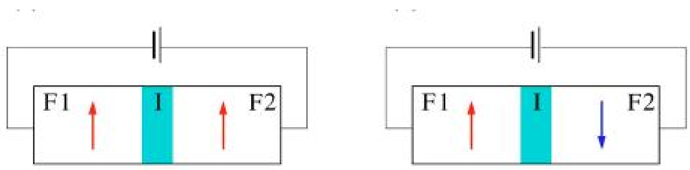
Kontrola spinskega transporta z električnim poljem

Seminar pri Fiziki nanosistemov

Ana Dergan, 11.7.2012

1 Tunelska magnetoupornost

Kot pove že njeno ime, je magnetoupornost lastnost snovi, da se v prisotnosti magnetnega polja spremeni upornost za prevajanje električnega toka; pri Hallovem pojavu, na primer, gre za transverzalno magnetoupornost. V tej nalogi se ukvarjam s tunelsko magnetoupornostjo. Raziskujem stik dveh feromagnetnih elektrod in vmesne izolatorske plasti (slika 1). Tok skozi stik je odvisen od magnetizacije feromagnetnih elektrod, še posebej je



Slika 1: Stik feromagnet 1 - izolator - feromagnet 2 (F1/I/F2). Tok skozi stik je odvisen od medsebojne orientacije magnetizacije v feromagnetnih elektrodah. Ta pojav imenujemo tunelska magnetoupornost.

odvisen od tega, ali sta magnetizaciji vzporedni ali kažeta v nasprotno smeri. Definicija tunelske magnetoupornosti je:

$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{G_P - G_{AP}}{G_{AP}}, \tag{1}$$

kjer sta R upornost in G prevodnost, indeksa A in AP pa označujeta anti-paralelno in paralelno magnetizacijo v elektrodah F1 in F2. Definirana je tudi "normirano magnetizacijo" za nek feromagnet - polarizacijo:

$$P = \frac{N_M - N_m}{N_M + N_m}, \tag{2}$$

kjer je N_M število spinov v smeri magnetizacije, N_m pa število spinov v nasprotni smeri. Če so vsi spini v kosu snovi poravnani, je polarizacija enaka $P = 1$, če je magnetizacija nič, je tudi polarizacija nič ($0 < P < 1$). Zgodnje eksperimente na F1/I/F2 stikih je Julliere [1] opisal z modelom v katerem je magnetoupornost odvisna samo od polarizacij v feromagnetih:

$$TMR = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2}, \tag{3}$$

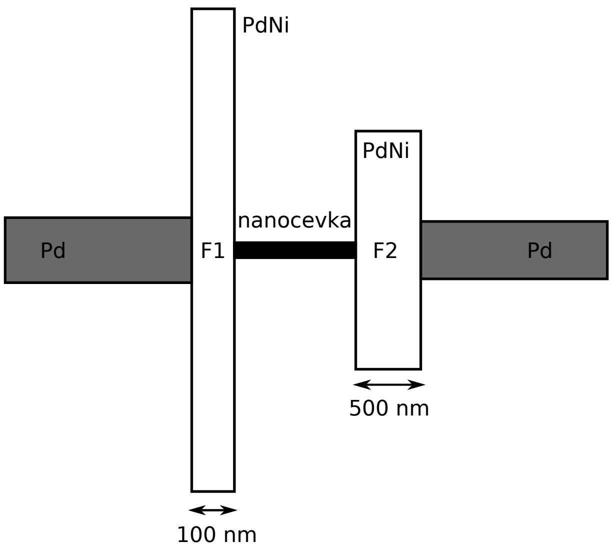
ki pa ne velja vedno - ne dopušča na primer negativne TMR, ki je sicer večkrat bila izmerjena [2].

2 Poskus: ogljikova nanocevka med feromagnetnima elektrodama

Opisala bomo poskus S. Sahoo in T. Kontos s sodelavci, objavljenega v Science novembra 2005 [2]. Predstavila bomo rezultate meritev, ter preverila teoretičen model zanje.

Opis poskusa

Poskus je nekoliko podoben stiku F/I/F, vendar imamo namesto izolatorske plasti med feromagnetnima elektrodama enoplastno ogljikovo nanocevko. Feromagnetni elektrodi sta iz zlitine paladija (70 %) in niklja (30 %) (paladij sam po sebi je paramagneten, a že pri majhni koncentraciji feromagnetnih nečistoč postane feromagneten). Zunanje magnetno polje (H_0) leži v ravnini elektrod, vzporedno z njunima daljšima stranicama. Elektrodi sta izrazito različne oblike, zato da imata različni koercivni polji (H_c^1, H_c^2). Pri neki velikosti zunanjega polja imata obe magnetizacijo poravnano s smerjo zunanjega polja; pri nekem drugem polju pa kažeta v različni smeri. Na tak način lahko s spreminjanjem velikosti zunanjega magnetnega polja spreminjamo magnetno polje v kontaktih iz paralelne v anti-paralelno konfiguracijo. Feromagnetni elektrodi sta povezani na Pd kon-



Slika 2: Feromagnetni elektrodi sta narejeni iz zlitine PdNi, med njima je enoplastna ogljikova nanocevka (single-wall carbon nanotube - SWCNT).

