

# Karga-garraiorik

## ESTITXU VILLAMOR LOMAS

(Gasteiz, 1987). EHU-n Fisikan lizentziatu zen eta CIC nanoGUN-en aritu da ikertzen. Lehenbizi, Nanozientzia masterra zela medio eta, ondoren, doktore-tesia burutzen. 2014ko abenduan "Injection, transport and manipulation of pure spin currents in metallic lateral spin valves" izeneko tesia defendatu zuen. Gaur egun, ikerketa alde batera utzi eta hezkuntzaren eta zientzia-dibulgazioaren munduan aritzea du helburu.

Zeinek esango luke 1946. urtean, lehenengo ordenagailua asmatu zenean, gaur egun gutariko edozeinek poltsikoan ordenagailu bat eramango lukeela? Pennsylvaniako unibertsitatean sorturiko ENIAC ordenagailu hark 167 m<sup>2</sup>-ko azalera zuen, 27 tona pisatzen zuen, erabiltzen zenean gelako temperatura 50 °C-ra igotzen zen eta 160 kW-eko kontsumoa zuen, besteak beste; hori dena 5.000 batuketa eta 300 biderketa egiteko baino ez. Gaur egun, transistorearen askuntzari eta zirkuitu elektronikoen miniaturizazioari esker, gure sakelako telefonoak askoz ordenagailu eraginkorragoak dira, azkarragoak, eta eragiketa logiko gehiago burutu ditzakete. 1965. urtean, Intel enpresako sortzaileetako bat zen Gordon E. Moorek, ordura arteko joeran oinarrituta, lege enpiriko hau formulatu zuen: zirkuitu integratu batean dagoen transistorekopurua bikoiztu egiten da bi urtetik behin. Mooren legearen aurreikuspena dela eta, Intel eta gainerako mikroelektronika-enpresak gogor saiatu dira joera horri eusten, eta, horri esker, geroz eta gailu elektroniko azkarragoak eta txikiagoak fabrikatzen dira.

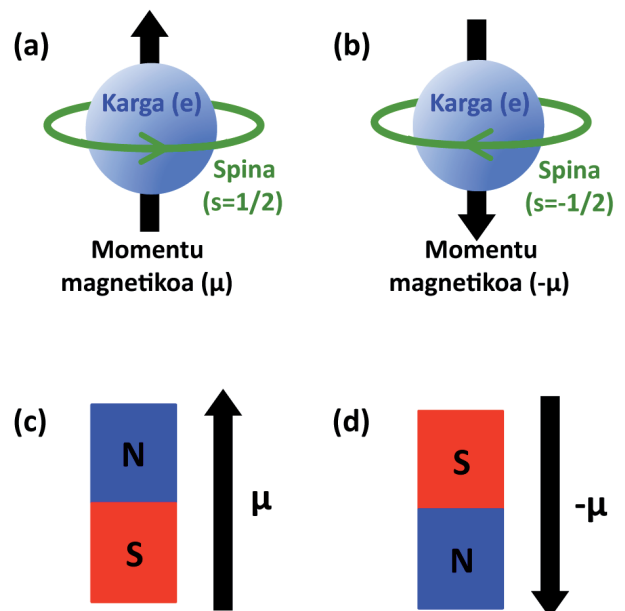
Baina zirkuituen etengabeko txikitze horrek ere baditu bere mugak. Alde batetik, energia-galera itzelak izaten direlako (bero bihurtzen da, izan ere): Joule efektua dela eta, hain bolumen txiki-

etatik igarotzen den kargaren disipazioa oso altua izaten da, gure ordenagailuetako potentzia-dentsitatea erreaktore nuklear batekoa baino altuagoa izaten baita; bestetik, fluktuazio kuantikoak agertzen direlako: atomoen tamainara hurbiltzen garen heinean, elektroiek, partikula-izaeraz gain, uhin-izaera ere badute eta zirkuituko elementu batetik bestera ihes egin dezakete. Hori dela eta, gailu elektronikoen datu-prozesaketaren abiadurak handitu eta energia-kontsumoa txikitu nahi baditugu, aldaketa baten beharra dugu.

