



## **Posudek disertační práce**

**Název práce:** Mechanical and Electrical Properties of Microcrystalline Silicon Thin Films

**Doktorand:** Mgr. Aliaksei Vetushka  
Matematicko-fyzikální fakulta  
Univerzity Karlova v Praze

**Oponent:** Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.

Předložená disertační práce se zabývá aktuální tematikou studia vzájemné vazby mechanických, elektrických a strukturálních vlastností tenkých mikrokrystalických vrstev křemíku. Má přiměřený rozsah 86 stran bez příloh a je logicky rozčleněna do pěti hlavních kapitol. Práce dále obsahuje 89 odkazů na literaturu, vč. publikací doktoranda. K práci jsem zaujal níže uvedené stanovisko.

### ***a) Aktuálnost zvoleného tématu***

Při výrobě fotovoltaických článků je poslední dobou pozornost zaměřena na technologie využívající jako aktivní vrstvu mikrokrystalický křemík. Pro snížení vstupní ceny fotovoltaických panelů se jako jedna z cest jeví použití flexibilních substrátů, které navíc umožní rozšířit možnosti aplikací. To sebou přináší potřebu se více věnovat problematice mechanického namáhání, pnutí ve vrstvách a adheze při zachování potřebných optoelektrických vlastností pro vysokou účinnost fotovoltaických článků.

Hlavním záměrem předložené disertační práce je proto studium vlivu mechanického namáhání tenkých vrstev mikrokrystalického křemíku a odpovídajícího transportního mechanismu nábojů. Pro toto studium byly vybrány dvě hlavní metody – Ramanovská mikrospektroskopie a vodivostní mikroskopie atomárních sil (C-AFM).

Zvolené téma má disertabilní charakter, plně odpovídá moderním trendům v oboru doktorského studia a přispívá k rozvoji v oblasti optimalizace nanostruktur na bázi mikrokrystalického křemíku.

### ***b) Cíle disertace***

Hlavní cíle práce byly formulovány v kap. 1.2 disertační práce do následujících částí:

- a) Pochopit růst křemíkových tenkých vrstev s mikrokrystalickou strukturou.
- b) Pochopit transportní mechanismus v intrinsických křemíkových vrstvách ve vazbě na jejich mikrostrukturu.
- c) Objasnit chování tenkých vrstev mikrokrystalického křemíku za různého mechanického namáhání.
- d) Shrnout praktické aspekty Ramanovské mikrospektroskopie a vodivostní mikroskopie atomárních sil s vysvětlením některých artefaktů a návodem, jak je z měření vyloučit.

### ***c) Metody zpracování***

Jak je možno vypořádat z doktorské disertační práce, Mgr. Vetushka se zabýval tématem disertační práce dlouhodobě, systematicky a velmi podrobně. V práci postupoval od známých skutečností postupně k řešení vlastního disertabilního jádra práce. K řešení práce doktorand využil metod vědecké práce – analýza současného stavu, návrh řešení, modelování a simulace a experimentální ověření. Vycházel z fyziky polovodičů za podpory příslušného matematického aparátu a programových prostředků. Doktorand využíval zázemí mezinárodně uznávaného vědeckého týmu AV ČR.

Práce je rozdělena do dvou celků - teoretického základu práce s kapitolami 2 a 3 a praktické části s kapitolami 4 - 6, kde je podrobně rozvedeno, jak byly jednotlivé cíle splněny. V kapitole 2 je proveden úvod do problematiky. Kapitola 3 se zabývá popisem použitých metod – Ramanovské spektroskopie a AFM. V kapitole 4 jsou uvedeny detaily týkající se přípravy vzorků a použitých experimentálních zařízení. Kapitola 5, resp. 6 vytváří jádro celé práce. Jsou zde detailně rozebírány a popsány výsledky dosažené při mapování mikrokrytalických Si:H vrstev pomocí Ramanovské mikrospektroskopie, resp. C-AFM. Zejména jsou popsány možnosti zobrazení zrn v amorfní matici a možnosti sledování mechanického namáhání pomocí výše uvedených metod. Závěr tvoří kapitolu 7.

