



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

DEPOZICE GAN NANOSTRUKTUR NA SI(111) 7X7

DEPOSITION OF GAN NANO STRUCTURES ON SI(111) 7X7

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB ŠŤASTNÝ

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JINDŘICH MACH, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Jakub Šťastný**
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jindřich Mach, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Depozice GaN nanostruktur na Si(111) 7x7

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

GaN je polovodič s přímým přechodem, který se jeví jako velmi perspektivní pro polovodičový průmysl. Tento materiál lze připravovat unikátní nízkoteplotní metodou, kdy spolu s atomárními svazky (Ga) interagují dusíkové ionty o nízké energii. Nízká teplota procesu umožňuje přípravu GaN nanostruktur. Při nízké teplotě (cca 200 °C) dochází na substrátu Si(111) 7x7 k růstu ultratenkých 2D krystalů, kdy je předpokládán vliv uspořádání experimentu na jejich tvar a velikost.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provést rešeršní studii na téma 2D GaN.
- 2) Provést sérii depozic GaN nanokrystalů na substrát Si(111) 7x7 pro různé úhly dopadu iontů dusíku.
- 3) Provedení strukturní a optické analýzy připravených vzorků (AFM, SEM, Ramanova spektroskopie, fotoluminiscence,...).

Seznam doporučené literatury:

MANIŠ, Jaroslav, Jindřich MACH, Miroslav BARTOŠÍK, et al. Low temperature 2D GaN growth on Si(111) 7 × 7 assisted by hyperthermal nitrogen ions. *Nanoscale Advances*. 2022, 4(17), 3549-3556. ISSN 2516-0230. Dostupné z: doi:10.1039/D2NA00175F

MACH, Jindřich, Jakub PIASTEK, Jaroslav MANIŠ, et al. Low temperature selective growth of GaN single crystals on pre-patterned Si substrates. *Applied Surface Science*. 2019, 497. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2019.143705

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem růstu 2D GaN nanokrystalů na substrát Si(111) 7x7. V teoretické části této práce jsou popsány vlastnosti 3D a 2D GaN, hlavní metody přípravy GaN i 2D GaN a využití GaN v průmyslu. Experimentální část se zabývá podrobným popisem metody nízkoteplotní kapkové epitaxe za asistence iontů, která byla využita pro provedení série depozic 2D GaN pod různými úhly dopadu iontového svazku na substrát Si(111) 7x7. Depozice byly provedeny v komplexním UHV systému v laboratořích ÚFI VUT v Brně. Vytvořené nanokrystalové 2D GaN byly analyzovány pomocí SEM a AFM.

Summary

The thesis is focused on the study of growth of 2D GaN nanocrystals on Si(111) 7x7. In the theoretical part of this thesis the properties of 3D and 2D GaN, main methods used for growth of GaN and 2D GaN and applications of GaN are described. The experimental part of this thesis describes in detail the method of low temperature droplet epitaxy with assistance of ions, which was used for deposition of 2D GaN nanocrystals under different angles of ion beam. The deposition was done in the complex UHV system in the ÚFI VUT labs in Brno. The nanocrystals were analysed by SEM and AFM.

Klíčová slova

GaN, 2D, nanokrystal, ostrůvek, nitridace, depozice, flashování, žíhání

Keywords

GaN, 2D, nanocrystal, island, nitridation, deposition, flashing, annealing

ŠŤASTNÝ, J. *Depozice GaN nanostruktur na Si(111) 7x7*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2023. 41 s. Vedoucí doc. Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Depozice GaN nanostruktur na Si(111) 7x7 vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Jindřicha Macha, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité podklady v seznamu použité literatury.

Jakub Štastný

V první řadě bych rád poděkoval mé rodině za neutuchající podporu v průběhu celého mého studia. Dále bych chtěl poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D, za pomoc při realizaci experimentů a zpracovávání výsledků měření, za čas, který pro mě obětoval. Moje poděkování patří celé GaN skupině, jmenovitě Ing. Vojtěchu Čalkovskému a Ing. Davidu Pokornému za pomoc při pořizování kvalitních snímků z rastrovacího elektronového mikroskopu a za ochotu mi vždy poradit a pomoci. Marku Kostkovi chci poděkovat za uvedení do problematiky luminescence a Vojtěchu Mikeráskovi za pomoc při řešení mnoha problémů v laboratoři. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Konečnému, Ph.D. za pomoc při měření AFM. Bez těchto lidí by byla tvorba této práce nemožná.

Tato práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2023051, MŠMT, 2023–2026) , CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Jakub Štastný

Obsah

Úvod	3
1 Nitrid gallitý	5
1.1 Vlastnosti GaN	5
1.2 Metody výroby GaN	6
1.2.1 Epitaxní růst z hydridů v plynné fázi (HVPE)	6
1.2.2 Epitaxe z molekulárních svazků (MBE)	7
1.2.3 Metoda růstu pomocí sodíku (NFM)	7
1.2.4 Metoda amonotermálního růstu	8
1.3 Využití GaN	9
2 2D GaN	11
2.1 Vlastnosti 2D GaN	11
2.2 Příprava 2D povrchů	11
2.2.1 Migrací podmíněný epitaxní růst (MEEG)	12
2.2.2 Chemická depozice z plynné fáze pomocí organokovových prekurzorů (MOCVD)	13
2.2.3 Plazmou posílená chemická depozice z plynné fáze (PECVD)	13
2.2.4 Dvoustupňová chemická metoda	14
2.2.5 Nízkoteplotní kapková epitaxe za asistence iontů	15
3 Příprava 2D GaN nízkoteplotní kapkovou epitaxí za asistence iontů	18
3.1 Příprava povrchu Si(111) 7x7	18
3.2 Depozice Ga	20
3.3 Nitridace	20
4 Depozice 2D GaN	22
4.1 Parametry ovlivňující růst 2D GaN	22
4.2 Vliv úhlu dopadu iontového svazku	24
4.2.1 Úhel dopadu 10° a 90°	25
4.2.2 Kolmý dopad svazku	26
4.2.3 Úhel dopadu 25° a 55°	29
4.2.4 Úhel dopadu 65°	30
Závěr	33
Literatura	34
Seznam použitých zkratk a symbolů	40

Úvod

Nitrid gallitý je významným materiálem v polovodičovém průmyslu. Jeho přímý zakázaný pás šířky 3.4 eV umožňuje emitování modrého světla, a tedy z GaN dělá ideální materiál pro výrobu modrých LED diod [1]. Nalézá uplatnění také v jiných odvětvích optoelektroniky jako jsou například laserové diody, dále v tranzistorech nebo v biosenzorech [1, 21, 31].

