

Oponentský posudek

disertační práce na téma

Spinová dynamika v polovodičových strukturách založených na GaAs vypracované paní **Evou Schmoranzarovou (rozenou Rozkotovou)**

Tato disertační práce se zabývá studiem spinové dynamiky v magnetických i nemagnetických polovodičových systémech. Magnetické struktury jsou reprezentovány vrstvami GaAs s definovanou koncentrací příměsí Mn; (Ga,Mn)As vrstvy vykazují za nízkých teplot feromagnetické vlastnosti. Nemagnetické struktury jsou pak reprezentovány vhodně připravenými heterostrukturami GaAs/AlGaAs se silnou spin-orbitální vazbou; uspořádání umožňuje měřit Hallův jev opticky injektovaných spinově polarizovaných nosičů (spin-injection Hall effect). Výsledky této části práce jsou velmi významné pro realizaci spinového tranzistoru, na níž se autorka disertace podílela. Téma předložené práce je vysoce aktuální z hlediska současného dynamického rozvoje spintroniky a vzhledem k velkému aplikačnímu potenciálu spinového transportu.

Autorka ve své práci používá pump-probe metod ultrarychlé laserové spektroskopie v uspořádání na odraz. Analýzou polarizačního stavu sondovacího pulsu získává časově rozlišené signály, které identifikuje jako magneto-optický Kerrův jev a magnetický lineární dichroismus. V druhé části práce autorka studuje transport spinů pomocí elektro-optických Hallových měření specificky nanostrukturovaných vzorků.

Disertační práce je členěna do čtyř kapitol, přičemž vlastní text má asi 100 stran a obsahuje 151 odkazů na literaturu. První kapitola představuje spintroniku jako vědní disciplínu s perspektivními aplikacemi a zaměřuje se dále na vysvětlení struktury a vlastností GaAs heterostruktur. V druhé kapitole jsou stručně vysvětleny jednotlivé experimentální metody: časově rozlišená laserová spektroskopie aplikovaná na magnetooptiku a elektro-optická hallovská měření. Popis experimentálních metod je přehledný. Domnívám se jen, že by bylo vhodné, kdyby struktura z obr. 4.5(a) byla uvedena již v této části a stala se základem popisu specifické metody měření spinového Hallova jevu. Současný styl popisu nutí čtenáře střídavě konzultovat kapitoly 2 a 4, aby mohl měření detailně pochopit.

Třetí kapitola je zdaleka nejobsažnější a zahrnuje veškeré experimenty s magnetickými polovodiči (Ga,Mn)As a jejich interpretaci. Jedná se zejména o studium precese magnetizace vyvolané excitací laserovými pulsy. Experimentální výsledky jsou analyzovány pomocí Landau-Lifshitz-Gilbertovy rovnice popisující dynamiku magnetizace, do kterých byl dosazen podrobně diskutovaný výraz pro volnou energii popisující magnetickou anizotropii vzorku. Hybnou silou precese magnetizace ve vzorku je právě změna magnetické anizotropie vlivem ohřevu magnetické vrstvy ultrakrátkými laserovými pulsy. V precesním pohybu magnetizace se projevují jednotlivé magnetické módy vrstvy. V druhé části kapitoly je ukázána možnost manipulace směru osy snadné magnetizace (a tím i kontrola precese magnetizace) pomocí přiloženého mechanického napětí na vzorek. Autorka též poprvé pozorovala nedávno předpovězený jev, kdy precese magnetizace je spuštěna díky přenosu úhlového momentu absorbovaného kruhově polarizovaného světla na magnetické momenty v mřížce (Ga,Mn)As přes fotoexcitované nosiče náboje (tzv. optical spin transfer torque).

Pravděpodobně nejvýznamnějších výsledků z hlediska budoucích aplikací bylo dosaženo v kapitole 4, která se věnuje měření transportu spinů a spinovému tranzistoru na bázi Hallova jevu. Objev spinového transistoru může ovlivnit celkové směřování spintroniky. V rámci této práce byla připravena specifická nanostruktura obsahující PN přechod mezi kanály 2D elektronového a děrového plynu. Elektronovou litografií pak byla na této struktuře vytvořena

serie kolmo orientovaných hallovských nano-destiček, které umožnily prostorově rozlišenou detekci spinově polarizovaných opticky injektovaných nositelů náboje.

