

MAGNIT MAYDON SENSORLARI

Daminov Rahimjon Shokir o'g'li

*O'zMU huzuridagi nanotexnologiyalarni rivojlantirish markazi doktoranti Tel:
+998996558849, email: rakhimjondaminov@gmail.com*

Annotatsiya: Elektron qurilmalarning rivojlanishi magnit maydoni asosida ishlaydigan sensorlarga bo'lgan ehtiyojni oshirib kelmoqda, bu esa o'z navbatida magnit maydoni asosida ishlaydigan sensorlarni rivojlantirishga turtki bo'lmoqda. Ushbu maqolada bir nechta magnit sensorlarini nazariyasi, ishlash prinsipi, samaradorligi hamda iqtisodiy ahamiyati ko'rib chiqildi. Shular jumlasidan GMR (Giant Magnetoresistance) gigant magnit qarshilik sensorlari, TMR (Tunnel Magnetoresistance) tunel effektiga asoslangan magnit sensorlaridir.

Kalit so'zlar: GMR gigant magnit qarshilik, TMR tunel magnit qarshilik

GMR (Giant Magnetoresistance) sensor

Magnit bo'lmagan va magnit o'tkazgichlarning o'zgaruvchan qatlamlaridan tashkil topgan ko'p qatlamli yupqa plyonkali konstruktsiyalar magnit maydonga joylashtirilganida qarshilikning sezilarli o'zgarishini ko'rsatadi. Bu hodisa gigant magnit qarshilik effekti deb ataladi[1]. Bu kashfiyot uchun 2008 yilda A. Fert va P. Gryunberglar Nobel mukofoti bilan taqdirlangan.

Gigant magnit qarshilikning ta'siri miqdoriy jihatdan quyidagi nisbat bilan tavsiflanadi.

$$MR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_{ap}} \quad (1)$$

$$MR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_p} \quad (2)$$

Bu yerda R_{ap} va R_p mos ravishda uning tarkibiy qatlamlari magnitlanishining antiparallel va parallel yo'nalishlari uchun strukturaning qarshiligi. Odatda $R_{ap} > R_p$ bo'lgani uchun (1) yordamida olingan qiymatlar magnit qarshilikning pessimistik baholari deb ataladi va (2) dan foydalanish esa optimistik baholari deb ataladi. Tajriba natijalari odatda optimistik baholar bilan tavsiflanadi. Ba'zi ferromagnit va magnit bo'lmagan o'tkazgichlar juftlari uchun ushbu baholarning odatiy eksperimental qiymatlari jadvalda keltirilgan.

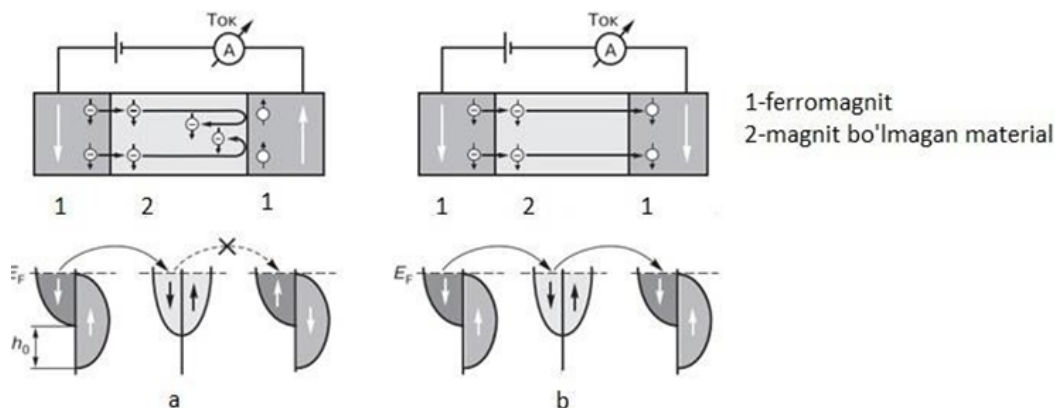
Material qatlamlari	Struktura tekisligidagi tok oqimi		Struktura tekisligidagi Perpendikulyar tok oqimi	
	Optimistik baholari MR %	pessimistik baholari MR %	optimistik baholari MR %	pessimistik baholari MR %
Co/Cu	115	53	170	63
Fe/Cr	108	52	108	52
FeCo/Cu	80	44		
Fe/Ag			42	30
NiFeCo/Cu	35	26		
Ni/Ag	26	21		
Co/Au	18	15		

