

# Oponentní posudek disertační práce

Ústav: Středoevropský technologický institut VUT

Akademický rok: **2025/2026**

Student (ka): **Ing. Jakub Pongrácz**

Doktorský studijní program: **Pokročilé materiály a nanovědy**

Vedoucí disertační práce: **doc. Ing. Roman Gröger, Ph.D. et Ph.D.**

Oponent disertační práce: **Ing. Alice Hospodková, Ph.D.**

**Název disertační práce:** Optimalizace rané fáze heteroepitaxního růstu polovodičových filmů

## Aktuálnost tématu disertační práce:

Heteroepitaxe nitridových polovodičů na Si podložkách byla velmi aktuální před cca 15 lety, nicméně stále přetrvávají problémy s poměrně vysokou hustotou dislokací kvůli vysokému pnutí ve struktuře. Pokud by se našel efektivní způsob, jak hustotu dislokací v epitaxních vrstvách snížit jednalo by se jistě o významný průlom.

Tady je však potřeba zmínit, že téma resp. název práce úplně neodpovídá obsahu disertace. Práce se prakticky netýkala optimalizace rané fáze epitaxního růstu, jak slibuje název, ale spíše porovnání kvality epitaxních nitridových vrstev připravených různými (velmi odlišnými) technologiemi na Si podložkách: ALD, MOVPE, MBE, sputtering. To je samozřejmě velmi zajímavé téma, pro vědeckou komunitu přínosné, avšak s tímto názvem disertace vlastně nedohledatelné. Je opravdu škoda, že název práce neodpovídá obsahu.

## Splnění stanovených cílů:

Cíle, které jsou definovány na straně 30 byly splněny. Pouze poslední cíl, který měl být odpovědí na otázku: „If all threading dislocations act as recombination centres, some more other less, is there a way of partially suppressing the creation of highly recombination active TDs?“ jsem nenašla v disertaci plně zodpovězený, i když ukazuje, které technologie vedly k lepším výsledkům. Možná by se k této otázce mohl doktorand vrátit v rámci obhajoby práce a říci, jestli s na základě charakterizace vzorků podařilo tuto otázku zodpovědět.

## Postup řešení problému a výsledky disertace:

V rámci disertace byla získána a charakterizována řada vzorků. Cenné je především srovnání různě připravených AlN vrstev.

Poněkud neorganicky je do práce hned na začátku včleněna příprava porézních InGaN supermřížek pro Braggovská zrcadla, které byly připraveny na pracovišti v Cambridgi, kde se tomuto zajímavému tématu v současnosti intenzivně věnují. Nicméně i tady mají vliv dislokace a V-pity na mechanismus elektrochemického leptání a porosifikace. Takže, i když se jednalo o jiný typ nitridových vrstev na jiném substrátu, vzhledem k tomu, že se na této práci doktorand úspěšně podílel v rámci doktorského studia, je v pořádku, že byla včleněna do disertace.

Další pokračování práce bylo systematické na vzorcích, které byly získány z různých pracovišť a připraveny různými technologiemi. Práce se zaměřila úzce na AlN vrstvy epitaxně připravené různými technikami na Si substrátu. Při charakterizaci byly využívány především následující metody, které byly zřejmě doktorandovi dobře přístupné: SEM, EBIX, EBAX, EDS, AFM, TEM a HRTEM. Jedna důležitá metoda pro určení krystalografické kvality však chybí: XRD – rentgenová difrakce, což je škoda.

Zvláště pěkná je část práce, která se věnuje různým typům dislokací a jejich rekombinační aktivitě pomocí EBIC kontrastu. Tato část práce přináší vědecké komunitě zcela nové a velmi užitečné informace. Díky kombinaci více metod byly identifikovány 4 typy dislokací: hranové (typ a), šroubové (typ c), a 2 smíšené typy (a+c, m+c). Byla kvantifikována jejich četnost i rekombinační aktivita, což je v případě AlN epitaxních vrstev doposud neprozkoumaná oblast. Právě využití EBIC a EBAC pro tuto charakterizaci je velmi dobře zvoleno, protože optická aktivita dislokací pomocí katodoluminiscence je v případě tenkých AlN vrstev prakticky nedosažitelná.

