
Fondamenti sui sensori

11.1. Introduzione e definizioni

Le *grandezze fisiche* da misurare nella maggior parte dei casi risultano *non elettriche*. D'altra parte i metodi di misura che assicurano la migliore accuratezza dei risultati e che consentono l'ottimizzazione nella progettazione della strumentazione di misura e controllo sono quelli elettrici. Allo scopo di utilizzare i metodi e le tecniche delle misure elettriche, la quantità non elettrica deve essere convertita in un segnale elettrico, il che avviene utilizzando un dispositivo che prende il nome di *trasduttore*. Non esiste ancora a livello internazionale un accordo sulle definizioni da attribuire ai termini *trasduttore* e *sensore* che molto spesso sono utilizzati in modo indifferenziato. Per cercare di distinguere i due termini, nel seguito si fornisce per essi una definizione, che, a giudizio di chi scrive, risulta abbastanza logica.

La parola *trasduttore* deriva dal verbo latino *traducere* che significa convertire, pertanto per *trasduttore* si può intendere un dispositivo che riceva energia da un sistema e la ritrasmetta, in genere in forma differente, a un altro sistema. Per *sensore* si può intendere un dispositivo sensibile alla grandezza fisica da misurare in grado di trasmettere un segnale a un sistema di misura o di controllo. Quindi proprio il sensore ha il compito di convertire l'informazione al suo ingresso. La conversione può essere nella stessa o in altra forma di energia. Il sensore è tanto più pregiato quanto meno il contenuto dell'informazione viene alterato. Poiché le capacità dei trasduttori si vanno sempre più estendendo, si può affermare, in base alle definizioni date, che un trasduttore molto spesso ingloba al suo interno diversi sensori, oltre che reti di compensazione e di controllo. In particolare è molto diffuso in diversi trasduttori il controllo della temperatura utilizzando un apposito sensore. Inoltre si va sempre più diffondendo l'utilizzazione della tecnologia a semiconduttore nella realizzazione dei trasduttori, il che sta comportando non solo una sempre più diffusa miniaturizzazione, ma anche una sensibile riduzione dei costi.

In base alla definizione data di trasduttore, si può asserire che in un sistema di misura e di controllo trasduttori si trovano sia negli stadi iniziali sia in quelli finali. Negli elementi di ingresso si troveranno dei sensori, in quelli di uscita il trasduttore conterrà o sarà rappresentato da un

elemento che prende il nome di *attuatore*, che consente di trasformare l'energia in ingresso in altra forma utile al processo in atto nel sistema. Poiché la definizione di trasduttore che si è data è abbastanza ampia, in realtà come è accaduto, sta accadendo e probabilmente accadrà i trasduttori continueranno a essere denominati molto spesso in modo differente. Si è già accennato all'uso indifferenziato dei termini sensore e trasduttore. In molti processi industriali i trasduttori sono chiamati *trasmettitori* (di pressione, di temperatura ecc.). In molti campi, in particolare nell'area dei dispositivi elettro-ottici, essi sono chiamati *rivelatori* (a intensità di luce infrarossa ecc.). Un altro termine molto utilizzato è quello di *cella* (cella di carico invece di trasduttore di forza ecc.). Altre parole inglesi molto usate sono *gage* (scritto anche *gauge*, che significa misuratore) e *pickup* (nel senso che qui si vuol dare alla parola non può che essere tradotta come trasduttore). Molto spesso alcuni trasduttori sono denominati aggiungendo la desinenza *-metro* al misurando. A volte i trasduttori prendono il nome di *sistema sensorio*, ciò proprio per la necessità di adattare il sensore al processo industriale che si vuole governare.

Se si accetta la distinzione fatta precedentemente tra sensore e trasduttore e si conviene di utilizzare correttamente questo termine, a esso è necessario far riferimento quando si tratti di applicazioni industriali. Non è neanche da sottacere che è rilevante il valore aggiunto nel passaggio da sensore a trasduttore o, come anche sarà meglio spiegato in seguito, da sensore a sensore intelligente. È chiaro allora che uno stesso sensore potrà essere utilizzato per differenti trasduttori e, reciprocamente, lo stesso trasduttore può utilizzare diversi sensori. In genere, mentre il sensore è definito esclusivamente dalla grandezza da misurare, il trasduttore dipende dal processo e dall'ambiente in cui opera.

I sensori possibilmente convertono la grandezza fisica da misurare in un segnale elettrico. La preferenza per un tale tipo di conversione deriva dalla facilità di condizionare, trasmettere, elaborare, memorizzare, visualizzare il segnale o il dato con le tecniche che l'elettronica e l'informatica mettono a disposizione al giorno d'oggi. La natura dell'uscita elettrica dal trasduttore dipende dal principio base utilizzato nel progetto. L'*uscita* può essere *analogica*, *digitale* o *modulata in frequenza*. I trasduttori nell'industria e nella medicina misurano pressioni, forze, velocità, accelerazioni, flussi, suoni, temperature, parametri chimici come il pH, impedenze elettriche e tante altre grandezze. Inoltre, è solo il caso di ricordarlo, il segnale elettrico ha la prerogativa che con opportuna elaborazione permette l'automazione del processo da controllare e l'autocalibrazione. Mediante un opportuno trasduttore e un controllo in retroazione una termocoppia consente non solo la misura della temperatura, ma anche la regolazione della potenza immessa nell'elemento riscaldante, in modo che si abbia temperatura costante entro limiti prefissati. Campi tipici di applicazione dei trasduttori sono i sistemi di controllo di processo, la robotica, le catene di produzione assistite dal calcolatore. L'utilizzazione dei sensori sempre più diffusa si è accompagnata al passaggio sempre più massivo dal controllo manuale dei processi a quello automa-

tico. L'ottimizzazione del processo si ha mediante l'invio da parte del sensore del segnale di controllo a un opportuno attuatore.

Il *mercato dei sensori* si va allargando quindi con l'automazione di fabbrica anche nel nostro paese, interessando non solo aree nelle quali l'automazione è stata attuata ormai da tempo, ma anche nuovi settori emergenti quale ad esempio quello delle industrie manifatturiere. Definire il valore del mercato in un settore in rapida espansione tecnologica quale quello dei sensori e degli attuatori risulta estremamente difficile oltre che azzardato. Si tratta di un settore di una notevole vastità ed inoltre si va dal costo del sensore e dell'attuatore che può essere irrisorio a quello del trasduttore completo che risulta decisamente superiore e che permette i maggiori guadagni da parte delle imprese costruttrici. Questo è senza dubbio uno dei motivi per cui nelle statistiche ufficiali non vengono distinti i termini sensori e trasduttori.

Le *tecnologie utilizzate* per la realizzazione di sensori, attuatori e trasduttori sono le più disparate per cui si assiste a una forte specializzazione da parte dei costruttori. Chi produce sensori per termocoppie difficilmente commercializza altri tipi di sensori, a meno che questi non si basino sulla stessa tecnologia utilizzata per la termocoppia. Per affrontare lo studio, la progettazione, la realizzazione di sensori occorre avere a disposizione *competenze multidisciplinari*, utilizzare ricerca di base molto specializzata e conoscere come sfruttare un particolare fenomeno per ricavare un elemento sensibile a un determinato misurando. I sensori diventano sempre più piccoli, meno costosi, più affidabili, più intelligenti, meno attaccabili da ambienti ostili e utilizzano sempre più semiconduttori e materiali ottici. Altre tendenze sono quelle di portare il sensore più vicino al processo e l'intelligenza più vicina al sensore. Tecnologie avanzate per la realizzazione di sensori impiegano la interferometria laser, le fibre ottiche, i radar modulati, l'interferenza ottica, i sensori di forza e movimento a sei assi. Molti di questi sono necessari nella fabbrica automatica e nella robotica (specie i sensori di forza con elevata risoluzione).

11.2. Il sensore intelligente

Si parla correntemente di *sensori integrati* con riferimento a quei dispositivi in cui sono accorpati l'elemento sensibile, il silicio e quindi il sistema di condizionamento del segnale. Nell'ambito dei sensori integrati è sorta l'esigenza di caratterizzarne un sottoinsieme che presenti oltre al sistema di condizionamento anche un sistema di elaborazione mediante un microprocessore. A questi dispositivi, che richiedono molto spesso un'unità fisica e anche una progettazione dedicata, si è dato il nome di *sensori intelligenti*. I sensori intelligenti hanno consentito una notevole semplificazione della misura oltre che l'ottimizzazione delle prestazioni dei sensori stessi. Lo sviluppo dei sensori intelligenti è legato non solo alle prestazioni che essi offrono, ma anche al notevole valore aggiunto rappresentato dal sistema di elaborazione e controllo.

Le potenzialità di un sensore intelligente sono notevoli e nel seguito

se ne accenna ad alcune. È possibile stabilire, in base al tipo di grandezza in esame, il miglior metodo di misura, la portata, la frequenza di campionamento, l'accuratezza della misura, il modo di presentazione del risultato. Spesso i sensori intelligenti hanno la capacità di comunicare con altri sensori, con sistemi di supervisione e con l'operatore, di adattarsi a diverse esigenze autoriconfigurandosi, di autocalibrarsi, di eseguire l'autodiagnosi.

In realtà per effettuare correttamente una serie di operazioni occorrono più sensori i cui segnali siano convertiti dal dominio del continuo in quello del discreto. In sintonia con le definizioni date nel paragrafo precedente sarebbe più corretto parlare di trasduttori intelligenti, ma ormai è invalso nell'uso attribuire l'intelligenza al sensore.

L'impetuoso sviluppo delle tecnologie elettroniche e informatiche, della elaborazione dei segnali e il suo utilizzo nella strumentazione programmabile si sta riversando quindi anche nell'ambito della sensoristica. Particolare attenzione va posta a tutte quelle tecniche che consentono di operare in *tempo reale* e quindi alle problematiche del campionamento, delle conversioni dal continuo al discreto, della trasmissione dei segnali.

