

Trasduttori e sensori di misura

Vengono considerati i principi fisici di funzionamento e di costruzione dei trasduttori di misura di vari parametri fisici. L'attenzione principale è rivolta ai sensori a semiconduttore di temperatura, deformazione meccanica e campi magnetici. Vengono presi in considerazione alcuni aspetti del funzionamento di sensori di umidità, dispositivi di ionizzazione, vari fototrasduttori, misuratori di portata, livelli di riempimento, pressione, ecc.

Vengono presentati i risultati di uno studio delle caratteristiche dei sensori considerati e dell'influenza di varie influenze esterne su di essi.

Per ingegneri e tecnici coinvolti nello sviluppo e nell'uso di trasduttori e sensori di misura, ricercatori, laureati e studenti universitari.

Nikolay Gorbachuk Professore associato del Dipartimento di Fisica Applicata e Matematica Superiore dell'Università Nazionale di Tecnologia e Design di Kyiv, Ucraina.



Sensori, trasduttori, misure

Nikolay Gorbachuk



Trasduttori e sensori di misura

Monografia

Nikolay Gorbachuk

Nikolay Gorbachuk

Trasduttori e sensori di misura

FOR AUTHOR USE ONLY

Nikolay Gorbachuk

Trasduttori e sensori di misura

Monografia

FOR AUTHOR USE ONLY

ScienziaScripts

Imprint

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-7-47057-0.

Publisher:

Scientia Scripta

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

ISBN: 978-620-7-37642-1

Copyright © Nikolay Gorbachuk

Copyright © 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

INDICE DEI CONTENUTI

Introduzione	2
Capitolo 1. La temperatura. Trasduttori, misurazione	3
Capitolo 2. Grandezze meccaniche. Trasduttori, sensori, misure	37
Capitolo 3. Campi magnetici. Trasduttori, sensori, misure	92
Capitolo 4. Umidità, gas. Metodi di misurazione dell'umidità. Igrometro	113
Capitolo 5. La luce. Trasduttori, fotocellule	117
Capitolo 6. Trasduttori di ionizzazione. Sensori	137
Appendice	147

FOR AUTHOR USE ONLY

Introduzione

È difficile immaginare le tecniche e le tecnologie moderne senza vari tipi di trasduttori di misura, sensori, trasduttori, elementi di rilevamento. Molti lavori sono dedicati allo sviluppo di tali dispositivi, i principi e i metodi di misurazione, la progettazione di trasduttori e sensori vengono costantemente migliorati.

I trasduttori di misura comprendono dispositivi che convertono la variazione di una grandezza in una variazione di un'altra grandezza. Di norma, un trasduttore di questo tipo converte una grandezza fisica non elettrica, detta grandezza fisica misurata, in un segnale elettrico. I trasduttori di misura sono utilizzati nei sistemi elettronici che visualizzano il risultato di misurazioni o osservazioni. I principali generatori di segnali elettrici relativi a una grandezza fisica non elettrica sono i sensori (trasduttori, elementi sensibili).

La monografia presenta i risultati dello sviluppo di vari trasduttori e sensori di misura. Vengono descritti i metodi e i mezzi di misurazione dell'autore e di altri noti in letteratura. L'attenzione è rivolta ai mezzi di misurazione della temperatura in un'ampia gamma di temperature - da quella criogenica a quella ambiente e alle temperature di fusione di alcuni materiali solidi. Vengono presi in considerazione i metodi di misurazione dei parametri meccanici - deformazioni, pressioni, spostamenti, velocità di flusso, ecc., la misurazione dei campi magnetici con vari mezzi, i parametri dei gas - umidità, ecc.

Capitolo 1. La temperatura. Trasduttori, misurazioni

Esiste un'ampia varietà di metodi e mezzi per misurare la temperatura. Per creare un sensore di temperatura (termometro), si possono utilizzare tutte le proprietà di sostanze solide, liquide o gassose che dipendono dalla temperatura. Ad esempio, stati fisici e chimici, dimensioni, caratteristiche elettriche, ecc. Allo stesso tempo, i termometri (sensori) che utilizzano un numero abbastanza limitato di proprietà elettrofisiche dei materiali e di metodi di misurazione hanno trovato ampia applicazione pratica.

1.1. Termometri meccanici a contatto

Tali termometri si basano sull'espansione termica delle sostanze. Sono caratterizzati da un basso costo e da una precisione soddisfacente. Sono destinati principalmente all'uso pratico quotidiano e al lavoro di laboratorio.

In un termometro a contatto, l'elemento sensibile può essere un'asta metallica il cui allungamento dipende dalla temperatura (termometri dilatometrici):

$$l = l_0 (1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

dove l_0 - lunghezza a 0 °C, α - coefficiente di espansione termica, t - temperatura °C.

Ancora più spesso si utilizza la differenza di espansione termica di due metalli dissimili: i termometri bimetallici. Questi termometri possono essere realizzati in piccole dimensioni, sono facili da produrre e hanno un costo contenuto.

I termometri a liquido in vetro sono ampiamente utilizzati. La parte principale del liquido è concentrata in un serbatoio volumetrico, che è praticamente un sensore (elemento sensibile). Per il riempimento si può utilizzare qualsiasi liquido, a seconda delle condizioni operative. Il più delle volte vengono utilizzati mercurio e alcol. Questi termometri non sono molto precisi, ma sono i più diffusi nelle case e nei laboratori. Nell'industria, vengono gradualmente sostituiti da termometri che consentono di automatizzare la produzione.

I termometri meccanici a contatto hanno un grosso svantaggio: le loro informazioni (segnale) non possono essere trasmesse a distanza per l'elaborazione. Per questo motivo, nell'industria si utilizzano termometri che sfruttano le variazioni elettriche delle proprietà di una sostanza al variare della temperatura.

1.2. Termometri basati sull'effetto termoresistivo

La resistenza elettrica della maggior parte delle sostanze cambia in modo significativo con la temperatura. Questa dipendenza viene utilizzata per creare termometri - termoresistori. Un termistore è un dispositivo costituito da un conduttore di corrente la cui resistenza elettrica dipende dalla temperatura e al quale sono collegati dei cavi elettrici.

La dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica dei metalli è dovuta alla dipendenza della mobilità dei portatori di corrente (elettroni), mentre nei semiconduttori il ruolo principale è svolto dalla dipendenza dalla temperatura della concentrazione dei portatori di corrente.

Il campo di misura dei termometri è limitato principalmente dalle alte temperature, che influenzano la linearità della caratteristica del sensore, nonché dalle proprietà meccaniche del materiale dell'elemento sensibile e dell'alloggiamento del sensore.

La dipendenza dalla temperatura della resistenza dei metalli può essere espressa come:

$$R = R_0 (1 + \gamma t) \quad (1.2),$$

dove R_0 - resistenza a 0 °C, γ - coefficiente di temperatura della resistenza, t - temperatura in °C.

Come materiali per l'elemento sensibile del termometro a termistore vengono utilizzati: platino, nichel, rame e altri. Gli elementi sensibili dei termometri a base metallica sono fili molto sottili avvolti su un telaio o su una pellicola depositata su un substrato isolante.

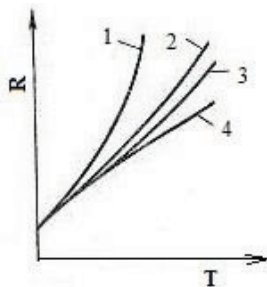


Fig. 1.1. Dipendenze caratteristiche della resistenza R di alcuni metalli dalla temperatura T : 1 - nichel, 2 - tungsteno, 3 - rame, 4 - platino

Le dipendenze tipiche della resistenza di alcuni metalli dalla temperatura sono mostrate nella Fig. 1.1. Esse indicano la possibilità di

ottenere un elevato grado di linearità della relazione tra resistenza e temperatura. Esse indicano la possibilità di ottenere un elevato grado di linearità della relazione tra resistenza e temperatura.

1.3. Termometri a resistenza a semiconduttore

Si tratta di sensori di temperatura (termistori) che sfruttano la dipendenza della resistenza elettrica di un semiconduttore dalla temperatura. Questa dipendenza può essere espressa come:

$$R=R_o \cdot e^{B/T} \quad (1.3),$$

dove R_o è la resistenza alla temperatura T tendente all'infinito, B è il coefficiente che determina la sensibilità t_o temperatura.

La dipendenza esponenziale mostra una forte non linearità della caratteristica di tale termometro e questo è uno dei principali svantaggi di tale sensore. D'altra parte, questi termometri sono i più sensibili alle variazioni di temperatura. Alle temperature dell'elio liquido la loro sensibilità può raggiungere il 100-200 %/K. Inoltre, l'elevata resistenza (fino a 1 megaohm) permette di trascurare le interferenze nei punti di connessione dei fili del circuito elettrico. Per la produzione di questi termometri si utilizzano semiconduttori come il silicio, il germanio, l'arseniuro di gallio, ecc. e ossidi metallici.

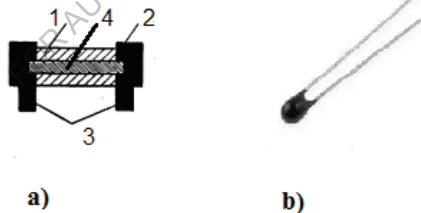


Fig. 1.2. a) - uno dei modelli tipici di termometro a semiconduttore - termistore. 1 - vetro, 2 - acciaio, 3 - argento, 4 - elemento sensibile, b) - campione di termistore miniaturizzato a semiconduttore.

I termometri a semiconduttore possono essere di vario tipo. Con l'aiuto della tecnologia microelettronica, l'elemento sensibile del termistore può essere reso micro-miniaturizzato. La Figura 1.2 mostra alcuni modelli di termometri a semiconduttore.

I termistori a semiconduttore sono ampiamente utilizzati. Un semiconduttore sotto forma di pellicola su un substrato isolante o in un

design sfuso funge da conduttore di corrente elettrica. Le dimensioni totali dei termistori possono essere inferiori a 1 mm³, la resistenza elettrica da alcuni Ohm a 100 kOhm, le correnti di alimentazione, di norma, da 10 a 100 μ A, la sensibilità dal 3%/K nell'area della temperatura ambiente al 100%/K nell'area delle temperature criogeniche, l'inerzia può raggiungere alcune decine di millisecondi o meno.

I termistori a semiconduttore sono ampiamente utilizzati per misurare e controllare la temperatura in un ampio intervallo, ma, di norma, non al di sopra dei 200 °C, poiché ad alta temperatura la conduttività intrinseca e la dipendenza dalla temperatura della resistenza calano bruscamente, diventano non monotoniche e non stabili. In un ampio intervallo di temperature, la dipendenza dalla temperatura della resistenza del semiconduttore $R(T)$ ha un carattere complesso e dipende dal tipo di impurità di drogaggio e dal livello di drogaggio. Pertanto, è impossibile esprimere la dipendenza di $R(T)$ con una formula semplice che consenta di eseguire la calibrazione con elevata precisione. Di norma, l'intero intervallo di temperatura viene suddiviso in sezioni separate, in cui la dipendenza $R(T)$ è descritta dalla sua formula di interpolazione.

Il gruppo di trasduttori a semiconduttore sensibili alla temperatura utilizzati nei termometri viene spesso chiamato termistori. Hanno una caratteristica altamente non lineare, ma possono essere efficacemente utilizzati nei sistemi di misurazione della temperatura.

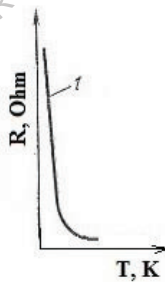


Fig. 1.3. Dipendenza dalla temperatura della resistenza di un tipico termistore.

Una caratteristica tipica di un termistore è mostrata nella fig. 1.3. Confrontando le caratteristiche dei trasduttori resistivi metallici con quelle di un termistore si può concludere che quest'ultimo:

1) sono più ripide, cioè il loro coefficiente di resistenza alla temperatura è significativamente maggiore di quello dei metalli, almeno nella parte principale della curva;

2) diminuiscono con l'aumentare della temperatura, cioè il loro coefficiente di resistenza alla temperatura è negativo.

I termistori con un coefficiente di resistenza di temperatura negativo sono meglio conosciuti come termistori NTC. Va notato che esistono anche termistori con un coefficiente di resistenza positivo, denominati termistori PTC. Questi ultimi sono più spesso utilizzati non per la misurazione della temperatura ma, ad esempio, per prevenire il surriscaldamento.

I termistori hanno dimensioni notevolmente inferiori rispetto ai trasduttori resistivi metallici e quindi reagiscono più rapidamente alle variazioni di temperatura. D'altra parte, le dimensioni ridotte dei termistori implicano che per l'auto-riscaldamento è necessaria una piccola corrente. Di conseguenza, si può ritenere che la corrente influisca sull'accuratezza della misura.

La metodologia di calibrazione di un termistore a semiconduttore può essere esaminata con il seguente esempio. Ad esempio, nella regione della temperatura ambiente, la dipendenza di $R(T)$ per i termistori a semiconduttore può essere espressa dalla formula (1.3).

Per la calibrazione dei termistori (ottenendo tabelle di dipendenza della resistenza elettrica dalla temperatura), trasformiamo la formula (1.3):

$$\ln R = \ln R_0 + B(1/T) \quad (1.4)$$

L'espressione ottenuta (1.4) è l'equazione di una retta in coordinate $1/T$ e $\ln R$. $\ln R_0$ è il valore del logaritmo della resistenza quando T tende all'infinito. Il coefficiente B è pari alla tangente dell'angolo α della pendenza della retta rispetto all'asse $1/T$. Se a due temperature fisse T_1 e T_2 misuriamo le resistenze del termistore R_1 e R_2 rispettivamente, possiamo tracciare la dipendenza di $\ln R(1/T)$ dai due punti:

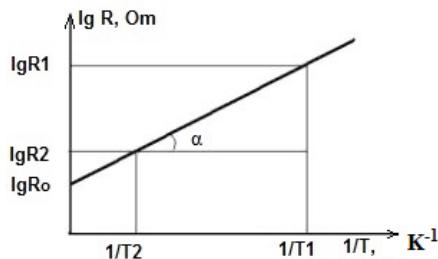


Fig. 1.4 Dipendenza dalla temperatura della resistenza R del termistore a semiconduttore

Utilizzando la formula (1.4) e il grafico ottenuto è possibile trovare per qualsiasi valore di R nell'intervallo compreso tra R_1 e R_2 il valore di temperatura corrispondente - per realizzare tabelle di taratura.

Per misurazioni accurate della temperatura, la calibrazione dei termistori viene eseguita in laboratori specializzati con l'uso di misure di alta precisione e formule approssimative per l'intervallo di temperatura richiesto, elaborazione dei dati al computer, ecc. In un ampio intervallo di temperatura, la dipendenza dalla temperatura della resistenza dei termistori a semiconduttore ha un carattere piuttosto complesso.

Le termoresistenze sono utilizzate nei dispositivi per la misurazione, il controllo e la regolazione automatica della temperatura. In esse, oltre all'elemento sensibile, sono presenti una sorgente di corrente e un circuito di misura. Il circuito di misura, ad esempio, di un ponte in corrente continua bilanciato è mostrato nella figura 1.5.

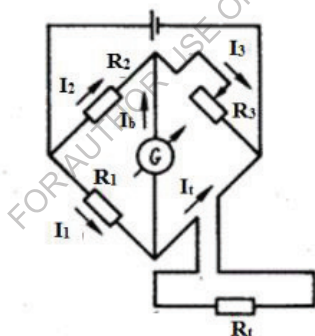


Fig. 1.5. Schema del ponte DC bilanciato

Muovendo il cursore del reostato R_3 , si porta il ponte allo stato di equilibrio, in cui il galvanometro G fissa l'assenza di corrente nella diagonale del ponte ($I_t = 0$). Pertanto, il valore di R_3 è proporzionale alla resistenza misurata R_t , che dipende dalla temperatura. L'equilibrio del ponte può essere realizzato automaticamente. A tale scopo, ad esempio, la resistenza del resistore cambia sotto l'influenza della freccia di zero del galvanometro G .

Oltre ai ponti di misura bilanciati, vengono utilizzati anche ponti sbilanciati, caratterizzati da una maggiore affidabilità ma da una minore precisione a causa dell'influenza delle fluttuazioni di tensione della sorgente.

1.4. Esempi di alcuni termistori industriali

Ad esempio, possiamo considerare i noti termistori industriali delle serie MMT e KMT. I termistori del tipo MMT-1 e KMT-1 sono costituiti da una barra di semiconduttore ricoperta di vernice smaltata, con cappucci di contatto e conduttori. Questi termistori possono essere utilizzati solo in ambienti asciutti. I termistori dei tipi MMT-4 e KMT-4 sono montati in un contenitore metallico e sigillati. Possono essere utilizzati in qualsiasi umidità e in qualsiasi ambiente che non sia aggressivo per la custodia. La sigillatura viene effettuata con vetro e stagno. Il nucleo del termistore di tipo MMT-4 è avvolto da una lamina metallica. Il dissipatore di corrente è costituito da un filo di nichel. Questi termistori sono prodotti per valori di resistenza nominale da 1 a 200 kOhm (a 20°C) e possono essere utilizzati per il funzionamento nell'intervallo di temperatura da -100 a 129°C.

Anche i metalli puri sono utilizzati come materiali per le termoresistenze: ad esempio, il platino sotto forma di filo sottile con un diametro di 0,05-0,07 mm per misurare temperature fino a 630°C. Rame, nichel o ferro per la misurazione di temperature di 100-150°C. Sono utilizzati sotto forma di filo con un diametro di 0,1 mm o sotto forma di pellicole dei rispettivi materiali.

Il materiale delle termometri a resistenza può essere avvolto nei seguenti modi:

- su una lastra di vetro
- su un tubo di vetro
- su una croce di mica o porcellana.

I metalli più utilizzati nella produzione di elementi sensibili dei termistori sono il platino, il nichel e il rame.

1.5. Termometri a resistenza in platino

Questi trasduttori utilizzano la variazione di resistenza di un filo o di una pellicola di platino per determinare la temperatura. Sono anche chiamati rilevatori di temperatura resistivi. Non è detto che altri metalli non possano essere utilizzati per misurare la temperatura, ma gli elementi sensibili in platino sono i più utilizzati in questi trasduttori.

La sensibilità di questi rilevatori di temperatura resistivi è piuttosto bassa e la risposta dinamica è piuttosto lenta (a causa del design del dispositivo). Sono inoltre piuttosto suscettibili di essere distrutti da vibrazioni e urti.

Esistono due tipi fondamentali di trasduttori resistivi a filo di platino: la sonda immersa e l'elemento sensibile montato in superficie. Gli elementi a filo sono solitamente montati su una base di ceramica con una tensione minima e sono solitamente rivestiti con un materiale protettivo per evitare che siano esposti all'ambiente.

La struttura di una tipica sonda a filo di platino è illustrata nella fig. 1.6(a), mentre l'elemento di rilevamento della temperatura montato in superficie nella fig. 1.6(b). I trasduttori con elementi di rilevamento a film (fig. 1.6,c), che utilizzano una lamina metallica su un substrato isolante, non sono così comuni come le sonde a filo, anche se il loro uso è in continua espansione grazie alle loro dimensioni ridotte, alla migliore risposta dinamica, alla maggiore sensibilità e al costo relativamente basso.

I trasduttori resistivi al platino sono solitamente inclusi in uno dei bracci di un ponte di Wheatstone, grazie al quale viene garantita un'elevata precisione di misura. Naturalmente, la bassa resistenza del dispositivo (circa 100 ohm) crea problemi quando lo si commuta con le apparecchiature di misura, poiché la resistenza dei fili che collegano il trasduttore al circuito di misura può essere commisurata alla resistenza del trasduttore.

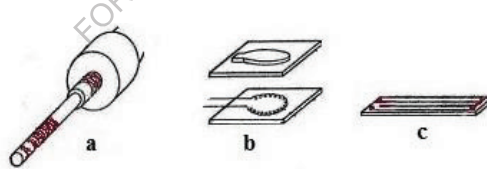


Fig. 1.6. Modelli di trasduttori resistivi a filo di platino: a - sonda a filo, b - trasduttore a filo montato sulla superficie dell'elemento sensibile, c - trasduttore a film sottile montato sulla superficie dell'elemento sensibile.

1.6. Riscaldamento proprio delle termoresistenze

Il riscaldamento intrinseco degli elementi di rilevamento della resistenza è inteso come un aumento della temperatura ΔT rispetto alla temperatura ambiente misurata, dovuto al rilascio di calore joule al loro interno durante il passaggio della corrente di misura. Questo eccesso di

temperatura costituisce un ulteriore errore di misura, che dipende non solo dalla corrente, ma soprattutto dalla quantità di calore che può essere dissipata nell'ambiente.

Il trasferimento di calore è determinato dal materiale e dalle dimensioni dell'elemento sensibile, nonché dalle condizioni e dalle proprietà termodinamiche dell'ambiente. I produttori di elementi di rilevamento termometrici di solito indicano per ogni tipo di elemento la massima caduta di corrente e tensione ammissibile attraverso di esso sotto forma di diagramma, ad esempio (fig. 1.7). L'elemento sensibile può essere utilizzato solo nel ramo ascendente sinistro della caratteristica, in modo che in determinate condizioni limite non si verifichino interferenze dovute al suo riscaldamento da parte della corrente di misura. Ad esempio, un elemento sensibile di platino (Pt 100) su un telaio di ceramica in un tubo metallico si riscalda di circa 0,01-0,02 K in acqua ferma e di 0,1 K in aria ferma quando viene attraversato da una corrente di 3 mA. La corrente massima non dovrebbe superare i 10 mA. Con i piccoli termistori NTC, la corrente massima consentita può essere di pochi microampere.

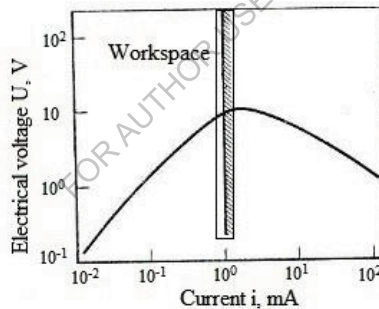


Fig. 1.7. Schema esemplificativo dei valori ammissibili della corrente che attraversa il termistore e della caduta di tensione su di esso

1.7. Termometri a resistenza a bassa temperatura (criogenici) - termistori. Misura della temperatura nella regione criogenica

Per la misurazione della temperatura nella regione criogenica si utilizzano sensori a semiconduttore e metallici - termometri a resistenza (termistori) e termocoppie con caratteristiche adeguate.

Molto spesso le misure a bassa temperatura devono essere effettuate in presenza di campi magnetici piuttosto forti. Pertanto, i termometri (sensori) a bassa temperatura, oltre a una buona sensibilità alla temperatura

e alla stabilità delle caratteristiche, devono avere una debole sensibilità all'influenza dei campi magnetici. Organizzazioni famose come VNIIFTRI (Russia), LakeShore (USA), Institute of Semiconductor Physics (Ucraina), ecc. sono impegnate nello sviluppo, nella ricerca e nella produzione di termistori criogenici (e di altri sensori per la gamma criogenica).

Tra le termoresistenze metalliche conosciute possiamo citare i termistori al platino, caratterizzati da elevate caratteristiche metrologiche. Tuttavia, ad esempio, il campo magnetico $B=2$ Tesla a una temperatura di 12 K provoca una crescita della resistenza equivalente a 5 K. Si ritiene possibile tenere conto dell'influenza del campo magnetico solo a temperature superiori a quella dell'azoto liquido (77 K).

I termistori rodio-ferro sono meno sensibili ai campi magnetici. A una temperatura di 4,2 K, un campo di 3 Tesla porta a un aumento della resistenza del 3% (equivalente a circa 0,5 K).

Tra i termistori a semiconduttore, quelli al germanio sono i più utilizzati. Hanno una buona stabilità a lungo termine, un'elevata sensibilità ($\cong 100 \text{ %/K}$ a 4,2 K) e possono fornire una precisione di circa 0,01 K. Le termoresistenze al germanio sono costituite da germanio sfuso, germanio disperso, film di germanio su substrati isolanti. Sono noti termistori al germanio che, grazie al basso valore di magnetoresistenza e a campi magnetici fino a 6 Tesla, forniscono un'accuratezza pari a 0,01 K.

Oltre al germanio, per i termistori criogenici vengono utilizzati anche altri materiali semiconduttori, come l'arseniuro di gallio. Tuttavia, si ritiene che le caratteristiche metrologiche di tali termometri, di norma, siano peggiori di quelle dei termometri al germanio.

Esistono anche sensori al carbonio - termometri a resistenza, spesso utilizzati per misurare le temperature nella regione criogenica in presenza di campi magnetici. Si tratta dei termometri Allen-Bradley, Spear, Mitsushita, TSU (produttore VNIIFTRI) e TVO. In letteratura è riportato che, ad esempio, i termometri TCU forniscono una riproducibilità di $\Delta T/T$ con un errore non superiore a 0,0002. In un campo magnetico di 6 Tesla a una temperatura di 4,2 K, il loro errore è pari a 0,35 K. I termometri TBO nel campo di 6 Tesla forniscono una precisione non peggiore di 0,12 K.

1.8. Termistori criogenici basati sul germanio disperso

Per migliorare le caratteristiche tecniche dei dispositivi microelettronici a semiconduttore e per creare le loro varietà, vengono

utilizzate sia nuove soluzioni progettuali che utilizzano materiali già noti, sia nuove tecnologie per ottenere materiali con promettenti proprietà elettrofisiche. Nella creazione di termometri, il cui funzionamento si basa sull'effetto termoresistivo, è di fondamentale importanza la stabilità della dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica del materiale utilizzato e la progettazione del convertitore termico, una sensibilità sufficiente, un errore minimo dovuto all'influenza di fattori esterni estranei. L'instabilità dei termistori a semiconduttore noti inizia a manifestarsi soprattutto a temperature criogeniche.

A temperature inferiori a 20 K, la mancanza di ripetibilità rende molte termometrie a resistenza inadatte a misure di precisione. La pratica dimostra che questi svantaggi sono meno presenti nei termometri al germanio. Tuttavia, il germanio puro non viene utilizzato in termometria perché a basse temperature presenta una resistenza molto elevata e una bassa sensibilità. Spesso le misure devono essere effettuate in condizioni di varie influenze esterne (presenza di campi magnetici, ecc.) che, influenzando la resistenza del germanio puro, possono portare a errori significativi. Attualmente, per ottenere proprietà elettrofisiche adeguate del germanio sfuso, si utilizzano vari metodi di drogaggio piuttosto costosi e laboriosi. Si utilizza anche il germanio in forma di film. In alcuni lavori sono stati studiati termistori criogenici basati su film di germanio su arseniuro di gallio semi-isolante. A 4,2 K possono avere una sensibilità di circa il 20%/K, alcuni sono resistenti all'irradiazione neutronica a 77 K a dosi dell'ordine di 10^{15} cm⁻².

Sono noti gli studi su campioni sperimentali di termistori basati su germanio disperso in massa, ottenuti mediante pressatura meccanica a diverse temperature e pressioni di polvere finemente dispersa di germanio monocristallino. Lo scopo dello studio era quello di creare termistori per l'intervallo di temperatura 4,2-300 K resistenti a influenze esterne estranee. Sono stati studiati la dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica nell'intervallo di temperatura sopra indicato, la magnetoresistenza a T=4,2 K e l'effetto dell'irradiazione neutronica sulla resistenza elettrica a temperatura ambiente.

Il germanio disperso è stato ottenuto da polvere di germanio monocristallino di conducibilità di tipo p con una resistività di 15 Ohm.cm. I campioni sono stati prodotti mediante esposizione a pressioni e temperature elevate. È emerso che la pressione e la temperatura a cui la polvere è stata pressata determinano le proprietà elettrofisiche del germanio disperso

ottenuto. Per la creazione di termoresistori per temperature criogeniche sono stati utilizzati i campioni più adatti. Il germanio disperso ottenuto ha una conducibilità di tipo *p*, con una resistenza specifica a temperatura ambiente $\rho = (1-4) \text{ Ohm.cm}$. Si può ipotizzare che i livelli di accettazione siano dovuti alle peculiarità della struttura cristallina del materiale ottenuto. È noto che il tipo di conducibilità può essere determinato da vari tipi di difetti strutturali. Le peculiarità della struttura del germanio disperso (in polvere) possono anche spiegare l'aumento della resistenza alle radiazioni di tale materiale. I campioni sperimentali di termistori avevano un elemento sensibile con dimensioni di circa 1 mm^3 (fig. 1.8).

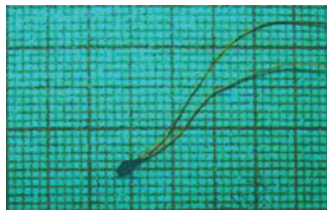


Fig. 1.8. Campione sperimentale di un termistore basato su germanio disperso

I risultati delle misurazioni della dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica sono presentati nella fig. 1.9. Qui viene mostrata la dipendenza dalla temperatura della resistenza del germanio monocristallino bulk di conducibilità di tipo *p* (curva 1) e dei termistori sperimentali di germanio disperso (curve 2,3).

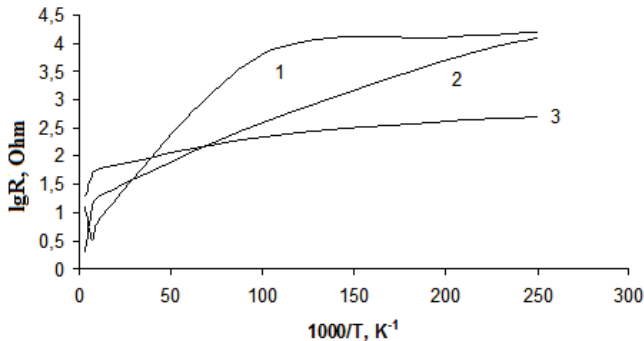


Fig. 1.9. Dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica: 1 - germanio monocristallino iniziale sfuso, 2 - termistore sulla base del germanio disperso di tipo A, 3 - termistore sulla base del germanio disperso di tipo B. I tipi

A e B differiscono principalmente per la temperatura e il valore di pressione nell'ottenere il germanio disperso.

La dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica dei termistori da germanio disperso (polvere) di tipo A (curva 2) a basse temperature è più ripida rispetto alla dipendenza del germanio monocristallino iniziale e nell'intero intervallo di temperatura ha un carattere più monotono. Il carattere regolare della dipendenza dalla temperatura della resistenza elettrica consente di approssimarla con formule matematiche abbastanza semplici e con buona precisione. Per un campione di tipo A, ad esempio, anche per l'intervallo di temperatura 77-300 K utilizzando un polinomio della forma:

$$\ln R = \sum_{i=0}^n A_i (\ln T) \quad (1.5),$$

(dove A_i - coefficienti costanti determinati dal metodo dei minimi quadrati, n - determinati dalla condizione di minimo errore di approssimazione) già per $n=3$ si ottiene la dipendenza:

$$\ln R = 15,1077031 + 1,6552736 * \ln T - 1,7901811 * (\ln T)^2 + 0,193233 * (\ln T)^3$$

con un coefficiente di correlazione $r^2 = 0,9995$ e un errore di circa 0,1 K nella regione dei 77K.

La sensibilità dei termistori di tipo A nella regione di temperatura dell'elio liquido (4,2 K) raggiunge valori superiori al 100%/K. La sensibilità dei termistori realizzati in materiale di tipo B è di circa il 20%/K e a 4,2 K presentano una resistenza elettrica di norma non superiore a 500 Ohm.

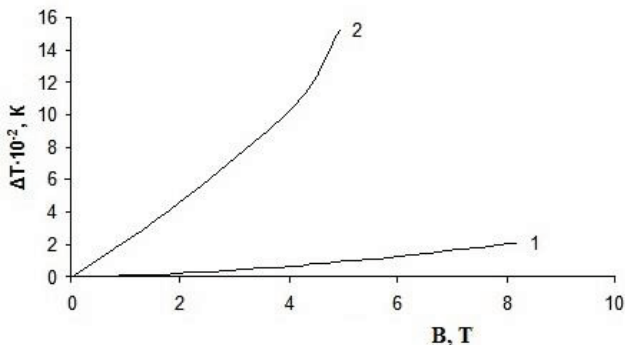


Fig. 1.10. Dipendenza dell'errore di misurazione della temperatura ΔT nella regione di 4,2 K dal valore del campo magnetico B per termistori di tipo A (curva 1) e di tipo B (curva 2).

La Fig. 1.10 mostra la dipendenza dell'errore ΔT della misurazione della temperatura nella regione dell'elio liquido in presenza di campi magnetici dalla grandezza del campo magnetico. L'errore dei termistori in materiale di tipo A (curva 1) in un campo di 8 T è di circa 0,02 K, mentre quello dei termistori di tipo B in un campo di 4 T raggiunge 0,15 K. Va notato che la magnetoresistenza $\Delta R/R$ (dove ΔR è la variazione di resistenza sotto l'influenza del campo magnetico, R è la resistenza iniziale) in entrambi i tipi di termistori è approssimativamente la stessa. Ad esempio, in un campo di 4 T, la magnetoresistenza di entrambi è compresa tra (2,5 e 3,0) %. Tuttavia, l'accuratezza della misura nei campi magnetici dei termistori di tipo A è maggiore a causa della maggiore sensibilità alla temperatura.

Per eliminare gli errori indotti dal campo magnetico, è stata utilizzata una configurazione speciale. Lo schema è presentato in fig. 1.11. I fili di misura sono fissati alla testa di rilevamento in modo che i contatti elettrici si trovino alla distanza

$$l = aR_H / \rho M, (1.6)$$

dove a è la larghezza della piastra; R_H , è la costante di Hall; ρ è la resistività; $M = \Delta\rho/\rho B$ è la magnetoresistenza al campo B .

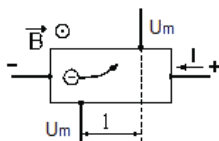


Fig. 1.11. Sensore di temperatura a compensazione di campo: U_m - la tensione misurata; l - la distanza tra i contatti.

Di conseguenza, le tensioni generate sui contatti a causa dell'effetto Hall e della magnetoresistenza vengono compensate reciprocamente, in modo da ridurre al minimo l'effetto del campo sulla precisione della misura.

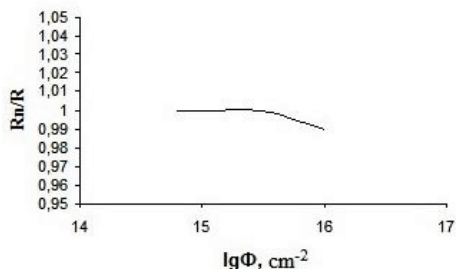


Fig. 1.12. Dipendenza della variazione relativa della resistenza elettrica di un termistore (tipo A) dopo l'irradiazione neutronica dal valore del flusso di neutroni Φ . R - resistenza iniziale, R_n - resistenza dopo l'irraggiamento.

È stata studiata l'influenza dell'irraggiamento sulle caratteristiche dei termistori basati sul germanio disperso. La Fig.1.12 mostra la dipendenza della resistenza dei termistori di tipo A dall'esposizione alle radiazioni. L'effetto delle radiazioni sul valore della resistenza è stato finora studiato in modo valutativo e solo a temperatura ambiente. Le caratteristiche sono state misurate alla temperatura di 300 K prima dell'irradiazione e dopo l'irradiazione con flussi di neutroni Φ da $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ a $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. La temperatura durante le misure è stata stabilizzata con un'accuratezza di 0,1 K. L'energia dei neutroni era di 1 MeV e l'intensità del flusso era di $(2-4) \cdot 10^8$ fl/s. La figura mostra che la resistenza elettrica dei termistori inizia a cambiare sensibilmente quando ci si avvicina a livelli di irradiazione neutronica di 10^{16} cm^{-2} .

1.9. Termiodiodi e termotransistori

I termiodiodi e i termotransistor sono utilizzati nei sensori di temperatura che operano nell'intervallo compreso tra -80 e $+150$ °C. Il limite superiore dell'intervallo di temperatura è limitato dalla rottura termica della giunzione $p-n$ e per alcuni tipi di sensori al germanio raggiunge i 200 °C, mentre per i sensori al silicio arriva fino a 500 °C. Il limite inferiore dell'intervallo di temperatura dei termiodiodi e dei termotransistori è determinato dalla diminuzione della concentrazione dei portatori principali e può raggiungere per i sensori al germanio $-(240-260)$ °C, per i sensori al silicio -200 °C.

I principali vantaggi dei termodiodi e dei termotransistor sono le dimensioni ridotte, l'intercambiabilità e, soprattutto, l'economicità, che ne consente l'impiego in sensori monouso.

La relazione tra la corrente I che attraversa una giunzione p-n (diodo o transistor) e la caduta di tensione U che la attraversa è definita da una certa equazione. Questa equazione definisce la corrente che attraversa la giunzione, sia in caso di polarizzazione in avanti che inversa della giunzione. Dalle equazioni e dalle formule conosciute si evince che sia la corrente in avanti che quella inversa di una giunzione p-n sono funzioni della temperatura. Le giunzioni p-n aperte sono utilizzate soprattutto per la misurazione della temperatura. La teoria mostra che la caduta di tensione attraverso una giunzione p-n aperta in presenza di una corrente I che attraversa la giunzione è determinata da una formula approssimativa, dalla quale si evince che la caduta di tensione dipende linearmente dalla temperatura e diminuisce con l'aumentare della temperatura. La sensibilità alla temperatura della giunzione p-n in termini di tensione è $\approx 1,5$ mV/K. Confrontando i coefficienti di sensibilità alla temperatura per la caduta di tensione attraverso la giunzione p-n e la termo-EMF delle termocoppie che operano nello stesso intervallo di temperatura (ad esempio, chromel - copel), si può affermare che la sensibilità della giunzione p-n è circa 100 volte superiore a quella delle termocoppie.

1.10. Trasduttori termoelettrici (termocoppie). Principio di funzionamento, schemi di accensione e utilizzo della termocoppia.

Il principio di funzionamento di una termocoppia si basa sull'effetto termoelettrico, che consiste nel fatto che in un circuito chiuso costituito da due conduttori dissimili, si verifica una CEM termica (tensione) se i punti di giunzione dei conduttori hanno temperature diverse. Se prendiamo un circuito chiuso (vedi fig. 1.13) costituito da conduttori dissimili (termoelettrodi), allora sulle loro giunzioni appariranno CEM termici $E(t)$ ed $E(t_0)$, che dipendono dalle temperature di queste giunzioni t e t_0 . Poiché i termoelettrodi considerati sono inclusi in una contromisura, il CEM termoelettrico risultante che agisce nel circuito sarà definito come $E(t) - E(t_0)$.

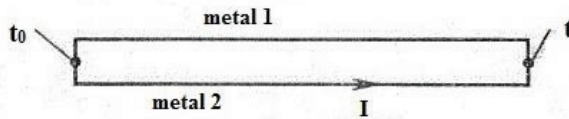


Fig. 1.13. Schema di un circuito chiuso di due conduttori

In caso di uguale temperatura di entrambe le giunzioni, l'EMF termico risultante sarà pari a zero. In pratica, una delle giunzioni della termocoppia viene immersa in un termostato (di norma, ghiaccio fondente) e la differenza di temperatura e la temperatura dell'altra giunzione vengono determinate rispetto ad essa. La giunzione immersa nel mezzo controllato (indagato) è chiamata estremità di lavoro della termocoppia, mentre la seconda giunzione (nel termostato) è chiamata estremità libera.

In qualsiasi coppia di conduttori omogenei, l'entità dell'EMF termoelettrico risultante non dipende dalla distribuzione della temperatura lungo i conduttori, ma dipende solo dalla natura dei conduttori e dalla temperatura della giunzione. Se un circuito termoelettrico viene scollegato in un punto qualsiasi e vi si inseriscono conduttori dissimili, allora, a condizione che tutti i punti di giunzione risultanti siano alla stessa temperatura, l'EMF termico risultante nel circuito non cambierà. Questo fenomeno viene utilizzato per misurare l'EMF termico di una termocoppia. L'EMF risultante nelle termocoppie è piccolo: è inferiore a 8 mV per ogni 100 °C e, di norma, non supera i 70 mV in valore assoluto.

