

Oponentní posudek disertační práce Nadi Tesařové
“Investigation of magnetization dynamics in GaMnAs by ultrafast laser spectroscopy”

Školitel: Doc. RNDr. Petr Němec, Ph.D.

Tématem doktorské disertační práce dodané k posouzení je studium fyzikálních vlastností filmů GaMnAs, zejména magnetizační dynamiky vyvolané ultrakrátkými polarizovanými optickými pulsy a souvisejících fyzikálních procesů. Kromě „pevnolátkařského“ materiálového výzkumu perspektivního feromagnetického polovodiče GaMnAs práce zahrnuje především vývoj experimentálně velmi náročné metody ultrarychlých excitací (vyvolaných sub-pikosekundovými optickými pulsy) spojených s časově rozlišeným měřením změny magnetizace excitovaného filmu, přičemž optický sondovací svazek je od excitačního svazku oddělen děličem svazku a zpožděn o nastavitelnou dobu, a toto měření se kvůli odstranění šumu mnohonásobně opakuje a průměruje (tzv. „pump-and-probe“ stroboskopické měření). Vyvinutá metoda umožnila úspěšnou analýzu procesů dynamiky magnetizace vyvolané čistě fotonicky (bez použití pulsu magnetického pole a bez přivedení spinově-polarizovaných elektronů z externího proudového zdroje), zejména optický „spin-transfer torque“ a „spin-orbit torque“, čímž poskytuje možnost řádově rychlejšího ovládní i sondování magnetického uspořádání feromagnetických látek než při použití standardních metod. Tato problematika je předmětem výzkumu pouze několika málo špičkových zahraničních laboratoří a výzkum spojený s konkrétními perspektivními materiály je teprve v začátcích. O aktuálnosti řešeného tématu proto nemůže být nejmenších pochybností, o čemž svědčí i řada přijatých publikací v renomovaných zahraničních časopisech.

Disertační práce je zhotovena v rozsahu necelých 170 stran a je zpracována formou vydaných publikací se shrnujícím úvodem. Shrnující úvod v rozsahu přibližně 40 stran (včetně citované literatury a seznamu zkratk a symbolů) je členěn následovně: Po úvodní kapitole následuje kapitola o studovaném materiálu GaMnAs popisující jeho fyzikální vlastnosti a zahrnující tabulku vzorků vyrobených pro experimentální měření. Dále následuje (třetí) kapitola o magnetooptických jevech využitých v optické sondovací metodě s jejich stručnou fyzikální interpretací. Čtvrtá kapitola popisuje optickou sondovací metodu, která umožňuje odvození dynamické trajektorie magnetizace z magnetooptických měření. Pátá kapitola se zabývá jednotlivými dynamickými procesy, které je metoda schopna monitorovat, tj. dynamikou spojenou s tepelnými procesy a dynamikou vyvolanou pomocí optického „spin-transfer torque“ a „spin-orbit torque“. Závěrečná, šestá kapitola se zabývá možnostmi metody detekovat mikromagnetické parametry feromagnetické látky, které vystupují v Landauově-Lifshitzově-Gilbertově (LLG) rovnici a které určují dynamiku magnetizace. Shrnující část disertační práce je zakončena zmíněným seznamem citované literatury a seznamy zkratk a symbolů).

Po shrnujícím úvodu následuje devět dodatků, z nichž prvních šest jsou články již časopisecky vydané, sedmý je v recenzním řízení a osmý přijatý. Těmto dodatkům předchází jejich seznam, který obsahuje popis příspěví autorky disertace k jednotlivým publikacím. Devátý dodatek je dvoustránkový popis experimentálního uspořádání pro měření časově rozlišené magnetooptiky, včetně názorného schématu. Jednotlivé dodatky (články) jsou logicky provázány se shrnujícím úvodem, doplňují veškeré technické detaily a výsledky, které se do úvodu nevešly, a jsou na příslušných místech úvodu citovány. První článek se zabývá přípravou materiálu ve vztahu k magnetooptické odezvě, druhý studuje materiál kvazistaticky pomocí magnetooptické spektroskopie, další dva prezentují měření opticky indukované magnetizační dynamiky pomocí optické metody „pump and probe“, pátý článek prezentuje odvození 3D trajektorie magnetizace v rámci dané metody. Šestý článek se detailněji zaměřuje na časové měření procesu zvaného „spin-transfer torque“, zatímco sedmý analogicky zkoumá proces „spin-orbit torque“. Poslední, osmý článek se v detailu zabývá principy monitorování materiálových vlastností GaMnAs pomocí vyvinuté metody. Zde bych chtěl poznamenat, že se verze článku použítá v disertaci (pod názvem „The essential role of carefully optimized synthesis for elucidating intrinsic material properties of (Ga,Mn)As“) liší od verze zveřejněné na <http://arxiv.org> (pod názvem „Establishing micromagnetic parameters of ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As“), což je pravděpodobně důsledek revize v průběhu recenzního řízení. V disertaci je rovněž vynechán doplňkový materiál stažitelný ze serveru <http://arxiv.org>, který je nicméně v zestručněné formě uveden v šesté kapitole shrnujícího úvodu.

