

Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě
Univerzity Karlovy

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> posudek vedoucího | <input checked="" type="checkbox"/> posudek oponenta |
| <input type="checkbox"/> bakalářské práce | <input checked="" type="checkbox"/> diplomové práce |

Autor: **Miloslav Surýnek**

Název práce: **Optická spektroskopie magneticky uspořádaných materiálů**

Studijní program a obor: **Fyzika – optika a optoelektronika**

Rok odevzdání: **2016**

Jméno a tituly vedoucího/opponenta: **Mgr. Hynek Němec, Ph.D.**

Pracoviště: **Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.**

Kontaktní e-mail: **nemec@fzu.cz**

Odborná úroveň práce:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Věcné chyby:

- téměř žádné vzhledem k rozsahu přiměřený počet méně podstatné četné závažné

Výsledky:

- originální původní i převzaté netriviální kompilace citované z literatury opsané

Rozsah práce:

- veliký standardní dostatečný nedostatečný

Grafická, jazyková a formální úroveň:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Tiskové chyby:

- téměř žádné vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet četné

Celková úroveň práce:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Práci

- doporučuji
 nedoporučuji

uznat jako diplomovou/bakalářskou.

Navrhuji hodnocení stupněm:

- výborně velmi dobře dobře neprospěl/a

Slovní vyjádření, komentáře a připomínky oponenta:

Předložená diplomová Miloslava Surýnka se zaměřuje na charakterizaci časového průběhu magnetooptické odezvy v heterostruktuře GaAs/AlGaAs metodou optické excitace a sondování; jejím cílem je zejména určení doby rozfázování spinů elektronů, a prozkoumání vazby s polarizací atomových jader.

První polovina práce (kapitoly 1 – 7) je věnována teoretickému popisu spinové dynamiky a související magnetooptické odezvy, a popisu experimentálních metod (spektroskopie optické excitace a sondování s využitím femtosekundového laserového zesilovače a vydělovače laserových pulzů, metoda rezonančního spinového zesílení). V této části je uvedena většina podstatných informací; oceňuji stručné připomenutí původu a vlastností spinu. Bylo by bývalo vhodné se více zaměřit na teoretický rozbor zkoumané problematiky; postrádám například vztah mezi spinovou dynamikou a měřenými signály, a diskusi saturace Kerrovy reflektivity s rostoucím excitačním výkonem. Řada z uvedených informací se několikrát zbytečně opakuje v druhé polovině práce.

Originální výsledky jsou prezentovány ve druhé části (kapitoly 8 – 11). Nejobsáhlejší experimentální výsledky zahrnují měření Kerrovy rotace v závislosti na čase po fotoexcitaci, na excitačním výkonu a na frekvenci vydělení laserových pulzů (kapitola 8); na základě těchto měření byla odhadnuta střední doba rozfázování elektronových spinů. Dále byl proměřen průběh spinové polarizace jader a byla stanovena velikost jaderného magnetického pole (kapitola 9). V kapitole 10 byla otestována metoda excitace a sondování se spektrální filtrací. V poslední kapitole byly získány velmi zajímavé experimentální výsledky, popisující velikost amplitudy Kerrovy rotace na směru a velikosti elektrického proudu protékajícího heterostrukturou.

Diplomant bezpečně zvládl náročnou techniku optické excitace a sondování v magnetickém poli. Tato metoda byla navíc používána za velmi složitých podmínek, kdy charakteristické časové škály dějů ve studovaném materiálu byly delší, než časový odstup mezi jednotlivými laserovými pulzy, a kdy navíc závislost měřeného signálu na excitačním výkonu byla silně nelineární. Slabinou práce je interpretace změřených výsledků. Je například správně identifikován rušivý vliv parazitních laserových pulzů z vydělovače, v navazujících fitovacích modelech je ale uvažován jen omezeně. Mohly být také provedeny experimenty s nízkými excitačními výkony, při nichž by byl vliv parazitních pulzů potlačen (nebo měla být nutnost těchto experimentů alespoň jasně diskutována). Práci nepomáhá ani lehce nepřehledná prezentace, neohrabané formulace (zejména v kapitolách 7 a 8), a množství balastu především ve druhé polovině práce (například úvodní věty kapitoly 7). Příklady důležitějších věcných záležitostí jsou uvedeny níže. V neposlední řadě postrádám větší rozhled nad studovanou problematikou: je citováno pouze 20 prací, z nichž navíc polovina pochází z MFF.

Přesto tyto dílčí výhrady práce velmi dobře splňuje požadavky kladené na diplomovou práci (zvládnutí náročné experimentální metody, rozsáhlé experimentální výsledky, základní interpretace pozorovaných dat, obstojná prezentace výsledků). Ocenil bych, kdyby připojené odborné dotazy byly zodpovězeny při obhajobě.