I sensori intelligenti possono avere una *codifica digitale diretta* e in tal caso il segnale digitale, in genere disponibile in forma parallela, è prelevato all'uscita del sensore e viene inviato in ingresso al microprocessore. Dispositivi di questo tipo sono rari. Come esempio si può considerare un misuratore di spostamento lineare o angolare costituito da un disco circolare sul quale è stampigliato un opportuno schema, che consente la codifica diretta. Il disco è normalmente calettato su un albero e come questo ruota si genera una codifica differente per ogni posizione misurabile. La codifica può avvenire per contatto, per via magnetica o per via ottica. Quella per contatto richiede la presenza di spazzole con tutti i problemi che queste comportano. Quella magnetica utilizza dei piccoli magneti toroidali, di quelli impiegati nelle memorie magnetiche dei calcolatori, sensibili alla presenza o meno di un campo magnetico. Questo tipo di codifica non soffre dell'usura delle spazzole e quindi assicura una vita utile maggiore al sensore. La codifica ottica è quella che si va diffondendo sempre più in quanto consente i maggiori livelli di accuratezza. Fondamentalmente un codificatore ottico è costituito da tre componenti: un disco segmentato composto da parti trasparenti e opache; una sorgente di luce con un sistema di lenti ottiche, dei rivelatori di luce costituiti da tante cellule fotoelettriche. Questi tipi di codificatori sono in grado di rilevare spostamenti dell'ordine del micron con una risoluzione superiore a 14 bit.

Altri tipi di sensori intelligenti convertono la grandezza fisica da misurare in una serie di impulsi che vengono inviati a un contatore digitale universale che fornisce in uscita il segnale digitale disponibile in forma parallela in ingresso al microprocessore. Un esempio tipico è rappresentato da un misuratore di velocità angolare, costituito da un disco forato, calettato sull'asse di un organo in movimento. Una sorgente di luce invia un segnale rilevabile dall'altra parte del disco mediante una cellula fotoe-

lettrica che converte il segnale di velocità del disco in una serie di impulsi a frequenza variabile in dipendenza della velocità stessa.

Certamente il modo più diffuso per passare dal continuo al discreto è quello di utilizzare un *convertitore analogico digitale* e su questo principio si basa la maggior parte dei sensori intelligenti disponibili sul mercato. Essi prevedono: un sistema di condizionamento (amplificazione, adattamento di impedenze, filtraggio del rumore, filtraggio anti-aliasing, scelta della portata utilizzando opportuni interruttori e relé comandati da un controllore di campo azionato dall'unità logica centrale di processo ecc.); un sistema di acquisizione (conversione analogico-digitale, tensione di riferimento, unità di controllo della polarità ecc.); un sistema di elaborazione (unità centrale di processo, processori dedicati all'elaborazione dei segnali, moltiplicatori, memorie, "cache", "bus" di comunicazione interna, interfacce, "clock", contatori, dispositivi per l'accesso diretto in memoria, "display", ecc.); un sistema di comunicazione (bus, interfacce, modem ecc.). Il sistema di comunicazione con l'esterno è molto importante non solo nella fase di esercizio del sensore, ma anche in quella iniziale di taratura. Infatti a questo scopo si utilizza quasi sempre un sistema automatico di taratura costituito da un host-computer con una notevole capacità di calcolo per poter eseguire tutte le operazioni necessarie alla taratura.

La ricerca e lo sviluppo nell'ambito dei sensori intelligenti tendono a intensificarsi in quanto forte è la domanda che proviene dal mondo industriale. Le linee di tendenza di questo sviluppo stanno essenzialmente in una maggiore integrazione tra sistema sensorio e sistema di elaborazione, in un trasferimento dei risultati conseguiti nell'ambito dell'intelligenza artificiale alla sensoristica. Probabilmente fra qualche anno si passerà dal sensore intelligente al *ensore esperto*.

11.3. Classificazione dei sensori

Nella trattazione dei sensori è necessario decidere se *classificarli sulla base della tecnologia e del principio fisico* che essi utilizzano (ottico, piezoelettrico, fotoelettrico, fotovoltaico ecc.) o *della funzione che essi svolgono e della grandezza da misurare* (lunghezza, temperatura, pressione, vibrazione ecc.) o *del particolare settore cui essi sono destinati* (agricoltura, siderurgia, chimica, manifatturiero ecc.). Le diverse classificazioni sono adottate in modo alternativo in diversi testi. La prima, quella per tecnologie, riesce a dare una visione ragionevolmente integrata dei processi utilizzati nella realizzazione dei sensori e risulta particolarmente utile al progettista di sensori. Essa evidenzia lo stato dell'arte e le possibilità che un dato principio fisico soddisfi una determinata richiesta. Essa purtroppo è poco utile quando uno desidera comparare i pregi e i difetti di sensori in grado di misurare una stessa grandezza. Ad esempio se si deve scegliere un termometro occorrerebbe andare a esaminare separatamente le sessioni riguardanti i dispositivi resistivi, quelli termoelettrici, quelli a semiconduttore, i pirometri. Anche una classificazione per

settori può risultare utile a chi operi in un certo campo, ma a parte la difficoltà di individuazione dei tanti settori in cui si utilizzano i sensori essa darebbe luogo a ripetitività o a continui rinvii, in quanto uno stesso sensore viene correntemente adoperato in diverse aree. Quindi da un punto di vista dell'utente senza dubbio la migliore classificazione è quella per grandezze da misurare in quanto consente di stabilire subito quali siano i sensori disponibili con le loro caratteristiche. È chiaro che una classificazione per funzioni deve soprattutto mettere in evidenza i particolari requisiti dei sensori in relazione alle differenti applicazioni, dando una panoramica delle varie proprietà fisiche utilizzabili per eseguire una determinata misura. In tal modo l'utente potrà operare la sua scelta in base alle necessità, tenendo conto del rapporto costi benefici. Purtroppo molti testi, classificando i sensori per grandezze da misurare tendono spesso ad assumere la veste di un catalogo con la giustapposizione di dispositivi privi di un minimo di correlazione, perdendo frequentemente di scientificità.

Nelle pagine seguenti si darà una classificazione per grandezze da misurare con particolare riferimento alla temperatura, allo spostamento, alla forza, alla pressione, alle vibrazioni, alla velocità, all'accelerazione, ai flussi. Ma prima di addentrarsi in questa trattazione, si fornirà una sintetica visione dei processi fisici che presiedono la trasformazione da una forma di energia all'altra nei diversi trasduttori. Si descriveranno sensori utilizzati da anni a livello industriale e alcuni che si affacciano in maniera promettente sul mercato. Infine si cercherà di dare un quadro dei possibili futuri sviluppi nel campo della sensoristica.

Solo per completezza di trattazione si accenna a un altro tipo di classificazione dei sensori che si trova in alcuni testi, riprendendo un concetto presente nell'elettronica. I sensori possono suddividersi in *passivi* (detti anche *a modulazione*) quando richiedono potenza dall'esterno per fornire un segnale di tensione o di corrente e in *attivi* (detti anche ad *auto-generazione*) quando non richiedono una potenza esterna (ad esempio in forma di energia elettrica) per fornire il segnale in uscita derivato dalla grandezza fisica da misurare.

I *sensori passivi* agiscono come impedenze elettriche. Il misurando può produrre una variazione nei parametri geometrici (volume, superficie, lunghezza ecc.) o una variazione delle proprietà elettriche (resistività, permittività, permeabilità ecc.). È molto importante tener conto che le variazioni nei parametri geometrici frequentemente producono anche variazioni nelle proprietà elettriche. E di queste variazioni occorre tener conto in quanto esse possono alterare sensibilità e accuratezza del sensore. La variazione nei parametri geometrici può essere dovuta a una forza, a uno spostamento, a una vibrazione, a una velocità ecc. La variazione nelle proprietà elettriche è dovuta generalmente a umidità, temperatura, pressione, forza, coppia, radiazione luminosa.

I *sensori attivi* forniscono un segnale elettrico in uscita derivato semplicemente dalla grandezza fisica in ingresso. I trasduttori di questo tipo sfruttano diversi effetti fisici quali quelli piezoelettrico, fotoelettrico, fotovoltaico, elettromagnetico e termoelettrico. Poiché l'uscita elettrica è

TABELLA 11.1
Tipi di sensori

<i>Classi ed esempi</i>	<i>Natura del sensore</i>	<i>Misurando e applicazioni</i>
SENSORI PASSIVI		
Resistore a filo	Resistenza variabile in un potenziometro	Dimensioni, spostamento
"Strain gage"	Resistenza variabile con lo sforzo	Sforzi, forze, coppie, pressioni
Termometri a resistenza	Spira o termistore con variazioni di resistenza	Temperatura, effetti termici, calore irradiato
Sensore a spira calda	Spira riscaldata elettricamente	Variazioni di flusso, turbolenze, densità gas
Igrometro a resistenza	Variazioni di resistività con l'umidità	Umidità relativa
Radiometro a termistore	Radiazioni focalizzate su un bolometro	Inseguimento di missili e satelliti
Misuratore di spessori del contatto	Misura di resistenza	Spessore di fogli, livello di liquidi
Cellule fotoconduttive	Resistenze variabili con radiazioni incidenti	Relè sensibili alla luce o a radiazioni infrarosse
Tubi fotoemissivi	Emissione di elettroni con le radiazioni	Relè fotosensibili
Misuratori di ionizzazione	Flusso di elettroni con la ionizzazione	Conteggio di radiazioni e particelle
Misuratori di traferro	Variazioni di induttanza con campo magnetico	Spessori, spostamenti, pressioni
Sensore a riluttanza	Variazioni di riluttanza con posizione materiale	Posizione, spostamenti, vibrazioni, pressioni
Sensore a correnti parassite	Variazioni di induttanza con l'avvicinamento	Spessori, spostamenti
Trasformatori differenziali	Nucleo magnetico mobile in speciali avvolgimenti	Spostamenti, posizioni, pressioni, forze
Sensore a magnetostriazione	Proprietà magnetiche variabili con sforzi	Suoni, pressioni, forze
Sensore a effetto Hall	Interazioni campo magnetico corrente	Forza del campo, correnti
Condensatore variabile	Variazioni capacità per lunghezza o area	Spostamenti, pressioni
Microfono a condensatore	Variazioni capacità per pressione del suono	Voce, musica, rumori, vibrazioni
Dielettrico	Variazioni nel dielettrico	Livelli, spessori
SENSORI ATTIVI		
Sensori a equipaggio mobile	Movimento relativo tra magneti ed equipaggio	Velocità di vibrazione, velocità di spostamento
Termocoppie	Metalli dissimili a diverse temperature	Temperature, radiazioni, flussi di calore
Sensori piezoelettrici	Compressione del quarzo o altro cristallo	Vibrazioni, accelerazioni, suoni, pressioni
Cellule fotovoltaiche	Generazione in semiconduttori di tensione dalla luce solare	Esposizione, luce

limitata dal misurando fisico, questi tipi di trasduttori tendono ad avere una uscita a bassa energia, per cui in genere richiedono una amplificazione.