V polovodičovém průmyslu dominuje křemík, ale dosahuje svých hranic, co se vlastností týče, proto se pozornost přenáší na výzkum nových materiálů. Po první úspěšné izolaci grafenu pomocí mechanické exfoliace v roce 2004 se 2D materiály staly středem zájmu mnoha výzkumných skupin po celém světě [42]. 2D materiály mají velký potenciál rozšířit možnosti dnešní elektroniky a optoelektroniky. Jedním z těchto materiálů by mohl být právě 2D GaN.

První zmínka o vytvoření tenké vrstvy GaN pomocí metody migrací podmíněného epitaxního růstu se objevila v roce 2016 [46]. Proběhlo mnoho pokusů o růst 2D GaN různými metodami jako například metodou chemické depozice z plynné fáze pomocí organokovových prekurzorů, ale výsledné povrchy měly spoustu defektů a nečistot [48, 49]. Stále se objevují nové způsoby, jak k růstu 2D GaN přistupovat, a některé vykazují velmi dobré výsledky. Plazmou posílená chemická depozice z plynné fáze je jedna z novějších metod růstu 2D GaN, která jako první experimentálně potvrdila teoretické vlastnosti 2D GaN. Důležitým výsledkem je potvrzení šířky zakázaného pásu, která dosahuje hodnoty 4.9 eV [46, 47]. Další z metod je metoda nízkoteplotní kapkové epitaxe, která je využita v rámci této práce.

Existuje mnoho parametrů ovlivňující růst nanokrystalů 2D GaN, mezi nejdůležitější patří úprava povrchu substrátu, teplota substrátu při depozici a energie dusíkových iontů. Dalším z těchto faktorů by mohl být úhel dopadu iontového svazku na substrát.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou růstu nanokrystalů 2D GaN a studiem parametrů, které ho ovlivňují. V první kapitole této práce jsou shrnuty základní informace o vlastnostech, výrobě a použití GaN. Druhá kapitola se podrobněji zabývá problematikou 2D GaN, jsou zmíněny teoreticky vypočítané vlastnosti tohoto materiálu a podrobněji rozebrány různé metody výroby tenkých vrstev GaN.

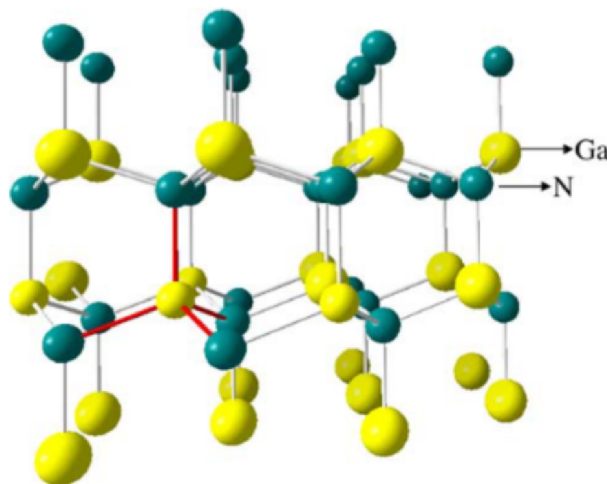
Třetí kapitola detailně popisuje experimentální část této práce, a tedy proces přípravy 2D GaN pomocí nízkoteplotní kapkové epitaxe za asistence iontů. Je zde popsána úprava povrchu substrátu Si(111), depozice Ga atomů a depozice dusíkových iontů pod různými úhly dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky. Poslední kapitola se zabývá analýzou nanokrystalů 2D GaN pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu a mikroskopu atomárních sil. Hlavní pozornost je věnována vlivu úhlu dopadu iontového svazku na substrát.

1. Nitrid gallitý

Studium GaN započalo rokem 1932, kdy se poprvé úspěšně podařilo syntetizovat krystaly GaN metodou, při které reagoval amoniak s tekutým Ga za vysokých teplot. V roce 1969 byla metodou epitaxního růstu z hydridů v plynné fázi vytvořena tenká vrstva GaN. Vrstva měla mnoho defektů zhoršujících kvalitu materiálu. V devadesátých letech 20. století došlo k řadě významných objevů. Nejvýznamnější byl vynález modré LED (*Light-Emitting Diode*) diody v roce 1992, který umožnil průmyslovou výrobu nejen barevných displejů. Trojice japonských vědců Isamu Akasaki, Hiroshi Amano a Shuji Nakamura byla za tento objev oceněna Nobelovou cenou za fyziku v roce 2014 [1].

1.1. Vlastnosti GaN

GaN má za pokojové teploty nejčastěji hexagonální wurtzitovou strukturu. Schéma wurtzitové struktury GaN je znázorněno na Obrázku 1.1. Mřížkové parametry této struktury jsou $a = 3.189 \text{ \AA}$ a $c = 5.185 \text{ \AA}$ [2, 3]. Atomy jsou vázány kovalentní vazbou. Protože struktura není inverzně symetrická ve směru [0001], rozlišují se dvě orientace krystalů, které mají rozdílné chemické vlastnosti. Označují se jako strana Ga (*Ga-face*) a strana N (*N-face*) podle atomů prvku tvořících svrchní vrstvu. Strana Ga je méně reaktivní a může se chovat jinak při růstu než strana N kvůli výraznému rozdílu elektronegativity prvků [4]. Tento rozdíl elektronegativity způsobuje spontánní polarizaci ve směru [0001], jejíž síla závisí na asymetrii krystalu. Polarizace roste se snižujícím se podílem mřížkových parametrů c/a [5].



Obrázek 1.1: Schéma wurtzitové struktury GaN. Převzato z [6].

Šířka zakázaného pásu GaN je 3.4 eV, chová se tedy jako polovodič. Přímý přechod zakázaným pásem umožňuje emitování fotonů při deexcitaci elektronů. Tyto vlastnosti umožňují krystalům GaN emitovat fotony o různých vlnových délkách od infračerveného ($\sim 1770 \text{ nm}$) přes viditelné (380 – 750 nm) po ultrafialové ($\sim 200 \text{ nm}$) [1].