- Kapitola 1.4.1. Není zmíněna doba života fotoexcitovaných nosičů náboje/spinu, přestože se v experimentech typu optická excitace a sondování jedná o velmi důležitý charakteristický čas. Není jasné, co v uvedeném teoretickém popisu vyjadřuje časově proměnné pole $\mathbf{B}_t(t)$.
- Kapitola 2.2: Symboly S_A a S_B by měly označovat spíš změnu signálů v důsledku fotoexcitace než přímo měřené signály (zejména v rovnici 22).
- Kapitola 2.3: Zcela schází komentář k převzatému obr. 2.3 – obrázek tak působí zbytečně.

- Kapitola 3. Signál v případě $T_2 \gg t_{\text{rep}}$ není chaotický, ale deterministický; měl by být popsán rovnicí 3.1, která nepůsobí jako možný zdroj chaosu.
- Kapitola 4. Není uveden význam symbolu b_n .
- Kapitola 5. Perioda opakování laserových pulzů je 12.5 ns; parazitní signál lze proto očekávat v časech 12.5 ns, 25 ns, 37.5 ns atd. Signál okolo 30 ns je spíše způsoben odrazy v propojovacích kabelech; totéž se pravděpodobně týká i dalších píků na obr. 5.1. Bylo by vhodné konfrontovat pozorované signály se specifikacemi zařízení (pro vydělovač pulzů 3980 od Spectra Physics je kontrast parazitních pulzů udávaný v katalogu lepší než 1:300).
- Kapitola 6. Uvedení schématu v měřítku nebo alespoň vyznačení skutečných vzdáleností by přispělo k lepší představě o experimentálním uspořádání a možných difúzních procesech.
- Kapitola 7. V této části se vyskytuje řada nepřesných formulací, jako například „... signál z detektorů je analyzován pomocí fázově citlivé detekce (lock-in detektorů), jež jsou citlivé na frekvenci optického přerušovače. ... Časové zpoždění lze pomocí přesné optické dráhy volit s krokem až ve femtosekundách, tímto způsobem dosahujeme vysokého časového rozlišení.“ Pokud by výstupní signál z lock-inu skutečně závisel na frekvenci optického přerušovače, znamenalo by to, že signál je ovlivněn ději probíhajícími na časové škále periody přerušovače (typicky milisekund). Časové rozlišení je omezeno především délkou laserového pulzu, nikoliv krokem zpoždovací dráhy.
- Kapitola 8.1. Proč dochází ke změně fáze Kerrovy rotace až ~ 100 ps po fotoexcitaci? K interferenci může docházet pouze po dobu trvání impulzů (~ 100 fs). Na straně 42 má být 2 μs místo 2 ms. Závěr této části „Zjistili jsme tedy, že z měření za použití vydělovače pulzů by se mohlo zdát, že spinové relaxační doby studovaného systému jsou velmi dlouhé. Ukázali jsme ale, že toto zdání je způsobeno přítomností parazitních pulzů, na které je potřeba při použití vydělovače myslet“ je nedostatečný; bylo by vhodné spinovou dobu života odhadnout třeba řádově, nebo alespoň stanovit její horní či dolní mez.
- Na straně 45 je uvedeno, že „i malá energie v excitačním pulzu dokáže budit spinovou polarizaci, takže vliv parazitních pulzů nemusí být zanedbatelný.“ Toto je velmi důležité tvrzení. Platí ale pouze pro excitační pulzy s vysokou energií, kdy dochází k saturaci Kerrovy rotace. Z toho plyne, že vliv parazitních pulzů je silně potlačen pro nízké excitační výkony: mohla být proto systematičtěji prozkoumána oblast nízkých výkonů (i když rozumím, že taková měření jsou pravděpodobně velmi obtížná, aby byl dosažen rozumný poměr signál/šum).
- Proč se křivky pro vydělení 160 a 80 na obr. 8.3 neškálují lineárně se stupněm vydělení?
- Diskuse na straně 53 patří mezi největší přínosy diplomové práce. Je škoda, že jí nebyla věnována větší péče. Věta „... elektronový podsystém ... je ochráněn před rekombinací s dírami bariérou“ je v rozporu s textem na straně 32, kde je správně uvedeno, že „Elektron-děrová rekombinace je potlačena vnitřním elektrickým polem, jež odvádí díry směrem k povrchu a elektrony opačným směrem“.
- Snaha stanovit na závěr 8. kapitoly dolní odhad doby rozfázování T_2 je chvályhodná, leč mohl být poměrně jednoduše odhadnut a zahrnut i vliv parazitního pulzu (s ohledem na amplitudy prezentované na obr. 8.8 bude nakonec dolní odhad pro T_2 cca o 30% nižší).
- Na straně 63 nepředstavuje τ poločas, ale střední dobu nabíjení. Rovnice (9.5) mohla být parametrizovaná čitelněji; např. místo poněkud obskurního času T_0 a faktoru 2 před exponenciálou mohlo ve vztahu vystupovat počáteční jaderné magnetické pole.