Un esempio di classificazione sulla base della natura passiva o attiva dei sensori è fornito nella tabella 11.1.

In alcuni testi accanto ai sensori passivi (o a modulazione) e a quelli attivi (o ad autogenerazione) si contempla un terzo gruppo cui appartengono i sensori noti come *modificatori* (in alcuni testi sono classificati come *convertitori*), che hanno la prerogativa di avere la stessa forma di energia all'ingresso e all'uscita con caratteristiche modificate.

11.4. Parametri fondamentali dei trasduttori

La scelta di un trasduttore che ha il compito di conservare inalterata l'informazione contenuta nel segnale d'ingresso, rendendola disponibile in uscita, si basa su una serie di considerazioni che si è tentato di parametrizzare. Rimandando, per quanto riguarda la caratterizzazione statica, al terzo capitolo, qui si accenna semplicemente ad alcuni parametri fondamentali che è indispensabile conoscere per una scelta meditata del sensore.

Il primo problema che si pone è ciò che si intende misurare. Per questo bisogna definire la *specie del misurando*, ovvero la natura della grandezza fisica o chimica da misurare e il campo di misura. Per quest'ultimo, definito anche *portata o valore di fondo scala* (FSO), si intende l'insieme di valori che può assumere il misurando senza che il sensore esca dalle specifiche fornite dal costruttore, ovvero funzioni correttamente, senza subire particolari degradazioni dei componenti. Al misurando è legato anche il valore di *sovraccarico*, inteso come il valore limite che può assumere il misurando senza che il funzionamento del sensore resti permanentemente alterato rispetto alle specifiche.

Un altro problema che si pone è legato al principio di funzionamento del trasduttore; a esso sono strettamente legate le problematiche relative all'elemento che all'interno del trasduttore risponde direttamente al misurando (elemento sensibile) e alle particolari funzioni svolte dal trasduttore. Solo una buona conoscenza dei principi fisici alla base del funzionamento del trasduttore e del sensore può consentire un loro uso corretto. Purtroppo non sempre dalle specifiche fornite dal costruttore è facile evincere in modo inequivocabile il principio di funzionamento di un trasduttore. Solo l'esperienza personale gioca un ruolo fondamentale in questo campo.

È necessario inoltre precisare i *parametri di uscita* del sensore e quindi la sua natura (in genere elettrica di tipo analogico o digitale), il campo di *normale funzionamento* (legato al campo di misura dell'ingresso), il *sovraccarico* (valore massimo in uscita legato al massimo valore della grandezza applicata all'ingresso). Altri parametri utili sono la *potenza erogabile* che il sensore può fornire in uscita all'interno delle sue specifiche, l'*impedenza di uscita* che il sensore presenta ai morsetti di

uscita (utile soprattutto per poter progettare correttamente un dispositivo di adattamento di impedenze).

Nel caso di sensori passivi un parametro importante è rappresentato dal valore della tensione o della corrente che deve essere fornita da una *sorgente di alimentazione esterna o ausiliaria* per consentire il corretto funzionamento del sensore.

Quando si tratti, come avviene quasi sempre, di trasduttori lineari un parametro importante è rappresentato dalla *costante* del sensore definita come rapporto tra il segnale di ingresso e il segnale di uscita in risposta all'ingresso. Essa è un parametro che ha dimensioni date dal rapporto delle unità di misura della grandezza di ingresso e di quella di uscita (nel caso di un trasduttore di spostamento con in uscita una tensione elettrica si ha metro per volt).

11.5. Rappresentazione dei sensori

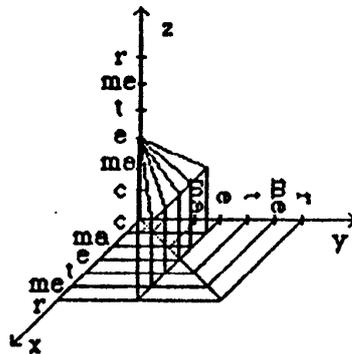
Come si è accennato in precedenza diversi sono gli effetti fisici che si utilizzano nei sensori. Proprio la loro attuale espansione non consente di essere esaustivi nell'esame dei principi fondamentali di funzionamento su cui si basano tutti i sensori oggi in commercio. Le possibilità offerte dall'*intelligenza artificiale* hanno infatti permesso di far ricorso a principi e tecniche operative un tempo abbandonate. Le innovazioni tecnologiche nell'ambito dei materiali fanno intravedere il superamento degli attuali limiti di alcuni sensori. Nelle pagine seguenti si propone semplicemente una sintesi dei principi di funzionamento sui quali si basa una larga parte dei trasduttori oggi disponibili in commercio. L'esame degli effetti fisici utilizzati nei sensori richiede una schematizzazione delle varie forme in cui l'energia si manifesta. Una interessante e ormai famosa rappresentazione tridimensionale dei sensori è stata proposta nel 1981 da Middelhoek e Noorlag. In essa sono considerate le seguenti sei forme di energia:

- energia elettromagnetica radiante;
- energia meccanica;
- energia termica;
- energia elettrica;
- energia magnetica;
- energia chimica.

Queste forme di energia si possono presentare sia in ingresso (in tal caso sono riportate lungo l'asse x di uno spazio cartesiano) sia in uscita (in tal caso si riportano lungo l'asse y dello spazio cartesiano) sia come fonte ausiliaria esterna per consentire il funzionamento del sensore (in tal caso si riportano lungo l'asse z dello spazio cartesiano).

In base a questa rappresentazione è evidente che nel piano xy saranno contenuti tutti i *sensori attivi*. In totale nel piano xy si possono presentare 36 combinazioni tra le energie del misurando e del segnale in uscita al sensore. Trenta di queste trentasei combinazioni sono scambi

FIGURA 11.1
Rappresentazione tridimensionale dei sensori



energetici che si riferiscono a forme diverse di energia tra segnali di ingresso e uscita, mentre sei a forme uguali di energia (si tratta in tal caso di modificatori o convertitori). Tra i trenta scambi di energie diverse i più importanti sono cinque e precisamente quelli che prevedono in uscita energia elettrica, anche se assumeranno in futuro rilevanza i cinque scambi che presentano in uscita energia elettromagnetica radiante.

Se risulta indispensabile per il funzionamento del sensore un apporto esterno di energia, occorre considerare nella rappresentazione del sensore la componente dell'energia lungo l'asse z . In tal caso si tratta di *sensori passivi* e le possibili combinazioni tra le componenti in gioco dell'energia lungo i tre assi risultano duecentosedici. Ancora una volta i sensori più diffusi sono quelli che prevedono un apporto di energia elettrica dall'esterno.

In fig. 11.1 sono rappresentati a titolo di esempio, tra i tanti possibili, i *sensori con energia elettrica in uscita*. Uno attivo nel piano xy con energia termica in ingresso ed elettrica in uscita è ad esempio una termocoppia. Uno passivo nello spazio xyz con energia meccanica in ingresso ed elettrica sia in uscita sia come fonte ausiliaria è per esempio un potenziometro.

11.6. Fotoemissione o effetto fotoelettrico esterno

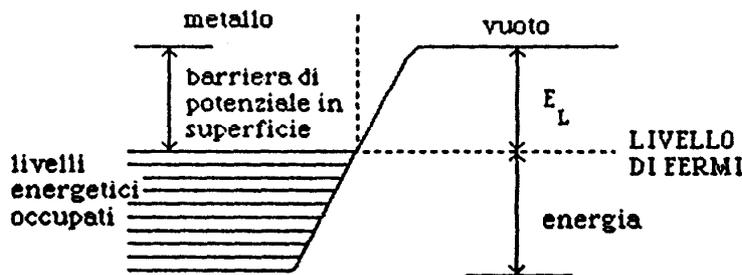
La *fotoemissione* consiste nell'emissione di elettroni da un materiale provocata da radiazioni elettromagnetiche appartenenti alla zona visibile e ultravioletta dello spettro, ma anche da radiazioni infrarosse, da raggi X e raggi δ . La fotoemissione si riscontra più facilmente in materiali solidi ed è denominata anche *effetto fotoelettrico esterno*.

Si consideri una superficie metallica investita da un fascio di luce di opportuna lunghezza d'onda. La superficie investita è caratterizzata da una *funzione lavoro* E_L , che è la quantità di energia richiesta per estrarre un elettrone da essa. Se la luce è monocromatica di frequenza f e lunghezza d'onda λ , la *condizione per l'emissione di un elettrone* è:

$$hf > E_L$$

dove h è la *costante di Plank*. I sensori che utilizzano l'effetto fotoelettrico sono noti come *rivelatori fotoemissivi*. Questi sono realizzati mediante un catodo di un opportuno materiale e da un anodo tra i quali è applicata una elevata d.d.p. (intorno alle centinaia di volt) chiusi in un tubo. L'effetto di fotoemissione nei metalli è rappresentato in fig. 11.2.