1.2. METODY VÝROBY GAN

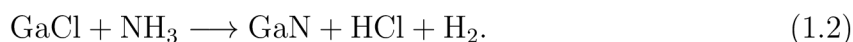
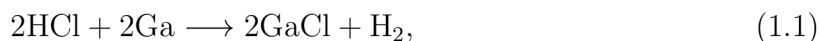
Nanokrystaly GaN vykazují výborné elektrické vlastnosti, jako například kritické napětí, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 3 – 3.75 MV/cm. Vysoké kritické napětí je klíčové pro celou řadu elektronických zařízení pracujících pod vysokým napětím. Velký vliv na vlastnosti polovodičů má teplota. Je žádoucí, aby si polovodič udržel stejné vlastnosti i za vyšších teplot. GaN odolává teplotám do výšky 600 °C [1, 7]. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje počet a pohyblivost nosičů náboje. Přenosová rychlost, aneb rychlost elektronů v látce, se u GaN pohybuje v rozmezí od 100 cm²/Vs (při koncentraci elektronů ~ 10²⁰ cm⁻³) do 900 cm²/Vs (při koncentraci elektronů ~ 10¹⁷ cm⁻³). Tyto hodnoty jsou vyšší než u jiných polovodičů např. GaAs nebo Si. Proto je GaN vhodný pro vysokofrekvenční elektrická zařízení [8].

1.2. Metody výroby GaN

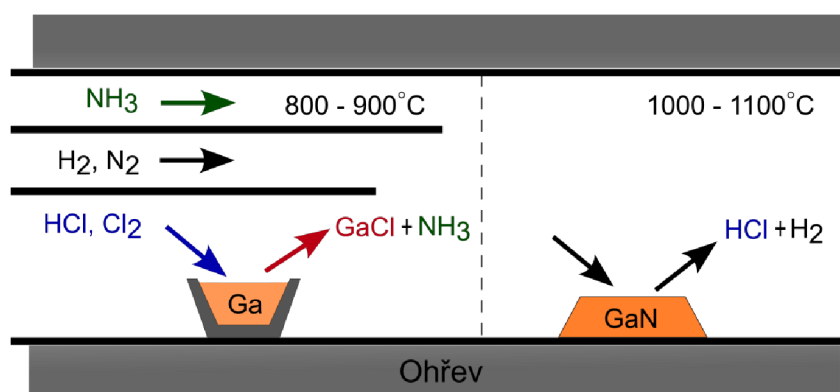
V padesátých letech dvacátého století byly známé metody epitaxního růstu z kapalně a plynné fáze, avšak nedosahovaly potřebných kvalit. Zájem o materiály s přímým a širokým zakázaným pásem výrazně vzrostl a tedy i zájem o zkvalitnění jejich výrobních procesů. Chemická depozice z plynné fáze za pomoci organokovových prekurzorů a epitaxe z molekulárních svazků se staly hlavními metodami výroby materiálů pro polovodičový průmysl a pro přípravu heterostruktur. Používají se pro výrobu LED diod, laserových diod nebo tranzistorů. Další z významných metod přípravy objemového GaN jsou amonotermální růst a růst pomocí sodíku [1].

1.2.1. Epitaxní růst z hydridů v plynné fázi (HVPE)

HVPE (*Hydride Vapor Phase Epitaxy*) je metoda, která vytváří vrstvy GaN z plynné fáze. Reaktor, v kterém růst probíhá, má dvě části nízkoteplotní a vysokoteplotní. V nízkoteplotní části reaktoru probíhá chemická reakce HCl s Ga a vzniká GaCl za teplot od 800 °C do 900 °C. V další fázi se GaCl transportuje do vysokoteplotní části za pomoci molekul N₂ a H₂. Do této části se současně přivádí také NH₃, který za teplot od 1000 °C do 1100 °C reaguje s GaCl a vytváří vrstvu GaN na substrátu. Schéma HVPE metody je graficky znázorněno na Obrázku 1.2. Nejběžněji využívaným substrátem pro tuto metodu je safír nebo GaAs. Chemické reakce jsou popsány následujícími rovnicemi:



Nejčastější krystalografickou rovinou růstu je rovina [0001] (c-směr). Ta s sebou nese dvě velké výhody. Vysokou čistotu povrchu a vysokou rychlost růstu povrchu, která může dosahovat až stovek mikrometrů za hodinu. Výsledný produkt se následně dopuje různými prvky pro zlepšení či zhoršení jeho vodivosti a jiných vlastností v závislosti na aplikacích [1, 9, 10].



Obrázek 1.2: Schéma epitaxního růstu GaN z hydridů v plynné fázi. Převzato a upraveno z [11].

1.2.2. Epitaxe z molekulárních svazků (MBE)

Metodou MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) se připravují různé vrstvy společnou interakcí atomárních nebo molekulových svazků na povrchu substrátu. Kapalné a pevné materiály jsou uloženy v efuzních celách, kde jsou zahřívány a následně vypařovány nebo sublimovány. Odpařené částice jsou posílány směrem na substrát, který lze v průběhu zahřívát. Pro zlepšení homogenity výsledné vrstvy lze substrátem v průběhu depozice otáčet. K syntéze GaN a jeho sloučenin je třeba k soustavě přidat zdroj dusíkových iontů či neutrálních atomů. Nejčastěji se setkáváme s plazmatickými zdroji využívající amoniak jako prekurzor [6, 12].

Efuze je svázána s podmínkou, která říká, že střední volná dráha částic λ musí být větší než rozměry samotné komory. Střední volnou dráhu částic lze vypočítat ze vztahu 1.3.