Le termocoppie possono essere impiegate per misurare temperature comprese tra -270 e 2200 °C. Per misurare temperature fino a 1100 °C, si utilizzano termocoppie in metalli comuni; per misurare temperature tra 1100 e 1600 °C, si utilizzano termocoppie in metalli nobili e leghe del gruppo del platino. Per misurare temperature ancora più elevate, si utilizzano termocoppie in leghe di tungsteno resistenti al calore.

Attualmente, per le termocoppie si utilizzano soprattutto platino, platino-rodio, cromo e allumina.

Quando si misura la temperatura in un ampio intervallo, è necessario tenere conto della non linearità della funzione di conversione della termocoppia. Ad esempio, la funzione di conversione delle termocoppie rame-costantina per l'intervallo di temperatura da -200 a 300 °C con un errore di circa $\pm 2 \mu\text{V}$ è descritta dalla formula

$$E = At^2 + Bt + C \quad (1.7),$$

dove A , B e C sono costanti determinate misurando l'EMF termico a tre temperature, t è la temperatura di lavoro della giunzione in °C.

La costante di tempo (inerzia) dei convertitori termoelettrici dipende dal design della termocoppia, dalla qualità del contatto termico tra la giunzione di lavoro della termocoppia e l'oggetto da studiare. Per le termocoppie industriali la costante di tempo è di alcuni minuti. Tuttavia, esistono anche termocoppie a bassa inerzia, la cui costante di tempo è compresa tra 5 e 20 secondi e anche inferiore.

Lo strumento di misura è collegato al circuito della termocoppia all'estremità libera della termocoppia e a uno dei termoelettrodi.

Come già detto, l'estremità libera della termocoppia deve trovarsi a temperatura costante durante la misurazione della temperatura. Se la lunghezza della termocoppia stessa è insufficiente, per portare questa estremità in una zona a temperatura costante, si utilizzano fili costituiti da due anime di materiali (metalli) con le stesse proprietà termoelettriche degli elettrodi del termometro.

Per le termocoppie in metalli comuni, i fili di estensione sono spesso realizzati con gli stessi materiali dei termoelettrodi principali. Per le termocoppie in metalli nobili, i fili di prolunga sono costituiti da altri materiali (non costosi) che sviluppano lo stesso campo elettromagnetico termico degli elettrodi della termocoppia nell'intervallo di temperatura 0 - 150 °C. Ad esempio, per le termocoppie in platino - platino-rodio, i termoelettrodi di estensione sono realizzati in rame e in una lega speciale. Questi metalli formano una termocoppia identica a quella in platino-platino-rodio nell'intervallo di temperatura 0 - 150 °C. Per le termocoppie chromel-alumel i termoelettrodi di estensione sono realizzati in rame e costantana, mentre per le termocoppie chromel-copel i termoelettrodi di estensione possono essere i termoelettrodi principali realizzati sotto forma di fili flessibili. Se le termoelettrodi di estensione sono collegate in modo errato, si può verificare un errore significativo.

In condizioni di laboratorio, la temperatura dell'estremità libera della termocoppia viene mantenuta a 0 °C collocandola in un recipiente Dewar riempito di ghiaccio tritato e acqua. In condizioni industriali, la temperatura dell'estremità libera della termocoppia è solitamente diversa da 0 °C e pari alla temperatura ambiente (temperatura ambiente). Poiché le termocoppie sono calibrate a una temperatura dell'estremità libera di 0 °C e le tabelle di calibrazione sono fornite rispetto a 0 °C, questa differenza può essere fonte

di errori significativi. Per ridurre questo errore, di norma, si introduce una correzione nelle letture del termometro (termocoppia). Quando si seleziona la correzione, vengono presi in considerazione sia la temperatura delle estremità libere della termocoppia sia il valore della temperatura misurata (ciò è dovuto al fatto che la funzione di conversione della termocoppia non è lineare); questo rende difficile correggere accuratamente l'errore.

Per eliminare l'errore, è molto diffusa la correzione automatica della temperatura delle estremità libere della termocoppia. A tale scopo, nel circuito della termocoppia e del millivoltmetro viene inserito un ponte, un braccio del quale è costituito da un termistore di rame, mentre gli altri bracci sono formati da termistori al manganese. Alla temperatura delle estremità libere della termocoppia, pari a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, il ponte è in equilibrio; quando la temperatura delle estremità libere della termocoppia si discosta da $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la tensione all'uscita del ponte non è uguale a zero e si aggiunge al campo elettromagnetico termico della termocoppia, apportando così una correzione nelle letture del dispositivo (il valore della correzione può essere regolato da un apposito resistore). A causa della non linearità della funzione di conversione della termocoppia, non è possibile ottenere una compensazione completa dell'errore, ma l'errore viene ridotto in modo significativo.

A seconda dell'accuratezza richiesta nella pratica, quando si utilizza una termocoppia, si utilizzano spesso i seguenti schemi di collegamento (vedere fig. 1.14). Ad esempio, si utilizza la termocoppia rame (M) - costantana (K):

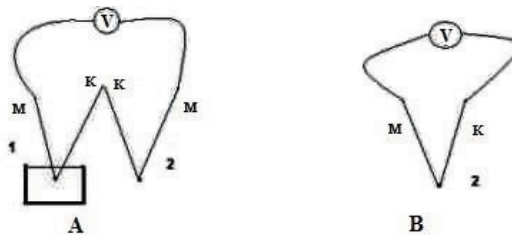


Fig. 1.14. Schemi di collegamento delle termocoppie.

A) circuito differenziale. B) in questo schema, la temperatura dell'estremità libera può essere considerata uguale alla temperatura ambiente (temperatura nei punti di connessione del dispositivo di misura alla termocoppia).

Nello schema di connessione differenziale (fig. 1.14.A), l'estremità libera 1 è a temperatura costante (ghiaccio fondente, 0°C). La formazione di

campi elettromagnetici termici è dovuta alla differenza di temperatura tra la giunzione di lavoro 2 e quella libera 1. Nello schema di connessione mostrato in fig. 1.14.B, la temperatura dell'estremità libera può essere considerata uguale alla temperatura ambiente (temperatura nei punti di connessione del dispositivo di misura alla termocoppia) e la temperatura nell'area della giunzione di lavoro 2 viene calcolata (corretta) rispetto ad essa. In questo caso, l'EMF termico nella termocoppia si forma a causa della differenza di temperatura tra la giunzione di lavoro e la temperatura ambiente.

Per misurare l'EMF termico, si utilizzano voltmetri con ingresso ad alta impedenza o altri tipi di galvanometri. Per determinare la temperatura si utilizzano le tabelle di calibrazione (vedere APPENDICE), costruite per la condizione che l'estremità libera della termocoppia sia a zero gradi Celsius. Alcune tabelle di calibrazione, ad esempio per le termocoppie in cromo-allumina, ecc. sono presentate nelle tabelle alla fine della monografia.

1.11. Produzione di termocoppie

Per le misure e le ricerche in condizioni di laboratorio (domestiche), le termocoppie possono essere realizzate in modo indipendente. A tale scopo, si utilizzano fili prodotti industrialmente con materiali adatti alla produzione di termocoppie. Il diametro del filo è importante quando si misurano processi termici in piccoli volumi (indagine su piccoli oggetti). Quanto più piccolo è il diametro del filo della termocoppia, tanto minore è l'errore nella determinazione della temperatura e dei parametri dei processi termici, poiché l'influenza della termocoppia stessa sullo scambio termico è ridotta. Il materiale della termocoppia viene scelto in base all'intervallo di temperature operative previsto, alla sensibilità richiesta, alla presenza di apparecchiature secondarie, ecc. Le termocoppie più utilizzate sono quelle in cromo-allumina, rame-costantana, ecc.

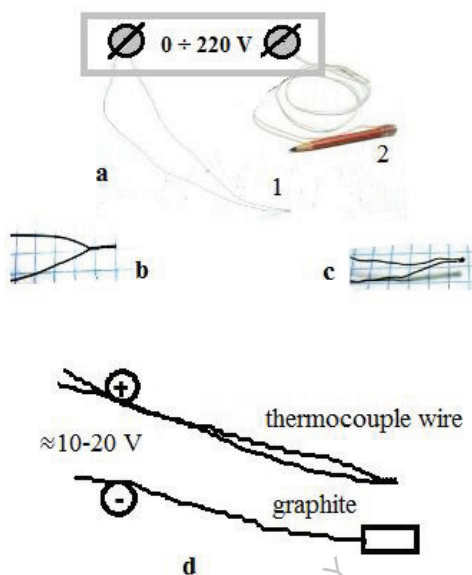


Fig. 1.15. Saldatura di termocoppie: a - uso del trasformatore da laboratorio, 1 - fili di termocoppia collegati, 2 - grafite (matita), b - fili precollegati, c - connessione saldata, d - schema generale di connessione durante la saldatura.

La realizzazione di una termocoppia consiste nel creare un forte collegamento (saldatura, fig. 1.15) di due materiali (fili). A tale scopo, è possibile utilizzare una sorgente di tensione di potenza sufficiente (ad esempio, LATR - autotrasformatore da laboratorio (a), batteria di automobile). Una termocoppia (entrambe le estremità libere) è collegata a un polo della sorgente di tensione - fig. 1.15.a (1), d con fili premeccanicamente collegati - fig. 1.15.b, e un piombo collegato a un pezzo di grafite (ad esempio una matita fig. 1.15.a (2)) è collegato all'altro polo.

Quando le estremità collegate della termocoppia toccano la grafite, si genera un arco elettrico di potenza sufficiente e i fili della termocoppia si saldano. La tensione necessaria per la saldatura viene selezionata sperimentalmente, iniziando con tensioni ridotte di 3-5 V.

La tensione ottimale per la saldatura dipende dal materiale della termocoppia, dal diametro e dalla lunghezza e, di norma, non supera i 30-40V. Durante il lavoro, è necessario rispettare le precauzioni di sicurezza: non utilizzare tensioni troppo elevate, non toccare parti scoperte del circuito

elettrico. Per comodità, una piccola sezione dei fili della termocoppia può essere coperta (isolata) con nastro isolante, tubo di ceramica, ecc.

Un collegamento sufficientemente buono può essere ottenuto anche riscaldando i fili delle termocoppie mediante una scarica ad arco acceso tra essi e una forte soluzione acquosa di sale da cucina.

1.12. Graduazione della termocoppia

La graduazione di una termocoppia consiste nello stabilire la dipendenza della forza termoelettromotrice dalla differenza di temperatura tra i fili di giunzione della termocoppia. Questo viene fatto, di norma, per non utilizzare in futuro tabelle di calibrazione standard, ecc. La graduazione può essere effettuata, ad esempio, come segue.

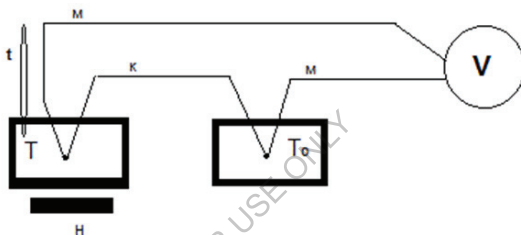


Fig. 1.16. Schema dei collegamenti per la calibrazione della termocoppia

Una semplice configurazione sperimentale, da cui si evince l'essenza della tecnica di graduazione, è mostrata nella figura 1.16. Una giunzione (funzionante) della termocoppia (per esempio, rame (m) - costantana (k)) è immersa in un recipiente con olio (con temperatura T), l'altra libera - in un recipiente con ghiaccio $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poiché le tabelle di calibrazione presenti in letteratura sono fornite rispetto a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, è meglio attenersi a questa condizione, perché in futuro sarà facile confrontare i risultati sperimentali ottenuti con quelli tabellari. Inoltre, la fusione del ghiaccio consente di fissare in modo semplice e preciso una delle temperature rispetto alle quali viene eseguita la calibrazione e, successivamente, le misure con questa termocoppia. Un recipiente con olio viene riscaldato da un riscaldatore elettrico H e la temperatura T viene misurata con un termometro t della precisione richiesta. Il campo elettromagnetico termico risultante dal riscaldamento della giunzione della termocoppia viene misurato con un potenziometro in corrente continua V. Fare una tabella o tracciare il grafico della dipendenza del campo elettromagnetico dalla temperatura T .

Se non è richiesta un'elevata precisione di graduazione e misurazione, è possibile graduare rispetto alla temperatura ambiente. In questo caso, la giunzione libera può essere posta in olio a temperatura ambiente (T_0 , circa 20 °C).

1.13. Leghe per termocoppie

Per la fabbricazione delle termocoppie si utilizzano principalmente leghe a base di metalli, anche se esistono materiali con valori di emf termica molto superiori a quelli dei metalli. I semiconduttori possono essere indicati come materiali di questo tipo. Tuttavia, è molto difficile produrre termocoppie da semiconduttori e, a causa delle loro caratteristiche tecniche e di progettazione, tali termocoppie non sono molto utilizzate.

Le leghe più comunemente utilizzate per le termocoppie sono:

- 1) copel (56% Cu e 44% Ni);
- 2) allumel (95% Ni, il resto Al, Si e Mn);
- 3) cromel (90% Ni e 10% Cu);
- 4) platino-rodio (90% Pt e 10% Rh).

La Fig. 1.17 mostra la dipendenza dell'EMF termico dalla differenza di temperatura tra il giunto caldo e quello freddo per diverse termocoppie.

L'incoerenza delle composizioni delle leghe può portare a variazioni significative nei valori dell'emf termoelettrico. In questi casi, è necessaria una calibrazione preliminare per ottenere un'elevata precisione, invece di utilizzare le tabelle standard.

A seconda della composizione, le termocoppie vengono utilizzate per misurare le temperature nei seguenti intervalli: platino-rodio - platino fino a 1600°C; rame - costantana e rame - copel fino a 350°C; ferro - costantana, ferro - copel e cromel - copel fino a 600°C; cromel - allumel fino a 900-1000°C.

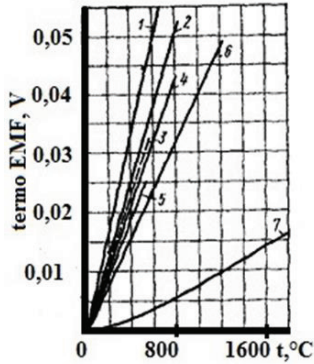


Fig. 1.17. Dipendenza del CEM termico dalla differenza di temperatura tra giunzione calda e fredda per le termocoppie: 1 - cromel - copel, 2 - ferro - copel, 3 - rame - copel, 4 - ferro - costantana, 5 - rame - costantana, 6 - cromel - allumel, 7 - platino-rodio - platino.

Tra le termocoppie metalliche, il maggiore EMF termico a parità di differenza di temperatura è quello della termocoppia chromel - copel. Il segno dell'EMF termico delle termocoppie mostrate in fig. 1.17 è il seguente: nella giunzione fredda la corrente è diretta dal primo materiale nominato nella coppia al secondo (da cromel a copel, da rame a costantana, ecc.), e nella giunzione calda - viceversa.

La maggior parte delle termocoppie funziona costantemente in un ambiente ossidante. Nel processo di funzionamento a lungo termine, si può osservare una graduale variazione dell'emf termica della termocoppia. Le ragioni di questa instabilità sono la contaminazione da impurità dell'atmosfera circostante, l'ossidazione dei fili, la volatilità dei componenti, le curve strette e le deformazioni meccaniche, che introducono tensioni interne e creano disomogeneità nella struttura. Le termocoppie in platino-rodio presentano la massima stabilità, accuratezza e riproducibilità, nonostante il basso valore di EMF termico. Ciò è dovuto all'inerzia chimica del materiale e all'elevato grado di purezza del materiale ottenuto.

1.14. Esempi di misurazione e calcolo della temperatura con le termocoppie

a) Calcolo a partire dal valore dell'emf termoelettrico di una termocoppia rame-costantana.

A seconda della precisione richiesta, la temperatura può essere calcolata in modo diverso dal valore dell'emf termoelettrico della termocoppia.

Nelle misurazioni, quando è sufficiente la precisione in poche frazioni di grado, si possono utilizzare le tabelle di taratura e in base ai loro dati e alle letture del voltmetro (galvanometro), misurando il valore della FEM termica, determinare la temperatura. In questo caso, se la termocoppia è inclusa nello schema di fig. 1.14.A e l'estremità libera si trova a 0°C, la temperatura determinata con il metodo sopra descritto dal valore dell'EMF termico tra la giunzione di lavoro e quella libera dovrebbe coincidere con la temperatura reale (entro l'errore determinato dalla qualità della termocoppia, dal metodo di utilizzo delle tabelle) nell'area della giunzione di lavoro della termocoppia.

Se si utilizza uno schema più semplice di inclusione della termocoppia fig.1.14.B (a condizione che l'estremità libera della termocoppia sia a temperatura ambiente e che il campo elettromagnetico nella termocoppia sia generato dalla differenza di temperatura tra il giunto di lavoro e la temperatura ambiente), è necessario apportare una correzione quando si utilizzano le tabelle.

Ad esempio, la temperatura nella regione della giunzione di lavoro può essere determinata dal valore dell'EMF termico misurato (E_i) sommato all'EMF termico tabulato (E_{t_0}) per una data temperatura ambiente (la temperatura a cui si trova il dispositivo di misura): $E = E_i + E_{t_0}$. Se, ad esempio, la temperatura ambiente è di 20 °C, il valore di $E_{t_0} = 0,790$ mV per la termocoppia rame-costantana per questa temperatura - vedere la tabella di calibrazione. Supponiamo che la lettura (CEM misurato) della termocoppia rame-costantana $E_i = 2,119$ mV. In questo caso, l'EMF da utilizzare per determinare la temperatura di giunzione di lavoro dalle tabelle è: $E = 0,790 + 2,119 = 2,909$ (mV). Utilizzando le tabelle si ottiene il valore di temperatura nell'area della giunzione di lavoro $t = 70$ °C. La Figura 1.18 mostra la dipendenza del valore del CEM misurato (E_i) e del valore della tabella (E_t) dalla temperatura per questo caso.

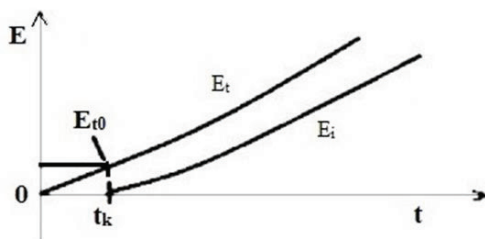


Fig. 1.18. Schema grafico della dipendenza dalla temperatura dell'EMF termico E di una termocoppia differenziale E_t e di una termocoppia a giunzione singola E_i .

Allo stesso tempo, a volte l'EMF termico delle termocoppie può differire significativamente dai valori tabulati, anche quando si utilizza una termocoppia differenziale e la si accende secondo lo schema in cui una giunzione è a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ciò può essere dovuto alla presenza di impurità, disomogeneità, deformazioni meccaniche, deviazione dal rapporto dei materiali nella lega del filo della termocoppia. Ciò può essere dovuto alla presenza di impurità, disomogeneità, deformazioni meccaniche, deviazione dal rapporto tra i materiali della lega nel filo della termocoppia. Pertanto, se sono necessarie misure più accurate, si effettua una speciale graduazione della termocoppia (vedere graduazione). È anche possibile, ad esempio, selezionare diversi punti dell'intervallo di temperatura di lavoro, in cui la temperatura può essere stabilizzata e determinata in modo sufficientemente preciso e indipendente. Quindi, avendo tracciato la dipendenza della differenza ΔE dei valori di EMF termico (secondo i dati della tabella e quelli misurati) dalla temperatura, è possibile apportare correzioni - aggiungere o sottrarre il valore di ΔE dall'EMF termico misurato. In questo modo è possibile ottenere un'accuratezza di misurazione della temperatura pari a $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se è richiesta un'accuratezza ancora maggiore, la calibrazione viene effettuata in laboratori metrologici specializzati.

b) Misurare e calcolare la temperatura con una termocoppia in lega di cromo-copel.

Qui descriviamo la misurazione della temperatura con una termocoppia realizzata con le nostre mani, ma le informazioni fornite sono utili anche per comprendere il funzionamento delle termocoppie prodotte in commercio.

Se si desidera una precisione di misurazione della temperatura pari a 0,5 K (può essere superiore; l'errore dipende dalle capacità del dispositivo di misurazione V), è necessario realizzare e utilizzare una termocoppia differenziale (vedere la figura 1.19.a). m_1 , m_2 - rispettivamente il metallo 1 e 2 del filo della termocoppia.

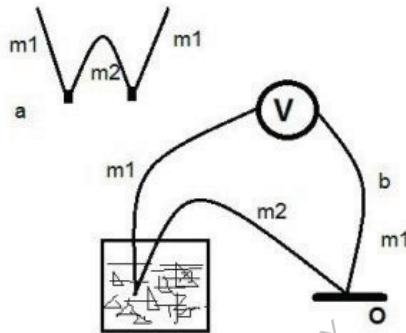


Fig. 1.19. Termocoppia differenziale - a, e schema di misurazione della temperatura dell'oggetto O - b.

Per la misurazione della temperatura nell'intervallo climatico (temperature ambiente), la termocoppia più adatta è quella in rame-cromo, il cui vantaggio principale è l'elevata sensibilità nell'area delle temperature ambiente. Per le misurazioni nell'area delle basse temperature è possibile utilizzare termocoppie in cromo-allumina, rame-costantana, ecc. (vedi tabelle di calibrazione). Per le alte temperature, si utilizzano termocoppie a base di platino, cromel-alumel, ecc.

Ricordiamo che le tabelle di taratura delle termocoppie sono realizzate per la condizione in cui una delle giunzioni della termocoppia differenziale si trova a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per utilizzare questa condizione nella pratica, una delle giunzioni della termocoppia viene immersa in un recipiente (thermos) con ghiaccio fondente, la cui temperatura è nota a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lo schema di tale misurazione della temperatura dell'oggetto O mediante una termocoppia differenziale è illustrato nella figura 1.19.b.

Per l'esempio, consideriamo che le misurazioni vengano effettuate utilizzando una termocoppia in rame-cromo. La temperatura dell'oggetto O è determinata dalle letture del voltmetro (galvanometro) V . Ad esempio, sappiamo che l'oggetto si trova a una temperatura superiore a 0°C , la lettura

del voltmetro $U = 6,43 \text{ mV}$. Osservando la tabella, si può stabilire che questo valore del campo elettromagnetico termico corrisponde a una temperatura di 93°C . Occorre tenere presente che il segno dell'EMF termico dipende dalla polarità del collegamento della termocoppia al dispositivo di misura V e al passaggio della temperatura dell'oggetto a 0°C sarà invertito.

Se le condizioni tecniche consentono di ottenere una precisione di misura a livello di unità di gradi, è possibile utilizzare una termocoppia con una giunzione (vedere fig. 1.20).

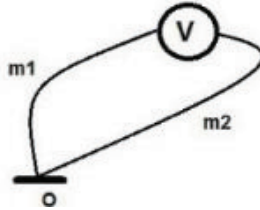


Fig. 1.20. Schema di misurazione della temperatura dell'oggetto O con una termocoppia a giunzione singola.

Se analizziamo i processi fisici in un circuito di misura di questo tipo, possiamo vedere che in questo caso (come notato in precedenza) il ruolo della temperatura, rispetto alla quale si forma il termo-EMF, gioca la temperatura ambiente (la temperatura alla quale si trovano i terminali del dispositivo di misura - voltmetro). Di conseguenza, se ne tiene conto quando si utilizzano le tabelle di calibrazione e si determina la temperatura dell'oggetto. Il valore del CEM termico U , con il quale, utilizzando le tabelle, si determina la temperatura dell'oggetto, sarà pari a:

$$U = U_k + U_v \quad (1.8),$$

dove U_k - valore di tabella dell'EMF della termocoppia differenziale (a due giunzioni) a temperatura ambiente t_k (temperatura del dispositivo - ad esempio, $t_k = 24^\circ\text{C}$, in questo caso $U_k = 1,57 \text{ mV}$), U_v - EMF termico misurato (lettura del voltmetro V).

Abbiamo preso ad esempio la temperatura della stanza di 24°C ($U_k = 1,57 \text{ mV}$); se il voltmetro legge, ad esempio, $3,05 \text{ mV}$, allora, rispettivamente, $U = 4,62 \text{ mV}$ e utilizzando le tabelle determiniamo che la temperatura dell'oggetto O - 68°C .

Per semplificare il calcolo (se è accettabile una piccola diminuzione dell'accuratezza) quando si determina la temperatura utilizzando una termocoppia con una singola giunzione si può approssimare la dipendenza

dell'EMF della termocoppia dalla temperatura con una dipendenza lineare. In questo caso, si determina la temperatura dell'oggetto:

$$t_o = t_k + U_v/j \quad (1.9),$$

dove $j = \Delta U/\Delta t$ è la sensibilità media alla temperatura della termocoppia in un determinato intervallo di temperatura.

Ad esempio, per una termocoppia cromel-pin nell'intervallo di temperatura (0 - 200) °C, la sensibilità media j è pari a circa 0,074 mV/°C.

1.15. Pirometri

I pirometri sono strumenti che utilizzano la radiazione elettromagnetica dei corpi per determinarne la temperatura.

Le superfici di tutti i corpi di sostanze la cui temperatura è superiore allo zero assoluto emettono onde elettromagnetiche. La natura di questa radiazione e le sue caratteristiche dipendono dalla temperatura.

La lunghezza d'onda delle radiazioni termiche è compresa tra 0,1 e 1000 μm . Oltre alle radiazioni, i corpi assorbono anche quelle provenienti da altri corpi. In generale, un corpo assorbe parte dell'energia, parte la riflette e parte la trasmette ulteriormente. Tutto questo è caratterizzato da coefficienti appropriati. Nella fisica della radiazione termica esiste il concetto di corpo assolutamente nero. Un corpo assolutamente nero è un corpo che assorbe tutta la radiazione che cade su di esso. L'assorbimento e la radiazione dei corpi sono considerati in relazione a tale corpo.

In pratica, nessun corpo assorbe e irradia come un corpo assolutamente nero. Un modello di corpo assolutamente nero può essere l'apertura di una camera, la cui superficie interna ha una buona capacità di assorbimento e la stessa temperatura.

La figura 1.21 mostra l'emissività di un corpo assolutamente nero e la sua dipendenza dalla temperatura:

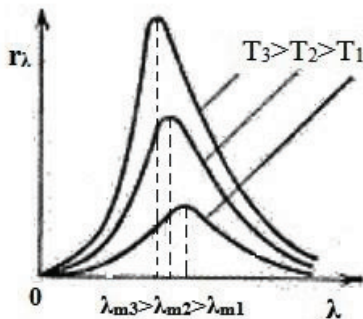


Fig.1. 21. Dipendenza dell'emissività r_λ di un corpo completamente nero dalla temperatura T e dalla lunghezza d'onda λ .

La lunghezza d'onda della massima intensità della radiazione è determinata dalla legge di Wien:

$$\lambda_m = b/T \quad (10),$$

b è la costante di Wien, T è la temperatura assoluta.

Conoscendo le leggi della radiazione, è possibile determinare la temperatura della superficie irradiata in base al flusso di radiazione misurato che cade su una certa superficie.

Sono presenti i seguenti ricevitori di radiazioni:

A) Ricevitori neri e grigi (termici). Questi ricevitori comprendono sensori di temperatura (termoresistori, termocoppie) fissati su piastre annerite che ricevono la radiazione. La loro sensibilità è indipendente dalla lunghezza d'onda.

B) Elementi di rilevamento selettivo. Si tratta di fotocellule, fotoresistori, fotodiodi, fototransistor. La sensibilità assoluta degli elementi sensibili selettivi è molto più elevata.

I ricevitori di radiazioni causano una variazione di corrente, resistenza e tensione nei corrispondenti circuiti di elaborazione del segnale elettrico.

Alle alte temperature della superficie radiante (oltre 650 °C), quando il colore inizia a cambiare, anche l'occhio dell'osservatore può fungere da ricevitore di radiazioni.

Si distingue tra pirometri:

Pirometri ottici. I pirometri ottici sono sensibili solo in una stretta gamma di lunghezze d'onda. Ciò si ottiene utilizzando un filtro speciale.

La radiazione dell'oggetto in esame viene analizzata da un ricevitore di radiazioni o per confronto con una sorgente di radiazioni di riferimento. I pirometri più utilizzati sono quelli con filamento a scomparsa. Quando si lavora con questi pirometri, il ricercatore confronta in un ristretto intervallo di lunghezze d'onda dello spettro visibile la luminosità della radiazione misurata e quella della radiazione di controllo (filamento di tungsteno incandescente). Quando le due luminosità sono uguali, il filamento scompare.

La potenza di riscaldamento (corrente) del filamento è un'indicazione della temperatura ottica dell'oggetto monitorato. La temperatura è determinata da una curva di graduazione oppure il pirometro può essere già

dotato di una scala. La temperatura di luminosità (spettrale, ottica) misurata da un pirometro è uguale alla temperatura reale se il coefficiente di emissione spettrale della superficie dell'oggetto controllato è uguale a uno (corpo assolutamente nero). In pratica, la temperatura misurata è sempre inferiore alla temperatura reale ed è necessario introdurre una correzione nel valore misurato, che viene determinata in base alla temperatura misurata e al coefficiente di emissione spettrale k_i (determinato da tabelle) (ad esempio, per una lunghezza d'onda $\lambda = 0,65 \text{ nm}$ - porcellana $k_i = 0,78$ a 1200°C , ferro $k_i = 0,35$ a 800°C).

I pirometri a filamento scomparso sono pirometri molto comodi e semplici. Lo svantaggio è la limitazione del limite inferiore di temperatura e una certa soggettività dei risultati di misurazione. Allo stesso tempo, la correzione effettuata nel risultato della misurazione per gli oggetti che non irradiano nero è più accurata rispetto ai pirometri a radiazione. Sono stati sviluppati anche pirometri ottici con un ricevitore oggettivo di radiazioni - elemento fotoelettrico, ecc.

Le misure con il pirometro a scomparsa vengono effettuate da una distanza di 2 m all'infinito. La distanza può essere corretta con l'aiuto di ottiche speciali. Il limite inferiore di temperatura è di 650°C o 200°C per il ricevitore obiettivo. Il limite superiore di solito non supera i 2500°C . I pirometri sono graduati su un emettitore nero o su una lampada a filamento di tungsteno.

Pirometri a radiazione (a radiazione completa). Sono pirometri che rilevano la radiazione nell'intera gamma spettrale. Sono considerati tali se almeno il 90% della radiazione dell'oggetto viene utilizzata nel pirometro. Per questi pirometri si possono utilizzare solo ricevitori termici (termocoppie, termistori). Questi pirometri possono misurare la temperatura in un intervallo compreso tra -50°C e 2000°C e oltre. La correzione delle letture in base al coefficiente di radiazione in molti pirometri viene effettuata automaticamente e il pirometro mostra immediatamente la temperatura reale, se si imposta in anticipo un valore noto del coefficiente di radiazione.

Bibliografia

1. Orlova M.P., Pogorelova O.F., Ulybin S.A. *Nizkotemperaturnaya termometriya* [Termometria a bassa temperatura]. M.: *Energoatomizdat*, 1987.-280 p.

2. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Misure nell'industria"] 1-3 volumi. M.: *Metallurgiya*, 1990.

3. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil. Sensori a semiconduttore per un ampio intervallo di temperatura. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, Gennaio 2014, pp.1-4.

4. N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholechuk et al., New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates, *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry 7*, 399-404 (2003).

5. Zarubin L.I., Nemish I.Yu. *Miniatyurnyy termometr soprotivleniya na 1,3-200K*. [Termometro a resistenza in miniatura per 1,3-200K]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1971, n. 4, pag. 260.

6. Astrov D.I., Abilov G.S., Alshin B.I. *Izmerenie nizkikh temperatur v prisutstvii sil'nykh magnitnykh poley*. [Misurazione delle basse temperature in presenza di forti campi magnetici]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1977, n. 4, p. 39.

7. V. F. Mitin. *Termometria soprotivleniya na osnove plenok germaniya*. [Termometri a resistenza basati sulle pellicole di germanio]. *Fizika poluprovodnikov, kvantovaya elektronika i optoelektronika*. 1999. V. 2, N 1. P. 115-123.

8. Medvedeva L.A., Orlova M.P., Rabinkin A.G. *Termopara dlya izmereniya nizkikh temperatur* [Termocoppia per la misurazione delle basse temperature]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1970, n. 5, pag. 208.

9. Gorbachuk N.T., Shybyryn V. S. "SENSORI DI TEMPERATURA A SEMICONDUTTORI - TERMORESISTORI", *Ingegneria moderna e tecnologie innovative*, Germania, numero 16. Aprile 2021.

10. N. T. Gorbachuk, *Sposob izmereniya temperatury*. [Metodo di misurazione della temperatura], Brevetto della Federazione Russa. No. 2025736, No. 24, 1994.

11. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. e altri. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy sektsii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Risultati di uno studio sperimentale del processo di raffreddamento della sezione modello e del blocco sperimentale dell'avvolgimento superconduttore del

campo toroidale dell'installazione T-15 sul complesso SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.

12. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. ecc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Trasduttori di misura a semiconduttore di deformazione, temperatura e campo magnetico per l'uso in condizioni di esposizione alle radiazioni, un'ampia gamma di temperature e campi magnetici]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

13. Mykola Gorbachuk. MATERIALI ELETTROROTECNICI. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londra, N2 9ED, Regno Unito, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

14. N. Stefan, S. A. Mulenko, N. T. Gorbachuk. "Sintesi laser di film nanometrici di ossido di cromo con alto coefficiente di Seebeck e alta figura di merito termoelettrica: Uno studio sperimentale". *Current Overview on Science and Technology Research Vol. 4, Capitolo 1*, pag. 1-22. ISBN cartaceo: 978-93-5547-861-0, ISBN eBook: 978-93-5547-862-7, DOI: 10.9734/bpi/costr/v4/6196F

15. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Sintesi di film nanometrici di ossido di ferro mediante RPLD e LCVD per sensori termofotografici. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, v.105, #3, p.517-523, 2011.

16. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Trasduttori di misura basati su GaAs, polisilicio e germanio disperso e prospettive per il loro utilizzo]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

17. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influenza dell'irradiazione neutronica sulle caratteristiche dei trasduttori di misura a semiconduttore di temperatura, deformazione e campo magnetico]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

18. N.T.Gorbachuk , S.A. Mulenko, Yu.N.Petrov . Sintesi fotonica di film sottili di ossido di ferro per sensori termo-fotochimici. *Applied Surface Science*. Volume 258, Numero 23, 15 settembre 2012, Pagina 9186-9191.

19. Sergii Mulenko, Nicolaie Stefan, Floralice Miroiu, Nikolay Gorbachuk.

Sintesi laser di ossidi metallici di transizione in struttura 2D ed eterostruttura per termosensori con elevato coefficiente di Seebeck.

Frontiers in Sensors (FS) Volume 4, 2016, p.16-26.

20. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconduttori].- *L. Nauka* 1967. 439p.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik [Corso generale di fisica: guida allo studio],T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

FOR AUTHOR USE ONLY

Capitolo 2. Grandezze meccaniche. Trasduttori, sensori, misure

2.1. Celle di carico

Poiché la resistenza di un conduttore è definita dalla relazione

$$R = \rho l/S \quad (2.1),$$

dove ρ è la resistività del materiale; l è la lunghezza S è l'area della sezione trasversale, allora la resistenza può cambiare a qualsiasi fluttuazione del valore misurato, che influisce su uno o più degli argomenti inclusi in questa espressione.

Questa relazione è utilizzata negli estensimetri, che sono trasduttori che convertono una variazione della forza applicata in una variazione della resistenza. In genere, un trasduttore di questo tipo viene utilizzato insieme a un ponte di Wheatstone, in cui uno, due o anche tutti e quattro i bracci sono celle di carico e la tensione di uscita cambia in risposta alle variazioni della forza misurata.

Gli estensimetri utilizzano, ad esempio, elementi trasduttori metallici che, quando viene applicato un carico meccanico, cambiano la loro lunghezza e la loro area trasversale. Ciò determina a sua volta una variazione della resistenza. Alcuni materiali estensimetrici, come i materiali semiconduttori, presentano un effetto piezoelettrico per cui un carico applicato al materiale provoca una forte variazione della sua resistività. Gli estensimetri di questo tipo hanno una sensibilità di due ordini di grandezza superiore rispetto a quelli metallici precedentemente discussi.

In generale, qualsiasi parametro che tenga conto del movimento o della forza può essere utilizzato per creare trasduttori estensimetrici.

Gli estensimetri a filo (fig. 2.1) sono prodotti sotto forma di conduttori collegati rigidamente con una base di carta o pellicola 2. Il conduttore 3 è un filo sottile a zig-zag di 0,02-0,05 mm di diametro, alle cui estremità sono collegati i conduttori (conduttori di rame 4) mediante saldatura o brasatura. I conduttori sono ricoperti di carta, pellicola o vernice 1. Dopo aver incollato il substrato dell'estensimetro alla superficie deformabile oggetto di studio, la deformazione di questa superficie viene trasmessa ai conduttori e porta a una variazione della loro resistenza.

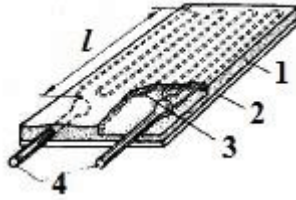


Fig. 2.1. Struttura di un resistore a filo estensimetrico.

La resistenza R del resistore realizzato sotto forma di filo di lunghezza l è determinata dall'espressione precedente (2.1).

L'effetto della deformazione è caratterizzato dal segnale di uscita associato alla variazione relativa della resistenza della resistenza $\Delta R/R$. Il rapporto tra la variazione relativa del segnale di uscita e la deformazione relativa ε che lo ha provocato a valori fissi di corrente, temperatura, ecc. è chiamato coefficiente di sensibilità alla deformazione dell'estensimetro.

$$k = \Delta R/R\varepsilon \quad (2.2).$$

Il rapporto $\Delta R/R$ è determinato (matematicamente si può ottenere differenziando la (2.1)) da $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S$, dove ΔR , $\Delta\rho$, Δl , ΔS - cambiano rispettivamente la resistenza, la resistività, la lunghezza e l'area di resistenza trasversale del conduttore.

Nel campo delle deformazioni elastiche, utilizzando la teoria per i corpi solidi, possiamo ottenere un'espressione per il coefficiente di sensibilità alla deformazione nella forma di:

$$k = 1 + 2\mu + \nu \quad (2.3).$$

Per i conduttori, i componenti μ (rapporto di Poisson) e ν (coefficiente di elastoresistenza) non differiscono molto in termini di grandezza. Per i semiconduttori, il valore di ν può essere di due ordini di grandezza superiore a μ e dipende dalla temperatura, dalla deformazione e dalla direzione cristallografica. Pertanto, gli estensimetri a semiconduttore hanno una sensibilità alla deformazione molto più elevata, ma sono anche più suscettibili alle influenze esterne.

La qualità degli estensimetri è determinata dai loro coefficienti di sensibilità alla deformazione k e dal valore del coefficiente di resistenza alla temperatura (TCR) - $\Delta R/R\Delta T$. Più alto è il coefficiente di sensibilità alla deformazione k e più basso è il coefficiente di resistenza alla temperatura (TCR) del materiale di cui è fatto l'estensimetro, più alta è la sua qualità.

Ad esempio, per gli estensimetri a filo in leghe di costantana e manganese $k \approx 2$, $TCR = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, rispettivamente. Per gli estensimetri a semiconduttore, k raggiunge il valore di 100 e oltre (ad esempio, il silicio).

Negli estensimetri a foglio, l'elemento sensibile è costituito da una lamina con uno spessore di 3-6 micron. I principali vantaggi degli estensimetri a foglio sono la possibilità di formare estensimetri di qualsiasi forma e l'efficace dissipazione del calore durante le misurazioni, che consente di ottenere un segnale di uscita più elevato. Gli estensimetri a foglio sono insensibili alle deformazioni trasversali e possono essere prodotti in dimensioni a partire da 0,3 mm.

Una delle principali caratteristiche metrologiche degli estensimetri comprende la sensibilità alla deformazione, il creep, l'isteresi meccanica e l'instabilità termica.

La sensibilità alla deformazione è determinata principalmente dalle proprietà estensimetriche del materiale dell'elemento sensibile. La sensibilità alla deformazione è il parametro principale che determina il valore della deformazione misurata:

$$\varepsilon = \Delta R / Rk \quad (2.4).$$

Il creep si manifesta come una variazione del segnale di uscita a un valore dato e invariato di ε . Il creep è causato principalmente da imperfezioni elastiche del substrato e dell'adesivo.

