



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet
és
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

11. ELŐADÁS: MÁGNESES ÉRZÉKELŐK I

2008/2009 tanév 1. félév

1

11. ELŐADÁS:

1. Mágneses tér mérése, mágneses térerősség (H) és mágneses indukció (B), mértékegységek.
2. Fizikai működési elvek. Hall-effektus, Hall-érzékelő, magnetorezisztor, óriás mágneses ellenállásváltozás (giant magnetoresistance, GMR).
3. Mágneses érzékelők alapanyagai (félvezetők, szilícium (Si), gallium-arszenid (GaAs), indium-antimonid (InSb), kobalt-réz-vas (Co-Cu-Fe) multi-réteg szerkezetek, stb.).
4. Hall-, magnetorezisztor-, GMR-érzékelők, gyakorlati típusok és mérőáramkörök. Mágneses térre érzékeny tranzisztorok, MAGFET, vertikális- és laterális- (bipoláris) magnetotranzisztor. Mikroelektronikai integrált érzékelők.
5. Alkalmazási példák. Lineáris elmozdulás és pozíció, távolság, szögelfordulás és szöghelyzet. Beavatkozás nélküli áramérzékelés és mérés. Mágneses érzékelők gépkocsikban².

MÁGNESES ÉRZÉKELŐK

Mágneses érzékelő: kétféle típusú lehet.

1. Közvetlenül érzékelhet egy mágneses teret (direkt alkalmazás), pl. mint egy magnetométerben a Föld mágneses terét, vagy egy adattároló készülékben az adathordozó (mágneses lemez, szalag, kártya, stb.) lokális mágneszettségét.
2. A mágneses tér mint közvetítő eszköz szolgál nem-mágneses jelek érzékelésre (indirekt alkalmazás) mint pl. lineáris- vagy szöghelyzet, elmozdulás és sebesség érzékelés permanens mágnesekkel kontaktusmentes módon, vagy áramérzékelés a mágneses tere révén, stb.

3

MÁGNESES ÉRZÉKELŐK

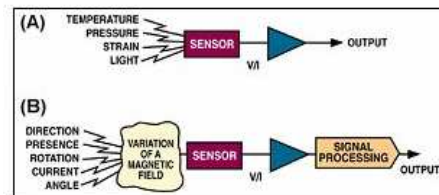


Figure 1. Conventional sensors detect a physical property directly (A); magnetic sensors detect changes in magnetic fields and from them derive information on physical properties (B).

4

DIREKT ALKALMAZÁSOK

- Információ kiolvasása mágneses adathordozóról (mágneses lemez, szalag vagy buborékmemória)
- Mágneses mintázat felismerése bankjegyeken vagy bankkártyákon
- Magnetometria: mágneses készülékek vezérlése mint pl. klasszikus vagy szupravezetős elektromágnesek, részecskegyorsítók mágnesei, továbbá a vektoriális mágneses terek meghatározása két-vagy három komponens detektálásával
- Mágneses levitáció (MAGLEV) vezérlése és szabályozása
- Föld mágneses terének mérése, elektronikus iránytű
- Geomágneses távérzékelés geológiai és vulkanikus felmérésekhez

5

DIREKT ALKALMAZÁSOK

- Mesterséges holdak helyzet szabályozása
- Repülőgépek, hajók, tengeralattjárók, rakéták és lövedékek pozicionálása a geomágneses térre kifejtett perturbáló hatásuk révén, valamint a globális navigációs rendszer kifejlesztésére
- Biomagnetometria: diagnosztikus adatok gyűjtése a kardiomágnesesség, miómagnesesség és a neuromágnesesség révén a célból, hogy a szív, az izmok, az idegek és az agy működését feltérképezzék (emberek és állatok)

6

INDIREKT ALKALMAZÁSOK

- Távolság/elmozdulás (lineáris, szög), sebesség és rezgés mérés
- Helyzetérzékelés
- Forgás és forgásirány érzékelés (tachometria)
- Kollektor nélküli DC motorok
- Billentyűzet és közelség (proximity) kapcsolók
- Mikrofonok
- Lineáris és forgó potencióméterek, forgó tengely szöghelyzet indikálás, gépkocsi gyújtásvezérlés
- Gépkocsi ASB (anti-skid breaking)
- Roncsolásmentes mágneses anyagvizsgálat, fémdetekálás

