

Oponentský posudek

disertační práce na téma

Studium optických nelinearit v polovodičích a polovodičových nanostrukturách vypracované panem Martinem Kozákem

Tuto disertační práci lze rozdělit na dvě poměrně samostatné části, z nichž první se zaměřuje na studium dynamiky excitonů a elektron-děrové kapaliny v monokrystalickém diamantu v závislosti na koncentraci nositelů náboje? a na teplotě a druhá pak charakterizuje nelineární vlastnosti nanokrystalů diamantu a křemíku. Autor práce využívá širokou škálu experimentálních metod nelineární optiky a ultrarychlé spektroskopie: vícefotonová absorpce, luminiscence, z-scan, přechodná difrakční mřížka, metody excitace – sondování, využívá též rozmítací kamery a navrhuje vlastní experimentální uspořádání umožňující přesnější charakterizaci povrchové rekombinace nositelů a difúze excitonů v diamantu. Téma práce je velmi aktuální a autorovi se podařilo provést řadu originálních pozorování a získat nové kvantitativní poznatky. Toto se též odrazilo v jeho dobré publikační činnosti během vypracování disertační práce.

Práce obsahuje velmi stručný úvod, kde jsou uvedena pouze nejdůležitější fakta o použitých experimentálních metodách, a dvě delší stěžejní kapitoly zabývající se po řadě výše zmíněnými tématy. Práce je napsána srozumitelně se zanedbatelným množstvím chyb a překlepů. Myslím, že členění práce s úvodem prostým všech detailů bylo velmi vhodně zvoleno vzhledem k pestrosti použitých experimentálních metod a k velkému množství různých modelů aplikovaných na jednotlivá měření ve snaze o získání konzistentní kvantitativní představy o chování studovaného systému. Čtenář ocení většinou poměrně přehledná detailnější vysvětlení specifických experimentů a modelů použitých k jejich interpretaci právě v místech disertace, kdy jsou ke studiu použita. Na druhou stranu, množství experimentů a modelů popsaných v disertaci, zejména v kapitole 2, nutně vede k poměrně dlouhým techničtějším pasážím roztroušeným v jednotlivých částech práce. Srozumitelnosti a významu práce by velmi prospělo, kdyby autor poskytl na konci jednotlivých sekcí závěry obsahující parciální shrnutí dosažených výsledků v dané části a dodávající celkový nadhled. Domnívám se, že obecnější závěr a shrnutí s porovnáním nejdůležitějších kvantitativních výsledků citelně chybí zejména na závěr sekce 2.6.

Autor prokazuje vynikající schopnost práce s literaturou, v níž nachází řadu vhodných modelů k popisu výsledků experimentů, díky nimž získává dobře fyzikálně zdůvodněné interpretace dat a skutečně kvantitativní výsledky. Celá práce obsahuje 135 odkazů na literaturu.

Kapitola 2 se mi jeví jako stěžejní část disertační práce. Mezi nejvýznamnějšími výsledky práce bych rád zmínil stanovení intrinsické zářivé doby života excitonů v diamantu (mnohem delší, než byla dříve uváděna v mnohých referencích) a jejich difúzního koeficientu (jeho závislosti na teplotě a koncentraci excitonů), změření rozdílu rozptylových časů nositelů v elektron-děrovém plazmatu a elektron-děrové kapalině v diamantu (kvantifikace snížení doby mezi srážkami v kapalině) a kvantitativní studium „vypařování“ elektron-děrových kapek pomocí třetího laserového pulsu. V kapitole 3 pak autor studuje generování 2. a 3. harmonické frekvence v nanokrystalickém diamantu a ultrarychlou dynamiku nositelů náboje ve fotoexcitovaných supermřížkách nanokrystalů Si v SiO₂ matici.

Následující kritické připomínky a dotazy mohou sloužit jako podklady k diskusi při obhajobě:

1. Při různých experimentech autor předpokládá gaussovský tvar a chování laserového svazku, přičemž jeho pološířka v ohnisku je měřena metodou skenovací hrany (str. 16).