$$\lambda = \frac{k_b T}{\sqrt{2\pi p D^2}}, \quad (1.3)$$

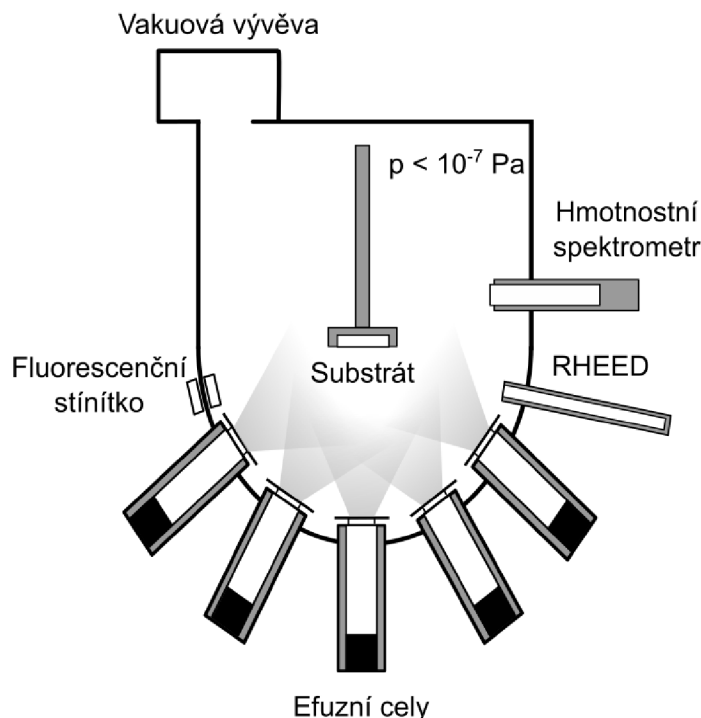
kde k_b je Boltzmannova konstanta, T teplota a p tlak uvnitř efuzní cely, D je průměr částic ve svazku [13].

Tato podmínka je splněna, jestliže se v komoře udrží nízký tlak řádově 10^{-7} Pa. Ultravysoké vakuum neboli UHV (*Ultra-High Vacuum*) je klíčovým parametrem pro vytváření čistých povrchů. Nízký tlak také umožňuje *in-situ* analýzu povrchů. Pomocí metody difrakce elektronů s vysokou energií na odraz (RHEED - *Reflection High Energy Electron Diffraction*) lze identifikovat tloušťku a strukturu povrchu v průběhu epitaxe. Obrázek 1.3 znázorňuje typické uspořádání MBE komory.

1.2.3. Metoda růstu pomocí sodíku (NFM)

Pro růst povrchů GaN z taveniny je třeba vysokého tlaku (nejméně 6 GPa) a vysokých teplot (2200 °C). Existují metody, které tyto překážky částečně překonaly přidáním jiné látky do taveniny Ga. Metoda NFM (*Na-Flux Method*) dosahuje zdánlivě nejlepších výsledků přidáním sodíku do taveniny Ga. Sodík zde působí jako katalyzátor, který zvyšuje

1.2. METODY VÝROBY GAN



Obrázek 1.3: Schéma typického uspořádání UHV komory pro epitaxy z molekulárních svazků. Převzato a upraveno z [12].

rozpuštění dusíku v tekutém Ga. Při správném poměru sodíku a Ga se izolují atomy Ga, které snadněji reagují s dusíkem za vytvoření Ga-N vazeb.

Při přípravě povrchů metodou NFM dosahuje tlak jednotek megapaskalů a teplota ~ 750 °C. Substrát se nejdříve ponoří do taveniny Ga a následně se vystaví dusíkové atmosféře. Molekuly dusíku se na povrchu Ga postupně rozpouštějí a krystalizují. Růst povrchu probíhá na safírovém substrátu. Výsledné vrstvy připravené NFM metodou vykazují vysokou kvalitu a čistotu [1, 14, 15].

Závažným problémem této metody je tvorba nukleačních center na stěnách kalíšku, který obsahuje taveninu Ga a sodíku. Dusík se spotřebovává na tvorbu krystalů na stěnách kalíšku, a tím se celý proces růstu GaN zpomalí. Jestliže se do taveniny přidá malé množství vápníku nebo stroncia, zvýší se smáčivost mezi taveninou a proudem dusíku. Přidáním těchto prvků se také redukuje hustota dislokací ve výsledném povrchu [16].

1.2.4. Metoda amonotermálního růstu

Příprava GaN pomocí metody amonotermálního růstu je podobná hydrotermálnímu růstu křemíku, avšak namísto vody využívá superkritického amoniaku, který se vodě podobá fyzikálními vlastnostmi. Látky se nazývají superkritické, pokud se nacházejí ve stavu, kdy se teplota i tlak blíží nebo přesahují jejich charakteristický kritický bod. Do superkritického amoniaku se přidávají látky zvyšující rozpustnost GaN jako například zásadité či kyselé mineralizátory. Růst krystalů probíhá v autoklávech, přístrojích pro reakce probí-

hající za vysoké teploty a tlaku. Výhodou této metody je nízká teplota a tlak v porovnání s předešlými metodami. Teplota se pohybuje v rozmezí 400 - 550 °C a tlak v rozmezí 100 - 500 MPa [17, 18].

V roztoku amoniaku se rozpustí Ga nebo GaN prášek. Rozpuštěný materiál se následně přesune do druhé části autoklávu. Látka je transportována vlivem teplotního gradientu mezi oběma částmi. V druhé části dochází k přesycení roztoku a jeho krystalizaci na zárodcích GaN. Rozpustnost GaN v superkritickém amoniaku není vysoká, proto se do taveniny přidávají alkalické kovy nebo halogeny. Touto metodou lze růst vysoce kvalitní GaN vrstvy, avšak jejich růst trvá řádově dny [1, 17, 18, 19].

1.3. Využití GaN

GaN má díky svým jedinečným vlastnostem řadu aplikací. Nalézá uplatnění v optických zařízeních jako jsou LED diody a lasery nebo v tranzistorech. GaN elektrody v Li a Na bateriích výrazně zvyšují jejich kapacitu [20]. V medicíně se GaN komponenty často využívají jako součást biosenzorů [21].

Diody

LED dioda je elektrická součástka, která emituje světlo vlivem průchodu elektrického proudu. Emitující fotony vznikají rekombinací děr a elektronů v prostoru P-N přechodu. Vlnová délka emitovaných fotonů závisí na šířce zakázaného pásu. Princip LED diody je známý od roku 1962, avšak do 90. let neexistovala LED dioda emitující modré světlo. Dioda na bázi GaN tento problém vyřešila. Modrá LED dioda nalézá uplatnění v kombinaci s červenou a zelenou LED diodou, kdy pomocí kombinace intenzit jednotlivých složek lze vytvořit světlo jakékoliv barvy viditelného spektra [22, 23].

