

Dynamika spinově polarizovaných nosičů náboje v polovodičích

Předkládaná disertační práce je poměrně rozsáhlá, obsahuje 195 stran a je rozčleněna do devíti kapitol, tří dodatků a seznamu literatury, který čítá celkem 108 položek. Prvních pět kapitol obsahuje stručný úvod do problematiky spinové polarizace v polovodičích a spintroniky. V druhé kapitole jsou popsány základní mechanismy spinové relaxace. Třetí kapitola uvádí stručný přehled výsledků získaných z literatury, především na polovodičích GaAs a CdTe. V následující kapitole jsou popsány principy metod ultrarychlé optické spektroskopie, které byly použity v práci k získání experimentálních výsledků na vzorcích objemového CdTe. Pátá kapitola uvádí stručný přehled vlastností monokrystalů CdTe a přehled parametrů studovaných vzorků.

Těžiště práce spočívá v následujících třech kapitolách. V šesté kapitole je studován spinový relaxační mechanismus nosičů ve vzorcích p-typu CdTe. Jsou zde uvedeny výsledky vlastního měření získané metodou diferenciální odrazivosti kruhově polarizovaných optických svazků. Dále byla zjišťována doba relaxace momentu hybnosti, která je nutná k teoretickému výpočtu doby spinové relaxace v jednotlivých rozptylových mechanismech. V této kapitole jsou porovnány jednotlivé teoreticky spočítané teplotní závislosti rozptylových mechanismů s experimentem a z porovnání označeny dominantní rozptyly pro teploty nad a pod 100 K. Následuje výpočet rychlostí spinové relaxace pro studované rozptyly a jejich porovnání s experimentem. V závěrečných odstavcích této rozsáhlé kapitoly je ještě posuzován vliv fotoexcitovaných děr na relaxační časy a vliv rozptylu na dislokacích.

Sedmá kapitola se zabývá studiem dynamiky spinově polarizovaných elektronů v p-typu CdTe a dále v n-typu v závislosti na koncentraci elektronů ve vzorku. Jako metoda byla zvolena Kerrova rotace, dovolující určit frekvenci precese elektronů v případě přiložení příčného magnetického pole. Z měření se dá vyhodnotit jednak doba spinové koherence elektronů T_2^* , jednak efektivní g-faktor. Uvedeny jsou závislosti g-faktoru a T_2^* na koncentraci elektronů, teplotě a intenzitě excitace.

Závěrečná osmá kapitola obsahuje studium vlivu mechanického napětí na spinovou koherenci a g-faktor vzorků. Mechanické napětí vznikalo při ochlazení tenkých vzorků, přilepených na podložku, vlivem různé roztažnosti CdTe a substrátu.

Závěr tvoří čtyřstránkový přehled a shrnutí dosažených výsledků a jejich interpretace. V přílohách jsou odvozeny některé vztahy, které byly použity při teoretickém modelování relaxačních procesů.

Práce je věnována nepochybně velmi zajímavému a aktuálnímu problému spinové koherence a relaxace, jehož předpokládané aplikační využití v oblasti přenosu a zpracování informace je podmíněno dalším studiem. Autor zvolil a využil metody ultrarychlé optické spektroskopie, které jsou vzhledem k časové škále spinové relaxace nezbytné. Z předložených výsledků je zřejmé, že zvolené metody jsou adekvátní a byly po experimentální stránce dovedeny na vysokou úroveň, takže poskytují překvapivě přesné výsledky. Těžiště práce vidím v určení dominantních mechanismů spinové relaxace elektronů v CdTe a v určení doby spinové koherence při precesním pohybu. Porovnáním s obdobnými výsledky a tendencemi na GaAs bylo možno vyvodit některé obecnější závěry.

