

Oponentský posudek dizertační práce Lukáše Nádvorníka „Relativistic spintronic effects in semiconductor structures“

Předložená dizertační práce Lukáše Nádvorníka je věnována studiu spinového transportu a dynamiky v heterostrukturách nemagnetického polovodiče GaAs. Vzhledem k současné situaci v konvenční elektronice která naráží na své fyzikální limity je téma spintronických zařízení velmi aktuální. Realizace nových spintronických konceptů v klasických polovodičích je předmětem intenzivního vědeckého výzkumu v předních světových laboratořích.

Samotná práce má 140 stran a je rozčleněna do čtyř číslovaných kapitol a šesti dodatků. Témata jednotlivých kapitol byla zvolena pečlivě tak, aby tvořila jednotný celek. Oceňuji zařazení dodatků jež obsahují důležité informace nehodící se do hlavního textu práce. Po stručném úvodu do spintroniky nemagnetických polovodičů a vymezení cílů práce následuje první kapitola věnovaná teorii potřebné k analýze experimentálních dat a diskuzi výsledků. Již z obsahu a formy této kapitoly je zřejmé, že doktorand k vypracování práce přistupoval velmi zodpovědně a snažil se co nejvíce přiblížit řešenou problematiku i zcela nezasvěcenému čtenáři. Pedagogickým přístupem je zde popsán spin i spin-orbitální interakce jako základní stavební kameny nových spintronických zařízení. Velká část kapitoly je pak věnována generaci a detekci spinové polarizace a spinové dynamice jež jsou hlavními nástroji pro výzkum spinového transportu v předložené práci. Na tuto kapitolu se poté autor odkazuje napříč zbytkem práce. Text kapitoly je vyvážený a neobsahuje nadbytečné množství rovnic které by čtenáře zbytečně mátlly. Velmi chválím uvádění konkrétních hodnot důležitých veličin pro konkrétní materiálové systémy.

Druhá kapitola je věnována popisu experimentálních metod použitých k charakterizaci zkoumaných vzorků. Jedná se o magnetooptické, elektrické a THz techniky standardně používané ke studiu spinových a elektronových systémů v pevných látkách. Za zmínku ovšem stojí originální experimentální uspořádání pro časově rozlišená magnetooptická měření s vysokým prostorovým rozlišením navržené a realizované doktorandem samotným, které si vyžádalo originální řešení technických překážek.

Třetí kapitola je věnována popisu zkoumaných struktur a technologii jejich přípravy. Jak vyplývá z textu této kapitoly, autor musel zvládnout mimo jiné i složitou přípravu laterálních struktur pomocí litografie a kombinace suchého a mokrého leptání. Toto také není zcela triviální a vyžaduje značnou trpělivost a pracovní nasazení.

Čtvrtá kapitola pak již shrnuje vlastní experimentální pozorování a jejich diskuzi. S pomocí časově rozlišených magnetooptických experimentů byla pozorována neobvykle dlouhá doba života opticky generovaných spinů (více než 20 ns) a spinová difuzní délka (více než 10 μm) ve vzorcích s jednoduchým rozhraním nedopovaného GaAs a AlGaAs. Tyto parametry značně převyšují hodnoty nedopovaného GaAs a jsou zajímavé z aplikačního hlediska. Původ tohoto jevu byl vysvětlen pomocí prostorové separace opticky generovaných nosičů v důsledku přítomnosti elektrického pole generovaného povrchovými stavy a objemovými příměsmi společně s „izolující“ AlGaAs bariérou. Pro ověření správnosti této hypotézy byla následně provedena elektrická měření vzorků a měření pomocí THz spektroskopie. Navíc byly zkoumány i vzorky s jinými strukturálními parametry. Diskutovány a určeny byly také mechanismy spinové relaxace a polarizace ve zkoumaných strukturách z teplotních a polních závislostí. Výsledky jasně ukázaly Dyakonův-Perelův mechanismus jako dominantní faktor spinové relaxace. Druhá část experimentální kapitoly se zabývá zcela opačným případem spinového transportu ve strukturách dopovaného GaAs. V tomto případě bylo dosaženo vysoce

lokalizované odezvy opticky generovaných spinů i při pokojové teplotě. To umožnilo experimentální realizaci polarimetru založeného na spinovém Hallově s vysokou citlivostí. Celkový rozsah provedených měření pomocí širokého spektra experimentálních metod je značný a výsledky jsou prokazatelně originální.

Dizertační práce je psána v anglickém jazyce na velmi dobré úrovni s minimem překlepů a gramatických chyb.

K práci mám jen drobnou připomínku: V grafech 2.5 a 2.7 jsou jiné souřadné systémy při stejné orientaci Hallova kříže. Z mého pohledu je to trochu matoucí.

Výborná úroveň práce, kterou demonstrují různá ocenění a publikace v prestižních vědeckých časopisech, společně s velikým souborem originálních výsledků prokazují značnou erudici autora a jeho předpoklady k samostatné vědecké práci. Dizertační práci proto s potěšením doporučuji k obhajobě.

Případné otázky do diskuze:

- 1) V grafu 4.2 b) je vidět jiná relaxace pro vzorky (II) a (IV). Je toto způsobeno rozdílnou kvalitou samotného GaAs substrátu a epitaxní vrstvy?
- 2) V grafu 4.3 b) je dosažena maximální amplituda pro tloušťku horní GaAs vrstvy 200 nm, což je řádně diskutováno v textu. Měřil autor i vzorky s vrstvou tenčí než 200 nm? Jaký vývoj amplitudy by poté očekával?
- 3) Na str. 73 je v textu uvedeno že v grafu 4.7 c) je pozorovatelný pokles hustoty nosičů. Osobně nic takového nepozoruji. Může toto autor okomentovat?
- 4) Na straně 75 je zmíněno, že spektra imaginární části vodivosti nezávisí na míře ozáření vzorku. V grafu 4.9 b) je však vidět znatelný posuv maxima pro frekvenci 0.4 THz. Je znám původ tohoto posuvu?
- 5) V grafu 4.12 a) i b) jsou závislosti popsány pouze jako $T^{3/2}$ resp. $T^{-3/2}$. Z čistě vizuální analýzy grafu 4.12 a) však vypadá, že by mohlo jít o složení dvou závislostí s předělem při 30 K. To by mohlo odpovídat dvěma mechanismům spinové relaxace dominantním při jiných teplotách. Může toto autor okomentovat?
- 6) V grafu 4.29 a) je znatelná odchylka mezi měřenými hodnotami a teoretickou závislostí pro úhly natočení fázové destičky 125 stupňů. Je znám původ této odchylky? Může to být způsobeno mechanickým otáčením destičky?

V Praze 31. září 2016

RNDr. Martin Veis, Ph.D.
Fyzikální ústav Univerzity Karlovy