Aldaketa horretarako tesi honetan aukera hau proposatu dugu: spintronika, zeina elektroien kargaz baliatzeaz gain bere spinaz ere baliatzen den elektronikaren alor berri bat baita. Oinarrituriko partikulen propietate kuantiko bat da spina, eta momentu angeluar intrintseko eta kuantizatu gisa irudika daiteke, hau da, norabide jakin batean balio bakar batzuk har ditzakeen biraketa gisara. Z norabide preferentziazalean,  $s = 1/2$  eta  $s = -1/2$  balioak hartzen ditu spinak (goranzkoak eta beheranzkoak), hots, elektroia klasikoki irudikatuz gero, gorantz edo beherantz biratzen ari den partikula baten gisara irudikatuko genuke.

Elektroia partikula kargaduna denez, spinari loturiko momentu magnetiko bat du:  $\mu$ . Horrek

1. irudia. (a) Goranzko eta (b) beheranzko spinak ( $s = 1/2$  eta  $s = -1/2$ ) dituen elektroien bat, (c) eta (d) elektroien horren momentu magnetikoa ( $\mu$  eta  $-\mu$ ).

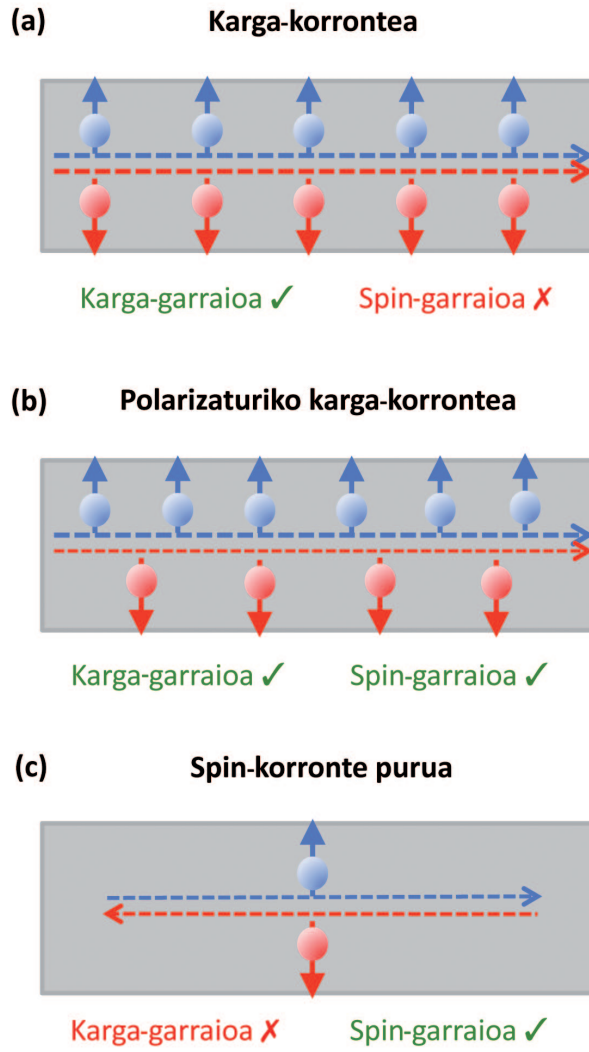


# gabeko elektronika berria

esan nahi du elektroiak iman mikroskopiko baten portaera bera duela. Izan ere, iman edota material ferromagnetikoen (FM) magnetizazioa honegatik sortzen da: material horiek spinak noranzko jakin baterantz orientaturik ditzutelako. Horregatik, material FM batean zehar karga-korronte bat garraiatzen denean, berau polarizaturik egoten da: korrontea garraiatzen duten elektroien spinak ere lerrotaturik egoten dira. Bigarren irudian ikusten den bezala, karga-garraio bera burutuz, polarizaturiko kargaren kasuan, informazio gehiago garraia daiteke (kargarena eta spinarena) eta, hartara energia-kantitate bera kontsumituz datu-prozesaketa azkarragoa egin.