L'isteresi meccanica, come il creep, è causata dall'imperfezione elastica del substrato e dell'adesivo ed è determinata numericamente attraverso la differenza dei valori di resistenza in uscita per lo stesso valore di deformazione, a condizione che il valore di deformazione dato sia raggiunto con un aumento e una diminuzione uniformi.

L'instabilità termica consiste nella variazione della resistenza dell'estensimetro dovuta al suo TCR e anche alla comparsa di sollecitazioni meccaniche aggiuntive dovute alla differenza dei coefficienti termici di espansione lineare del materiale dell'estensimetro e della parte in esame.

Un parametro importante degli estensimetri è la potenza ammissibile che può essere dissipata nell'estensimetro, purché il suo surriscaldamento non superi il valore consentito. La potenza ammissibile di un estensimetro dipende dalle sue dimensioni geometriche.

2.2. Estensimetri a foglio

Negli estensimetri a foglio l'elemento sensibile è costituito da un foglio di spessore pari a 3...6 micron.

Lo spessore degli estensimetri a foglio è inferiore a quello degli estensimetri a filo ed è di 30...50 micron. I principali vantaggi degli estensimetri a foglio sono la possibilità di formare estensimetri di qualsiasi forma e l'efficace dissipazione del calore durante le misurazioni, che consente di ottenere un segnale di uscita più elevato a parità di deformazioni. Gli estensimetri a foglio sono insensibili alle deformazioni trasversali e consentono di realizzare progetti con base piccola, a partire da 0,3 mm.

Gli estensimetri a foglio sono solitamente realizzati in foglio di costantana. Le proprietà elettromeccaniche della lamina sono meno costanti all'interno di un lotto rispetto al filo estensimetrico in costantano. Il suo trattamento termico è meno efficace, per cui il campo operativo degli estensimetri a foglio non supera $\pm(3-5)10^{-3}$ deformazioni relative ($\pm 3000...5000$ URD, dove $1\text{URD} = 1\text{mln}^{-1} = 10^{-6}$ - un'unità di deformazione relativa), e la temperatura è di 75...575 K. La tecnologia di fabbricazione degli estensimetri a foglio, di norma, si basa sull'uso di processi fotochimici. Questa tecnologia è la più adatta per la produzione di massa. A seconda della forma dei reticoli tensoriali, gli estensimetri a foglio si dividono nelle seguenti modifiche tipiche (fig. 2,2):

- rettangolare a singolo elemento per misure lineari;
- estensimetri rettangolari o a rosetta a due o tre elementi per misurazioni in aree con stato di sollecitazione piatto;
- speciali utilizzati come estensimetri negli elementi di rilevamento a membrana;
- ecc.

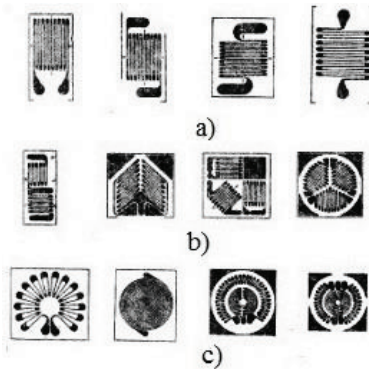


Figura 2.2. Forme di alcuni reticoli tensoriali di estensimetri a foglio.
 a - rettangolare a elemento singolo; b - rettangolare a più elementi e rosetta;
 c - membrana.

2.3. Misurazione delle sollecitazioni meccaniche mediante corda vibrante. Tenzometro

Questo metodo di misurazione delle sollecitazioni meccaniche (deformazioni, allungamenti) utilizza come elemento sensibile una corda d'acciaio tesa tra due morsetti fissati nella struttura di cui si studiano le deformazioni. Una variazione della tensione meccanica della corda porta a una variazione della frequenza di oscillazione ν e la misura di $\Delta\nu$ permette di determinare le deformazioni. Uno dei vantaggi del metodo in esame è la lunga durata del sensore (trasduttore, estensimetro), l'affidabilità, la scarsa sensibilità alle influenze esterne (umidità, radiazioni, ecc.). Questi vantaggi sono garantiti dalla resistenza della corda e dalla costruzione dell'estensimetro. In questo metodo, il vettore dell'informazione è la frequenza del segnale di uscita, che crea ulteriori vantaggi in termini di resistenza alle interferenze sotto forma di rumore, interferenze, influenze delle linee di trasmissione. Inoltre, tale segnale può essere facilmente convertito in forma digitale.

La frequenza fondamentale ν delle vibrazioni meccaniche di una corda estensimetrica tesa tra due punti a distanza l e sottoposta a una forza F è espressa dalla formula

$$\nu = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{S\rho}} \quad (2.5),$$

dove S è l'area della sezione trasversale della corda, ρ è la sua densità.

Sotto l'influenza della sollecitazione meccanica F/S , la corda del tensimetro subisce un allungamento Δl . Analizzando lo stato di tensione-deformazione della corda, possiamo ottenere un'espressione per l'allungamento relativo (deformazione relativa) attraverso la variazione della frequenza:

$$\Delta l/l = (4l^2 \rho/E)(\nu_1^2 - \nu_0^2) \quad (2.6),$$

dove E è il modulo di Young. Conoscendo ν_0 (frequenza iniziale) e misurando ν_1 (frequenza dopo la deformazione della struttura), è possibile determinare la deformazione della struttura.

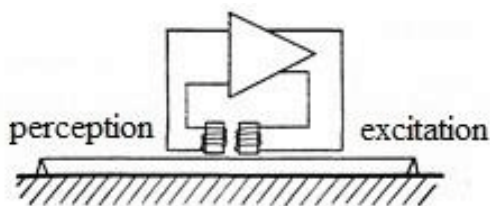


Fig. 2.3 Estensimetro con corda vibrante

La Fig. 2.3 mostra un estensimetro (schema) con una corda vibrante. La corda d'acciaio vibra con frequenza ν davanti alla bobina di segnale, causando oscillazioni periodiche della resistenza magnetica del suo circuito magnetico, che genera un segnale elettrico della stessa frequenza ν . Questo segnale viene amplificato e trasmesso alla bobina di eccitazione, che mantiene la vibrazione. La frequenza ν può essere misurata con un frequenzimetro. Le caratteristiche di questo tipo di estensimetri sono reperibili in letteratura. Ad esempio, un estensimetro prodotto da "Telemac" ha le seguenti caratteristiche: frequenza massima ~ 1200 Hz, frequenza minima ~ 400 Hz, campo di misura $4000 \mu\text{m/m}$, risoluzione $1 \mu\text{m/m}$, precisione dall'1 al 2% del campo di misura.

Il tipo di misuratore di allungamento (estensimetro) descritto viene utilizzato per il controllo delle deformazioni meccaniche e delle sollecitazioni nelle costruzioni (dighe, ponti, gallerie, ecc.), nella misurazione del peso, ecc.

2.4. Adesivi e leganti per il montaggio degli estensimetri

Gli adesivi e i leganti utilizzati per il montaggio degli estensimetri sulla superficie in esame devono soddisfare i seguenti requisiti di base:

A) Garantire il trasferimento della deformazione della superficie in esame all'estensimetro e il minor scorrimento possibile delle letture nell'intervallo operativo di temperature e deformazioni. Il creep è dovuto alla plasticità dell'adesivo.

B) Assicurare l'isolamento elettrico dell'estensimetro dalla superficie in esame.

Di norma, i fornitori di estensimetri forniscono nella loro documentazione un elenco di adesivi con caratteristiche ottimali per questo tipo di estensimetri e una descrizione della tecnologia di applicazione.

Di seguito vengono descritti brevemente gli adesivi più utilizzati per gli estensimetri.

Per gli estensimetri a foglio:

Adesivo Cyacrine EO. Sono adesivi a presa rapida e a freddo. Sono utilizzati per l'incollaggio di materiali non porosi e metalli. Induriscono entro 48 ore senza forze di compressione. Temperatura di esercizio -80 - +80 °C.

Colla UVS-10T. Polimerizzazione a caldo, monocomponente. Collega materiali non metallici non porosi e metalli. Temperatura di esercizio -70 - +200 °C. La polimerizzazione dell'adesivo si svolge come segue: gli estensimetri incollati devono essere tenuti per 0,5 ore in condizioni normali. Poi si mantengono per 5 ore a temperatura di 180 °C con pressione di pressatura di 0,1 - 0,3 MPa (1 - 3 atm) nelle condizioni del termo-armadio. Quindi polimerizzare per 5 ore a 215 °C in condizioni di polimerizzazione aperta.

Colla BFR-2K. Si riferisce agli adesivi monocomponenti a caldo, fenolo-formaldeide. Le condizioni di polimerizzazione e la tecnologia di utilizzo sono simili a quelle della colla UVS-10T.

2.5. Attestazione, taratura e verifica degli estensimetri

Per l'attestazione e la taratura (determinazione delle caratteristiche di taratura) degli estensimetri, si utilizzano elementi elastici di riferimento (travi). La trave, di norma, ha dimensioni (forma) che forniscono uguale resistenza alla flessione (fig. 2.4.a) o ha una sezione trasversale costante (fig. 2.4.b). La trave ha una sezione (area di lavoro, ombreggiata nella figura) entro la quale la deformazione è praticamente costante.

Il valore della deformazione della superficie della trave di uguale resistenza è determinato dalla formula:

$$\varepsilon = \frac{6PL}{EB(h+\Delta h)^2} \quad (2.7)$$

dove: P è il valore della forza di carico (carico), H , L è la distanza dalla linea di attacco della trave al punto di applicazione della forza, E è il modulo di elasticità del materiale della trave, B è la larghezza della trave nel punto di attacco, h è lo spessore della trave, Δh è la distanza dalla superficie della trave alla metà dello spessore dell'estensimetro.

L'entità della deformazione della superficie della trave a sezione costante viene calcolata attraverso la deflessione f mediante la formula:

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)f}{l^2+4f^2\pm 4fh} \quad (2.8),$$

dove: h - spessore della trave, Δh - distanza dalla superficie della trave alla metà dello spessore dell'estensimetro, l - base del dispositivo con l'aiuto del quale viene determinata la deflessione, f - braccio di deflessione alla base l .

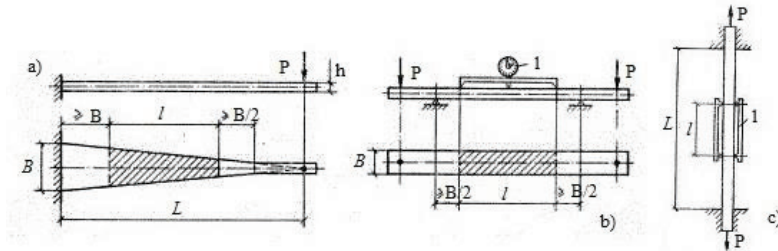


Fig. 2.4. Elementi elastici di riferimento: a - di uguale resistenza alla flessione, b - di sezione costante, c - trave che lavora in tensione. 1 - dispositivo per la misurazione della deformazione effettiva.

Per la taratura si possono utilizzare anche travi che lavorano in tensione (fig. 2.4.c). In questo caso, si utilizza la misurazione diretta del valore di deformazione nell'area di lavoro. Lo svantaggio di questo metodo è la difficoltà di creare un carico assiale stabile.

2.6. Misurazione delle deformazioni meccaniche (sollecitazioni) con l'aiuto dell'estensimetro

Come già detto, un estensimetro è un dispositivo la cui resistenza elettrica cambia quando viene deformato. Questa variazione di resistenza è correlata all'entità della deformazione meccanica ϵ attraverso il coefficiente di sensibilità alla deformazione (vedere 2.2).

Attualmente, i più utilizzati per misurare le deformazioni meccaniche sono gli estensimetri a foglio (il materiale del foglio è il metallo) e, per risolvere alcuni problemi, gli estensimetri a semiconduttore. I vantaggi e gli svantaggi di entrambi i tipi di estensimetri sono ben presentati in letteratura. Il vantaggio principale degli estensimetri a semiconduttore è la loro maggiore sensibilità alla deformazione (fino a 100 volte), ma allo stesso tempo sono più fragili, rigidi, con una maggiore dipendenza dei parametri dalla temperatura. L'elevata sensibilità alla deformazione degli estensimetri a semiconduttore si spiega con i cambiamenti nella struttura a zone del materiale semiconduttore sotto l'influenza delle sollecitazioni meccaniche e, di conseguenza, con una forte dipendenza della conduttività (resistenza)

dalla deformazione. Mentre negli estensimetri metallici la sensibilità alla deformazione è data dalle variazioni delle dimensioni dell'elemento sensibile (lamina).

Gli estensimetri a foglio si differenziano in base alla loro destinazione d'uso - per la misurazione di deformazioni uniassiali, deformazioni distribuite, per diversi intervalli di temperatura, per la dimensione e la forma del reticolo (forma della lamina elettricamente conduttiva), per i valori di resistenza elettrica e per alcuni altri parametri.

Uno dei più semplici estensimetri a foglio è mostrato nella figura 2.5. La struttura dell'estensimetro è tale che reagisce (cambia la sua resistenza) praticamente solo quando la deformazione è diretta (applicata) lungo l'asse del reticolo estensimetrico o c'è una componente di deformazione complessa distribuita in questa direzione (questa è chiamata "sensibilità alla deformazione longitudinale").



Fig. 2.5. Tipico estensimetro a foglio

Inoltre, la variazione della resistenza è proporzionale all'entità della deformazione longitudinale (o componente del complesso) ed è correlata alla sua entità attraverso il coefficiente k . Va notato che esiste anche una sensibilità alla deformazione trasversale, cioè alla deformazione diretta perpendicolarmente alla base (asse longitudinale) dell'estensimetro, ma è insignificante; di norma, per gli estensimetri a foglio è vicina allo zero e per quelli a filo non supera l'1% della longitudinale.

La ragione principale della variazione della resistenza dell'estensimetro a foglio sotto l'influenza della deformazione è la variazione delle dimensioni del reticolo elettricamente conduttivo. Come è noto, la resistenza elettrica dei materiali è determinata dalla dipendenza (2.1). In caso di deformazione a trazione la resistenza aumenta, in caso di compressione diminuisce. Nel processo di utilizzo degli estensimetri, questo dato viene preso in considerazione per determinare il segno della deformazione dell'oggetto.

Per gli estensimetri a foglio, il coefficiente di sensibilità alla deformazione dipende dal materiale del foglio. Il suo valore è compreso nell'intervallo $k = 2-4$ ed è indicato nei passaporti e nelle descrizioni allegate al lotto di estensimetri. Il valore della resistenza elettrica, di norma, è di 50 Ohm.

Per misurare l'entità della deformazione dell'oggetto in esame, l'estensimetro viene montato (incollato) nel punto dell'oggetto in cui è necessario misurare la deformazione. Per misurare la deformazione dell'oggetto nel modo più accurato possibile, è necessario garantire che la deformazione venga trasferita dall'oggetto al campo di estensimetri quasi senza perdite. Ciò si ottiene selezionando il legante (adesivo) e la tecnologia di montaggio appropriati. Il requisito principale per il legante è l'assenza di deformazione plastica nel campo operativo dell'estensimetro. Il legante ottimale e la tecnologia di lavoro con esso sono specificati nelle descrizioni tecniche dei lotti di estensimetri. Molto spesso si utilizzano colle del tipo BF-2 come legante.

La resistenza indicata nella scheda tecnica e misurata dopo aver montato l'estensimetro sull'oggetto può differire leggermente - nel processo di polimerizzazione del legante, possono verificarsi deformazioni del reticolo dell'estensimetro. È necessario tenerne conto durante le misurazioni precise.

Inoltre, dopo aver montato l'estensimetro sull'oggetto durante la prova meccanica dell'oggetto, si misura la resistenza elettrica dell'estensimetro. Se, ad esempio, il coefficiente di sensibilità dell'estensimetro $k = 2$, la resistenza iniziale (specificata nel passaporto o misurata dopo il montaggio dell'estensimetro sull'oggetto) $R_o = 200,1$ Ohm, e durante il carico meccanico dell'oggetto $R_\epsilon = 200,9$ Ohm, allora la quantità di deformazione meccanica (in questo caso, l'allungamento) nel punto di montaggio dell'estensimetro e nella direzione della sua base è uguale:

$$\epsilon = \Delta R/kR_o = (R_\epsilon - R_o)/kR_o = 0,002 = 2 \cdot 10^3 \text{ mln}^{-1} = 2 \cdot 10^3 \text{ URD.}$$

Vale a dire che il valore della deformazione relativa è pari a 0,002. I valori di deformazione relativa sono talvolta espressi in URD - unità di deformazione relativa, pari a 1/1000000 (una milionesima parte - mln⁻¹) dell'unità di deformazione.

In pratica, per misurare le deformazioni si utilizzano apparecchiature speciali per automatizzare le misure, le tecnologie di misura sono più

complesse per ottenere la massima precisione, il calcolo degli errori secondo determinati metodi, ecc.

Se è necessario determinare le sollecitazioni meccaniche dell'oggetto nel punto di misurazione della deformazione, si utilizza la relazione nota tra la deformazione meccanica ε e le sollecitazioni meccaniche σ :

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.9),$$

dove E è il modulo di Young (elasticità) del materiale dell'oggetto.

La tecnica e la sequenza di misurazione delle deformazioni meccaniche con un estensimetro a semiconduttore sono fundamentalmente le stesse descritte sopra per gli estensimetri a foglio.

2.7. Materiali idroprotettivi per estensimetri

L'impermeabilizzazione degli estensimetri dopo la loro installazione sull'oggetto di misura viene effettuata, di norma, in tutti i casi in cui l'umidità dell'ambiente può superare il 50%.

Il più diffuso è il metodo dell'impermeabilizzazione relativa, che consiste nell'applicare composizioni idrofobe e sigillanti ai punti di installazione degli estensimetri. Di solito tali composizioni hanno una buona adesione alla base degli estensimetri e alla superficie in esame, in modo che, così come gli adesivi, dopo l'indurimento formino un tutt'uno con l'estensimetro.

Le composizioni e i sigillanti idrofobici non devono deformarsi a causa del ritiro o delle variazioni delle condizioni ambientali, non devono rinforzare visibilmente i siti di misura e devono mantenere la capacità di deformazione elastoplastica. Inoltre, non devono attaccare chimicamente i materiali degli estensimetri e dei fili patch.

I rivestimenti impermeabili utilizzati per la misurazione della deformazione si suddividono in:

- rivestimenti in film applicati in più strati con uno spessore totale di 50... 100 micron;
- sigillanti morbidi con modulo di elasticità fino a 100 MPa, solitamente applicati in un unico strato con spessore di 2...3 mm.
- duro con modulo di elasticità superiore a 100 MPa, applicato in uno o più strati con spessore totale da 0,5 a 2...3 mm.

I rivestimenti a film sottile sono costituiti da soluzioni adesive come il BF-2 e altri. I rivestimenti impermeabili morbidi sono costituiti da vaselina

tecnica, miscele di paraffina e vaselina, grassi e lubrificanti a base di cera e plastilina per sculture.

Le miscele e i grassi o i composti a base di cera includono, oltre alla cera d'api, una serie di componenti plastificanti e sigillanti, poiché la cera ha un'adesione insufficiente ed è soggetta a screpolature a temperature inferiori allo zero.

I rivestimenti impermeabili solidi sono costituiti da composti polimerici e bituminosi. Ad esempio, il carbinol-cemento e l'epossidico, gli stucchi epossidici e altri.

I composti epossidici e gli stucchi sono preparati con resine epossidiche ED-5 e ED-6 con l'aggiunta di indurenti. Al composto vengono aggiunti plastificanti per ridurre la rigidità. I composti epossidici sono caratterizzati da un basso coefficiente di assorbimento dell'umidità (inferiore allo 0,05% in 24 ore), da una buona adesione alla maggior parte dei materiali e da una sufficiente resistenza agli agenti aggressivi. Gli svantaggi sono la fragilità, la tendenza alla fessurazione e all'interruzione dei legami adesivi sulla superficie di contatto durante la deformazione, nonché la tossicità.

2.8. Montaggio degli estensimetri per uso generale

Il montaggio degli estensimetri, a seconda del tipo e delle condizioni di prova, viene eseguito mediante incollaggio o saldatura alla superficie in esame, nonché mediante incorporazione all'interno degli elementi in esame di materiali adesivi, ad esempio plastica in fibra di vetro.

L'incollaggio di estensimetri generici destinati a misurazioni di deformazioni fino a ± 1 % nell'intervallo di temperature climatiche viene effettuato nella maggior parte dei casi con adesivi indurenti a freddo dei gruppi nitrocellulosa e cianoacrilato. L'incollaggio degli estensimetri termocompensati utilizzati nell'intervallo 175...475 K viene effettuato con adesivi termoindurenti dei gruppi fenolico, viniflex e furano, a seconda del materiale dell'oggetto di misura e dell'intervallo di temperatura operativa. Per il montaggio di estensimetri per alte temperature che operano a temperature di 525...575 K, si utilizzano leganti organosiliconici.

La tecnologia di incollaggio con gli adesivi di tutti i gruppi elencati, ad eccezione degli adesivi espressi del gruppo cianoacrilico, si riduce alle seguenti operazioni:

- immediatamente prima dell'incollaggio, i punti di montaggio degli estensimetri vengono puliti dalla polvere e strofinati con un tampone inumidito con alcol etilico o etere per rimuovere la condensa dell'acqua;

- un sottile strato di colla viene applicato a pennello sulle aree preparate dell'oggetto di misura; contemporaneamente lo stesso strato viene applicato sulla superficie di contatto della base dell'estensimetro e fatto asciugare per 10-15 minuti;

- il secondo strato di colla, più spesso, viene applicato sull'estensimetro e tenuto per 2-3 minuti fino a quando non si addensa;

- l'estensimetro viene orientato in base ai segni di marcatura nel luogo di installazione e premuto saldamente sulla superficie;

- Il film di fluoroplastica o triacetato viene posizionato sopra l'estensimetro, dopodiché la colla in eccesso viene rimossa con un dito o un rullo di gomma;

- l'estensimetro incollato viene tenuto per 1-2 ore sotto pressione (carico) al ritmo di circa 0,2...0,3 MPa;

- dopo la rimozione della pressione, l'estensimetro viene liberato dalla pellicola e asciugato fino alla completa rimozione del solvente in eccesso, di solito entro 1-2 giorni. Un segno oggettivo del completamento dell'asciugatura è la stabilizzazione della resistenza di isolamento rispetto alla superficie in esame (per i materiali conduttivi);

- nel caso in cui l'incollaggio degli estensimetri venga effettuato con un adesivo termoindurente, dopo l'asciugatura si esegue un normale trattamento termico secondo le modalità raccomandate per questo adesivo; durante il periodo di trattamento termico gli estensimetri devono essere sottoposti a una pressione fino a 0,3...0,5 MPa;

- dopo l'essiccazione o la polimerizzazione degli estensimetri incollati, verificare la qualità dell'incollaggio e la corretta posizione degli estensimetri rispetto ai segni di marcatura; verificare inoltre la rettilinearità della filettatura della griglia, la presenza di un circuito elettrico, la resistenza e il livello di isolamento degli estensimetri rispetto alla superficie in esame.

L'incollaggio degli estensimetri con l'adesivo cianoacrilato espresso cyacrin-30 può essere eseguito dopo una preliminare preparazione della base di carta con un adesivo per estensimetri, seguita da asciugatura o polimerizzazione. Gli estensimetri con base in film non necessitano di pre-impregnazione. L'ampolla di polietilene con la colla viene tolta dal frigorifero e mantenuta alla temperatura di 295 ± 10 K per 15 ± 20 minuti.

Quindi si pratica un foro del diametro di circa 0,3 mm nella fiala e si applica un sottile strato di colla sulla superficie di contatto della base dell'estensimetro. Subito dopo l'applicazione della colla, l'estensimetro viene posizionato il più accuratamente possibile sul punto contrassegnato e tenuto sotto pressione per 1 minuto. L'asciugatura successiva avviene a temperatura normale e con un'umidità del 50...80% per 6 ore.

In tutti i casi è necessario utilizzare materiale didattico con una descrizione dettagliata della tecnologia di incollaggio con un particolare adesivo di montaggio. I requisiti tecnologici generali per l'incollaggio degli estensimetri sono riportati nelle descrizioni.

Contemporaneamente all'incollaggio degli estensimetri, installare e incollare le piazzole di montaggio in materiale isolante con conduttori terminati per la saldatura degli estensimetri e dei fili patch. Le piazzole sono incollate vicino al bordo trasversale della base dell'estensimetro dal lato dei fili conduttori. Le piastre di montaggio proteggono gli estensimetri dalle rotture durante il montaggio ed eliminano la possibilità di cortocircuiti durante le misurazioni.

Il livello di isolamento degli estensimetri incollati non deve essere inferiore a 50...100 Mohm se le misurazioni vengono eseguite in condizioni normali e le deformazioni previste non superano l'1%.

2.9. Estensimetri a semiconduttore

I materiali principali per gli estensimetri a semiconduttore sono attualmente il silicio e il germanio, con il silicio più utilizzato per la sua minore sensibilità alla temperatura. Vengono utilizzati anche composti semiconduttori come l'arseniuro di gallio GaAs e altri.

A seconda dei materiali utilizzati, gli estensimetri a semiconduttore possono essere suddivisi in due gruppi: monocristallini e policristallini. Gli estensimetri monocristallini comprendono gli estensimetri ottenuti per taglio da un singolo cristallo; i cristalli aghiformi ottenuti per crescita dalla fase gassosa; i film epitassiali e le dendriti. Quelli policristallini comprendono le tensoliti, che sono miscele artificiali, ad esempio, di carbonio (o nerofumo) e vernice di bachelite.

I materiali per gli estensimetri a semiconduttore devono avere il più alto coefficiente di sensibilità alla deformazione (SSC) e il più basso coefficiente di resistenza alla temperatura (TCR), oltre a garantire la stabilità dei parametri estensimetrici.

Un'operazione molto importante nella produzione di estensimetri a semiconduttore è la creazione del contatto metallo-semiconduttore, che si ottiene con vari metodi: saldatura, fusione, saldatura, sputtering, rivestimento elettrochimico o chimico.

Di sicuro interesse sono gli estensimetri a semiconduttore costituiti da nastri dendritici di germanio, che si sono diffusi grazie a una tecnologia di produzione semplice ed economica. Le dendriti sono cristalli a forma di albero, di ago o di lamelle con una complessa struttura gemellare che si formano per cristallizzazione in una fusione superraffreddata o in una fase gassosa supersatura.

Gli estensimetri di germanio a deformazione dendritica sono caratterizzati da una resistenza meccanica ridotta rispetto agli estensimetri realizzati con lingotti a cristallo singolo. I vantaggi degli estensimetri dendritici includono la semplicità di fabbricazione e la relativa economicità (rispetto ad altri estensimetri a semiconduttore, gli estensimetri dendritici sono i più economici). La produzione di estensimetri dendritici al germanio non richiede attrezzature speciali (ad esempio, macchine per la rettifica e il taglio) e si riduce al taglio trasversale dell'ago di corindone a nastro dendritico, alla rottura dell'estensimetro e alla saldatura dei conduttori elettrici con saldature speciali. Per la produzione di estensimetri si utilizza principalmente il nastro dendritico di germanio con resistenza specifica $\rho = 1 \pm 0,2 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$. I parametri di questi estensimetri dipendono fortemente dalla temperatura.

Gli estensimetri a semiconduttore possono essere suddivisi in estensimetri a semiconduttore legati e non legati in base alla struttura. Gli estensimetri a semiconduttore legati possono essere utilizzati con o senza substrato.

Gli estensimetri a semiconduttore senza substrato si differenziano per la forma della sezione trasversale, il materiale e il metodo di creazione del contatto ohmico. Il loro design è in gran parte determinato dalla tecnologia di produzione. Il tipo più comune di estensimetro è una barra.

Gli estensimetri ottenuti per crescita dalla fase gassosa sono aghi monocristallini con un diametro di 10 - 100 micron. Il progetto di un estensimetro di questo tipo con un substrato è mostrato in fig. 2.6.a. La costruzione di un estensimetro a film è mostrata in fig. 2.6.b; gli estensimetri sono realizzati sotto forma di una singola striscia conduttiva, ricoperta da

uno strato di vernice. La tabella 2.1 riporta i parametri di alcuni estensimetri a semiconduttore.

L'applicazione principale degli estensimetri a semiconduttore è nei sensori di pressione, forza e sollecitazione. L'applicazione degli estensimetri a semiconduttore negli accelerometri è promettente.

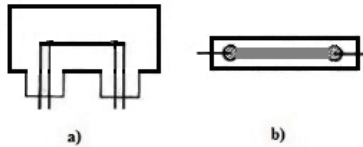


Fig. 2.6. Modelli di alcuni estensimetri a semiconduttore: a - estensimetro a cristallo ad ago con substrato, b - estensimetro a film.

Tabella 2.1. Specifiche di alcuni estensimetri a semiconduttore

Parameter	Strain gauge type				
	p-Si	p-Si	n-Si	n-Ge (dendrite)	n-Ge
ρ , Ohm•cm	0,017	0,02	0,35	0,25	0,8
Dimensions, mm					
length	12,7; 4,4	5	5	10	3,5
thickness	0,017	0,03-0,05	0,1	0,15-0,22	0,5
width	0,5	0,3	0,8	0,7-2,0	0,2
Nominal resistance at 20 °C	350;120	100-200	150-400	50-200	350
Strain sensitivity coefficient at 20 °C	130	135	-133	-100	-
Operating current, mA	20;35	20-40	10-20	20-35	5
Maximum operating temperature, °C	+300	+500	-	+150	-

2.10. Effetto piezoresistivo nei semiconduttori e estensimetro basato su di esso

Utilizzando i metodi dell'analisi matematica, considereremo la fisica dell'effetto piezoresistivo nei materiali solidi. Ci concentreremo su semiconduttori come il Si in massa e sotto forma di film di silicio su substrati isolanti. Considereremo l'uso pratico dell'effetto per creare trasduttori di misura delle deformazioni meccaniche - gli estensimetri. Vengono forniti esempi di progetti di sensori e le loro principali caratteristiche e capacità. Si analizzano i vantaggi e gli svantaggi degli estensimetri a semiconduttore.

I risultati degli studi sperimentali sono qui presentati per film di silicio impiantati con ioni su substrati di silicio semi-isolanti con uno strato di SiO_2 sulla superficie. La maggior parte dei risultati ottenuti può essere utilizzata per lo sviluppo di estensimetri basati su altri semiconduttori.

È noto che le proprietà elettrofisiche dei semiconduttori sono 10-100 volte più sensibili alle sollecitazioni meccaniche rispetto a quelle dei metalli. Allo stesso tempo, una serie di ragioni impedisce l'uso pratico e diffuso dei materiali semiconduttori nella misurazione delle deformazioni. Le principali sono la dipendenza dalla temperatura dei parametri elettrofisici di tali estensimetri (trasduttori di misura), la bassa resistenza meccanica e la rigidità, che portano allo scorrimento delle letture, e la significativa sensibilità alla deformazione trasversale.

Lo sviluppo della scienza e della tecnologia è impossibile senza migliorare i mezzi di monitoraggio dei vari parametri fisici. Ciò vale anche per gli estensimetri, che oggi sono richiesti in condizioni quali temperature criogeniche, forti campi magnetici, esposizione a radiazioni, ecc.

Come è noto, l'effetto piezoresistivo è una variazione della resistenza elettrica di un materiale sottoposto a sollecitazione meccanica. È noto che la variazione della resistenza elettrica in questo caso si verifica per due motivi: a causa di cambiamenti nelle dimensioni geometriche e a causa di cambiamenti nella mobilità dei portatori di carica e, di conseguenza, nella conduttività del materiale. Il primo motivo riguarda i metalli, in cui la mobilità dei portatori di corrente sotto l'impatto meccanico praticamente non cambia, e la resistenza si modifica a causa dei cambiamenti di dimensione durante la deformazione - fig. 2.7.

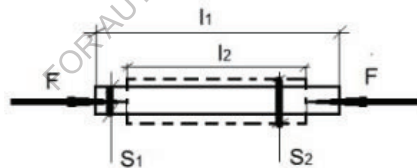


Fig. 2.7. Variazione delle dimensioni l - lunghezza, S - area della sezione trasversale del campione sotto l'azione meccanica di una forza F .

La resistenza elettrica R del materiale è determinata dalla precedente espressione (2.1):

$$R = \rho l / S,$$

dove ρ è la resistività, l è la lunghezza del campione e S è l'area della sezione trasversale.

Come si può capire dalla fig. 2.7 e dall'espressione (2.1), la resistenza elettrica del campione diminuisce in compressione a causa della diminuzione della lunghezza $\Delta l = l_1 - l_2$ e dell'aumento della sezione trasversale $\Delta S = S_2 - S_1$, e aumenta in tensione.

Nei semiconduttori con reticolo cubico, per il caso generale in cui la direzione della sollecitazione meccanica σ e la densità di corrente j sono angoli arbitrari, l'effetto piezoresistivo è descritto teoricamente dai coefficienti piezoresistivi π_{ij} ($\pi = \Delta\rho/\rho_o X$, dove $\Delta\rho$ è la variazione di resistività, ρ_o è la resistività iniziale, X è la sollecitazione meccanica) o elastoresistivi m_{ij} , che sono tensori di quarto grado. Questi coefficienti sono correlati tra loro attraverso i coefficienti di malleabilità e i moduli elastici. Per i cristalli della classe di simmetria a cui appartiene il silicio, è sufficiente conoscere tre coefficienti nel sistema di assi cristallografici per descrivere l'effetto piezoresistivo: π_{11} , π_{12} , e π_{44} , che sono talvolta chiamati coefficienti piezoresistivi principali. I coefficienti piezoresistivi principali dipendono da molti fattori: materiale, tipo di conducibilità, resistività, livello di drogaggio, temperatura e quantità di deformazione meccanica (stress).

Ad esempio, in letteratura sono note varie combinazioni di coefficienti di piezoresistenza per le direzioni di sollecitazione meccanica e densità di corrente che coincidono con determinati assi cristallografici. Tutti e tre i principali coefficienti di piezoresistenza possono essere determinati mediante tre misurazioni in direzioni diverse. Il tensore di piezoresistenza completo π_{ijkl} è definito come segue:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_o} = \sum_{kl}^3 \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.10),$$

dove σ_{kl} è il tensore delle sollecitazioni, $\Delta\rho_{ij}$ è il tensore della resistività. È noto che il tensore delle sollecitazioni è un tensore simmetrico e ha sei componenti indipendenti. Lo stesso vale per il tensore della resistività.

Tenendo conto di ciò, nello spazio a sei dimensioni, possiamo ottenere:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_o} = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \sigma_j, i=1,2,\dots,6 \quad (2.11)$$

Per l'*n-Si* bulk con drogaggio uniforme e $\rho = 11,7$ Ohm-cm, i seguenti valori sono riportati in articoli scientifici: $\pi_{11} = -102,2 \cdot 10^{-11}$ m² /N, $\pi_{12} = 53,7 \cdot 10^{-11}$ m² /N, $\pi_{44} = -13,6 \cdot 10^{-11}$ m² /N, e per il *p-Si* con $\rho = 7,8$ Ohm-cm, $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11}$ m² /N, $\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11}$ m² /N, $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11}$ m² /N.

Nei strati di silicio con drogaggio per diffusione, i coefficienti piezoresistivi sono determinati dalla concentrazione dell'impurità sulla superficie dello strato N_n e quasi non dipendono dalla legge di distribuzione delle impurità. Dai risultati ottenuti in vari lavori, è chiaro che per gli strati di n-Si, il coefficiente π_{11} a temperatura ambiente varia da $17 \cdot 10^{-11}$ m² /N

($N_n = 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) a $88 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$ ($N_n = 1,8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Una notevole dipendenza dalla temperatura di π_{11} inizia con $N_n = 9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (circa 0,1 %/K).

A causa delle peculiarità della struttura a bande dell'*n-Si*, sono valide le ipotesi per il silicio a basso drogaggio:

$$\pi_{44} \approx 0; \pi_{11} \approx -2 \pi_{12} .$$

All'aumentare della concentrazione di impurità, si verifica una violazione di queste ipotesi, che deve essere presa in considerazione quando si analizzano le caratteristiche degli effetti di deformazione. Per gli strati di diffusione, le violazioni si verificano a $N_n \geq 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

A seconda dell'orientamento cristallografico del campione di silicio, si ottengono diverse combinazioni di coefficienti di piezoresistenza longitudinali e trasversali. È importante tenerne conto quando si progettano estensimetri, soprattutto quelli il cui elemento sensibile funzionerà in condizioni di deformazione monoassiale e i cui componenti dell'elemento sensibile saranno orientati sia in senso longitudinale che trasversale. Utilizzando i dati di letteratura, si può calcolare che per il *p-Si* a bassa lega, i rapporti ottimali tra le orientazioni longitudinali e trasversali sono $110 \perp 110$, e per il *n-Si* $100 \perp 010$. Per campioni di *p-Si* debolmente legato con orientamento longitudinale $\langle 110 \rangle$, ad esempio, si può ottenere $\pi_{11} \approx 72 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$, e $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$ (π_{11} è il coefficiente di piezoresistenza longitudinale, π_{\perp} è il coefficiente di piezoresistenza trasversale).

Analizzando i dati noti in letteratura, si può osservare che le relazioni valide per il *p-silicio* puro sono violate per il *p-Si* in un materiale fortemente legato. Allo stesso tempo, la sensibilità alla deformazione per alcune direzioni può aumentare rispetto al silicio puro, il che può essere spiegato da un aumento del contributo dei fori pesanti.

Sono noti altri fattori che determinano in modo significativo le caratteristiche dell'estensimetro. Ad esempio, l'influenza delle dimensioni geometriche sui parametri estensimetrici è significativa. Alcuni studi hanno dimostrato che non tutta la deformazione viene trasmessa dall'oggetto deformato in esame all'elemento sensibile dell'estensimetro, anche con un legante rigido. La deformazione trasmessa dipende dalle dimensioni dell'estensimetro, dalle sue proprietà elastiche e dalle proprietà del legante con cui il sensore è fissato alla trave. Questo effetto può essere spiegato dal coefficiente di trasmissione, il cui valore (per il caso in cui l'estensimetro sia posizionato al centro del campione) può essere determinato dalla formula:

$$k_{nep} = 1 - \frac{2}{bl} \left(1 - e^{-b/l} \right) \quad (2.12)$$

dove, $b = \sqrt{GC/EQ}$, G è il modulo di taglio del legante, E è il modulo elastico dell'elemento sensibile (campione), Q è l'area della sezione trasversale del campione, $C = \frac{2\pi}{\ln \frac{4h_c}{h}}$, h è lo spessore del campione, h_c è lo spessore del legante, l è la lunghezza del campione.

Per lo studio e lo sviluppo di trasduttori di misura, sono stati utilizzati sottili film di silicio policristallino drogati con fosforo e boro mediante impiantazione ionica sul piano (100) del silicio monocristallino con uno strato isolante di SiO_2 . Tali strutture possono essere tecnologicamente più avanzate quando si utilizzano tecnologie planari per la produzione di trasduttori di misura.

La resistività ρ , i coefficienti di sensibilità alla deformazione longitudinale $k_{II} = \Delta\rho_{II} / \rho \cdot \varepsilon_{III}$ (dove $\Delta\rho_{II}$ è la variazione di resistività lungo la direzione di deformazione ε_{II}) e trasversale $k_{\perp} = \Delta\rho / \rho_{\perp\perp} \cdot \varepsilon_{II}$ (dove $\Delta\rho_{\perp}$ è la variazione di resistività perpendicolare alla direzione di deformazione ε_{II}) sono stati misurati sperimentalmente, coefficienti di piezoresistenza $\pi_{II} = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$ e $\pi_{\perp} = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$, dipendenza dalla temperatura e dalla deformazione dei parametri dei trasduttori sperimentali.

