

CAPITOLUL 11

TRADUCTOARE MAGNETICE

11.1 Senzori de câmp magnetic

Măsurarea câmpului magnetic este necesară pentru a detecta prezența obiectelor mari feromagnetice care schimbă distribuția câmpului magnetic. Curenții din circuitele electrice generează câmpuri magnetice proporționale. Astfel, se pot măsura indirect curenții electrici prin măsurarea câmpurilor magnetice.

Detecția variațiilor de câmp magnetic are utilizări în industria minieră, pilotarea automată a aparatelor de zbor, detectarea și localizarea aparatelor de zbor, vehiculelor, submarinelor, navelor, etc. În multe cazuri, navele de detectat au o semnătură magnetică diferită de a altora, putându-se astfel distinge cu ușurință. Amplitudinea câmpului magnetic depinde de distanță, făcând posibilă localizarea și urmărirea. Fenomenul are aplicații în controlul traficului autostrăzilor, porturilor și aeroporturilor evoluat, prin dispunerea unor suprafețe de traductoare de câmp magnetic în zonele de interes.

Senzorii de câmp magnetic funcționează pe baza forței Lorentz exercitată asupra electronilor care se mișcă în metale, semiconductoare sau izolatoare:

$$F = -qv \times B$$

unde q este sarcina electronului, v este viteza electronului, iar B este inducția magnetică ce acționează asupra purtătorilor de sarcină și determină răspunsul sensorului. Deoarece $B = \mu\mu_0 H$, răspunsul sensorului este amplificat de permeabilitatea relativă mare.

În funcție de valoarea permeabilității magnetice, senzorii sunt de două tipuri:

- senzori feromagnetici sau ferimagnetici, cu $\mu \gg 1$ și sensibilitate mare; exemple: senzorii bazați pe magnetorezistență din straturi subțiri de NiFe, magnetostricțiunea învelișului de Ni a unei fibre optice sau efectele magneto-optice în granate, senzori combinați cu dispozitive concentratoare de flux;
- senzori diamagnetici sau paramagnetici, cu $\mu \approx 1$ și sensibilitate mică; exemple: dispozitive Hall, senzori Hall cu tranzistoare TECMOS sensibile la câmp magnetic, structuri Hall heterojoncțiune, magnetotranzistoare, magnetodiode, magnetorezistoare, magnetometre cu fibră optică.

11.2 Senzori de câmp magnetic cu strat subțire metalic

Sunt realizați din materiale feromagnetice, cei mai utilizați fiind din aliaj cu magnetostucțiune mică $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ (permalloy). Cel mai reprezentativ este senzorul magnetorezistiv din straturi anizotropice NiFe sau NiCo.

Straturi cu magnetorezistență gigant

Sunt straturi care, sub acțiunea unui câmp magnetic își modifică rezistența cu 10...20%. Mai multe straturi magnetice sunt separate de un strat nemagnetic. Datorită împrăștierii electronilor de conducție, rezistența este maximă ($< 10 \text{ M}\Omega$) atunci când momentele magnetice ale straturilor sunt antiparalele și minimă ($> 5 \Omega$) când straturile sunt paralele.

Structurile folosite în straturile cu magnetorezistență gigant sunt de trei tipuri:

- în sandwich;
- supape de spin antiferomagnetice;
- multistraturi antiferomagnetice.

În structurile cu tunelare cu magnetorezistență gigant, cele două straturi magnetice sunt separate de un strat izolator. Conducția se datorează tunelării cuantice prin izolator. Mărimea curentului de tunelare dintre cele două straturi magnetice este modulată de direcția vectorilor de magnetizație în cele două straturi. Calea de conducție trebuie să fie perpendiculară pe planul materialului cu magnetorezistență gigant, deoarece există o diferență mare între conductivitatea căii de tunelare și aceea a oricărei căi din plan.

Dispozitivele cu tunelare au dimensiuni de câțiva μm , sunt realizate prin fotolitografie și dau o variație a rezistenței de 10...30 %. Câmpurile magnetice de saturație depind de compoziția straturilor magnetice și de metoda de obținere a alinierii paralele sau antiparalele. Valorile câmpului magnetic de saturație sunt în gama 0,1 kA/m... 10 kA/m. Din acest motiv, acești senzori sunt foarte sensibili. Stratul de tunelare permite realizarea senzorilor cu rezistență electrică mare și alimentare de la baterii (folosiți în aplicații portabile).

Structurile tip sandwich conțin două straturi magnetice moi, din aliaje de Fe, Ni și Co, separate de un strat conductor nemagnetic (Cu). Cuplajul magnetic este slab. Straturile sunt realizate sub formă de benzi; câmpul magnetic ce trece de-a lungul benzii, rotește straturile magnetice antiparalele.