1980ko hamarkadaren amaieran sortu zen spintronika, eta hainbat aplikazio izan ditu harrezkerotzik. Polarizaturiko korronteen sorreran, distantzia laburretarako garraioan eta detekzioan oinarritzen dira, esaterako, disko gogorretan gordeta dagoen informazioa irakurtzen duten gailuak. Gaur egun, ordea, spintronikaren garapena bigarren belaunaldiko gailuen eskutik etorririko da, zeintzuek karga-korrontearen ordez spin-korronte purua baliatuko baituten Joule efektuak sorturiko bero-galerak eta horren ondoriozko energia-kontsumoa txikitzeko. 2(c) irudian ikusten den moduan, spin-korronte puru bat izanez gero, polarizaturiko karga-korronte baten bidez garraiatuko genukeen spin-informazio bera garraiatzeko askoz elektroi gutxiago higitu behar dira, eta nabarmen gutxituko litzaiteke haien marruskadurak sorturiko bero-galera. Kontuan izan spin-korrontea  $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$  gisa definitzen dela —non  $J_{\uparrow}$  eta  $J_{\downarrow}$  goranzko eta behe-ranzko spinari loturiko karga-korronteak diren— ezkererantz doan behe-ranzko spina eta eskuinerantz doan goranzko spina baliokideak direla eta, beraz, 2(b) eta 2(c) irudietan garraiatzen den spin-informazioa berbera dela.

Bigarren belaunaldiko gailu spintronikoen funtzionamendu egoki baterako, bereziki hiru elementu behar dira: (i) spin-korronte puruak sortzea, (ii) korronte horiek distantzia luzeetan (>100 nm) zehar garraiatzea, eta (iii) garraiatu- riko spinen manipulazioa. Hori dela eta, tesi honen helburua hau izan da: alboko spin-balbulak erabiliz, elementu horiek aztertzea. Spin-korronte puruak elektririkoki sortzeko baliagarriak diren gailuak dira alboko spin-balbulak. Bi elektrodo

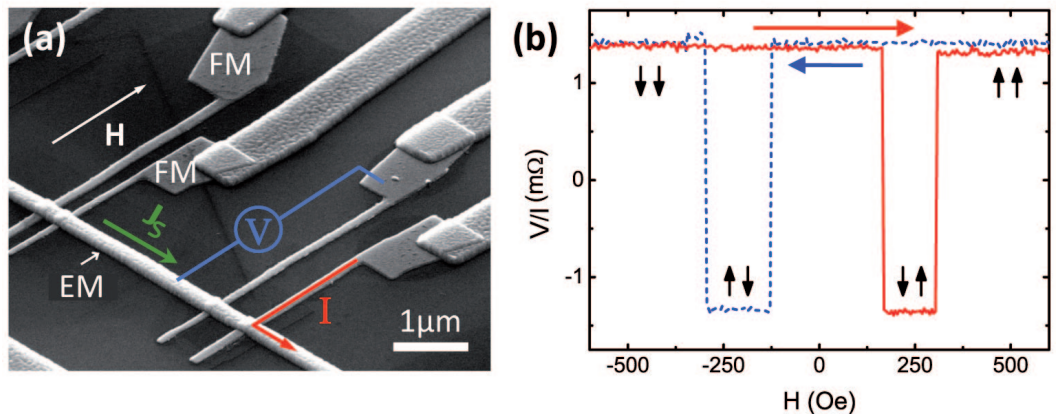


2. irudia. (a) Polarizaziorik gabeko karga-korrontea. (b) Polarizaturiko karga-korrontea. Kasu honetan, spinaren informazioa ere garraiatzen da. (c) Spin-korronte purua. Guztiak ez dago karga-korrontearekin, baina spin-informazioa garraiatzen da.