I coefficienti di piezoresistenza sono stati misurati utilizzando una trave di acciaio a sbalzo di uguale resistenza alla flessione, sulla quale il campione è stato incollato con l'adesivo BF-2, e caricando direttamente i campioni. Confrontando i risultati ottenuti, è possibile calcolare il valore del coefficiente di trasferimento della deformazione e valutare la sua coincidenza con quello calcolato teoricamente con la formula (2.12). I film utilizzati sono di tipo n su un piano di silicio (100). Lo spessore dei film è di 0,6 μm , la concentrazione dell'impurità di fosforo in lega è di $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La resistività è di 0,013 ohm-cm. Le misure sono state eseguite su campioni (estensimetri) di dimensioni $8 \times 0,6 \times 0,4 \text{ mm}$ con un film sulla superficie.

Quando si misura con una trave e si utilizza il valore della deformazione calcolato con la nota formula $\varepsilon_b = h\delta / l_b^2$ (dove h è lo spessore della trave, l_b è la lunghezza della trave, δ è lo spostamento dell'estremità libera della trave), i valori dei coefficienti di sensibilità alla deformazione $k_{II}^b (\varepsilon_{II} \langle 110 \rangle ; J \langle 110 \rangle) - k (\varepsilon \langle 110 \rangle ; J \langle 110 \rangle) -27,3$ e -2.110 ; $J_{II} \langle 110 \rangle$ i $k_{\perp}^b (\varepsilon_{II} \langle 110 \rangle ; J_{\perp} \langle 110 \rangle) -27,3$ e -2.8 , rispettivamente.

Per misurare la sensibilità alla deformazione con il metodo del carico diretto, il campione è stato messo a sbalzo e applicato un carico di flessione. L'errore di misurazione dei coefficienti con questo metodo non ha superato il 4%. I seguenti valori sono stati ottenuti a temperatura ambiente: $\pi_{\parallel} = -24,9$ e $\pi_{\perp} = -2,4$. Se utilizziamo i coefficienti di elasticità noti per il silicio e calcoliamo k , otteniamo $k_{\parallel} = -39,1$, $k_{\perp} = -3,8$. Confrontando, si ottiene il coefficiente di trasmissione sperimentale $k_{tr}^e = 0,71$

Per confronto, le misure sono state effettuate con il metodo del carico diretto. Sostituendo i parametri delle condizioni di misura nella formula (2.12) (per $h_c = 0,15$ mm), si ottiene il valore teorico $k_r = 0,68$. Pertanto, i parametri di trasferimento della deformazione determinati sperimentalmente e teoricamente coincidono praticamente.

È stato inoltre riscontrato che nei film di *p-Si* impiantati con ioni con una concentrazione di impurità pari a $N_p = (10^{18} - 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$, ad esempio, i coefficienti di sensibilità alla deformazione longitudinale e trasversale k ($k = \Delta\rho/\rho_o \varepsilon$, ε è la deformazione meccanica relativa) per l'orientamento longitudinale $\langle 100 \rangle$ erano vicini in valore ed erano almeno $k = 30$. Ciò può essere spiegato dalla policristallinità del film e dalle peculiarità della struttura a bande del *silicio p*, che possono determinare l'effetto della deformazione mediante fori leggeri in un materiale debolmente legato, mentre il loro contributo diminuisce in un materiale fortemente legato.

Il meccanismo di trasmissione della deformazione porta al fatto che, come stabilito dal rapporto tra la larghezza d del sensore e l'altezza h $d/h < 2$, la deformazione trasversale dell'oggetto non viene praticamente trasmessa alla sua superficie. Questa proprietà è utilizzata per la fabbricazione di estensimetri sperimentali (trasduttori di misura).

Per la fabbricazione di trasduttori meccanici di deformazione, sono stati utilizzati film di polisilicio di conducibilità *di tipo n* e *p*, con spessore di $0,6 \mu\text{m}$ e livelli di drogaggio $(1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$. Fondamentalmente, nell'esperimento sono stati utilizzati campioni con film *di tipo p* con orientamento longitudinale $\langle 100 \rangle$ e trasversale $\langle 010 \rangle$, poiché per il *silicio* policristallino *p* altamente drogato i coefficienti trasversali e longitudinali per questo orientamento si dimostrano vicini in valore. L'impurità di lega per il *silicio p* era il boro.

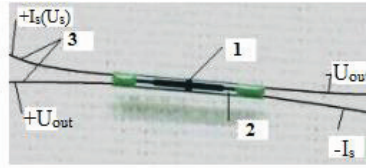


Fig. 2.8. Sensore di deformazione. 1 - microcircuito sensibile alle deformazioni; 2 - substrato; 3 - terminali elettrici; $I_s (U_s)$ - corrente o tensione di alimentazione, U_{out} - tensione di uscita.

La Fig. 2.8 mostra un'immagine di un tipo di trasduttore di deformazione (sollecitazione) e la polarità dell'alimentazione e dei dispositivi di misura. È costituito da un elemento sensibile integrale 1 realizzato sulla base di un film di silicio depositato su un substrato di silicio monocristallino 2 con uno strato di ossido sulla superficie.

I conduttori elettrici 3 sono realizzati in filo di alluminio $d=80 \mu\text{m}$, le cui estremità sono dotate di strisce di metallo che possono essere saldate con saldature convenzionali. Il design e l'esecuzione integrale dell'elemento sensibile del sensore garantiscono la compensazione termica dei parametri principali, la compensazione dell'influenza del campo magnetico e l'assenza di sensibilità alla deformazione trasversale. La dimensione della base del sensore è di 8 mm, le resistenze elettriche di ingresso R_{in} e di uscita R_{out} dipendono dal livello di drogaggio e dallo spessore del film e sono comprese nell'intervallo (200 - 3000) Ohm, la corrente di alimentazione dipende dal valore della resistenza ed è solitamente compresa nell'intervallo (1 - 10) mA. La differenza nella resistenza elettrica dei sensori di un lotto non supera il 5% e, se necessario, è possibile formare un lotto di sensori con caratteristiche tecniche quasi identiche.

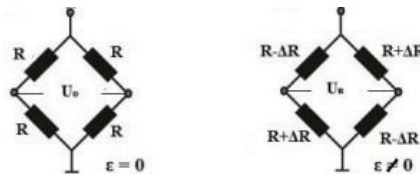


Fig. 2.9. Schema dell'elemento di rilevamento dell'estensimetro.

Il principio di funzionamento dell'estensimetro consiste nel modificare la resistenza elettrica degli elementi resistivi del circuito integrato quando viene applicata una deformazione meccanica lungo l'asse del sensore (fig. 2.9), per compensare il circuito e, di conseguenza, generare una tensione

elettrica U_{out} sui contatti di misura quando il sensore è alimentato in corrente o in tensione (vedi fig. 2.9). Dopo aver pre-programmato il sensore, cioè aver ottenuto la dipendenza della tensione di uscita U_{out} dal valore della deformazione meccanica, la deformazione dell'oggetto viene determinata dal valore della tensione di uscita del sensore fissato rigidamente all'oggetto:

$$\varepsilon = (U_{out} - U_o)/k \quad (2.13)$$

dove U_{out} è il segnale di uscita del sensore dopo la comparsa della deformazione ε dell'oggetto in esame, U_o è il segnale di uscita iniziale misurato dopo il montaggio del sensore sull'oggetto, $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$ è la sensibilità alla deformazione del sensore.

Per montare il sensore sull'oggetto in prova, si possono usare i collanti BF-2, BC-350 e altri, che sono ampiamente utilizzati negli estensimetri e forniscono una sufficiente rigidità di montaggio. L'ammissibilità dell'uso di questo legante può essere verificata in base al valore delle letture del sensore che strisciano dopo aver caricato la trave di prova, che non deve superare l'errore di misura ammissibile.

Di seguito sono riportati i risultati di uno studio più dettagliato dei trasduttori di misura con $R_m = 1,7 \text{ k}\Omega$ ($N_p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). La sensibilità a una corrente di alimentazione di 2 mA è di circa $42 \text{ }\mu\text{V/mln}^{-1}$ ($42 \text{ }\mu\text{V/URD}$). Il valore del segnale di uscita zero (iniziale) del sensore U_o è di $\sim 6,2 \text{ mV}$ e, se necessario, può essere regolato vicino allo zero. La dipendenza dalla temperatura della sensibilità alla deformazione è leggermente superiore allo $0,02 \text{ \% /K}$, $U_o \sim 8 \text{ }\mu\text{V/K}$, $R \sim 0,03 \text{ \% /K}$. Le caratteristiche possono essere modificate, ad esempio aumentando la corrente di alimentazione (senza surriscaldamento e rumore inaccettabile), per aumentare la sensibilità.

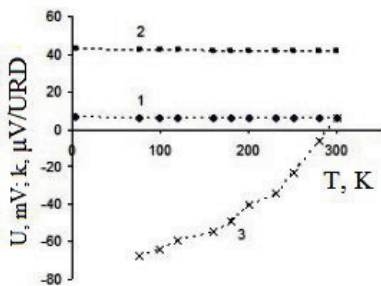


Fig. 2.10. Dipendenza dalla temperatura del segnale di uscita zero (deformazione relativa $\varepsilon = 0$) (1), della sensibilità alla deformazione $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$ (2) e del segnale di uscita del sensore incollato a una piastra d'acciaio (3).

La Fig. 2.10 mostra la dipendenza dalla temperatura del segnale di uscita zero (deformazione relativa $\varepsilon = 0$) (1), della sensibilità alla deformazione $k = \Delta U_V / \Delta \varepsilon$ (2) e del segnale di uscita del sensore incollato alla piastra di acciaio (3). Quest'ultimo monitora le sollecitazioni termiche.

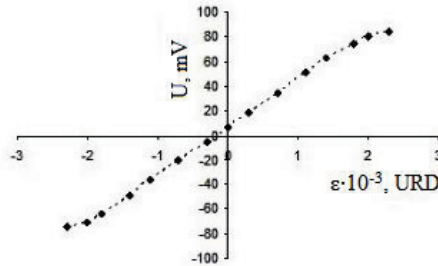


Fig. 2.11. Dipendenza della tensione di uscita U_{out} dal valore della deformazione applicata.

La Fig. 2.11 mostra la dipendenza della tensione di uscita U_{out} dal valore della deformazione applicata. Il grafico indica una buona linearità della caratteristica fino a deformazioni di circa $1 \cdot 10^3$ URD. La sensibilità alla deformazione del sensore studiato, come si può vedere dal grafico, è pari a $42 \mu\text{V/URD}$.

Se consideriamo il funzionamento di un estensimetro a ponte, in cui una coppia di resistenze ha un segno dell'effetto di deformazione e l'altra ha il segno opposto (purché le resistenze siano uguali), possiamo ottenere la seguente espressione per la tensione nella diagonale del ponte:

$$U = I R_{o0} [(k_{II} + k_{\perp})/2] \varepsilon \quad (2.14).$$

Se $|k_{II}| = |k_{\perp}| = k$, allora $U = I_o R_o k \varepsilon$,

dove k è il coefficiente di sensibilità alla deformazione del braccio del ponte (resistenza), I_o è la corrente di alimentazione del circuito del ponte, R_o è la resistenza iniziale della resistenza del circuito.

Ciò, la tensione di uscita a una corrente di alimentazione costante è lineare nella regione di linearità della dipendenza di $k(\varepsilon)$ dell'estensimetro o della costanza del valore di k . La non linearità sperimentale osservata dopo $\varepsilon > 1 \cdot 10^3$ URD (mln^{-1}) può essere correlata sia alle proprietà elettrofisiche del film di silicio sensibile sia alle proprietà del legante.

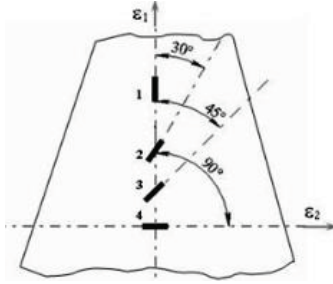


Fig. 2.12. Disposizione degli estensimetri nello studio del caso di divergenza dell'asse del sensore e della direzione della deformazione principale ε_1

Abbiamo anche studiato l'errore delle misure di deformazione con gli estensimetri in condizioni in cui l'asse della base del sensore non coincide con la direzione della deformazione principale dell'oggetto. La Fig. 2.12 mostra la direzione della deformazione principale ε_1 della trave e la disposizione dei sensori sulla trave. I sensori sono stati fissati con colla BF-2. L'asse di base del sensore 1 coincide con la direzione della deformazione principale ε_1 , il sensore 2 è posizionato con un angolo di 30° rispetto a ε_1 , il sensore 3 con un angolo di 45° e il sensore 4 con un angolo di 90° (coincidente con la deformazione principale ε_2). Tutti i sensori sono stati prelevati dallo stesso lotto prodotto con la stessa modalità tecnologica.

Il valore della deformazione misurata ε_φ è stato determinato con la formula (2.13). Le deformazioni calcolate, utilizzate per il confronto con quelle ottenute sperimentalmente, sono state determinate con la formula:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (2.15)$$

dove φ è l'angolo tra la direzione ε_1 e la direzione per la quale si calcola la deformazione.

La deformazione ε_2 è stata calcolata con la formula $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$ (dove μ è il rapporto di Poisson). I risultati dello studio sono riportati nella tabella 2.2.

Tabella 2.2. Dipendenza delle deformazioni ε_φ calcolate e ε_e sperimentali dall'orientamento del sensore rispetto all'asse principale.

φ	0°	30°	45°	90°
ε_φ , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,68 \cdot 10^3$	$0,37 \cdot 10^3$	$-0,25 \cdot 10^3$
ε_ε , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,64 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$	$-0,24 \cdot 10^3$

La differenza maggiore tra ε_φ e ε_ε si osserva per $\varphi = 30^\circ$ ed è del 6%, pari al livello dell'errore sperimentale. I risultati indicano che la sensibilità alla deformazione trasversale dei sensori è insignificante.

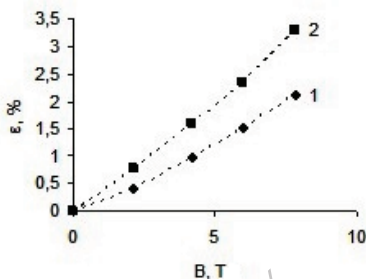


Fig. 2.13. Dipendenza dell'errore di misura in un campo magnetico a 4,2 K: 1 - sensore non deformato, 2 - deformato a $\varepsilon = 10^3$ URD.

La Fig. 2.13 mostra i risultati dello studio di uno dei sensori in un campo magnetico a $T = 4,2$ K. La curva (1) corrisponde al valore di deformazione che sembra verificarsi quando un campo magnetico agisce su un sensore non deformato ($\varepsilon = 0$), e la curva (2) su un sensore pre-deformato a $\varepsilon = 1 \cdot 10^3$ URD. Un campo di 7 T porta a un errore di circa il 3%.

È noto che l'accuratezza delle misure dipende in larga misura da un parametro come il creep delle letture. Il creep è determinato dalla rigidità della struttura del sensore e del legante ed è causato dalla deformazione plastica del legante (colla) sottoposta a deformazione meccanica. Di norma, per i sensori a semiconduttore, il creep è significativamente più elevato rispetto a quello dei sensori a lamina metallica.

Per i sensori in esame, il creep è probabilmente il principale inconveniente ed è dovuto alla struttura piuttosto rigida del trasduttore. I modi per ridurre il creep possono includere un'ulteriore miniaturizzazione e ottimizzazione della forma del sensore e la scelta di un legante.

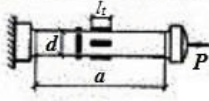
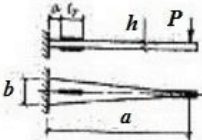
2.11. Trasduttori di deformazione e pressione per la misurazione di forza e pressione

I trasduttori di forza e pressione ad estensimetri sono utilizzati in un'ampia varietà di applicazioni, in quanto possono misurare forze e pressioni nell'intervallo da alcuni milli- a diversi MN utilizzando elementi elastici (travi) di varie forme e dimensioni. Quando si progettano gli estensimetri (trasduttori di forza e pressione), si presta particolare attenzione a garantire la minima deformazione possibile del sistema che percepisce la forza e la pressione e a compensare l'influenza delle componenti laterali della forza che derivano dalle eccentricità. Per evitare le eccentricità, vengono comunemente utilizzati supporti intermedi per sfere e segmenti e diaframmi elastici flessibili lungo l'asse della forza e rigidi al di là di esso. Per ridurre l'isteresi nei punti di accoppiamento degli elementi dei trasduttori di forza e pressione, si raccomanda l'uso di giunti elastici.

Per la misurazione di forze elevate da 10 kN a 10 MN, nei trasduttori di forza e di pressione si utilizzano elementi elastici di varie forme costruttive (travi). Il più semplice è l'elemento elastico a barra, utilizzato per misurare forze da 50 kN a 5 MN. Per garantire una distribuzione uniforme delle sollecitazioni sulla sezione trasversale dell'elemento elastico nella zona dell'estensimetro, il rapporto tra altezza e dimensione trasversale deve essere almeno pari a 3. L'aumento di questo rapporto oltre 5 può causare una perdita di stabilità. Per aumentare la stabilità, si utilizza un diaframma elastico di centraggio o un sistema di giunti elastici.

I trasduttori di forza e pressione per la misurazione di piccole forze (fino a 10 kN) hanno, di norma, elementi elastici a fascio. Sono diffusi anche gli estensimetri sotto forma di anelli pieghevoli che operano su deformazioni a due cifre. Gli elementi elastici ad anello hanno una sensibilità relativamente elevata con una sufficiente rigidità rispetto al piano di azione della forza.

Tabella 2.3. Schemi di calcolo e formule per la caratterizzazione di alcuni elementi elastici semplici dei trasduttori di forza e pressione.

Type of elastic element	Elastic element diagram	Calculation formula
Rods	 $a > 5d; l_t < a/5$	$\frac{4P10^6}{\pi d^2 E}$
Beam	 $a_t > b; l_t < a/2$	$\frac{6Pa10^6}{bh^2 E}$

2.12. Trasduttori elettromeccanici

I trasduttori elettromeccanici hanno la forma di un dispositivo meccanico a contatto che opera sotto l'azione di una grandezza fisica mutevole, che viene misurata. Possono essere realizzati in diversi design. Di solito i contatti hanno una forma semplice e funzionano in modo discreto, come, ad esempio, un interruttore bimetallico (fig. 2.13).

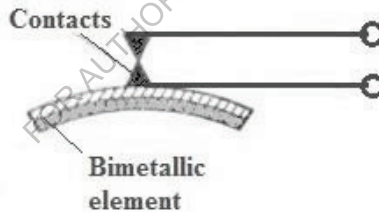


Fig. 2.13. Esempio di elemento bimetallico funzionante come trasduttore elettromeccanico

Quando il valore misurato supera il punto di commutazione, il contatto si apre o si chiude, generando un segnale di uscita del trasduttore nel circuito chiuso o aperto.

I trasduttori elettromeccanici sono generalmente digitali (discreti) perché i loro contatti possono trovarsi solo in due posizioni e rappresentano un elemento on-off.

2.13. Trasduttori di accelerazione. Accelerometri.

Gli accelerometri sono trasduttori che misurano l'accelerazione di un oggetto, che acquisisce quando viene spostato rispetto alla sua posizione iniziale. Gli accelerometri sono utilizzati per misurare l'accelerazione degli spostamenti orizzontali, le accelerazioni causate dalla gravità terrestre e altre. Oggi gli accelerometri sono prodotti in serie sulla base di microsistemi elettromeccanici (MEMS).

Consideriamo i principi di funzionamento dei principali circuiti accelerometrici. La Fig. 2.14 mostra alcuni modelli di accelerometri ad estensimetri. L'accelerometro più semplice (a) consiste in una base, un elemento sensibile a sbalzo con estensimetri e una massa inerziale all'estremità. Il calcolo di un accelerometro di questo tipo si riduce alla determinazione della sezione trasversale e della luce della trave a sbalzo per l'azione di una forza pari al prodotto della massa per l'accelerazione misurata. Gli accelerometri di questo tipo sono utilizzati per misurare accelerazioni comprese tra 0...20g e 0...20000g con una gamma di frequenza compresa tra 0...15 e 1500 Hz. Da 15 a 1500 Hz. La frequenza naturale degli accelerometri a cantilever è determinata dalla rigidità del cantilever e dalla massa inerziale. L'intervallo di frequenza può essere esteso utilizzando elementi elastici senza massa concentrata. La forza che agisce su un accelerometro di questo tipo è determinata dal prodotto dell'accelerazione misurata per la massa del cantilever.

L'accelerometro illustrato nella figura 2.14.b) si differenzia per la presenza di un elemento di rilevamento a telaio con una massa inerziale sostenuta tra due travi a sbalzo. Rispetto agli accelerometri a sbalzo, in questo caso è possibile ottenere un fattore di conversione più elevato alle stesse frequenze naturali. L'elemento del telaio è progettato per essere fissato rigidamente ai puntoni a entrambe le estremità. Gli accelerometri a bassa frequenza sono solitamente dotati di smorzamento a liquido, per cui l'elemento sensibile si trova in un alloggiamento sigillato riempito, ad esempio, di liquido polissilossanico.

Gli accelerometri ad alta frequenza hanno una massa inerziale, collegata alla base attraverso un misuratore di forza di sezione solida o tubolare. L'accelerometro è orientato in modo che l'accelerazione misurata agisca lungo l'asse dell'elemento sensibile. Il calcolo di un accelerometro di questo tipo si riduce alla determinazione delle dimensioni del misuratore di forza caricato con una forza pari al prodotto dell'accelerazione e della massa.

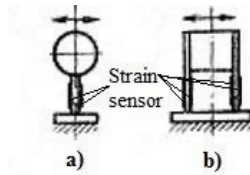


Fig. 2.14. Esempi di progetti di accelerometri.

2.14. Accelerometro a fascio di semiconduttori integrale

Le tecnologie della moderna microelettronica consentono di creare accelerometri miniaturizzati con caratteristiche metrologiche stabili. Ciò consente di applicarli in un'ampia varietà di dispositivi tecnici e di risolvere vari problemi scientifici, tecnici e produttivi.

A titolo di esempio, si consideri il noto **accelerometro a fascio integrato in silicio (trasduttore MEMS)**. Si tratta di un progetto micro-miniaturizzato illustrato in fig. 2.15. L'accelerometro è costituito da un cristallo di silicio orientato sul piano cristallografico ottimale in termini di proprietà tensimetriche. Una trave con un concentratore di sollecitazioni meccaniche ed estensimetri su di essa e una parte massiccia - la massa inerziale, che può essere realizzata con lo stesso silicio della trave o con un altro materiale, è fabbricata nel cristallo mediante incisione anisotropica. La trave è separata dalla base da un foro scanalato. Il cristallo di silicio è chiuso in alto e in basso da coperture in vetro con cavità incise, che formano una camera chiusa che protegge la trave e la cella di deformazione dall'ambiente esterno e limita il libero movimento della trave in caso di sovraccarico. Le coperture sono collegate al silicio mediante un accoppiamento anodico. Inoltre, sul coperchio superiore sono state realizzate delle piazzole di contatto alle quali sono collegati i conduttori esterni. Come riferiscono gli autori, le dimensioni dell'esempio di accelerometro considerato sono $2 \times 3 \times 0,6$ mm, massa 0,02 g, intervallo di accelerazioni misurate da 0,1 a 500 m/s^2 , nell'intervallo di frequenza da 0 a 100 Hz.

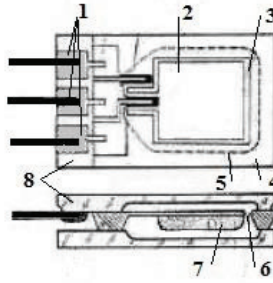


Fig. 2.15. Esempio di costruzione dell'accelerometro a fascio integrale. 1 - pattini di contatto; 2 - trave; 3 - traferro; 4 - silicio; 5 - intaglio nel coperchio; 6 - traferro; 7 - massa inerziale; 8 - coperchio in vetro

2.15. Trasduttori di misura delle vibrazioni. Vibrometri

I trasduttori inerziali a tensoresistenza per la misura delle vibrazioni (vibrometri) possono essere costruiti secondo gli schemi degli accelerometri e differiscono da questi ultimi solo per il rapporto tra le frequenze naturali e le frequenze dei processi oggetto di studio. Poiché le masse inerziali dei vibrometri sono relativamente più grandi e l'intervallo di ampiezza deve corrispondere all'ampiezza delle vibrazioni misurate, anche la progettazione dei vibrometri a bassa frequenza e degli accelerometri è leggermente diversa.

La Figura 2.16 mostra uno schema di un vibrometro inerziale in cui la massa inerziale è supportata da cuscinetti. La massa è mantenuta in uno stato di equilibrio da una molla di un elemento elastico (sospensione) e i suoi movimenti provocano la deflessione di una trave con gli estensimetri del trasduttore di spostamento 4. I vibrometri di questo tipo possono avere una frequenza naturale dell'ordine di alcuni hertz. I vibrometri a bassa frequenza sono caratterizzati da una certa instabilità del riferimento di zero dovuta all'influenza delle forze di attrito nei cuscinetti, che causa un campo di misura limitato.

Esistono anche vibrometri con massa inerziale a forma di pendolo. In esso, la massa inerziale sulla leva è mantenuta in posizione di equilibrio da due molle o da elementi di rilevamento elastici di trasduttori di spostamento.

Nei vibrometri a contatto, le vibrazioni vengono trasmesse all'elemento sensibile tramite un'asta. Durante le misurazioni, il corpo del vibrometro viene tenuto in mano o rafforzato su un supporto fisso.

I vibrometri sotto forma di sonde di vibrazione a contatto sono utilizzati nello studio delle strutture che collegano l'oggetto di studio a un supporto fisso. Come sonde di vibrazione è possibile utilizzare trasduttori di spostamento a tensoresistenza di qualsiasi tipo, il cui campo di misura corrisponde agli spostamenti di vibrazione dell'oggetto di ricerca. Una variante delle sonde di vibrazione a contatto sono le sonde di vibrazione portatili. Durante la misurazione, l'operatore tiene il corpo dello stilo tra le mani, premendo la punta contro l'oggetto in modo che il trasduttore di spostamento estensimetrico si trovi al centro del campo di misura.

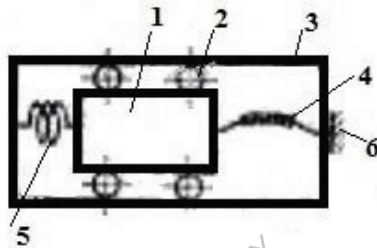


Fig. 2.16. Esempio di progettazione di un vibrometro: 1 - massa inerziale, 2 - cuscinetti, 3 - alloggiamento, 4 - trave con estensimetri, 5 - molla, 6 - montaggio della trave.

2.16. Trasduttore di pressione estensimetrico al silicio

Le membrane di silicio per la creazione di trasduttori di pressione sono abbastanza diffuse, gli effetti tensivi in tali membrane con diversi orientamenti cristallografici sono ben studiati, le tecnologie di lavoro con esse, la creazione di elementi sensibili estensibili su di esse e la loro connessione nei circuiti integrati sono elaborate. L'uso del silicio e delle moderne tecnologie microelettroniche rende possibile la creazione di sensori di pressione miniaturizzati per applicazioni mediche e altri compiti speciali in vari campi della scienza e della tecnologia.

Consideriamo uno dei trasduttori di pressione assoluta estensimetrici integrati descritti in letteratura. Ha la struttura mostrata in fig. 2.17. Il progetto consiste in un coperchio piatto di vetro, in cui è inciso un incavo, e in un cristallo di silicio con una sottile membrana, in cui sono realizzati quattro estensimetri, collegati in un circuito a ponte. La membrana è circondata da uno spesso anello di base in silicio. Al di sotto della membrana si trova un incavo nella lastra di vetro e la lastra stessa è incollata al cristallo di silicio per mezzo di un accoppiamento anodico. L'incollaggio anodico

viene effettuato riscaldando le piastre di vetro e di silicio fino a 400 °C e applicando successivamente una tensione di 600 V al silicio rispetto alla piastra di vetro messa a terra. L'accoppiamento anodico fornisce una connessione completamente ermetica, in modo che l'incavo nella piastra di vetro e la membrana formino una camera ermetica chiusa.

Secondo gli autori, le dimensioni esterne del trasduttore possono essere: 1,5x2,0x0,2 mm. La sensibilità è di 0,2 mV/(kPa· V). La deriva termica è equivalente a 250 Pa per 1 °C e la tensione di uscita varia linearmente fino a una pressione di 40 kPa.

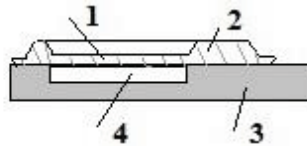


Fig. 2.17. Esempio di struttura di un trasduttore di pressione assoluta integrato al silicio: 1 - membrana di silicio; 2 - base; 3 - piastra di vetro; 4 - camera ermetica.

2.17. Alcuni sensori di pressione disponibili in commercio. Sapphire, Motorola

Sensore di pressione (trasduttore) Sapphire. Il trasduttore di pressione del complesso Sapphire 22 è progettato per la conversione continua del valore dei parametri misurati - pressione assoluta, relativa, vuoto, idrostatica e differenza di pressione tra fluidi neutri e aggressivi, nonché per la conversione del livello in un segnale di uscita unificato in corrente. Il trasmettitore di pressione è progettato per il funzionamento nei sistemi di controllo automatico, regolazione e gestione dei processi tecnologici in vari settori industriali, compresa l'applicazione nella produzione di esplosivi dell'industria del petrolio e del gas, negli impianti nucleari (UAE) e per l'esportazione.

Il trasmettitore di pressione è composto da unità di misura ed elettronica. Tutti i convertitori hanno un'unità elettronica unificata e si differenziano solo per il design dell'unità di misura.

Il principio di funzionamento dei sensori di pressione Sapphire 22 si basa sull'effetto della pressione misurata (differenza di pressione) sulle membrane dell'unità di misura, che provoca la deformazione dell'elemento sensibile elastico e una variazione della resistenza dei resistori estensimetrici. La variazione di resistenza viene convertita in un segnale

elettrico, che viene trasmesso dall'estensimetro al convertitore elettronico. Inoltre, sotto forma di segnale unificato di corrente standard.

Il trasmettitore di pressione è dotato di versione antideflagrante. Il trasmettitore di pressione antideflagrante è progettato per l'installazione in aree pericolose di locali e installazioni all'aperto, secondo i documenti che regolano l'uso di apparecchiature elettriche in aree pericolose.

Sensori di pressione Motorola. Motorola è nota per la creazione e la produzione di vari tipi di sensori. Gli ultimi sviluppi sono i sensori di pressione a semiconduttore. I sensori sono caratterizzati da dimensioni ridotte e facilità d'uso. Il design utilizza membrane che hanno sviluppato un nuovo elemento di rilevamento brevettato. Questo elemento di rilevamento funziona secondo il principio del sensore di Hall. In esso, sotto l'azione di una sollecitazione meccanica sui terminali di uscita del sensore compare una tensione elettrica proporzionale alla pressione. La tensione appare a causa della deformazione disomogenea degli elementi resistivi del sensore di pressione. Come si è detto, il sensore di pressione con il design dell'elemento sensibile proposto presenta vantaggi quali una migliore linearità, la semplicità della compensazione termica, ecc. A seconda del tipo di pressione da misurare, vengono prodotti sensori di pressione differenziale, relativa e assoluta.

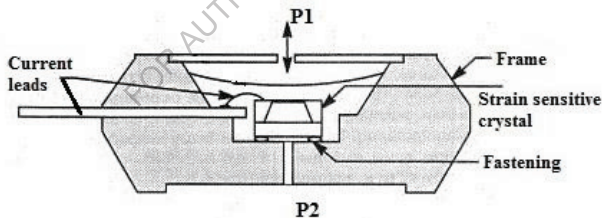


Fig. 2.18. Struttura generale di uno dei trasduttori di pressione Motorola.

Trasduttore di pressione piezoelettrico. Schema generale del dispositivo. L'effetto piezoelettrico, utilizzato nei trasduttori, è la comparsa di cariche elettriche sulla superficie di alcuni dielettrici cristallini (quarzo, titanato di bario) sotto l'azione di sollecitazioni o deformazioni meccaniche.

La Fig. 2.19 mostra lo schema di un dispositivo per la misurazione della pressione del gas mediante un trasduttore piezoelettrico. La pressione misurata P agisce sul diaframma 1 in fondo al corpo del trasduttore. Due piastre di quarzo 2 sono inserite tra tre distanziatori metallici 3. Una sfera 4

è collocata tra i coperchi. Una sfera 4 è collocata tra il coperchio e la parte superiore per garantire una distribuzione omogenea della pressione misurata. Alla piastra centrale - l'elettrodo negativo - è collegato un filo 5 che passa attraverso un manicotto isolante.

La differenza di potenziale tra l'elettrodo negativo e l'involucro è proporzionale alla pressione misurata. La pressione è determinata dalla differenza di potenziale misurata.

Poiché le cariche scompaiono quando la pressione viene rimossa, è necessario utilizzare circuiti di misura appropriati in modo che la carica non abbia il tempo di cambiare in modo significativo.

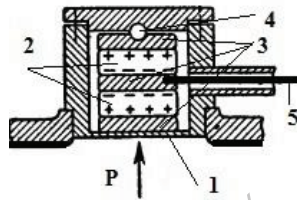


Fig. 2.19. Dispositivo di trasduttore piezoelettrico per la misurazione della pressione del gas. Schema generale del dispositivo.

2.18. Trasduttori di spostamento

Uno dei semplici trasduttori di spostamento è un divisore potenziometrico resistivo, in cui il contatto scorrevole o cursore del potenziometro si muove lungo l'elemento resistivo (fig. 2.20). Il cursore è collegato meccanicamente a un rullo sensibile (pin), che segue i movimenti dell'oggetto di misura. Quando viene applicata una tensione all'elemento resistivo, la tensione rimossa dal cursore del potenziometro indica il valore del movimento.

I trasduttori di spostamento angolare lineari e rotativi basati sul principio della divisione della tensione sono piuttosto comuni. I trasduttori angolari sono utilizzati per misurare spostamenti angolari da pochi gradi a pochi giri del disco, mentre i trasduttori lineari lavorano in un intervallo da pochi millimetri a pochi metri.

La forma dell'elemento resistivo determina la risoluzione del trasduttore. Quando questo elemento è costituito da un filo, la risoluzione dipende dal numero di spire di filo per unità di lunghezza dell'elemento. Altri tipi di trasduttori basati sulla divisione della tensione utilizzano una pellicola

di metallo, carbonio, ecc. per creare l'elemento resistivo, consentendo una risoluzione teoricamente infinita.

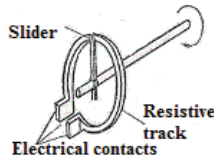


Fig. 2.20. Il più semplice dispositivo potenziometrico per il rilevamento dello spostamento angolare

Trasduttori di spostamento capacitivi. I trasduttori di spostamento capacitivi funzionano secondo il principio del condensatore, formato da due piastre separate da un dielettrico. Una variazione delle dimensioni delle piastre, della distanza tra di esse o tra di esse e il dielettrico provoca una variazione della capacità.

La Figura 2.21 mostra uno dei principi di funzionamento di un trasduttore di spostamento capacitivo. In essa, la capacità viene modificata spostando il dielettrico tra le due piastre del condensatore. Esistono anche altri principi: lo spostamento di una piastra rispetto all'altra, la modifica dell'area di sovrapposizione delle piastre. È noto anche un design in cui il dielettrico, rimanendo fermo, cambia le sue caratteristiche.

Su questo principio si basano i sensori di prossimità capacitivi e gli interruttori di prossimità capacitivi, in grado di rilevare il bersaglio a una certa distanza dal dispositivo. Lo stesso principio è alla base del trasmettitore di livello capacitivo per liquidi. Varia la costante dielettrica in base alle variazioni del livello del liquido.

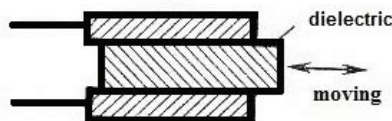


Fig. 2.21. Principio di funzionamento del trasduttore di spostamento capacitivo

Trasduttori induttivi di spostamento. L'autoinduttanza di una bobina cambia quando un corpo magneticamente permeabile si avvicina ad essa, quindi lo spostamento del corpo rispetto alla bobina può essere

determinato utilizzando una bobina di rilevamento con autoinduttanza. I trasduttori di misura che utilizzano questo principio sono solitamente senza contatto (fig. 2.22.a). Esistono anche trasduttori di spostamento induttivi accoppiati (fig. 2.22.b), in cui il nucleo della bobina è accoppiato meccanicamente al corpo di cui si misura lo spostamento. I trasduttori senza contatto del tipo descritto sono utilizzati come base per la costruzione di sensori di prossimità induttivi e interruttori di prossimità induttivi.

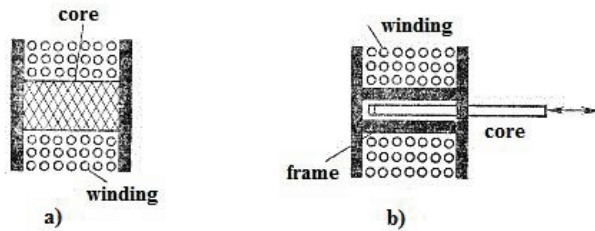


Fig. 2.22. Trasduttori induttivi di spostamento: a - senza contatto; b - collegati

Trasduttori di spostamento magnetico. I trasduttori di questo tipo si basano sull'utilizzo della variazione della resistenza magnetica tra due o più bobine magnetiche, in funzione dello spostamento del corpo. Lo spostamento provoca una variazione della tensione di uscita del trasduttore. Si possono utilizzare anche campi magnetici costanti o alternati, la cui grandezza varia linearmente. In questo caso, un sensore di campo magnetico posizionato sul corpo da spostare seguirà lo spostamento.

Trasduttori di spostamento induttivi. Il principio di funzionamento dei trasduttori induttivi si basa sulla dipendenza dell'induttanza o dell'induttanza reciproca degli avvolgimenti dalla posizione, dalle dimensioni geometriche e dallo stato magnetico degli elementi costitutivi del loro circuito magnetico.

Dalla teoria (e dalle formule matematiche) si evince che l'induttanza e l'induttanza reciproca possono essere modificate influenzando le dimensioni geometriche (lunghezza, area della sezione trasversale) della sezione aerea del circuito magnetico, la permeabilità magnetica e le perdite nel nucleo magnetico.

La corrente alternata che scorre nella bobina crea un campo magnetico alternato. Quando un materiale elettricamente conduttore (metallo, ecc.) viene posto al suo interno, parte dell'energia del campo magnetico viene trasferita all'oggetto metallico. Questa energia trasferita induce correnti

parassite (correnti di Foucault) sulla superficie dell'oggetto. La loro entità dipende dalle dimensioni, dalla composizione del metallo e dalla posizione dell'oggetto rispetto al campo magnetico. Le correnti parassite nell'oggetto creano un campo magnetico proprio, che interagisce con il campo primario generato dalla bobina. A causa di questo effetto, l'induttanza effettiva della bobina diminuisce e, di conseguenza, la frequenza di risonanza del circuito in cui è inclusa l'induttanza cambia.

2.19. Strumenti di misura del flusso. Misuratori di portata

Meccanico. In pratica, sono noti diversi metodi di determinazione del flusso. I metodi più semplici e quindi più comuni di misurazione del flusso sono quelli che utilizzano elementi di rilevamento meccanici, in cui il flusso sposta o ruota un corpo solido. Lo spostamento o la rotazione del solido risulta quindi proporzionale alla portata.

La Figura 2.23 mostra uno schema di uno dei metodi di misurazione meccanica del flusso. Mostra una paletta caricata a molla e sospesa su un perno che si deflette per aprire un orifizio quando il fluido passa attraverso il trasduttore. Maggiore è la portata, maggiore è la deflessione della paletta.

Esistono altre varietà di metodi meccanici di misurazione del flusso. In un trasduttore di flusso, è possibile realizzare il metodo dell'elica che ruota quando una sostanza scorre. La velocità di rotazione dell'elica è proporzionale alla portata della sostanza.

