

## OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Hana Benešová

Název: **Příprava a analýza tenkých křemíkových vrstev pro tandemové fotovoltaické články**

Obor: Elektroenergetika

Oponent: Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc., ČVUT - FEL Praha

---

Předložená disertační práce Ing. Hany Benešové je psána v českém jazyce. Obsahuje 130 stran (z toho 116 stran odborného textu). Úprava práce je na úrovni požadované pro disertační práci. Předložená práce je přepracovanou verzí práce o stejném názvu, předložené v roce 2014.

Cílem předložené práce je určení vlastností tenkých vrstev amorfního hydrogenovaného křemíku a mikrokryystalického křemíku pomocí různých experimentálních metod a posoudit vhodnost deponovaných vrstev pro tandemové fotovoltaické články. Přestože tandemové články na bázi tenkovrstvé křemíkové technologie byly realizovány již před 20 lety, téma je stále aktuální a cíle práce jsou disertabilní. Způsob zpracování práce je typický pro materiálové obory.

Při přepracování práce byly vypuštěny (nebo zkráceny) některé nepodstatné popisné části, což práci prospělo. Byla upřesněna terminologie, nicméně namísto použitých jednotek „cps“ a „cts“ by měly být použity jednotky v soustavě SI.

Výsledky výzkumu byly publikovány ve 22 publikacích, převážně jako příspěvky na konferencích, 5 publikací je registrováno ve WoS, bez citací. Výsledky práce nebyly publikovány v zahraničních recenzovaných časopisech.

Seznam použité literatury obsahuje 86 titulů, pouze 5 je z období 2010 – 2012, novější prameny nejsou uvedeny. V tak dynamickém oboru jako je fotovoltaika (v období od roku 2012 do současnosti instalovaný výkon ve světě vzrostl ze 100 GW<sub>p</sub> na současných více než 200 GW<sub>p</sub>) může snadno dojít ke ztrátě kontaktu se stávajícím stavem technologie. Několik novějších trendů ve výzkumu a vývoji zmiňuje autorka v kapitole II. 2, ale nezařadila je do seznamu použité literatury.

Nejdůležitější část práce práce (teoretický rozbor, experimentální výsledky a jejich vyhodnocení) je zpracována v kapitolách IV – X. K obsahu jednotlivých kapitol mám následující věcné připomínky.

Čtvrtá kapitola byla oproti původní práci výrazně zkrácena. V části IV.2. postrádám fyzikální model fotovoltaického článku, včetně požadavků na vlastnosti materiálů, ze kterých může být tenkovrstvý článek realizován (popis v odstavci 2.1 je příliš stručný). Chybí zmínka o některých materiálech, použitých v sériové výrobě tandemových článků (např. amorfni Si-Ge).

Pátá kapitola je zaměřena na problematiku tandemových struktur. Oproti původní verzi byla kapitola doplněna odstavcem o transparentních vodivých oxidech. Přesto by bylo vhodné podrobněji diskutovat hlavní konstrukční principy pro dosažení vysoké účinnosti tandemových struktur. V odstavci V.4. chybí vysvětlení malého rozdílu v účinnosti článku z amorfního křemíku a tandemu a-Si:H/c-Si:H a také několikrát konstatovaného poklesu účinnosti s rostoucí intenzitou dopadajícího záření.

Šestá kapitola je zaměřena na deposici tenkých křemíkových vrstev metodou PECVD. Popisuje použité depoziční zařízení a podmínky přípravy vzorků, použitých pro měření. Podmínky experimentu nejsou podrobněji zdůvodněny. Je uvedeno, že každou technologií bylo realizováno 6 vzorků, v tabulce by měla být proto uvedena průměrná hodnota a rozptyl (v tabulce 2 na str. 43 mají dva vzorky stejné označení) a komentován způsob výběru vzorků pro další měření (byl měřen vždy pouze jeden vzorek ?).

Sedmá kapitola je věnována popisu pěti metod, které byly použity pro měření vlastností realizovaných vrstev : UV-Vis spektroskopie, spektroskopická elipsometrie, Fourierova infračervená spektroskopie, Ramanova spektroskopie a rentgenová difrakce.


Výsledky měření jsou uvedeny v osmé kapitole. V tabulkách tab.5 až tab.20 jsou uvedeny výsledky měření jednotlivých parametrů deponovaných vrstev. Jsou popsány metody fitace parametrů a konstatována neurčitost měření větší než 0,1%. Výsledky by tedy měly být uváděny s přesností na čtyři platné číslice a ne na sedm platných číslic, jak je uvedeno např. v tab. 10. Závěry provedené v odstavci VIII-1.2.3.1 o vlivu ředění plynné směsi na tloušťku deponovaných vrstev jsou chybné, protože depoziční doba byla různá pro různá ředění a je zřejmé, že depoziční rychlost s rostoucím ředěním klesá (jak vyplývá z tab. 2, pro R=0 je depoziční rychlost 34 nm/min, pro R=70 je depoziční rychlost 3,2 nm/min).

V deváté kapitole jsou shrnuty a diskutovány výsledky měření a provedeny závěry pro využití poznatků při přípravě tandemových fotovoltaických článků. Bylo by vhodné porovnat naměřené výsledky s údaji v literatuře.

Závěr.

Předložená disertační práce je výsledkem rozsáhlé experimentální činnosti doktorandky při měření parametrů tenkých vrstev amorfního a mikrokrytalického křemíku, připravených metodou PECVD. Je možno konstatovat, že jádro disertace obsahuje některé původní závěry využitelné v praxi a publikované v rámci odborných konferencí. Z tohoto hlediska je práce v souladu s §47 bod 4 zákona 111/98 Sb. Na druhé straně jsou v práci nedostatky, které je třeba v průběhu obhajoby diskutovat.