FMz eta berauek lotzen dituen kanal ez-magnetiko (EM) batez osaturik daude eta, euren geometriak korronte elektriko bat elektrodo FM batetik kanal EMra bideratzeko aukera ematen dute, bigarren elektrodoaren bidez tentsioa neurtzen den bitartean, 3(a) irudian adierazi bezala. Lehenengo elektrodo FMtik kanal EMra bideraturiko korrontea FMan zehar polarizaturik dago, baina material EMak goranzko eta behe-ranzko spin-kopuru bera duenez, FMtik datozen spinek erresistentzia bat aurkitzen dute bi materialen arteko gainazalean, eta han pilatuta gelditzen dira, desoreka-egoeran. Sistema orekatzeko, pilaturiko spin horiek elektrodo FMaren bi aldeetarantz hedatzen dira, eta karga-garraiorik

ez dugun aldean spin-korronte puru bat sortzen dute. Bigarren elektrodo FMari esker, kanal EMaren eta FM horren artean spin-pilaketa bat sortzen da berriro, eta tentsio elektriko baten moduan neur daiteke. Beraz, bi elektrodoen artean karga-korronte higitzen ez denez neurturiko tentsioak nulua izan behar duela pentsa genezakeen arren, badago neur daitekeen tentsio elektriko bat, spin-korronte puruak sorturikoa edo spin seinalea, alegia. Bi elektrodo FMen arteko magnetizazio erlatiboak aldatu egiten du tentsio horren zeinua: elektrodoen magnetizazioa paraleloa denean (bien magnetizazioak noranzko bera duenean), positiboa izaten da tentsioa; haien magnetizazioa antiparaleloa denean,

3. irudia. (a) Elektroi mikroskopia bidezko alboko bi spin-balbularen irudia. Material FM eta EMak, korrante elektrikoa ( $I$ ), tentsio elektrikoa ( $V$ ), spin-korrante purua ( $J_s$ ) eta kanpoko eremu magnetikoa ( $H$ ) adierazi dira. (b) Kanpoko eremu magnetikoa ( $H$ ) arabera neurturiko tentsioa, korranteaz normalizatua ( $V/I$ ). Elektrodo FMen magnetizazio paralelo eta antiparaleloak adierazi dira. Lerro gorriak eremuaren balioa handitzen duguneko noranzkoa adierazten du; urdinak, berriz, txikitzen duguneko.

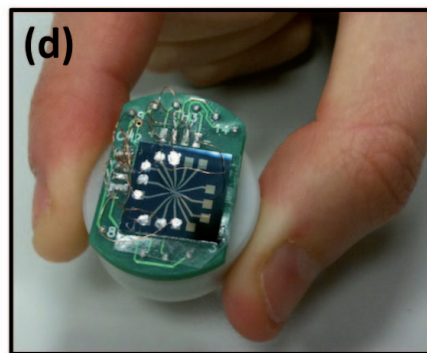
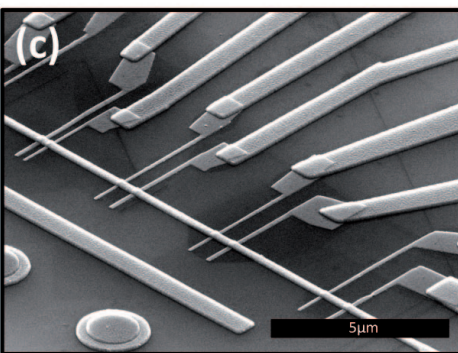
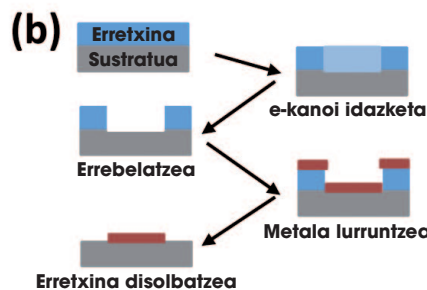


ordea (magnetizazioek kontrako noranzkoak dituztenean), negatiboa izaten da neurturiko tentsioa. Elektrodoen magnetizazioa kanpoko eremu magnetiko baten bitartez kontrola daiteke. Horrela, tentsioa kanpoko eremuaren arabera neurtuz, alboko spin-balbulen hatz-marka den 3(b) irudiko kurba lortzen da.