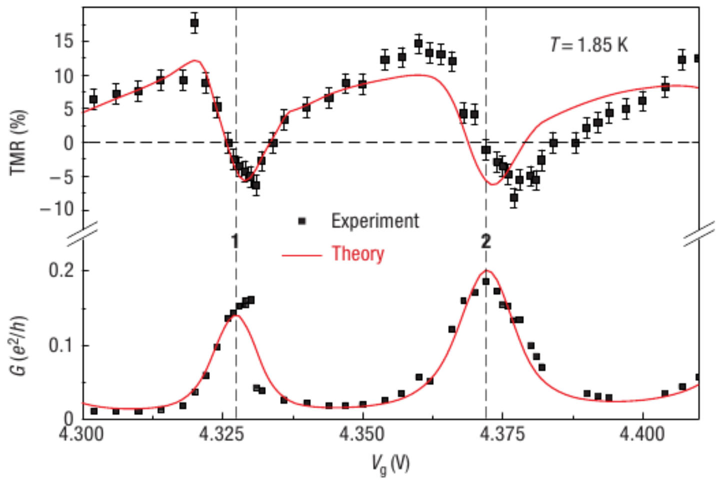
takta, med katerima merimo upornost. Z napetostjo V_g med substratom (SiO_2) in Pd kontakti spreminjamo energijske nivoje v nancevki [3].

Modeliranje eksperimentalnih rezultatov

Rezultati meritev prevodnosti G in tunelske magnetoupornosti TMR so predstavljeni na sliki 3. Prikazani sta dve od več izmerjenih resonanc.

Izkaže se, da lahko rezultate meritev dobro opišemo z modelom, v katerem nanocevko obravnavamo kot kvantno piko. Preden predstavim model za opisani eksperiment, bom zato na kratko povzela opis prepustnosti kvantne pike.

Prepustnost kvantne pike. Za kvantno piko je značilen diskreten set elektronskih energijskih nivojev (kot pri atomu), za razliko od (večjega kosa) trdne snovi, kjer imamo

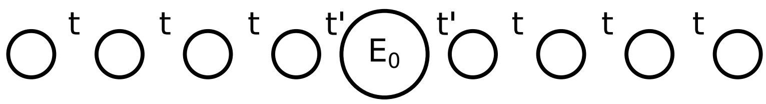


Slika 3: Rezultati meritev in simulacija [2]. TMR je definirana z enačbo 3, medtem ko je za prevodnost G prikazana povprečna vrednost prevodnosti pri obeh medsebojnih orientacijah polarizacije P in AP.

za elektrone zvezne gostote stanj. Če je kvantna pika sklopljena z dvema vodnikoma z zvezno gostoto stanj, je verjetnost za prehod elektrona preko pike največja, ko se energija vpadnega elektrona ujema z osnovnim/katerim od energijskih nivojev kvantne pike. Prepustnost smo izpeljali na podlagi Andersonovega modela (slika 4). Prepustnost T je funkcija parametrov t, t', E_0 in valovnega vektorja k. Za $k = \pi/2$ ima T obliko resonančne krivulje:

$$T = \frac{\Gamma^2}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4}, \tag{4}$$

kjer je $\Gamma = \frac{t'^2}{t}$. Takšen približek za $T(E)$ velja, če $E_0 \ll 2t$. Prevodnost G, ki jo merimo v eksperimentu, je sorazmerna s $T(E)$.



Slika 4: Andersonov model: prekrivalni integral med atomi v vodniku označimo s t, med atomi vodnika in kvantno piko pa t'. Energija nivoja elektrona v kvantni piki se za E_0 razlikuje od energije relevantnega stanja v atomih vodnika.