Přestože byly vzorky získány z různých zdrojů, podařilo se získat také 2 sady vzorků umožňující systematictější studium vlastností, obě sady byly připraveny metodou MOVPE. Na sadě vzorků s různou tloušťkou AlN byl studován vliv tloušťky na morfologii. Druhá sada vzorků byla připravena s různou rychlostí růstu AlN vrstvy. Při interpretaci výsledků této sady však možná došlo k chybě. Autorovi chyběla informace (nemohl vědět), že při velmi nízkých růstových rychlostech AlN se může projevit více paměťový efekt reaktoru, tedy Ga deponované na jeho stěnách, které způsobuje leptání Si substrátu. Právě tento efekt zřejmě stojí za tvorbou C defektů: na TEM je zřetelné proleptání do substrátu a na EDS je patrné obohacení AlN o odleptané Si atomy přesně pod oblastí s nižší hustotou defektů. Si kontaminace zřejmě snižuje v této oblasti pnutí, a tím i hustotu vzniklých misfit dislokací. Nižší hustota dislokací není tedy způsobena pomalým růstem, jak předpokládá autor, ale leptáním a zpětným zabudováním Si. Dokazuje to, jak důležité a užitečné pro poznání a vědecký výzkum je komunikace a diskuse výsledků mezi týmy.

MOVPE vrstvy připravené v Otto von Guericke Universität pomocí epitaxe složené ze dvou kroků při vysokém a nízkém V/III vykazovaly extrémně nízké hustoty dislokací. Podle této práce by měly být hustoty  $1,7 \cdot 10^7 \text{cm}^{-2}$  (str. 81 nahoře). To je na Si substrátu zcela unikátní výsledek (pokud se nejedná o chybu). Taková hodnota by si zasloužila velkou pozornost a několikanásobné ověření jinými metodami (např. leptáním nebo XRD), což jsem v práci nenašla. V následující větě se uvádí, že je vrstva částečně polykrystalická. Takže čtenář vlastně neví, co si má o kvalitě vrstvy myslet. Bylo by fajn, kdyby to bylo lépe vysvětleno u obhajoby.

V odstavci 6.4 Summary si doktorand správně všimnul, že u epitaxních vrstev s pozvolnou gradací koncentrace Si v EDS mapách (OVGU\_1 MOVPE vzorek) nebo u oblastí s tímto jevem (C defekty MOVPE vzorku Prague\_2) mají vrstvy velmi nízkou koncentraci dislokací. Bohužel v sekci 9. Conclusion již tento velmi zajímavý jev zmíněn není. Myslím, že to může být velmi důležitý nový poznatek, který by neměl zapadnout. Mohl by např. umožnit i přípravu vertikálních struktur.

Poslední kapitoly dokazují, jak extrémně důležitá je absolutní čistota materiálu i zařízení při epitaxním procesu a co může napáchat nechtěná kontaminace kyslíkem, molybdenem, ale i galiem (i když tato kontaminace nebyla v rámci disertace potvrzena).

#### **Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru:**

Nitridové polovodiče jsou po křemíku druhým nejpoužívanějším typem polovodičů. Jakýkoliv způsob zlepšení jejich kvality je proto pro průmyslové a praktické využití velmi důležité.

Za nejpřínosnější část práce považuji část věnovanou různým typům dislokací a jejich rekombinační aktivitě pomocí EBIC kontrastu. Tato část práce přináší vědecké komunitě zcela nové a velmi užitečné informace o rekombinační aktivitě různých typů dislokací, což je v případě AlN epitaxních vrstev doposud neprozkoumaná oblast. Velmi pěkná a přínosná je kombinace různých typů charakterizace a mikroskopii, které přinášejí nový vhled do pochopení souvislostí mezi typy defektů a vlivem na vlastnosti vrstev.

Potenciálně zajímavé je také zjištění, že u epitaxních vrstev s pozvolnou gradací koncentrace Si v EDS mapách (vzorek OVGU\_1) nebo u oblastí s tímto jevem (C defekty MOVPE vzorku Prague\_2) mají vrstvy velmi nízkou koncentraci dislokací, viz 6.4 Summary. Bohužel v sekci 9. Conclusion tento jev zmíněn není.

#### **Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň:**

Po grafické stránce má práce dobrou úroveň, je přehledně členěná. Možná mi chyběla na konci nějaká tabulka zkoumaných vzorků s krátkým komentářem, případně hustotou TD, podobně, jako byla na konci kapitoly 4.1 uveden v tabulce přehled technologií. Jazyková úroveň, pokud mohu posoudit, je dobrá. Jen by chtěla práce po sobě pečlivě přečíst, najde se tam řada překlepů a nepřesností. Rozsah práce je více než dostatečný.