Un câmp magnetic extern, paralel cu banda, produce aceeași variație a rezistenței. Câmpul magnetic perpendicular pe bandă are efect mic datorită câmpurilor de demagnetizare asociate cu dimensiuni mici ale obiectelor magnetice.

Multistraturile antiferomagnetice au mai multe interfețe decât tipurile sandwich și deci variația rezistenței este mai mare. Structurile tip supape antiferomagnetice seamănă cu cele tip sandwich.

Straturile subțiri cu magnetorezistență gigant depuse pe substraturi de Si pot fi configurate ca rezistoare, perechi de rezistoare sau punte Wheatstone. Dimensiunile și cerințele de putere de alimentare reduse le fac utile în aplicații de detecție a câmpurilor magnetice mici, sub formă de suprafețe de senzori.

Straturi anizotropice convenționale cu magnetorezistență

Senzorii folosesc efectul magnetorezistiv, definit prin proprietatea unui material magnetic prin care trece un curent electric de a-și schimba rezistivitatea în prezența unui câmp magnetic extern. Schimbarea are loc prin rotirea magnetizării față de direcția curentului.

La permalloy, o rotație cu 90° a magnetizării datorită aplicării unui câmp magnetic perpendicular pe direcția curentului, produce o variație a rezistivității de 2... 3 %.

Rezistivitatea depinde neliniar de câmpul magnetic.

Magnetometru cu flux poartă

Magnetometrele sunt dispozitive care determină prezența unui câmp magnetic, mărimea și direcția aceluși câmp. Sunt utilizate la realizarea busolelor numerice.

Un senzor de câmp magnetic este cuplat la un circuit integrat specific aplicației (ASIC), combinația constând din două bobine neliniare cu circuite de comandă echilibrate, controlul în curent a variațiilor vitezei de creștere și o metodă de măsurare a ieșirii senzorilor. Se folosește un singur circuit pentru comanda și monitorizarea ambilor senzori. Un circuit numeric urmărește în orice moment care senzor este accesat și memorează datele în registrul corespunzător. Cu un circuit de test, convertorul analog-numeric monitorizează continuitatea bobinei senzor. Semnalul de ieșire este sub forma unor coduri de eroare, pe care un procesor central le transmite pentru afișare.

Combinația senzor - ASIC elimină parțial procesările analogice complexe. Circuitul ASIC are cerințe scăzute de putere electrică, putând fi alimentat de la baterie. Nu este necesară procesarea tensiunilor sau curenților de nivel mic prin amplificatoare de câștig mare, integratoare sau filtre analogice. Toate decalajele și zgomotele sunt corectate numeric. Sensibilitatea se ajustează cu registre numerice și nu cu rezistoare sau condensatoare de fixare analogică a câștigului.

Circuitul ASIC se interfațează cu o clasă specială de bobine neliniare, care au proprietatea de a-și schimba inductanța în prezența variațiilor mici ale câmpului magnetic. El nu necesită bobine separate senzor și de comandă, ambele funcții fiind implementate într-o singură bobină.

Circuitul ASIC poate comanda două bobine, orientate perpendicular una pe cealaltă, permițând detecția unei unde sinus și a unei unde cosinus.

11.3 Senzori de câmp magnetic cu semiconductoare

Senzorii de câmp magnetic cu semiconductoare sunt flexibili în proiectare și aplicații, au dimensiuni mici, sunt robuști și au ieșire în semnal electric.

Sunt fabricați din Si sau materiale semiconductoare în amestec, din grupele III-V. Sunt ieftini deoarece sunt realizați în tehnologia circuitelor integrate. Dispozitivele includ elemente Hall de volum și cu strat de inversiune, magnetotranzistoare, magnetodiode și magnetometre. Anumiți senzori cu semiconductoare III-V au rezoluție magnetică superioară dispozitivelor comparabile din siliciu datorită mobilității mai mari a purtătorilor. Materialele semiconductoare din grupele III-V sunt folosite sub forma dispozitivelor Hall și a celor magnetorezistive.

11.3.1 Senzori Hall

Placa Hall ideală

Placa Hall este o placă subțire, dreptunghiulară, din material cu rezistivitate mare, prevăzută cu patru contacte ohmice, fig. 11.1.