Il trasduttore di portata meccanico più comune è un misuratore di portata a turbina con un'elica rotante (o in questo caso una turbina). La turbina è montata nel flusso della sostanza per mezzo di cuscinetti. In genere, le pale della turbina sono realizzate in materiale ferromagnetico. Pertanto, per determinare la velocità della turbina si utilizza una bobina montata sul corpo del misuratore di portata. L'elemento di rilevamento elettromagnetico del trasmettitore di portata crea un effetto frenante della turbina, che può influenzare la velocità angolare della turbina a basse portate. Altri tipi di elementi di rilevamento, come quelli elettro-ottici, sono utilizzati per misurare le basse portate.

Per ottenere misurazioni accurate, è importante che non vi siano vortici nella sostanza che scorre, poiché ciò influisce direttamente sulla velocità della turbina. Per questo motivo, all'ingresso del misuratore di portata vengono solitamente installate delle palette di raddrizzamento del flusso. Queste pale costituiscono anche uno dei punti di riferimento della

turbina. Naturalmente, sono possibili anche modelli di flussimetri molto più semplici quando l'accuratezza della misura non è essenziale, cioè quando si possono ignorare la frenatura del flusso e i vortici.

Uno dei vantaggi dei flussimetri a turbina rispetto ad altri tipi di flussimetri è la dipendenza lineare del loro segnale di uscita dalla velocità del flusso nell'intervallo impostato per il dispositivo.

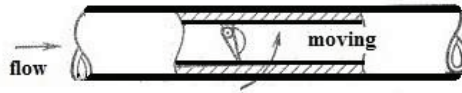


Fig. 2.23. Un esempio di progettazione di un dispositivo meccanico di misurazione del flusso.

Misura di portata basata su fenomeni termici. I misuratori di portata termici funzionano in base al principio che il calore trasportato da una sostanza da un punto all'altro è proporzionale alla portata massica di tale sostanza. Ad esempio, la figura 2.24.a mostra come due trasduttori di temperatura (T) determinano la temperatura di una sostanza prima e dopo il riscaldamento, che viene effettuato da un elemento riscaldante situato tra questi trasduttori.

La Figura 2.24.b mostra un termooanemometro che misura il flusso di una sostanza per mezzo di un singolo elemento riscaldante situato nel suo flusso. L'effetto di raffreddamento della sostanza che scorre attraverso questo elemento caratterizza la portata massica, cioè il raffreddamento viene monitorato grazie alla variazione di resistenza dei fili dell'elemento riscaldante. Spesso al posto dell'elemento a filo nel trasduttore si utilizza un film metallico o semiconduttore. Con il termooanemometro è possibile misurare fluttuazioni estremamente rapide nella portata delle sostanze.

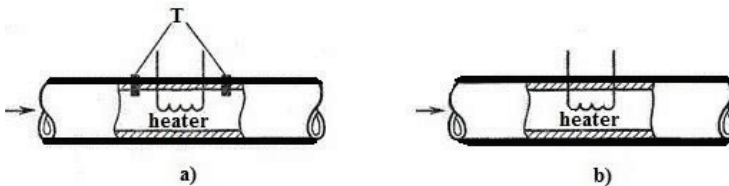


Fig. 2.24. Metodi di realizzazione del principio termico di misurazione del flusso con l'utilizzo di un elemento riscaldante

Metodo termooanemometrico per la determinazione del flusso.

Principio di misurazione. Il metodo prevede la determinazione della portata mediante la variazione di temperatura di un filo o di un film metallico riscaldato elettricamente (trasduttore di flusso) posto nel flusso di gas controllato. Il raffreddamento del trasduttore dipende dalla velocità del flusso, dalle proprietà fisiche del gas (conduttività termica, temperatura e densità) e dalla differenza di temperatura tra il trasduttore e il gas.

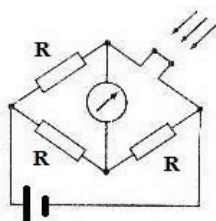


Fig. 2.25. Termooanemometrico alimentato in tensione continua

Sono noti due metodi:

A. Metodo a corrente costante. La corrente (o la tensione) che riscalda il filo viene mantenuta costante e misurata in base alla variazione della resistenza causata dal suo raffreddamento: $R = f(V)$. I parametri e l'alimentazione del circuito a ponte (fig. 2.25) sono scelti in modo che sia in equilibrio alla velocità zero V del gas. La deviazione della freccia del galvanometro serve a misurare la velocità del flusso.

Il metodo ha una sensibilità sufficiente solo alle basse velocità dei flussi controllati e non è adatto a misurare velocità elevate ($V > 0,5$ cm/s).

B. Metodo a temperatura costante. La resistenza del trasduttore raffreddato a flusso viene mantenuta costante regolando la tensione di riscaldamento (tensione di alimentazione del ponte). Questa tensione o corrente di alimentazione del ponte serve a misurare la velocità del flusso monitorato. Come nel caso precedente, la sensibilità del termooanemometrico diminuisce con l'aumentare della velocità del flusso monitorato, ma questa diminuzione è sostanzialmente inferiore rispetto al circuito del termooanemometrico a tensione di riscaldamento costante.

Valutazione del metodo termooanemometrico. Il metodo termooanemometrico presenta una serie di vantaggi:

- alta sensibilità;
- dimensioni miniaturizzate dell'elemento sensibile;

- Per le misure sono applicabili schemi e dispositivi semplici.

Gli svantaggi del metodo includono:

- sensibilità decrescente all'aumentare della velocità del flusso;
- necessità di calibrazione individuale dei trasduttori primari;
- instabilità della caratteristica di calibrazione.

L'uso di fili ricotti riduce il tasso di invecchiamento. La bassa temperatura di esercizio del filo aumenta l'influenza della temperatura del gas. Questa influenza può essere eliminata con la compensazione della temperatura. Anche i flussi di gas auto-convettivi intorno al filo riscaldato (a velocità zero del flusso monitorato) distorcono le letture, il che è particolarmente importante per le misure a bassa velocità. Grazie alla bassa inerzia, i termoanemometri a filo sono utilizzati negli studi sui flussi turbolenti.

Metodo di misura del flusso per induzione magnetica. Quando un conduttore si muove in un campo magnetico, secondo la legge dell'induzione elettromagnetica, nel conduttore si genera una forza elettromotrice e viene indotta una corrente elettrica. Questo effetto viene utilizzato nel misuratore di portata a induzione per determinare la portata. Il liquido che scorre deve avere una certa conduttività minima. Secondo la legge di Faraday, si genera un campo elettrico in un fluido elettricamente conduttivo che scorre attraverso un campo magnetico. Il flusso controllato scorre attraverso un tubo ricoperto di isolante, nelle cui pareti sono installati due elettrodi diametralmente opposti alla direzione del campo magnetico e del flusso del fluido (mezzo), da cui viene rimossa la tensione. Il valore della tensione è proporzionale alla velocità media del flusso del fluido. Questa tensione, generata da una sorgente ad alta impedenza (liquido), viene portata tramite un cavo al trasduttore di misura, che la amplifica ed effettua un'ulteriore elaborazione. Il valore del segnale è solitamente di pochi millivolt.

La teoria del misuratore di portata a induzione si basa sulle equazioni di Maxwell. Un liquido conduttivo in movimento presenta un certo numero (concentrazione) di cariche elettriche. La forza di Lorentz agisce sulle cariche in movimento e le devia in direzione perpendicolare, provocando una differenza di potenziale elettrico (tensione elettrica). Il valore della tensione è proporzionale alla velocità del flusso e alle proprietà elettrofisiche del fluido (flusso).

Il segnale utile in uscita di un flussimetro di questo tipo è piccolo. In questo schema di misurazione del flusso ci sono interferenze significative.

Per eliminare questi svantaggi, i misuratori di portata di questo tipo utilizzano un campo magnetico variabile o commutabile. Questa tecnica consente di isolare il segnale utile e di ottenere una precisione di misura accettabile.

2.20. Interruttori e sensori per il rilevamento di prossimità (sensori di movimento)

I sensori di prossimità non hanno alcun legame fisico con gli oggetti. Essi giudicano la presenza di un corpo mediante un principio di rilevamento fisico implementato nei rispettivi trasduttori,

Un sensore di prossimità induttivo utilizza un oscillatore sintonizzato. Quando un corpo conduttore si avvicina al sensore, si verifica uno smorzamento delle oscillazioni percepite dal circuito di accoppiamento. Dispositivi più generali e semplici sono gli interruttori di prossimità induttivi, in cui un circuito di interfaccia viene utilizzato per attivarli o disattivarli quando un corpo conduttore si avvicina ad essi.

I sensori di prossimità capacitivi sono trasduttori di misura o interruttori. Il loro principio di funzionamento è che un corpo vicino modifica la costante dielettrica di un condensatore, sbilanciando il ponte in uno dei bracci in cui è collocato il condensatore. I sensori capacitivi sono in grado di rilevare la vicinanza di corpi di materiali diversi in un'ampia gamma di distanze.

Esiste anche un gran numero di **sensori ottici** per il rilevamento di prossimità. Sono costituiti da un elemento di rilevamento di base e da uno schema per il suo collegamento al sistema di misura. I seguenti metodi di rilevamento di prossimità possono funzionare nei dispositivi in esame (fig. 2.26). I sensori possono essere del tipo (fig. 2.26.a) in cui la sorgente di luce e l'elemento sensibile sono posizionati insieme e la luce emessa viene riflessa e percorre lo stesso percorso della luce incidente. In altri dispositivi (fig. 2.26.b), il fascio di luce proveniente dalla sorgente e il fascio di luce riflesso si trovano ad un certo angolo l'uno rispetto all'altro e vengono riflessi dalla superficie del corpo come da uno specchio. Sono possibili anche sensori che sfruttano il passaggio della luce attraverso la superficie del corpo.

I sensori di prossimità magnetici sono dispositivi molto comuni e comprendono reed o sensori di Hall.

I sensori di prossimità radar sono costituiti da un generatore di segnale radar e da un mixer in cui interagiscono il segnale riflesso e quello

di sonda. Grazie all'effetto Doppler (la frequenza del segnale riflesso differisce da quella del segnale di tastatura quando il corpo è in movimento), la frequenza dell'uscita del mixer è zero quando il corpo non si muove e diversa da zero quando è in movimento. La maggior parte di questi sensori di prossimità opera nella gamma dei *raggi X*.

L'applicazione di questi dispositivi (sensori di prossimità) non si limita solo alla misurazione dello spostamento. I sensori possono anche registrare la distanza, quindi la velocità, determinando il tempo tra gli impulsi trasmessi e riflessi ed eseguendo i calcoli necessari con i risultati di queste misure.

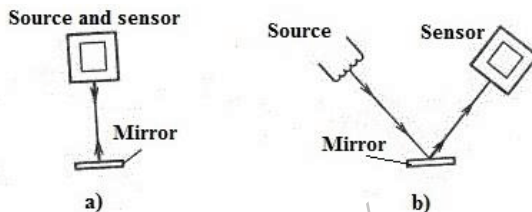


Fig. 2.26. Principi di funzionamento di alcuni dispositivi ottici (sensori, trasduttori) per il rilevamento di prossimità

2.21. Sensori di peso. Metodi e mezzi di conversione

Sensori di peso elettromeccanici. Sensori di peso con estensimetri.

I sensori di peso con estensimetri sono tra i dispositivi di misurazione della forza più precisi utilizzati per la pesatura. Insieme agli estensimetri, nei sensori di peso sono integrate resistenze progettate per regolare il circuito a ponte, che garantisce l'intercambiabilità dei sensori e la possibilità di includere più sensori in un circuito comune, se necessario. La caratteristica del sensore di peso a estensimetri indica il valore della tensione di uscita in millivolt a carico nominale, riferito a una tensione di alimentazione di 1 V. In genere, questo valore è pari a 1-2 volt. In genere, questo valore è di 1-2 mV/V. I sovraccarichi superiori al 150% nominale non causano un offset dello zero. Anche i sovraccarichi fino al 500% del valore nominale non causano danni meccanici.

Sensori di pesatura con corda vibrante. Il principio di funzionamento prevede l'eccitazione della vibrazione a frequenza costante di una corda pretensionata mediante un sistema elettromagnetico e il trasferimento alla corda della forza sviluppata dal carico nella bilancia. Questa forza aumenta la tensione della corda e, di conseguenza, la frequenza

della sua vibrazione. La variazione di frequenza è una misura della massa determinata del carico. Con questi sensori è possibile ottenere un'elevata precisione nella misurazione del peso.

Sensori di peso magnetoelastici. L'effetto magnetoelastico fa sì che alcuni materiali (ad esempio la permalloy) sottoposti a un carico cambino la loro suscettibilità magnetica. Questo materiale viene utilizzato come nucleo di un avvolgimento la cui resistenza totale diminuisce con l'aumentare del carico a causa della diminuzione della suscettibilità magnetica. Questi elementi di rilevamento hanno una potenza di uscita relativamente elevata, che consente di utilizzare il loro segnale di uscita senza amplificazione. Tuttavia, il piccolo intervallo di linearità della caratteristica è insufficiente per effettuare misure accurate.

Sensori di peso induttivi. Nei sensori di peso induttivi, la variazione dell'induttanza dell'avvolgimento è causata dallo spostamento del nucleo di ferro per effetto della forza misurata.

Di particolare importanza nel campo della tecnologia di misurazione del peso sono i seguenti dispositivi:

- a) Con due o quattro induttanze variabili (induttanza doppia con armatura di richiamo o incrociata);
- b) con induttanza reciproca variabile (trasformatore differenziale con armatura in tiro).

Rispetto agli estensimetri, i sensori di peso induttivi hanno tensioni di uscita più elevate, minore sensibilità alla temperatura e all'umidità e spostamenti dell'armatura più ampi. Queste proprietà consentono l'uso di molle morbide, che a loro volta permettono di misurare piccole forze. Tuttavia, la precisione dei sensori di peso induttivi è inferiore a quella degli estensimetri.

Sensori di peso con dispositivo di compensazione della forza elettromagnetica. In questo dispositivo, il piatto della bilancia è collegato tramite una leva a una bobina di compensazione, che si trova nel campo di un magnete permanente. La corrente nell'avvolgimento di questa bobina è controllata da un sensore di posizione collegato a un amplificatore. La variazione di corrente nell'avvolgimento della bobina di compensazione avviene fino al raggiungimento dell'equilibrio. Quando il carico cambia nella bilancia, la corrente nella bobina, che è una misura del peso del carico, cambia di conseguenza.

Sensori di peso idraulici. La forza viene determinata misurando la pressione sviluppata dal carico sul pistone o sulla membrana del sistema idraulico. La pressione del fluido viene misurata da un manometro. Il design del diaframma di gomma elimina l'attrito. Inoltre, i sensori di questo tipo consentono deviazioni della direzione della forza agente fino a pochi gradi dalla verticale senza errori aggiuntivi. L'errore è stimato in $\pm 0,2\%$ all'interno del campo di pesatura. I limiti di pesatura più ampi vanno da 50 kg a 500 tonnellate.

Sensori di peso che utilizzano metodi di misurazione a ionizzazione. La pesatura con isotopi radioattivi può essere effettuata con due metodi: il metodo di trasmissione e il metodo di diffusione.

Quando si utilizza il metodo di trasmissione, si misura l'assorbimento della radiazione da parte del peso da pesare. L'uso di radiazioni dure consente di considerare il valore del coefficiente di attenuazione di massa indipendente dalla composizione chimica del materiale. Nel metodo di diffusione, la radiazione diretta viene schermata. La radiazione laterale viene diffusa dal materiale e diretta al rilevatore. Il metodo di pesatura consente di utilizzare questo tipo di bilance come bilance per nastri trasportatori o bilance per camion che operano in condizioni ambientali difficili, dove le bilance con sistemi di misura convenzionali si usurano rapidamente. Gli errori possono raggiungere diversi punti percentuali.

2.22. Sensori di livello di riempimento. Misura del livello di riempimento

A seconda del settore e delle condizioni di utilizzo, i sensori di livello devono soddisfare requisiti diversi. Quando si pianifica l'uso di un misuratore di livello, è necessario conoscere le proprietà fisiche e chimiche dei materiali di riempimento (viscosità, conducibilità elettrica, radioattività, abrasività, ecc.), le condizioni di misura esterne - temperatura, pressione, aggressività dell'ambiente, ecc.

Esistono numerosi effetti fisici e proprietà dei materiali, sulla base dei quali è possibile progettare e realizzare sensori (trasduttori di misura) del livello di riempimento.

Misura con galleggiante. Come elemento sensibile di un sensore di livello per liquidi si utilizza un galleggiante. Di norma, come galleggiante si utilizzano corpi sferici con una densità inferiore a quella del liquido. La trasmissione delle informazioni dal sensore sul livello di riempimento può

essere effettuata meccanicamente con l'aiuto di vari rulli, ingranaggi, cavi o utilizzare sistemi di trasmissione elettrica dei dati (collegando il movimento con una resistenza variabile, ecc.) Per la trasmissione dei dati si possono utilizzare anche interruttori a gradino, invio di impulsi, trasmissione magnetica del movimento del galleggiante, sensori di spostamento induttivi.

Gli errori di misura in questi dispositivi sono dovuti principalmente a variazioni della densità del liquido da riempire o a variazioni delle condizioni di trasmissione dei dati (attrito, contraccolpi, ecc.).

Metodo capacitivo di misurazione del livello. Sensori di livello capacitivi. Il metodo capacitivo di misurazione del livello consente di misurare il riempimento di materiali in polvere, viscosi e granulari. Il metodo capacitivo misura i livelli di alimenti in polvere, cereali, detersivi, cemento, sabbia, polvere di carbone, olio combustibile, gasolio, acqua, acidi, alcali, ecc. Il metodo capacitivo consente di misurare in continuo il livello di alimenti in polvere, cereali, detersivi, cemento, sabbia, polvere di carbone, olio combustibile, olio combustibile, acqua, acidi, alcali, ecc. Il metodo capacitivo consente di effettuare misurazioni continue. Il metodo di funzionamento dei sensori si basa sulla misurazione della capacità elettrica (principio di funzionamento del condensatore). Il condensatore è formato dalla parete del serbatoio e da una sonda immersa nel contenuto del serbatoio. La capacità viene solitamente misurata applicando una tensione elettrica ad alta frequenza. La capacità varia con il livello di riempimento. La capacità è pari alla somma delle capacità della sezione immersa e della sezione in aria. Le due capacità sono collegate in parallelo e la capacità totale viene sommata. La precisione dipende dalla struttura della sonda. La sonda è costituita da un cavo, un'asta o un tubo. Se necessario, viene applicato un rivestimento isolante.

Se il serbatoio è costituito da materiale dielettrico, è necessario prevedere un elettrodo opposto separato. A volte, nella progettazione degli indicatori di livello si utilizza un condensatore cilindrico, con l'estremità aperta immersa nel fluido.

Misura del livello di riempimento basata sulla conduttività. I sensori e il metodo di misurazione del livello basato sulla conduttività possono essere utilizzati solo per la misurazione del livello di materiali liquidi conduttivi.

Il principio di misurazione si basa sulla variazione della resistenza elettrica tra due elettrodi quando questi sono immersi nel materiale di

riempimento. La resistenza diminuisce con l'immersione. Questo metodo e i sensori hanno trovato applicazione per la misurazione del livello di riempimento nelle caldaie a vapore. Lo svantaggio del metodo è che può essere utilizzato solo per misurare il livello di materiali liquidi elettricamente conduttivi.

Metodi idrostatici e pneumatici di misurazione del livello. Questi metodi possono essere utilizzati per misurare il livello di qualsiasi liquido. Il metodo idrostatico utilizza la pressione del liquido sul fondo del serbatoio e la sua variazione al variare del livello. La pressione sul fondo di un recipiente liquido può essere misurata in serbatoi aperti utilizzando un manometro convenzionale o differenziale. Nei serbatoi chiusi, dove il liquido può essere pressurizzato, solo con un manometro differenziale. La pressione dipende dall'altezza della colonna di liquido e dalla sua densità. Se il manometro non è installato al livello del fondo, è necessario apportare una correzione.

Nel metodo pneumatico di misurazione del livello, l'aria o il gas di protezione devono essere forzati nel serbatoio. Questo metodo è utilizzato nelle caldaie a vapore, nei reattori, ecc.

Il metodo pneumatico di misurazione del livello consiste nell'immergere un tubo fino a un certo livello nel liquido di cui si vuole misurare il livello. L'aria (o qualsiasi altro gas) viene immessa nel tubo attraverso una speciale valvola a farfalla. La pressione nel tubo e, rispettivamente, sopra la farfalla è uguale alla pressione della colonna di liquido (e dipende, rispettivamente, dal livello del liquido) rispetto al bordo inferiore del tubo.

I vantaggi di questi metodi e sensori di livello considerati sono il loro grado di affidabilità piuttosto elevato.

Metodo di misurazione del livello a ultrasuoni. Il metodo di misurazione del riempimento a ultrasuoni può essere utilizzato per liquidi e solidi sfusi. Non può essere utilizzato solo se il liquido contiene particelle solide, il che può portare a grandi errori di misura. Questo metodo di misura consente di automatizzare facilmente il processo di misurazione.

Per realizzare il metodo a ultrasuoni per la misurazione del livello di riempimento è necessario disporre di una sorgente di onde ultrasoniche (trasmettitore) e di un ricevitore. In genere si utilizzano frequenze da 20 kHz a diversi megahertz. Esistono due modi per produrre vibrazioni ultrasoniche: piezoelettrico e magnetostrittivo.

Una misura del livello può essere, ad esempio, il tempo di transito di un fascio di ultrasuoni. La velocità del raggio dipende dal mezzo di propagazione. Questo modo di misurare il livello può servire per segnalare i limiti di riempimento (vedi fig. 2.27). Quando un certo spazio viene riempito, il dispositivo a ultrasuoni invia un segnale.

Per i liquidi, invece, il metodo di misurazione del livello a ultrasuoni basato sul principio dell'ecoscandaglio è più comodo e preciso. Gli ultrasuoni si propagano nello spazio sopra il liquido, vengono riflessi dalla superficie (interfaccia aria-liquido) e dal tempo di ritorno al ricevitore si determina il livello.

Uno dei principali vantaggi del sensore di livello a ultrasuoni è la possibilità di applicarlo in punti difficili da raggiungere.

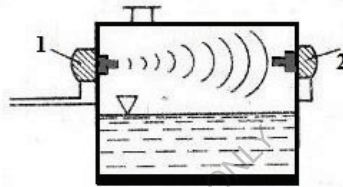


Fig. 2.27. Struttura di un misuratore di livello a ultrasuoni. 1 - emettitore, 2 - ricevitore

Misuratori di livello basati su isotopi radioattivi. Metodo di misurazione. I sensori di livello basati su isotopi radioattivi vengono utilizzati laddove è impossibile effettuare misure con sensori convenzionali. Il più delle volte il metodo di misurazione del livello basato sugli isotopi radioattivi viene utilizzato per misurare il livello di materiali aggressivi, in serbatoi ad alta temperatura, in impianti metallurgici, materiali come carbone, minerali, ecc. L'applicazione più comune dei sensori di livello basati sugli isotopi radioattivi è la misurazione del livello di materiali aggressivi.

Il funzionamento dei sensori si basa sul fenomeno dell'assorbimento delle radiazioni radioattive da parte dei materiali contenuti nel serbatoio. In pratica, di solito si misurano strati spessi di materiali, quindi i raggi γ sono i più utilizzati in questi sensori. Il fascio di raggi γ attraversa il serbatoio in linea retta. Sulla parete opposta del serbatoio si trova un ricevitore di radiazioni. L'intensità dei raggi che colpiscono il ricevitore dipende dal grado di assorbimento del materiale. La progettazione di sensori e sistemi di

misurazione del livello che utilizzano isotopi radioattivi può variare a seconda delle condizioni tecniche e dei requisiti.

Se è necessario un sensore di livello che funzioni secondo il principio di un dispositivo di segnalazione, la sua progettazione è approssimativamente la stessa di quella basata sulla radiazione ultrasonica (vedere fig. 2.27). Quando il livello cambia e il materiale si sovrappone al raggio, il sensore e il sistema di misura vengono attivati.

Se è necessaria una misurazione continua del livello, si utilizzano altri tipi di sensori. Ad esempio, quando si posizionano diversi emettitori sulla parete del serbatoio, i cui fasci sono diretti al ricevitore sull'altro lato. Quando il livello del materiale cambia, parte dei fasci si sovrappone e l'intensità della radiazione che raggiunge il ricevitore cambia.

I vantaggi del metodo di misura di livello considerato sono: assenza di contatti, possibilità di misurare in condizioni particolarmente difficili, affidabilità operativa.

Altri metodi e sensori per la misura di livello. Misura di livello con sensori di temperatura - termocoppie, termistori. Questo metodo di misura è possibile per materiali liquidi non aggressivi. Il principio di misurazione si basa sulla differenza tra la temperatura del materiale nel serbatoio e la temperatura esterna. La progettazione di questi trasduttori di misura dipende dai requisiti e dalle condizioni di misura.

Misurazioni con dinamometri. In sostanza, il serbatoio e il materiale in esso contenuto vengono pesati. Il metodo è adatto per misurare il livello di riempimento di materiali sfusi e aggressivi. I design dei sistemi di misura possono essere diversi e vengono sviluppati in base ai requisiti tecnici.

La misurazione del livello di riempimento può essere effettuata anche mediante interruttori di soglia con elementi sensibili vibranti, ecc. Esistono sensori di livello basati sul metodo interferometrico.

Metodi meccanici di misurazione del livello di riempimento. Misurazione del livello di riempimento del liquido mediante un galleggiante. Il principio fisico della misurazione può essere spiegato con la figura 2.28. Sul galleggiante agiscono tre forze: il peso P , la forza di spinta (forza di Archimede) F_a e la forza di reazione del sistema di trasmissione della lettura F_r . L'entità delle forze dipende principalmente dalla densità dell'aria, dalla densità del liquido e dal tipo di sistema di comunicazione tra il galleggiante e il dispositivo di misurazione. Nello stato di equilibrio, la somma di queste forze è uguale a 0. Quando il livello del liquido cambia,

l'equilibrio delle forze si rompe e il galleggiante si sposta verso l'alto o verso il basso. Lo spostamento determina l'altezza del liquido rispetto alla posizione iniziale.

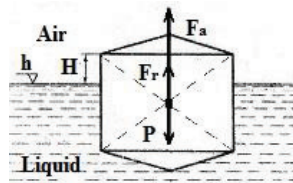


Fig. 2.28. Metodo a galleggiante per la misurazione del livello del liquido

Come galleggianti nei sensori vengono utilizzati principalmente corpi sferici o sferico-cilindrici cavi, la cui densità è inferiore a quella del liquido, per cui possono galleggiare sulla sua superficie. La variazione della densità del liquido o delle condizioni di attrito nel sistema di trasmissione del sensore porta a una distorsione del risultato della misurazione. Questo effetto è tanto meno pronunciato rispetto all'altezza di sollevamento quanto più piatto è il galleggiante del sensore.

Nel caso più semplice, il galleggiante del sensore è collegato a una corda o a una catena, che viene fatta passare su un rullo o una ruota dentata. In questo caso, il valore misurato viene trasmesso meccanicamente. Per garantire il funzionamento continuo del sensore, all'altra estremità della fune o della catena è fissato un contrappeso.

In questo metodo di misurazione del livello del liquido, l'angolo di rotazione del rullo corrisponde alla variazione del livello del liquido. L'asse del rullo di guida può essere collegato al cursore del potenziometro del sensore per realizzare la trasmissione elettrica del valore misurato.

È abbastanza semplice trasmettere meccanicamente i dati di livello in serbatoi aperti mediante un sistema di cavi o, in serbatoi chiusi, mediante un passacavo se le distanze per la trasmissione dei dati sono brevi.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi, sia nei serbatoi aperti che in quelli chiusi, i sensori di livello utilizzano sistemi di trasmissione elettrica dei dati, soprattutto se il risultato della misurazione viene inviato a un dispositivo di calcolo.

Un esempio di sensore di livello a galleggiante è il sensore di livello del carburante per automobili (fig. 2.29). In questo caso viene utilizzato il cosiddetto metodo potenziometrico per trasferire informazioni sul livello del liquido (sensore di livello potenziometrico). Il galleggiante 1 è collegato

meccanicamente al reostato 2. Il galleggiante, muovendosi in base al livello del liquido, sposta meccanicamente la slitta del potenziometro (reostato) 2. In questo modo, la resistenza elettrica di uscita del potenziometro (reostato) cambia, il che viene elaborato e inviato dal sensore all'indicatore di livello del carburante appropriato.

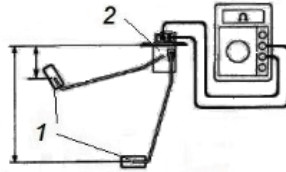


Fig. 2.29. Schema di funzionamento del sensore di livello del carburante di un'automobile.

I vantaggi dei sensori potenziometrici di livello del carburante sono la semplicità del dispositivo e il basso costo. Lo svantaggio è l'usura dei contatti elettrici mobili del sensore. Ciò è particolarmente vero nei veicoli che utilizzano carburanti aggressivi come etanolo, metanolo e biodiesel. In queste condizioni, viene utilizzato un sensore di livello senza contatto che sfrutta l'interazione di elementi magnetici.

2.23. Misurazione della velocità. Tachimetri

I trasduttori di questo tipo vengono utilizzati per misurare la velocità lineare o angolare. I misuratori di velocità angolare sono solitamente dispositivi elettromagnetici e sono chiamati tachimetri. I tachimetri di tipo elettronico-ottico sono chiamati stroboscopi. La velocità lineare viene solitamente determinata indirettamente convertendo la velocità lineare della rotazione del volano o dell'ingranaggio. La velocità angolare viene quindi misurata con un encoder angolare (tachimetro). La determinazione diretta della velocità lineare è fornita da trasduttori elettromagnetici, trasduttori radar Doppler a microonde senza contatto, ecc.

Tachimetri a impulsi. Il metodo di conversione più comune è quello in cui la bobina ricevente di disegno noto permette di determinare la velocità di rotazione dell'albero. Di norma, un albero di questo tipo è realizzato con rientranze o sporgenze, formando così una ruota dentata (fig. 2.30). Quando la sporgenza o la tacca passa attraverso la bobina, la tensione della corrente di uscita cambia. Il calcolo della variazione della tensione di uscita in un certo intervallo di tempo fornisce il valore della velocità angolare.

Nei tachimetri a impulsi è possibile utilizzare, ad esempio, l'effetto Hall, le correnti parassite induttive, i fenomeni ottici (nei trasduttori senza contatto), ma il più comune nei tachimetri è il principio elettromagnetico.

Il rotore ferromagnetico con elemento sensibile è realizzato sotto forma di magnete permanente o bobina. Il magnete crea un campo magnetico intorno all'elemento sensibile. Quando il dente del rotore attraversa il campo, il flusso magnetico cambia e il campo elettromagnetico viene indotto nella bobina del tachimetro. Il vantaggio di questo principio di conversione è la dipendenza del segnale di uscita dalla configurazione del dente del rotore. La figura 2.30 mostra alcuni tipi noti di impulsi di uscita per diverse forme di denti del rotore del tachimetro.

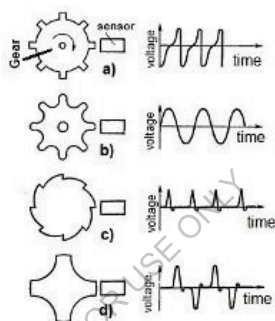


Fig. 2.30. Dipendenza del segnale di uscita del tachimetro a impulsi elettromagnetici dalla configurazione dei denti del rotore: a-denti ruvidi, b-denti del tachimetro del rotore lavorati con precisione, c- e d-forma speciale dei denti.

Generatori di tachimetri. Quando la misura della velocità riguarda un particolare oscillatore, la velocità angolare può essere giudicata dall'ampiezza o dalla frequenza della sua tensione di uscita. I generatori utilizzati a questo scopo sono chiamati tachimetri.

Per il trasduttore di misura si deve scegliere un'energia così piccola dal corpo mobile da eliminare l'influenza del dinamo tachimetrica sulla velocità angolare dell'albero.

Stroboscopi. Gli stroboscopi sono tachimetri elettro-ottici di tipo speciale in cui l'albero rotante è illuminato da lampi di luce. La velocità dei lampi viene regolata manualmente finché l'immagine dell'albero rimane ferma. Ciò avviene quando ogni lampo compie un giro dell'albero del tachimetro.

Bibliografia

1. Klokov N.P. *Tenzorezistory* [Estensimetri]. -M.Mashinostroenie, 1990.-224p.
2. Daychik M.L., Prigorovskiy N.I., Khurshudov G.Kh. *Metody i sredstva naturnoy tenzometrii. Spravochnik* [Metodi e mezzi di misurazione delle deformazioni su scala reale. Repertorio] M. Mashinostroenie, 1989.-240p.
3. Vaganov V. I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli* [Estensimetri integrali]. -M.: Energoatomizdat, 1983. - 136 p.
4. Gridchin V.M., Lyubimsky V.M. *P'ezosoprotivlenie v plenkakh polikristallicheskogo kremniya p-tipa* [Resistenza piezoelettrica in film di silicio policristallino di tipo p]. *FTP*, 2004, v.38, №.8, 38-46p.
5. Klokov N.P. *Tenzorezistory* [Estensimetri]. *Datchiki i sistemy* [Sensori e sistemi] 2004, №3, p.10-12.
6. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. Sensori a semiconduttore per un ampio intervallo di temperatura. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, Gennaio 2014, pp.1-4
7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Issledovanie nekotorykh elektrofizicheskikh svoystv plenok n-Si, legirovannykh ionnoy implantatsiyey* [Studio di alcune proprietà elettrofisiche dei film di n-Si drogati per impiantazione ionica]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya*, 2006, №4, p.104-106
8. Druzhinin A.A., Mar'yamova I.I., Kubrakov A.P., Pavlovskiy I.V. *Tenzorezistory dlya nizkikh temperatur na osnove nitevidnykh kristallov kremniya* [Estensimetri per basse temperature basati su baffi di silicio]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2008, №4, s. 26-30.
9. Terston R. *Primenenie poluprovodnikovyykh preobrazovateley dlya izmereniya deformatsiy, uskoreniy i smeshcheniy* [Applicazione di trasduttori a semiconduttore per misurare deformazioni, accelerazioni e spostamenti]. -V kn: *Fizicheskaya akustika/ Pod red. U. Mezona, t.1, chast' B -Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy. Per. s angl.* - M.: Mir, 1967, p.187-209.
10. Mykola Gorbachuk. MATERIALI ELETTROROTECNICI. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londra, N2 9ED, Regno Unito, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

11. Zeeger K. *Fizika poluprovodnikov* [Fisica dei semiconduttori]. *Per. s angl. pod red. Yu.K. Pozhely.* -M.: Mir, 1977, p. 615.
12. Smith C.S. Effetto piezoresistenza nel germanio e nel silicio. - *Phys. Rev.* 1954, v. 94, 1, pagg. 42-49.
13. Tufte O.N., Stelzer E.L. Proprietà piezoresistive dei lauers diffusi di silicio. - *J. Appl. Phys.*, 1963, v. 34, 9, p. 313-318.
14. Brevetto RF 2043671. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Estensimetro a semiconduttore]. *Avt. Gorbachuk N.T. / B.I.* 1995, №25.
15. A.B.Renskiy e altri. *Tenzometrirovaniye stroitel'nykh konstruksiy i materialov* [Misurazione delle deformazioni delle strutture edilizie e dei materiali]. M.- Stroyizdat, 1977, 239p.
16. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Effetto Piezo-Hall nel p-germanio. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.
17. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Sulla determinazione delle costanti di potenziale di deformazione dei semiconduttori del tipo p-germanio dalla dipendenza dalla temperatura della piezoresistenza. *FTP*, vol. 15, v. 14, pag. 649, 1981.
18. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyaniye deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Effetto della deformazione sull'entità della magnetoresistenza in film bulk p-Ge e p-Ge su arseniuro di gallio]. *OPT*, 1984, №6, s.88.
19. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Poluprovodnikovyy termotenzodatchik* [Estensimetro termico a semiconduttore]. *PSU*, 1984, n. 9, pag. 21.
20. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *P'ezogal'vanomagnitnye svoystva plenok germaniya na arsenide galliya i perspektivy ispol'zovaniya ikh v kachestve tenzorezistorov* [Proprietà piezogalvanomagnetiche dei film di germanio su arseniuro di gallio e prospettive per il loro uso come estensimetri]. *UFZh*, 1984, n. 12, pag. 1850.
21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Sposob opredeleniya temperatury i deformiruyushogo usiliya.* [Metodo per la determinazione della temperatura e della forza di deformazione.] *A.s. No.* 932282, 05/30/82 Bollettino. No. 20.
22. Gorbachuk N.T., Sakidon P.A., Thorik Yu.A., Shvarts Yu.M. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Estensimetro a semiconduttore]. *A.s. No.* 11 16305 1984.

23. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Trasduttori di misura basati su GaAs, polisilicio e germanio disperso e prospettive per il loro utilizzo]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

24. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influenza dell'irradiazione neutronica sulle caratteristiche dei trasduttori di misura a semiconduttore di temperatura, deformazione e campo magnetico]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

25. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Misure nell'industria"] 1-3 volumi. M.: *Metallurgiya*, 1990.

26. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. e altri. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy sektsii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Risultati di uno studio sperimentale del processo di raffreddamento della sezione modello e del blocco sperimentale dell'avvolgimento superconduttore del campo toroidale dell'installazione T-15 sul complesso SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.

27. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. ecc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Trasduttori di misura a semiconduttore di deformazione, temperatura e campo magnetico per l'uso in condizioni di esposizione alle radiazioni, un'ampia gamma di temperature e campi magnetici]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Corso generale di fisica: guida allo studio], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

Capitolo 3. Campi magnetici. Trasduttori, sensori, misure

3.1. Sensori di Hall. Principio di funzionamento, descrizione, dispositivo

Un sensore di Hall è un dispositivo che misura la grandezza di un campo magnetico utilizzando l'effetto Hall. Il sensore di Hall è costituito da una piastra rettangolare semiconduttrice alla quale sono collegati quattro conduttori elettrici. La figura 3.1 mostra l'elemento sensibile di un sensore di Hall.

Effetto Hall. Sia il campione sotto forma di piastra rettangolare di lunghezza l , larghezza d e spessore b (vedi fig. 3.1).

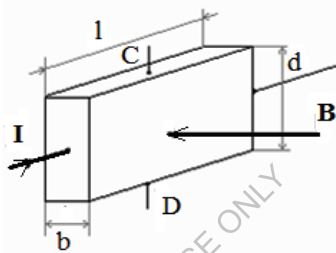


Fig. 3.1 Effetto Hall in una piastra con una corrente longitudinale I e un campo magnetico B perpendicolare al piano della piastra.

Se lungo il campione viene fatta passare una corrente elettrica I e viene creato un campo magnetico B perpendicolare al piano della piastra, sui piani laterali della piastra apparirà un campo elettrico, detto campo di Hall, in direzione CD . In pratica, di norma, il campo di Hall è caratterizzato da una differenza di potenziale, che viene misurata tra i punti simmetrici C e D sulla superficie laterale del campione. Questa differenza di potenziale è chiamata differenza di potenziale di Hall U_{hal} o CEM di Hall ε_{hal} .

Nella teoria classica della conduzione, l'effetto Hall è spiegato dal fatto che in un campo magnetico la forza di Lorentz agisce su cariche elettriche in movimento, la cui entità e direzione sono determinate dall'equazione vettoriale:

$$F = e [\mathbf{VB}] \quad (3.1),$$

dove \mathbf{B} è il vettore dell'induzione del campo magnetico, \mathbf{V} è il vettore della velocità della carica, e e è la carica dei portatori di corrente tenendo conto del segno.

A causa di questa forza in direzione CD, si verifica una differenza nella concentrazione dei portatori di corrente e, di conseguenza, un campo elettrico. Nel nostro caso, V è perpendicolare a B e, in base alle leggi note dell'elettrofisica, si definisce il campo elettrico di Hall:

$$E_{hal} = F/e = VB \quad (3.2),$$

Il campo è correlato al campo elettromagnetico di Hall ε_{hal} , o alla differenza di potenziale di Hall U_{hal} , come segue:

$$\varepsilon_{hal} \approx U_{hal} = E_{hal} d = VBd \quad (3.3).$$

La forza della corrente che attraversa un'unità di sezione trasversale del campione è uguale alla densità di corrente:

$$J = I/S = enV \quad (3.4),$$

dove n è il numero di portatori di corrente in un volume unitario del campione (concentrazione di portatori di corrente).

