

CAPITOLUL 4

TRADUCTOARE CU ULTRASUNETE

4.1 Generalități

Ultrasunetele, ca și sunetele, sunt oscilații elastice care se datorează vibrațiilor mecanice ale particulelor mediului, în jurul unor poziții de echilibru. Domeniul de frecvență al ultrasunetelor este 16 kHz ... 100 GHz.

În gaze și lichide se propagă un singur tip de unde elastice, undele longitudinale. Acestea se găsesc și în solidele ale căror dimensiuni depășesc foarte mult lungimea de undă a oscilațiilor elastice.

Generatoarele și receptoarele de ultrasunete se bazează pe efectul piezoelectric și efectul piezomagnetic.

Unii dielectrici formați din dipoli permanenți care nu au centru de simetrie (de exemplu substanțele feroelectrice) au *efect piezoelectric direct*. Dacă un astfel de cristal este supus unei deformări elastice de întindere, compresiune sau torsiune, atunci dipolii săi moleculari se rotesc și cristalul se polarizează. Ca urmare, pe fețele opuse ale cristalului apar sarcini legate care creează un câmp electric și o diferență de potențial între aceste fețe. Mărimea polarizării este proporțională cu deformația mecanică. La schimbarea sensului deformației, se schimbă și semnul polarizării. Cristalele piezoelectrice sunt cristale naturale (cuarțul, sarea Seignette - tartrat dublu de sodiu și potasiu) și cristale artificiale (metatitanatul de bariu).

Efectul piezoelectric invers apare dacă se aplică o diferență de potențial cristalului. Ca urmare a rotirii dipolilor, apare o deformație de întindere, comprimare sau torsiune. Cristalele pot fi tăiate astfel încât câmpul electric și deformația să fie reciproc perpendiculare (*efect piezoelectric transversal*) sau câmpul electric și deformația să fie paralele (*efect piezoelectric longitudinal*).

Efectul piezoelectric invers nu trebuie confundat cu *fenomenul de electrostricțiune*, care apare la dielectricii cu legături ionice (de exemplu NaCl). Rețelele ionilor pozitivi și ale celor negativi din dielectricul situat într-un câmp electric, se deplasează în direcții opuse, producând o deformare. Datorită deplasării reciproce a particulelor încărcate cu sarcini electrice de semne contrare, electrostricțiunea, spre deosebire de efectul piezoelectric, nu depinde

de sensul câmpului aplicat: deformația prin electrostricțiune depinde pătratic de câmp, în timp ce efectul piezoelectric depinde liniar de câmp.

Efectul magnetostrictiv constă în deformarea unui material feromagnetic sub acțiunea câmpului magnetic, independent de sensul acestuia și depinzând doar de mărimea câmpului și de natura materialului. Efectul este reversibil.

Materialele magnetostrictive sunt metalele feromagnetice (Ni, Co, Fe) și unele aliaje ale acestora: (permendur (75 % Co, 25 % Fe), alifer (13 % Al, 87 % Fe), hipert (50 % Ni, 50 % Fe), permalloy (40 % Ni, 60 % Fe) precum și unele ferite. Proprietățile piezoelectrice și piezomagnetice dispar când materialele respective sunt încălzite peste temperatura Curie a acestora.

4.2 Tehnici de defectoscopie ultrasonoră

În practică se întâlnesc următoarele metode de defectoscopie ultrasonoră:

1. Metoda vizualizării. Imaginea obținută prin examinarea obiectului cu ajutorul ultrasunetelor se transformă în imagine optică; după străbaterea obiectului, fasciculul ultrasonic nu mai are intensitate uniformă în toate punctele și se folosește un convertor acustico-optic pentru a obține zone luminoase sau întunecate.