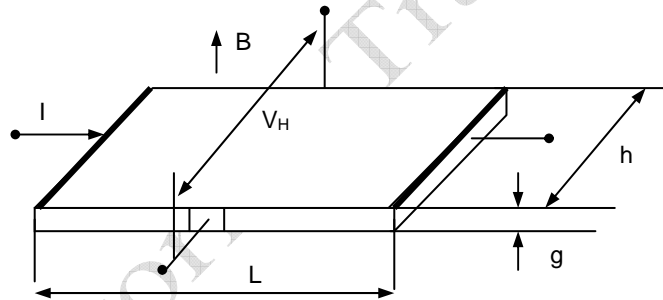


Fig. 11.1

Tensiunea Hall, notată prin V_H este proporțională cu inducția magnetică B perpendiculară și curentul de polarizare I :

$$V_H = R_H BI \frac{G}{g} = -\frac{GIBr_n}{qng}$$

Factorul geometric de corecție G depinde de lungimea L , lățimea h , mărimea și poziția contactelor electrice și unghiul Hall, notat θ_H . Pentru o placă de lungime infinită, $G \approx 1$. Placa Hall se poate realiza din Si n uniform, cu rezistivitatea de $1 \Omega\text{cm}$, la temperatura camerei.

Pentru senzorul Hall se definesc trei sensibilități:

- Sensibilitatea absolută, care este factorul de conversie pentru semnale

mari: $S_A = \left| \frac{V_H}{B} \right|$; raportul între sensibilitatea absolută a unui senzor Hall modulat

și mărimea de polarizare (curent sau tensiune) dă sensibilitatea relativă.

- Sensibilitatea relativă de curent este: $S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{V_H}{BI} \right|$ iar

- Sensibilitatea relativă de tensiune este: $S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{V_H}{BV} \right|$.

Senzori Hall integrați de volum

a) Senzori Hall integrați orizontal

Au fost realizați prima dată de Bosch, în anii '70. O placă Hall integrată orizontal este realizată prin creștere epitaxială n, pe un substrat p, într-un proces tehnologic pentru circuite integrate bipolare din Si. Izolarea plăcii Hall de restul cipului se face cu joncțiuni p-n polarizate invers. Se preferă semiconductor tip n ca material activ, datorită sensibilității relative de tensiune mai mari. Pe lângă senzorul Hall, în același circuit se realizează circuitele de stabilizare și amplificare. Acești senzori sunt sensibili la vectori de inducție magnetică B perpendiculari pe suprafața senzorului.

Se realizează și comutatoare Hall, pentru aplicații unde este necesară numai ieșire logică; acestea au un trigger Schmitt pentru controlul etajului de ieșire.

De asemenea, pentru realizarea senzorilor Hall integrați se folosește și GaAs datorită mobilității mai mari de peste cinci ori a electronilor decât la Si și datorită temperaturilor de funcționare mai mari.

b) Senzori Hall integrați vertical

Sunt sensibili la vectori inducție magnetică B paraleli cu planul senzorului. Structura este realizată în tehnologie CMOS, astfel încât toate contactele electrice necesare sunt la partea superioară. Regiunea activă a dispozitivului este un substrat n iar regiunea izolatoare inelară este de tip p, realizată prin difuzie (joncțiune p-n polarizată invers).

c) Senzori Hall integrați cu amplificator diferențial

Sunt compuși dintr-o placă Hall orizontală tip n și două tranzistoare bipolare p-n-p ce formează o parte din amplificatorul diferențial. Stratul de Si tip n de la

partea superioară este și placa Hall și regiunea de bază comună pentru cele două tranzistoare. Funcționarea se bazează modularea purtătorilor minoritari injectați de câmpul Hall produs de curentul purtătorilor majoritari din bază.

d) Senzori Hall integrați cu tranzistoare cu efect de câmp

Suprafața stratului de inversiune sau canalul unui tranzistor TECMOS poate fi folosită ca regiune activă a unui senzor Hall. Aceste dispozitive sunt prescurtate MAGFET, existând două variante: Hall MAGFET și MAGFET cu drenă duală.

La senzorii Hall MAGFET, canalul se folosește ca placă Hall subțire. MAGFET folosit în regiunea liniară este similar cu o placă Hall de volum. Sensibilitatea relativă de curent este de sute V/AT . Se realizează în tehnologie NMOS, cu poartă din polisiliciu. Se folosesc drept comutatoare fără contact, pentru tastaturi.

MAGFET cu drenă duală are regiunea de drenă împărțită în două. Inducția magnetică perpendiculară pe stratul de inversiune produce un curent de dezechilibru $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ între cele două drene. Un MAGFET cu drene duală integrat cu un oscilator controlat în curent formează un oscilator controlat de câmpul magnetic. Frecvența sa variază liniar cu inducția magnetică în jurul unei frecvențe centrale. O altă variantă de senzor MAGFET cu drene duală este MAGFET dublu cu drenă duală, cu o pereche de MAGFET cu drenă duală dispuse în configurație de amplificator diferențial CMOS.

e) Senzori Hall integrați cu heterojuncțiuni

Regiunea activă este un strat dreptunghiular foarte subțire, localizat într-o heterojuncțiune (AlGa)As/GaAs. Poate detecta câmpuri magnetice foarte scăzute, de exemplu 2 nT, la frecvența de 1 kHz.