Alboko spin-balbulak hain dira txikiak (elektrodoek, esaterako, 100 nm inguruko zabalera dute) ezen, hauts-partikula bat gainera eroriz gero, funtzionatzeari utz baitiezaiokete. Horregatik, "gela zuria" deritzon laborategian fabrikatzen dira, non airean egon daitekeen partikula-kopurua ondo kontrolatuta dagoen, iragazki berezi batzuei esker. Laginak fabrikatzeko elektro(e)-kanoi bidezko litografia deritzon teknika

erabili dugu. Honetan datza teknika hori: e-kanoi batekin polimero baten gainean "idatzi" eta han metala lurruntzean. Hainbat pauso ditu teknika horrek: lehendabizi, substratu baten gainean (normalean, siliziozkoa) elektroiekiko sentikorra den polimero bat (erretxina deritzona) zabaltzen da; ondoren, e-kanoiaren bidez, lortu nahi den irudia idazten da, eta, substantzia kimiko bat erabiliz, errebelatu, hau da, idatziriko erretxina ezabatu egiten da. Metala lurrundu egiten da haren gainean eta, azkenik, lagin osoa azetonan sartzen da, erretxina disolba dadin; metala e-kanoiak idatziriko gunean soilik mantentzen da. Gure kasuan, bi aldiz egin dugu prozesu hori: lehenik, elektrodo FMak sortzeko, eta, ondoren, kanal EMA gainetik jartzeko. Lagin bakoitzean hainbat spin-balbula jarri ditugu, spin-seinalea kanal EMaren luzera desberdinetarako neurtuz, gailu horien propietateak ulertzeko. Azkenik, litografia optikoari esker (e-kanoiaren ordeaz argi ultramorea erabiliz) 4(d) irudian ageri diren bide makroskopikoak sortu ditugu, lagina elektrikoki kontaktatzeko.

4. irudia. (a) CIC nanoGUNE-ko gela zuria. (b) Alboko spin-balbulak fabrikatzeko erabiltzen den e-kanoi bidezko litografian ematen diren pausoak. (c) Lagin baten elektroi mikroskopia bidezko argazkia, non alboko bi spin-balbula ikusten diren. (d) Neurketa elektrikoak egiteko kontaktatuta dagoen lagin baten argazkia.