Convertorul acustico-optic se bazează pe unul din următoarele efecte:

- reliefarea suprafeței unui lichid sub acțiunea combinată a presiunii ultrasonice și a gravitației,
- modificarea indicelui de refracție a luminii în lichidele supuse acțiunii ultrasunetelor,
- orientarea unor suspensii metalice în lichide, datorită ultrasunetelor și examinarea acestor orientări la iluminare oblică;

2. Metoda rezonanței ultrasonice se bazează pe formarea undelor staționare, în cazul existenței unui anumit raport între lungimea de undă a fasciculului ultrasonic și grosimea piesei examinate.

3. Metoda umbrei are la bază analogia dintre propagarea ultrasunetelor în spatele unui defect și propagarea luminii în spatele unui corp opac.

4. Metoda impulsului reflectat. Ultrasunetele emise sunt trenuri de oscilații, a căror propagare în material poate fi urmărită cu precizie. Emițătorul și receptorul de ultrasunete se fixează de o parte și de alta a piesei examinate sau ambele pe aceeași parte.

4.3. Traductoare semiconductoare cu ultrasunete

4.3.1 Unde ultrasonore în materiale solide

Cea mai importantă proprietate a undelor ultrasonore este viteza scăzută în comparație cu viteza undelor electromagnetice. Viteza ultrasunetelor în solide este de $1,5 \cdot 10^5 \dots 12 \cdot 10^5$ cm/s iar viteza ultrasunetelor în cazul senzorilor cu unde ultrasonore de suprafață (SAW – *Surface Acoustic Waves*) este de $3,8 \cdot 10^5 \dots 4,2 \cdot 10^5$ cm/s. Se observă că viteza ultrasunetelor este cu cinci ordine de mărime mai mică decât viteza undelor electromagnetice, rezultând astfel senzori de dimensiuni foarte mici.

Frecvențele fundamentale ale senzorilor cu unde ultrasonore de suprafață sunt de aproximativ 5 GHz, au suprafețe de câțiva mm² și pot fi fabricați monolitic pe același substrat împreună cu circuitele electronice necesare.

Undele elastice care se propagă în materiale solide sunt de patru tipuri:

- unde longitudinale de volum, cu viteza de fază $v = 4000 \dots 12000$ m/s,
- unde transversale de volum, $v = 2000 \dots 6000$ m/s,
- unde de suprafață (Rayleigh), $v = 2000 \dots 6000$ m/s și
- unde plate (Lamb) în două variante: simetrice, $v = 2000 \dots 12000$ m/s și antisimetrice, $v = 100 \dots 4000$ m/s.

4.3.2 Senzori semiconductori cu ultrasunete

4.3.2.1 Clasificarea senzorilor semiconductori cu ultrasunete

Există mai multe tipuri de senzori microelectromecanici cu ultrasunete din materiale semiconductoare și anume:

- cu torsionarea grosimii (TSM - *thickness shear mode*), fig. 4.1.a,
- cu unde ultrasonore de suprafață (SAW), fig. 4.1.b,
- cu unde plate de flexiune (FPW- *flexural plate waves*), fig. 4.1.c,
- cu mod plat ultrasonor (APM - *acoustic plate mode*) și tip suprafață de microtobe, fig. 4.1.d.

În cazul senzorilor cu torsionarea grosimii, TSM, frecvența de rezonanță depinde de numărul de molecule absorbite în stratul activ de deasupra.

La senzorii cu mod plat ultrasonor, APM, undele sar cu un unghi ascuțit între planele vecine ale plăcii. Din punct de vedere constructiv, arată la fel ca senzorii SAW.

