

OPTIMIZACIJA SPINSKE POLARIZACIJE U HETEROSTRUKTURAMA BAZIRANIM NA POLUMAGNETNIM POLUPROVODNICIMA

Jelena Radovanović, *Institut za fiziku, Pregrevica 118, 11080 Beograd*

Vitomir Milanović, *Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd*

Zoran Ikončić, Dragan Inđin, *Institute of Microwaves and Photonics, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, Woodhouse Lane, Leeds LS2 9JT, UK*

Sadržaj – Izvršena je optimizacija parametara $ZnSe/ZnMnSe$ poluprovodničkih nanostrukture, izloženih dejstvu spoljašnjeg magnetnog i električnog polja, sa ciljem da se maksimizuje stepen spinske polarizacije tunelujućih elektrona. U poluprovodničkim sistemima baziranim na Mn, provodni elektroni interaguju sa 3d elektronima Mn jona i ova sp-d interakcija rezultuje velikim Zeeman-ovim efektom za elektrone različitog spina. Pokazuje se da se odgovarajući koeficijent spinske polarizacije značajno menja pri prelasku sa direktne na inverznu električnu polarizacije, što znači da predložena struktura ispoljava karakteristike diode sa filtriranjem spina. Ovo je posledica efektivnog povećanja potencijala za elektrone sa spinom-gore koji tuneluju kroz prave potencijalne barijere. Analizirani efekat može biti osnova za dizajniranje brzih spinski-osetljivih elektronskih naprava na bazi tunelovanja.

1. UVOD

U poslednjih nekoliko godina vlada izuzetno interesovanje za novu oblast nanonauke koja je dobila naziv spintronika, a zasnovana je na konceptu da se za prenos, skladištenje i procesiranje informacija pored naelektrisanja elektrona može koristiti i njihov spin [1]-[8]. Većina naprava baziranih na ovom principu koje su do sada predložene u literaturi podrazumeva transport spinski polarisanih nosilaca kroz različite magnetski modulirane kvantne strukture. Ovakvim mogućnostima za dizajniranje spinskih tranzistora, detektora, senzora, emitera, ili npr. spinskih memorijskih ćelija, značajno je proširen spektar niskodimenzionalnih poluprovodničkih sistema [2]-[4]. Spintroničke naprave imaju potencijal da zamene ili komplementiraju konvencionalne elektronske naprave, poboljšavajući njihove karakteristike. U širem smislu pojam spintronike obuhvata i oblasti kao što su spinski bazirana kvantna informatika i komunikacije, gde bi spin nosilaca igrao ulogu kvantnih bita (kubita) pomoću kojih se prenose informacije [7,8].

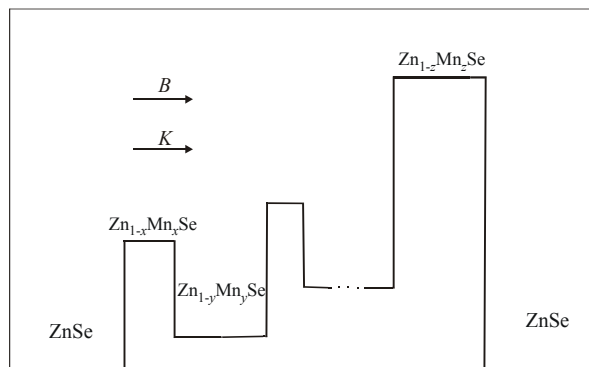
Ovako široke granice primene objašnjavaju se činjenicom da se spinom elektrona u poluprovodnicima može lako neinvarzivno manipulirati primenom spoljašnjeg magnetnog polja ili spoljašnjeg električnog polja, pa čak i obasjavanjem polarizovanom svetlošću. Istraživanja su pokazala da razblaženi magnetski poluprovodnici (diluted magnetic semiconductors - DMS) (ili, polumagnetni poluprovodnici, kako se još nazivaju) predstavljaju posebno obećavajuće kandidate za efikasnu spinsku injekciju u druge (nemagnetske) poluprovodnike [9]-[12]. Radi se o poluprovodničkim legurama kod kojih je deo atoma osnovnog materijala u kristalnoj rešeci zamenjen atomima (jonima) magnetnog materijala. Najpoznatiji primer predstavljaju II-VI jedinjenja (npr. ZnSe, CdTe) kod koji je određeni procenat atoma II grupe zamenjen Mn^{2+} jonima. Jedno od najznačajnijih svojstava ovih materijala je ispoljavanje izuzetno velikog Zeeman-ovog cepanja ivica zona, zahvaljujući interakciji razmene između d elektrona Mn^{2+} jona i zonskih elektrona (s ili p porekla) [9]. Usled cepanja između stanja karakterisanih spinom-gore i spinom-

