

Posudek diplomové práce Jakuba Holovského  
**Fotovoltaické sluneční články na bázi křemíku: studium materiálů a solárních struktur  
metodou fourierovské fotovodivostní spektroskopie**

Práce je zaměřena především na rozpracování metodiky fourierovské spektroskopie pro měření povrchového fotovoltaického jevu v souvislosti s charakterizací materiálu pro výrobu solárních fotovoltaických článků, konkrétně destiček krystalického křemíku s povrchem pasivovaným nitridem křemíku. Metodika vychází z fotovodivostní fourierovské spektroskopie, která je již několik let využívána v laboratoři Fyzikálního ústavu AV ČR právě pro charakterizaci různých typů křemíkových materiálů. Na druhé straně navazuje na studium povrchového fotovoltaického jevu za pomoci prostředků klasické disperzní spektroskopie (monochromátor), který probíhá na matematicko-fyzikální fakultě UK. Teoretický model pro vyhodnocování je založen právě na představách, které se osvědčily při interpretaci výsledků „disperzního“ měření. Přechod od „disperzního“ způsobu měření k využití interferometru ve fourierovské spektroskopii není však vůbec triviální. Ovšem zvládnutí této metodiky by znamenalo podstatné urychlení měření parametrů povrchové rekombinace při posuzování kvality pasivačních vrstev, má tedy přímý praktický význam.

Diplomant Holovský ve své práci některé specifické rysy fourierovské spektroskopie adekvátně popsal (opravy na rychlost detektorů, nelinearity, přítomnost „stejnoseměrné“ složky dopadající intenzity záření apod.). Práce přináší řadu poznatků získaných při zavádění nové nevyzkoušené metody včetně konstrukce vhodných přípravků pro daná měření a prezentuje i původní výsledky. Snaha o co nejdůvěhodnější popis vedla diplomanta ke zkoušení různých experimentálních podmínek: různé elektrody, měření povrchového fotovoltaického jevu na zadním i předním povrchu, zjišťování závislostí na krátkovlnném přisvětlování apod..

Ve dvou kapitolách následujících po úvodu jsou přehledně shrnuty dosavadní metody a fyzikální popis jevů spojených s povrchovým fotovoltaickým efektem. Poněkud netradičně následuje kapitola nazvaná „Research“, ve které se jednak diskutují zvláštnosti a specifické rysy fourierovské spektroskopie, jednak jsou zde souběžně prezentovány a diskutovány experimentální výsledky. Teprve pak následuje kapitola „Results“, kde jsou popsány vzorky a uvedeny nejen další výsledky měření povrchového fotovoltaického jevu ale i měření dalších efektů (určování absorpčního koeficientu pomocí fourierovské fotovodivostní spektroskopie na jiných vzorcích a měření účinnosti několika typů solárních článků), které se základním tématem práce přímo nespojují.

Využití fourierovské spektroskopie je do značné míry podmíněno různými korekcemi. V práci je uvedena korekce na rychlost odezvy referenčního pyroelektrického DTGS detektoru, včetně analytického vyjádření v nejzajímavější oblasti vlnových délek 700 – 1200 nm; při zvolené rychlosti zrcadla interferometru leží odpovídající frekvence v oboru 4,5 – 8 kHz. Spektrální závislost citlivosti DTGS detektoru se patrně předpokládá jako konstanta.

V části 4.1.10 jsou diskutovány korekce na frekvenční závislosti odezvy vzorku při měření povrchového fotovoltaického jevu. Experimentálně vycházejí z porovnání spekter změřených s různou rychlostí pohybu zrcátka interferometru a jsou diskutovány na základě vlastností ekvivalentního elektrického obvodu. Obr. 4.22 4.22 na str. 59 a k němu se vztahující text mi není zcela jasný: modelové křivky „circuit“ jsou označeny pouze „číslem modelu“ (#1, #2, #3), aniž by byly blíže vysvětleny a použité parametry uvedeny; rovněž není zřejmé, jak byly získány křivky „sample ( $\lambda$ )“.