7

INDIREKT ALKALMAZÁSOK

- Villamos áram- és teljesítménymérés (kWh számlálók) a vezeték megszakítása nélkül
- Analóg szorzás
- Galvanikus elválasztás
- Járműérzékelés (ferromágneses test elhaladása)
- Mechanikai, kémiai, stb. jellemzők mérése, permanens mágneseket tartalmazó mágneses modulációs rendszerekben

8

MÁGNESTÉR ÉRZÉKELŐK CSOPORTOSÍTÁSA

Lehetséges és szokásos csoportosítás, illetve elnevezések

Vektor (komponens)
Skalár (abszolút érték) érzékleők

Kis terek ($B < 1$ mT) **magnetométer**
Nagyterek ($B > 1$ mT) **gaussméter**

9

MÁGNESTÉR ÉRZÉKELŐK CSOPORTOSÍTÁSA

MÁGNESTÉR SZENZOROK

$B < 1$ mT
MAGNETOMÉTEREK

$B > 1$ mT
GAUSSMÉTEREK

VEKTOR	SKALÁR	
Mérőtekerecs	Proton	Hall effektus
Fluxgate szenzor	precesszió	Magnetorezisztív
SQUID	Optikai	Magnetodioda
Magnetorezisztív szenzor	pumpálás	Magnetotranzisztor
Szál-optikai szenzor		

10

MAGNETOMÉTEREK

Az indukciós tekerecs és a fluxgate szenzor magnetométerek a legelterjedtebb vektor mágneses témérők. Robusztusak, megbízhatóak, relatíve olcsók.

A száloptikai magnetométer új fejlesztés (2000 körül még laboratóriumi stádiumban).

A szupravezető kvantum interferométer magnetométerek (**SQUID**, **S**upraconducting **Q**uantum **I**nterference **D**evice), mely a Josephson-effektuson alapul, a legérzékenyebbek az összes mágneses szenzor közül.

Az abszolút zérus hőmérséklet közelében működnek, speciális hűtőelrendezést igényelnek. A SQUID-ek drágábbak, kevésbé robusztusak és megbízhatóak.

11

SQUID

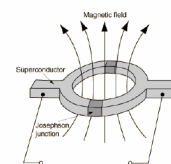
Szupravezető kvantum interferencia

Alkalmazás mágneses tér érzékelésére: Josephson-átmenet

$$I_c = I_{c0} \frac{\sin(\pi \cdot \Phi / \Phi_0)}{\pi \cdot \Phi / \Phi_0}$$

ahol Φ a mágneses fluxus és Φ_0 ennek kvantuma, a fluxon ($=h/2e$)

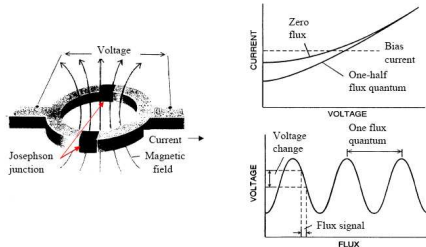
- Megvalósítása:
- Nb/Al/AIO_x/Nb
 - MHS:
 - YBCO
 - BSCOO



12

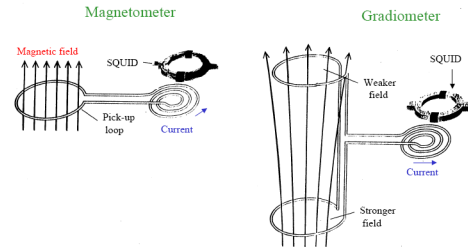
SQUID

SQUID FLUX-TO-VOLTAGE CONVERSION



3

COUPLING FLUX TO A SQUID



14

GAUSSMÉTEREK

A Hall szonda a legrégebb és a legtöbbször használt vektor mágneses tér érzékelő. Igen jól használható nagy terek ($B > 1$ T) esetén.

A magnetorezisztív szenzorok átfedik a kis- és nagy terek tartományait. Az anizotróp mágneses ellenállásváltozási szenzorok (AMR, Anisotropic MagnetoResistance) jelenleg terjedtek, még magnetometerekben is. Új felfedezés az óriás mágneses ellenállásváltozási effektus (GMR, Giant MagnetoResistance), egyébként ez volt a 2007-évi fizikai Nobel-díj, ma ez fő érzékelő a mágneses lemezek (hard disk) leolvasófejeiben.

