

Capitolo 1

La fenomenologia dell'effetto piezoelettrico

In questo capitolo si presenta una breve descrizione della fenomenologia dell'effetto piezoelettrico, introducendo i principi e le grandezze fisiche essenziali per l'analisi di questo fenomeno. Viene anche riportata una breve storia della ricerca scientifica in questo campo e delle applicazioni tecniche della piezoelettricità.

1.1 Generalità sull'effetto piezoelettrico

Per illustrare l'effetto piezoelettrico è opportuno richiamare brevemente alcune proprietà dei mezzi dielettrici. Per descrizioni più dettagliate si rimanda ai testi [73, 46, 63].

1.1.1 I materiali dielettrici

Dal punto di vista del comportamento elettrico i materiali possono essere classificati in conduttori, semiconduttori e dielettrici o isolanti. Un materiale dielettrico ideale non possiede cariche libere e quindi non consente il passaggio di correnti elettriche stazionarie. Quando un dielettrico è sottoposto ad un campo elettrico esterno, i centri di carica positiva e negativa all'interno delle molecole di cui è composto si spostano dalle loro posizioni di equilibrio di alcune frazioni di diametro molecolare ed in versi opposti lungo le linee di campo; ogni singola molecola diventa così un dipolo elettrico e nasce uno stato di polarizzazione all'interno del materiale. Il contributo di tutti i dipoli elettrici molecolari ha l'effetto di alterare il campo elettrico all'interno del materiale in maniera significativa. La polarizzazione di un dielettrico può avvenire secondo tre modalità differenti [73]: polarizzazione elettronica, polarizzazione ionica e polarizzazione per orientazione. Nel primo

caso i dipoli si formano a causa di uno spostamento degli elettroni rispetto al nucleo positivo. Nel secondo caso, applicabile a materiali la cui struttura chimica contiene ioni, i dipoli sono generati da uno spostamento relativo tra ioni di carica opposta. Infine il terzo caso si applica a materiali le cui molecole, in assenza di campi elettrici esterni, sono dipoli elettrici permanenti orientati in maniera casuale; l'applicazione di un campo elettrico provoca un parziale riorientamento dei dipoli lungo le linee di campo con la conseguente comparsa di una polarizzazione netta nel materiale.

Per una completa descrizione del campo elettrico all'interno di un dielettrico si introducono i vettori campo elettrico \mathbf{e} [newton/coulomb], intensità di polarizzazione elettrica \mathbf{p} [coulomb/m²] e spostamento elettrico \mathbf{d} [coulomb/m²], tra i quali esiste la relazione:

$$\mathbf{d} = \varepsilon_0 \mathbf{e} + \mathbf{p} \quad (1.1)$$

essendo ε_0 la costante dielettrica del vuoto. Il vettore \mathbf{p} è pari a $N\mathbf{p}_m$, essendo N il numero di dipoli per unità di volume e \mathbf{p}_m il loro momento dipolare; tale vettore è proporzionale al campo elettrico locale all'interno del materiale e vale la relazione $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \chi^e \mathbf{e}$, essendo χ^e una grandezza adimensionale detta suscettività elettrica del mezzo. Sostituendo quest'ultima relazione nella (1.1) si ottiene:

$$\mathbf{d} = \varepsilon \mathbf{e} \quad (1.2)$$

essendo $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi^e)$ la permeabilità del mezzo dielettrico. In mezzi anisotropi χ^e e ε sono tensori del secondo ordine.

1.1.2 Elettrostrizione ed effetto piezoelettrico diretto ed inverso

Quando un dielettrico è sottoposto ad un campo elettrico, all'interno del materiale sussiste un sistema di forze che bilancia l'azione del campo elettrico esterno sui dipoli elettrici molecolari. Come effetto al secondo ordine dello spostamento relativo tra le cariche, si hanno componenti del sistema di forze interne che comprimono il materiale perpendicolarmente alla direzione del campo elettrico; di conseguenza il materiale subisce un allungamento nella direzione del campo elettrico [73]. Invertendo il verso del campo elettrico si riscontra una deformazione dello stesso segno. Questo fenomeno è detto elettrostrizione ed è comune a tutti i solidi dielettrici; in esso la deformazione all'interno del materiale è un effetto quadratico rispetto al campo elettrico.