**Otázky:** Jaký je přesný význam uvedených závislostí na obr. 4.22 na str. 59 ?

Bylo by možno stručně shrnout postup při provádění korekce na frekvenční závislost a ukázat důsledek pro výsledné spektrum (např. ukázat spektrum bez korekce a s korekcí)?

Další korekcí rutinně využívanou ve fourierovské spektroskopii je fázová korekce na nesymetričnost interferogramu. Předpokládám, že byla i v prezentovaných výsledcích použita, ale v textu jsem o ní informace nenalezl, ani obrázek ukazující tvar interferogramu. V souvislosti s výsledkem rozboru v části 4.1.8 na str. 56 (měřené napětí je úměrné časové změně celkové intenzity dopadající na vzorek) by mohlo být studium tvaru interferogramu před aplikací fázové korekce užitečné.

Na str. 24 je zmínka o možnosti využití modu step-scan. **Otázka:** Byly v tomto směru konány nějaké pokusy?

Vzhledem k tomu, že se jedná o novou a přitom dosti komplikovanou a na interpretaci velmi náročnou metodiku, by bylo třeba rozsáhlejšího porovnání výsledků s výsledky získanými pomocí disperzní spektroskopie, včetně porovnání závislostí na frekvenci přerušování dopadajícího záření. Považuji za pravděpodobné, že tyto výsledky sice nebudou totožné (vzorky se při měření nacházejí v dosti odlišných poměrech pokud se týče dopadajícího záření) a výsledky nové metody možná budou obtížněji interpretovatelné, ale na druhou stranu mohou poskytnout snadněji a rychleji porovnání kvality pasivace u různých vzorků.

Je nutno ocenit komplexní přístup k řešení problému anomálního pásu ve spektru povrchového fotovoltaického jevu (který se projevuje jak v klasickém disperzním, tak fourierovském měření).

**Otázka:** Jaká jsou kritéria pro odlišení normálního („true“) a anomálního („false“) pásu?

### **Kritické poznámky:**

1) Popis aparatury je poněkud stručný, vlastně jsou použity jen schematické obrázky (byť názorné). Nejsou ale uvedeny typy a základní vlastnosti použitých přístrojů.

2) Popis vzorků s ohledem na úpravu povrchu není vždy úplně jasný: byla všechna měření prováděna prováděny na vzorcích oboustranně pasivovaných, včetně pokusů s vlivem tloušťky a odleptáváním? To by bylo experimentálně značně náročné. Přehlednosti by mohl napomoci seznam studovaných vzorků, včetně popisu jejich úprav a opětovných měření.

3) Práce citované u obrázků (Mark Kerr thesis, str. 14) či v textu (Ritter, str. 64) nejsou uvedeny v „References“.

4) Příklady výstupů počítačového programu nemají popis os (obr. 4.22 – 4.26 na str. 60-62).

5) U obr. 4.4 na str. 41 nevysvětleny křivky 1, 2, 3 ; považuji za vhodné je popsat i když se jedná o obrázek převzatý.

6) Obr. 3.3 na str. 28 (frekvenční závislost DTGS detektoru): kratší vlnová délka by měla odpovídat vyšší frekvenci.

7)  $V_S$  výška bariery: v kapitole 2 užívána jako rozdíl potenciálů, v kapitole 4 jako energie (např. vztah 4.15 na str. 54)

8) Nesprávné odkazy na čísla rovnic a obrázků v textu: obr. 3.2 místo 3.3 na str. 28;  
obr.4.10 místo 4.11 na str.48;  
rovnice 4.18 místo 3.18 na str. 56.

9) Obr. 4.12 (odkaz na str.50) jsem nenalezl. Zato jsem našel dva obrázky 4.22 (str. 59 a 60).

Souhrnem lze konstatovat, že diplomant Jakub Holovský zvládl poměrně náročnou experimentální techniku, nashromáždil dosti velký objem experimentálních dat, je schopen se orientovat v odborné literatuře a výsledky měření dokázal vyhodnotit v kontextu soudobého stupně poznání dané problematiky. Je nutno ocenit kritičnost a jistou opatrnost při interpretaci výsledků experimentů. Předložená práce naprosto splňuje všechny požadavky kladené na diplomovou práci.

10.5.2006



Doc. RNDr. Pavel Hlídaek, CSc.