15

SKALÁR MAGNETOMÉTEREK

A proton-(nukleáris-) precessziós magnetométer a legelterjedtebb skaláris teret mérő eszköz. Fő alkalmazásai: geológiai és geofizikai mérések és feltárások, valamint a geomágneses tér (légi) feltérképezése. Működése fundamentális természeti állandó értékén alapul (proton giromágneses hányadosa, azaz a proton mágneses nyomatékának és spinjének hányadosa)

$$\gamma = (2,6751526 \pm 0,0000008) \times 10^8 \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$$

$$\omega_p = \gamma B$$

(1 Tesla \rightarrow 42,6 MHz).

Elsődleges standardnak, illetve kalibrációs célokra is használják.

16

MÉRÉSI TECHNIKÁK ÖSSZEHASONÍTÁSA

Eszköz	B tartomány (mT)	Feloldás (nT)
Tekerics	10^{-10} - 10^6	változó
Fluxgate	10^{-4} -0,5	0,1
SQUID	10^{-9} -0,1	10^{-4}
Hall effektus	$0,1$ - 3×10^4	100
MR	10^{-3} -5	10
Proton precesszió	0,02-0,1	0,05
Optikai pumpálás	0,01-0,1	0,005

17

MÁGNESES TEREK NAGYSÁGA

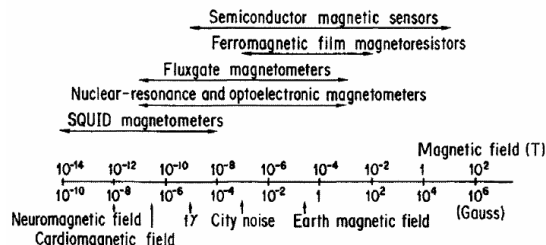
Jelenség, mágneses tér forrása

Mágneses indukció (Tesla)

Biológiai / élő rendszerek	Pico- és nanotesla
Geomágneses tér	$(30-60) \times 10^{-6}$
Mágneses adattárolók	0,001
Vezető felszínén ($r = 1-2$ mm, 10 A)	0,001-0,002
Permanens mágnes (kapcsolók)	0,005-0,1
Permanens mágnes, ferrit	0,3 (max)
Permanens mágnes, Alnico, SmCo,	0,4-0,8 (max)
Vasmagos transzformátor	0,9-1
Vas telítési mágnessétség	2,1
Szupravezető tekerics ($T = 2-4$ K)	10-20
Rezisztív mágnes	28-30
(50 mm dia szabad tér, 22-25 MW táplálás)	
"Lassú" impulzus (~msec)	30-60
"Gyors" impulzus (~µsec)	50-100
"One-shot"	100-200
Fluxus kompresszió	> több száz

18

SZENZOROK ÉRZÉKELÉS TARTOMÁNYA



19

MÁGNESÉG: ALAPFOGALMAK

Vákuumban

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

Anyag jelenlétében

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

\mathbf{M} - térfogategységre eső mágneses dipólmomentum (dimenziója $\text{Am}^2/\text{m}^3 = \text{A/m}$) azaz mágnesezettség

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

χ_m - mágneses szuszceptibilitás

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

20

MÉRTÉKEGYSÉGEK

Mágneses egységek mindig gondot okoztak és okoznak ma is ...

A cgs (Gauss) rendszer sokáig volt használatban. Ebben $\mu_0 = 1$ és így \mathbf{H} és \mathbf{B} numerikusan azonosak vákuumban (és gyakorlatilag levegőben), és egységeiket (Oersted a téré, Gauss a fluxussűrűsége) gyakran össze-vissza felcserélik. Ez nagy kavarást okozott és okoz néha ma is.

Ma: SI rendszer

21

MÉRTÉKEGYSÉGEK

Unit System	Magnetic Induction B	Magnetic Field H
SI ⁽¹⁾ units	Tesla: 1 T = 1 Vs/Am ²	A/m
Older units	Gauss: 1 G = 10 ⁻⁴ T	Oersted: 1 Oe = 10 ³ /4 π A/m

Conversion Table for Common Magnetic Units

	mT (Tesla)	G (Gauss)	kA/m	Oe (Oersted)
1 mT	= 1.0000	= 10.000	= 0.7960*	= 10.000*
1 G	= 0.1000	= 1.0000	= 0.0796*	= 1.0000*
1 kA/m	= 1.2560*	= 12.560*	= 1.0000	= 12.560
1 Oe	= 0.1000*	= 1.0000*	= 0.0796	= 1.0000