dole, heterostrukture koje uključuju slojeve sa DMS imaju jedinstvenu osobinu da se ofset provodne i valentne zone može podešavati u značajnom opsegu (reda nekoliko desetina meV) putem spoljašnjeg magnetnog polja [12].

U ovom radu je analizirana heterostruktura sastavljena od slojeva polumagnetnog poluprovodnika ($Zn_{1-x}Mn_xSe$) smeštenih između barijera od nemagnetnog materijala (ZnSe). Zahvaljujući ternarnoj strukturi DMS slojeva, variranjem njihovog sastava može se uticati na veličinu odgovarajućeg energetskog procepa. Promena u koncentraciji Mn jona odražava se, s druge strane, i na magnetna svojstva materijala s obzirom da se njihovi lokalni momenti mogu lako usmeravati putem relativno slabog magnetnog polja. Ispitivana je zavisnost koeficijenta spinske polarizacije elektrona od parametara strukture pod dejstvom spoljašnjeg magnetnog polja (B) i polarizacionog napona (V_a). Kao rezultat velikog Zeeman-ovog cepanja u prisustvu B , elektroni čiji je spin orijentisan u smeru magnetnog polja (spin-gore) i u suprotnom smeru (spin-dole) "vide" različite sekvence potencijalnih jama i barijera i ispoljavaju različite transmisionne karakteristike pri tunelovanju kroz ovakav sistem. Zahvaljujući ovoj pojavi, može se ostvariti efikasno spinsko filtriranje, odnosno efekat da elektroni određene vrednosti spina dominiraju u struji. Adekvatnim variranjem dimenzija i sastava slojeva može se izvršiti optimizacija strukture tako da ona ispoljava osobine spin-filter diode, pokazujući različito ponašanje pri pozitivnim i negativnim vrednostima polarizacionog dc napona.

2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

Posmatra se transport spinski-polarisanih elektrona sa efektivnom masom m_e^* kroz asimetričnu višeslojnu $ZnSe/Zn_{1-x}Mn_xSe/Zn_{1-y}Mn_ySe/.../ZnSe$ strukturu, kao na Slici 1, izloženu dejstvu spoljašnjeg magnetnog polja B i električnog polja K , usmerenih duž z -ose.



Sl.1. Profil koncentracije Mn u heterostrukturi baziranoj na $ZnSe/ZnMnSe$

U ovakvom sistemu baziranom na polumagnetnim poluprovodnicima sa Mn, provodni elektroni interaguju sa 3d elektronima lokalizovanih Mn jona kroz sp-d interakciju razmene koja se može opisati Hamiltonijanom interakcije u formi [1,9]:

$$H_{\text{int}} = \sum_i J^{sp-d} (\vec{r} - \vec{R}_i) \vec{S}_i \vec{\sigma} \quad (1)$$

gde je J^{sp-d} integral razmene između zonskih elektrona i Mn^{2+} jona, \vec{r} i $\vec{\sigma}$ su koordinate i operator spina za elektrone, respektivno, dok su \vec{R}_i i \vec{S}_i analogne veličine za Mn^{2+} jone. Ova interakcija rezultuje ogromnim Zeeman-ovim efektom u spoljašnjem magnetnom polju, što značajno podiže nivo degeneracije za stanja sa spinom-gore i spinom-dole. Koristeći aproksimacije virtuelnog kristala i srednjeg polja, može se doći do analitičkog izraza za spinski-zavisani deo potencijala u DMS slojevima koji potiče od $sp-d$ interakcije, u obliku [2,9,10]:

$$U_{\sigma_z} = \pm \frac{1}{2} N_0 \alpha x_{\text{eff}} \langle S_z \rangle \quad (2)$$

gde znak “+“ odgovara elektronima sa spinom-gore, “-“ elektronima sa spinom-dole. Veličina $N_0 \alpha$ predstavlja elektronsku konstantu $sp-d$ razmene, $x_{\text{eff}} = x(1-x)^{1/2}$ [1,2] je efektivna koncentracija Mn u posmatranom sloju DMS materijala kojom se računa antiferomagnetsko uparivanje (x je stvarna koncentracija Mn), a $\langle S_z \rangle$ je termalna srednja vrednost z -komponente spina Mn^{2+} jona i opisana je modifikovanom Brillouin-ovom funkcijom $B_{1/2}$ [$B_{1/2}(w) = 6/5 \coth(6/5w) - 1/5 \coth(1/5w)$]:

$$\langle S_z \rangle = \frac{5}{2} B_{5/2} \left[\frac{5 \mu_B B}{k_B T_{\text{eff}}} \right] \quad (3)$$

U gornjem izrazu μ_B označava Bohr-ov magneton, k_B je Boltzmann-ova konstanta, a $T_{\text{eff}} = T + T_0$, gde je T temperatura, a T_0 je fenomenološki parametar kojim se računa antiferomagnetska Mn-Mn interakcija [1,9]. S obzirom da je struktura izložena i dejstvu spoljašnjeg električnog polja K (tj. polarizacionog napona Va), ukupni Hamiltonijan za elektrone u provodnoj zoni se, u okviru aproksimacije efektivnim masama, može napisati u obliku:

$$H = \frac{1}{2m_e^*} (\vec{p} + e\vec{A})^2 + U_0(z) + U_s + U_{\sigma_z}(z) - eKz \quad (4)$$

gde je $U_0(z)$ profila dna provodne zone $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}/\text{Zn}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Se}/\dots/\text{ZnSe}$ strukture u odsustvu spoljašnjih polja, $U_s = \mp \frac{1}{2} g_s \mu_B B$ opisuje unutrašnje Zeeman-vo cepanje za elektrone koje je nezavisno od $sp-d$ interakcije i egzistira i u nemagnetskim poluprovodnicima (g_s je Landé-ov faktor za elektrone, a “+“ i “-“ se odnose na spin-dole i spin-gore, respektivno). Kada magnetno polje ima pravac z -ose, kretanje elektrona u ravni slojeva (x - y ravan) može se posmatrati odvojeno od kretanja duž z -ose, i kvantovano je na Landau-ove nivoe sa energijama $E_l = (l+1/2)\hbar\omega_c$, gde je $l=0,1,2,\dots$, a $\omega_c = eB/m_e^*$ je ciklotronska frekvencija. Shodno tome, Schrödinger-ova jednačina za redukovani (jedno-dimenzionalni) problem u z -pravcu se može napisati u formi:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \frac{d^2 \Psi(z)}{dz^2} + U_{\text{eff}}(z, B, Va, \sigma_z) \Psi(z) = E_z \Psi(z) \quad (5)$$

gde je $U_{\text{eff}}(z, B, Va, \sigma_z) = U_0(z) + U_s + U_{\sigma_z}(z) - ezVa/L$ efektivni potencijal koji zavisi i od vrednosti spoljašnjih polja i od spina elektrona, a L je zbir debljina svih magnetnih slojeva. Spinski-zavisani koeficijent transmisije elektrona $T_{\sigma_z}(E_z, B, Va)$ kroz posmatrani poluprovodnički sistem može se izračunati na standardan način, uzimajući talasne funkcije u formi stanja rasejanja:

$$\Psi(z) = \begin{cases} e^{ik_1 z} + r e^{-ik_1 z}, & z < 0 \\ A_1 g_1(z) + A_2 g_2(z), & 0 \leq z < L \\ t e^{ik_1 z}, & z \geq L \end{cases} \quad (6)$$