FIGURA 11.2
Fotoemissione nei metalli



Gli aspetti più importanti della fotoemissione sono che non vi è alcun ritardo tra l'irradiazione di un emettitore e l'emissione di fotoelettroni. Ciò è dovuto al fatto che il fotone, interagendo con l'elettrone, gli cede tutta la sua energia senza ritardi temporali. Inoltre a una data frequenza il numero di fotoelettroni emessi per secondo è proporzionale all'intensità della radiazione incidente. Infine i fotoelettroni hanno energia cinetica con valori compresi tra zero e un massimo ben definito, proporzionale alla frequenza della radiazione incidente e indipendente dall'intensità. L'energia cinetica degli elettroni liberi risulterà pertanto uguale o inferiore a un massimo dato dalla differenza $hf - E_L$ (valore che deve risultare necessariamente positivo perché l'elettrone possa liberarsi dal materiale).

Nei *sensori fotoemissivi* purtroppo l'effetto della temperatura non è trascurabile in quanto il valore della soglia fotoelettrica non è più ben definito quando la temperatura del metallo si scosta dallo zero assoluto. Vi sono dei *coefficienti di correzione* dell'effetto di temperatura proposti da Fowler e da De Bridge.

Per sfruttare la fotoemissione si potrebbero utilizzare anche dei semiconduttori, ma a questi sono preferiti i *metalli* che presentano un'energia di soglia fotoelettrica inferiore a quella dei semiconduttori.

I rivelatori fotoemissivi trovano scarsa utilizzazione nei trasduttori, mentre più diffusa è l'applicazione nei *fotomoltiplicatori* nei quali si crea una corrente elettrica incrementando l'effetto fotoelettrico mediante una serie di elettrodi secondari.

11.7. Effetto fotoconduttivo

L'*effetto fotoconduttivo* determina un passaggio di corrente elettrica in materiali investiti da radiazioni di varia lunghezza d'onda. Esso è do-

vuto alla variazione delle caratteristiche elettriche nel materiale investito dalla radiazione, in particolare della *conduttività* per quanto riguarda materiali isolanti e semiconduttori. Il fenomeno prende anche il nome di *effetto fotoelettrico interno* per distinguerlo da quello esterno che attiene alla fotoemissione.

La radiazione incidente consente il passaggio degli elettroni da uno stato di legame a uno libero. Gli elettroni liberi non hanno energia sufficiente per uscire dal materiale (come avviene nel caso della fotoemissione) ma contribuiscono alla conduzione facendo diminuire la resistività del materiale, ovvero aumentare la conduttività. In questo tipo di fenomeno, per avere un flusso di corrente elettrica, variabile con la radiazione incidente, è necessario collegare l'elemento fotoconduttivo a un generatore di tensione elettrica.

Tra i materiali fotoconduttivi si annoverano anche i materiali *semiconduttori*, nei quali, come è noto, vi è una separazione fisica dei portatori di carica. Per questi materiali è necessario fare una distinzione. Vi è un *effetto fotovoltaico* (che sarà esaminato in seguito) in cui senza un apporto di energia dall'esterno del materiale si ha il verificarsi di una d.d.p. per il passaggio di elettroni dalla banda di valenza (BV) a quella di conduzione (BC); l'effetto fotoconduttivo invece comporta semplicemente una variazione di conduttività nel materiale, per quantificare la quale occorre un apporto di energia dall'esterno. La conduttività in un materiale semiconduttore è data da $\sigma = Ne\mu$, dove N è il numero totale di elettroni in BC, e e la carica dell'elettrone e μ la mobilità dei portatori di carica.

Purtroppo anche l'effetto fotoconduttivo è influenzato dall'*effetto termico*. Infatti il numero N di elettroni in BC è fortemente influenzato dalla temperatura in accordo alla formula seguente:

$$[11.1] \quad N = N_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

dove N_0 è il numero totale di elettroni nel materiale (cioè in BC e BV), E_g è il gap di energia tra le due bande, k è la *costante di Boltzmann* e T è la temperatura della giunzione. N quindi aumenta con T ed è zero allo zero assoluto.

Un altro fenomeno che riduce l'entità dell'effetto fotoconduttivo è il *tempo di vita* limitato degli elettroni in BC, mentre sarebbe auspicabile che esso fosse più lungo possibile per aumentare la sensibilità.

Per un calcolo della corrente di fotoconduzione si può considerare un cubo di germanio avente lo spigolo di 1 cm con due elettrodi, necessari per creare il campo elettrico, posti su due facce opposte. Se N_f sono i fotoni assorbiti in un secondo, il numero di elettroni e buche liberi in eccesso raggiunge una concentrazione costante $N_f t$ per ciascun tipo di carica. Il numero di elettroni N_e che fluiscono nel tempo t attraverso la batteria nel circuito esterno è dato da:

$$[11.2] \quad N_e = V N_f t (\mu_e + \mu_b)$$

dove V è la tensione applicata e μ_e e μ_b sono le *mobilità* di elettroni e buche rispettivamente.

L'effetto fotoconduttivo si presenta in molti materiali come gli *alogenuri alcalini*, il *germanio*, il *solfuro di cadmio*, il *seleniuro di cadmio*, il *solfuro di piombo*, il *seleniuro di piombo*. L'entità dell'effetto nei diversi materiali fotoconduttivi e quindi la sensibilità del sensore che utilizzi un determinato materiale variano con la lunghezza d'onda della radiazione incidente. Pertanto si assegna a ciascun materiale fotoconduttivo un particolare campo di frequenze, compreso nella banda fondamentale di assorbimento ottico, nel quale si manifesta la sua migliore attitudine. Ad esempio gli *alogenuri alcalini* sono particolarmente indicati nella *regione rossa dello spettro* (avendo un picco di assorbimento ottico nell'intorno di 1,6 eV), mentre il *germanio* è indicato per radiazioni nell'*infrarosso* (avendo massimo assorbimento ottico intorno a 0,7 eV), ma può essere utilizzato anche nel *visibile* e nell'*ultravioletto*. Le proprietà di conduttività dei fotoconduttori sono notevolmente migliorate con il *drogaggio* consistente nell'introduzione di una quantità controllata di impurità. Il fotoconduttore è di solito preparato sotto forma di *sottile pellicola*, per evaporazione del materiale sotto vuoto, per precipitazione chimica o per compressione del materiale polverizzato. Le celle di *solfuro di cadmio* sono molto usate per applicazioni industriali, per la loro alta sensibilità nello spettro *visibile*. Tuttavia esse presentano errori di *isteresi* (la risposta dipende dalla esposizione alla luce avvenuta in precedenza) e di *pie-distallo* (presenza di correnti nel circuito anche in assenza di luce). Le celle di *solfuro di piombo* e *seleniuro di piombo* sono particolarmente sensibili alla radiazione *infrarossa* e la sensibilità aumenta alle basse temperature con il crescere delle lunghezze d'onda delle radiazioni. Per utilizzarle nel lontano infrarosso è necessario raffreddare le celle con idrogeno liquido (si portano a temperature intorno a -250 °C).

Le celle fotoconduttrici sono caratterizzate dalla loro sensibilità nell'*infrarosso* ($\lambda = 1 - 2 \mu\text{m}$) e dal loro breve tempo di risposta. Il loro utilizzo si ha nei sistemi di *registrazione* ad alta velocità, nei *microscopi* ad alta risoluzione, nell'*elettrografia* e nei *rivelatori di radiazioni infrarosse*.

11.8. Effetto di fotoionizzazione

La *fotoionizzazione* è un effetto che consente di produrre in un gas la ionizzazione per azione di una radiazione elettromagnetica. La ionizzazione consiste nella modificazione di una molecola o di un atomo neutro in uno ione positivo o in un elettrone libero. In casi più complessi una molecola può essere modificata in uno ione positivo o in uno negativo, separati tra loro. L'energia necessaria perché possa manifestarsi il processo di fotoionizzazione viene fornita per irraggiamento di fotoni

contenuti in radiazioni X od ottiche. Tali radiazioni agiscono in genere in un gas, ma possono anche essere applicate alla superficie di materiali solidi e danno luogo ad atomi ionizzati o a elettroni liberi.

La fotoionizzazione è utilizzata nel campo della misura delle radiazioni.

11.9. Effetto fotovoltaico

I due effetti precedenti danno luogo a sensori passivi, mentre quello *fotovoltaico* è riferito a *sensori attivi* ed è conseguente alla conversione dell'energia radiante in energia elettrica. Tale effetto consente la realizzazione di *celle solari*, notissime per la loro utilizzazione sempre più diffusa in diversi campi, come quello dei satelliti.

L'effetto fotovoltaico si presenta nelle giunzioni p-n dei semiconduttori, sottoposte a radiazioni che danno luogo alla comparsa di una forza elettromotrice (f.e.m.). Come mostrato in fig. 11.3, illuminando la giunzione si producono coppie elettroni-buche; le coppie vengono separate dal campo della barriera (gap) e danno origine a una f.e.m. La giunzione p-n altri non è che un diodo caratterizzato da una elevata corrente inversa. Naturalmente si vengono a creare una buca in BV e un elettrone in BC, solo se l'energia hf del fotone è superiore a quella E_g caratterizzante la barriera di potenziale tra le due bande. La buca e l'elettrone liberati si muovono liberamente nelle due bande e possono fluire nel circuito esterno. È opportuno notare che la direzione della corrente è la stessa della corrente inversa in un diodo normale. Così la corrente I_L , dovuta alla radiazione luminosa, può considerarsi, come mostra la fig. 11.4, una grandezza che determina un aumento della corrente inversa, Quindi in