* in free air

LORENTZ ERŐ

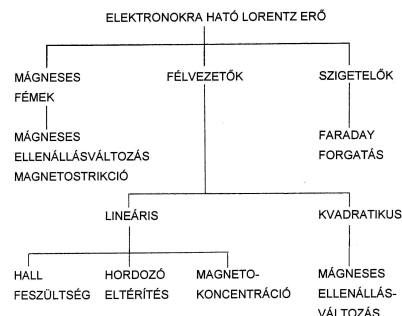
A legtöbb mágneses szenzor a Lorentz erőt használja ki

$$\mathbf{F} = -q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

mely az anyagban (fém, félvezető vagy szigetelő) mozgó elektronra hat. Bár a \mathbf{H} mágneses térerő az érzékelendő mennyiség, a \mathbf{B} mágneses indukció mely az erőhatást leírja, és ez határozza meg a szenzor választását.

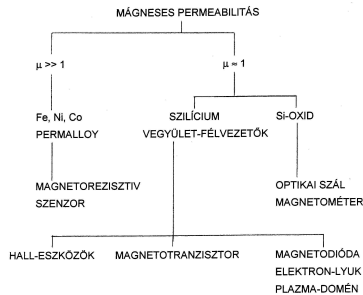
23

LORENTZ ERŐ ÉS ÉRZÉKELÉS



24

MÁGNESES SENZOR SZERKEZETEK



25

MÁGNESES SENZOR SZERKEZETEK

A $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$ összefüggés alapján a szenzor válasza nagy relatív permeabilitás esetén megnő. Ennek alapján a szenzorok két nagy csoportra oszthatók.

Szenzorok, melyekben nagy permeabilitású anyag kerül alkalmazásra (ferro- vagy ferrimágneses anyag, $\mu_r \gg 1$), mely a permeabilitás arányában megnöveli az érzékenységet, pl. NiFe vékonyréteg mágneses ellenállásváltozási szenzor, optikai szálakon elhelyezett ferromágneses) nikkal bevonat mely magnetostríkciónak hatással bír, illetve bármely szenzor, melyben fluxus koncentrátor kerül alkalmazásra.

Kis relatív permeabilitás ($\mu_r \approx 1$) esetén nincs ilyen jellegű erősítés. Pl. az összes, a galvanomágneses jelenségeken alapuló szenzor ebbe az osztályba tartozik.

26

GALVANOMÁGNESES EFFEKTUSOK

A mágneses érzékelő működése gyakran valamely galvanomágneses effektuson (Hall jelenség, mágneses ellenállás-változás) alapul.

A mágneses térerősség \mathbf{H} dimenziója A/m , a vele összefüggő mágneses indukció (\mathbf{B} , fluxus-sűrűség) dimenziója pedig Vs/m^2 (Tesla). Mivel a töltéshordozó-mozgékonyosság (μ) dimenziója ennek éppen reciproka, azaz m^2/Vs , ezért a $\mu\mathbf{B}$ szorzat dimenzió nélküli szám, és ez jellemzi a galvano-mágneses hatások erősségét és egyben a szenzorok relatív érzékenységét.

Általában nagy töltéshordozó-mozgékonyosság és alacsony töltéshordozó-koncentrációk esetén erősek a galvano-mágneses hatások, ez az oka, hogy az ilyen szenzorok anyaga félvezető és nem fém.

27

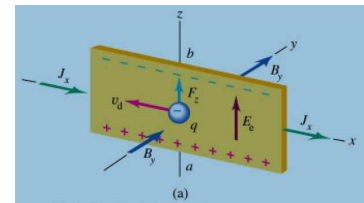
A HALL EFFEKTUS

Ha egy vezetőben vagy félvezetőben áram folyik, és azt mágneses térbe helyezzük, akkor a vezetőben mozgó elektronokra ható Lorentz-erő miatt a vezető két oldalán potenciálkülönbség lép fel, ez a Hall-feszültség.

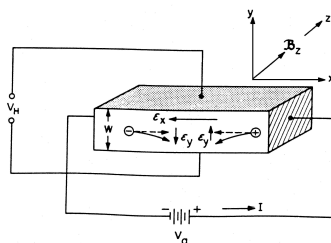
A jelenség jól keskeny mintában lép fel, ahol a töltéshordozók a hossziránnyal párhuzamosan mozognak az ez irányban kapcsolt feszültség hatására. A vékony minta síkjára merőleges mágneses térben keresztirányú elektromos erőter is kialakul, ami kompenzálja a mágneses mezőben haladó töltéshordozókra ható Lorentz-erőt. A Hall feszültség:

$$U_H = \frac{R_H I B}{t}$$

t a minta vastagsága, R_H a Hall-állandó.