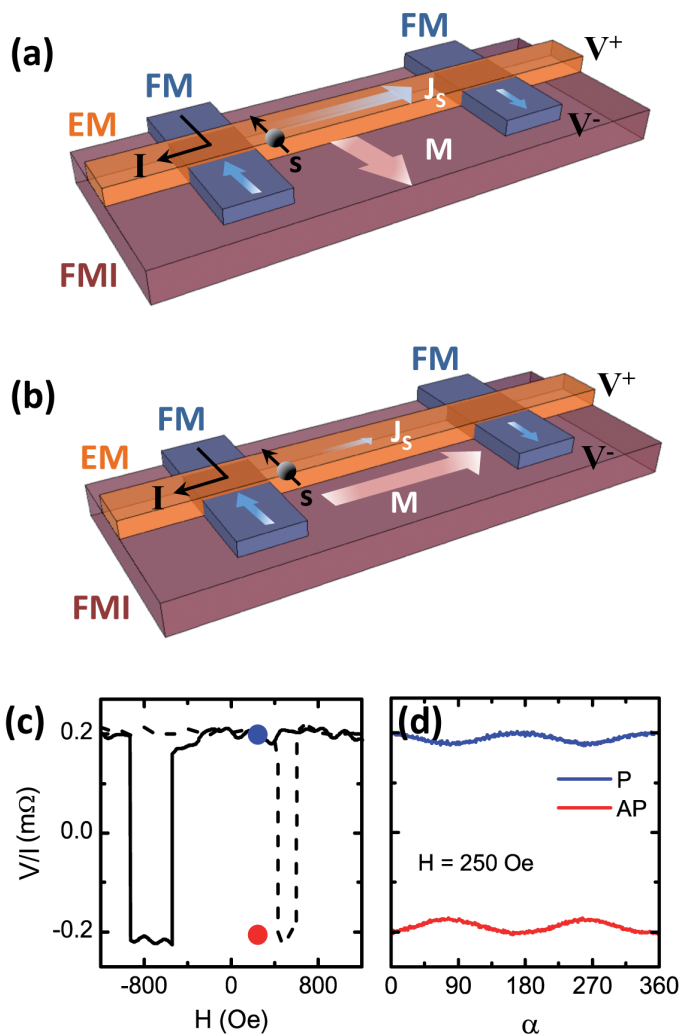


Gure gailuen fabrikazioan lortu dugun errepikaportasun altuari esker, material ferromagnetiko desberdinak erabiltzeko aukera izan dugu spin-korrante puruak sortzeko, eta seinale handiena permalloyarekin (nikel eta burdinaren arteko aleazioa) lortu dugu. Horrez gain, kobreak zehar spin-garraioa tenperaturaren arabera aztertuz, ezpurutasun magnetikoak eta akatsak (gainazalak, ale-mugak, etab.) identifikatu ditugu spin-seinalea txikiagotzearen erantzulezat. Bitxia da: spin-seinaleak neurtzeko egitura nanometrikoak behar ditugun arren, horien dimentsio txikiak areagotu egiten ditu akatsak eta,aldi berean, spinen garraioa oztopatzen.

Azkenik, spinak manipulatzeko metodo berri bat proposatu eta garatu dugu, spinen eta material ferromagnetiko isolatzaileen (FMI) arteko elkarrekintza baliatuz. Material horiek isolatzaileak

direnez, ez dute elektroirik garraiatzen, baina euren magnetizazioak ( $M$ ) kanal EMtik doazen spinei eragiten die, horiekiko perpendikularra denean.  $M$  erraz kontrola daiteke kanpoko eremu magnetiko txiki baten bidez, zeinak, txikia izanik, elektrodo FMen magnetizazioan eraginik ez baitu. Horrela,  $M$  eta spinen polarizazioa ( $s$ ) paraleloak direnean ez dugu spin-seinalean aldaketarik neurtzen;  $M$  eta  $s$  elkarrekiko perpendikularrak direnean, ordea, FMlako spinak xurgatu egiten ditu, eta txikiagoa izaten da neurturiko seinalea. Proposatutako metodoa egiaztatzeko, alboko spin-balbulak itrio eta burdinazko grana-

te baten gainean fabrikatu ditugu eta,  $M$ ren norabidea  $\alpha$  angeluaz aldatuz (baina bere balioa 250 oerstedetan finko mantenduz), neurturiko seinalean % 8ko modulazio bat atzeman dugu elektrodo FMen magnetizazio paralelo eta antiparalelorako. Modulazio hori erabat nabarmena da, eta fabrikazio-prozesua optimizatuz zein material egokiak aukeratzuz, biziki handitu daitekeela uste dugu. Horrela, spin-korronte puruekin eragiketa logikoak egiteari bidea ireki diogu. Ezinbesteko baldintza da hori elektronika arrunta spin-korronte puruei esker dabilen spintronikaz ordezkatu nahi badugu.