Po formální stránce má práce velmi dobrou úroveň, i když by se dalo zvolit možná jiné členění, které by zlepšilo logiku výkladu. Některé obrázky by měly mít větší rozměry, aby se zlepšila jejich čitelnost. Pokud jde o další formální připomínky, uvádím zejména následující:

- podle pravidel českého pravopisu by se měla obě jména v názvech typu Elliott-Yafetův mechanismus skloňovat, tj. psát Elliottův-Yafetův mechanismus apod.;
- odkazy na původní články nemají jednotnou formu, někdy jsou uvedeni všichni spoluautoři, jindy je použita formulace „et al“.. Odkazy (namátkově) číslo [3], [42] a [11] jsou uvedeny chybně; v [3] má být Vol. 61 místo Vol. 64, článek [42] je na straně 7911 místo 2315 a v [11] mají být uvedeni autoři G.F.Pikus a A.N.Titkov ve sborníku editovaném v odkazu uvedenými autory
- v práci je zvoleno několik nevhodných označení, jako „n-dopování nebo p-dopování“ místo vzorek n- nebo p-typu, případně koncentrace elektronů nebo koncentrace děr; „krystalické pole nebo struktura“ místo krystalové pole (str. 21, 27, 67); na str. 93 je koncentrace děr v závislosti na teplotě značena $n(T)$ místo $p(T)$; v textu pod obr. 6.8 na str. 94 je formulace „materiálně-experimentální podmínky“ místo parametry vzorku a podmínky experimentu; na str. 86 nad diskusí se hovoří o „... zrychlení doby rozlázování ...“ místo zkrácení;
- kromě několika překlepů, které neuvádím, jsou na několika místech drobná opomenutí nebo omyly, jako: str. 13 „Goudsmita“; ve vztahu (2.5) na str. 28 má být τ_s^{DP} místo τ_s^{LY} ; str. 47, řádek 5 „...foto-excituje elektrony do valenčního pásu ...“ má být do vodivostního pásu; str.56, počátek 2. odstavce „... je signál Kerrovy rotace ...“ má být Faradayovy rotace; str. 93, v prvním odstavci je uvedeno, že výsledná závislost τ_p se spočte ze vztahů (6.1) a (6.2), mělo by být (6.6) a (6.7); na str. 112 dole je vztah (2.5) (ve kterém je chyba - viz výše) označen chybně jako EY mechanismus, správně má být uveden vztah (2.3); ve vztazích (6.33) a (6.35) na str. 113 a 114 má být vlevo $1/\tau_p$, nikoliv $1/\tau_s$; na str. 155 v odstavci nahoře má být místo „Vztah (8.4) ...“, Vztah (8.2); v obr. 8.3 na str. 162 jsou uvedeny úhlové frekvence v Hz místo v rad/s; v modelovém příkladu v prvním odstavci na str. 48 by místo „...např. že levotočivě generujeme jen elektrony se spinem dolů“ by mělo být „že pravotočivě generujeme jen elektrony se spinem nahoru“.

Dále mám následující připomínky:

- v práci se na více místech používá pro CdTe pojem „polovodič typu GaAs“ (např. str. 41) nebo „U binárních kubických polovodičů s iontovou vazbou, jako např. GaAs ...“ (str.20). Ve skutečnosti GaAs i CdTe jsou polovodiče s krystalovou strukturou typu sfaleritu (ZnS) a oba mají pouze částečně iontovou vazbu;
- na str. 72 se pozorované dvě série excitonových maxim interpretují jako rozštěpení energie zakázaného pásu vlivem mechanického napětí ve vzorku. Ve skutečnosti napětí sejme degeneraci vrcholu valenčního pásu polovodiče.
- V práci bylo zvoleno označení pro pravotočivě σ^- a levotočivě σ^+ kruhově polarizované světlo a odpovídající úhlový moment hybnosti -1 resp $+1$. Obvykle se používá opačné značení, σ^+ označuje pravotočivě polarizované světlo s momentem hybnosti $+1$. Označení má původ v Žemanově jevu, kdy σ znamenalo polarizaci „senkrecht“ a $+$ značilo složku s vyšší frekvencí;
- ve vztazích (4.1) a (4.2) na str. 46 by měl být uvážěn vliv odrazivosti na povrchu vzorku na prošlou intenzitu záření;
- ve vztazích (4.3) a (4.5) na téže straně závisí na čase t změna absorpčního koeficientu α a nikoliv tloušťka vzorku d .