2-jadval Ferromagnit / magnit bo'lmagan o'tkazgich juftlari ko'p qatlamli tuzilmalarining magnit qarshiligi

Gigant magnit qarshilikning ta'siri Co/Cu va Fe/Cr ko'p qatlamli tuzilmalarida eng aniq kuzatiladi. U qatlamlar soni bilan ortadi va har bir qatlam qalinligi bir necha nanometr bo'lgan taxminan 100 qatlamdan iborat tuzilmalarda maksimal darajaga yetadi.

Quyidagi rasmda ferromagnit, magnit bo'lmagan o'tkazgich va ferromagnit strukturasi tekisligiga perpendikulyar tok o'tganda tashish jarayonlarining asosiy qonuniyatlari sxematik tarzda ko'rsatilgan. Tashqi kuchlanish qo'llanilganda, strukturada tok o'ta boshlaydi, u ikki komponentdan iborat - yuqoriga aylanadigan elektronlar va pastga aylanadigan elektronlar tomonidan hosil bo'ladi. Spinning tarqalishi bo'lmasa, ular aralashmaydi

2-rasm Spin-polarizatsiyalangan elektronni ferromagnit / magnit bo'lmagan o'tkazgich /



ferromagnitning qatlamli tuzilishi orqali tashish: ferromagnit qatlamlarning antiparallel magnitlanishi, yuqori qarshilik (a) va ferromagnit qatlamlarning parallel magnitlanishi, past qarshilik (b) keltirilgan

Ferromagnitlarda magnit bo'lmagan materiallardan farqli o'laroq, rasmda ko'rsatilganidek, aylanish va aylanish elektronlari uchun holatlarning energiya spektrlari har xil. Bitta aylanish yo'nalishi uchun ruxsat etilgan holatlar hududi Fermi darajasi bilan kesishadi, bu esa bu spin yo'nalishidagi elektronlarga erkin zaryad tashuvchisi sifatida qatnashish imkonini beradi. Spin yo'nalishi qarama-qarshi bo'lgan elektronlar uchun ruxsat

etilgan holatlar Fermi darajasidan past bo'ladi, bu ularning ferromagnitda erkin harakat qilish imkoniyatini cheklaydi. Bir ferromagnitdan ikkinchisiga o'tadigan ma'lum spinli elektronlar faqat bir xil spin yo'nalishidagi bo'sh o'rinlarni egallashi mumkin.

GMR sensorlari yerning juda kichik magnit maydon izlarini ham aniqlashga qodir hamda orentatsiya, navigatsiya va qollanilishning integral joylashuvi uchun ham mosdir. [2]da bir- biriga nisbatan 1200 ortaganal joylashtirilgan magnitometrlarni ko'rishimiz mumkin. Magnetokardiografiya (MCG) yurak faoliyatini nazorat qiluvchi elektr impulslari tomonidan yuzaga keladigan magnit maydonlar yordamida yurak faoliyatini o'lchash uchun invaziv bo'lmagan, kontaktsiz usuldir. Amaldagi maydonlar zaif ($\sim 10-11$ T) joylarda eng ko'p ishlatiladigan MCG sensorlaridir. [3] da Nb halqaga ulangan Wheatstone ko'prigi konfiguratsiyasidagi to'rtta suyuq geliyli sovutilgan GMR probi inson yurak faoliyatini o'rganish uchun kam quvvatli ixcham MCG probi sifatida ishlatilgan. GMR sensorlari juda qulaydir, chunki ular yuqori sezuvchanlik va piksellar sonini past sensor qarshiligi bilan birlashtiradi [4] Bu past qarshilik, o'z navbatida, past shovqin, yuqori ish smaradorligi va ma'lum o'lchashlarda quvvat sarfini kamaytiradi.