Da qui la forza attuale:

$$I = jbd = enVbd \quad (3.5).$$

Il che rende possibile la scrittura:

$$V = I / enbd \quad (3.6).$$

Quindi:

$$\varepsilon_{hal} = IB / enb \quad (3.7).$$

Pertanto, il CEM di Hall (o U_{hal}) è proporzionale all'intensità di corrente, all'induzione del campo magnetico e inversamente proporzionale allo spessore del campione e alla concentrazione di portatori di corrente in esso.

Spesso si scrive:

$$\varepsilon_{hal} = R \cdot IB/b \quad (3.8).$$

Dove il coefficiente $R = 1/ne$ è la costante di Hall, che, ad esempio, per i semiconduttori ha un valore compreso tra 10 e 10^5 cm³/Kl.

3.2. Principio di funzionamento di un sensore di Hall

La Figura 3.2 mostra la forma tipica dell'elemento sensibile di un sensore di Hall. Questo tipo di elemento sensibile può essere realizzato con materiale sfuso o con materiali in forma di pellicola.

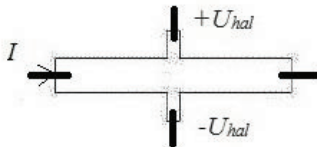


Fig. 3.2 Rappresentazione schematica della forma dell'elemento sensibile del sensore di Hall.

La Fig. 3.3 mostra la dipendenza caratteristica di U_{hal} (differenza di potenziale nella direzione dei contatti CD - fig. 3.1) dal campo magnetico a corrente di alimentazione costante.

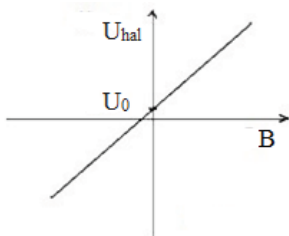


Fig. 3.3. Dipendenza della tensione elettrica sui contatti di Hall U_{hal} dal valore dell'induzione del campo magnetico B

In assenza di campo magnetico, l'EMF di Hall (differenza di potenziale) dovrebbe essere pari a zero. Tuttavia, a causa di vari fenomeni collaterali (ad esempio, un posizionamento non sufficientemente simmetrico degli elettrodi di misura del sensore), il dispositivo di misura può mostrare una certa differenza di potenziale U_o all'uscita del sensore di Hall anche in assenza di campo magnetico. Per eliminare gli errori associati, il valore di U_o deve essere sottratto dalla differenza di potenziale misurata nel campo magnetico.

Una delle caratteristiche principali di un sensore di Hall è la sua sensibilità:

$$\gamma = \Delta U_{hal} / \Delta B \quad (3.9).$$

La sensibilità del sensore di Hall, specificata nella sua scheda tecnica, viene utilizzata per determinare l'entità dell'induzione del campo magnetico misurato:

$$B = U_{hal} / \gamma \quad (3.10).$$

Si noti che il sensore di Hall misura la componente perpendicolare (al piano del sensore) del vettore campo magnetico. Pertanto, se si vuole misurare il valore massimo del campo magnetico, il sensore di Hall deve essere orientato di conseguenza.

I semiconduttori InP, InSb, GaAs, Ge, Si sono i più utilizzati per la produzione di sensori di Hall. L'uso dei semiconduttori è dovuto al fatto che, grazie all'elevata mobilità dei portatori di corrente, hanno un'alta sensibilità

all'influenza del campo magnetico. L'elemento sensibile del sensore di Hall può essere realizzato sia in materiale sfuso sia sulla base di film di semiconduttori su substrati isolanti. Il sensore di Hall può avere una forma diversa, che influisce sulla linearità della dipendenza del segnale di uscita dal campo magnetico, sulla sensibilità. Le dimensioni dei moderni sensori di Hall non superano $1 \times 1 \times 0,5$ mm, le correnti di alimentazione sono solitamente di 1- 100 mA (dipende dalla resistenza di ingresso del sensore), la sensibilità può raggiungere i 1000 mV/T e oltre, la temperatura di funzionamento va da -270 °C a 200 °C. Oltre alla sensibilità, uno dei parametri principali dei sensori di Hall è la dipendenza dalla temperatura della sensibilità, della resistenza di ingresso e del segnale di uscita iniziale U_o . Nei sensori di Hall di buona qualità questi parametri dovrebbero essere insignificanti.

3.3. Moderni sensori a effetto Hall

I sensori di Hall sono prodotti da molte aziende nel mondo, ad esempio da Honeywell. I sensori DHC-0.5A sono conosciuti in Russia.

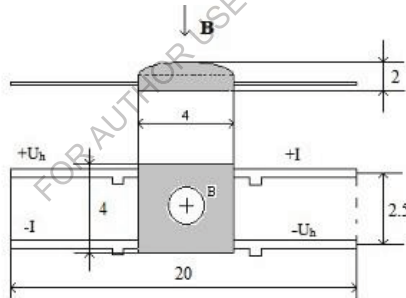


Fig. 3.4. Rappresentazione schematica di uno dei sensori DHC-0.5A

Il sensore di Hall DHC-0,5A è progettato per misurare il valore dell'induzione magnetica sulla base della conversione dell'induzione magnetica in tensione di uscita. Il sensore è realizzato sulla base di una struttura topologica planare formata sulla superficie di un cristallo di silicio.

Principali caratteristiche tecniche:

La corrente di controllo nominale è di 3 mA;

Tensione di Hall con induzione magnetica 0,25 T e corrente di controllo nominale - 70 mV (sensibilità $\gamma = 280$ mV/T);

Tensione residua alla corrente di controllo nominale - non più di 7 mV

Resistenza di ingresso - 1,8 ... 3 kOhm (resistenza tra i pin I);
Resistenza di uscita - non superiore a 3 kOhm (resistenza tra i pin U_h);

Peso - non superiore a 2,5 g.

$-I_h$ e $+I_h$ - per il collegamento della sorgente di corrente di controllo (pin di corrente);

$-U_h$ e $+U_h$ sono pin di segnale di uscita (pin di Hall); la resistenza tra i pin di corrente è più piccola di quella tra i pin di Hall.

Il sensore DHC-0.5A è sensibile alla direzione dell'induzione magnetica e alla polarità della corrente di controllo.

Sensori di campo magnetico (sensori di Hall) basati su film di GaAs. Le caratteristiche tecniche dei sensori di campo magnetico basati sull'effetto Hall (sensori di Hall) dipendono sia dal materiale utilizzato sia dalle dimensioni geometriche e dalla forma dell'elemento sensibile. I materiali più comuni utilizzati per gli elementi sensibili dei sensori di Hall sono l'InSb e il GaAs, i cui principali vantaggi sono l'elevata mobilità dei portatori di carica, che si traduce in un'alta sensibilità dei sensori.

Di seguito vengono presentati i risultati dello sviluppo e dello studio sperimentale delle caratteristiche metrologiche dei trasduttori di campo magnetico (sensori) e dell'effetto dell'irradiazione neutronica sui parametri principali.

Per creare i sensori sono stati utilizzati film di GaAs su arseniuro di gallio semi-isolante. Lo scopo dello sviluppo era quello di creare sensori con bassi livelli di rumore, elevata linearità della dipendenza del segnale utile dal campo magnetico, debole dipendenza dei parametri dalla temperatura e miniaturizzazione dell'area di lavoro. La Fig. 3.2 mostra uno schema approssimativo dell'elemento sensibile del sensore.

Lo spessore dei film di CaAs variava tra 0,1-5 μm e la concentrazione di portatori di corrente $\cong 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La dimensione dell'area di lavoro era di $100 \times 100 \mu\text{m}$. A seconda dello spessore dei film e della concentrazione di portatori di corrente, le resistenze elettriche di ingresso e di uscita dei sensori variavano nell'intervallo 15 - 1500 ohm. Le correnti di alimentazione erano di 3 - 150 mA. Il segnale di uscita iniziale U_o era compreso tra 0,01 e 5 mV, la dipendenza dalla temperatura di U_o era inferiore allo 0,1%/K, $R \sim 0,08\%/K$, la sensibilità al campo magnetico era compresa tra 80 e 500 mV/T. La linearità del segnale di uscita nel campo fino a 2 Tesla non è peggiore dello 0,1%.

I sensori possono operare in un intervallo di temperatura compreso tra 4,2 e 400 K.

È noto, ad esempio, che la resistenza dei dispositivi a semiconduttore all'irradiazione dipende dal livello di drogaggio, dalla defettività del materiale semiconduttore, ecc. Le proprietà elettrofisiche dei semiconduttori sono maggiormente influenzate dall'irradiazione neutronica. L'irradiazione neutronica ha il maggiore impatto sulle proprietà elettrofisiche dei semiconduttori. Il meccanismo di influenza è principalmente la formazione di difetti strutturali e la trasformazione radioattiva degli atomi. Con l'aumento del livello di drogaggio, l'influenza dell'irradiazione si indebolisce.

Le caratteristiche dei sensori sono state misurate a una temperatura di 300 K prima dell'irradiazione e dopo l'irradiazione con flussi di neutroni Φ da $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ a $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. La temperatura durante le misurazioni è stata stabilizzata con una precisione di 0,1 K. L'energia dei neutroni era di 1 MeV, l'intensità del flusso era di $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$.

La Fig. 3.5 mostra la dipendenza della variazione relativa della resistenza d'ingresso dei trasduttori di misura del campo magnetico (sensori di Hall) dal valore del flusso di neutroni Φ . La resistenza d'ingresso dei sensori è di 1,1 kOhm, il segnale di uscita iniziale non supera i 4,5 mV, la sensibilità è di 350 mV/T.

Le variazioni di resistenza iniziano a flussi di $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ e ammontano al 15-20 %, mentre a $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ la resistenza aumenta di 3,3 volte. Allo stesso tempo, il segnale di uscita iniziale a una tensione di alimentazione costante di 4,5 V è cambiato di non più del 15%, il che equivale all'effetto di un campo magnetico fino a 1 mT. A tensione di alimentazione costante, la sensibilità dopo l'irradiazione è diminuita di circa 1,4 volte. Dopo l'irradiazione con flussi di $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ la resistenza dei sensori cresce all'infinito.

Pertanto, i sensori di campo magnetico sono utilizzabili in un ampio intervallo di temperatura, hanno una debole dipendenza dalla temperatura della sensibilità e del segnale di uscita iniziale (inferiore allo 0,1%). La non linearità del segnale di uscita non supera lo 0,1% nel campo fino a 2T, la sensibilità può raggiungere 500 mV/T.

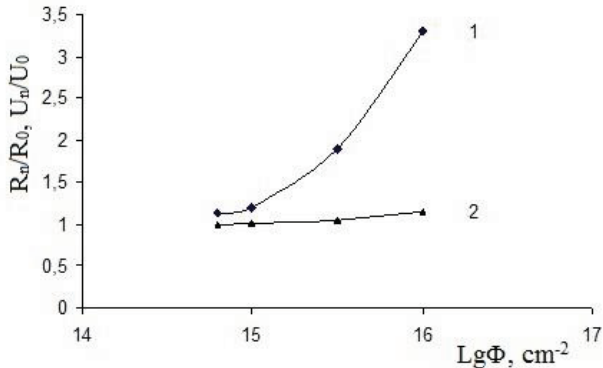


Fig. 3.5. Dipendenza della variazione relativa della resistenza di ingresso R_n / R_0 (1) (dove R_n - valore della resistenza dopo l'irradiazione, R_0 - resistenza iniziale) e del segnale di uscita iniziale U/U_{n0} (2) (dove U_n - valore del segnale di uscita dopo l'irradiazione, U_0 - segnale di uscita iniziale) del trasduttore di misura del campo magnetico dal valore dell'irradiazione del flusso di neutroni.

Gli studi hanno dimostrato che a 300 K i trasduttori sviluppati sono utilizzabili fino a livelli di irradiazione neutronica di 10^{15} cm^{-2} . I cambiamenti risultanti nelle caratteristiche dei trasduttori fino a livelli di $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ possono essere spiegati in una certa misura, dato che è stata osservata una buona ripetibilità dei risultati. I trasduttori possono essere utilizzati sia per la diagnostica dei dispositivi tecnici dell'ingegneria dell'energia nucleare, delle apparecchiature criogeniche e, grazie all'elevata sensibilità, in ecologia per il controllo dei parametri ambientali, come i campi elettromagnetici, ecc.

Alcune caratteristiche di sensori sperimentali di campo magnetico (sensori di Hall) basati su film di GaAs per temperature criogeniche e range climatico:

- materiale - GaAs
- intervallo di temperatura operativa 4,2 - 400 K
- corrente di alimentazione 1 - 100 mA
- sensibilità 60 - 500 mV/T
- segnale iniziale entro 0,010 - 5 mV
- area attiva del sensore 100x100 μm
- dimensioni complessive - almeno 1x1x0,4 mm

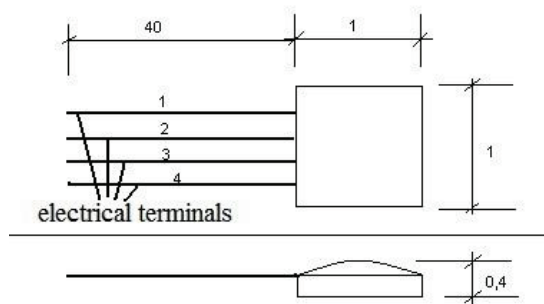


Fig. 3.6: Rappresentazione schematica del sensore di Hall. Uscite: 1,4 - tensione di alimentazione (corrente); 2,3 - tensione di uscita (U_h)

3.4. Una serie di generatori di campi elettromagnetici di Hall di precisione (sensori di Hall)

I risultati della ricerca e le caratteristiche dei sensori di Hall ad alta precisione basati su InSb e GaAs sono presentati qui (Zhelamsky M.V., Gorbachuk N.T. et al.). Le misure magnetiche sono una delle principali nello sviluppo di apparecchiature elettrofisiche che utilizzano campi magnetici. Le dimensioni ridotte dei generatori di f.e.m. di Hall (HG) rappresentano un innegabile vantaggio rispetto ad altri dispositivi magnetometrici, che ne determina l'ampia applicazione per le misure magnetiche in elettrofisica.

Quando si misurano campi forti, una delle principali fonti di errore è l'influenza della temperatura sul segnale di uscita HG, che è insignificante sullo sfondo di un segnale di uscita relativamente grande. Ad esempio, in un campo di 2 Tesla, il segnale di uscita HG può raggiungere i 200 mV, mentre una variazione di 1°C della temperatura modifica il segnale di uscita di pochi microvolt. Inoltre, a questo livello di segnali, l'influenza della temperatura è additiva rispetto al segnale principale e può essere compensata metodicamente, soprattutto nella regione criogenica, dove l'elio liquido è uno stabilizzatore di temperatura ideale e i campi sono sufficientemente elevati. Quando si misurano campi forti, occorre prestare particolare attenzione a ridurre al minimo le componenti planari e di gradiente del segnale di uscita HG.

Nei campi magnetici deboli, a livello di piccoli segnali di uscita HG, le fonti di errore aggiuntive, come gli effetti termoelettrici (Seebeck, Peltier), gli effetti di autocampo, le proprietà e l'omogeneità del materiale applicato,

sono più pronunciate. Pertanto, ad esempio, sono necessarie misure speciali per misurare la distribuzione del campo magnetico nella zona centrale di un magnete a quadrupolo.

In entrambi i casi, sono importanti anche la minimizzazione dell'errore, la calibrazione e la direzionalità.

L'obiettivo del lavoro era sia ottenere la massima sensibilità assoluta dei generatori di Hall nella misurazione dei campi magnetici deboli, sia massimizzare l'accuratezza e la stabilità della misurazione dei campi forti.

Vengono descritti i risultati dello sviluppo di dispositivi magnetometrici basati su generatori di Hall per la misurazione di campi magnetici deboli a livello del campo terrestre, che comprendono sia l'ottimizzazione del design, della tecnologia di produzione e delle proprietà elettrofisiche degli HG, sia una serie di misure circuitali, progettuali e metodologiche volte a raggiungere un'elevata precisione e sensibilità assoluta delle misure.

Vengono inoltre descritti i sensori di campo magnetico a tre componenti sviluppati.

Vengono analizzate le principali proprietà e caratteristiche dei dispositivi sviluppati.

Sono stati utilizzati due materiali semiconduttori: arseniuro di gallio drogato (GaAs) e antimoniuro di indio (InSb). Il primo è stato utilizzato per ottenere la massima stabilità di temperatura e linearità, il secondo per ottenere la massima sensibilità delle misure.

Per migliorare l'accuratezza della misura, è stata scelta una forma di cristallo a croce ottimale, mostrata in fig. 3.7.



Fig. 3.7. Cristallo (chip) dell'oscillatore di Hall.

Le dimensioni della zona attiva del generatore sono $100 \times 100 \mu\text{m}$ e possono essere ulteriormente ridotte se necessario. La determinazione della posizione centrale dell'area di lavoro viene eseguita su un'apparecchiatura speciale con una precisione non inferiore a $\pm 0,5 \mu\text{m}$, mentre la determinazione della posizione angolare della normale al piano HG - con una precisione non inferiore a $\pm 0,1^\circ$.

Un'ampia gamma di variazione della resistenza di ingresso (5-1500 ohm) offre la possibilità di selezionare il valore di corrente nominale entro 1-200 mA con una sensibilità magnetica invariata per ottenere la risoluzione e la velocità di misura del campo magnetico richieste.

Il valore dell'offset HG iniziale determinato dalla tecnologia è - 500 μV . La riduzione dell'offset al valore $< 100 \mu\text{V}$ è assicurata da un'ulteriore regolazione. La variazione dei parametri in un lotto non supera il 10%. Il coefficiente di temperatura della tensione di offset iniziale è determinato dalla progettazione dell'HG e può essere portato a un valore inferiore a 1-2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

La termostabilizzazione attiva dell'HG garantisce la stabilità dei risultati a $\pm 0,05 \text{ Gs}$ per 8 ore di funzionamento. L'intervallo di temperatura operativa è di 4,2-450 K.

Per gli HG di precisione, la sensibilità magnetica alla corrente di alimentazione nominale è di $8\pm 2 \mu\text{V}/\text{Gs}$ per il GaAs e $25\pm 3 \mu\text{V}/\text{Gs}$ per l'InSb. L'elevata sensibilità assoluta delle misure è garantita dalla minimizzazione del rumore dell'HG e dell'apparecchiatura, dai circuiti adottati e dalle misure di progettazione, oltre che da uno speciale algoritmo.

Sulla base degli HG descritti sono stati creati assemblaggi termostabilizzati a tre componenti. Ogni assemblaggio è costituito da tre HG monocomponente assemblati sui piani ortogonali del cubo di rame di supporto. Un termometro e un riscaldatore sono montati sui piani liberi e vengono utilizzati per stabilizzare la temperatura dell'assemblaggio. Il cubo di supporto sul PCB è coperto da un isolamento termico esterno e montato su un supporto termoisolante. I parametri principali degli assiemi HG a tre componenti sono riportati nella tabella 3.1.

Tabella 3.1. Parametri di base degli assemblaggi HG a tre componenti

Parameter	Value
Assembly size	Cube with a side of 7 mm
Accuracy of determining the spatial and angular coordinates of single-component GH	0.5 μm , 0.1 corner radius
Rated supply current	30 mA
Assembly stabilization accuracy in the range + - 60	No worse 0,05 $^\circ\text{C}$
Absolute sensitivity with special equipment	$< 1 \text{ mGs}$
Assembly dimensions without equipment	20x20x15 mm

3.5. Misure stimate dei campi magnetici alternati nell'ambiente

Molti lavori sono dedicati ai problemi di misurazione dei campi magnetici ed elettromagnetici alternati. Analizzando la letteratura si può dire che i metodi più comuni utilizzati per misurare i campi magnetici si basano sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica e dell'effetto Hall.

Il metodo di misura a induzione si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, che consiste nel fatto che in un circuito conduttore posto in un campo magnetico, in determinate condizioni, si genera una forza elettromotrice (EMF), determinata dall'espressione nota:

$$\varepsilon_i = -Nd\Phi/dt \quad (3.11),$$

dove N è il numero di spire del circuito, Φ è il flusso magnetico che penetra nel circuito, t è il tempo.

Il metodo dell'induzione può essere utilizzato per misurare campi magnetici sia variabili che costanti.

Per misurare i campi magnetici permanenti, è necessario modificare direttamente nel tempo uno o più parametri della bobina di induzione (circuito): l'angolo α tra la normale al piano del circuito e il vettore dell'induzione magnetica, l'area del circuito S , la permeabilità magnetica relativa del nucleo μ_c , il coefficiente di smagnetizzazione del nucleo k . Il valore del CEM indotto per queste condizioni può essere determinato dall'espressione

$$\varepsilon_i = -N(X \frac{dB}{dt} + B \frac{dX}{dt}) \quad (3.12),$$

dove $X = S \cdot \mu_c \cdot \cos \alpha / [1 + N(\mu_c - 1)]$ è il cosiddetto parametro generalizzato della bobina di induzione, i cui dettagli non sono importanti per questo lavoro.

L'accuratezza della misurazione dei campi magnetici mediante un sensore a induzione dipende sia dalle caratteristiche di progettazione del sensore stesso sia, in larga misura, dallo schema di misurazione e dalle apparecchiature secondarie che determinano l'entità del segnale di uscita.

Si noti che nella pratica il segnale misurato, di norma, non ha una forma sinusoidale corretta, spesso sotto forma di impulsi separati, ecc.

L'essenza del metodo di misurazione con l'ausilio di trasduttori (sensori) di Hall consiste nell'utilizzo dell'effetto Hall, che consiste nel verificarsi di un EMF ε_{hal} nella direzione perpendicolare alla corrente I nella piastra conduttrice posta nel campo magnetico B . A un valore costante della corrente nella piastra, il valore dell'EMF è determinato dall'espressione:

$$\varepsilon_{hal} = A \cdot I \cdot B / n \cdot e \cdot d \quad (3.13),$$

dove A è una costante che varia entro 1...2 a seconda dei meccanismi di dispersione dei portatori di corrente, n è la concentrazione dei portatori di corrente nel materiale della piastra, e è la carica degli elettroni, d è lo spessore della piastra.

I materiali semiconduttori sono utilizzati per la produzione di convertitori di Hall, in quanto in essi l'effetto considerato è della massima importanza. Recentemente sono stati utilizzati semiconduttori sotto forma di film su substrati isolanti, il che semplifica la tecnologia di produzione, consente la miniaturizzazione, ecc.

I trasduttori di Hall basati su InSb e GaAs hanno la sensibilità più elevata. Inoltre, per aumentare la sensibilità vengono utilizzati vari metodi tecnologici: progettazione integrata, uso di concentratori ferromagnetici e altri.

La valutazione sperimentale dei valori dei campi magnetici alternati presenti nell'ambiente durante il funzionamento di varie apparecchiature domestiche e industriali è stata effettuata utilizzando una bobina di induzione fabbricata e, in alcuni casi, un trasduttore di Hall basato su InSb.

Le misure con l'ausilio della bobina di induzione sono state eseguite dopo la sua calibrazione secondo lo schema di connessione semplificato. Durante la calibrazione, la bobina è stata posta in un campo magnetico alternato creato da una corrente sinusoidale I nel conduttore. A tale scopo è stato utilizzato un generatore di corrente alternata. Il segnale in uscita dalla bobina è stato misurato con un voltmetro a tensione alternata.

La grandezza del campo magnetico a una certa distanza r dal conduttore è stata calcolata sulla base della legge di Bio-Savard-Laplace:

$$B = -N\mu\mu_0 I/2\pi r \quad (3.14),$$

dove μ è la permeabilità magnetica relativa del mezzo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Gn/m è la costante magnetica.

Durante la calibrazione sono stati variati la distanza dal conduttore, l'entità della corrente e la sua frequenza. I risultati sono stati poi mediati e tracciati.

La Fig. 3.8 mostra la dipendenza della forza elettromotrice risultante nella bobina (tensione U misurata da un voltmetro) dalla frequenza del campo magnetico alternato (corrente nel conduttore). Il grafico mostra il ricalcolo di U in funzione del campo magnetico.

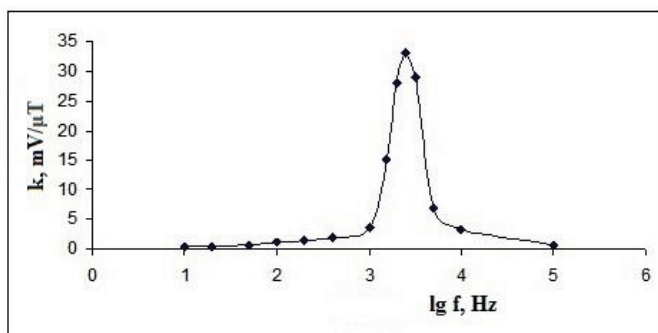


Fig. 3.8. Dipendenza della sensibilità $k = \Delta U / \Delta B$ della bobina di induzione fabbricata dalla frequenza del campo magnetico f .

Nella successiva applicazione pratica della bobina, sono stati misurati il segnale di uscita e la sua frequenza. Per le graduazioni e le misure pratiche è stato utilizzato lo stesso voltmetro, poiché le sue caratteristiche tecniche possono influenzare i risultati ottenuti. In base ai dati ottenuti e alla curva di calibrazione, è stato determinato il valore del campo magnetico alternato.

Per le misure con il trasduttore di Hall a base di InSb è stato utilizzato un concentratore ferromagnetico. Di conseguenza, la sensibilità è stata di circa $1 \cdot 10^4$ mV/T e può essere aumentata con miglioramenti progettuali. I dati ottenuti con i trasduttori di Hall corrispondono alle misure della bobina di induzione con una precisione del 20%.

I valori determinati dei campi magnetici alternati emessi da vari dispositivi elettrici sono riassunti nella Tabella 3.2.

Tabella 3.2. Risultati delle misurazioni dei campi magnetici di diverse sorgenti di radiazioni

Object	Distance	Magnetic field value, μT
Supra TV	1.5 m from the screen	1-2
	3.5 m from the screen	0.03
TV Slavutich (big screen)	1.5 m from the side	5
	3 m from the screen	4
computer monitor	0,2 m from the side	50
high-voltage power line (110 kV)	0,1-0,2 m from the screen	3-5
in - off household appliances (iron, lamp)	70-100	2-5
	0.1-1.0	up to 2 (pulses)

Le norme sanitarie esistenti per i livelli ammissibili di campi magnetici, ricavati da varie fonti, sono valori di 0,2-0,5 μT . Si noti che nella letteratura nota non sono indicate le frequenze delle radiazioni, anche se dal punto di vista fisico potrebbero non avere lo stesso effetto sugli oggetti biologici.

Nonostante l'approccio piuttosto semplificato, i risultati ottenuti concordano abbastanza bene con altri dati noti in letteratura. Questo ci permette di parlare della possibilità di utilizzare i metodi descritti per l'indicazione e la valutazione dei livelli di radiazioni elettromagnetiche, la creazione di indicatori economici (domestici) di radiazioni elettromagnetiche e la creazione di dispositivi di misurazione di alta precisione basati su trasduttori di Hall.

3.6. Sensore di Hall per autoveicoli. Sensore di Hall nel sistema di accensione

Attualmente i sensori di Hall sono ampiamente utilizzati nell'industria automobilistica. Vengono utilizzati per controllare il movimento e la rotazione di vari componenti dell'auto, le vibrazioni del motore, il sistema di accensione e altro.

Probabilmente il più famoso è il sensore di Hall per autoveicoli, utilizzato per controllare e garantire il funzionamento del sistema di accensione. Lo schema del dispositivo è illustrato nella fig. 3.9.

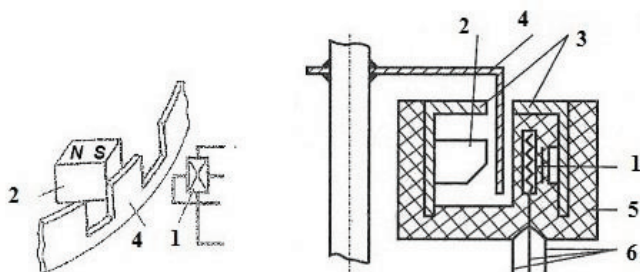


Fig. 3.9. Rappresentazione schematica del dispositivo del sensore di Hall per automobili. 1 - elemento sensibile del sensore di Hall, da cui partono i cavi per il chip di elaborazione del segnale di uscita, 2 - magnete permanente, 3 - conduttori magnetici, 4 - pale del rotore, 5 - alloggiamento in plastica, 6 - cavi del sensore.

Il sensore è costituito da un elemento sensibile 1 (direttamente il sensore di Hall) e da un microcontrollore 1 ad esso integrato (microcircuito per l'elaborazione del segnale in uscita dal sensore di Hall). Di conseguenza, il sensore di Hall per autoveicoli ha tre contatti 6 (terminali) per il collegamento al circuito elettrico (circuito) del veicolo. Il sensore di Hall per autoveicoli per il sistema di accensione dispone anche di un magnete permanente 2, separato da uno spazio dall'elemento sensibile del sensore di Hall, e di fili magnetici. Il campo magnetico del magnete permanente è in grado di indurre un segnale di uscita dal sensore di Hall e le lamelle metalliche 4 dell'albero rotante, sovrapponendosi (smistando) il flusso magnetico, porteranno a una corrispondente variazione (oscillazione) del segnale di uscita. Inoltre, il segnale di uscita è collegato al sistema di alimentazione della scintilla di accensione nel momento desiderato della posizione dell'albero.

Come si controlla il sensore di Hall?

Esistono diversi modi per verificare il corretto funzionamento del sensore di Hall dell'auto. Uno dei più semplici è il seguente. Collegare il sensore di Hall dell'automobile secondo lo schema illustrato nella fig. 3.10. Il sensore di Hall rimosso può essere alimentato da una batteria Krona (9 V). Per misurare il segnale di uscita (tensione) V , è meglio utilizzare un multimetro digitale compatto. Se il flusso magnetico attraverso l'elemento sensibile del sensore di Hall cambia (ad esempio, ruotando l'albero del rotore o semplicemente colmando la distanza con una piastra metallica), anche il segnale di uscita del sensore cambierà, indicando la sua operatività. Il

segnale di uscita può variare a seconda del modello di sensore, ma è tipicamente compreso tra 0,5 e 1,0 V.

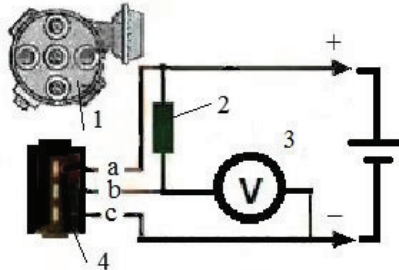


Fig. 3.10. Controllo del sensore di Hall. Chimica generale. 1 - sensore del distributore, 2 - resistenza da 2 kOhm, 3 - voltmetro (multimetro digitale), 4 - connettore del sensore del distributore (sensore di Hall).

3.7. Trasduttori magnetoresistivi. Effetto magnetoresistivo

La variazione della resistenza al campo magnetico di un conduttore (semiconduttore) in cui scorre una corrente elettrica è chiamata effetto magnetoresistivo. L'aumento della resistenza elettrica sotto l'azione di un campo magnetico si verifica sia nel caso di perpendicolarità del vettore di induzione magnetica alla superficie delle piastre di semiconduttore (magnetoresistenza trasversale) sia nel caso di parallelismo (magnetoresistenza longitudinale). Tuttavia, nel secondo caso la resistenza cambia, di norma, in modo insignificante.

La variazione della resistenza del semiconduttore in un campo magnetico B è proporzionale al quadrato della mobilità μ dei portatori di corrente:

$$\Delta\rho/\rho = c \mu^2 \cdot B^2 \quad (3.15),$$

dove c è il coefficiente di proporzionalità legato alla diffusione dei portatori di carica.

In una piastra di semiconduttore posta in un campo magnetico, sui portatori di carica in movimento agisce una forza di Lorentz proporzionale al campo elettrico di Hall. Tuttavia, il campo di Hall equilibra solo i portatori che viaggiano a velocità medie. Nei mezzi lenti il campo di Hall è maggiore, nei mezzi veloci la forza di Lorentz è maggiore. La traiettoria si piega e la lunghezza del cammino libero effettivo diminuisce, con conseguente aumento della resistenza aerodinamica. Ovviamente, quanto più piccolo è l'effetto Hall in un semiconduttore, tanto maggiore è la resistenza. In un

semiconduttore con due tipi di portatori, il campo di Hall è minore, quindi le linee di corrente non sono parallele alle facce e l'effetto di magnetoresistenza è di conseguenza maggiore.

Per eliminare l'influenza dell'effetto Hall, è possibile utilizzare forme geometriche speciali di campioni in un semiconduttore con una predominanza di un tipo di portatori. L'esempio più evidente dell'influenza della struttura sull'effetto di magnetoresistenza è il disco di Corbino, che è una piastra di semiconduttore con una disposizione concentrica di contatti: uno al centro e il secondo sulla circonferenza a distanze uguali dal primo. Se si applica una tensione agli elettrodi di questo disco, le traiettorie degli elettroni assomigliano a raggi radiali provenienti dal centro. Quando viene posto in un campo magnetico perpendicolare al piano della piastra, i portatori vengono deviati lungo la superficie, le linee di corrente si allungano, ma non si verifica l'accumulo di cariche e non si forma il campo elettromagnetico di Hall. In questa struttura si osserva il massimo effetto di magnetoresistenza, ma a causa delle difficoltà tecniche, l'applicazione pratica del disco Corbino è molto difficile.

3.8. Progetti di magnetoresistori

L'effetto di aumento della magnetoresistenza dovuto alla geometria del resistore può essere ottenuto anche in un wafer di semiconduttore la cui lunghezza L è molto più piccola della larghezza W . Quando la piastra è sottoposta a un campo magnetico la cui direzione è perpendicolare al piano della piastra, la tensione di Hall viene attenuata a causa dell'effetto shunt degli elettrodi di corrente. Geometricamente, l'effetto di magnetoresistenza in questo caso è tanto più forte quanto più piccolo è il rapporto L/W . Per aumentare ulteriormente l'effetto, si collegano resistenze con un rapporto L/W ridotto.

La base del materiale del magnetoresistore è solitamente l'antimoniuro di indio, che ha un'elevata mobilità dei portatori di corrente, a cui viene aggiunto l'1,8% di NiSb. Dopo la fusione e il successivo raffreddamento, l'antimoniuro di nichel cristallizza in antimoniuro di indio sotto forma di aghi con uno spessore di $1 \mu\text{m}$ e una lunghezza di circa $50 \mu\text{m}$, disposti parallelamente l'uno all'altro e perpendicolarmente alla direzione della corrente. La conducibilità dell'ago di NiSb è di circa $10^4 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, mentre quella dell'InSb è di due ordini di grandezza inferiore.

In questo modo, gli aghi svolgono il ruolo di buoni elettrodi conduttori, dividendo il bulk del semiconduttore in regioni separate con un piccolo rapporto L/W . Questo porta a una forte soppressione del campo di Hall e, di conseguenza, alla curvatura delle traiettorie degli elettroni sotto l'azione del campo magnetico, ovvero a un aumento dell'effetto di magnetoresistenza.

Un altro modo per realizzare questo principio si basa sulla tecnologia microelettronica. La sua essenza risiede nella formazione di magnetoresistori basati su film epitassiali di silicio contenenti sezioni di shunt a bassa resistenza di silicio policristallino (PS) situate perpendicolarmente alla direzione della corrente.

La tecnologia di fabbricazione di questo materiale magnetoresistivo si basa sulla crescita simultanea di film di silicio mono e policristallino (PS). Mediante processi di ossidazione e fotolitografia, si formano regioni locali di SiO₂ in cui crescono film di PC durante la crescita epitassiale del film.

Per chiudere il campo elettromagnetico di Hall, le regioni PS sono drogate con atomi di fosforo fino alla concentrazione di 10^{21} cm^{-3} e, tenendo conto della maggiore velocità di diffusione degli atomi di drogante nel PS rispetto al silicio a cristallo singolo, il drogaggio viene effettuato contemporaneamente al processo di creazione del film nelle regioni n⁺ - a cristallo singolo sotto contatto ohmico.

Bibliografia

1. O.K.Homeriki. *Poluprovodnikovye preobrazovateli magnitnogo polya* [Trasduttori a semiconduttore di campo magnetico]. M.-Energoatomizdat, 1986, 136 pp.
2. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Fisica dei dispositivi a semiconduttore]. M.: Radio i svyaz', 1990. 264 p.
3. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. ecc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Trasduttori di misura a semiconduttore di deformazione, temperatura e campo magnetico per l'uso in condizioni di esposizione alle radiazioni, un'ampia gamma di temperature e campi

magnetici]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura, v.3(29), 2005, p.46-54.

4. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil Sensori a semiconduttore per un ampio intervallo di temperatura. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, Gennaio 2014, pp.1-4.

5. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shekhovtsov V.I. et al. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki*. Moskva [Azione delle radiazioni penetranti sui prodotti delle apparecchiature elettroniche]. Mosca: *Sov. radio*, 1980. 224 p.

6. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Trasduttori di misura basati su GaAs, polisilicio e germanio disperso e prospettive per il loro utilizzo]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyaniye neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influenza dell'irradiazione neutronica sulle caratteristiche dei trasduttori di misura a semiconduttore di temperatura, deformazione e campo magnetico]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

8. Henrichsen K. N. Classificazione dei metodi di misurazione magnetica //CERN acceleration schol. Misurazione magnetica e allineamento. Montreux. Svizzera. Marzo, 1992 , p.70-83.

9. Berkes B. Generatori di Hall //CERN acceleration schol. Misurazione e allineamento magnetico. Montreux. Svizzera. Marzo, 1992 , p.167-192.

10. Afanasyev Yu. V., Sludentsov N. V., Shchelkin A. P. *Magnitometricheskie preobrazovateli, pribory, ustanovki*. L.: [Trasduttori magnetometrici, dispositivi, impianti]. L.: *Energiya. Leningradskiy filial*. 1972.- 272p.

11. Knoopers H. G. et.al. Terzo round del test di bench mark di ITER // *Proceedings of EUCAS-97*. P. 1271-1274.

12. Zhelamskii M.V., Sychevskii S.E., Filatov O.G., Gorbachuk N.T. et al. *Ryad pretsizionnykh generatorov E.D.S. Kholla* [Una gamma di oscillatori di precisione E.D.S. Hall]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v. 1(27), 2002, pp.9-14.

13. V.V.Panin, B.M.Stepanov. *Izmerenie impul'snykh magnitnykh i elektricheskikh poley* [Misurazione di campi magnetici ed elettrici pulsati]. - Moskva: Energoatomizdat, 1987. - 120 p.

14. I.A.Bolshakova, M.R.Gladun, R.L.Golyaka e altri. *Mikroelektronnyye sensornye ustroystva magnitnogo polya: Monografiya / Pod red. Z.Ya. Gotri* [Dispositivi microelettronici di sensori del campo magnetico: Monografia / A cura di Z.Y. Gotry]. - L'vov: Izdatel'stvo Natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politehnika", 2001. - 412 p.

15. Gorbachuk N.T., Firsov A.A.. *Datchiki magnitnogo polya (datchiki Kholla) na osnove plenok GaAs* [Sensori di campo magnetico (sensori di Hall) basati su film di GaAs].

Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte '2010" [Conferenza internazionale scientifica e pratica "Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte '2010"]. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.6, pp.24-25, 21-30 giugno 2010, Odessa.

16. N.T. Gorbachuk, P.I. Didenko. *Otsenochnye izmereniya peremennykh magnitnykh poley v okruzhayushchey srede* [Misure stimate di campi magnetici alternati nell'ambiente]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Nauchnye issledovaniya ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya '2010"* [Conferenza internazionale scientifica e pratica "La ricerca scientifica e la sua applicazione pratica. Stato moderno e vie di sviluppo 2010"]. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.3, p.40-41, 4-15 ottobre 2010, Odessa.

17. Amoskov V.M., Vasiliev V.N., Gorbachuk N.T., Sychevsky S.E. et al. *Pretsizionnyy trekhkomponentnyy magnitometr na generatorakh e.d.s. Kholla dlya izmereniya slabykh magnitnykh poley* [Magnetometro di precisione a tre componenti su generatori Hall e.d.s. per la misurazione di campi magnetici deboli]. // *Giroskopiya i navigatsiya* [Giroscopia e navigazione], n. 4(31), 2000. p. 56.