Kromě využívání GaN diod v barevných displejích a obrazovkách nalézá diody uplatnění také v komunikačních technologiích. V současné době je bezdrátové připojení k internetu nepostradatelné, proto byla představena technologie LiFi, která narozdíl od známější WiFi využívá namísto rádiových vln LED diody pro přenos informací. Předností této technologie je vysoká rychlost přenosu dat. [24]

LD (*Laser Diode*) diody patří mezi další důležité aplikace GaN diod [1]. LD diody lze využít pro přenos dat na velké vzdálenosti nebo pod vodou. Na kratší vzdálenosti lze dosáhnout přenosové rychlosti až 15 Gbit/s [25]. GaN LD diody emitující ultrafialové záření lze využívat například na čištění vody [26], nebo také k detoxikaci plynů [27]. Zajímavá aplikace GaN LD diod je v odvětví kvantových technologií. LD diody dokáží zmrazit atomy na hodnoty mikrokkelvinů a slouží k excitaci těchto atomů v atomových hodinách [28].

Tranzistory

Tranzistor je polovodičová součástka, bez které by se dnešní svět neobešel. Skládá se ze tří částí: emitoru (*source*), hradla (*gate*) a kolektoru (*drain*). Polovodiče s širokým zakázaným pásem (například SiC nebo GaN [29]) jsou v současné době hlavními kandidáty na náhradu křemíku v mikroelektronice [30]. Tranzistory na bázi GaN dokáží pracovat při

1.3. VYUŽITÍ GAN

vyšších teplotách, vyšších frekvencích a také mají vyšší účinnost než klasické tranzistory na bázi křemíku [31].

Nejběžněji se GaN využívá v kombinaci s různými polovodiči s rozdílnou šířkou zakázaného pásu. Tato zařízení se nazývají heterostrukturní tranzistory řízené elektrickým polem (HFET - *Heterostructure Field-Effect Transistor*). Na rozhraní dvou polovodičů vzniká dvoudimenzionální elektronový plyn, který s sebou přináší vysokou pohyblivost elektronů ($\sim 6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) [32] a velkou hustotu nosičů náboje ($\sim 1.45 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) [33]. Pro elektronická zařízení to v praxi znamená vyšší rychlost, větší proud, který zařízení dokáže snést a vyšší kritické napětí [34, 35, 36].

Tranzistory na bázi GaN nacházejí využití jako zesilovače, spínače nebo v integrovaných obvodech, které tvoří významnou část polovodičového trhu. Využívají se téměř ve veškeré elektronice, jako jsou počítače, telefony nebo elektrická auta [37].

Biosenzory

V průběhu virových epidemií je efektivní testování lidí klíčovým nástrojem proti šíření nemoci. Většina testovacích zařízení je postavena na bázi MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) nebo FET (*Field-Effect Transistor*) tranzistorů. Ty však mají omezenou citlivost a složitou strukturu. Biosenzory z GaN jsou charakteristické svojí chemickou stabilitou, teplotní odolností, malou spotřebou elektrické energie a hlavně vysokou citlivostí. Nedávné studie ukázaly, že tyto biosenzory jsou vhodné pro rychlé testování virů jako je například SARS-CoV-2 [38].

Kromě detekce virů se GaN biosenzory využívají k detekci proteinů a jiných biomolekul. Detekcí určitých biomolekul a měřením jejich množství a koncentrace, lze například diagnostikovat nemoci [21, 39, 40].

2. 2D GaN

S rozvojem elektrotechnického a optoelektrického průmyslu se rozšiřuje zájem o nové materiály s lepšími vlastnostmi. Křemík, který dominuje v elektronice několik desítek let, už dosahuje svých hranic, co se vlastností týče. 2D materiály vykazují potenciál rozšířit možnosti elektroniky a případně v budoucnu nahradit křemík.

Výzkum 2D materiálů započal v roce 1923 L. Paulingem při objevu hexagonální struktury sulfidu molybdeničitého [41]. Sulfid se skládá z několika vrstev, které spolu interagují Van der Waalsovými silami. Objev však neupoutal výraznou pozornost. Tu na sebe dokázal strhnout grafen, jehož monovrstvu poprvé izolovali v roce 2004 A. Geim a K. Novoselov pomocí mechanické exfoliace [42].

Díky unikátním vlastnostem (například nulová šířka zakázaného pásu) se grafen okamžitě stal středem zájmu mnoha výzkumných skupin. Průmyslová výroba kvalitního grafenu je stále velice náročná, i přesto již našel uplatnění ve spintronice [43], biosenzorech nebo tkáňovém inženýrství [44, 45].

Mezi nově objevené 2D materiály řadíme také 2D GaN. První úspěšná syntéza proběhla v roce 2016 pomocí metody, při níž docházelo k interkalaci GaN mezi vrstvou SiC a grafenovou dvouvrstvou [46]. Výzkum 2D GaN se stále nachází v rané fázi, ale již nyní vykazuje velký potenciál pro aplikace v oblastech elektroniky a optoelektroniky.

2.1. Vlastnosti 2D GaN

Se snižující se tloušťkou vrstvy materiálu se mění také jeho vlastnosti. Struktury o tloušťce několika monovrstev se označují jako 2D struktury. Většina vlastností 2D GaN je doposud zjištěna pouze pomocí teoretických výpočtů z prvních principů.

Vrstva 2D GaN má dle výpočtů šířku zakázaného pásu 4.9 eV [46] a byla také experimentálně potvrzena [47]. Hodnota spadá do UV části spektra, avšak rozdílný experiment ukázal, že šířka zakázaného pásu 2D GaN může dosahovat hodnot 3.12 eV. Nižší hodnota je nejspíše způsobena defekty krystalové mřížky [50].

Mechanické napětí ve 2D materiálu může sloužit k ovlivnění elektronických vlastností, což má také vliv na optické vlastnosti materiálu. Aplikací mechanického napětí na 2D GaN lze ovlivnit jeho šířku zakázaného pásu [26]. Zatím však tyto vlastnosti nebyly experimentálně potvrzeny.