FIGURA 11.3
Effetto fotovoltaico in una giunzione p-n

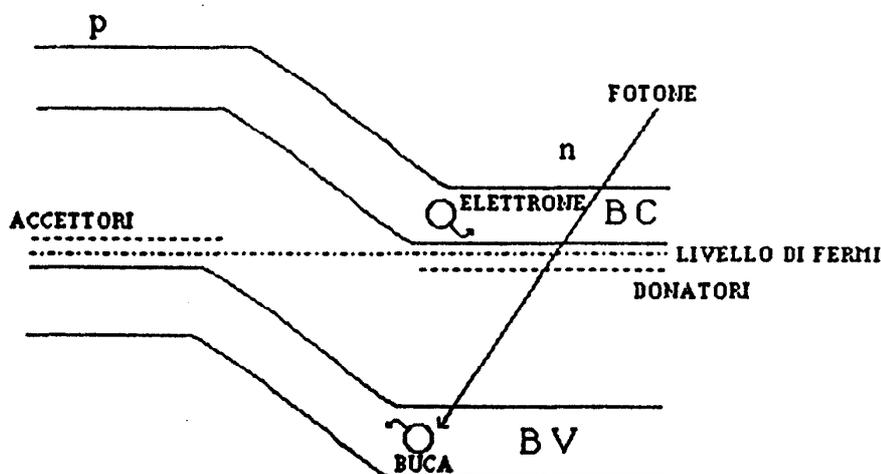
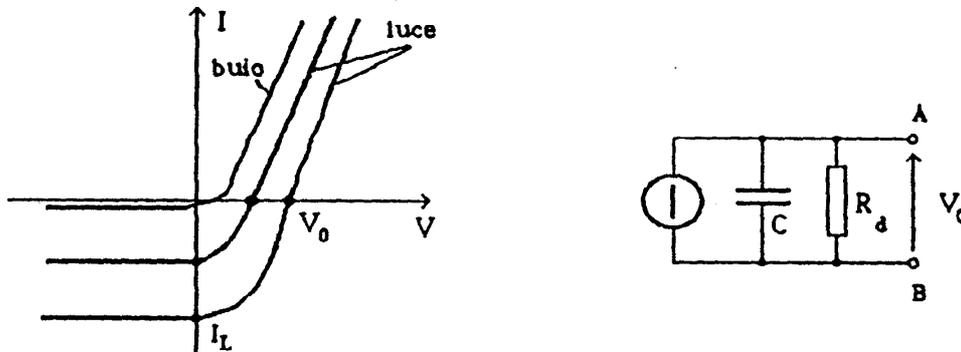


FIGURA 11.4
 Caratteristica e circuito equivalente di un diodo fotovoltaico



condizioni di cortocircuito all'esterno fluirà una corrente I_L , mentre in condizioni a vuoto ai morsetti AB si avrà una tensione V_0 . Nel circuito equivalente sono presenti oltre al generatore di corrente I_L , una resistenza R_d (che limita la corrente di cortocircuito) e una capacità C (che può limitare la risposta in frequenza).

L'entità della corrente I_L è una funzione dell'energia W associata alla radiazione e della frequenza f della radiazione monocromatica. Il numero di fotoni al secondo è dato da W/hf per cui:

$$[11.3] \quad I_L = k e \frac{W}{hf}$$

dove k è un fattore di efficienza del materiale utilizzato per il diodo.

Materiali tipici per la costruzione delle giunzioni nelle celle fotovoltaiche sono: *silicio-(borato di silicio)*; *selenio-ferro*; *rame-(ossido di rame)*.

La misura della radiazione incidente può avvenire attraverso la misura della corrente I_L . *Celle fotovoltaiche* sono usate anche nei *rivelatori di particelle*, in particolare per i raggi γ e hanno trovato applicazione nelle ricerche sui raggi cosmici compiute con i *satelliti*.

Fotodiodi e fototransistor sono elementi fotovoltaici nei quali l'altezza della barriera di potenziale in corrispondenza della giunzione è modulata dalla luce incidente. Nei fotodiodi per aumentare la sensibilità si effettua una polarizzazione inversa che fa circolare una corrente piccola al buio, crescente con la quantità di luce incidente sul fotodiodo. I fototransistor sono diversi dai fotodiodi perché la corrente fotoelettrica è amplificata con un notevole aumento della sensibilità alla radiazione incidente. Alcuni tipi di fototransistor sono usati come interruttori o dispositivi bistabili. Piccole quantità di luce sono in grado di produrre la commutazione del circuito dalla condizione di minima corrente a quella di corrente elevata.

11.10. Effetto Doppler

Questo effetto fu scoperto nel 1842 dal tedesco C. Doppler e consiste nella variazione di frequenza delle onde acustiche, ottiche, radio, dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore delle onde. Occorre distinguere gli aspetti salienti del fenomeno nel campo *acustico* e in quello *ottico* in quanto si presentano alcune differenze.

Nel *campo acustico* l'effetto è facilmente percepibile quando una tromba attivata di una automobile si avvicini a un ascoltatore fermo. Anche se l'intensità e la frequenza dell'onda sonora emessa dalla tromba restano costanti, l'ascoltatore percepirà l'avvicinarsi o l'allontanarsi dell'automobile perché aumenterà o diminuirà la frequenza dell'onda sonora (numero di suoni nell'unità di tempo) che giunge al suo orecchio. Quando, come in genere accade, la velocità, v_u , di propagazione del suono è molto più grande della velocità, v_r , del moto relativo tra sorgente e ricevitore, la *variazione di frequenza* tra la frequenza, f_s , dell'onda emessa dalla sorgente e quella dell'onda percepita dal ricevitore risulta:

$$[11.4] \quad \Delta f = f_s \frac{v_r}{v_u}$$

Se il moto non avviene lungo la retta di congiunzione della sorgente e del ricevitore, nella precedente equazione occorre considerare per v_r la componente della velocità secondo la suddetta retta. L'effetto Doppler nel campo acustico è quindi un *effetto* tipicamente *longitudinale*, e non si presenta quando la direzione del moto è ortogonale alla congiungente sorgente-ricevitore. Nel campo acustico il moto del mezzo in cui avviene la propagazione delle onde influisce sulla variazione di frequenza Δf , il che non accade nel campo delle onde elettromagnetiche.

L'effetto Doppler, *relativo alle onde elettromagnetiche*, è molto utilizzato sia in *cosmologia* sia nei *radar*. Se una stella si muove rispetto a un osservatore si ha una variazione nella frequenza delle onde ricevute. Tale variazione dà luogo a una dispersione delle righe spettrali in un ricevitore sincronizzato con le frequenze delle onde emesse dalla stella. Dalla dispersione delle righe spettrali è possibile risalire al moto dei corpi celesti il cui spettro sia rivelabile. L'effetto Doppler nel campo delle onde elettromagnetiche dà luogo a una *variazione di frequenza*, che ha la seguente forma generale:

$$[11.5] \quad \Delta f = f_s \left[\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v_r}{c} \cos \theta} - 1 \right]$$

dove c è la velocità della luce e θ è l'angolo che la congiungente sorgente-ricevitore forma con la direzione del moto. Pertanto nel campo delle onde elettromagnetiche si hanno due effetti:

— *effetto Doppler longitudinale*, nell'eq. [11.5] $\theta = 0$, $v_r \ll c$:

$$[11.6] \quad \Delta f_i = f_s \left(\frac{1}{1 - \frac{v_r}{c}} - 1 \right) = f_s \frac{v_r}{c}$$

(con Δf di segno negativo nel caso di allontanamento della sorgente dal ricevitore);

— *effetto Doppler trasversale*, nell'eq. [11.5] $\theta = \pi/2$, $v_r \ll c$:

$$[11.7] \quad \Delta f_i = f_s \left(\sqrt{1 - \left(\frac{v_r}{c}\right)^2} - 1 \right) = -\frac{f_s}{2} \left(\frac{v_r}{c}\right)^2$$

Nel caso delle *applicazioni radar* si misura la variazione della frequenza tra un segnale trasmesso e il segnale dell'*eco*, dovuto a un bersaglio mobile. Per l'effetto Doppler longitudinale l'eq. [11.6] si modifica nel modo seguente:

$$[11.8] \quad \Delta f_i = 2f_s \frac{v_r}{c}$$

dove v_r è la velocità relativa del bersaglio nella direzione del radar. La variazione di frequenza è positiva nel caso in cui il bersaglio si avvicini al radar, negativa nel caso si allontani. L'uso più diffuso del radar Doppler è quello di misuratore della velocità degli oggetti (radiotachimetro), ma applicazioni si hanno anche nei radiogoniometri. L'effetto Doppler è molto utilizzato anche nei sensori di flusso nei quali si può fare ricorso a onde nel campo degli ultrasuoni, dei radar e dei laser con realizzazioni ben differenti l'una dall'altra.

11.11. Effetto piezoelettrico

L'*effetto piezoelettrico* dà luogo a una differenza di potenziale (d.d.p.) fra le due facce di particolari cristalli, quando su di esse siano applicate delle sollecitazioni meccaniche. Il fenomeno osservato da Curie nel 1880 può manifestarsi anche in senso inverso (*reversibilità*). Si possono così presentare *deformazioni meccaniche* in particolari cristalli ferroelettrici sottoposti a d.d.p., e il segno della d.d.p. segue quello della deformazione e viceversa. Utilizzando l'effetto piezoelettrico si possono realizzare trasduttori che convertono una deformazione in *cariche elettriche*. L'effetto non si verifica in materiali che presentano una distribuzione di cariche simmetriche o meglio che abbiano un centro di simmetria nella struttura cristallina. Tra le trentadue *classi cristallografiche* sono ben ventuno quelle che non hanno centro di simmetria e che, a eccezione di una, presentano caratteristiche piezoelettriche.

Nei cristalli non conduttori la piezoelettricità è interpretata come una alterazione dell'equilibrio dei momenti di dipoli elettrici. Quindi una sollecitazione meccanica che provoca una deformazione modifica i momenti di dipolo con conseguente variazione di cariche in superficie dando luogo a una d.d.p.; si possono così realizzare sensori di pressione, di vibrazione e di onde acustiche. La polarizzazione piezoelettrica non è limitata a un unico asse, ma in molte classi di cristalli si presenta solo su un *unico piano*.

La relazione matematica tra le sei componenti del tensore degli sforzi (tre componenti per la tensione e tre per la compressione) e le tre componenti del vettore di polarizzazione P è rappresentata da una matrice a 18 elementi piezoelettrici, i cui valori sono funzioni della maggiore o minore simmetria del cristallo. Per semplificare la forma della matrice si scelgono come assi di riferimento quelli di simmetria naturale del cristallo.