In alcuni corpi, comunque, le deformazioni che compaiono nel materiale in seguito all'applicazione di un campo elettrico hanno una dipendenza lineare dal campo elettrico stesso, in modo tale che un'inversione del campo elettrico provoca deformazioni di segno opposto; tale fenomeno è detto effetto piezoelettrico inverso. Ad esso si accompagna sempre l'effetto reciproco, cioè la comparsa di un campo elettrico all'interno del materiale in seguito ad una sua deformazione meccanica; tale fenomeno è detto effetto piezoelettrico diretto.

Al contrario dell'elettrostrizione, l'effetto piezoelettrico non si riscontra in tutti i dielettrici ma soltanto in quelli la cui struttura non presenta un centro di simmetria per la carica elettrica, tale che una riflessione rispetto a tale centro lascia invariata la disposizione delle cariche elettriche. In presenza di un centro di simmetria, in ogni cella elementare di materiale i centri di carica positiva e negativa coincidono necessariamente con il centro di simmetria della carica; sottoponendo tale materiale ad una deformazione meccanica, i centri di carica positiva e negativa continuano a coincidere e la polarizzazione netta all'interno del materiale rimane nulla [73]. Solo in assenza di un centro di simmetria delle cariche lo spostamento delle cariche elettriche conseguente ad una deformazione meccanica può indurre una polarizzazione elettrica netta all'interno del materiale [5]. Una spiegazione più formale si ottiene tenendo conto che, come mostrato in dettaglio nel capitolo successivo, il legame lineare tra deformazione e campo elettrico in un materiale piezoelettrico è espresso da un tensore del terzo ordine; ovviamente tutte le trasformazioni di simmetria del materiale, definite nella (2.25), devono lasciare immutato tale tensore. Per un materiale dotato di centro di simmetria la riflessione rispetto a tale centro è ovviamente una trasformazione di simmetria e provoca un cambiamento di segno in tutte le componenti del tensore piezoelettrico; ciò implica che tale tensore deve essere necessariamente nullo [63]. In particolare nei materiali isotropi, che possiedono tutte le simmetrie, non si può riscontrare l'effetto piezoelettrico.

L'effetto piezoelettrico diretto può essere utilmente sfruttato nella realizzazione di trasduttori di pressione, accelerometri e in genere nella realizzazione di sensori. L'effetto piezoelettrico inverso è sfruttato nella realizzazione di risonatori piezoelettrici, di motori lineari e rotativi piezoelettrici ed in generale nella costruzione di dispositivi di attuazione.

1.2 Cenni storici

La scoperta dell'effetto piezoelettrico diretto avvenne ad opera dei fratelli Curie nel 1880 [72]; tale scoperta non giunse inattesa in quanto Pierre Curie aveva già condotto studi sulla piroelettricità ed in particolare sul suo legame con la struttura cristallina di un materiale. Tali studi avevano consentito ai fratelli Curie di prevedere anche l'effetto piezoelettrico diretto e di capire in quale tipo di materiali si potesse riscontrare; i risultati di tale ricerca apparvero sulla rivista *“Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris”* nel 1880. L'effetto piezoelettrico diretto fu riscontrato dai due fratelli in diversi cristalli come il clorato di sodio, la boracite, la tormalina, il quarzo, il sale di Rochelle ecc. L'effetto piezoelettrico inverso fu predetto da Lippman sulla base di considerazioni termodinamiche e fu verificato successivamente dai Curie. Fu Voigt che diede un assetto definitivo alla teoria della piezoelettricità determinando tra le 32 classi di simmetria cristallina le 20 nelle quali si riscontra l'effetto piezoelettrico; i risultati delle sue ricerche apparvero nel 1910 nella celebre opera monumentale *“Lehrbuch der Kristallphysik”*.

La piezoelettricità trovò la sua prima applicazione nella realizzazione di misuratori di carica, ad esempio della carica emessa dal radio, ad opera dello stesso Pierre Curie. Fu durante la I guerra mondiale che si ebbero le prime applicazioni industriali della piezoelettricità con la costruzione di risonatori al quarzo per generare onde acustiche; tali apparecchi, realizzati da Paul Langevin, erano utilizzati come sonar per individuare i sottomarini in immersione. Una applicazione successiva fu la costruzione di interferometri acustici per la misura della velocità del suono e della dispersione in differenti gas al variare della composizione del gas e della sua temperatura [72]. I cristalli di quarzo furono largamente impiegati anche nella radiotecnica per la realizzazione di filtri selettivi. Da quel momento i materiali piezoelettrici furono impiegati nella realizzazione di varie tipologie di attuatori e trasduttori, grazie alla loro capacità di trasformare energia meccanica in elettrica e viceversa.