gde je $k_1 = \sqrt{2m_e^* E_z} / \hbar$, $k_2 = \sqrt{2m_e^* (E_z + eVa)} / \hbar$, r i t su refleksiona i transmisiona amplituda, a funkcije $g_1(z)$ i $g_2(z)$ predstavljaju fundamentalna rešenja koja ispunjavaju sledeće granične uslove: $g_1(0)=1$, $g_1'(0)=0$, $g_2(0)=0$, $g_2'(0)=1$. Uz pomoć uslova neprekidnosti Ψ i Ψ'/m_e^* na razdvojnima površinama slojeva, određuju se potrebne konstante A_1 , A_2 , r i t , i može se izračunati traženi koeficijent transmisije kroz strukturu:

$$T_{\sigma_z}(E_z, B, Va) = \frac{k_2}{k_1} |t|^2 \quad (7)$$

Pretpostavljajući da ZnSe slojevi igraju ulogu emitera i kolektora priključenih na spoljašnje kontakte, možemo izračunati srednju spinski-zavisnu gustinu struje korišćenjem Tsu-Esaki formule za slučaj $B \neq 0$ [1,2]:

$$J_{\sigma_z}(B, Va) = J_0 B \sum_{l=0}^{\infty} \int_0^{\infty} T_{\sigma_z}(E_z, B, Va) \times \{f^l(E_z, E_F) - f^r(E_z, E_F)\} dE_z \quad (8)$$

gde je $J_0 = e^2 / (4\pi\hbar^2)$, a $f^l(E_z, E_F) = f_{FD}[E_z + (l+1/2)\hbar\omega_c + U_s, E_F]$ i $f^r(E_z, E_F) = f_{FD}[E_z + (l+1/2)\hbar\omega_c + U_s + eVa, E_F]$ su Fermi-Dirac-ove funkcije raspodele za levu i desnu elektrodu, respektivno. Izraz (8) važi pod pretpostavkom da se elektroni razmatraju na $T=0$, dok se paramagnetske primese nalaze na $T=4.2\text{K}$ [13]. Da bi se ocenio efekat spinskog filtriranja u posmatranoj strukturi, definiše se koeficijent spinske polarizacije transmitovanih elektrona u formi:

$$P(B, Va) = \frac{J_{\uparrow}(B, Va) - J_{\downarrow}(B, Va)}{J_{\uparrow}(B, Va) + J_{\downarrow}(B, Va)} \quad (9)$$

gde su J_{\uparrow} i J_{\downarrow} komponente gustine struje koje odgovaraju elektronima sa spinom-gore i spinom-dole.

3. NUMERIČKI REZULTATI

U numeričkom proračunu spinske polarizacije korišćene su sledeće vrednosti parametara [1]: $m_e^* = 0.16m_e$ (m_e je masa slobodnog elektrona), $T=4.2\text{K}$, $g_s=1.1$, $N_0\alpha=0.26\text{eV}$, $T_0=1.7\text{K}$. Vrednost diskontinuiteta provodne zone između ZnSe i $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ uzeta je u skladu sa Ref. [10]. Kao što je već objašnjeno, zbog pojave snažne $sp-d$ interakcije razmene, u prisustvu spoljašnjeg magnetnog polja dolazi do velikog povećanja u cepanju energija elektrona različitog spinskog stanja. Sa povećanjem vrednosti magnetnog polja, potencijal u paramagnetnim slojevima ($\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$) se povećava za elektrone sa spinom-gore (barijere postaju sve više, dok se dubina jama smanjuje) za vrednost $|U_{\sigma_z}|$ u skladu sa formulom (2). Analogno, elektroni sa spinom-dole doživljavaju produblivanje jame kako B raste.