Na závěr mám k práci několik dotazů:

- Schémata experimentální aparatury na obr. 4.3 (str.53) a obr. 4.6 (str. 58) dělají dojem, že sondovací puls předchází excitačnímu pulsu. Je to skutečně tak, že sondovací puls reaguje na jiný předeházející excitační puls než ten, ze kterého byl odvozen? Také by bylo vhodné lépe specifikovat polarizační hranol, který slouží k rozdělení svazku v polarizačním můstku při měření Faradayovy rotace.
- Ve výpočtech se předpokládá, že fotoexcitované nosiče jsou v kvazitermální rovnováze s mřížkou. Při excitaci 20 meV nad dno vodivostního pásu relaxují elektrony v řádu desetin ps interakcí s LO fonony ke dnu pásu, potom ale relativně dlouho vyrovnávají teplotu s mřížkou interakcí s akustickými fonony. Hodnota 20 meV odpovídá prakticky energii LO fononu v CdTe, byla zvolena právě proto, aby elektrony relaxovaly přímo na dno pásu? Na druhou stranu je možné, že budou relaxovat až na hladinu excitonu. Mohla by se pozorovat spinová polarizace excitonů v tomto případě?
- Kerrova rotace jako metoda založená na odrazivosti povrchu je silně závislá na kvalitě povrchu. Bude proto silně závislá na kvalitě mechanického broušení a případného chemického oleptání povrchu. Při zvolené energii excitačního fotonu je vysoká hodnota absorpčního koeficientu, takže světlo bude absorbováno právě v oblasti velmi blízko pod povrchem vzorku. Navíc tenké vzorky připravené mechanickým broušením a leštěním obsahují vždy mechanické pnutí, jestliže nebyly následně temperovány na vysoké teplotě. Jak by tyto problémy mohly ovlivnit výsledky studia spinové relaxace a zejména vlivu dislokací na dobu spinové relaxace a vlivu napětí na spinovou koherenci?
- V odstavci 8.2.1 se studuje doba rozfázování a g-faktor elektronů ve vzorku p-typu CdTe. Užívá se také excitace s energií fotonů o 15 meV nižší než je šířka zakázaného pásu. Kde se toto záření absorbuje, kam nosiče relaxují a jak to, že mají stejnou dobu koherence jako elektrony ve vodivostním pásu?
- V práci byl naměřen růst hodnoty efektivního g-faktoru (pokles jeho záporné hodnoty) se zvyšováním teploty vzorku. Podle vztahu (1) v A.A.Sirenko et al. Phys. Rev B56, 2114 (1997) je velikost g-faktoru určena pásovými parametry polovodiče a maticovými elementy mezipásových přechodů. Podle tohoto vztahu by měl g-faktor CdTe při ohřátí z 4K na pokojovou teplotu klesnout z hodnoty - 1.644 na - 1.852, tedy opačně než je naměřeno. Dá se tento rozdíl vysvětlit opravdu pouze zvyšováním střední kinetické energie fotoexcitovaných a termalizovaných elektronů s rostoucí teplotou?

Nehledě na výše uvedené připomínky bych rád konstatoval, že práce má vysokou úroveň jak po stránce experimentální, tak i po stránce teoretické a interpretační. Práce obsahuje výsledky četných experimentů provedené několika odlišnými metodami ultrarychlé optické

spektroskopie. Udivuje především měření oscilací Kerrovy rotace v závislosti na časovém zpoždění a intenzitě magnetického pole. Výsledkem je pak velmi přesné určení efektivního g-faktoru nosičů a doby spinové koherence nosičů. V této souvislosti by měl autor komentovat svůj podíl na uváděných experimentech. Rovněž interpretace výsledků podložená teoretickými výpočty je velmi podrobná, vyčerpávajícím způsobem jsou diskutovány různé příspěvky, které vytvářejí pozorované závislosti a rozebírány příčiny možných chyb. Autor musel prostudovat velké množství původních časopiseckých prací, aby si udělal přehled přes několik zásadních oblastí, týkajících se studovaných jevů. Výsledkem zkoumání je řada původních výsledků, jak je zřejmé i z toho, že některé již byly publikovány v recenzovaných renomovaných fyzikálních časopisech.

Domnívám se, že práce bohatě splňuje požadavky, kladené na doktorskou disertaci. Autor nepochybně prokázal schopnosti k samostatné vědecké práci a proto doporučuji předkládanou práci ke kladnému projednání.

V Praze, dne 26. října 2009



Doc. RNDr. Milan Zvara, CSc.