Il materiale piezoelettrico più diffuso è il *quarzo*, ma l'effetto piezoelettrico può essere ottenuto artificialmente nei materiali ferroelettrici (come ad esempio nel *titanato-zirconato di piombo* di produzione più recente) quando siano riscaldati in presenza di intensi campi elettrici.

Si consideri ora un piccolo disco di quarzo o di altro materiale piezoelettrico, la densità di carica q è funzione della forza applicata F :

$$[11.9] \quad q = k_1 F$$

dove il coefficiente k_1 risulta pari a $2 \cdot 10^{-12}$ C/N per il quarzo e a circa $150 \cdot 10^{-12}$ C/N per il titanato-zirconato di piombo. Le superfici sulle quali agiscono le forze applicate al materiale sono metallizzate e danno luogo a un condensatore di capacità $C = \epsilon_r \epsilon_0 A/s$ dove ϵ_r è la permittività o costante dielettrica relativa, pari circa a 4,5 per il quarzo e a 1.800 per il titanato-zirconato di piombo, ϵ_0 è la permittività del vuoto pari a $(1/36\pi)10^{-19}$ F/m, A è l'area della superficie metallizzata e s è lo spessore del disco. La d.d.p. V corrispondente alla carica è proporzionale alla pressione applicata secondo la relazione:

$$[11.10] \quad V = \frac{q}{C} = k_1 \frac{s}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{F}{A} = k_2 sp$$

dove $k_2 = k_1/\epsilon_0 \epsilon_r$ ha un valore di circa $5 \cdot 10^{-2}$ Vm/N per il quarzo e di circa 10^{-2} Vm/N per il titanato-zirconato di piombo.

I *dispositivi piezoelettrici* sono ampiamente utilizzati per misure di *forza e pressioni*, ma è opportuno sottolineare che la risposta alla deformazione non si estende alla componente continua, a causa della capacità C . Essi sono anche impiegati per *misure accelerometriche*.

11.12. Effetto piroelettrico

Tra i *cristalli piezoelettrici* ve ne sono alcuni, in particolare quelli appartenenti a dieci delle 32 classi cristalline, che presentano un unico asse

di polarizzazione, ovvero una direzione privilegiata per la orientazione dei momenti elettrici delle molecole. Questi cristalli manifestano un ulteriore effetto, detto *pireoelettrico*, consistente nella variazione della polarizzazione elettrica spontanea o indotta, che insorge in seguito a variazioni di temperatura dovute ad esempio ad assorbimento di radiazioni.

Il vettore polarizzazione è legato alla variazione di temperatura attraverso una serie di coefficienti pireoelettrici, variabili con l'orientazione degli assi di riferimento. Fra i cristalli che presentano il fenomeno vi sono la *tormalina*, l'*acido tartarico*, il *solfato di litio e sodio*, il *titanato di bario*, il *titanato-zirconato di piombo*, il *niobato di litio*, con coefficienti pireoelettrici variabili intorno a valori di 10^{-13} C/m²K.

L'*effetto pireoelettrico* si manifesta in due modi: uno *primario*, quando il cristallo è tenuto a volume costante in modo che non si verifichino fenomeni di dilatazione termica, e uno *secondario*, quando non si esercitano azioni meccaniche e si possono quindi verificare deformazioni per la dilatazione termica. Nel secondo caso l'effetto piezoelettrico, dovuto alla dilatazione, fornisce un ulteriore contributo alla variazione dei momenti di dipolo. I coefficienti pireoelettrici variano in funzione di T^2 (con T temperatura assoluta) per l'effetto primario e con T^4 per l'effetto secondario, a indicare che quest'ultimo è maggiore di quello primario.

L'effetto pireoelettrico è ampiamente sfruttato nei *bolometri*, ovvero nei *rivelatori termici di radiazioni*, e specie nel campo delle *radiazioni infrarosse* questi sono preferiti a quelli basati sull'effetto fotoelettrico o fotoconduttivo, per il pregio di poter funzionare anche a temperatura ambiente, senza necessità di correzioni, essendo insensibili alla radiazione di fondo stazionaria nel tempo.

Nei rivelatori termici di radiazione basati sull'effetto pireoelettrico la radiazione è diretta su un piccolo disco di materiale le cui facce sono metallizzate e sulle quali si manifesta una d.d.p.; è quasi sempre necessario amplificare il segnale che deve essere applicato a una impedenza molto elevata. A tale scopo il cristallo pireoelettrico è collegato a un amplificatore MOS-FET, che notoriamente presenta impedenze di ingresso superiori anche alle decine di megaohm, montato sullo stesso supporto.

Anche l'effetto pireoelettrico come quello piezoelettrico gode di *reversibilità*, ovvero si può presentare un *effetto* detto *elettrocalorico* lineare. Quando si ha una variazione della polarizzazione a causa della applicazione di un campo elettrico esterno, il cristallo subisce una variazione di temperatura. I valori di questa variazione raggiungibili in tipici materiali pireoelettrici sono dell'ordine di grandezza di 0,01 °C.

11.13. Effetto piezoresistivo

È l'effetto di *variazione della resistività* di un opportuno materiale quando è soggetto a una deformazione, dovuta a uno sforzo a esso applicato. L'effetto è correntemente utilizzato negli estensimetri ("strain-gage"). Nei *materiali metallici* l'effetto si presenta in modo ridotto, mentre

è molto più consistente in alcuni materiali *semiconduttori*. I cristalli di semiconduttori dai quali si ottengono gli elementi sensibili dei trasduttori sono in genere opportunamente drogati e il contenuto di impurità deve essere accuratamente controllato perché si abbiano le caratteristiche desiderate.

Con l'uso di semiconduttori si ottengono notevoli vantaggi quali: una elevata sensibilità (superiore dalle 20 alle 90 volte a quelle relative agli estensimetri metallici); piccole dimensioni ($0,5 \times 0,25$ mm); un elevato valore di resistenza (da 60Ω a $1 \text{ k}\Omega$); un elevato numero di cicli (superiore a 10^7); piccola isteresi. Sfortunatamente i semiconduttori hanno anche un elevato coefficiente di temperatura (effetto termoresistivo) per cui il loro uso negli estensimetri richiede spesso il ricorso a speciali tecniche di compensazione della temperatura. L'effetto piezoresistivo è utilizzato anche negli *accelerometri* e nei *microfoni*.

Una *variazione di resistenza* conseguente a uno spostamento si può ottenere oltre che con elementi piezoresistivi, anche con materiali conduttori, facendo scorrere una spazzola su un filo o su un reostato come avviene nei *sensori potenziometrici*.

11.14. Effetto di magnetostrizione

La *magnetostrizione* è quel fenomeno fisico che determina variazioni di dimensioni e forma in un materiale magnetico soggetto a magnetizzazione e reversibilmente variazioni nella caratteristica di magnetizzazione a causa di deformazioni meccaniche del materiale. L'entità del fenomeno dipende dalla direzione in cui agisce il campo e dal grado di magnetizzazione del materiale.

La magnetostrizione è dovuta alla dipendenza della energia di *anisotropia del cristallo* dallo stato di deformazione del reticolo cristallino. Sollecitazioni contenute entro il limite di elasticità del materiale possono produrre una diminuzione o un aumento di *permeabilità*, in relazione alla particolare natura del materiale. Per esempio il *nichel* soggetto a sollecitazioni che producono deformazioni elastiche presenta permeabilità tanto minore quanto più è elevata la sollecitazione, mentre il *permalloy 68* (lega Ni 68%, Fe 32%) ha permeabilità che aumenta trenta volte per sollecitazioni di trazione pari a 11 kg/mm^2 , corrispondenti al limite di elasticità; superato questo limite la permeabilità diminuisce rapidamente.

Il *nichel* è sfruttato nei trasduttori a magnetostrizione, utilizzati per ricezione o trasmissione di *vibrazioni sonore* ad alta frequenza. Lo stesso fenomeno si sfrutta per misure di *forza*, *pressione*, *accelerazione* utilizzando la variazione di permeabilità di un nucleo di nichel, dovuta alle deformazioni del materiale. Se un intero circuito magnetico o una sua parte è di materiale magnetostrittivo, le variazioni di permeabilità che si producono per sollecitazioni meccaniche del circuito magnetico danno luogo a variazioni dell'*induttanza* di bobine avvolgenti il nucleo.

11.15. Effetto galvanomagnetico magnetoresistivo

Gli *effetti galvanomagnetici* si presentano in alcuni materiali quando siano posti in un campo magnetico e siano percorsi da corrente elettrica. Il fenomeno è dovuto sostanzialmente al fatto che gli elettroni che si muovono all'interno del materiale per la circolazione della corrente elettrica sono deviati per effetto del campo magnetico cui sono sottoposti. L'entità di questa deviazione è condizionata dalla struttura cristallina reticolare del solido e può determinare variazioni della *conducibilità elettrica* e la comparsa di un campo elettrico in direzione ortogonale a quella del flusso primario. L'effetto inoltre può essere o *trasversale* (quando si presenti perpendicolarmente sia alla corrente elettrica sia al campo magnetico) e in tal caso risulta di maggiore interesse, o *longitudinale* (quando si presenti nella stessa direzione della corrente elettrica).

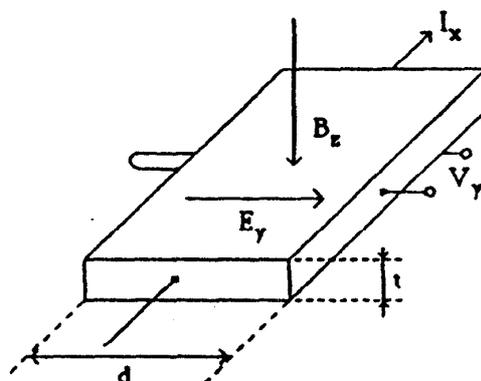
Gli effetti galvanomagnetici hanno molta analogia con quelli *termomagnetici* che si verificano quando un flusso di calore attraversa un materiale solido immerso in un campo magnetico.