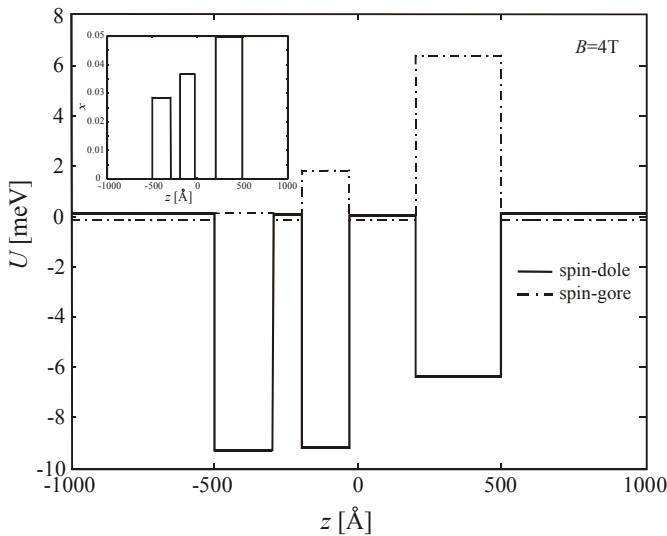
Očigledno je da će postojati velika razlika u transmisiji elektrona različitog spina kroz analiziranu strukturu (nalik onoj sa Slike 1) sastavljenu iz većeg broja slojeva polumagnetnog poluprovodnika. Dodatna asimetrija u sistemu može se proizvesti putem spoljašnjeg električnog polja, tj. napona polarizacije Va , koji predstavlja još jedan parametar za podešavanje vrednosti spinske polarizacije P , s obzirom da se vrednost i znak P mogu značajno razlikovati pri direktnoj i inverznoj električnoj polarizaciji.

Ideja ovog rada je da se adekvatnim variranjem konfiguracije sistema (podešavanjem dimenzija i sastava magnetnih slojeva) dizajnira struktura kod koje bi bile maksimalno izražene osobine spinske diode. Pod ovim se podrazumeva takva optimizacija parametara strukture da se za unapred odabranu vrednost spoljašnjeg magnetnog polja i

opseg polarizacionog napona ostvari što veći stepen filtriranja spina (u idealizovanom slučaju, $P \rightarrow -1$ za $V_a < 0$ i $P \rightarrow 1$ za $V_a > 0$). Variranje parametara u fizički ili tehnološki dozvoljenim granicama najpogodnije je izvršiti primenom nekog proverenog algoritma za globalnu optimizaciju, kao što je npr. algoritam za simulirano odgrevanje (simulated annealing – SA) [14]. SA je optimizaciona tehnika modelovana po analogiji sa procesom odgrevanja u metalurgiji, a njeno glavno svojstvo je da pored toga što uvek prihvata promene stanja koje poboljšavaju vrednost ciljne funkcije za optimizaciju, takođe može prihvatiti i pojedine promene koje je pogoršavaju, što omogućava da se izbegne upadanje u lokalne optimume. Ovo prihvatanje vrši se sa određenom verovatnoćom koja zavisi od kontrolnog parametra nazvanog “temperatura sistema”. Glavni zadatak prilikom primene SA algoritma je da se pravilno definiše funkcija koja izražava cilj optimizacije. Za problem razmatran u ovom radu, gde je potrebno da se ostvari što veća razlika koeficijenta spinske polarizacije za pozitivne i negativne vrednosti spoljašnjeg napona, prvo je testirana ciljna funkcija u elementarnoj formi:

$$F = P(V_{\max}) - P(-V_{\max}) \quad (10)$$

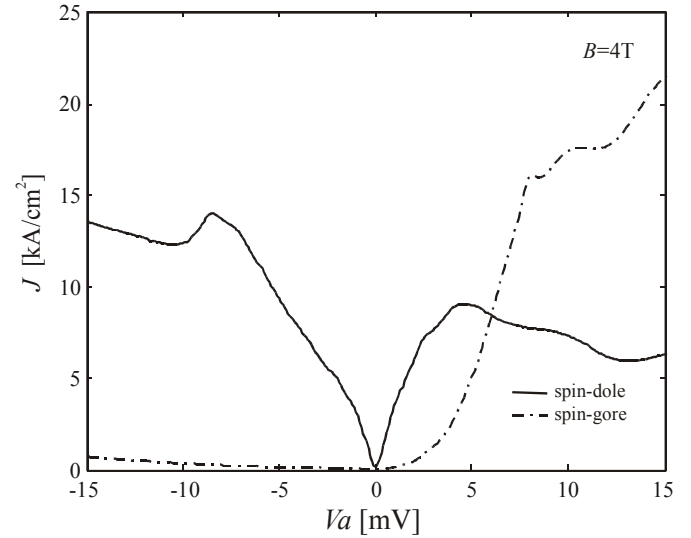
gde je $(-V_{\max}, V_{\max})$ dozvoljeni opseg vrednosti električne polarizacije. Broj paramagnetskih slojeva ograničen je na 5 (svaki sloj unosi dva slobodna parametra – debljinu i koncentraciju Mn jona) kako bi se ostvarilo prihvatljivo vreme konvergencije SA algoritma, i s druge strane zadržao relativno jednostavan profil strukture.