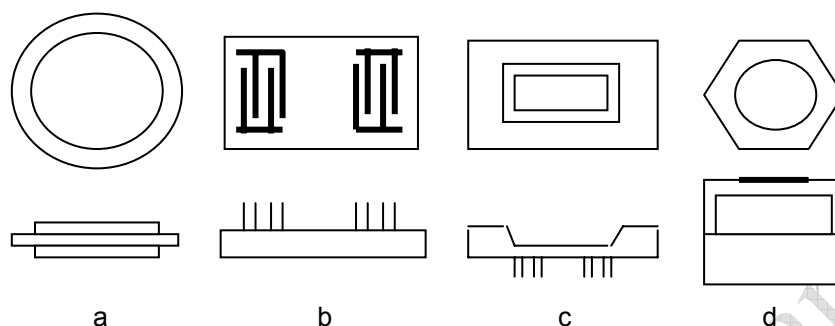


Fig. 4.1

4.3.2.2 Senzori cu unde ultrasonore de suprafață (SAW)

Se obțin prin fotolitografie, pe straturi subțiri din materiale piezoelectrice depuse pe materiale semiconductoare (ZnO pe Si sau AlN pe GaAs).

Se realizează sub formă de linii de întârziere, filtre, spirale, rezonatoare sau oscilatoare, ca senzori de gaze, accelerație, presiune, etc.

Materialele piezoelectrice folosite pentru senzorii SAW sunt: cuarț cristalin SiO_2 , cristal feroelectric artificial și straturi subțiri depuse de ZnO. Senzorii SAW din ZnO pe Si au latura de 2,5 mm și generează ultrasunete în gama 100 ... 500 MHz.

Deplasarea particulelor aproape de suprafața unui solid prin care se propagă o undă Rayleigh de suprafață are două componente: una longitudinală (înainte și înapoi, paralelă cu suprafața) și una verticală de torsiune (în sus și în jos). Suprapunerea celor două componente determină traiectorii eliptice ale particulelor suprafeței, în jurul pozițiilor de echilibru.

Undele de suprafață au cea mai mare parte a energiei localizată în una sau două lungimi de undă, ceea ce permite o interacțiune puternică și ușoară cu mediul adiacent suprafeței.

Undele Rayleigh se generează ușor, într-o mare varietate de substraturi piezoelectrice, folosind un senzor interdigitat (IDT, *interdigitate transducer*). Acesta este fabricat microlitografic, dintr-un strat subțire de metal, cu grosime 100...200 nm prin evaporare în vid, pe un substrat piezoelectric lustruit. La aplicarea unei tensiuni de radiofrecvență, senzorul generează o undă Rayleigh de suprafață în substratul piezoelectric. Lungimea de undă a unei Rayleigh de suprafață în substratul piezoelectric. Lungimea de undă a unei Rayleigh depinde de distanța dintre electrozii sensorului. Impedanța electrică a sensorului depinde de numărul electrozilor și de lungimea lor de suprapunere. Lungimea de suprapunere a electrozilor determină și adâncimea unei ultrasonore

generate. Limitele frecvențelor de lucru ale senzorilor cu unde ultrasonore de suprafață sunt de 10 MHz. ... 3 GHz..

Din punct de vedere electric, senzorul interdigitat este o încărcare capacitivă pentru sursa de tensiune de radiofrecvență și pentru a îmbunătăți transferul de putere este nevoie de o inductanță serie de cuplaj.

Senzorii cu undă ultrasonoră de suprafață tip linie de întârziere au câte un senzor interdigitat la fiecare capăt al substratului.

Un senzor interdigitat acționează ca emițător și celălalt ca receptor al energiei ultrasonore. Unda Rayleigh care se propagă interacționează cu materia de la suprafața liniei de întârziere și modifică caracteristicilor undelor (amplitudine, fază, viteză, conținutul în armonici, etc).

Senzorii interdigați sunt bidirecționali, o cantitate mare de energie fiind reflectată de muchia substratului de lângă senzor. Acest lucru provoacă un efect cunoscut sub numele de *ecou de trecere triplă*, ce se poate elimina prin aplicarea absorbanților de energie ultrasonoră (de exemplu adeziv siliconic) la capetele liniei de întârziere, sau prin tăierea oblică a capetelor, astfel ca undele ultrasonore să fie reflectate în afara axei.