A HALL ELEKTROMOS TÉR



p-típusú mintában a lyukak sebessége $-x$ irányú, a lyukakra ható $\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ Lorentz erő iránya $-y$, és lefelé téríti el a lyukakat.

A lyukak az alsó lapon felhalmozódva egy $+y$ irányú elektromos teret hoznak létre. Mivel az y irányban nem folyik áram, az y irányú tér (a Hall tér) egyensúlyt tart a Lorentz erő terével, $E_y = v_x B_z$. Ekkor $E_y = V_y/w = V_H/w = R_H i_x B_z$, és a Hall állandó $R_H = 1/ep$.

29

FÉLVEZETŐK MÉRÉSE

A fizikai modell szerint a vezető-képesség, illetve a fajlagos ellenállás

$$\sigma = \rho^{-1} = e n \mu$$

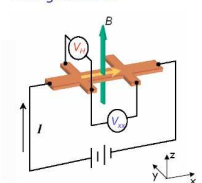
A Hall állandó

$$R_H = 1/e n$$

A fajlagos ellenállás és a Hall állandó mérésével a félvezetők két alapvető paramétere, a töltéshordozók koncentrációja és mozgékonyága meghatározható.

A Hall-mérés alapvető félvezető-fizikai és technikai mérés

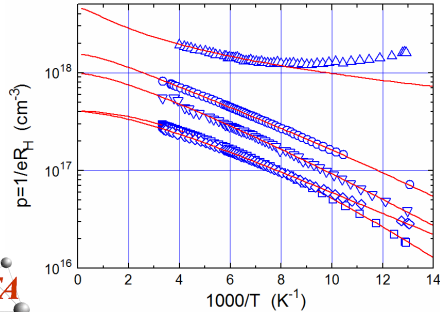
Hall-geometria



30

P-TÍPUSÚ InP: LYUKKONCENTRÁCIÓ A HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN

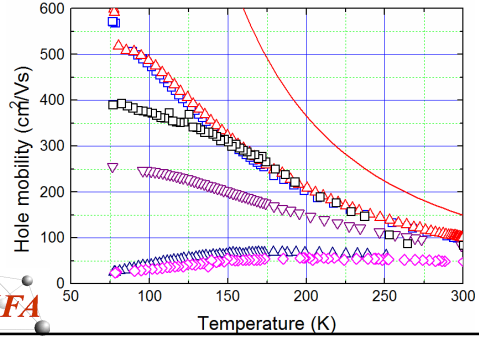
InP hole concentration: measured data and theoretical fit



31

P-TÍPUSÚ InP: LYUKMOZGÉKONYSÁG A HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN

InP:Zn hole mobility



32

Kvantum Hall-effektus

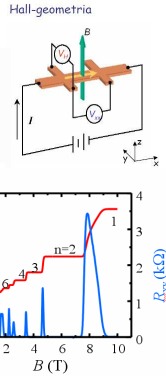
A klasszikus Hall effektus predikciója: mágneses térben az e -kra Lorentz erő hat, a minta széle felé tereli őket $\Rightarrow V_H$ feszültség. A mozgásegyenlet stacionárius megoldásából, az áram definícióját ($\vec{j} = en_{2D}\vec{v}$) felhasználva:

$$R_H = \frac{B}{n_{2D}e}$$

$V_H \sim B$
 $R = R_{xx} \sim \text{Konst}$

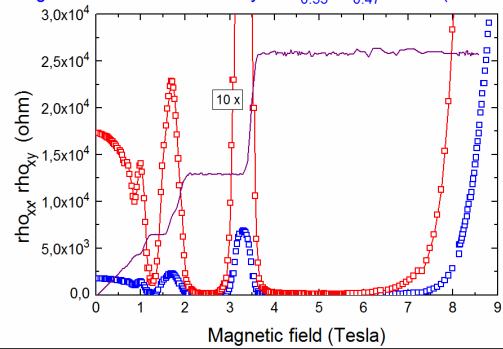
Alacsony hőmérsékleten és nagy mágneses térben:

- Platók jelennek meg $R_H = R_H/i$ ellenállásközl.
- $R_H = h/e^2$
- R_H fgt. a minta alakjától, anyagától (kl. is)
- R_H pontossága $2 \times 10^{-7} \Rightarrow$ ellenállás standard