TMR (Tunnel Magnetoresistance) sensor

Tunnel magnit qarshilik (TMR) sensori deb tunel to'sig'i bilan ajratilgan ikkita ferromagnit materialdan tarkib topgan brikmaga aytiladi. Struktura GMR sensoriga o'xshaydi, o'tkazuvchi qatlam izolyator bilan almashtirilgan. Ikki ferromagnit parallel yo'nalishda magnitlangan bo'lsa, elektronlarning izolyatsiya qatlami orqali tunnel o'tish ehtimoli ikki qatlamning magnitlanishi antiparallel bo'lganidan ko'ra yuqori bo'ladi. Parallel konfiguratsiya minimal qarshilikka olib keladi va antiparallel konfiguratsiya maksimal qarshilikka olib keladi. Julliere birinchi bo'lib amorf Ge qatlami bilan ajratilgan Fe va Co qatlamlaridan tashkil topgan magnit tunnel o'tish joylarida spinga bog'liq kvant tunnelini kuzatgan [5]

Qalinligi birdan bir necha nanometrgacha bo'lgan spinga bog'liq tunnel o'tish uchun tipik ko'p qatlamli tuzilmalar Co, CoCr, CoFe, CoFeB yoki yupqa dielektriklar - MgO, Al₂O₃, Ta₂O₅ bilan ajratilgan ferromagnit qotishmalar hosil qilingan, ularning ba'zi tuzilmalarning magnit qarshiliklari eksperimental qiymatlari jadvalda keltirilgan. Magnit maydonga sezgirlik 1 Oe uchun taxminan 2% ni tashkil qiladi.

Tarkib	Tunel magnitqarshiliklar	
	77 k ⁰	300 k ⁰
CoFeB/MgO/CoFeB	1010	500
Co ₂ FeAl _{0,5} Si _{0,5} /MgO/Co ₂ FeAl _{0,5} Si _{0,5}	390	220
Co ₂ MnGe/MgO/Co ₅₀ Fe ₅₀	376	160
Co ₂ Cr _{0,6} Fe _{0,4} /MgO/Co ₅₀ Fe ₅₀	317	109
CoFeB/Al ₂ O ₃ /CoFeB		20-70
CoFe/Al ₂ O ₃ /CoFe		14-59
NiFeCo/Al ₂ O ₃ /NiFeCo		45
NiFe/Al ₂ O ₃ /NiFe		14-30

3-jadval dielektrik sifatida MgO va Al₂O₃ strukturalarning tunnel magnitqarshiligi

Tunnel o'tish joylarining magnit qarshiligi qo'llaniladigan kuchlanish, magnit maydon kuchi va haroratga bog'liq. Magnit maydon yo'q bo'lganda, tunnel birikmasi (agar u ideal bo'lsa), bir necha millivolt dan yuzlab millivoltgacha bo'lgan oraliqdagi past kuchlanishlarda deyarli doimiy o'tkazuvchanlikka ega. Yuqori kuchlanishlarda o'tkazuvchanlikning qo'llaniladigan kuchlanishga parabolik bog'liqligi kuzatiladi.

Tunnel qarshiligining o'zgarishi quyidagi tenglama bilan berilgan

$$MR = \frac{R_{ap} - R_p}{R_{ap}} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2} \quad (3)$$