Varianta cu contact dual la regiunea activă are o sensibilitate de 48 %/T, la temperatura camerei.

11.3.2 Magnetotranzistoare (MT)

Sunt tranzistoare bipolare proiectate astfel încât curentul de colector este modulat de câmpul magnetic. În funcție de geometria MT, se pot detecta câmpuri magnetice paralele sau perpendiculare la planul cipului. Multe MT au structură duală de colector.

La câmp magnetic zero, funcționarea lor este simetrică în raport cu cele două colectoare, curenții de colector fiind egali. În prezența unui câmp magnetic, forța Lorentz creează o asimetrie a distribuției de potențial și de curent, rezultând un dezechilibru al curenților de colector. MT sunt realizate în tehnologie CMOS.

Magnetotranzistoarele (MT) se împart în două grupe:

- MT pentru o singură dimensiune, notate ID, care măsoară amplitudinea câmpului magnetic perpendicular pe planul cipului (MT laterale) sau

- paralel la planul cipului (MT verticale, MT laterale și MT cu injecție suprimată prin pereții laterali);
- MT tip sondă vectorială, care măsoară amplitudinea și direcția vectorului inducție magnetică în două dimensiuni (vectorul B este paralel cu planul structurii) sau 3D.

11.3.3 Magnetodiode (MD)

Concentrația de purtători printr-o placă semiconductoare intrinsecă, parcursă de curent și expusă unui câmp magnetic este modulată de efectul de magnetoconcentrare. Magnetodiodele (MD) folosesc acest efect în combinație cu fenomenele de dublă injecție și de recombinare la suprafață. Electronii și golurile injectate de contactele de capăt ale plăcii semiconductoare sunt deviați de forța Lorentz spre aceeași suprafață, unde se recombina. Datorită variației concentrației de purtători, magnetodiodele sunt lente, frecvența limită superioară fiind 10 MHz.

Structura unei magnetodiode cuprinde o placă semiconductoare slab dopată n^- cuprinsă între două zone subțiri p^+ și n^+ .

Există magnetodiode discrete din Si, Ge sau GaAs. Prima magnetodiodă integrată a fost realizată în tehnologia circuitelor integrate din siliciu pe safir. Ea funcționează pe baza vitezei mari de recombinare a interfeței Si/Al₂O₃ și a vitezei mici de recombinare a interfeței Si/SiO₂.

În aplicații, sunt preferați senzorii realizați în tehnica CMOS. Se obține astfel o structură asemănătoare unui tranzistor bipolar, dar a cărei funcționare este a unei magnetodiode. O joncțiune p-n polarizată invers funcționează ca interfață cu recombinare mare.

Sensibilitatea unei asemenea magnetodiode CMOS este de 5 V/mAT, la curenți de polarizare de câțiva mA.

11.4 Senzori optoelectronici de câmp magnetic

Acești senzori folosesc radiația optică drept semnal purtător intermediar. Senzorii magneto-optici se bazează pe rotația Faraday a planului de polarizare a radiației optice polarizate liniar.

Sunt realizați din bobine de fibre optice, cu o cale lungă a radiației optice și corespunzător, o rotație mare pe unitatea de câmp magnetic. Astfel, au fost realizați senzori de curent magneto-optici pentru liniile de transmisie de înaltă tensiune. Efortul transferat fibrei din materialul magnetostrictiv are ca efect o variație a lungimii căii optice, ce determină o deplasare de fază, detectată cu interferometrul cu fibră optică.

11.5 Senzori superconductori de câmp magnetic

Sunt de două tipuri:

- dispozitivele superconductoare cu interferență cuantică (SQUID);
- supermagnetorezistoarele.

Dispozitivul superconductor cu interferență cuantică este un magnetometru de mare rezoluție, pentru gama pT. El exploatează efectele galvanomagnetice mecanice cuantice care au loc în joncțiunile Josephson între materiale superconductoare, de exemplu Nb / AlO₃ / Nb, la temperaturi suficient de scăzute (sub 20 K). Folosind tehnici cu straturi subțiri, SQUID poate fi integrat într-un singur substrat, împreună cu o bobină de intrare superconductoare din niobiu și circuitele de conversie de semnale.

Supermagnetorezistoarele funcționează la temperatura azotului lichid (77 K) și răspund la câmpuri magnetice mici, cu inducție magnetică sub 10 mT. Se bazează pe faptul că un câmp magnetic slab rupe superconductivitatea unui eșantion de ceramică granulară Y-Ba-Cu-O, prin creșterea rezistenței între granulele superconductoare. Se obține astfel o variație abruptă a rezistenței eșantionului cu câmpul magnetic. Straturile de ceramică se realizează în meandre, prin piroliză și evaporare.