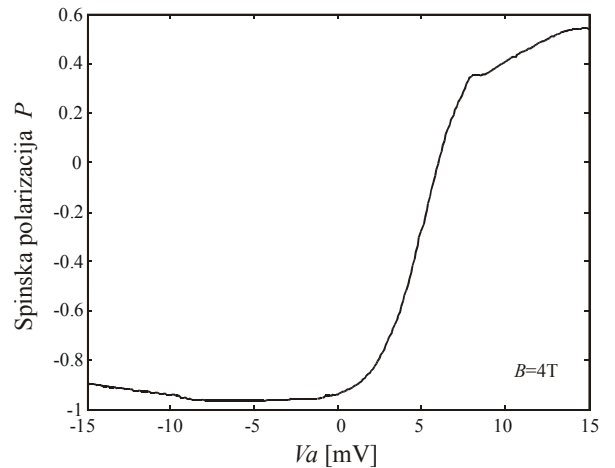
Sl.2. Dijagram dna provodne zone u optimizovanoj strukturi za elektrone sa spinom-dole (niz potencijalnih jama prikazan punom linijom) i sa spinom-gore (potencijalne barijere – isprekidana linija), u uslovima $B=4T$ i $V_a=0$. Koncentracija Mn jona u slojevima data je u insetu

Pošto je analiza ZnSe/ZnMnSe struktura u literaturi [1]-[3] pokazala da je sa porastom vrednosti magnetnog polja teže ostvariti pozitivnu spinsku polarizaciju (tj. dominaciju elektrona sa spinom-gore koji tuneluju kroz efektivne barijere), odabrana je vrednost $B=4T$ kako bi se optimizacionim postupkom popravio ovaj rezultat. Vrednost spoljašnjeg napona ograničena je na $V_{\max}=15$ mV, a ukupna širina paramagnetskih slojeva na $L=1000$ Å. Izračunati položaj Fermi-jevog nivoa glasi $E_F=5.7$ meV u odnosu na referentni nivo energije koji čini dno provodne zone u ZnSe barijerama dopiranim donorima koncentracije $N_d=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Koncentracija Mn jona u paramagnetskim slojevima limitirana je na niske vrednosti ($x \leq 0.05$) kako bi spinski-zavisna deo

potencijala U_{σ_z} bio uporediv sa potencijalom dna provodne zone u odsustvu spoljašnjih polja ($U_0(z)$). Optimalna struktura dobijena putem SA algoritma sa ciljnom funkcijom u obliku (10) i uz prethodno navedena ograničenja, prikazana je na Slici 2. Pokazuje se da se najbolji rezultati dobijaju kada su od 5 unutrašnjih slojeva zapravo samo 3 zaista paramagnetska, dok u preostala dva koja ih razdvajaju koncentracija Mn jona teži nuli. Odgovarajuće vrednosti gustine struje elektrona sa obe orijentacije spina date su na Slici 3, dok je rezultujući koeficijent spinske polarizacije prikazan na Slici 4.