Autorka provedla v rámci své disertační práce opravdu velké množství experimentů a domnívám se, že byly provedeny velice pečlivě. Je možné též jednoznačně konstatovat, že bylo dosaženo velmi významných vědeckých výsledků. Z práce je zřejmé, že k těmto výsledkům autorka dospěla v rámci poměrně široké mezinárodní spolupráce. Chtěl bych tedy znát její osobní přínos k dosaženým výsledkům v případě detekce „spin transfer torque“ a při experimentech SIHE, které společně zřejmě tvoří nejvýznamnější vědecké výsledky celé disertace.

Dle mého názoru v textu chybí hlubší syntéza výsledků. Kapitola 3 čítá 60 stránek, na kterých je popsáno velké množství dílčích experimentů. Každá část je ukončena velmi krátkým závěrem čítajícím 4–5 řádků. Chybí ovšem celková diskuse a závěr této velmi objemné kapitoly; zde by mohly být uvedeny jednotlivé výsledky do souvislostí. Čtenář není v tomto smyslu veden ani v průběhu kapitoly; místy je obtížné zorientovat se k jakému cíli text v dané části směřuje a čtenář tak získá dojem velkého množství roztroušených výsledků.

Práce do značné míry postrádá pedagogickou propracovanost a celkovou přehlednost a domnívám se, že bude obtížně čitelná pro čtenáře nespécialistu v daném oboru. V následujících odstavcích uvádím několik takových příkladů a dále předkládám několik podnětů a dotazů, které mohou sloužit jako podklady k diskusi v rámci obhajoby:

- Saturovaná magnetizace M_s je velmi důležitá veličina, přesto je v práci zavedena pouze mimochodem jako součást členu energie tvarové anizotropie, který je ovšem zanedbatelný. Následně se — v tomto kontextu nepochopitelně — touto velmi malou veličinou ostatní veličiny normalizují (str. 25, 26). Čtenář nespécialista si význam této veličiny může začít domýšlet až od strany 30 pod rovnicí (3.13).

- Fenomenologický vzorec (3.21) je uveden na str. 40 bez jakékoli fyzikální diskuse. Ani v následující sekci nazvané „Our model of a helicity-independent signal“ se vysvětlení tohoto vzorce nenachází. Interpretace první části vzorce je až na stranách 51, 52 — jedná se ovšem o vzorec pozměněný v tom smyslu, že precesních komponent charakterizovaných koeficienty A_i může být více (tyto komponenty odpovídají vedeným magnetickým módům v tenké vrstvě, resonancím spinových vln – SWR). Fyzikální podstata posledního členu rovnice (3.21) je uvedena až na straně 58 ovšem velmi povrchně. Může autorka původ tohoto členu během obhajoby krátce diskutovat?

- Odkazy na obr. 3.31, 3.32, 3.33 a 3.57a,b jsou v textu pomíchané.

- Reference [152] uváděná v legendě obr. 4.2 neexistuje.

- Na str. 87 se autorka odvolává na diskusi extrinsického a intrinsického původu Hallova jevu v odstavci 4.1.1; v celé práci jsem však žádnou takovou diskusi nenašel.

- Zkratka SMA poprvé uvedená na str. 66 je vysvětlena až o několik stran později

- Na obr. 4.5(b) je proud fotodiodou v závěrném směru (značen I_c) roven $1 \mu\text{A}$. V textu na str. 90 se hovoří o 1 mA (proud značen I_{PH}) a na str. 93 při popisu experimentálních podmínek je rovněž uvedena hodnota 1 mA . Je to otázka teploty (300 K vs. 5 K) nebo se jedná o různé proudy? Prosím o komentář. Navíc v experimentu se používá závěrné napětí 10 V , avšak obr. 4.5(b) ukazuje průběhy pouze do -5 V .

- Při lineárním čtení textu není jasné, jaký čas se udává na vodorovné ose na obr. 4.6. Čtenář se to dozví mnohem později.