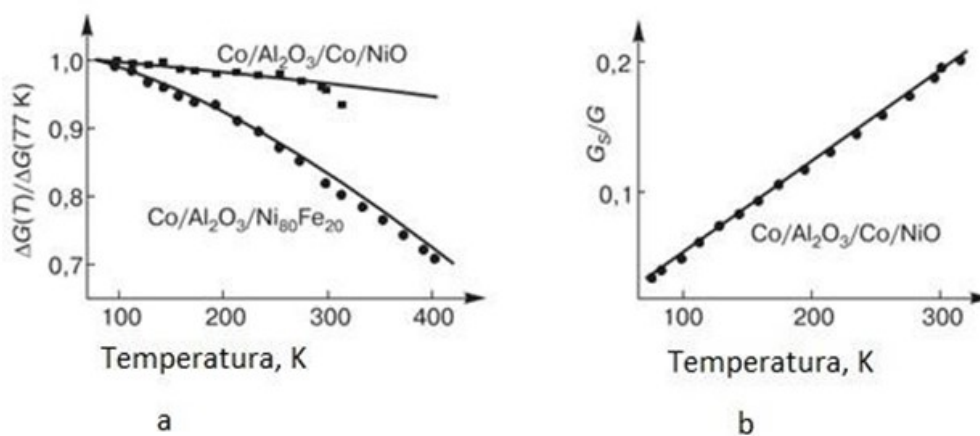
Bu yerda P₁ va P₂ - ferromagnit 1 va 2 elektrodlardagi erkin elektronlarning spin polarizatsiyasi. Oraliq holatda, elektrodning magnitlanish vektorlari yo'nalishlari orasidagi θ burchak 180 ° dan farq qilganda, tunnel birikmasining o'tkazuvchanligi 1 + P₁P₂ cos θ qiymatga proporsionaldir. Elektrodlardagi spin polarizatsiyasining haroratga bog'liqligini quyidagicha ifodalanishi mumkin.

$$P(T) = P_0(1 - BT^{\frac{3}{2}}) \quad (4)$$

Bu yerda P₀, T=0 k⁰ da spin polarizatsiyasi, B - birinchi navbatda materialning tarkibiga bog'liq bo'lgan doimiy. Shuni ham yodda tutish kerakki, yupqa plyonkali konstruktsiyalarda B qiymati, strukturaning mukammalligiga qarab, eng ko'p foydalaniladigan material uchun bir xil qiymatdan kamida ikki baravar yuqori. Spinga bog'liq bo'lmagan qo'shimcha o'tkazuvchanlikni ifodalovchi komponent, izolyatsion to'siqdagi tutqich holatlari ustidan sakrash o'tkazuvchanligi ustunlik qiluvchi elektron tashish mexanizmiga asoslanadi:

$$G_S(T) = ST^a \quad (5)$$

Bu yerda S - konstanta, asosan to'siqdagi nuqsonlarning turiga va konsentratsiyasiga bog'liq (to'g'ridan-to'g'ri to'siqning sifatini ko'rsatadi), $a = 4/3$.



Ikki tipik tunnelli ferromagnit tuzilmalar uchun umumiy (a) va spinga bog'liq bo'lmagan o'tkazuvchanlikning haroratga bog'liqligi (b)

Spinga bog'liq bo'lmagan komponentalar izolyatsion to'siqdagi nuqsonlar va ular bilan bog'liq, kutilayotgan o'tkazuvchanlik harorat oshishi bilan spinga bog'liq bo'lmagan o'tkazuvchanlikning umumiy o'tkazuvchanlikni oshirishni belgilovchi eng muhim omil hisoblanadi. Nuqsonlar bo'yicha lokalizatsiya qilingan elektron holatlar zanjirlari orqali sakrash, o'tkazuvchanligi fononlarning emissiyasi yoki yutilishi tufayli haroratga bog'liq bo'ladi.