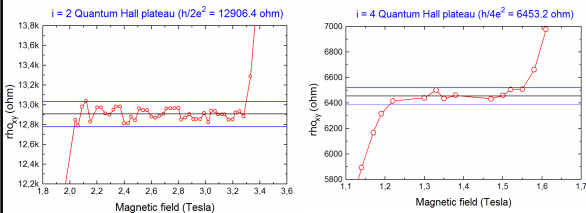


KVANTUM-HALL EFFEKTUS

Longitudinal and Hall resistivity in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ (T=60 mK)



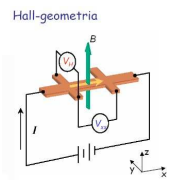
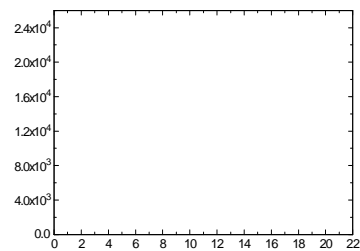
KVANTUM HALL EFFEKTUS



Fekete vonal: h/e^2 értékei
Kék vonalak $\pm 1\%$ -os eltérések

35

KVANTUM HALL EFFEKTUS: HALL ELLENÁLLÁS A MÁGNESES TÉR FÜGGVÉNYÉBEN



Hall ellenállás a mágneses tér (B) és a 2DEG sík normálisa közötti különböző szögeknél.



FELVEZETŐ MAGNETOREZISZTOROK

Megfelelően kialakított vezetőkben (széles és vékony, hasábalakú eszköz), keresztirányú mágneses térbe helyezve, a töltéshordozókra (elektronok vagy lyukak) ható Lorentz erő hatására az árampályák elfordulnak, az áramút hossza és így az eszköz ellenállása megnő. Az ellenállásváltozás nagysága az eszköz geometriája, illetve a félvezető alapanyag megválasztásával optimalizálható. Az ellenállás relatív megváltozása

$$\Delta R/R \sim (\mu B)^2$$

(μ - mozgékonyság, B - mágneses indukció).

37

FELVEZETŐ MAGNETOREZISZTOROK

A magnetorezisztor alapanyaga ezért nagy elektron-mozgékonyssággal rendelkező félvezető, legtöbbször indium-antimonid (InSb) .

Az eszköz ellenállás-mágneses tér jelleggörbéje nagyjából négyzetes, és nem függ a mágneses tér polaritásától. A változás nagysága néhány tized Tesla mágneses indukciónál akár 100 % is lehet.

Alkalmazási területei: különféle érzékelési feladatok (helyzet, szögelfordulás, távolság, stb.) illetve kontaktus nélküli potenciométerek.

38

HALL ÉRZÉKLEŐK

Működése a félvezetőben a külső mágneses térben az áramot hordozó mozgó töltéshordozókra ható Lorentz erőn alapul. A lemez alakú, hosszú de kis vastagságú eszközben a lemezre merőleges irányú mágneses tér a hosszirányú áramot hordozó elektronokat vagy lyukakat keresztirányba eltéríti, így a domináns töltéshordozók előjelétől illetve a mágneses tér polaritásától függően a lemez két szélén ellentétes előjelű töltések halmozódnak fel, melyek egy keresztirányú feszültséget, az ún. Hall-feszültséget hoznak létre.

39

HALL ÉRZÉKLEŐK

Az eszköz alapegyenlete

$$U_H = K \cdot I \cdot B$$

I - az eszközön átfolyó áram [A],
B - az alkalmazott mágneses indukció [Vs/m²],
U_H - a Hall-feszültség [V],
K - érzékenységi állandó [m²/As] , mely magában foglalja a geometriai, és a félvezető anyagi paramétereket.
Az eszköz kimenőjele a mágneses tér függvényében lineáris.

40

HALL ÉRZÉKLEŐK

A Hall-generátor félvezető alapanyaga általában szilícium (Si), gallium-arszenid (GaAs) vagy indium-antimonid (InSb). A működési elvből következően a Hall-generátornál is célszerű nagy elektronmozgékonyságú alapanyagot választani. Ezt a feltételt kielégíti a GaAs (az elektronmozgékonyossága kb. ötszöröse mint a szilíciumé) de méginkább az InSb. Ugyanakkor a Si technológiája kiforrottabb, könnyen integrálható az eszköz.

Alkalmazások: a magnetorezisztorhoz hasonlóan különféle érzékelési feladatok, illetve kontaktus nélküli (más néven mágneses) potenciométerek.

41

VÉGE

42