2.2. Příprava 2D povrchů

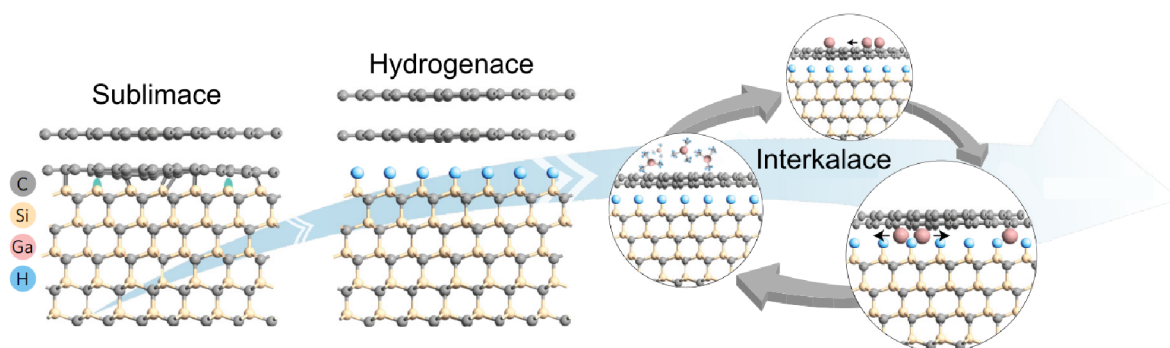
Technologie výroby 2D povrchů se stále nachází v rané fázi. Výrobní metody jsou příliš náročné a výsledné povrchy nedosahují potřebných kvalit pro průmysl. Problematikou se zabývá velký počet výzkumných skupin po celém světě a technologie se neustále zefektivňují. Potrvá ještě několik let, než se 2D materiály budou moci vyrábět v množství a kvalitě, které průmysl vyžaduje.

2.2. PŘÍPRAVA 2D POVRCHŮ

2.2.1. Migrací podmíněný epitaxní růst (MEEG)

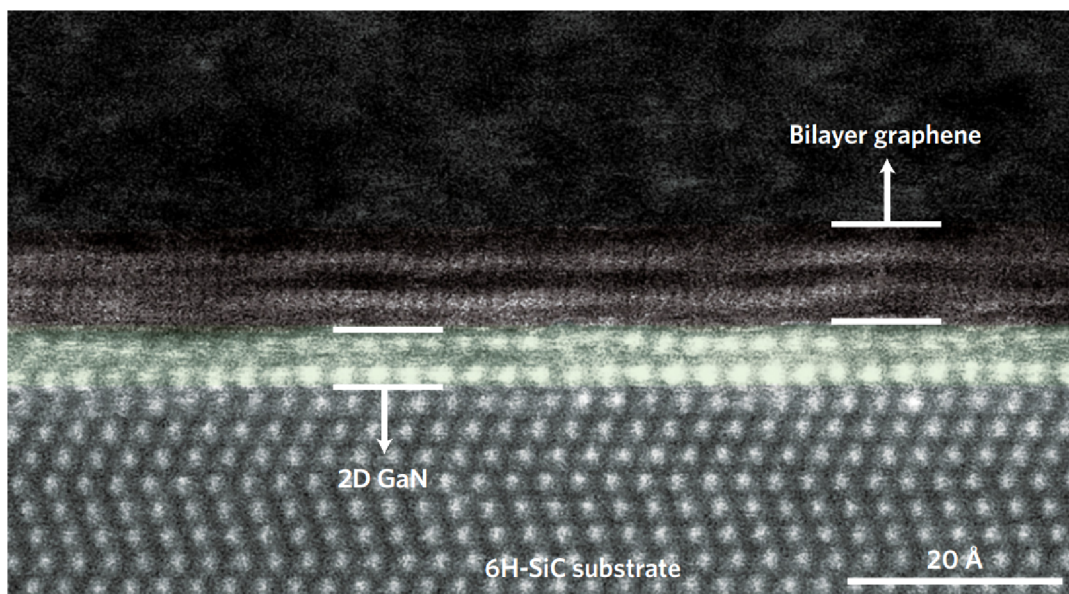
První úspěšná syntéza 2D GaN byla realizována pomocí metody MEEG (*Migration Enhanced Epitaxial Growth*). Přímým růstem GaN na SiC substrátu se vytvoří nežádoucí 3D ostrůvky, vzniklé díky velkému rozdílu mřížkové konstanty a povrchové energii. Jestliže se povrch pasivuje a využije se Frank-van der Merweho růstová metoda, lze vytvořit vrstvu 2D GaN.

V první fázi je grafen syntetizován na substrát SiC. Vlivem sublimace Si atomů z povrchu za přítomnosti vodíku se potom vytvoří druhá vrstva grafenu. Následně je reakční prostor naplněn plynem trimethylgallia, který disociuje a atomy Ga se difuzí dostávají do mezivrstvy grafenu a SiC. Následně se do systému vpustí amoniak. Atomy dusíku, získané disociací amoniaku, transformují vmezeřené Ga na 2D GaN. Obrázek 2.1 znázorňuje proces růstu vrstvy 2D GaN pomocí MEEG metody.



Obrázek 2.1: Zjednodušené schéma MEEG metody: sublimací se vytvoří dvouvrstva grafenu, SiC se pasivuje vodíkem, do vzniklé mezery mezi vrstvami se difuzí dostanou atomy Ga, následně se vzorek vystaví amoniakové atmosféře za vysokých teplot za vzniku tenké vrstvy GaN. Převzato a upraveno z [46].

Grafen zde hraje klíčovou roli při stabilizaci přímého zakázaného pásu. Metoda umožňuje přesně kontrolovat tloušťku vzniklého povrchu. Výsledný produkt dosahuje vysoké kvality, avšak jeho aplikace jsou značně omezené jeho sendvičovou strukturou, neboť takto vzniklé struktury se obtížně přenášejí na jiné povrchy [46]. Na Obrázku 2.2 jsou vidět jednotlivé vrstvy grafenu, 2D GaN a SiC substrátu.



Obrázek 2.2: HAADF-STEM (*High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscope*) snímek vmezeřené vrstvy 2D GaN mezi dvouvrstvu grafenu a substrát SiC (0001). Převzato z [46].

2.2.2. Chemická depozice z plynné fáze pomocí organokovových prekurzorů (MOCVD)

Již od 20. století se metoda MOCVD (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*) využívá k růstu GaN nanokrystalů, lze ji však využít také pro růst 2D struktur. Proces přípravy spočívá v nanesení kapalného Ga na substrát vhodný pro růst 2D struktur. Jedním z vhodných substrátů může být například wolframová fólie. Zdrojem dusíkových atomů je močovina, ta za vysokých teplot disociuje a dusík reaguje s Ga za vytvoření celistvé tenké vrstvy GaN.