Práce je realizována na 86 stranách, dále je přiložena příloha, která obsahuje autorovo CV a seznam jeho publikací a vystoupeních na konferencích. Lze říci, že práce je z hlediska informací v ní obsažených dobře vyvážená, možná by charakter kapitol 5 a 6 mohl být koncipován méně časopisecky, např. s podrobnějším rozvedením jednotlivých vztahů. Standardu odpovídá 89 odkazů na literaturu a jejich výběr.

### ***d) Formální úpravě disertační práce a jazykové úrovni***

Autor vytvořil práci srozumitelnou a jasnou. Práce je psána v anglickém jazyce. Vůči odbornému slohu a terminologii nemám námitek. Přiměřená je i grafická úroveň práce.

### ***e) Výsledky disertační práce a nové poznatky***

Přínos práce z předložených výsledků (a jak je shrnuto v závěru) lze formulovat zejména:

1. Poukázání na možnost využití Ramanovské mikrospektroskopie pro stanovení krystalinity vzorků, s možností stranového rozlišení jednotlivých zrn cca 350 nm při použití vlnové délky excitačního záření 442 nm.
2. Vývoj experimentální metody pro vytváření mechanického namáhání tenkých vrstev mikrokrytalického křemíku s přímou možností Ramanovského měření.
3. Bylo ukázáno, že poloha Ramanovských píků se lineárně mění s mechanickým napětím ve vrstvách mikrokrytalického křemíku.
4. Bylo ukázáno, že lokální anodická oxidace (LAO) může při přiloženém vyšším kladném napětí ovlivnit výsledky mapování elektrických vlastností při použití metody C-AFM. Současně byly navrženy a experimentálně ověřeny postupy, které umožňují tyto indukované artefakty omezit.
5. Na základě měření C-AFM na vzorcích s různou geometrií kontaktů byl doplněn model popisující transportní mechanismy v mikrokrytalických vrstvách křemíku o složku LGB (Large Grain Boundaries).

### **f) Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru**

Práce má přímé praktické uplatnění jak ve vývoji, tak v praxi. Disertant přináší některé nové poznatky týkající se rozlišení při mapování vzorků tenkých vrstev mikrokrystalického křemíku pomocí Ramanovské mikrospektroskopie a vysvětluje některé zanesené artefakty při použití vodivostní spektroskopie atomárních sil. Současně práce přináší návod, jak se vyhnout změnám, které mohou být indukované měřením C-AFM v sousedním okolí mapovaného místa. Nastíněný model transportu v  $\mu\text{c-Si:H}$  vrstvách, který je podpořen výsledky předložených měření, může být využit pro vysvětlení experimentálních dat získaných jinými technikami.

### **g) Vyjádření k publikacím doktoranda**

Práce obsahuje také seznam 7 publikací v impaktovaných časopisech (z toho 2x je Mgr. Vetushka prvním autorem). Dále 12 příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencích (4x první autor), 4 příspěvky ve sbornících domácích konferencí (1x první autor). Dále doktorand uvádí 9 nepublikovaných konferenčních příspěvků. Ve všech případech se články týkají problematiky související s disertační prací.

Je tedy možné konstatovat, že se Mgr. Vetushka během doktorského studia zapojil do výzkumné a vývojové práce a publikoval dosažené výsledky. Počet a kvalitu publikací je možno ocenit.

### **h) Shrnutí**

Oponovaná práce je zaměřena na studium vzájemné vazby mechanických, elektrických a strukturálních vlastností tenkých mikrokrystalických vrstev křemíku. V disertační práci jsou uvedeny rozšířené možnosti využití dvou hlavních použitých experimentálních metod – Ramanovské mikrospektroskopie a vodivostní mikroskopie atomárních sil (C-AFM). Ty byly použity ke studiu jednak mapování krystalických zrn v amorfní matici, jednak ke studiu vlivu mechanického namáhání tenkých vrstev mikrokrystalického křemíku na měřená spektra.

Vlastní podíl disertanta je zřetelný. Byly navrženy nové postupy umožňující omezení vzniku artefaktů při měření C-AFM a představen rozšířený model transportního mechanismu ve vrstvách mikrokrystalického křemíku.