5. irudia. (a)-(b) Spinak manipulatzeko erabilitako gailuaren eskema, zeina alboko spin-balbula bat material ferromagnetiko isolatzaile (FMI) baten gainean fabrikatzean datzan. (a) FMIaren magnetizazioa ( $M$ ) eta spinen polarizazioa ( $s$ ) paraleloak direnean, ez dago spin-xurgapenik. (b)  $M$  eta  $s$  perpendikularrak direnean, ordea, FMIak spinak xurgatu egiten ditu, neurtzen dugun spin-seinalea txikituz. (c) Mota horretako gailu batean neurturiko seinalea kanpoko eremu magnetiko baten arabera. (d) Kanpoko eremu magnetikoa 250 Oe-etan finkatuz baina bere norabidea  $\alpha$  angeluaz aldatuz neurturiko seinalea, elektrodo FMen magnetizazio paralelo (ferro urdina) zein antiparalelorako (ferro gorria). % 8ko modulazio nabarmen bat atzemanen da.

BIBLIOGRAFIA

*Spin Current*, edited by S. Maekawa, S. O. Valenzuela, E. Saitoh and T. Kimura (Oxford University Press, Oxford, 2012).

JOHNSON, M.; SILSBEE, R. H.: "Interfacial charge-spin coupling: Injection and detection of spin magnetization in metals". *Phys. Rev. Lett.* 55, 1790 (1985).

JEDEMA, F. J.; FILIP, A. T.; VAN WEES, B. J.: "Electrical spin injection and accumulation at room temperature in an all-metal mesoscopic spin valve". *Nature*, 410, 345 (2001).

JEDEMA, F. J.; NIJBOER, M. S.; FILIP, A. T.; VAN WEES, B. J.: "Spin injection and spin accumulation in all-metal mesoscopic spin valves". *Phys. Rev. B* 67, 085319 (2003).

KIMURA, T.; SATO, T.; OTANI, Y.: "Temperature Evolution of Spin Relaxation in a NiFe/Cu Lateral Spin Valve". *Phys. Rev. Lett.* 100, 066602 (2008).

CASANOVA, F.; SHARONI, A.; EHREKHINSKY, M.; SCHULLER, I. K.: "Control of spin injection by direct current in lateral spin valves". *Phys. Rev. B* 79, 184415 (2009).

MIHAJLOVIC, G.; PEARSON, J. E.; BADER, S. D.; HOFFMANN, A.: "Surface Spin Flip Probability of Mesoscopic Ag Wires". *Phys. Rev. Lett.* 104, 237202 (2010).

ZHU, M.; DENNIS, C. L.; MCMICHAEL, R. D.: "Temperature dependence of magnetization drift velocity and current polarization in Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> by spin-wave Doppler measurements". *Phys. Rev. B* 81, 140407(R) (2010).

VILLAMOR, E.; ISASA, M.; HUESO, L. E.; CASANOVA, F.: "Contribution of defects to the spin relaxation in copper nanowires". *Phys. Rev. B* 87, 094417 (2013).

VILLAMOR, E.; ISASA, M.; HUESO, L. E.; CASANOVA, F.: "Temperature dependence of spin polarization in ferromagnetic metals using lateral spin valves". *Phys. Rev. B* 88, 184411 (2013).

NAKAYAMA, H.; ALTHAMMER, M.; CHEN, Y.-T.; UCHIDA, K.; KAJIWARA, Y.; KIKUCHI, D.; OHTANI, T.; GEPRÄGS, S.; OPEL, M.; TAKAHASHI, S.; GROSS, R.; BAUER, G. E. W.; GOENNENWEIN, S. T. B.; SAITOH, E.: "Spin Hall Magnetoresistance Induced by a Nonequilibrium Proximity Effect". *Phys. Rev. Lett.* 110, 206601 (2013).

VILLAMOR, E.; ISASA, M.; VÉLEZ, S.; BEDOYA-PINTO, A.; VAVASSORI, P.; HUESO, L. E.; BERGERET, F. S.; CASANOVA, F.: "Modulation of pure spin currents with a ferromagnetic insulator". *Phys. Rev. B* 91, 020403(R) (2015).