Výrazné pozitivum MOCVD metody je především snadný přenos výsledného produktu na jiné povrchy, neboť 2D GaN roste (narozdíl od MEEG metody) na volném povrchu. Velikost nanokrystalů dosahuje desítek mikrometrů a jejich tloušťka jednotek nanometrů. 2D GaN vytvořený MOCVD metodou má také dobré elektrické a optické vlastnosti.

Velkou nevýhodou MOCVD metody jsou použité prekurzory, neboť mohou být hořlavé nebo toxické. Vysoké teploty, kterých musí být dosaženo pro získání dusíkových atomů, nejsou vhodné pro syntézu čistých povrchů. Celý proces probíhá při tlaku desítek pascalů. Nečistoty mají negativní dopad na optické vlastnosti povrchu, jsou tedy nežádoucí [48, 49].

2.2.3. Plazmou posílená chemická depozice z plynné fáze (PECVD)

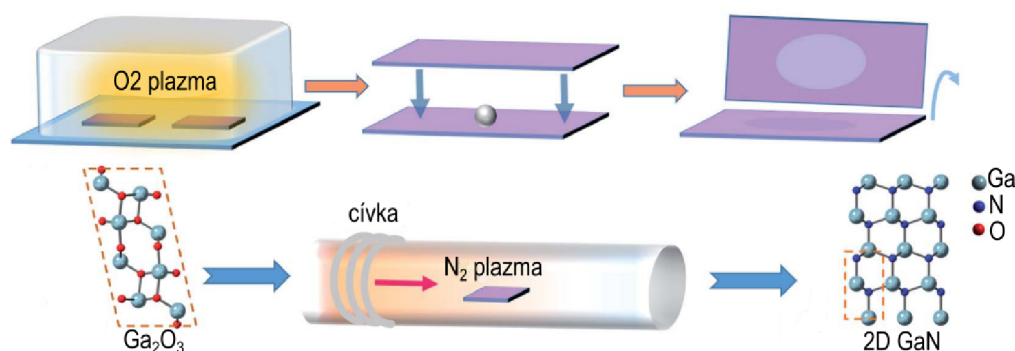
V roce 2022 byl v deníku *Journal of Materials Chemistry A* publikován článek pojednávající o unikátní metodě přípravy 2D GaN označovaný zkratkou PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*), která dosahuje velmi slibných výsledků.

2.2. PŘÍPRAVA 2D POVRCHŮ

Dvě desky SiO_2/Si se očistí v acetonu, isopropyl alkoholu a deionizované vodě. Následně se vyčistí v kyslíkovém plazmatu. Na desku se nanese malý objem kapalného Ga a za teploty $50\text{ }^\circ\text{C}$ se desky stlačí k sobě. Přebytky Ga se odstraní pomocí vatové tyčinky namočené v isopropanolu a na povrchu zůstane tenká vrstva Ga_2O_3 . Při opakovaném stlačování desek se tloušťka vrstvy Ga_2O_3 zmenšuje a lze tak dosáhnout velmi tenkých vrstev. Dalším krokem je nitridace v PECVD komoře, kam je při teplotě $\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ vpuštěno dusíkové plazma za vzniku 2D GaN povrchu. Schéma na Obrázku 2.3 graficky znázorňuje průběh přípravy 2D GaN povrchů pomocí PECVD metody.

Výsledná tloušťka vrstvy změřena AFM, dosáhla hodnot 0.8 nm , což odpovídá dvěma vrstvám GaN. Zakázaný pás 2D GaN nitridovaného 20 minut měl šířku 4.9 eV a ověřila se tak teoreticky vypočítaná hodnota [46].

Jedinečným principem této metody je dvojitý efekt molekul N_2 . Neslouží pouze k nitridaci Ga_2O_3 , ale také odstraňuje přebytky vrstvy. Spodní vrstvy GaN disponují silnou vazbou k substrátu SiO_2/Si , mají tedy větší odolnost vůči leptání. Je však potřeba nalézt rovnováhu mezi leptáním a nitridací. Jestliže reakce trvá příliš dlouho, povrch se degraduje. Trvá-li krátce, nestihnou molekuly N_2 odstranit dostatek vrstev [47].



Obrázek 2.3: Schéma růstu 2D GaN pomocí PECVD metody. Převzato a upraveno z [47].

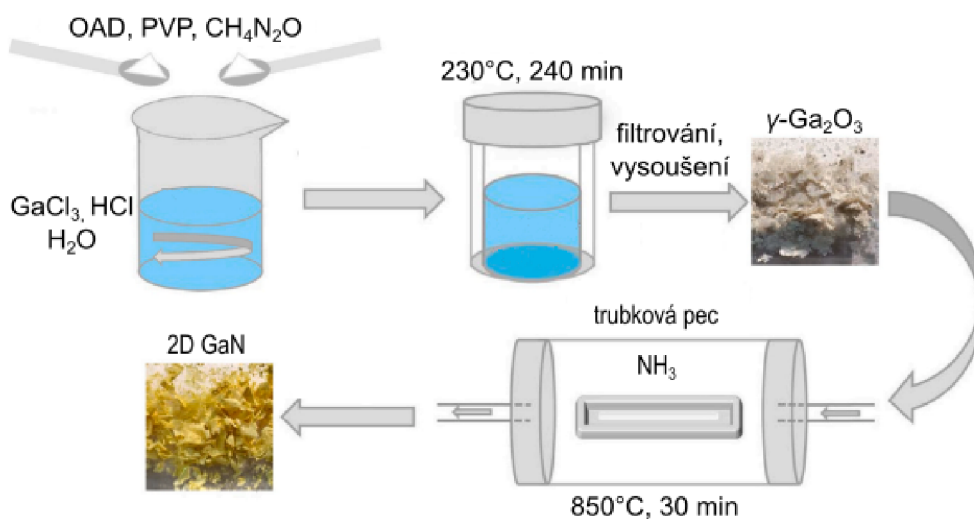
2.2.4. Dvoustupňová chemická metoda

K přípravě 2D GaN lze přistupovat také chemicky. V deníku *Vacuum* vyšel v roce 2022 článek popisující právě takový přístup.