1.3 Cenni sui materiali piezoelettrici

Tra i cristalli nei quali i Curie riscontrarono l'effetto piezoelettrico, il sale di Rochelle presentava un forte accoppiamento elettromeccanico anche se era piuttosto instabile; grazie al suo elevato accoppiamento elettromeccanico esso presto sostituì il quarzo nella realiz-

zazione dei generatori ultrasonici. Il sale di Rochelle presenta un forte accoppiamento in quanto è un materiale ferroelettrico, per la precisione esso fu il primo materiale in cui si riscontrò tale proprietà. I cristalli ferroelettrici [72, 46] sono caratterizzati dal presentare una polarizzazione spontanea in un certo intervallo di temperatura. La polarizzazione può essere indotta mediante una azione meccanica che separa i centri di carica positiva e negativa; in seguito alla rimozione dell'azione meccanica tali centri rimangono bloccati nelle nuove posizioni ed il materiale presenta una polarizzazione permanente. La situazione più comune è comunque quella di un materiale che presenta domini polarizzati individualmente; quando è applicato un campo elettrico esterno, che tende ad allineare i domini, quelli che sono inizialmente più allineati con tale campo crescono alle spese di quelli meno allineati. Nel piano \mathbf{e} , \mathbf{p} si ottiene allora una curva di isteresi simile a quella che caratterizza i materiali ferromagnetici. I dipoli elettrici permanenti dei materiali ferroelettrici rimangono allineati anche dopo la rimozione del campo esterno cosicchè tali materiali presentano, in un certo intervallo di temperatura, una polarizzazione spontanea. Al di sopra di una temperatura limite, detta temperatura di Curie, avviene un transizione di fase ed un conseguente cambiamento della struttura cristallina che porta ad una scomparsa della polarizzazione spontanea. Alcuni materiali ferroelettrici, tra i quali il sale di Rochelle, presentano anche una seconda temperatura di Curie, al di sotto della quale scompare ugualmente la polarizzazione; questo fatto dipende dalla particolare composizione chimica nel materiale [72]. I materiali ferroelettrici sono molto utilizzati nella realizzazione di trasduttori grazie alle loro peculiari proprietà; essi sono infatti caratterizzati da una elevata sensibilità della polarizzazione al campo elettrico esterno e presentano valori di accoppiamento piezoelettrico superiori a quelli relativi agli altri cristalli piezoelettrici. Negli ultimi decenni sono state sviluppate moltissime tecnologie per la realizzazione di materiali piezoelettrici aventi elevati coefficienti di accoppiamento tra le variabili meccaniche e quelle elettriche [87]. Trasduttori molto efficienti sono stati ottenuti impiegando materiali ceramici ferroelettrici come ad esempio il titanato di bario. Tali dispositivi vengono realizzati applicando un campo elettrico ad una lastra di materiale sinterizzato a temperatura superiore a quella di Curie; abbassando progressivamente la temperatura e mantenendo costante il campo elettrico, si induce una microstruttura permanente all'interno del materiale che presenta così elevati valori di accoppiamento elettromeccanico. Esempi di tali materiali sono riportati in [94, 97]. Un'altra tipologia di materiali usati nella realizzazione di trasduttori piezoelettrici sono i materiali polime-

rici come ad esempio il fluoruro di polivinildene (PVF_2); caratteristiche piezoelettriche permanenti vengono indotte in un striscia di tale materiale estendendolo sotto l'azione di un campo elettrico esterno. Il PVF_2 è molto economico e non presenta la fragilità dei materiali cristallini o ceramici. Inoltre può essere realizzato in modo da presentare un variazione spaziale del profilo di polarizzazione; risulta quindi adatto per la realizzazione di sensori ed attuatori modali per il controllo delle vibrazioni di strutture e per il controllo del rumore irradiato [65, 1, 95, 36]. Per una più ampia descrizione delle differenti tipologie di sensori ed attuatori piezoelettrici si rimanda a [32].