Po formální stránce je disertační práce zpracována na vysoké úrovni, kterou v současnosti umožňuje moderní počítačový software pro zpracování textů a grafiky (to se týká shrnujícího úvodu a dosud nevydaných článků; grafické zpracování vydaných článků je samozřejmě věcí příslušných časopisů). Pokud mohu posoudit jazykovou úroveň, je práce rovněž napsána na vysoké gramatické i stylistické úrovni, prakticky bez gramatických chyb a bez překlepů. Co se týče použité terminologie, rovněž jsem nenašel žádné nesprávné ani

problematické použití.

Především bych ale rád ocenil vysokou vědeckou úroveň práce, vyplývající už ze samotného výčtu časopisů, v nichž byly publikovány jednotlivé články-dodatky (zvláště Physical Review Letters a časopisy NPG, mající extrémně náročné požadavky recenzního řízení). Co se týče práce jako celku, tak poskytuje ucelený přehled optické pumpovací a sondovací metody, jí detekovatelných fyzikálních jevů a využívaných magnetooptických jevů, ale hlavně demonstuje nové vynikající výsledky dosažené pomocí této metody. Za stěžejní výsledky považuji schopnost metody detekovat a vzájemně rozlišovat jednotlivé způsoby interakce polarizovaných fotonů s feromagnetickým materiálem, při nichž se různě excituje magnetizace a vyvolává dynamický proces (excitace doprovázená tepelným procesem a netepelné excitace nazývané „spin-transfer torque“ a „spin-orbit torque“). Tato metoda bude zajisté s výhodou využitelná v magnetooptické komunitě při studiu mnoha jiných jevů i na jiných materiálech, např. na feromagnetických slitinách.

Co se týče vlastního příspěvní autorky disertace k výzkumné práci a k tvorbě jednotlivých publikací, tak se majoritně podílela na konstrukci experimentálního zařízení, na měření experimentálních dat i jejich analýze včetně numerického modelování, a v neposlední řadě i na samotném publikačním procesu. O osobním významném příspěvní autorky k prezentovanému výzkumu a dosaženým výsledkům proto rovněž nemůže být nejmenší pochybnost.

K obecné diskusi na plánované obhajobě disertační práce bych rád navrhl několik dotazů a připomínek:

1. Na konferencích zaměřených na magnetooptiku jsem se v posledních pár letech rovněž setkával s čistě optickým vyvoláváním magnetizační dynamiky, ale na jiných materiálech a v transmisním módu, přičemž byl tento jev prezentován jako „inverzní Faradayův efekt“. Je možné efekty prezentované v disertaci, nebo aspoň některé z nich identifikovat jako „inverzní Kerrův efekt“?
2. Jsou používané rovnice popisující dynamiku magnetizace aplikovány pouze v objemové verzi (využívající pouze magnetokrystalickou anizotropii), nebo byla někde uvažována i tvarová anizotropie (demagnetizační pole tenkého filmu)?
3. Bylo by možné či výhodné aplikovat metodu na geometricky a/nebo materiálově bohatší a složitější struktury? Např. používat různé substráty, mezivrstvy a krycí vrstvy umožňující vyšší reflektanci (využít odrazivější substrát a konstruktivní interferenci v reflexním módu), samozřejmě v oboru vlnové délky pumpovacího a sondovacího světla? Nebo dokonce struktury s laterálním patternem (stranově strukturované pomocí litografie)? V tomto případě by LLG rovnice musela zahrnovat i efektivní pole výměnné interakce a demagnetizační pole mikromagnetů.
4. Jak dlouho trvá měření jednoho dynamického procesu (trajektorie magnetizace po excitování)?
5. Zajímala by mě podrobnější diskuse ohledně fokusování pumpovacího a sondovacího světla. Na obr. A9.1 (poslední strana disertace) je toto fokusování zprostředkováno (pro pumpu i sondu) společnou čočkou „L“. Jakým způsobem je optimalizována velikost stopy světelného svazku pumpy a sondy a jejich vzájemného překrývání? (To zřejmě souvisí se snahou homogenního osvětlování, ale zároveň se snahou o co nejvyšší intenzitu pro kvalitní excitaci i citlivé magnetooptické měření.) Rovněž bych ocenil podrobnější popis jednotlivých optických komponent (např. druhy polarizátorů a fázových destiček a důvody pro jejich konkrétní výběr, zvláště poslední polarizátor, který rozděluje svazek na dva podsvazky putující do detektorů A a B). Nastávaly problémy s vysokou koherencí laserového světla? Chopper zřejmě sekundárně slouží i pro redukci koherence.
6. Existuje nějaká budoucí vize využití této metody v optickém přepínání a čtení magnetických pamětí (s uvažováním nalezení materiálů fungujících při pokojové teplotě)?

Závěr: Na základě svých předchozích vyjádření se domnívám, že předkládaná práce více než dostatečně dokládá schopnosti autorky věnovat se samostatně vědecké výzkumné činnosti a velmi přesvědčivě dokládá její příspěvek k rozvoji daného oboru. Práce podle mého názoru splňuje všechny požadavky kladené na doktorskou disertační práci, a proto ji jednoznačně **doporučuji k obhajobě** za účelem získání vědeckého titulu Ph.D.