Yuqori sezuvchanligi tufayli TMR sensorlari kontaktsiz tokni o'lchash uchun eng maqbul variant hisoblanadi. [6] da MTJ asosida ishlaydigan sezgirligi 7.74 mV/A bo'lgan aqilli tarmoq yaratilganligi haqida boyon etilgan. Antiparallel holatdagi TMR qurilmasining qarshiligi spin- to'lqin chiqarishi tufayli haroratga sezgir. Bunday qurilmaning javob qaytarish vaqti elektron diffuziyaga asoslangan an'anaviy CMOS termal sensoriga qaraganda tezroqdir. [7] da haroratni kuzatish va IC(integrate circuit) haddan tashqari qizib ketishdan himoya qilish uchun chipda kompensatsiyalangan harorat sensori yaratish uchun ikkita TMR sensori ishlatilgan. Kichik o'lchamlari, katta sezgirligi va o'lchashning nisbatan qulayligi tufayli TMR sensorlari turli biologik sohalarda qo'llash mumkin. [8]da sendvich tahlili konfiguratsiyasida 20 nm superparamagnitik temir nanozarrachalari va MgO asosidagi TMR sensorlari yordamida 0,002 mg/ml gacha konsentratsiyalarda muhim jigar o'simtasi belgisi bo'lgan alfa-fetoprotein (AFP) ni aniqlash ko'rsatilgan.

Ushbu maqolada bir nechta turdagi magnit maydoni sensorlari ko'rib chiqildi. Asosan ularning nazariyasi, ishlash prinsipi, ko'p foydalaniladigan materiallari, iqtisodiy hamda samaradorlik jihatlariga to'xtalib o'tildi.

Quyidagi 4-jadvalda ko'rib o'tilgan sensorlarning bazi bir parametrlari solishtirilgan.

Texnologiya	Hall effekt sensorlari	AMR	GMR	TMR
Quvvat sarfi (mA)	5~20	1~10	1~10	0.001-0.01
Hajmi (mm ²)	1 x 1	1 x 1	1 x 2	0.5 x 0.5
Maydon sezgirligi (mV/V/Oe)	~0.05	~1	~3	~100
Dinamik oralig'i (Oe)	~10 000	~10	~100	~1000
Aniqligi (nT/Hz ^{1/2})	>100	0.1~10	1~10	0.1~10
Ishlash temperaturasi (C ⁰)	< 150	< 150	< 150	< 200

Jadvaldan ko'rinib turibdi, quvvat sarfiga nisbatan olganda TMR sensorlari samarali hisoblanadi, hajm jihatdan olinganda TMR sensorlari Hall effect, AMR, GMR sensorlarga qaraganda kichik, sezgirligi yuqori, ishlash temperaturasi ham yuqori hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Впервые описан в: M. N. Baibich, et al., Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices, Phys. Rev. Lett. 61(21), 2472–2475 (1988) и независимо в: G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, Phys. Rev. B 39(7), 4828–4830 (1989).
2. Chiang C-Y, Jeng J-T, Lai B-L, Luong VS, Lu C-C. Tri-axis magnetometer with in-plane giant magnetoresistance sensors for compass application. Journal of Applied Physics. 2015;117(17):17A321.
3. Pannetier-Lecoeur M, Parkkonen L, Sergeeva-Chollet N, Polovy H, Fermon C, Fowley C. Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance. Applied Physics Letters. 2011;98(15):153705.
4. Guedes A, Jaramillo G, Buffa C, Vigevani G, Cardoso S, Leitao D, et al. Towards picoTesla magnetic field detection using a GMR-MEMS hybrid device. IEEE transactions on magnetics. 2012;48(11):4115-8.
5. Julliere M. Tunneling between ferromagnetic films. Physics letters A. 1975;54(3):225-6.
6. Ouyang Y, He J, Hu J, Zhao G, Wang Z, Wang SX. Contactless current sensors based on magnetic tunnel junction for smart grid applications. IEEE Transactions on Magnetism. 2015;51(11):1-4.
7. Jiang Y, Zhang Y, Klemm A, Wang J-P, editors. Fast spintronic thermal sensor for IC power driver cooling down. Electron Devices Meeting (IEDM), 2016 IEEE International; 2016: IEEE.

8. Lei Z, Li L, Li G, Leung C, Shi J, Wong C, et al. Liver cancer immunoassay with magnetic nanoparticles and MgO-based magnetic tunnel junction sensors. *Journal of applied physics*. 2012;111(7):07E505.