

Oponentní posudek disertační práce

“Early Stages of indium growth on the Si(100) surface”

Doktorand: Mgr. Jakub Javorský

Školitel: Doc. RNDr. Ivan Ošťádal, CSc.

Konzultant: Doc. RNDr. Pavel Sobotík, PhD.

Doktorand se ve své práci zabývá vysoce aktuální problematikou výzkumu počátečních fází růstu polovodičových nanostruktur. S rostoucí miniaturizací elektronických součástek a objevem kvalitativně nových funkčních nanostruktur a zařízení vzniká potřeba detailního pochopení růstu struktur na atomární úrovni i vlivu defektů na tento růst. Disertační práce přispívá k řešení tohoto úkolu.

Doktorand se zaměřil na studium tvorby řetízků atomů In na substrátu Si (100) – 2 x 2. Při tomto výzkumu používal vedle experimentálních metod rovněž výsledky simulací metodou Monte Carlo.

Pro zvládnutí zvolených úkolů si musel doktorand osvojit teoretické základy i experimentální dovednosti spojené s řadou moderních metod i zařízení. Bylo nutné zvládnout základy ultravakuové techniky, přípravu rekonstruovaných substrátů, technologií vakuového napařování stromů s pokrytím menším jak jedna monovrstva, kalibraci napařovacích rychlostí, i samotný výzkum takto připravených vrstev metodou STM a interpretaci výsledků pomocí počítačových simulací založených na stochastických metodách (KMC). Pozorování atomární struktury povrchů pomocí STM je časově velmi náročné a vyžaduje značnou zkušenost a trpělivost. To stejné platí i pro korektní interpretaci a vyhodnocení získaných snímků.

Při pokojové teplotě se podařilo přímo pozorovat růst a rozpad In řetízků a identifikovat způsob zakončení řetízků. To umožnilo definovat model založený na růstu nebo rozpadu řetízku po jednotlivých atomech, jakož i určit energii potřebnou pro odtržení atomů od řetízku. Zcela originální jsou hodnoty předexponenciálního faktoru, jejichž přímo měřené hodnoty nebyly dosud v literatuře publikovány. Tyto hodnoty mají poměrně značný rozptyl, což je však u této veličiny typické. Mám však výhrady ke způsobu jejich zápisu (diskutujte prosím v rozpravě).

Využitím uvedeného modelu a zjištěných energií odtržení byly provedeny simulace KMC a jejich fitováním k experimentálním výsledkům nalezeny difúzní bariéry. Ty jsou však několikrát větší než ab-initio výpočty nebo přímá pozorování při nízkých teplotách. V práci jsou uvedeny možné důvody způsobující tento nesoulad a naznačeny cesty, jak jej zmírnit. Z uvedené analýzy však není možné zjistit, jak je obtížné a realistické tyto cesty realizovat. Byly již provedeny nějaké úpravy stávajícího programu za tímto účelem? Simulace pomohly rovněž vysvětlit řadu dalších jevů, zejména monotónnost v rozdělení velikosti ostrůvků a vztah mezi koncentrací „C“ defektů a průměrnou délkou řetízků a ukázaly na potřebu provádět experimenty za nízkých teplot. Nízkoteplotní pozorování, uskutečněná na pracovišti FÚ AVČR přinesla rovněž originální výsledky, např. zobrazení jednotlivých atomů a „intra-dimerů“ skupiny III na Si (100).

Výsledky byly publikovány ve třech rezenzovaných mezinárodních časopisech.

Dosažené výsledky přispívají k pochopení mechanismů samouspořádávání při tvorbě nanostruktur. Takové objekty mohou nalézt uplatnění jak v základním výzkumu nanostruktur, tak i technologických aplikacích.

Práce je obsahově rozdělena do dvou celků. V první, rešeršní části je podán výklad oblastí a problémů, který je potřebný pro pochopení zkoumané problematiky. Stručné nastínění problematiky je věcně správné a nenašel jsem v něm žádná podstatná pochybení. V některých případech však přílišná stručnost znesnadňuje porozumění výkladu a vzniká otázka, zda takto podané části má smysl vůbec uvádět, zvláště, když zbytek textu se na ně přímo neodkazuje (např. vzorce 10 až 12). Dále mi ve výkladu chybí zmínka o některých nových trendech, které mohou mít přímý dopad na oblast doktorandova výzkumu. Jedná se např. o bezkontaktní metodu AFM („tunning fork“), umožňující lepší rozlišení než STM. Dále je poměrně málo místa věnováno strukturám In a Ga na površích Si, které byly intenzivně studovány po řadu let. Je známo, že v závislosti na pokrytí a teplotě vytvářejí superstruktury s rozličnými rekonstrukcemi.

Druhá část se zaměřuje na popis vlastních výsledků. Sestává z metodického úvodu do vlastní práce a ze stručných komentářů výsledků doložených kopiemi příslušných článků. Tato kompozice je obvyklá např. pro docentské habilitační práce, pro doktorské disertační práce se mi však jeví poněkud nevhodná. Zastírá totiž míru podílu autora na dosažených výsledcích, neboť články jsou kolektivními pracemi. Uvítal bych rovněž, kdyby byl v práci uveden explicitně seznam všech publikací doktoranda.

Oceňuji, že práce je psána v jazyce anglickém, protože součástí plnohodnotného doktorského studia má být i příprava studenta pro publikování v mezinárodních odborných časopisech, psaných ponejvíce v angličtině.

Celkově úroveň práce dosvědčuje, že doktorand nabyl solidní znalosti v oblasti fyziky povrchů a zvládl zadaný úkol.

V souvislosti s prací a jako součást rozpravy požaduji zodpovězení následujících bodů:

1. Specifikujte svůj podíl na dosažených výsledcích.
2. Uveďte seznam všech svých publikací.
3. Vysvětlete blíže fyzikální význam vzorců č. 10 – 12. Do jak velkých ostrůvků je reálné touto metodou počítat jejich vývoj?
4. Vysvětlete funkci zadní desky („back plate“, pos. 7 na obr. 16) při ochraně hlavy STM před napařováním. Zřejmě se jedná o ochranu před depozicí z napařovacích zdrojů mimo mikroskop? Jak je ale zabráněno napařování částí mikroskopu, zejména hrotu při „in-vivo“ depozici?
5. Byly již provedeny obdobné experimenty pomocí AFM s atomárním rozlišením v nějaké jiné laboratoři?

6. Diskutujte zápis předexponenciálních faktorů (je vhodné jej uvádět na jedno desetinné místo při takovém rozptylu?).

Předložená práce splňuje kritéria kladená na disertační práci a hodnotím ji známkou výborně. Za předpokladu úspěšného průběhu oponentního řízení doporučuji udělit panu magistru Jakubu Javorskému titul Ph.D.

V Brně, 20. 8. 2011

Prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ÚFI FSI VUT Brno