- Diskuse na straně 65. Diplomant odhadl velikost spinové polarizace $|S|$ na základě faktoru ztráty spinové polarizace f , jehož hodnoty se v citované literatuře [19] odhadují na 1% – 10%. Zápis $|S| = (10 \pm 5)\%$ je v této situaci zavádějící. Nebylo by naopak možné odhadnout maximální dosažitelnou spinovou polarizaci $|S|$ a tak lépe kvantifikovat faktor ztráty polarizace?
- Kapitola 10.1. Jeden z použitých filtrů byl FB820-10, jehož charakteristiky nejsou v práci uvedeny. Znaménko signálu by mělo souviset s helicitou použitých svazků; proto by mělo být možné jednoznačně rozhodnout, jestli pozorované znaménko je správně či nikoliv.
- Strana 77. Doporučuji odhadnout velikost Jouleova tepla. Přiložené napětí sice není specifikované; předpokládám-li 10 V a protékající proud $10 \mu\text{A}$, je disipovaný výkon 0.1 mW, což je výrazně méně, než výkon excitačního svazku (jednotky mW). Za těchto okolností bych neočekával zásadní vliv ohřevu vzorku elektrickým proudem (pokud by ohřev proudem měl zásadní vliv, pak by daleko dramatičtější jevem byl ohřev excitačním a možná i sondovacím laserovým pulzem).
- Obr. 11.2. Měla by být uvedena orientace magnetického pole vůči protékajícímu proudu: to je důležitější informace, než jestli je vzorek napájen proudem mezi kontakty 1-2 nebo 1-4.
- Kapitola 11. K pozorovaným závislostem Kerrovy rotace na velikosti a směru protékajícího proudu mohlo být nastíněno alespoň elementární vysvětlení. Výraznější ovlivnění elektronového pod systému bych očekával spíše v elektrickém poli orientovaném kolmo k rovině vzorku.

Otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

- Pozorovaná rychlost poklesu diferenciální reflektivity (u které bych vzhledem k sondování těsně nad zakázaným pásem očekával, že bude udávat koncentraci nerovnovážných nosičů) je mnohem větší, než rychlost poklesu amplitudy Kerrovy rotace (obr. 8.1). Můžete tento rozpor vysvětlit? V diskusí na straně 53 uvádíte, že rekombinace se zrychluje s rostoucím excitačním výkonem – můžete toto tvrzení doložit například měřením diferenciální reflektivity? Jaké jsou charakteristické rekombinační časy pro malé a vysoké excitační výkony? Můžete odhadnout kvazirovnovážnou koncentraci fotoexcitovaných nosičů náboje/spinu?
- Čím je způsobena saturace Kerrovy rotace při nárůstu excitační energie, pozorovaná v kapitole 8.1? Proč roste spinová polarizace při zvětšování kapacity elektronového pod systému?
- Jaká je amplituda parazitních pulzů z vydělovače? Čím je způsoben velmi výrazný signál při vypnutém laseru (obr. 5.3)? Proč v části 8.2 uvažujete pouze jediný hlavní a parazitní pulz, a zanedbáváte jejich periodická opakování? Tato aproximace odpovídá (pro zpoždění mezi 0 a t_{rep}) případu s velmi krátkou relaxační dobou ($T_2 \ll t_{\text{rep}}$), kdy rezonanční metoda dává stejnou informaci, jako měření časového průběhu Kerrovy rotace. Pro záporná zpoždění navíc tato aproximace není správně (bylo by potřeba uvažovat předchozí hlavní a parazitní pulz); očekával bych, že toto zanedbání má za následek pozorovaný časový vývoj amplitud $A_{\text{Hlavní}}$ a $A_{\text{Parazitní}}$ (který je nekompatibilní s modelem 3.1). Můžete diskutovat, jestli může být signál ovlivněn i sondovacím pulzem (sondovací pulz je mnohem silnější, než kterýkoliv parazitní pulz – uváděný poměr výkonů excitačního a sondovacího svazku je 5:1 nebo 10:1)?

- Měření Kerrovy rotace na obr. 8.2a a 9.1b byla prováděna za velmi podobných podmínek; přesto je nárůst amplitudy oscilací ve druhém obrázku výrazně větší. Můžete vysvětlit proč? Jak by se projevilo vzájemné prostorové posunutí excitačního a sondovacího svazku – může způsobit třeba podobný nárůst signálu s rostoucím zpožděním, jako na obr. 9.2?
- V kapitole 10 jsou prezentována měření Kerrovy rotace s různými centrálními vlnovými délkami laseru. V čem se liší sondování nad a pod zakázaným pásem? Můžete nastínit teorii optické odezvy v obou případech?
- Můžete komentovat, která charakteristika křivek na obr. 3.2 nejlépe vystihuje dobu rozfázování T_2 ? Jinými slovy, je možné z těchto složitých závislostí alespoň zhruba odhadnout čas T_2 ?

V Praze dne 22. srpna 2016

Hynek Němec