- Bylo též ověřeno, že svazek má kruhový průřez a že nevykazuje významnější astigmatismus?
- Na str. 19 a 20 autor vyvozuje z tvaru spektra parametru α_3 , že pozorovaný proces ve skutečnosti není třífotonovou absorpcí, ale nepřímým dvoufotonovým procesem za asistence fononu mimo Γ bod. V následujícím textu ovšem tento proces stále nazývá třífotonovou absorpcí a v závěru k celé kapitole (sekce 2.8) zdůrazňuje, že se poprvé v diamantu podařilo pozorovat třífotonovou absorpci. Při diskusi v rámci obhajoby by bylo vhodné shrnout tato pozorování a vysvětlit, jak dané výsledky chápat.
 - V sekci 2.5 autor vysvětluje méně intenzivní luminiscenční maximum jako proces rekombinace excitonu za účasti TO fononu mimo Γ bod a TO fononu v Γ bodě. Proč zde nedochází též k 2-fononovému procesu za účasti 2 fononů mimo Γ bod, tak aby byla splněna podmínka zachování kvaziimpulsu? Toto schéma poskytuje větší množství možných procesů a vzhledem k tomu, že optické fonony mívají poměrně plochou disperzi, nemusel by takový pás v luminiscenčním spektru vykazovat ani příliš dramatické rozšíření.
 - Úvod k diskusi difúze excitonů na str. 34 a 35 je poněkud zavádějící. V prvních odstavcích nejsou přesně vymezeny pojmy. Autor hovoří o difúzi nositelů náboje, na str. 35 nahoře pak o ambipolární difúzi, ve vztahu $L_D = \sqrt{\tau D}$ na straně 34 dole není jasné k jakým částicím a k jakému procesu se vztahuje τ a D . Situace se vyjasní až s rovnicí (2.17).
 - Metoda posuvné hrany vzorku jakožto nová zajímavá metoda by si zasloužila detailnější úvod a přesnější teoretické rozpracování. Je potřeba od začátku vyjasnit základní definice a popis. Čtenář může být spleten tím, že se autor odkazuje na podélný a příčný směr difúze nosičů. Podle mého názoru by bylo vhodné napsat znovu rovnici (2.17) s derivací podle x a se závislostí n na x , y , z . Pak lze přehledně diskutovat, která závislost je zanedbána a která není. Z disertace jsem nepochopil, jestli je závislost na z zanedbána nebo jestli autor předpokládá závislost zobrazenou na obr. 2.17. Rovněž není jasné, jestli bral autor v potaz tvar svazku (který vstoupí do rovnice skrze závislost na x a y). Též není jasné, co je přesně vynášeno v obr. 2.19. Jedná se o výsledek exponenciálního fitu výrazu:

$$\iint n(t, x, z) dx dz$$

- kde $n(t, x, z)$ je řešením rovnice (2.17) se speciálním (gaussovským) počátečním profilem? Prosím o podrobnější rozbor a diskusi.
- Str. 41: jak byly stanoveny hustoty fotonů dopadající na vzorek? Na základě předpokladu transformace gaussovských svazků nebo byl vždy pro každou polohu čočky změřen profil svazku na vstupní straně vzorku? Je možné vyloučit nelineární chování filtru (např. vytvoření tepelné čočky) a tedy jeho různou odezvu pro různé polohy čočky v experimentu?
 - Rovnice (2.19): jakým způsobem byla rovnice získána a jaký význam má $n(r, t)$? Domníval jsem se, že je to hustota excitonů dosazovaná do rovnice (2.17). Zde je ovšem hustota excitonů označena jako n_{FE} . Prosím o komentář a detailnější vysvětlení této rovnice.
 - Na straně 44 si autor všímá rozdílu mezi difúzním koeficientem získaným pomocí metody posuvné hrany a pomocí metody proměnné stopy (liší se faktorem 2), zcela však ponechává stranou rozdíl mezi hodnotami doby života excitonu získanými těmito dvěma metodami (faktor 3–4). Prosím o komentář k tomuto rozdílu.
 - Na straně 50 je uvedena hodnota difúzního koeficientu změřená pomocí metody přechodné difrakční mřížky: $29 \text{ cm}^2/\text{s}$ pro pokojovou teplotu při koncentraci nositelů $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Toto číslo je však v rozporu s obrázkem vloženým do obr. 2.27. Kromě toho má čtenář ještě k dispozici hodnoty difúzních koeficientů získané v predešlých měřeních. Prosím o srovnání a komentář.

10. Z předchozích bodů plyne, že v sekci 2.6. autor získal různými metodami velké množství významných kvantitativních výsledků. Některé jsou ve shodě nebo se doplňují a některé se liší. Prosím tedy o celkové shrnutí sekce 2.6 s vyzdvihnutím a srovnáním nejdůležitějších výsledků.
11. Sekci o dynamice EHL považuji za vynikající vyvrcholení celé kapitoly 2. Nicméně rád bych požádal o upřesnění týkající se rovnice (2.31), která je vlastně řešením kvadratické rovnice pro γ vyplývající z Drudeho členu (2.30). Jaký je přepočítání mezi veličinou $\Delta T/T$ a koeficientem $\Delta\alpha$? Proč ve vloženém obrázku v obr. 2.41 nekonverguje rozptylový čas ke 40 fs po vypaření EHL (tento čas je uveden jako charakteristický rozptylový čas EHP na str. 66)?

Závěrem bych rád zdůraznil, že celkovou vědeckou úroveň předložené disertační práce hodnotím jako vynikající. Autor dosáhl řady nových kvalitativních i kvantitativních výsledků, které byly publikovány v recenzovaných časopisech a předneseny na mezinárodních konferencích. Z celé práce číší vůle autora dotáhnout interpretaci všech výsledků do dobře podložených kvantitativních závěrů a je ochoten za to zaplatit časem stráveným u množství dodatečných experimentů a komplikovaných fitování. Disertační práce dle mého názoru splňuje požadavky kladené na práce tohoto druhu a prokazuje schopnost autora provádět samostatnou vědeckou práci; proto ji vřele doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 19.8.2013

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