18. Filatov, O.G.; Soldatenkov, V.A.; Sychevskiy, S.E.; Gorbachuk, N.T., et al. *Sistema elektromagnitnogo pozitsionirovaniya dlya sistemy pritselivaniya i indikatsii, ustanovlennoy na shleme* [Sistema di posizionamento elettromagnetico per il sistema di puntamento e indicazione montato sul casco]. *Elektronika: Nauka, tekhnologii, biznes*. [Elettronica: scienza, tecnologia, affari]. 5/2003, p.62-67.

19. Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Razrabotka pretsizionnykh datchikov fizicheskikh velichin na osnove optimizirovannykh magnitnykh tsepey* [Sviluppo di sensori di precisione di grandezze fisiche sulla base di circuiti magnetici ottimizzati]. *Nauchno-tehnicheskii zhurnal "Aviakosmicheskoe priborostroenie"* [Rivista scientifica e tecnica "Aviakosmicheskoe Instrument Engineering"], 2004, N 5, pp. 7-13.

20. Zhelamskiy M.V., Konstantinov A.B., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Odnokomponentnyy pervichnyy preobrazovatel', odnokomponentnyy datchik, trekhkomponentnyy pervichnyy preobrazovatel' i trekhkomponentnyy datchik magnitnogo polya, rabotayushchie na effekte Kholla*. [Trasduttore primario monocomponente, sensore monocomponente, trasduttore primario tricomponente e sensore di campo magnetico tricomponente funzionante a effetto Hall]. Brevetto della Federazione Russa №2001115570.

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Effetto Piezo-Hall nel p-germanio. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.

22. Gorbachuk N.T. *Chuvstvitel'nost' magnitosoprotivleniya i khollovskoy podvizhnosti v slabolegirovannom p-Ge k izmeneniyu kontsentratsii primesi* [Sensibilità della magnetoresistenza e della mobilità di Hall in p-Ge leggermente drogato alle variazioni della concentrazione di impurità]. *UFZh*, 1984, n. 6, pag. 92.

23. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyanie deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob'emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Effetto della deformazione sull'entità della magnetoresistenza in film bulk p-Ge e p-Ge su arseniuro di gallio]. *OPT*, 1984, n. 6, pag. 88.

24. Mykola Gorbachuk. MATERIALI ELETTROROTECNICI. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londra, N2 9ED, Regno Unito, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.

25. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconduttori].- *L. Nauka* 1967. 439p.

26. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Corso generale di fisica: guida allo studio], T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.

27. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagnetoelettronica]. *Tom 1. DMK.-M.*:2001.

Capitolo 4. Umidità, gas. Metodi di misurazione dell'umidità. Igrometro

L'aria che ci circonda contiene una certa quantità di vapore acqueo (molecole d'acqua). La quantità massima possibile di vapore acqueo nell'aria (saturazione dell'aria con vapore acqueo) dipende dalla temperatura. Il numero di molecole del vapore acqueo in saturazione aumenta con l'aumentare della temperatura. Il vapore acqueo di saturazione si forma, ad esempio, sulla superficie dell'acqua quando le temperature dell'acqua e dell'aria sono uguali - si verifica l'equilibrio: il numero di molecole d'acqua che evaporano è uguale al numero di molecole che condensano.

In generale, l'aria normale a una determinata temperatura non contiene vapore acqueo saturo. Ma quando la temperatura dell'aria cambia (si abbassa, ad esempio di notte), il vapore acqueo insaturo può trasformarsi in vapore acqueo saturo - il punto di rugiada. Il punto di rugiada è la temperatura alla quale il vapore acqueo nell'aria diventa saturo.

In base al livello di vapore acqueo contenuto, l'aria è caratterizzata dall'umidità. L'umidità assoluta ρ è la quantità di vapore acqueo contenuta in 1 metro cubo a una determinata temperatura. L'umidità relativa dell'aria f è il rapporto tra l'umidità assoluta e la quantità di vapore ρ_o , necessaria per saturare 1 metro cubo d'aria a una determinata temperatura (cioè la quantità corrispondente alla condizione di punto di rugiada per una determinata temperatura. il valore di ρ_o può essere trovato nelle tabelle pertinenti):

$$f = (\rho/\rho_o)100\% (4.1).$$

Gli strumenti per la misurazione dell'umidità sono chiamati igrometri. Attualmente vengono utilizzati principalmente i seguenti metodi e strumenti per la misurazione dell'umidità dell'aria.

4.1. Igrometri

Igrometri del punto di rugiada. Un piccolo specchio raffreddato (ad esempio mediante un elemento di Peltier) è posto nel flusso del gas in esame. Con l'aiuto di una fotocellula, che rileva la formazione di rugiada sullo specchio, si regola la sua temperatura. Dopo aver misurato la temperatura, si determina il punto di rugiada. Esistono igrometri che utilizzano elettrodi al posto dello specchio, la cui conduttività cambia in seguito all'appannamento.

Psicrometro. Strumento composto da due termometri, uno umidificato e uno normale. Analizzando la differenza delle letture dei termometri, si determina il punto di rugiada. Quanto più bassa è la

saturazione dell'aria con il vapore acqueo, tanto più intensamente l'acqua evapora dalla superficie del termometro umidificato e tanto più bassa è la sua temperatura e maggiore è la differenza tra le letture dei due termometri.

Igrometro a elettrolisi. Un flusso misurato di aria (gas) viene fatto passare vicino a elettrodi di platino con pentossido di fosforo, che assorbe l'acqua. Quando agli elettrodi viene applicata una tensione, l'acqua si decompone in idrogeno e ossigeno. La corrente di elettrolisi è proporzionale alla quantità di acqua assorbita, ovvero all'umidità assoluta.

Igrometro a infrarossi. Misurando l'assorbimento della radiazione infrarossa, si determina l'umidità assoluta.

Igrometri elettrici con pellicola conduttiva. A seconda della quantità di vapore acqueo assorbito, la resistenza elettrica della pellicola conduttiva cambia. Dopo aver calibrato la pellicola, è possibile determinare l'umidità assoluta del gas in esame.

Igrometri per capelli. In questi igrometri si misura l'allungamento dei capelli umani sgrassati e si determina l'umidità dell'aria. L'allungamento sotto l'influenza dell'umidità può raggiungere il 2,5%.

Igrometri con elemento bimorfo. La base di questo tipo di igrometro è una molla metallica a spirale, ricoperta su un lato da una sostanza che assorbe l'umidità. Sotto l'influenza dell'acqua assorbita, la sostanza si espande e modifica i parametri geometrici della molla. Con la calibrazione è possibile determinare l'umidità dell'aria (gas).

Igrometro a film conduttivo. L'acqua assorbita da alcuni materiali può influenzare le proprietà elettrofisiche di questi ultimi. Questo fenomeno è alla base dell'igrometro a film conduttivo. A seconda del livello di umidità dell'aria (gas) negli igrometri con pellicola conduttiva, la resistenza elettrica della pellicola - l'elemento sensibile dell'igrometro - cambia.

Questo tipo di igrometro misura l'umidità relativa dell'aria, il che rappresenta uno dei principali vantaggi, poiché l'umidità relativa dipende molto poco dalla temperatura. Lo svantaggio è la necessità di calibrare ogni igrometro e la non elevata stabilità di tale calibrazione. La calibrazione può spostarsi a causa dei depositi di ioni sulla pellicola quando questa entra in contatto con la polvere e altri costituenti del gas. Inoltre, l'igrometro non ha un'elevata potenza di segnale in uscita, il che rappresenta un altro svantaggio. La potenza del segnale dell'igrometro può essere aumentata aumentando le dimensioni dell'elemento sensibile, ma allo stesso tempo perde velocità e compare l'isteresi.

Un igrometro a film conduttivo consiste in un elemento sensibile - uno strato di sostanza igroscopica applicato a un substrato isolante. Gli ossidi di alcuni metalli e altri materiali sono spesso utilizzati come sostanza igroscopica (elemento sensibile dell'igrometro). I contatti elettrici sono realizzati, di norma, sotto forma di pettine. All'aumentare dell'umidità del gas e, di conseguenza, della pellicola di rilevamento, la sua resistenza elettrica diminuisce. Nella maggior parte dei casi la dipendenza è esponenziale.

Un igrometro con pellicola conduttiva ha un'inerzia sufficientemente bassa e viene spesso utilizzato per determinare piccoli valori di umidità dell'aria (gas).

4.2. Analisi dei gas resistivi. Trasduttore di concentrazione di gas

Un trasduttore resistivo di concentrazione di ossigeno, come un trasduttore a base di ossido di titanio, può servire come base per un analizzatore di gas di scarico (sensore). L'ossido di titanio è una sostanza la cui resistenza varia in base al numero di molecole di ossigeno adsorbite sulla sua superficie.

Il trasduttore è costituito, ad esempio, da un filo di platino o da un resistore a film sottile, la cui superficie è rivestita di ossido di titanio. A seconda del contenuto di ossigeno del gas di scarico, lo strato di ossido di titanio cambia la sua resistenza e quindi la resistenza complessiva del dispositivo.

Negli analizzatori di gas resistivi vengono utilizzate altre sostanze per determinare il contenuto di altri gas. Esistono anche trasduttori resistivi per il rilevamento di propano e metano. I trasduttori resistivi hanno solitamente due elementi sensibili, uno rivestito con una sostanza e l'altro non rivestito. Questo viene utilizzato come elemento di compensazione della temperatura quando le misurazioni vengono effettuate con il trasduttore inserito in un circuito a ponte.

Esistono analizzatori di gas resistivi ed elementi di rilevamento di gas basati sulla loro sensibilità alle variazioni delle caratteristiche termofisiche dei gas circostanti.

Ad esempio, un elemento sensibile basato sulla variazione della resistenza elettrica dei metalli con la temperatura. L'elemento sensibile di tale trasduttore (catarometro) è costituito da un filo metallico sufficientemente lungo collegato a una sorgente di tensione elettrica. Il filo

si trova nel flusso del gas analizzato. La quantità di corrente che scorre e riscalda il filo è controllata con elevata precisione. Al variare della concentrazione del gas circostante, la conduttività termica del gas cambia di conseguenza. Di conseguenza, cambia il trasferimento di calore tra il filo e il gas circostante. Di conseguenza, la temperatura del filo e la sua resistenza elettrica cambiano. Questo porta a una variazione del valore della corrente elettrica, che viene rilevata dal dispositivo di misura.

Bibliografia

1. Jan F.Kreider. Manuale di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria. -Taylor & Francis, 2019, 680p.

2. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik [Corso generale di fisica: guida allo studio], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

3. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconduttori].- L. Nauka 1967. 439p.

4. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Misure nell'industria"] 1-3 volumi. M.: Metallurgiya, 1990.

Capitolo 5. La luce. Trasduttori, fotocellule

5.1. Fotoconduttività

Mentre nei metalli la conduzione si osserva a varie temperature, la conduttività dei semiconduttori in condizioni ordinarie si verifica solo attraverso il moto termico. Tuttavia, è possibile creare condizioni che garantiscano la comparsa della conduttività in un semiconduttore senza aumentarne la temperatura. Poiché la conducibilità elettrica del semiconduttore si verifica solo grazie al fatto che gli elettroni cadono nella zona di conduzione, è sufficiente fornire agli elettroni l'energia necessaria per lanciarli nella zona libera e far comparire la conducibilità. Questa energia in condizioni normali gli elettroni la ricevono da altre particelle coinvolte nel moto termico, ma l'energia può anche provenire dall'esterno, in particolare, ad esempio, sotto forma di radiazione.

Già nel secolo scorso è stato scoperto che la resistenza di un bastoncino di selenio cambia drasticamente a seconda dell'illuminazione. Studi accurati hanno dimostrato che la resistenza del selenio diminuisce con l'illuminazione.

In seguito è stato stabilito che questa proprietà non è posseduta solo dal selenio, ma anche da alcuni altri semiconduttori. L'emergere di concetti di meccanica quantistica ha permesso di spiegare questo fenomeno, che nella scienza è stato chiamato fotoconduttività o fotoeffetto interno.

La natura fisica della fotoconduttività è la seguente. A una certa temperatura, in un semiconduttore oscurato, un certo numero di elettroni n si trova nella zona libera. Questi elettroni sono responsabili della normale conducibilità elettrica della sostanza, altrimenti detta conducibilità al buio. Se il semiconduttore viene esposto alla luce, nella zona libera, oltre agli elettroni scuri precedentemente presenti, apparirà un nuovo numero n_1 di elettroni chiari e il numero totale di elettroni nella zona diventerà pari a $n + n_1$. La conducibilità elettrica in questo caso aumenterà e diventerà pari a:

$$\sigma = neU + n_1 eU_1, \quad (5.1)$$

dove il primo sommatorio corrisponde alla conduzione al buio e il secondo alla fotoconduttività, e - carica degli elettroni, U - mobilità dei portatori di corrente (elettroni).

Dalle idee generali sulla natura dei semiconduttori, la ragione della comparsa dei fotoelettroni nella zona libera diventa chiara. Non c'è dubbio che il fornitore di elettroni scuri e chiari in un semiconduttore privo di

impurità sia una zona piena. È chiaro che questi e altri elettroni sono arrivati nella zona libera solo perché hanno ricevuto l'energia necessaria per superare la zona proibita.

"con un'ampiezza di ΔE . Di conseguenza, la fotoconduttività è dovuta al fatto che i fotoni che cadono sulla superficie del semiconduttore e vengono assorbiti da esso hanno ceduto tutta la loro energia ai fotoelettroni. Ogni fotone porta con sé un'energia $h\nu$. Se questa energia è maggiore dell'energia ΔE o almeno uguale ad essa, allora l'elettrone dalla zona di riempimento può passare alla zona di conduzione. Da ciò deriva una conseguenza indispensabile: la fotoconduttività è possibile quando $h\nu > \Delta E$. Quindi, per ogni sostanza fotosensibile esiste un limite diverso di fotoconduttività, corrispondente alla seguente condizione:

$$h\nu_0 = \Delta E \quad (5.2).$$

Se la frequenza ν della radiazione incidente sul semiconduttore è inferiore a ν_0 , non si verifica la fotoconduttività.

Solo la radiazione con frequenza $\nu > \nu_0$ può creare fotoconduttività.

Il limite del fotoeffetto (limite rosso), cioè il valore di ν_0 , dipende dal semiconduttore stesso in cui si osserva il fotoeffetto, sia esso privo di impurità o meno.

La fotoconduttività, o fotoeffetto interno, non si verifica in tutti i semiconduttori. Indipendentemente da ciò, la condizione indispensabile per la comparsa della fotoconduttività è l'assorbimento della materia incidente sulla radiazione. Solo in questo caso, in linea di principio, può verificarsi il fotoeffetto.

Gli esperimenti dei fisici hanno stabilito che nel loro comportamento i fotoelettroni non differiscono dagli elettroni termici fino alla quasi completa coincidenza della loro mobilità.

Un attento studio del fotoeffetto interno ha dimostrato che la variazione di resistenza in diverse sostanze si verifica sotto l'azione di radiazioni di diversa composizione spettrale: in alcune sostanze si osserva quando la sostanza è illuminata da raggi ultravioletti, in altre - quando è illuminata da raggi visibili o infrarossi.

Gli elettroni liberati dalla luce si trovano nella zona libera per un periodo di tempo molto breve. Durante questo periodo vagano nelle lacune interatomiche e, in presenza di una differenza di potenziale tra due punti del semiconduttore, si muovono principalmente in una direzione, formando così una corrente elettrica. I fotoelettroni si spostano quindi verso livelli di

impurità inferiori o verso la zona di riempimento. Tuttavia, con l'illuminazione continua del semiconduttore, appaiono sempre più fotoelettroni e nello stesso tempo un certo numero di essi ritorna indietro. Di conseguenza, si stabilisce un equilibrio dinamico, cioè il numero di fotoelettroni emergenti diventa uguale al numero di elettroni che ritornano indietro.

Allo stato libero, i fotoelettroni lo sono per un tempo molto breve (dell'ordine di 10^{-3} a 10^{-7} secondi). Ma durante questo breve periodo di vita sono elettroni di conduzione a tutti gli effetti. Le sostanze semiconduttrici aumentano significativamente la loro conducibilità elettrica non solo sotto l'azione delle radiazioni. Qualsiasi altra particella che entri nell'atomo e fornisca tutta la sua energia all'elettrone, in linea di principio è in grado di trasferire l'elettrone in uno stato libero. Infatti, numerosi e ripetuti esperimenti hanno dimostrato che la conduzione avviene anche quando la superficie di una sostanza è bombardata da elettroni veloci, particelle alfa, protoni e altre particelle. È chiaro che a questo scopo l'energia della particella bombardante deve essere maggiore dell'energia di trasferimento dell'elettrone allo stato libero.

Nei semiconduttori, la concentrazione di elettroni di conduzione a temperatura ambiente è molto più piccola che nei metalli e il numero di fotoelettroni che appaiono sotto l'influenza della luce è relativamente grande. In alcune sostanze, come il solfuro di cadmio (CdS), il numero di fotoelettroni può superare di quattro ordini di grandezza il numero di elettroni di conduzione al buio. In altre sostanze meno fotosensibili, il numero di fotoelettroni, anche se non sottoposti a irraggiamento troppo intenso, può raggiungere il 20-30% del numero totale di elettroni di conduzione. Questa proprietà di alcuni semiconduttori li rende importanti e necessari in varie tecnologie di conversione.

5.2. Il fotoeffetto dello strato di confinamento

Nella Sezione 5.1 è stato dimostrato che, sotto l'azione della luce assorbita, gli elettroni possono spostarsi dalla zona piena alla zona libera, creando così la fotoconduttività. In questo caso, nel semiconduttore si verifica solo una conduzione aggiuntiva, ma non si generano forze elettromotrici intrinseche. Tuttavia, è noto un altro fenomeno: la comparsa di forze elettromotrici in seguito all'illuminazione del semiconduttore. Ad esempio, se sottoponiamo il semiconduttore a un'illuminazione non

uniforme, in modo che alcune parti del campione siano illuminate molto più intensamente e altre molto più debolmente, in alcuni casi è possibile rilevare una differenza di potenziale tra le aree chiare e quelle scure. Questo fenomeno si spiega con il fatto che al momento dell'illuminazione gli elettroni iniziano a diffondersi dalle parti illuminate a quelle scure in numero maggiore rispetto alla direzione opposta. Questa diffusione preferenziale porta al fatto che le aree scure, nel caso del meccanismo di conduzione elettronica, si caricano gradualmente in modo negativo, mentre le aree chiare si caricano in modo positivo. Di conseguenza, all'interno del semiconduttore si forma un campo elettrico gradualmente crescente, che finirà per stabilire uno stato di equilibrio caratterizzato dal fatto che i flussi elettronici in entrambe le direzioni sono uguali.

Quando si verifica l'equilibrio, tra le parti chiare e scure del semiconduttore esisterà una certa differenza di potenziale, fino a decimi di volt.

Inoltre, l'effetto della luce sul semiconduttore si manifesta nel cosiddetto effetto fotoelettrico dello strato di chiusura.

Creando la struttura mostrata in fig. 5.1, è possibile osservare sperimentalmente il fotoeffetto dello strato di chiusura.

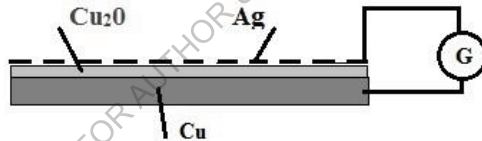


Fig. 5.1. Effetto fotografico dello strato barriera. Schema della struttura del materiale

Se ossidiamo una lastra di rame Cu e vi formiamo sopra uno strato di ossido di rame Cu_2O , otteniamo un semiconduttore classico. Poi mettiamo un sottile strato d'argento sopra il semiconduttore Cu_2O . Il sottile strato di argento sarà trasparente alla luce. Se colleghiamo un galvanometro tra lo strato d'argento e una lastra di rame (vedi fig. 5.1), quando la superficie argentata viene illuminata, nel circuito scorre una corrente. Questo fenomeno si spiega con l'esistenza di un cosiddetto strato barriera nel sistema metallo-semiconduttore.

In questo caso, sotto l'influenza della luce, gli elettroni passano dall'ossido di rame al rame attraverso lo strato barriera. Di conseguenza, la piastra di rame si carica negativamente e l'elettrodo d'argento trasparente si

carica positivamente. Quando il circuito viene chiuso, viene indotta una corrente nel circuito. Un fenomeno simile può essere osservato in altri semiconduttori. Questo effetto è particolarmente pronunciato nei sistemi contenenti semiconduttori come zolfo-tallio, zolfo-argento, selenio, germanio, silicio e altri.

Il fotoeffetto valvola (blocking layer photoeffect) si riferisce alla comparsa di forza elettromotrice all'assorbimento della luce in un sistema contenente il contatto di due semiconduttori impuri di diversa conducibilità o nel sistema semiconduttore-metallo (fig. 5.2).

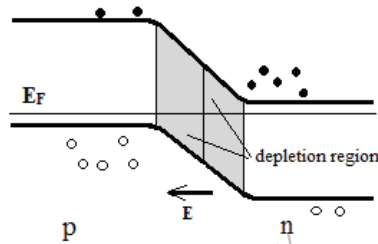


Fig. 5.2. Diagramma energetico generale di una giunzione $p-n$ (strato di chiusura)

Quando un sistema di questo tipo viene illuminato, la luce assorbita trasferisce gli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione. A questo punto, nella zona di valenza si formano dei buchi, cioè si generano coppie elettrone-buco. Il comportamento dei portatori non in equilibrio dipende dalla regione del sistema in cui viene assorbita la radiazione. Se la radiazione viene assorbita nella *regione p*, gli elettroni vicini alla giunzione $p-n$ possono raggiungerla e, sotto l'azione del campo elettrico di contatto, si sposteranno verso la regione n .

Se la radiazione viene assorbita nella *regione n*, solo i buchi vengono espulsi attraverso la giunzione $p-n$ nella *regione p*.

Se le coppie sono generate nella regione di carica del bulk (giunzione $p-n$), il campo "distribuisce" i portatori di carica in modo tale che finiscano nella regione in cui sono fondamentali.

In questo caso, gli elettroni si concentrano nel *semiconduttore n*, mentre le buche si concentrano nel *semiconduttore p*.

Il campo elettrico da essi creato cresce, impedendo un'ulteriore transizione di portatori non basici attraverso lo strato di confinamento.

Si raggiunge un equilibrio dinamico, in cui il numero di portatori non basici che si muovono per unità di tempo attraverso lo strato di chiusura è uguale al numero degli stessi portatori che si muovono per lo stesso periodo di tempo nella direzione opposta.

Con l'inizio dell'equilibrio, si stabilisce una differenza di potenziale tra i semiconduttori p e n , che rappresenta la forza fotoelettromotrice.

Il fenomeno dell'emergere di foto-EMF valvolari all'illuminazione della giunzione $p-n$ viene utilizzato per creare fotorivelatori e convertitori di energia fotovoltaica - batterie solari.

Questo è il meccanismo della forza fotoelettromotrice in un sistema costituito da semiconduttori p e n e da uno strato bloccante tra di essi.

Il fotoeffetto valvola è particolarmente attivo nei sistemi di semiconduttori con una grande lunghezza di diffusione dei portatori di corrente "non principali" e, di conseguenza, un grande tempo di vita degli stessi.

Dalla considerazione del meccanismo di insorgenza della forza fotoelettromotrice della valvola è chiaro che l'elettrodo direttamente a contatto con il semiconduttore di elettroni è sempre carico negativamente, mentre l'elettrodo direttamente a contatto con il semiconduttore di buchi è carico positivamente. Pertanto, in diversi tipi di celle a valvola, l'elettrodo traslucido superiore può essere caricato positivamente o negativamente.

La scoperta del fotoeffetto di blocco dello strato ha ampliato le possibilità di utilizzo pratico dei semiconduttori e ha costituito la base per il dispositivo delle celle fotovoltaiche a valvola - dispositivi che convertono l'energia della luce in energia elettrica.

5.3. Batteria solare

La cella solare è il nome dato alla prima cella fotovoltaica basata sul silicio. La fotocellula è un convertitore di energia solare (luce) in energia elettrica.

La conducibilità elettrica del silicio, a seconda del grado e del numero di impurità introdotte, varia in un intervallo piuttosto ampio. Per molti anni il silicio è stato oggetto di ricerche fisiche approfondite. Come risultato di molti anni di lavoro di ricerca sono stati ottenuti risultati di grande valore sia per la teoria che per la pratica.

Un risultato importante va considerato lo sviluppo della tecnologia per l'introduzione di impurità di atomi estranei in singoli cristalli di silicio, che

ha permesso di ottenere in un cristallo la giunzione $p-n$, sulla base della quale è stata creata una fotocellula di silicio con uno strato di blocco. Sulla base di tali fotocellule è stata creata una batteria solare.

La tecnologia di produzione delle fotocellule al silicio è piuttosto complicata. Al giorno d'oggi, a questo scopo, si utilizzano le moderne tecnologie di microelettronica planare.

Le singole celle fotovoltaiche possono essere collegate tra loro in serie e in parallelo, ottenendo così una batteria fotovoltaica (solare). Tale batteria solare può essere utilizzata per alimentare elettrodomestici, dispositivi elettronici portatili, ecc. Le prime celle solari sono già state create.

Praticamente già le prime celle fotovoltaiche al silicio create avevano un'efficienza di circa il 6%. Per fare un paragone, si può dire che le macchine a vapore hanno un'efficienza di circa il 6-8%. Inoltre, va tenuto presente che, a differenza di altri convertitori di energia, la durata di vita delle celle a semiconduttore può essere molto lunga.



Fig. 5.3. Moderna batteria solare portatile - batteria (caricatore solare)

5.4. Bolometri

Il bolometro è un dispositivo che consente di misurare l'energia radiante con un elevato grado di precisione. La maggior parte dei bolometri si basa sul principio della conversione dell'energia radiante in energia termica. Con la scoperta delle proprietà elettrofisiche dei semiconduttori, questi ultimi sono stati utilizzati per la tecnologia dei bolometri, aumentandone notevolmente il limite di sensibilità.

I bolometri sono ampiamente utilizzati per un'ampia varietà di scopi. I bolometri sono di eccezionale valore quando è necessario eseguire studi spettrometrici.

Il circuito principale di un normale bolometro è un ponte, un braccio del quale include un resistore termico sensibile. Quando una radiazione termica cade sul termistore, ne aumenta la temperatura; di conseguenza,

l'equilibrio del ponte viene disturbato e la freccia dello strumento di misura, pre-programmata nelle unità appropriate, devierà del numero appropriato di divisioni. Il termistore è spesso collocato in un cilindro sottovuoto di metallo o di vetro con una finestra di materiale trasparente. Sulla parte esterna del cilindro si trovano i cavi del termistore per includerlo nel circuito.

La sensibilità dei moderni bolometri è di $10^1 - 5 \cdot 10^3$ V/W. I bolometri sono utilizzati per registrare la radiazione ottica nella gamma dell'infrarosso. Sono molto sensibili alla radiazione termica e vengono utilizzati principalmente per registrare la radiazione IR con lunghezze d'onda comprese tra 10 e 5000 μm .

5.5. Fotocellule al selenio

La prima fotocellula fu realizzata in ossido di rame e fu utilizzata per diversi anni. Quasi contemporaneamente fu scoperta la cella al selenio, che ebbe una diffusione molto maggiore e che oggi non ha perso la sua importanza.

La tecnologia di produzione delle fotocellule al selenio ha subito notevoli cambiamenti.

Le fotocellule con strato di bloccaggio sono costituite da un substrato metallico, uno strato semiconduttore e un elettrodo metallico superiore semitrasparente.

Il substrato della futura fotocellula svolge due funzioni. Da un lato, è un supporto per il fragile strato di selenio, proteggendolo da danni meccanici, e dall'altro è utilizzato per creare un contatto elettrico affidabile. Il lato a forma di disco del substrato su cui è applicato lo strato di selenio è rettificato in modo che lo strato di selenio aderisca bene al disco di acciaio. Il substrato rettificato è sospeso all'interno dell'unità di vuoto.

Lo strato di selenio viene applicato per evaporazione sotto vuoto.

Per ottenere celle fotovoltaiche con buoni parametri è necessario che lo spessore dello strato semiconduttore sia pari a 0,1 mm.

Il selenio depositato è in modifica amorfa, ha una resistività molto elevata e non ha ancora le proprietà fotovoltaiche richieste. Pertanto, nella fase successiva del processo tecnologico, il selenio viene convertito dalla modifica amorfa a quella cristallina, che ha un'elevata fotosensibilità. A questo scopo, un disco su cui è stato depositato il selenio viene rimosso da sotto la cappa e posto in un forno speciale. Con l'aiuto di un certo processo

tecnologico nel forno, il selenio amorfo viene trasformato in selenio cristallino.

L'elettrodo metallico traslucido superiore viene solitamente applicato mediante sputtering catodico.

I dischi finiti della fotocellula sono assemblati in un mandrino di ebanite o plastica con due morsetti portati all'esterno.

5.6. Fotoresistori al selenio

La resistenza elettrica di un campione di materiale semiconduttore diminuisce sotto l'influenza della radiazione luminosa, ma non viene generato alcun campo elettromagnetico o corrente elettrica.

La fotoresistenza è quindi un dispositivo semiconduttore che cambia la sua resistenza elettrica sotto l'azione della luce.

Dalla precedente considerazione dell'essenza fisica del fotoeffetto interno, risulta chiara la struttura fondamentale della fotoresistenza. Una fotoresistenza è una piastra (nella maggior parte dei casi un sottile strato di semiconduttore), sui cui bordi vengono applicati elettrodi metallici per garantire un contatto elettrico affidabile. Tale fotoresistenza è inclusa in un circuito in serie con l'alimentazione.

Quando la fotoresistenza si oscura, nell'intero circuito, e quindi nella fotoresistenza stessa, scorre una corrente elettrica il cui valore è determinato dalla resistenza ohmica della fotoresistenza e dalla differenza di potenziale ad essa applicata. Tale corrente è chiamata corrente di buio. All'illuminazione della fotoresistenza, la corrente aumenta e questo aumento è tanto maggiore quanto maggiore è il flusso luminoso. La differenza tra le correnti di luce e di buio ci dà il valore della fotocorrente.

A seconda del loro scopo, le fotoresistenze sono realizzate con diversi materiali semiconduttori. La sensibilità delle fotoresistenze è molto più elevata di quella delle fotocellule a vuoto con fotoeffetto esterno. Ciò significa che, a parità di illuminazione, la fotoresistenza fornisce un aumento di corrente nel circuito di diverse volte superiore a quello di una fotocellula con fotoeffetto esterno. Lo svantaggio essenziale della maggior parte delle fotoresistenze create per la prima volta era una notevole inerzia, mentre la fotocellula a vuoto con effetto fotografico esterno è un dispositivo praticamente privo di inerzia.

Il secondo svantaggio significativo dei fotoresistori è la dipendenza non lineare dell'aumento della fotocorrente dall'aumento dell'intensità del

flusso luminoso. La Fig. 5.4 mostra la dipendenza della fotocorrente dal flusso luminoso.

Oggi si ottengono nuovi materiali semiconduttori, che sono in gran parte privi di questi svantaggi, e si progettano nuovi tipi di fotoresistori con parametri migliorati. Più recentemente, i fisici sono riusciti a risolvere molte difficoltà e a ottenere fotoresistori in gran parte privi degli svantaggi insiti nei loro predecessori.

A seconda della sostanza di cui sono fatti, i fotoresistori hanno caratteristiche spettrali e sensibilità integrale diverse. La sensibilità spettrale caratterizza la quantità di fotocorrente derivante dall'azione di un'unità di flusso di energia luminosa di una certa lunghezza d'onda. Pertanto, se la sensibilità integrale di una fotocellula può essere determinata da un numero - il valore della fotocorrente attribuito all'unità di energia incidente, la sensibilità spettrale di ciascuna fotocellula è solitamente rappresentata sotto forma di grafico. La prima fotoresistenza è stata realizzata con il selenio, che ha avuto un ruolo fondamentale nella storia della scienza e della tecnologia.

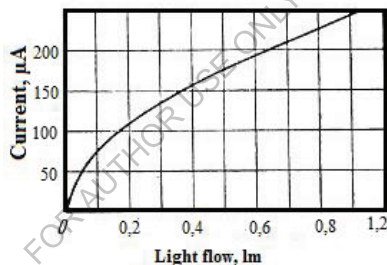


Fig. 5.4. Dipendenza della fotocorrente dal flusso luminoso. Esempio di caratteristica luminosa della fotoresistenza del selenio.

5.7. Trasduttori fotoelettrici. Principi generali di funzionamento

I trasduttori fotoelettrici sono trasduttori di misura primari che reagiscono alle radiazioni elettromagnetiche che cadono sulla superficie dell'elemento convertitore. La radiazione può essere visibile, cioè luminosa, ma anche avere una lunghezza d'onda più o meno lunga ed essere invisibile.

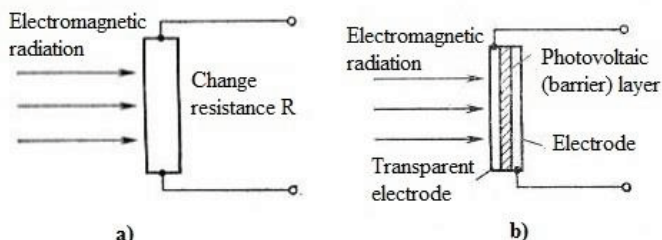


Fig. 5.5. Esempi di fotoconvertitori. a) - conversione fotoconduttiva, b) - cella solare come esempio di conversione fotovoltaica.

Convertitori fotoconduttivi. Questi convertitori trasformano la variazione della grandezza misurata nella variazione di resistenza del materiale utilizzato (fig. 5.5.a). Tali convertitori sono detti passivi, cioè richiedono un'alimentazione esterna. Spesso il loro nome caratterizza il tipo di conversione utilizzata, come ad esempio le resistenze sensibili alla luce.

La resistenza di un materiale è funzione della densità dei portatori di carica basici e, poiché la densità aumenta con l'aumentare dell'intensità di irraggiamento, la conduttività aumenta. Poiché la conduttività è inversamente proporzionale alla resistenza, si può concludere che la resistenza è una funzione inversa dell'intensità di irradiazione. Il valore della resistenza in condizioni di piena irradiazione è generalmente di 100-200 ohm, mentre in condizioni di buio totale la resistenza è di megaohm. Nella progettazione di resistenze dipendenti dalla luce si utilizzano solfuro di cadmio, seleniuro di cadmio, ecc.

Celle solari. Le celle solari sono convertitori fotovoltaici che trasformano l'energia elettromagnetica in energia elettrica (fig. 5.5.b).

Il progetto del convertitore prevede uno strato di materiale fotosensibile ad alta resistività posto tra due elettrodi conduttori. Uno degli elettrodi è costituito da un materiale trasparente attraverso il quale la radiazione passa e colpisce il materiale fotosensibile. Quando è completamente illuminata, una singola cella produce una tensione di uscita di circa 0,5 V tra gli elettrodi.

Di norma, le celle fotovoltaiche a valvole semiconduttrici (celle fotovoltaiche con strato di chiusura) sono utilizzate come strato fotovoltaico (fig. 5.5.b).

Uno dei parametri più importanti di una cella fotovoltaica utilizzata come fonte di energia elettrica è il fattore di efficienza (EF). L'efficienza di

una cella solare è il rapporto tra la potenza massima di corrente elettrica che si può ottenere dalla cella e la potenza della radiazione luminosa che cade sulla cella stessa. L'efficienza sarà tanto maggiore quanto maggiore è la parte dello spettro della radiazione luminosa coinvolta nella generazione dei portatori di corrente. Uno dei modi per aumentare l'efficienza delle celle solari è quello di creare fotocelle con le caratteristiche spettrali più ampie possibili. Le fotocelle in silicio hanno un'efficienza fino al 12%. Le fotocelle basate su composti di arseniuro di gallio hanno un'efficienza fino al 20%.

Fotorivelatori. I trasduttori a semiconduttore progettati per misurare le variazioni dei parametri della radiazione luminosa sono chiamati fotorivelatori. Un trasduttore fotoelettrico, che è il tipo più semplice di fotorivelatore, è un diodo a semiconduttore. Uno dei principali tra questi trasduttori è il fotodiodo, che sfrutta l'effetto dell'irradiazione di una giunzione *p-n* negativamente polarizzata con la luce (visibile o di altre lunghezze d'onda). In presenza di irradiazione, la corrente che attraversa la giunzione cambia. Il tempo di risposta di un fotodiodo di questo tipo è di pochi nanosecondi.

Per ottenere una risposta più rapida alle variazioni dei parametri di radiazione, sono stati sviluppati diodi PIN in cui tra gli strati di *tipo p e n* è presente uno strato di semiconduttore privo di impurità.

Fototransistor. In diversi dispositivi i fotodiodi vengono utilizzati insieme agli amplificatori per aumentare la sensibilità. Esistono però dispositivi che combinano queste proprietà: i fototransistor. Sono realizzati in un involucro trasparente che lascia passare la radiazione luminosa. La luce che cade sulla giunzione collettore-base del fototransistor (giunzione *p-n* con polarizzazione negativa) provoca una fotocorrente nella base, che viene amplificata con il guadagno del transistor, dando luogo a una corrente di emettitore molto grande.

Poiché i fotorivelatori sono dispositivi a semiconduttore, la loro corrente di saturazione dipende dalla temperatura. In assenza di radiazione luminosa, in essi scorre una corrente oscura, che limita le misure di bassi livelli di radiazione luminosa.

Fotoresistori. Caratteristiche del fotoresistore. Il valore della resistenza al buio dipende dalla forma, dalle dimensioni, dalla temperatura e dalla natura fisico-chimica dello strato fotosensibile del fotoresistore. Una resistenza al buio molto elevata (da 10^4 a 10^9 Ohm a 25°C) possiedono i

fotoresistori basati su PbS, CdS, CdSe. La resistenza al buio di InSb, InAs, CdHgTe (da 10 a 10^3 Ohm a 25°C) non è molto elevata. La resistenza dei fotoresistori irradiati diminuisce rapidamente con l'aumentare dell'irradiazione (fig. 5.6).

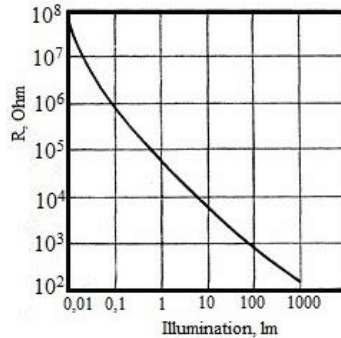


Fig. 5.6. Esempio di dipendenza della resistenza del fotoresistore dall'illuminazione

5.8. Fotocellule per valvole. Disegni

La costruzione di tutte le fotocellule con strato di chiusura è praticamente la stessa. Possono esserci alcune differenze, ma non cambiano il carattere generale della costruzione delle fotocellule. La forma della fotocellula, le sue dimensioni, i metodi di applicazione dell'elettrodo superiore, l'uscita di tali elettrodi, ecc. possono variare.

Di solito la produzione della fotocellula a valvola (fig. 5.7) inizia con il cosiddetto elettrodo inferiore - una piastra metallica di 1-2 mm di spessore, sulla quale viene applicato un sottile strato di semiconduttore. Lo strato di semiconduttore viene poi trattato per creare una giunzione $p-n$ nel suo spessore. Successivamente, nella maggior parte dei casi, sulla superficie esterna viene applicato un elettrodo metallico superiore, un sottile strato di metallo traslucido che trasmette la luce.

Una fotocellula a valvola comprende un elettrodo metallico inferiore, uno strato semiconduttore di elettroni (o di buchi), uno strato di blocco, uno strato di buchi (o di elettroni) e un elettrodo metallico superiore semitrasparente (fig. 5.7).

La fotocellula è inserita in una custodia di plastica con cavi elettrici e una finestra per la luce.

