

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze

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

Autor: **Bc. Michael Hakl**

Název práce: **Study of electric field in radiation detectors by Pockels effect**

Studijní program a obor: **Solid state physics - Physics of real surfaces**

Rok odevzdání: **2014**

Jméno a tituly oponenta: **Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.**

Pracoviště: **ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská**

Kontaktní e-mail: **richter@fjfi.cvut.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

## Slovní vyjádření, komentáře a připomínky vedoucího/opponenta:

viz posudek

## Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

viz posudek

## Práci

- doporučuji  
 nedoporučuji  
uznat jako diplomovou.

## Navrhuji hodnocení stupněm:

- výborně  velmi dobře  dobře  neprospěl/a

Místo, datum a podpis oponenta:

Praha, 19/5/2014



Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.

**Oponentní posudek na diplomovou práci posluchače *Michael Hakla* na téma  
*Study of electric field in radiation detectors by Pockels effect***

---

Předložená diplomová práce pana Michaela Hakla, vypracovaná na Fyzikálním ústavu UK v Praze, MFF, je věnována teoretickým základům a zejména experimentálnímu studiu fungování reálných radiačních detektorů na bázi CdTe, pomocí Pockelsova elektrooptického jevu. Vysokoodporový polovodič kadmium telurid, představující vhodného a perspektivního kandidáta pro spektrální a intenzitní detekci rtg. a gama záření, vykazuje v reálném použití odchylky od ideální funkcionality, zejména díky efektům nábojové polarizace, způsobené přítomností center defektů a nečistot v materiálu CdTe v jeho zakázaném pásu. Nosiče náboje zachycené v těchto hlubokých centrech, v závislosti na rozhraní kov a polovodič, vytváří efektivně nabitou vrstvu, která stíní elektrické pole a způsobuje nakonec degradaci celého detektoru. Materiál CdTe vytváří také díky vysokému elektrooptickému koeficientu Pockelsovu celu, což představuje mj. vhodný nástroj pro jeho charakterizaci (Pockelsova metoda), spolu s luminiscenční a infračervenou (IR) spektroskopii. Je tedy zřejmé, že pro optimální funkci detektoru je zapotřebí rozumět vlivu a následně případně optimalizovat elektrické pole, které je rozloženo mezi elektrodami. Tento cíl sleduje tato předložená diplomová práce. Práce tak, zejména experimentálně, zkoumá, pro dva zvolené typy kontaktu kov – polovodič: zlato a indium, vztah mezi detektorovými vlastnostmi a elektrickým polem pásovou strukturou. Jedná se tedy o téma diplomové práce velmi aktuální. Práce tak jistě představuje potřebnou studii do dané oblasti, v rámci pracoviště školitele, na kterou bude možno jistě s výhodou dále navazovat.

Posuzovaná diplomová práce je psána anglickým jazykem, pokud mohu posoudit, na velmi dobré úrovni. Práce má rozsah celkem 88 stran, obsahuje 55 obrázků, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 39. Práce je členěna do 7 hlavních, číslovaných kapitol, včetně úvodní a závěrečné kapitoly, práce navíc obsahuje přehled použité literatury a dva dodatky, součástí je také česká a anglická anotace, a (užitečný) seznam použitých zkratk a symbolů.

V úvodní kapitole autor představuje CdTe detektory, vlastnosti polovodičového CdTe materiálu, techniku jeho růstu, spolu s problematikou defektů - poskytuje tak dobrou úvodní motivaci k diplomové práci. Druhá kapitola se již detailně věnuje teoretickému studiu povrchových defektů pomocí luminiscenční spektroskopie. Nejprve je představen konfigurační model souřadnic pro popis lokalizovaných defektů. V jeho kontextu je komentována luminiscence z hlubokých hladin a A center, spolu s termálním zhášením této luminiscence. Dále je zde představena luminiscence excitonu a donor-akceptorových párů, jsou představeny a diskutovány výsledky z luminiscenčních spektroskopických měření. Třetí kapitola dále rozebírá problematiku přechodu kov – polovodič a záchytu nosičů v polovodičích. Je představena Schottkyho teorie rozhraní kov – polovodič, spolu s Schockleyho-Readovým-Hallovým modelem okupace pastí. V práci je následně ve čtvrté kapitole představena makroskopická teorie Pockelsova elektrooptického jevu, která je využita v následné 5. kapitole zabývající se měřením Pockelsova efektu, ve vazbě na CdTe detektory. Nejprve je v textu představena Pockelsova cela obecně, poté experimentální uspořádání s CdTe, postup získávání a zpracování dat, spolu s praktickými aspekty a odhadem chyb při měření. Podstatné výsledky práce jsou obsaženy v šesté kapitole, je studována struktura Au/CdTe/Au, je pozorována polarizace náboje a její teplotní ovlivnění a časový vývoj elektrického pole. Dále je zde zkoumán vliv elektrod (zlato vs. indium) a relace mezi Fermiho hladinou a tvarem pásů. Následně diplomant provedl studii vlivu iluminace detektoru excitačním laserovým zářením, s energií pod, resp. nad jeho zakázaným pásem. Byla také zkoumána spektrální závislost blízko absorpční hrany detektoru, přitom byly porovnány obě struktury: Au/Au a Au/In, byla využita metoda IR skenování. Práce je formálně zakončena podrobným závěrem (7. kapitola), shrnujícím dosažené výsledky, doplněným dvěma dodatky (A – Derivace elektrooptických Pockelsových koeficientů pro strukturu sfaleritu zinku, B – Pockelsova dvojlomnost pro CdTe krystaly). Práce je uzavřena přehledem literatury o 39 položkách.