- Na základě vztahů (3.19-20) a velmi krátkého rozboru, který následuje, mi není zřejmé, proč je signál na obrázku 3.12 nutně magnetického původu. K jednoznačnému určení by bylo třeba diskutovat tvar funkcí Δf zavedených ve vztazích (3.20a,b). Může autorka uvést krátký komentář? Navíc, argumenty, že magnetický signál pochází pouze z vrstvy $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, se omezují pouze na citování reference [121], což je ústní sdělení kolegyně (str. 43).

- Na obr. 3.21 jsou uvedeny amplitudy A precesních pohybů pro vnější magnetické pole přiložené ve směru osy snadné magnetizace [010] a ve směru [110]. Z obrázku 3.21 není dle mého názoru patrné, že by $H \parallel [010]$ stabilizovalo osu snadné magnetizace a tím utlumilo oscilace. Navíc není jasné, jak je možné, že pro nulové pole dostává autorka dva různé výsledky. Prosím o komentář.
- Nezanedbatelný počet měření byl proveden na několika vzorcích o tloušťce 20 nm pocházejících z větší série; tyto vzorky jsou popsány v práci jen formou odkazu na literaturu.
- V sekci 3.4 se diskutuje dekompozice signálu na příspěvek magnetického lineárního dichroismu a na příspěvek magnetického Kerrova jevu. Vzhledem k tomu, že nejsou ukázány žádné fity úhlových závislostí, není jasné jaký jev odpovídá kterému členu v rovnici (3.21).
- V odstavci 3.5.1 jsou popsány jednotlivé rezonanční magnetické módy a jejich měření pomocí časově rozlišených magneto-optických experimentů. Pro nenulový vlnový vektor podél vrstvy se zde vlastně jedná o vedené magnetické vlny ve vlnovodu tvořeném tenkou vrstvou. Zajímalo by mě, jestli je též možné detekovat v těchto měřeních Damonův-Eshbachův mód (povrchový magnetický mód) a za jakých okolností. V některých vzorcích se pozoruje větší počet SWR rezonancí než v jiných. Čím je to způsobeno? Pouze tloušťkou nebo zde hrají roli i další parametry? Navíc na obr. 3.27 jsou ukázány 3 rezonance, zatímco diskuse výsledků znázorněných na obr. 3.11, které byly získané pro stejný vzorek, hovoří jen o jedné.
- Odstavec 3.5.3 by se měl pravděpodobně spíše jmenovat „Influence of magnetic inhomogeneity“
- Srovnáme-li oscilace signálu na obrázku 3.25 a 3.11 zjistíme, že tlumení oscilací je diametrálně odlišné. Čím je to způsobeno? Magnetickou kvalitou vzorku?
- Z rovnice (3.27) není zřejmé, že ω_n je úměrné H_n (str. 52). To by byla pravda pouze tehdy, kdyby člen ΔH_n byl v rovnici (3.27) dominantní. Chybí diskuse.
- Je zdůrazněna důležitost experimentálně určené konstanty D (exchange spin stiffness), ale není popsán její fyzikální význam (str. 52, 54).
- Název odstavce 3.5.4 „Spatio-temporal evolution of the SWR modes“ vnímám jako určování časové změny nehomogenního rozložení magnetizace. O tomto jevu se ovšem zde nehovoří. Název by podle mého názoru měl spíše znít: „Anisotropy of the magnetization precession“.
- Na str. 76-77 a z obr. 3.35 autorka vyvozuje, že změnou hloubky minima volné energie v okolí osy snadné magnetizace je možné vysvětlit pozorovaný útlum oscilací v měřených závislostech. Dle mého názoru (a jak bylo ukázáno v práci dříve), amplituda oscilací závisí zejména na vazbě magnetických momentů na teplotní změny v důsledku absorpce ultrakrátkých optických pulsů. Není mi jasné, jakou roli v tomto procesu může hrát hloubka minima volné energie.

Přes výše uvedené výhrady hodnotím vědeckou úroveň předložené disertační práce jako velmi dobrou. Autorka dosáhla několika vynikajících vědeckých výsledků. Disertační práce dle mého názoru splňuje požadavky kladené na práce tohoto druhu a ukazuje schopnost autorky provádět samostatnou vědeckou práci; proto ji doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 23.5.2012

Dr. Petr Kužel
Fyzikální ústav AVČR
Na Slovance 2
182 21 Praha 8