Modeliranje rezultatov eksperimenta. Če je TMR neničelna, to pomeni, da je prepustnost elektrona skozi kvantno piko odvisna od njegovega spina. Izberemo si takle model:

$$T_\sigma = \frac{\Gamma_L^\sigma \Gamma_R^\sigma}{(E - E_0^\sigma)^2 + (\Gamma_L^\sigma + \Gamma_R^\sigma)^2/4}, \tag{5}$$

kjer indeksa R in L označujeta desno in levo elektrodo. Parametra Γ sta odvisna od spina - izberemo si najenostavnejšo možno obliko odvisnosti: $\Gamma_{L,R}^\sigma = \gamma_{R,L}(1 + \sigma P_{L,R})$. Spin σ ima vrednost ± 1. S parametroma P_L in P_R označimo polarizaciji magnetizacije leve in desne elektrode. V paralelni orientaciji naj bo $P_L = P_R = P$, v anti-paralelni pa $P_L = -P$, $P_R = P$. Tudi energijski nivoji v kvantni piki so odvisni od spina, kot je razvidno iz oznake E_0^σ. Celoten izraz za E_0^σ je:

$$E_0^\sigma = E_0 - \epsilon_\sigma - \alpha \cdot e_0 \cdot V_g, \qquad \epsilon_\sigma = \kappa \cdot \sigma \cdot (P_L + P_R). \tag{6}$$

Parameter κ se določi s simulacijo, ravno tako kot P ter γ_L in γ_R. Izraz za ϵ_σ velja ob predpostavki $P \ll 1$. Parameter α povezuje spremembo napetosti V_g in spremembo energijskega nivoja kvantne pike. V članku [2] ni podana, zato jo določim s simulacijo. Prav tako iz opisa k modeliranju eksperimenta ni razvidno ali

- prikazani dve resonanci ($G(E)$) pripadata različnima spinskima stanjema/ polarizacijama pri nekem osnovnem stanju kvantne pike,
- gre za dva nivoja kvantne pike (dva različna E_0), pri katerih je razcep po spinu in polarizaciji manjši od razširitve posameznih resonanc.

Najprej bom zato preverila, za katero od teh dveh možnosti gre. V tabelo 1 zapišem pozicije energij v odvisnosti od spina in orientacije magnetizacij. Razcepa po spinu in

	P	AP
$\sigma = +1$	$E_0 - 2P\kappa - \alpha e_0 V_g$	$E_0 - \alpha e_0 V_g$
$\sigma = -1$	$E_0 + 2P\kappa - \alpha e_0 V_g$	$E_0 - \alpha e_0 V_g$

Tabela 1: Energije nivojev "kvante pike" za vse kombinacije spina in orientacije magnetizacije.

polarizaciji sta primerljivo velika, tako da bi morali v tem primeru imeti tri resonance v razmikih po $2P\kappa$. Tako smo se hitro prepričali, da resnici velja druga možnost.

Začnem s simulacijo resonanc $G(V_g)$. Tako lahko dobim vse parametre, ki jih nato samo vstavim v izraze za TMR. Parameter α skušam določiti iz širine resonanc na sliki 3. Iz enačbe 5 je razvidno, da širina resonance odvisna od AP/P orientacije in od spina. Vrednosti se med sabo razlikujejo za $P \cdot (\gamma_L \pm \gamma_R)$. Ker smo že prej predpostavili, da

	P	AP
$\sigma = +1$	$(\gamma_L + \gamma_R)(1 + P)$	$(\gamma_L + \gamma_R) + P(\gamma_R - \gamma_L)$
$\sigma = -1$	$(\gamma_L + \gamma_R)(1 - P)$	$(\gamma_L + \gamma_R) + P(\gamma_L - \gamma_R)$

Tabela 2: Vrednosti širine posameznih resonanc $\Gamma_L + \Gamma_R$ za vse kombinacije spina in orientacije magnetizacije.

je $P \ll 1$, približno velja $\Gamma_L + \Gamma_R \approx \gamma_L + \gamma_R$. Del razširitve pride tudi zaradi končne temperature – meritve so bile opravljene pri T=1.85, kar prinese razširitev (FWHM) 0.16 meV. Kot ugotovljeno zgoraj, so znotraj ene same izmerjene resonance so pravzaprav štiri: spin $\times$ polarizacija $\rightarrow 2 \times 2$. Razcep med njimi prav tako prispeva k razširitvi resonance. Glede na to, da razcepov ne opazimo, očitno velja

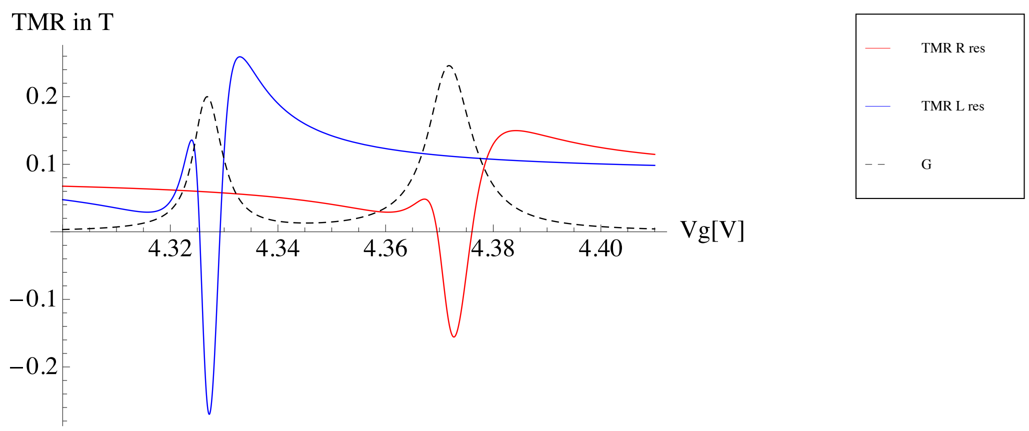
$$4P\kappa \ll (\gamma_L + \gamma_R + k_B T), \tag{7}$$