Co se týče formální stránky, práce je vypracována standardním, velmi pěkným způsobem. Je třeba ocenit až na několik překlepů velmi dobrou formální i stylistickou úroveň anglického jazyka, v němž je práce napsána, pokud tedy mohu posoudit; text se také poměrně dobře čte, text zřejmě prošel pečlivou revizí. Formální chyby vůbec jsou řídké, není třeba je zde explicitně zmiňovat. Využití obrázků, grafů a tabulek je adekvátní a efektivní. Grafická úroveň práce je také velmi vysoká. Dle mého názoru je struktura vlastní struktura práce zvolena vhodně, text je vyváženou kombinací metod a postupů a získaných výsledků. Pokud se týká terminologie, nenašel jsem žádné problematické či nesprávné použití.

Pokud se jedná o věcnou stránku, je zřejmé, že všechny cíle předložené diplomové práce, tak jak byly zadány, byly splněny. Diplomová práce působí také poměrně vyzrálým dojmem. Z odborného hlediska tak považuji práci za přínosnou a užitečnou, jak pro další výzkum uchazeče, tak i v rámci pracoviště i v širším kontextu. Uchazeč tak dle mého názoru zvládl danou, poměrně komplikovanou a náročnou problematiku, v celé šíři. Ačkoliv nejsem přímo odborníkem systematicky pracujícím v dané oblasti fyziky detektorů CdTe, je více než zřejmé, že úroveň prezentované diplomové práce je velmi vysoká. Myslím, že výsledky mohou být významné pro další možné praktické aplikace. Osobně oceňuji zvládnutí náročných experimentálních technik.

K předložené diplomové práci mám následující dotazy resp. připomínky, k některým z nich by se autor mohl (pokud tak již nebude učiněno v rámci vlastní prezentace) v rámci obhajoby vyjádřit, pokud čas dovolí:

1. Mohl by autor blíže komentovat fyzikální význam rovnice (1.2) – teplotní závislost energie zakázaného pásu na teplotě (s. 6), nakolik je tato rovnice pro CdTe přesná?
2. Po přečtení části textu 2.1 jsem zřejmě ne zcela pochopil fungování konfiguračního modelu souřadnic pro popis lokalizovaných defektů, mohl by diplomant, pokud již tak neučiní při vlastní prezentaci, blíže tento model, přiblížit, ve vazbě na jeho praktickou použitelnost?

3. Podobně, zajímala by mne praktická aplikovatelnost Schockleyho-Readova-Hallova modelu (rovnice (3.24)) pro materiál CdTe?
4. Zajímaly by mne obecně možnosti teoretických simulací a předpovědí studovaných efektů, např. pomocí numerických metod používaných ve fyzice pevných látek?
5. Poprosil bych dále diplomanta, pokud by mohl porovnat, na základě svých výsledků, oba typy elektrod pro CdTe detektor: zlato vs. indium, z praktického pohledu.
6. V závěru práce diplomant navrhuje koncept periodicky spínaného ozařování detektoru CdTe pomocí diod, s energií nad zakázaným pásem. Bylo by možno tuto myšlenku blíže komentovat?
7. Konečně, podařilo se již během diplomové práce (resp. chystá se) diplomantovi získat nějaký vědecký výstup /výstupy, i když to na úrovni diplomové práce není vyžadováno, ať již ve formě konferenčního příspěvku nebo článku (viz např. citace [3] v referencích práce), pokud ano, jaký v nich byl diplomantův podíl?

**Závěrem** lze konstatovat, že předložená diplomová práce pana Hakla dle mého názoru bezesporu splnila zadání ve všech bodech, dosáhla zajímavých výsledků, čímž splnila i veškeré požadavky na tento typ práce kladené příslušnými předpisy. Dle mého názoru, diplomant prokázal jak smysl pro fyzikální porozumění řešené problematiky, její fyzikální popis, tak zejména schopnosti a dovednosti v rámci náročného experimentálního řešení. Diplomová práce již také přináší nové poznatky a je přínosná jak pro vlastní pochopení studovaných jevů, tak pro další rozvoj aplikací v oblasti CdTe detektorů. Získané výsledky tak, dle mého názoru, přispějí k dalšímu rozvoji daného oboru. Jelikož předpokládám kladné zodpovězení všech dotazů a připomínek, tuto diplomovou práci doporučuji jednoznačně k obhajobě. Jako oponent práci hodnotím stupněm **v ý b o r n ě**.

  
Ivan Richter

V Praze dne 19. května 2014

Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra fyzikální elektroniky  
Břehová 7, 115 19 Praha 1  
E-mail: richter@fjfi.cvut.cz