V oponované práci nejsou patrné zásadní chyby teoretického charakteru a podstatné nedostatky. Výsledky práce byly dostatečně publikovány v impaktovaných časopisech.

Disertace splňuje podmínky samostatné tvůrčí vědecké práce a obsahuje původní výsledky, které byly publikovány. Práce splňuje podmínky §47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb. a předpisů platných na Univerzitě Karlově v Praze. Proto **doporučuji** disertační práci Mgr. Aliaksei Vetushky **k obhajobě**.



V Brně dne 12. 2. 2011

Doc. RNDr. Petr Sládek, CSc.

Příloha: Otázky a náměty do rozpravy.

Příloha: Otázky a náměty do rozpravy:

(angl. verze)

1. p. 38: Why you used different pressure units in the same paragraph (mbar vs. Pa)?
2. p. 42, Fig. 5.3: Missing description of axes.
3. p. 43, Fig. 5.4: I did not found the link to this figure in the text.
4. p. 45: For better clarity, please present Figure with Raman spectra for both 442 and 785 nm.
5. pp 45, 46: What do you mean under Raman integral intensity on pp. 45, 46?
6. p. 45: Can you estimate error of large grain diameter (1.65 and 1.64  $\mu\text{m}$ , from Raman mapping and AFM respectively)?
7. p. 51, Fig. 5.9: Missing comment of Z- unit. In the Fig. 5.9 caption you state:  
*At curvatures with radius less than 1mm near the base the profile of the cantilever becomes more parabolic.*  
This is in contradiction with the main body text:  
*Fig. 5.9 shows that at high curvatures the profile of the bent cantilever becomes more parabolic.*
8. p. 51 below: The text with link to Fig. 4.5 is not correct.
9. pp 52, 53 – Fig. 5.10 and 5.11: On x-axis you have in both cases **Bending** - is it correct?
10. § 5.2.5 Can you comment deposition condition of the film?
11. p. 54, Fig. 5.12: At which place ( $X= 10\mu\text{m}$ ?) do you measure the Raman spectra?
12. p. 56: As **we** have shown [73] ... But A.Vetushka is not among authors...
13. p. 61 below: Perhaps (see fig. **6.5**) instead fig. 6.4.

(česká verze)

1. s. 38: Proč používáte různé jednotky tlaku v jednom odstavci (mbar vs. Pa)?
2. s. 42, Fig. 5.3: Chybí popis os.
3. s. 43, Fig. 5.4: V textu jsem nenašel odkaz na tento obrázek.
4. s. 45: Pro lepší názornost odkazu na měření v textu prosím o předložení obrázku s Ramanovskými spektry pro excitační záření 442 a 785 nm.
5. s. 45, 46: Co rozumíte pod pojmem Raman integral intensity na s. 45, 46?
6. s. 45: Můžete určit nepřesnost při stanovení velikosti poloměru zrna (1.65 a 1.64  $\mu\text{m}$ , stanovené z Ramanovského mapování, resp. AFM)?
7. s. 51, Fig. 5.9: Chybí komentář týkající se jednotky u veličiny Z.  
V popisu obr. 5.9 je uvedeno:  
*At curvatures with radius less than 1mm near the base the profile of the cantilever becomes more parabolic.*  
To je v rozporu s tím, co je uvedeno v textu:  
*Fig. 5.9 shows that at high curvatures the profile of the bent cantilever becomes more parabolic.*
8. s. 51 dole: Text neodpovídá odkazu na obr. 4.5.
9. s. 52, 53 – Fig. 5.10 a 5.11: Na x-ové ose je v obou případech uvedeno **Bending** – je to v pořádku?
10. § 5.2.5 Můžete blíže upřesnit depoziční podmínky prezentované vrstvy?
11. s. 54, Fig. 5.12: V kterém místě ( $X=10\mu\text{m}$ ?) jste měřil Ramanovská spektra?
12. s. 56: As **we** have shown [73] ... Ale A.Vetushka není uveden mezi autory...
13. s. 61 dole: Zřejmě (see fig. **6.5**) místo fig. 6.4.