O altă problemă apare când o cantitate mică de energie a undei ultrasonore de suprafață este împrăștiată în substrat și convertită în unde ultrasonore de volum, care apoi se reflectă de suprafața de jos a substratului și interferă cu unda de suprafață de sus. Acest efect se reduce ușor prin realizarea unor striiațiuni sau se folosește material absorbant pe partea inferioară a substratului, pentru a distruge coerența de fază a undelor ultrasonore de volum.

Senzorii cu unde ultrasonore de suprafață tip linie de întârziere sunt folosiți la monitorizarea variațiilor de amplitudine sau variațiilor de viteză a undelor ultrasonore.

- măsurările de amplitudine: unda Rayleigh este excitată cu o sursă de putere de radiofrecvență și se măsoară puterea undelor ultrasonore la capătul receptor al liniei de întârziere.
- măsurările de viteză: se fac indirect, cu o precizie mult mai bună dacă se utilizează linia de întârziere ca element rezonant.

În fig. 4.2 este prezentată schema de măsurare a variațiilor de viteză pentru undele ultrasonore, folosind linia de întârziere.

Schema conține un amplificator de putere de RF legat în buclă cu senzorul SAW tip linie de întârziere. Sistemul oscilează pe frecvența de rezonanță a senzorului interdigitat, oscilațiile având loc doar când câștigul amplificatorului este mai mare decât pierderile liniei de întârziere.

Frecvența de rezonanță a traductorului se modifică datorită variațiilor vitezei undelor Rayleigh și se poate măsura cu acuratețe cu un frecvențmetru numeric.

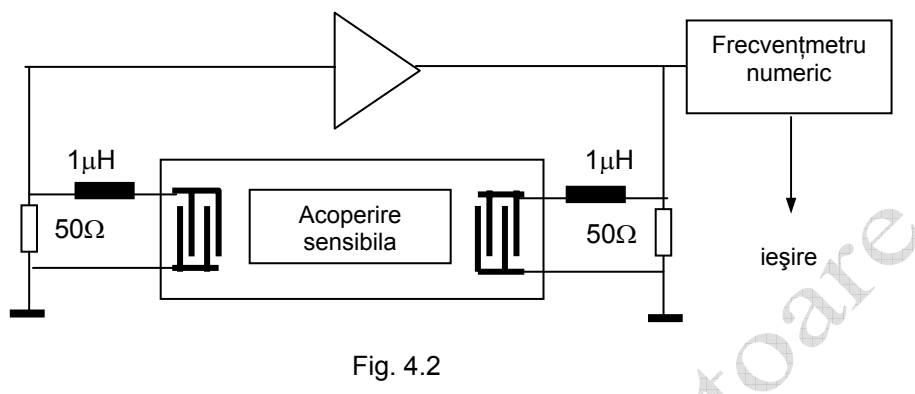


Fig. 4.2

4.3.2.3 Senzori cu unde ultrasonore plate de flexiune (FPW)

Senzorii de acest tip au o membrană nepiezoelectrică din Si îmbogățit și nitrat de Si pe care se depune ZnO, fig. 4.1.c. Dacă grosimea membranei este mult mai mică decât lungimea de undă, modul de flexiune cu ordinul cel mai scăzut se va propaga în membrană cu o viteză de fază de sute de m/s, mai mică decât viteza ultrasunetelor în majoritatea lichidelor (viteza ultrasunetelor în apă la 25°C este 1480 m/s).

Când membrana intră în contact cu un fluid nevâscos ideal, unda de flexiune produce doar o perturbație în fluid la suprafața membranei și nu se radiază energie din membrană în fluid.

Senzorii cu unde ultrasonore plate de flexiune (FPW) se folosesc în următoarele tipuri de aplicații:

- ca senzori gravimetrice (variația masei datorită absorbției unor vapori);
- ca senzori de vâscozitate;
- ca senzori pentru microdebit;
- în micropompe, micromixere, etc.