Sl.3. Spinski-zavisna gustina struje u funkciji primenjenog spoljašnjeg napona za elektrone koji se transportuju kroz strukturu sa Slike 2, za $B=4T$



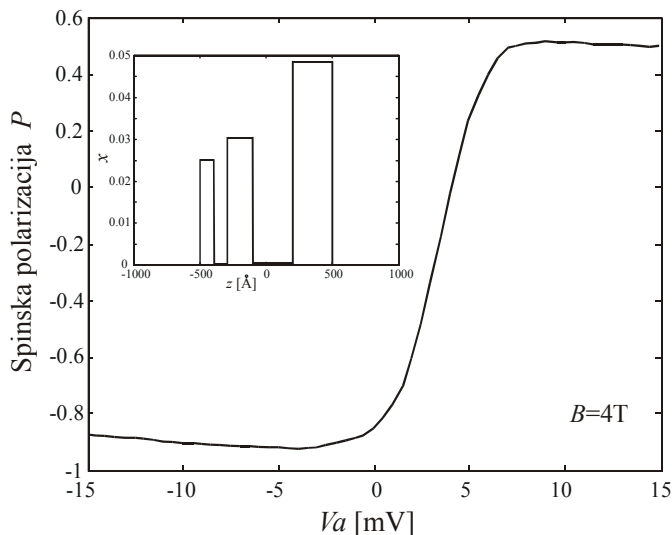
Sl.4. Koeficijent spinske polarizacije za strukturu sa Slike 2 u funkciji spoljašnjeg napona, za $B=4T$

Ovakvim optimizacionim postupkom ostvarena je velika razlika u stepenu spinske polarizacije pri pozitivnim i negativnim naponima [$P(-V_{\max})=-0.903$, $P(V_{\max})=0.544$], međutim, na delu karakteristike koji odgovara vrednostima $V_a > 0$ postoji prilična “zakrivljenost” funkcije $P(V_a)$. Kako bi se ovaj efekat ublažio, a zavisnost $P(V_a)$ približila onome što se očekuje od idealizovane spinske diode, ciljna funkcija za SA algoritam je izmenjena na sledeći način:

$$F = \int_{-V_0}^{-V_{\max}} |-0.9 - P(V)| dV + \int_{V_0}^{V_{\max}} |0.5 - P(V)| dV \quad (11)$$

gde je $V_0=5$ mV. Algoritam će sada varirati geometrijske

parametre u potrazi za minimumom funkcije F , sa ciljem da se "izravna" zavisnost $P(V_a)$ na "platoima" (-15mV, -5mV) i (5mV, 15mV), čak i po cenu da razlika $P(V_{\max})-P(-V_{\max})$ malo opadne po vrednosti. Ovakvim "dooptimizovanjem" dobijeni su rezultati predstavljeni na Slici 5, a predložena struktura zaista ispoljava mogućnosti spinskog filtriranja u kombinaciji sa osobinama diode. Na osnovu izloženog, očigledno je da su asimetrične strukture na bazi razblaženih magnetnih poluprovodnika veoma pogodne za analiziranje problema manipulacije spinom, i mogu biti izuzetno korisne u proučavanju fundamentalnih efekata na polju spintronike.



Slika 5. Koeficijent spinske polarizacije za $B=4T$ u funkciji električnog polarizacionog napona za strukturu sa "poravnatom" karakteristikom, dobijenu optimizacijom pomoću ciljane funkcije u formi (11). Odgovarajuća koncentracija Mn jona u slojevima data je u insetu

4. ZAKLJUČAK

Razmatrana je mogućnost manipulacije koeficijentom spinske polarizacije elektrona koji se transportuju kroz asimetričnu magnetski modulisanu kvantnu strukturu. Ustanovljeno je da se status spinske polarizacije može značajno izmeniti promenom polariteta spoljašnjeg električnog napona, kao i promenom geometrijskih parametara paramagnetnih slojeva. Predložene su dve strukture dobijene u optimizacionom postupku sprovedenom pomoću algoritma za simulirano odgrevanje koje u velikoj meri ispoljavaju osobine spin-filter dioda. Ovakva svojstva mogu biti značajna za razvijanje novih spinski-baziranih multifunkcionalnih poluprovodničkih naprava.