V Praze, 21.10.2015

  
Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.  
ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická

## Posudek dizertační práce

Název práce: Příprava a analýza tenkých křemíkových vrstev pro tandemové fotovoltaické články

Autorka: Ing. Hana Benešová

Recenzent dostal k posouzení druhou revidovanou verzi dizertace. Úvodem posudku dlužno dodat, že oproti první verzi došlo ke značnému zlepšení. Autorka si vzala k srdci (některé) minulé výhrady samotné experimenty již vylepšit nemohla, ale alespoň je prezentovala způsobem, který je odpovídající požadavkům běžně na dizertaci kladeným. Zmizela, nebo byla zmírněna, některá příliš zobecňující tvrzení, neadekvátní ekonomické úvahy a zcela zbytečné historické exkurze. To dalo příležitost vyniknout řadě původních experimentů, které recenzent kladně hodnotil již minule.

Mé připomínky jsou tedy již zeslabeny:

1. autorka neopravila určité neobratnosti, typu "Tauc zakázaný pás" a pod. To je spojení češtiny a angličtiny a navíc Prof. Jan Tauc by si českou koncovku zasloužil, jelikož to byl Čech.
2. podobně "pohyblivostní zakázaný pás" je nešťastný překlad výrazu "gap" (tady je to opravdu mezera).
3. autorka je trochu na štíru s chemickými značkami. Např. PbI<sub>2</sub> je jodid a ne oxid a i koncovka by pak byla špatně (ale to je možná jen překlep). Rovněž záměna síry a selenu (v několika případech) nedělá dobrý dojem

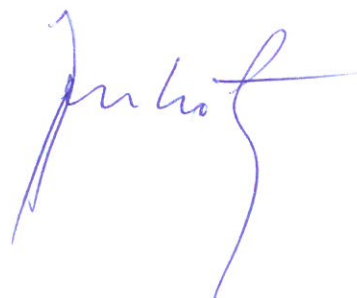
Takových příkladů by se našla řada, ale jejich výčet nemá pro hodnocení práce význam.

Nicméně autorka nezměnila (a asi ani nemohla) celkové vyznění práce týkající se perspektiv tandemových fotovoltaických článků. Tato tvrzení (pro vyznění práce zcela zásadní) vyvolala odpor již minule a jejich obhajoba autorkou nevyzněla zrovna přesvědčivě. "Úplný závěr" na str. 113 by mohl sloužit jako slogan, vědecká jeho hodnota je však nulová.

Musím dále autorku (znovu) vyzvat, aby předložila separáty, resp. kopie svých publikací, včetně vyjádření spoluautorů. A také vyjádření pracovníků NTSI o jejím podílu na prezentovaných experimentech.

Moje hodnocení na závěr: práci doporučuji k obhajobě.

V Plzni, 12. října 2015



Oponentní posudek disertační práce “ ing.H.Benešové  
**„Příprava a analýza tenkých křemíkových vrstev pro tandemové fotovoltaické články“**

Práce obsahuje rešeršní část zaměřenou na tenké vrstvy a-Si:H a  $\mu$ c-Si:H a na fotovoltaiku obecně. Cílem bylo připravit vrstvy a-Si:H a  $\mu$ c-Si:H, zjistit jejich vlastnosti a posoudit jejich vhodnost pro tandemové články. Autorka prováděla velmi zevrubně diagnostiku vrstev UV-Vis, FTIR a Ramanovskou spektroskopií, elipsometricky a RTG difrakcí. Chybí však zpětná vazba těchto metod na technologii; jejich podrobný rozbor působí proto samoúčelně. Tvrzení, že všechny deponované vrstvy jsou vhodné pro tandemové články (str.111) není opodstatněné. Nejsou-li totiž měřeny elektrické vlastnosti, nelze vůbec soudit na vhodnost vrstev pro konstrukci PN nebo PIN diod. Pokud měla práce připravit konstrukci tandemů, měla být věnována pozornost dopování vrstev a studiu jejich elektrických vlastností. Vodivost připravených vrstev a pohyblivost volných nosičů proudu nebo difúzní délka jsou další parametry, které by měly být sledovány.

V odstavci 2.1.1 se vysvětluje funkce fotovoltaického článku dosti matoucím způsobem. Z řady nepřesností lze uvést např. tvrzení, že „vzdálenost párů elektron-díra musí být menší, než je difúzní délka“ (str.17). Na str.31 ve 4. odstavci shora se píše: „Namísto difúzní délky hovoříme o driftové délce, která je součinem difúzní délky...doby života a intenzity pole...“. To nesouhlasí ani rozměrově! Je patrné, že tu chybí některé základní představy z fyziky polovodičů. Časté chyby jsou v terminologii: autorka používá např. termín „intristický“ (str.30 dole). Používá často číslice v textu, kde to není vhodné, např. „kombinace těchto 5 metod“ na str.104.. Struktura tandemového článku na obr.9 (str.32) je znázorněna chybně. Postrádá totiž mezivrstvu mezi oběma PIN diodami, která umožňuje transport nábojů z jedné diody do druhé např. tunelováním.

Předložená práce by měla snést srovnání se stavem výzkumu v zahraničí, což by mohla doložit publikace v zahraničním časopise s nenulovým impakt faktorem. Takový doklad však chybí.

Domnívám se, že je třeba umožnit doktorandce, aby se k uvedeným námitkám vyjádřila, a proto doporučuji disertační práci k obhajobě.

V Praze 5.10.2015

*J. Toušek*  
Doc.RNDr.J.Toušek,CSc.