kar moramo po določitvi parametrov še preveriti. Tako zaenkrat ocenimo koeficient α na

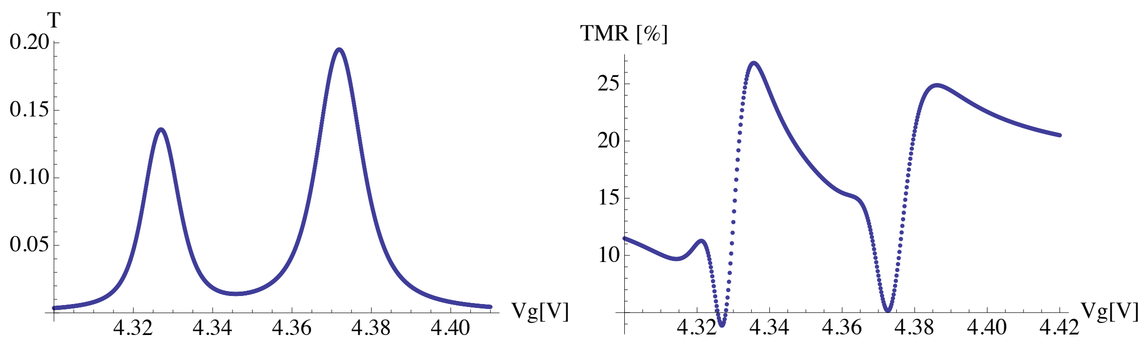
$$\alpha = \frac{\delta E}{\Delta U} = \frac{(\gamma_L + \gamma_R + k_B T/2)[eV]}{HWHF[V]}. \tag{8}$$

Izmerjeni širini resonanc (HWHM) sta: 4.5 mV za levo in 5.8 mV desno resonanco. Takoj vidimo, da parametra γ_L in γ_R nista čisto enaka za obe resonanci.

V članku [2] navajajo naslednje vrednosti parametrov: $P = 0.2$, $\kappa = 0.32$ meV, $\gamma_L = 0.014(0.028)$ meV in $\gamma_R = 0.5(0.85)$ meV za levo (desno) resonanco. Tako dobimo za parameter α približno 0.13 oz. 0.16 eV/V. Opazimo, da neenakosti 7 ne velja zelo dobro, saj $4P\kappa = 0.26$ meV in $\gamma_L + \gamma_R + k_B T/2 = 0.59(0.95)$ meV. Pričakujemo lahko, da je ocena α boljša pri desni resonanci. Natančneje kot z oceno en. 8 določim α s simulacijo. Izkaže se, da dobim najboljše ujemanje modela z meritvijo za $\alpha = 0.09$. Na sliki 5 je prikazano sta prikazana G in TMR brez konvolucije z odvodom Fermijeve porazdelitve, na sliki 5 je konvolucija upoštevana.



Slika 5: $G = (T_{AP} + T_P)/2$ in TMR (za levo in desno resonanco posebej) brez konvolucije z odvodom Fermijeve porazdelitve. Parametra E_0 za obe stanji pike sta -393 meV in -389 meV.



Slika 6: $G = (T_{AP} + T_P)/2$ in TMR (seštetа prispevka obeh resonanc) s konvolucijo z odvodom Fermijeve porazdelitve.

Moja simulacija $G(E)$ se dobro ujema z meritvijo in simulacijo iz [2]. Pri TMR so težave. Vrednost TMR daleč stran od resonance je $2P^2/(1-P^2)$, kar je za P=0.2 okrog 8%. Prispevka obeh resonanc (tudi morebitnih naslednjih) se seštejeta. Tako bi morali imeti na skrajnem desnem koncu, pri največjih V_g TMR že blizu 16%, ampak to ni razvidno iz simulacije v [2].

Literatura

[1] M. Julliere, *Physics Letters A* **54**, 225 (1975).

[2] S. Sahoo, T. Kontos, J. Furer, C. Hoffmann, M. Graber, A. Cottet, C. Schonenberger, *Nat. Phys* **1**, 99.

[3] S. Sahoo, T. Kontos, C. Schonenberger, C. Surgers, *Applied Physics Letters* **86**, 112109 (2005).