LITERATURA

- [1] Y. Guo, X.-Y. Chen, F. Zhai, B.-L. Gu, "Spin-filter diode based on $ZnSe/Zn_{1-x}Mn_xSe/Zn_{1-y}Mn_ySe/ZnSe$ heterostructures", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 4591-4593, 2002.
- [2] Y. Guo, H. Wang, B.-L. Gu, Y. Kawazoe, "Spin-polarized transport through a $ZnSe/Zn_{1-x}Mn_xSe$ heterostructure under an applied electric field", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 6614-6617, 2000.
- [3] Y. Guo, B.-L. Gu, Z. Zeng, J.-Z. Yu, Y. Kawazoe, "Electron-spin polarization in magnetically modulated quantum structures", *Phys. Rev. B*, vol. 62, pp. 2635-2639, 2000.

- [4] I. A. Buyanova et al., "On the spin injection in $ZnMnSe/ZnCdSe$ heterostructures", *Physica E*, vol. 13, pp. 538-541, 2002.
- [5] J.-Q. Lu, et al., "Spin-polarized transport through a magnetic heterostructure: tunneling and spin filtering effect", *Phys. Lett. A*, vol. 299, pp. 616-621, 2002.
- [6] I.C. da Cunha Lima "Spin-polarized transport in low-dimensional systems", *Microelectronics Journal*, vol. 34, pp. 475-480, 2003.
- [7] S. Das Sarma, J. Fabian, X. Hu, I. Žutić, "Spin Electronics and Spin Computation", *Solid State Commun.*, vol. 119, pp. 207-215, 2001.
- [8] X. Hu, S. Das Sarma "Spin-based quantum computation in multielectron quantum dots", *Phys. Rev. A*, vol. 64, art. no. 042312, 2001.
- [9] S. Lee, M. Dobrowolska, J.K. Furdyna, H. Luo, L. R. Ram-Mohan, "Magneto-optical study of interwell coupling in double quantum wells using diluted magnetic semiconductors", *Phys. Rev. B*, vol. 54, pp. 16939-16951, 1996.
- [10] N. Dai et al, "Observation of above-the barrier transitions in superlattices with small magnetically induced band offsets", *Phys. Rev. B*, vol. 50, pp. 18153-18166, 1994.
- [11] P. J. Klar, D. Wolverson, J.J. Davies, W. Heimbrodt, M. Happ, "Determination of the chemical valence band-offset for $Zn_{1-x}Mn_xSe/ZnSe$ multiple-quantum-well structures of high x ", *Phys. Rev. B*, vol. 57, pp. 7103-7113, 1998.
- [12] M. Syed, G.L. Yang, J. K. Furdyna, M. Dobrowolska, J. Kossut, "The 2s exciton in intermediate dimensionality structures", *Superlattices and Microstructures*, vol. 29, pp. 247-257, 2001.
- [13] J. C. Egues et al., "Spin filtering and magnetoresistance in ballistic tunnel junctions", *Phys. Rev. B*, vol. 64, art. no. 195319, 2001.
- [14] <http://www.netlib.org/opt/simann.f>

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku Republike Srbije, The Royal Society, UK i EPSRC, UK, na finansijskoj podršci

Abstract – We have performed the structural parameters optimization of $ZnSe/ZnMnSe$ semiconductor nanostructures, under the influence of both an electric and a magnetic field, in order to maximize the degree of spin polarization of the tunneling electrons. In Mn-based semiconductor systems, conduction electrons interact with $3d$ electrons of Mn ions, and this $sp-d$ interaction gives rise to a large Zeeman effect for spin-up and spin-down electrons. It is found that the corresponding spin-filtering coefficient changes significantly when the electrical bias is switched from forward to reverse, thus the proposed structure displays significant features of spin-filter diode. This originates from effective "lifting" of the potential for spin-up electrons which tunnel through actual potential barriers. The analyzed effect can be the base for designing spin-dependent fast tunneling electronic devices.

OPTIMIZATION OF SPIN POLARIZATION IN HETEROSTRUCTURES BASED ON SEMIMAGNETIC SEMICONDUCTORS

Jelena Radovanović, Vitomir Milanović, Zoran Ikončić, Dragan Inđin