La variazione di conducibilità in un materiale conduttore o semiconduttore quando è percorso da corrente ed è soggetto a un campo magnetico H è dovuta all'*effetto magnetoresistivo* che si presenta con la direzione del campo magnetico sia parallelo sia trasversale alla direzione in cui fluisce la corrente. La conseguente variazione di resistenza può essere proporzionale al quadrato dell'intensità del campo magnetico per campi deboli, mentre varia linearmente con H per i valori più intensi del campo. L'effetto magnetoresistivo si manifesta sia nei *metalli* e in *leghe di metalli nobili*, sia nei *semiconduttori* in cui è utilizzato per determinare la struttura delle bande.

Sensori per misure di intensità di *corrente* o di *campo magnetico* potrebbero utilizzare l'effetto magnetoresistivo, ma in genere per tali sensori si preferisce attualmente sfruttare l'effetto galvanomagnetico più conosciuto che è quello Hall.

11.16. Effetto Hall

In un materiale conduttore sottoposto a un campo di induzione magnetica B_z normale al flusso di una corrente elettrica di intensità I_x , si manifesta una d.d.p. V_y in direzione perpendicolare alle direzioni sia di B_z sia di I_x , come mostrato in fig. 11.5. Il fenomeno è dovuto al fatto che le cariche elettriche, in movimento per la presenza della corrente I_x , si accumulano su una faccia del materiale per effetto del campo magnetico, finché si determina un campo elettrico E_y che dà luogo a una forza agente sugli elettroni tale da opporsi e compensare la forza dovuta al campo magnetico. Il campo elettrico E_y (*campo di Hall*), che è legato alla tensione V_y (*tensione di Hall*) dalla relazione $E_y = V_y/d$, è proporzionale al prodotto della corrente e della induzione ovvero al prodotto delle cause che lo hanno determinato. Il segno della tensione di Hall che si manifesta su due facce opposte del materiale dipende dalla direzione

FIGURA 11.5
Effetto Hall


del campo magnetico, da quello della corrente e dal segno delle cariche elettriche.

L'effetto Hall può essere spiegato mediante la teoria degli elettroni liberi. Sia v_x la velocità media di spostamento degli elettroni lungo la direzione x . Ogni elettrone sarà soggetto nel piano xy alla forza di Lorentz che è generata sia dal campo di Hall, sia dal campo magnetico agente normalmente al piano xy . Come si è detto questa forza tende ad annullarsi, in quanto l'effetto dei due campi è opposto:

$$[11.11] \quad F_L = e (E_y - v_x B_z) = 0$$

dove e è la carica dell'elettrone. Ricordando che la velocità degli elettroni si può esprimere mediante il prodotto della mobilità μ_x per il campo elettrico nella direzione x , dalla [11.11] si ricava la seguente espressione:

$$[11.12] \quad E_y = v_x B_z = \mu_x E_x B_z$$

Poiché il campo elettrico è legato alla densità di corrente attraverso la resistività ρ del materiale, l'eq. [11.12] si può scrivere anche:

$$[11.13] \quad E_y = \mu_x \rho J_x B_z = \mu_x \rho \frac{I_x}{td} B_z$$

e ancora:

$$[11.14] \quad V_y = \mu_x \rho \frac{I_x B_z}{t} = k_H \frac{I_x B_z}{t}$$

con t spessore della lamina di materiale e $k_H = \mu_x \rho$ *coefficiente di Hall*. Risultato analogo si sarebbe ottenuto risolvendo l'equazione del trasporto di Boltzmann.

La tensione di Hall può essere prelevata con opportuni elettrodi. Essa è estremamente bassa nei conduttori e negli isolanti. Infatti il coefficiente di Hall dipende dal prodotto della mobilità dei portatori di carica e della resistività del materiale; nei materiali conduttori si ha una bassa resistività, nei materiali isolanti si ha una bassa mobilità. L'effetto Hall assume valori tali da consentirne la realizzazione pratica nei semiconduttori, fra i quali sono particolarmente usati l'arseniuro di indio e l'arseniuro di gallio. Poiché la tensione Hall è inversamente proporzionale allo spessore della striscia di materiale utilizzato, si impiegano strisce molto sottili, talvolta ottenute per evaporazione in spessori dell'ordine di $1\ \mu\text{m}$.

L'effetto Hall può essere influenzato dalla temperatura, specie in presenza di correnti continue, a causa dell'effetto *Ettingshausen*, che consiste nell'insorgere di un gradiente di temperatura nella stessa direzione del campo elettrico di Hall. È bene sottolineare che quando la corrente I_x è alternata il gradiente di temperatura è meno significativo del caso di correnti continue.

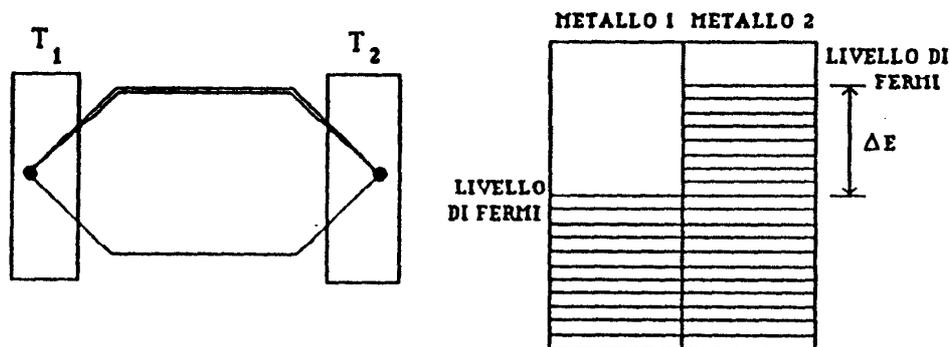
Le applicazioni dei sensori a effetto Hall si hanno prevalentemente nei misuratori di *campo magnetico*, di *corrente elettrica* e di *potenza elettrica*. Da queste misure si può naturalmente risalire a grandezze ad esempio meccaniche legate alle grandezze elettriche da determinate relazioni funzionali. Un dispositivo commerciale che utilizza *arseniuro di indio* ha una corrente di controllo di $0,1\ \text{A}$ e presenta una tensione di Hall pari a $0,15\ \text{V}$ in corrispondenza di un campo di induzione magnetica di $1\ \text{Wb/m}^2$. Un'altra applicazione è quella di misurare deboli *correnti continue* che sono convertite, applicando un campo magnetico alternativo, in tensioni Hall alternate, più facilmente amplificabili. Si hanno già applicazioni di wattmetri a effetto Hall nel campo delle alte frequenze. Proprio la prerogativa di funzionare in un'ampia banda di frequenze sta permettendo lo sviluppo dei sensori a effetto Hall nei *trasformatori di correnti alternate e continue* e nei *trasformatori di tensione*.

11.17. Effetti termoelettrici

Tra gli effetti termoelettrici quello più noto è l'effetto Seebeck, scoperto nel 1826, che consiste nel manifestarsi di una f.e.m. in un circuito comprendente due metalli diversi, quando le giunzioni fra questi sono poste a differenti temperature, come mostrato in fig. 11.6. L'effetto è sfruttato nelle termocoppie ed è dovuto sia alla equalizzazione dei livelli di Fermi, che si verifica quando due metalli sono posti in contatto tra loro, sia alla differente diffusione termica di elettroni tra la parte calda e fredda della termocoppia. Quando due metalli con diversi livelli di Fermi sono posti a contatto, il livello massimo di energia disponibile per gli elettroni dei due metalli è il livello di Fermi più alto. Si determina quindi una f.e.m. proporzionale alla differenza dei due livelli di Fermi dipendente dalla temperatura delle due giunzioni.

In prima approssimazione e per differenze di temperatura non molto elevate si può ritenere la f.e.m., e, una funzione (generalmente crescen-

FIGURA 11.6
Termocoppia e livelli di Fermi nei due metalli



te) della differenza di temperatura fra le due giunzioni (una trattazione più dettagliata sarà fatta quando si esamineranno i sensori a termocoppia):

$$e = k_T \Delta T$$

dove ΔT è la variazione di temperatura fra le giunzioni e k_T è il *potere termoelettrico* della termocoppia o *coefficiente assoluto di Seebeck*, che può essere sia positivo sia negativo. I valori ottenibili di f.e.m. sono molto piccoli, essendo i valori di k_T in genere variabili tra i 10 e i $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Un altro effetto termoelettrico è quello Peltier, scoperto nel 1834, che consiste nel manifestarsi di una certa quantità di calore, assorbita o ceduta da una termocoppia quando questa è attraversata da una corrente elettrica. Il calore è assorbito o ceduto in dipendenza della direzione del flusso della corrente elettrica. L'effetto può considerarsi duale dell'effetto Seebeck. Si definisce anche un coefficiente relativo di Peltier, come il calore che deve essere fornito alla giunzione, in corrispondenza di una densità di corrente unitaria che passi da un conduttore all'altro. Questo effetto è utilizzato nei frigoriferi termoelettrici dove una corrente elettrica di opportuna polarità è inviata in una termocoppia in modo che asporti calore (assorbito da una giunzione della termocoppia). Questi dispositivi sono diffusi prevalentemente nel campo del raffreddamento dei sensori che devono funzionare a temperature stabilite, soprattutto per valori di temperatura intorno a 273 K (0°C) o leggermente inferiori. La loro caratteristica è quella di avere piccole dimensioni e un limitato assorbimento di potenza (da 15 a 25 W). Utilizzando termopile si raggiungono temperature anche inferiori con un leggero incremento nella dissipazione di potenza.

Un ultimo effetto termoelettrico è quello Thomson che consiste nello sviluppo di calore in presenza di un gradiente di temperatura in un materiale conduttore, attraversato da corrente elettrica. Esso prende anche il nome di effetto termoelettrico omogeneo, in quanto è l'unico dei tre

effetti termoelettrici che riguardi un materiale singolo. Il manifestarsi dell'effetto Thomson in una giunzione comporta l'insorgere di una f.e.m. che si sovrappone a quella relativa all'effetto Seebeck. L'effetto Thomson è relativamente piccolo in una termocoppia rispetto all'effetto Seebeck, ma nel caso di misure di temperatura molto accurate deve essere portato in conto mediante un termine correttivo.