Il flusso radiante che cade sulla superficie della fotocellula viene parzialmente riflesso dall'elettrodo metallico semitrasparente e parzialmente assorbito. Parte del flusso che ha attraversato l'elettrodo viene assorbito dallo strato di semiconduttore adiacente. Di conseguenza, in questo strato si formano coppie elettrone-buco. Gli elettroni si concentrano sull'elettrodo che copre lo strato semiconduttore, che ha un meccanismo di conduzione elettronica, e le buche si concentrano sull'elettrodo del semiconduttore a buchi.

Tra l'elettrodo inferiore e quello superiore si crea una differenza di potenziale il cui valore, fino a un certo limite, sarà tanto maggiore quanto maggiore è l'intensità del flusso radiante. Chiudendo gli elettrodi della fotocellula con un circuito esterno, si creano le condizioni per il flusso di corrente elettrica al suo interno. Ciò avverrà mentre la fotocellula è illuminata e, nell'intervallo di piccoli flussi luminosi con un valore limite di 1 lumen, la corrente di cortocircuito della fotocellula dipende quasi linearmente dall'intensità del flusso luminoso. Quando nel circuito della fotocellula viene inserita una resistenza esterna, questa linearità si interrompe.

Gli scienziati sono costantemente impegnati in ricerche e sforzi per ottenere fotocellule da nuovi materiali con una sensibilità integrale significativa e per far sì che le fotocellule percepiscano non solo l'intera parte visibile dello spettro, ma anche possibilmente quella più invisibile - infrarossi e ultravioletti.

I processi fotovoltaici che avvengono nelle fotocellule a valvola hanno una notevole inerzia, che influisce sulla forma delle loro caratteristiche di frequenza. La forte diminuzione del rendimento della maggior parte delle celle a valvola con l'aumentare della frequenza ne limita l'uso in caso di flussi luminosi variabili di frequenza relativamente elevata.

Le celle fotovoltaiche a valvola sono costituite da diversi materiali semiconduttori fotosensibili. Le fotocellule al selenio sono ampiamente utilizzate. La caratteristica spettrale della fotocellula al selenio è vicina alla sensibilità dell'occhio umano; il massimo della sensibilità spettrale è nella regione di $5500-6000 \text{ \AA}$ ($0,55-0,6 \text{ }\mu\text{m}$), cioè si trova nella parte visibile dello spettro (fig. 5.8). La sensibilità integrale della fotocellula al selenio raggiunge i $600 \text{ }\mu\text{A/lm}$, cioè supera la sensibilità delle fotocellule a effetto esterno.

Le fotocellule al solfuro d'argento (Ag_2S) - PCSS - sono ancora più diffuse. La sensibilità integrale delle PCSS raggiunge i $9000 \mu\text{A}/\text{lm}$, con una caratteristica spettrale piuttosto ampia (da $0,4$ a $1,4 \mu\text{m}$) e una sensibilità massima nella regione del vicino infrarosso ($0,8-0,9 \mu\text{m}$). Le fotocellule zolfo-argento hanno un'elevata stabilità di funzionamento.

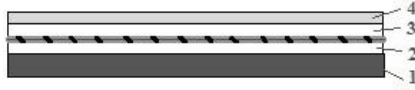


Fig. 5.7. Struttura schematica di una fotocellula a valvola: 1 - elettrodo metallico inferiore; 2 - strato semiconduttore di elettroni (buche); 3 - strato semiconduttore di buche (elettroni); 4 - elettrodo semiconduttore metallico superiore. L'area tratteggiata rappresenta lo strato di chiusura.

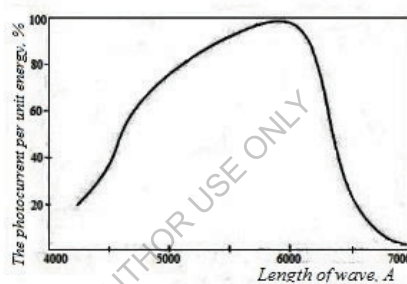


Fig. 5.8. Caratteristica spettrale di una fotocellula al selenio. Selenio puro.

5.9. LED

L'emissione nei LED è dovuta alla ricombinazione dei portatori iniettati in una parte della giunzione $p-n$. La ricombinazione avviene quando i portatori si spostano dai livelli superiori a quelli inferiori. Le transizioni interzonali tra il minimo della banda di conduzione e il massimo della banda di valenza sono accompagnate da un'emissione effettiva se le transizioni sono dirette, ossia se il minimo e il massimo si trovano allo stesso valore del vettore d'onda k . Tali transizioni si realizzano, ad esempio, nell'arseniuro di gallio a $k = 0$.

La caratteristica principale dei LED è l'efficienza quantistica interna η_{iqe} (il rapporto tra il numero di fotoni generati e il numero di portatori iniettati nella base) ed esterna η_{eqe} (il rapporto tra il numero di fotoni che lasciano il LED e il numero totale di portatori di carica che lo attraversano).

La diminuzione di η_{eqe} è causata dalla ricombinazione senza radiazioni nei difetti della struttura e dall'assorbimento dei fotoni nel semiconduttore stesso (autoassorbimento), poiché l'energia dei fotoni è vicina a E_g .

Significativi η_{vnt} (fino al 20-28%) sono posseduti dai LED più diffusi al giorno d'oggi, creati dall'accumulo epitassiale di arseniuro di gallio drogato con silicio (*tipo p*) su *n-GaAs*. Ciò è dovuto sia alla maggiore perfezione della struttura cristallina sia al fatto che la regione del semiconduttore altamente compensata con silicio emette quanti di luce con energie di 1,31 ... 1,34 eV, inferiori a E_g dell'arseniuro di gallio non compensato, il che riduce l'autoassorbimento quando la radiazione viene emessa attraverso la *regione n*.

Molti problemi dei LED sono risolti anche dall'uso delle moderne etero-giunzioni.

La Tabella 1 riassume i principali materiali attualmente utilizzati per creare LED con le migliori prestazioni nelle regioni spettrali corrispondenti. Il parametro η_{eqe} dipende in modo significativo dalla tecnologia e con la crescita del suo livello può essere aumentato in modo significativo.

I LED sono ampiamente utilizzati negli indicatori digitali e nei display luminosi per gli strumenti di misura e i dispositivi di output dei computer, nonché nei dispositivi optoelettronici. Rispetto alle sorgenti luminose convenzionali, i LED hanno dimensioni d'ingombro ridotte, basse tensioni di funzionamento, alta velocità (fino a 10^{-9} s) e lunga durata.

Tabella 5.1. Alcuni materiali utilizzati per creare i LED

Material	Impurity or composition	Glow color	λ_{max} , nm	η_{iqe}
GaAs	Si, Zn	IR	950 900	12-50
GaP	Zn, O, N	Red green	690 550	7 0,7
GaAs _{1-x} P _x	x=0,39 x=0,5-0,75	Red amber	660 610	0,5 0,04
Ga _{1-x} Al _x As	x=0,05-0,1 x=0,3	IR red	800 675	12 1,3
In _{1-x} Ga _x P	x=0,58 x=0,6	Red Amber yellow-green	659 617 570	0,2 0,1 0,02

5.10. Laser a semiconduttore. Laser a giunzione P-n

Il principio di funzionamento di un laser a semiconduttore è il seguente. In un semiconduttore intrinseco, ci sono sempre elettroni abbandonati termicamente dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Quando la luce attraversa il semiconduttore, gli elettroni nella banda di valenza assorbono i quanti di luce e possono spostarsi nella banda di conduzione se la frequenza della luce incidente è:

$$\nu \geq E_g / h \quad (5,3),$$

dove E_g è la larghezza della zona proibita, h è la costante di Planck. Pertanto, l'intensità della luce diminuisce dopo aver attraversato il semiconduttore. Contemporaneamente, la radiazione incidente sul semiconduttore stimola le transizioni degli elettroni eccitati dalla banda di conduzione alla banda di valenza e l'emissione di quanti di luce (fig. 5.9.a). Questi quanti si aggiungono alla radiazione esterna mentre questa attraversa il semiconduttore, ovvero si verifica l'amplificazione della luce.

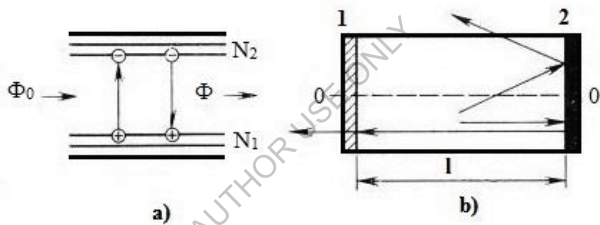


Fig. 5.9. Transizioni interzonali sotto l'azione della radiazione su un semiconduttore - a, schema di un laser a semiconduttore - b.

Le transizioni che avvengono sotto l'influenza di radiazioni esterne sono dette indotte, in contrasto con le transizioni spontanee che avvengono indipendentemente dalle radiazioni esterne. In uno stato di equilibrio termodinamico, il numero di elettroni nella banda di valenza è molte volte superiore a quello nella banda di conduzione. Di conseguenza, l'assorbimento della luce domina sull'amplificazione. Per l'amplificazione della luce, è necessario creare condizioni tali per cui la concentrazione di elettroni vicino al fondo della zona di conduzione sia maggiore della loro concentrazione vicino al soffitto della zona di valenza ($N_2 > N_1$). Un tale stato del semiconduttore è chiamato stato con inversione di popolazione di livello.

Il fattore di amplificazione della luce α quando la luce attraversa un semiconduttore dipende dalla differenza tra le popolazioni dei livelli

superiori e inferiori. Poiché le probabilità di transizione degli elettroni verso l'alto e verso il basso sono uguali, l'amplificazione si verifica quando la differenza di popolazione tra i livelli superiore e inferiore $N_1 - N_2 > 0$.

L'attenuazione della luce che attraversa un semiconduttore è causata non solo dalle transizioni degli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, ma anche dalla diffusione della luce su varie disomogeneità del cristallo. Di conseguenza, l'intensità della luce varia con la distanza x all'interno del semiconduttore secondo la legge:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\alpha - \chi_l)x \quad (5.4),$$

dove α è il coefficiente di guadagno, il coefficiente χ_l caratterizza le perdite, x è la distanza.

Pertanto, un cristallo semiconduttore amplifica la radiazione esterna se al suo interno c'è un'inversione di popolazione di livello e il guadagno supera il coefficiente di perdita ($\alpha > \chi_l$).

Per trasformare un amplificatore in un generatore di radiazioni, è necessario introdurre una retroazione positiva, cioè alimentare una parte della radiazione dall'uscita all'ingresso. Nei laser, per creare la retroazione, il cristallo di lavoro viene posto tra due specchi paralleli (1 e 2 nella figura 5.9.b). La luce che passa attraverso il cristallo viene amplificata $\exp(\alpha - \chi_l)l$ volte, poi viene riflessa dallo specchio, passa di nuovo attraverso il cristallo e viene nuovamente amplificata dello stesso fattore, ecc. I quanti di luce primari si formano a causa di transizioni spontanee, e poi c'è un'amplificazione della luce durante la sua propagazione nel cristallo a causa di transizioni indotte.

L'inversione di popolazione dei livelli dei semiconduttori può essere creata con diversi metodi. Uno di questi consiste nell'irradiare il semiconduttore stesso con una luce intensa (pompaggio ottico). Gli elettroni dalla banda di valenza si spostano nella banda di conduzione e vi si accumulano. Se l'intensità del pompaggio è sufficientemente elevata, può verificarsi l'inversione della popolazione dei livelli. Un altro metodo è il trasferimento di elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione bombardando il semiconduttore con elettroni veloci. Con entrambi i metodi è possibile ottenere elevate potenze di emissione, ma in generale l'efficienza dei dispositivi è bassa.

Il laser a giunzione p - n presenta la massima efficienza e semplicità di progettazione. L'azione del laser si basa sul fatto che in presenza di polarizzazione diretta gli elettroni vengono iniettati nella regione p , dove

avviene la loro ricombinazione radiativa con le buche presenti. Per creare uno stato con inversione di popolazione, è necessaria una grande concentrazione di buchi nella banda di valenza, che si ottiene aumentando la concentrazione dell'impurità drogante accettore. Affinché l'iniezione di elettroni nella *regione p* superi l'iniezione di buchi nella *regione n* (dove la ricombinazione è priva di radiazioni), è necessario che la concentrazione di impurità donatore nella *regione n* sia superiore alla concentrazione di impurità accettore nella *regione p*, cioè $n_n > p_p$.

Pertanto, per ottenere uno stato con inversione di popolazione nella *regione p*, è necessario un elevato grado di drogaggio di entrambe le regioni della giunzione *p-n* con impurità.

Il materiale migliore per i diodi laser è l'arseniuro di gallio. Lo spessore della parte emittente della *regione p* è dell'ordine di $2 \mu\text{m}$. Il diodo laser è il primo laser in cui è stato possibile realizzare la conversione diretta di energia elettrica in energia di radiazione luminosa coerente. Ha anche la massima efficienza e prestazioni ad alta velocità.

Fondamentalmente, la ragione principale della diminuzione dell'efficienza del diodo laser è la necessità di un forte drogaggio delle *regioni p e n della* transizione. Contemporaneamente all'introduzione di impurità nel semiconduttore, si forma un gran numero di difetti nella regione attiva, con conseguenti perdite significative di radiazione. Inoltre, i difetti possono formare livelli energetici nella zona proibita del semiconduttore. Poiché la concentrazione di impurità in entrambe le parti della giunzione *p-n* è elevata, la larghezza della giunzione *p-n* è piccola e, di conseguenza, i portatori di corrente possono spostarsi dalla banda di conduzione a questi livelli e quindi effettuare il tunneling nella banda di valenza della *regione p*. La corrente di tunneling non è accoppiata alla regione attiva. La corrente di tunneling non è accoppiata alla radiazione e questo degrada l'efficienza.

I diodi laser possono essere utilizzati, tra l'altro, nei localizzatori di luce per l'osservazione e la fotografia al buio, nei telemetri e per le comunicazioni.

Bibliografia

1. John Kimbala, Mehmet Kanoglu. Fondamenti e applicazioni delle energie rinnovabili. - McGraw-Hill, 2019, 416p.
2. David L. Greenaway, Gunter Harbeke. Proprietà ottiche e struttura a bande dei semiconduttori. Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford 4&5 Fitzroy Square, London W.I. 1968, 172p.
3. Paul Holmes, Shalve Mohile, Shantanu Mohile. Energia solare per principianti: Come progettare e installare il miglior sistema di energia solare per la vostra casa (DIY Solar Power) Kindle Edition. 2020, 179p, ISBN-13979-8642013625
4. Nsakalagos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J. Silicon nanowire solar cells//Appl. Phys. Lett. - 2007. - Vol. 91. - P. 233117(1)-233117(3).
5. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Fisica dei dispositivi a semiconduttore]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
6. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconduttori].- L. Nauka 1967. 439p.
7. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Misure nell'industria"] 1-3 volumi. M.: *Metallurgiya*, 1990.
8. Mykola Gorbachuk. MATERIALI ELETTROROTECNICI. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londra, N2 9ED, Regno Unito, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.
9. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Corso generale di fisica: guida allo studio],T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.

Capitolo 6. Trasduttori di ionizzazione. Sensori

6.1. Trasduttori di pH

I trasduttori di ionizzazione convertono la variazione di una grandezza misurata in una variazione, ad esempio, di una corrente di ionizzazione che attraversa un liquido posto tra due elettrodi (fig. 6.1). Un tipico esempio di utilizzo del principio di ionizzazione è uno strumento per misurare l'acidità di una soluzione. Il grado di acidità di una soluzione è determinato dalla concentrazione di ioni idrogeno caricati positivamente in essa, chiamata potenziale idrogeno (meglio conosciuto con l'abbreviazione *pH*). Inoltre:

$$pH = -\log[H^+],$$

dove H^+ è la concentrazione di ioni idrogeno in grammi per litro.

Il valore del *pH* è 0 per una soluzione puramente acida, 7 per una soluzione neutra (come l'acqua pura) e 14 per una soluzione puramente alcalina.

Una tipica sonda di *pH* ha elettrodi in gelatina con un valore noto di potenziale di idrogeno. Essi sono formati da una speciale membrana di vetro che è a contatto con la soluzione di cui si sta misurando il valore di *pH*. La differenza di potenziale tra i due elettrodi riflette il valore di *pH* della soluzione (circa 59 mV per unità di *pH*).

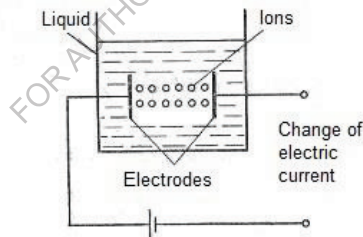


Fig. 6.1 Trasformazione di ionizzazione, in cui gli ioni migrano nei liquidi verso gli elettrodi e agiscono come portatori di carica, creando una corrente elettrica.

6.2. Camere di ionizzazione. Principi generali di funzionamento

Uno strumento (sensore) con camera di ionizzazione è costituito da una camera K con un elettrodo interno e uno esterno, una sorgente di tensione, un sistema di indicazione (indicatore) G e una resistenza di misura R o un condensatore di misura C (fig. 6.2). La corrente di ionizzazione (densità di flusso o dose) è misurata dal valore della caduta di tensione attraverso il resistore ad alta resistenza R. La misura della carica come

integrale della corrente nel tempo (misura del flusso o della dose) è determinata dal caricamento del condensatore C.

A seconda della sensibilità richiesta e dell'adeguatezza geometrica al compito di misura da svolgere, vengono utilizzate diverse camere di ionizzazione. L'intervallo di misurazione dei rivelatori basati sul principio della camera di ionizzazione copre valori da frazioni di microgradi a migliaia di gradi (da $\mu\text{Gy/h}$ a kGy/h).

Quando sono riempite d'aria, le camere di ionizzazione sono adatte per definizione alla misurazione della dose di ioni. Tuttavia, a questo scopo è necessario utilizzare costruzioni speciali che escludano o compensino l'influenza delle pareti della camera di ionizzazione che limitano il volume d'aria. Per le misurazioni pratiche sono state sviluppate molte camere di misura. Quando le si utilizza, oltre alla sensibilità, al campo di misura e alla riproducibilità dei risultati ottenuti, occorre tenere conto delle seguenti considerazioni:

1. La dipendenza energetica della sensibilità mostra in che misura il valore misurato dipende dall'energia della radiazione. Esempi tipici di questa dipendenza energetica per diversi tipi di rivelatori di radiazioni sono illustrati nella Fig. 6.3.

2. La dipendenza della sensibilità dalla direzione di volo delle particelle (raggi) è dovuta alla struttura stessa del rivelatore. A seconda della direzione di incidenza dei raggi è necessario introdurre delle correzioni, che a loro volta possono dipendere dall'energia della radiazione.

3. La dipendenza della sensibilità dalla temperatura e dalla pressione si manifesta nel fatto che, nel caso di sistemi a camera di ionizzazione non sigillati, la massa calcolata cambia con la temperatura e la pressione dell'aria. Ciò richiede anche un fattore di correzione per il quale la lettura deve essere moltiplicata per ottenere il valore corretto della quantità misurata, se la sensibilità del sistema di misura non è stata regolata in anticipo utilizzando una corrente di riferimento.

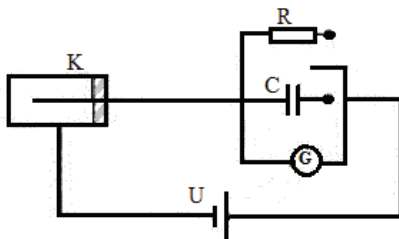


Fig. 6.2. Schema di principio della camera di ionizzazione per la misurazione del rateo di dose o della dose assorbita

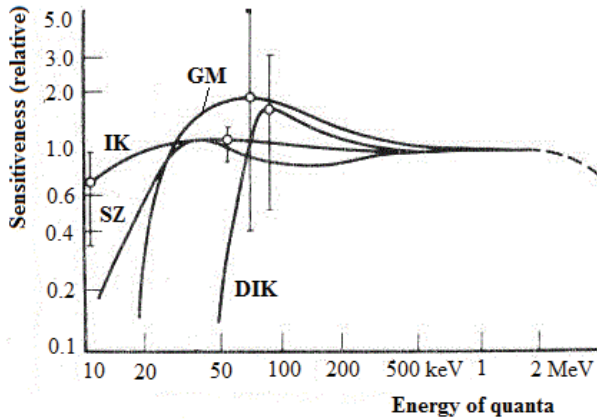


Fig. 6.3. Dipendenza tipica della sensibilità di diversi rivelatori di radiazioni dal livello di energia (valori medi per un gran numero di rivelatori individuali) e diffusione massima nella regione critica. GM - contatore Geiger-Muller; IK - camera di ionizzazione; SZ - contatore a scintillazione; DIK - camera di ionizzazione ad alta pressione.

6.3. Trasduttori di misura a ionizzazione

La Fig. 6.4 mostra lo schema strutturale di uno dei trasduttori a ionizzazione con isotopo radioattivo. Il dispositivo è progettato per la misurazione continua dello spessore di un nastro in movimento o, ad esempio, di un acciaio laminato.

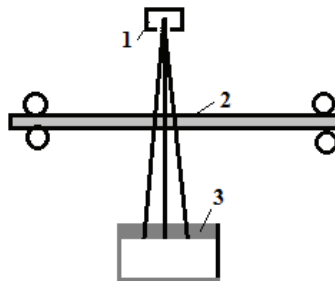


Fig. 6.4. Schema del trasduttore a ionizzazione per la misurazione dello spessore del nastro.

Il principio di funzionamento del dispositivo è il seguente. La radiazione radioattiva dell'isotopo 1 viene parzialmente assorbita dal prodotto 2. La quantità di energia ricevuta dall'indicatore 3 dipende dal materiale e dallo spessore del prodotto. La quantità di energia ricevuta dall'indicatore 3 dipende dal materiale e dallo spessore del prodotto. L'indicatore 3, attraverso un amplificatore, è collegato al sistema di misurazione calibrato in valori del valore misurato.

La Fig. 6.5 mostra gli schemi dei dispositivi del misuratore di livello e del misuratore di pressione del gas che funzionano secondo il principio della ionizzazione.

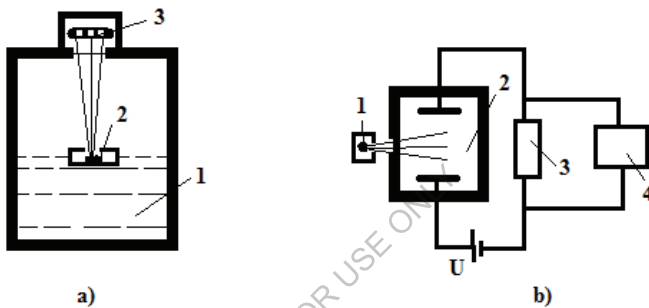


Fig. 6.5. a - schema del misuratore di livello a ionizzazione, b - schema del dispositivo di misurazione della pressione del gas.

Il galleggiante 2 con l'isotopo radioattivo galleggia sulla superficie del liquido 1 (fig. 6.5.a). L'indicatore 3, che percepisce le radiazioni, si trova sopra il galleggiante. Quando il livello del liquido cambia, la distanza dalla sorgente di radiazioni all'indicatore e, di conseguenza, la quantità di energia ricevuta dall'indicatore cambiano. In questo modo, il livello del liquido viene monitorato.

La Fig. 6.5.b mostra lo schema strutturale del misuratore di pressione del gas di ionizzazione. Sotto l'influenza della radiazione radioattiva dell'isotopo 1, nel serbatoio 2 si verifica la ionizzazione del gas. A seconda della pressione del gas, l'intensità della ionizzazione cambia. Di conseguenza, la corrente di ionizzazione che scorre nel circuito sotto l'azione della tensione applicata U cambia. Il dispositivo di misura è collegato alla resistenza 3, la cui caduta di tensione è creata dalla corrente di ionizzazione.

Gli analizzatori di gas a ionizzazione hanno un dispositivo simile.

6.4. Camera di ionizzazione. Radiazioni radioattive. Contatori

Nel caso più semplice, la camera di ionizzazione è un dispositivo costituito da due piastre metalliche isolate l'una dall'altra e separate da uno spazio di gas (fig. 6.6).

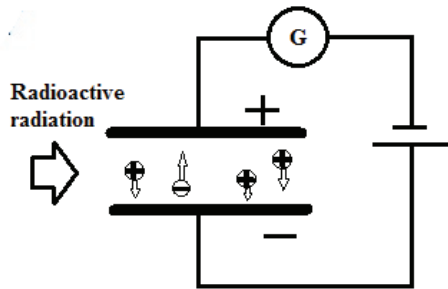


Fig. 6.6. Schema e principio di funzionamento di una camera di ionizzazione.

Qualsiasi condensatore d'aria può fungere da camera di ionizzazione. Lo spazio tra le piastre è chiamato volume di lavoro della camera. Se si applica una tensione costante a una piastra, si forma uno spazio con un campo elettrico, le cui linee di forza sono dirette dalla piastra positiva a quella negativa. Una forza agirà su una particella elettricamente carica posta nel campo elettrico e si muoverà lungo una traiettoria che coincide con la direzione delle linee del campo elettrico. La direzione di movimento delle particelle cariche positivamente coincide con la direzione delle linee di campo. Le particelle negative si muovono nella direzione opposta.

Consideriamo i processi che avvengono nel volume di lavoro della camera di ionizzazione. In assenza di tensione sugli elettrodi della camera, gli ioni e gli elettroni che si formano nel volume di lavoro a causa della radiazione radioattiva si muovono in modo casuale insieme agli atomi neutri, alcuni dei quali raggiungono gli elettrodi. Se agli elettrodi viene applicata una piccola tensione costante, sotto l'influenza del campo elettrico gli ioni e gli elettroni acquisiscono un moto diretto corrispondente alle linee di campo (fig. 6.6). Gli elettroni si muovono verso la piastra anodica a carica positiva e gli ioni positivi verso la piastra catodica a carica negativa. La velocità di movimento degli ioni positivi pesanti è migliaia e decine di migliaia di volte inferiore a quella degli elettroni leggeri.

A bassa tensione, il campo elettrodico è debole e le particelle si muovono lentamente. Pertanto, la maggior parte di esse si ricombina e non raggiunge gli elettrodi. Si trasformano in particelle di gas neutro. Di conseguenza, la corrente nel circuito esterno sarà molto piccola.

L'intensità della corrente di ionizzazione è pari alla carica elettrica totale apportata dalle particelle cariche alla superficie dell'elettrodo durante un secondo. Più ioni arrivano all'elettrodo, maggiore è la corrente. Questa corrente viene registrata con qualsiasi strumento elettrico collegato al circuito della camera.

All'aumentare della tensione applicata alle piastre, aumenta l'intensità del campo elettrico e un numero crescente di particelle cariche, che non hanno avuto il tempo di ricombinarsi, cade sugli elettrodi. L'intensità di corrente nel circuito esterno aumenta (fig. 6.7, da O ad A).

Quindi, a una certa tensione U_1 l'intensità del campo elettrico aumenta, in modo che tutte le particelle cariche formate dallo ionizzatore esterno nel volume di lavoro della camera cadano sugli elettrodi. In questo caso, la corrente nel circuito esterno è determinata solo dalla capacità di ionizzazione della radiazione. Se la capacità di ionizzazione della radiazione non cambia, la corrente nella camera non cambia (curva A-B). Questa corrente è chiamata corrente di saturazione della camera.

Quando la tensione viene ulteriormente aumentata fino a U_2 , la corrente che scorre nel circuito della camera ricomincia ad aumentare, dapprima lentamente e poi sempre più velocemente (parte della curva sopra il punto). Ciò è dovuto al fatto che a tensioni superiori a U_2 l'intensità del campo elettrico all'interno della camera aumenta in modo tale che gli elettroni acquistano una velocità sufficiente a ionizzare gli atomi neutri del gas quando si incontrano. Pertanto, la corrente nel circuito esterno è determinata dalla quantità totale di cariche formate sotto l'influenza dello ionizzatore esterno e sotto l'azione degli elettroni ionizzanti intrappolati nel volume di lavoro della camera.

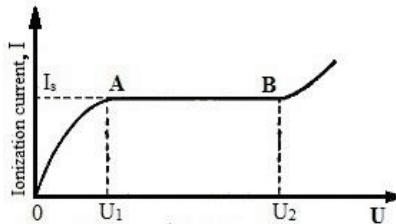


Fig. 6.7. Caratteristica Volt-ampere di una camera di ionizzazione.

La curva di dipendenza della corrente di ionizzazione della camera dall'entità della tensione applicata è detta caratteristica volt-ampere.

Le camere di ionizzazione operano solitamente nella regione di saturazione della corrente. Poiché l'entità di questa corrente è proporzionale al numero di ioni prodotti, può servire come misura della capacità di ionizzazione della radiazione.

A seconda del loro utilizzo, le camere di ionizzazione sono di due tipi:

- Una camera utilizzata per misurare la ionizzazione totale causata dal passaggio di un numero significativo di particelle ionizzanti è chiamata camera di ionizzazione integrante. L'entità della corrente di saturazione è uguale al prodotto del numero di coppie di ioni prodotti al secondo per centimetro cubo della camera, del suo bias e della carica di ogni ione. Di conseguenza, il valore della corrente di saturazione può servire come misura della dose di radiazioni.

- Il secondo tipo è costituito dalle camere di ionizzazione a conteggio, che possono essere utilizzate per testare e determinare la capacità di ionizzazione di ogni singola particella ionizzante (ad esempio una particella α) catturata nel volume di lavoro della camera.

Camera di ionizzazione Geiger-Muller. La Figura 6.8 mostra un dispositivo costituito da un cilindro metallico, sul cui asse è teso un filamento di filo su isolanti. Questo dispositivo è chiamato contatore a scarica di gas. La Figura 6.8 mostra la sezione trasversale del contatore. Il cilindro è collegato al terminale negativo della batteria ed è chiamato catodo. L'anodo è collegato attraverso la resistenza di carico.

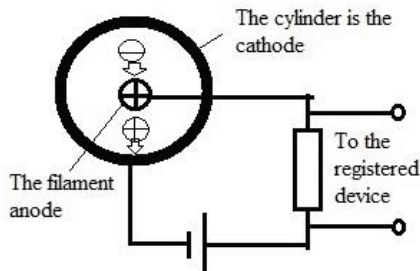


Fig. 6.8. Schema e funzionamento del contatore a ionizzazione

Se una particella ionizzante attraversa il volume di lavoro del contatore, nella camera compaiono ioni ed elettroni positivi che, sotto

l'azione del campo elettrico, si spostano verso gli elettrodi: gli elettroni verso il filamento, gli ioni verso il cilindro. Nel circuito esterno fluisce un impulso di corrente che forma un impulso di caduta di tensione sulla resistenza di carico. Questo impulso di tensione può essere registrato con un dispositivo di registrazione.

La quantità di elettricità nell'impulso di corrente dipende dall'entità della tensione applicata. In generale, questa dipendenza è illustrata nella fig. 6.7 e i principi fisici di funzionamento del misuratore sono simili a quelli della camera di ionizzazione (fig. 6.6).

A seconda della tensione applicata, il contatore può funzionare come camera di ionizzazione, contatore proporzionale e contatore Geiger-Muller a scarica di gas. In pratica, però, si tratta di tre tipi di dispositivi diversi con design differenti e, a seconda dell'uso previsto, si applica l'uno o l'altro dispositivo.

Design del contatore. Design del contatore gamma. Il design dei contatori a scarica di gas viene costantemente migliorato e modificato. I contatori possono essere suddivisi in diversi gruppi: contatori gamma, i cosiddetti contatori beta-gamma, contatori per particelle β morbide, che nella loro progettazione devono avere una finestra per il passaggio di particelle β morbide, contatori di fotoni (quanti di luce) e altri.

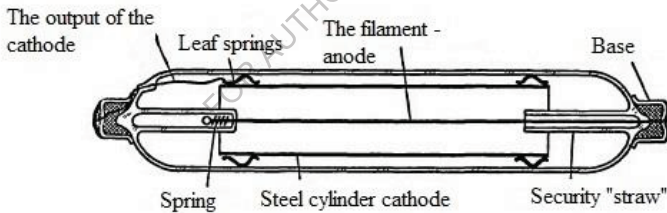


Fig. 6.9. Schema del contatore gamma in sezione

Il dispositivo del contatore gamma è piuttosto semplice. La figura 6.9 mostra un contatore gamma con contenuto di argon. In questo caso, un cilindro a parete sottile - catodo in acciaio inossidabile - è inserito in un cilindro di vetro. Il contatto è condotto fuori dal cilindro con un filo di molibdeno. Un filamento metallico (anodo) è collegato all'asse. Il misuratore è riempito con una miscela di alogeni (neon-argon-bromo) e può essere utilizzato sia in modalità impulsiva (conteggio) che in modalità corrente. Questo misuratore appartiene alla serie STM (steel meter).

In modalità a impulsi, il misuratore ha una vita utile molto lunga. I contatori della serie STM consentono velocità di conteggio di centomila impulsi al minuto e oltre; ciò mantiene la proporzionalità tra l'intensità di irradiazione e la velocità di conteggio fino a duecentomila impulsi al minuto.

Questa caratteristica del tasso di conteggio corrisponde a una dose di circa 0,25 (R/h). L'intensità di dose fino alla quale il rateo di conteggio rimane direttamente proporzionale ad esso, così come il valore della dose massima del funzionamento del contatore in modalità corrente, dipendono dalle dimensioni geometriche. Quanto più piccoli sono il diametro del catodo e la lunghezza operativa, tanto più grande è il limite di dose e tanto più a lungo si mantiene la proporzionalità tra il rateo di conteggio e il rateo di dose di radiazione.

Quando si seleziona la lunghezza di lavoro, i rapporti della lunghezza di lavoro sono regolati nel misuratore in modo da essere almeno il doppio del diametro del catodo. Con una lunghezza di lavoro inferiore, il misuratore funziona ugualmente, ma il valore della scarica potenziale aumenta drasticamente.

Ad esempio, per un contatore con un diametro catodico di 10 mm a una lunghezza di lavoro pari a 5 diametri (50 mm), a un certo riempimento di gas, la tensione di avvio è di 400 V, a una lunghezza di lavoro pari a due diametri catodici - 405, a una lunghezza di lavoro pari a un diametro catodico - 450 V, e a una lunghezza di lavoro pari a 0,5 diametri catodici, il potenziale di accensione aumenta a 500 V.

Al diminuire della lunghezza di lavoro del filamento, diminuiscono sia la lunghezza del plateau di conteggio che le caratteristiche.

Bibliografia

1. Tecnologie e applicazioni delle radiazioni nella scienza dei materiali. A cura di Subhendu Ray Chowdhuru. -Taylor & Francis, 2022, 396p. ISBN 9781032343945
2. Mykola Gorbachuk. MATERIALI ELETTROROTECNICI. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, Londra, N2 9ED, Regno Unito, 2024, 112p. ISBN: 978-620-3-46212-8.
3. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Corso generale di fisica: guida allo studio],T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.
4. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Fisica dei dispositivi a semiconduttore]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
5. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconduttori].- L. *Nauka* 1967. 439p.
6. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Repertorio "Misure nell'industria"] 1-3 volumi. M.: *Metallurgiya*, 1990.

Appendice

Tabella 1.

Dipendenza del CEM di una termocoppia differenziale in rame-cromo (Tipo L) dalla temperatura della giunzione di lavoro (tabella di calibrazione). Intervallo di temperatura da -20°C a $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	EMF, mV									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

Tabella 2.

Dipendenza del CEM di una termocoppia differenziale in cromo-allumina (**tipo K**) dalla temperatura del giunto di lavoro (tabella di calibrazione).

Intervallo di temperatura da -270 °C a 1370 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-8.458										
-260	-8.441	-8.444	-8.448	-8.448	-8.450	-8.452	-8.453	-8.455	-8.458	-8.457	-8.458
-250	-8.404	-8.408	-8.413	-8.417	-8.421	-8.425	-8.429	-8.432	-8.435	-8.438	-8.441
-240	-8.344	-8.351	-8.358	-8.364	-8.370	-8.377	-8.382	-8.388	-8.393	-8.399	-8.404
-230	-8.282	-8.271	-8.280	-8.289	-8.297	-8.306	-8.314	-8.322	-8.329	-8.337	-8.344
-220	-8.158	-8.170	-8.181	-8.192	-8.202	-8.213	-8.223	-8.233	-8.243	-8.252	-8.262
-210	-8.035	-8.048	-8.061	-8.074	-8.087	-8.099	-8.111	-8.123	-8.135	-8.147	-8.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.959	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.438
60	2.438	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138

Continuazione della Tabella 2

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539	200
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.219	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.368	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.836	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690

Continuazione della Tabella 2

700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.288	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.094
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.018	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.255	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.655	52.690	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								1370

Tabella 3.

Dipendenza dell'EMF di una termocoppia differenziale in rame-costantana (**tipo T**) dalla temperatura del giunto di lavoro (tabella di calibrazione).

Intervallo di temperatura da -270 °C a 400 °C.

t, °C	EMF, mV											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
-270	-8.258											
-260	-8.232	-8.236	-8.239	-8.242	-8.245	-8.248	-8.251	-8.253	-8.255	-8.256	-8.258	
-250	-8.180	-8.187	-8.193	-8.198	-8.204	-8.209	-8.214	-8.219	-8.223	-8.228	-8.232	
-240	-8.105	-8.114	-8.122	-8.130	-8.138	-8.146	-8.153	-8.160	-8.167	-8.174	-8.180	
-230	-8.007	-8.017	-8.028	-8.038	-8.049	-8.059	-8.068	-8.078	-8.087	-8.096	-8.105	
-220	-5.888	-5.901	-5.914	-5.928	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007	
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888	
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753	
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603	
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439	
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.146	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261	
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070	
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865	
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.628	-4.649	
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419	
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177	
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923	
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657	
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379	
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089	
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788	
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476	
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153	
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819	
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475	
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121	
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757	
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383	
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391	
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790	
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196	
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612	
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036	
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468	
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909	
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358	
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814	
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279	
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750	
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228	
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714	
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206	
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704	
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209	
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720	
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237	
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759	
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288	

Continuazione della Tabella 3

200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822	200
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362	210
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907	220
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458	230
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013	240
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574	250
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139	260
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709	270
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283	280
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862	290
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.388	15.445	300
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032	310
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624	320
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219	330
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819	340
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422	350
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030	360
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641	370
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255	380
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872	390
400	20.872											400

FOR AUTHOR USE ONLY

Tabella 4.

Dipendenza del CEM di una termocoppia differenziale c platino-30% rodio/platino-6% rodio (**tipo B**) dalla temperatura della giunzione di lavoro (tabella di calibrazione).

Intervallo di temperatura da 0 °C a 1820 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.865	0.870
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242

Continuazione della Tabella 4

500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.568	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913	610
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975	620
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037	630
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101	640
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165	650
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230	660
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296	670
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363	680
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431	690
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499	700
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569	710
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639	720
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.695	2.703	2.710	730
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782	740
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854	750
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928	760
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.966	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002	770
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078	780
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	-3.131	3.138	3.146	3.154	790
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230	800
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308	810
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.388	820
830	3.388	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466	830
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546	840
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626	850
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708	860
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790	870
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873	880
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957	890
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041	900
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127	910
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213	920
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299	930
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387	940
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475	950
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564	960
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653	970
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743	980
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834	990

Continuazione della Tabella 4

1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.926
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.056	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.056	6.066	6.076
1130	6.075	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.255	6.266	6.276
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.755	6.766	6.776	6.786
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844
1390	8.844	8.856	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.946	8.956
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099

1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215	1500
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331	1510
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447	1520
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563	1530
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679	1540
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796	1550
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913	1560
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029	1570
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146	1580
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263	1590
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380	1600
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497	1610
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614	1620
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731	1630
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848	1640
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965	1650
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082	1660
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199	1670
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316	1680
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433	1690
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549	1700
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666	1710
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782	1720
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898	1730
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014	1740
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130	1750
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246	1760
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361	1770
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476	1780
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591	1790
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706	1800
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820	1810
1820	13.820											1820

FOR AUTHOR USE ONLY

**More
Books!**



yes
I want morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.shop

Compra i tuoi libri rapidamente e direttamente da internet, in una delle librerie on-line cresciuta più velocemente nel mondo!
Produzione che garantisce la tutela dell'ambiente grazie all'uso della tecnologia di "stampa a domanda".

Compra i tuoi libri on-line su
www.morebooks.shop



info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com

OMNIScriptum