#### **Zda dizertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona:**

(4) Studium se řádně ukončuje státní doktorskou zkouškou a obhajobou disertační práce, kterými se prokazuje schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu nebo vývoje nebo k samostatné teoretické a tvůrčí umělecké činnosti. Disertační práce musí obsahovat původní a uveřejněné výsledky nebo výsledky přijaté k uveřejnění. 1)

---

<sup>1</sup> § 10 zákona č. 35/1965 Sb., o dílech literárních, vědeckých a uměleckých (autorský zákon).

**Dizertační práce Ing. Jakuba Pongrácze splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona, prokázal samostatnost i připravenost pro práci ve výzkumu a vývoji. Výsledky práce byly publikovány ve dvou recenzovaných publikacích.**

#### **Připomínky a dotazy:**

Nejprve si dovoluji napsat několik připomínek k některým malým nepřesnostem, které jsem v disertaci našla zvláště v úvodních kapitolách, např.:

Str. 17: jsou zde dvě různé hodnoty  $E_g$  InN. Která je správně?

Str. 24: Není pravda, že jedinou možností jak růst kvalitní nitridové epitaxní vrstvy je heteroepitaxe. GaN a AlN substráty jsou čím dál dostupnější a připravují se již ve větších poloměrech. Předpoklad je, že v r.2030 by mohly být k dispozici i 8" GaN substráty.

Historie epitaxe nitridových vrstev je špatně chronologicky popsána: nejprve připravil Akasaki GaN na nízkoteplotních AlN nukleačních vrstvách (1989), pak teprve Nakamura použil LT GaN nukleaci (1991).

Str. 26: Dimethyl aluminium neexistuje (nevím o tom)

Str. 27: MOVPE metoda není zcela dobře popsána, růst neprobíhá v cyklech, ale kontinuálně. V cyklech funguje ALD.

Str. 29: zajímavý pojem „neutral ion“ – vyskytuje se v disertaci nejméně na dvou místech

Str. 32: Pro přípravu vzorků Prague\_1 a Prague\_2 byl využit komerční AIXTRON 2000 3x2 CCS Flip-top reaktor. Není nijak upravován, je vyroben na zakázku. (K dispozici pro přípravy nitridových vrstev je také reaktor AIXTRON 200/4 RF umožňující vyšší teploty epitaxe.)

Str. 59: Jsou zde uvedeny pojmy n-polar a non-polar, ale nejsem si jistá, co tím autor myslí: N-polární a nepolární vrstvy? Nebo spíše n-dopované a nedopované vrstvy? Pojem n-polar se vyskytuje v disertaci vícekrát. Zkoumané vrstvy jsou však dle mého názoru všechny Ga-polární nikoliv N-polární.

Str.88: Tady není jasné, jak by měla hustota C-struktur souviset s hustotou TD  $3,75 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  (budu moc ráda za vysvětlení v rámci obhajoby).

#### **Dotazy k obhajobě:**

1. Podařilo se v rámci disertační práce nalézt způsob, jak potlačit tvorbu TD, které jsou nejvíce rekombinačně aktivní (mixed a+c, m+c)?
2. Bylo by velmi zajímavé rozvézt více unikátní výsledek OVGU\_1 vzorku s hustotou dislokací  $1,7 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$  na Si substrátu. Byl tento výsledek konzultován s autory (Armin Dadgar)?
3. Proč je tak důležité zvolit při růstu na Si substrátu AlN nukleační vrstvu, případně i koalescenční vrstvu? Věděl byste alespoň 1, ale ideálně dvě výhody AlN nukleace?
4. Bylo by hezké u obhajoby ukázat tabulku s přehledem AlN vzorků a srovnáním kvality.
5. Prosím o vysvětlení výše zmíněných nejasností ze str. 17, 29, 59 a 88
6. Mezi citacemi jsou na konci i druhy AI: Gemini a Chat GPT. Nenašla jsem však místo v textu, kde byly využity. Mohl byste to, prosím při obhajobě přiblížit?

**Celkové zhodnocení disertační práce:**

**Disertační práce je kvalitní, založena na velkém množství experimentů a jejich důkladném zpracování. Je určitě přínosem pro přípravu nitridových polovodičů jak z praktického, tak vědeckého hlediska. Doktorand prokázal znalost v oboru i schopnost samostatné vědecké práce. Výsledky výzkumu byly publikovány ve dvou článcích v Journal of Applied Physics (IF 2,7)**

Disertační práci Ing. Pongrácze doporučuji k obhajobě pro udělení akademického titulu “doktor“ (Ph.D.).

V Praze, dne 17.2.2026

.....  
Ing. Alice Hospodková, Ph.D.