11.18. Effetti termoresistivi

I materiali sia *conduttori* sia *semiconduttori* presentano *variazioni di resistenza elettrica* con le escursioni termiche. Nei sensori di temperatura si utilizzano entrambi i tipi di materiali, benché le loro caratteristiche siano molto differenti.

Nella maggior parte dei materiali la *resistività* ha una legge di variazione con la temperatura del tipo:

$$[11.15] \quad \rho_T = \rho_{T_r} e^{\frac{\beta}{T}}$$

dove ρ_T e ρ_{T_r} sono le resistività alle temperature rispettivamente T e T_r , con T_r temperatura di riferimento tendente all'infinito e β è una costante proporzionale al gap di energia tra BV e BC.

Nei *materiali metallici* vi è sovrapposizione fra le due bande e in tal caso β risulta molto piccolo e negativo, per cui nell'eq. [11.15] l'esponenziale può espandersi in fratti semplici. In definitiva l'espressione della resistività assume la seguente forma polinomiale:

$$[11.16] \quad \rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T + \gamma T^2 + \dots)$$

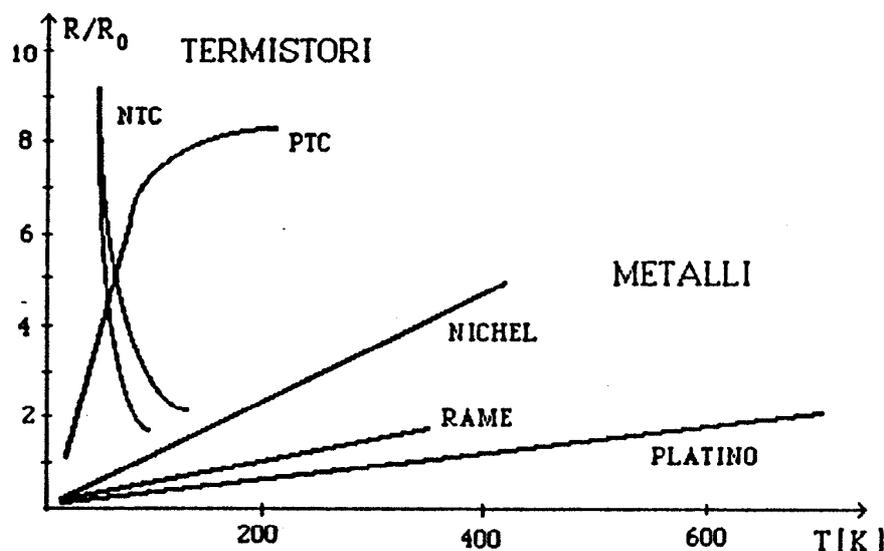
dove ρ_0 è la resistività del materiale a 0 °C. Per molti metalli, in campi di temperatura limitati, si può assumere lineare la variazione di ρ con la temperatura:

$$[11.17] \quad \rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

dove α è il coefficiente di temperatura della resistività del materiale considerato. Se non è noto il valore di ρ_0 si può fare a meno della sua conoscenza, misurando la resistenza del sensore termoresistivo in condizioni di equilibrio termico con l'ambiente a temperatura T_a . Infatti è facile verificare che il legame tra la resistenza del sensore a temperatura T e quella a temperatura T_a è il seguente:

$$[11.18] \quad R_T = R_{T_a} \frac{T + \frac{1}{\alpha}}{T_a + \frac{1}{\alpha}} = R_{T_a} [1 + \alpha (T - T_a)]$$

FIGURA 11.7
Variazioni indicative della resistenza con la temperatura per metalli e termistori



La retta rappresentativa dell'andamento della resistenza in funzione della temperatura ha una pendenza positiva che varia con il materiale conduttore considerato, come mostrato in fig. 11.7.

Per i *materiali semiconduttori* che presentano un gap non nullo tra BV e BC, β è positivo e varia con il materiale considerato, assumendo valori elevati, intorno a diverse migliaia. Anche per i materiali semiconduttori si può determinare una legge di variazione della resistenza che prescindendo dalla conoscenza di ρ_{Tr} , quando sia noto il valore di resistenza alla temperatura ambiente T_a (normalmente pari a 25 °C), infatti si può facilmente verificare la validità della seguente relazione:

$$[11.19] \quad R_T = R_{T_a} e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

La resistenza R_{T_a} è comunemente compresa tra 1 000 e 200 000 Ω . La variazione di resistenza con la temperatura nei materiali semiconduttori è quindi esponenziale, il che rappresenta uno svantaggio, anche se vi sono tecniche che consentono di linearizzare la risposta dei sensori che fanno uso di materiali semiconduttori. Tra i materiali più utilizzati vi sono gli ossidi di nichel, di cobalto e di manganese. Essi sono noti come *termistori a coefficiente di temperatura negativa* (NTC), in quanto la pendenza della curva è negativa. È possibile ottenere *termistori con coefficienti di temperatura positivi* (PTC) in un campo limitato di temperatura, mediante un opportuno drogaggio, anche se le leggi di variazione della resistenza con la temperatura variano considerevolmente tra i vari ter-

mistori PTC. In fig. 11.7 sono riportati a titolo illustrativo gli andamenti delle leggi di variazione della resistenza con la temperatura per metalli e semiconduttori.

Nell'ambito degli effetti termoresistivi si può annoverare anche quello dovuto alle variazioni con la temperatura sia della resistenza diretta di un *diodo*, costituito da una giunzione p-n al silicio, quando sia polarizzato direttamente, sia delle tensioni base-emettitore di dispositivi allo stato solido costituiti da *transistor* con corrente di collettore costante. Le entità delle variazioni sono differenti da dispositivo a dispositivo, per cui ogni termometro richiede una taratura preventiva. Questi sensori si utilizzano nelle applicazioni che non richiedono elevate precisioni soprattutto per la loro linearità nella risposta, il piccolo tempo di risposta e il costo ridotto rispetto ad altri sensori.

11.19. Effetti elettromagnetici

Gli effetti dell'interazione di un campo elettrico con uno magnetico sono molti e nel settore dei sensori se ne sfruttano diversi. In precedenza si sono per esempio esaminati gli effetti di magnetostrizione e quelli galvanomagnetici che si possono annoverare tra gli *effetti elettromagnetici*. Qui se ne ricordano altri due che danno luogo a svariate applicazioni sensoristiche: la *legge d'induzione di Faraday*; le *variazioni di una induttanza* in una bobina avvolta su un circuito magnetico perturbato.

La *legge di induzione di Faraday* stabilisce che quando una bobina di n spire è soggetta a un flusso magnetico variabile nel tempo, che si concateni con le sue spire, si induce in essa una f.e.m. la cui espressione è la seguente:

$$[11.20] \quad e = - n \frac{d\phi}{dt}$$

Questa legge è del tutto generale, nel senso che è valida qualunque sia la causa determinante la variazione del flusso concatenato, e può essere utilizzata nei sensori di campi magnetici variabili nel tempo. In tal caso il *sensore* o sonda è costituito dalla bobina di n spire ferma. Quando invece si vogliono misurare campi magnetici statici occorre far ruotare la bobina a una velocità nota, ma in tal caso l'effetto si dice elettrodinamico.

L'*induttanza* di una bobina di n spire avvolte su materiale magnetico varia in dipendenza non solo delle n spire, ma anche della riluttanza del circuito magnetico. Se questo è dotato di un traferro si può facilmente variare la riluttanza modificando le caratteristiche del circuito magnetico stesso. Dalle variazioni di induttanza si può risalire a *spostamenti, deformazioni, forze, pressioni*.

11.20. Effetti elettrodinamici

Tra gli *effetti elettromagnetici* si annoverano anche quelli *elettrodinamici*. Quando un conduttore di lunghezza l si muove con velocità v , perpendicolarmente a un campo magnetico di induzione B è facile verificare che si manifesta una f.e.m. data da:

$$[11.21] \quad e = Blv$$

In modo reversibile quando il conduttore è attraversato da corrente elettrica i e perpendicolarmente agisce un campo magnetico di induzione B si genera una forza F data da:

$$[11.22] \quad F = Bli$$

La presenza nelle due formule del prodotto Bl è molto utile per la taratura dei cosiddetti *sensori a equipaggio mobile* che operano in presenza di un campo magnetico generato da un *magnete permanente*.

Sugli effetti elettrodinamici (alla base del funzionamento delle macchine elettriche) si basano alcuni sensori tachimetrici e i microfoni elettrodinamici.

11.21. Effetti capacitivi

Sensori tipicamente passivi possono essere costituiti semplicemente da *condensatori*, la cui capacità varia con il modificarsi delle caratteristiche fondamentali del condensatore stesso. Per esempio si consideri un condensatore ad armature piane e parallele di area A , poste a distanza d tra loro e con interposto un dielettrico di permittività relativa ϵ_r . La capacità di questo condensatore è data da:

$$[11.23] \quad C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

dove ϵ_0 è la permittività del vuoto. Dalla precedente risulta evidente che la capacità può variare per modifiche dei parametri dimensionali o della permittività relativa del dielettrico. Si ottengono così tre tipi base di sensori capacitivi:

- a *variazione di distanza fra le armature*;
- a *variazione di area delle armature*;
- a *variazione di permittività*.

La variazione di distanza può avvenire per deformazione delle armature quando si è in presenza di dielettrici gassosi o liquidi o per applicazione di pressioni sia statiche sia dinamiche.

La variazione di area si può avere sia per scorrimento sia per rotazione di una armatura rispetto all'altra.

La variazione di permittività può essere dovuta a variazioni sia di temperatura (*effetto termodielettrico*) sia di composizione del dielettrico. L'effetto termodielettrico è utilizzato nei sensori capacitivi di *temperatura*. Come dielettrici si impiegano vetri e ceramiche metallizzate per avere disponibili le armature del condensatore, i campi di temperatura sono diversi e comprendono quello delle temperature criogeniche (inferiori a 20 K). L'umidità è una delle grandezze che può determinare variazioni nella composizione di dielettrici costituiti da ceramiche porose. In tal modo si realizzano sensori capacitivi di *umidità*.