Nejdříve se hydrotermální reakcí syntetizuje nanovrstva $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$ následujícím způsobem. Smíchá se 5 ml vodného roztoku GaCl_3 o koncentraci 0.14 mol/l , 20 ml vodného roztoku kyseliny chlorovodíkové o koncentraci 0.5 mol/l a 5 ml deionizované vody. Přidá se močovina o čistotě 99.9% , dihydrát kyseliny šťavelové o čistotě 99.9% a polyvinylpyrrolidon. Močovina snižuje pH v roztoku a zabraňuje vzniku nežádoucího $\text{Ga}(\text{OH})_3$. Roztok se zamíchá a vloží do autoklávu, kde probíhá hydrotermální reakce po dobu 4 hodin za teploty $230\text{ }^\circ\text{C}$. Po vysušení a filtraci se získá vrstva $\gamma\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Vzorek je následně přenesen do trubkové pece. Při zvyšování teploty se pec naplní argonem, který slouží k udržení nízkého tlaku. Jakmile se pec ohřeje na $850\text{ }^\circ\text{C}$, je do ní vpuštěn amoniak po dobu 30 minut . Následně se pec zchladí argonem na pokojovou teplotu. Finálním produktem je

povrch hustě pokrytý nanokrystaly 2D GaN. Proces dvoustupňové chemické metody je znázorněn na Obrázku 2.4.

Naměřená šířka zakázaného pásu tenké vrstvy GaN, připravené touto metodou, odpovídá hodnotě 3.12 eV, která se neshoduje s teoretickou hodnotou 4.9 eV [46]. Nepravidelnosti ve struktuře a shlukování GaN ovlivňují šířku zakázaného pásu. Dalším faktorem mohou být nečistoty, které jsou přitahovány místy s defekty [50].



Obrázek 2.4: Schéma dvoustupňové chemické metody. Převzato a upraveno z [50].

2.2.5. Nízkoteplotní kapková epitaxe za asistence iontů

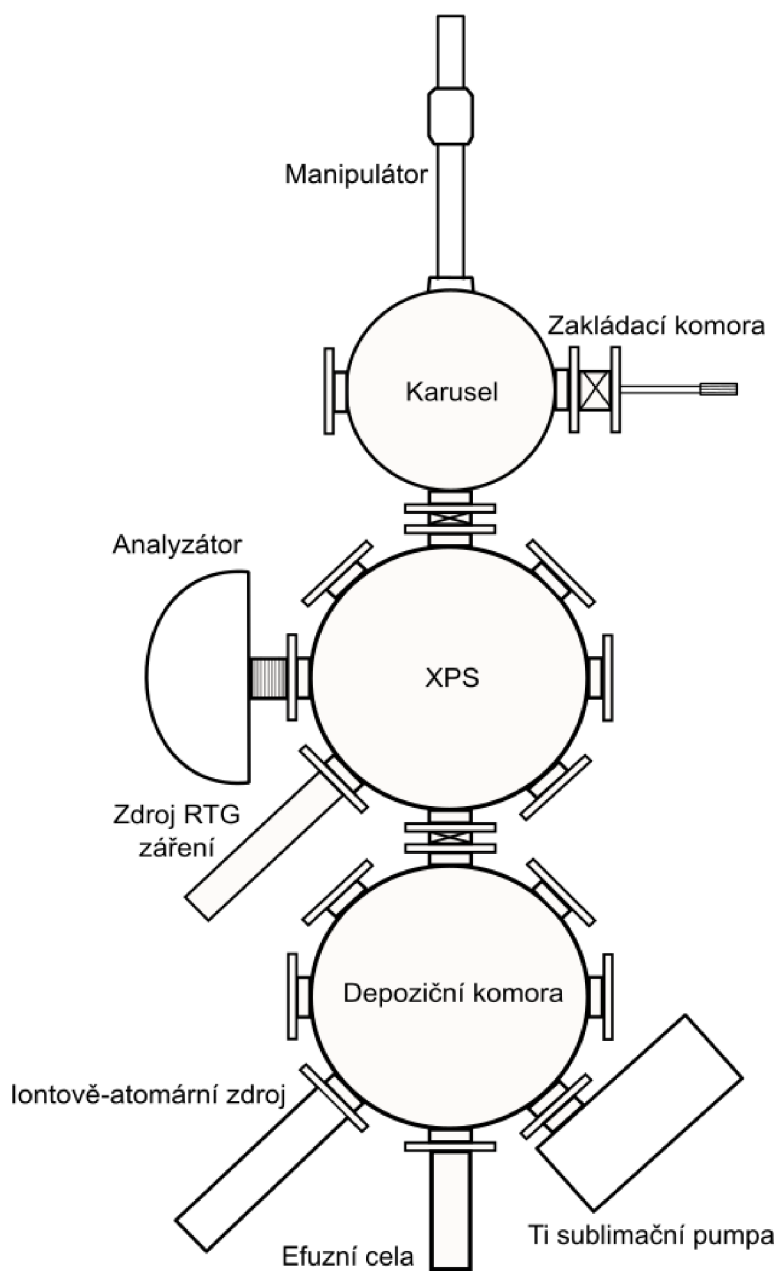
Většina dříve zmíněných metod využívá pro růst 2D GaN vysokých teplot ($T > 800^\circ\text{C}$), které mohou významně ovlivnit výsledné nanokrystaly a povrchy, nebo také využívají nebezpečné prekuzory. Tyto problémy řeší metoda kapkové epitaxe, která nepoužívá žádné závadné prekuzory a syntetizuje nanokrystaly GaN za teploty maximálně 330°C .

Růst 2D GaN nanokrystalů probíhá ve dvou krocích. Prvně se deponují ostrůvky Ga na substrát a následně se tyto ostrůvky nitridují svazkem dusíkových iontů o nízkých energiích ($E < 50\text{ eV}$). Celý proces probíhá v UHV depoziční komoře, která je přímo propojena s UHV komorou vybavenou metodou XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*) a zakládací komorou. Tento komplexní systém umožňuje rychlou *in-situ* analýzu vzorku, bez vystavování vzorku atmosféře, která by mohla vzorek znečistit. Komplexní UHV systém je znázorněn na Obrázku 2.5.

Substrát Si(111) je žíhán, aby se odstranila nativní SiO_2 vrstva, následně je substrát flashován a dochází ke vzniku rekonstrukce 7×7 . Na vhodně upravený povrch Si(111) s rekonstrukcí 7×7 jsou při teplotě 330°C po dobu 50 minut nanášeny atomy Ga za pomoci efuzní cely. Na substrátu ulpí Ga ostrůvky, jejichž rozměry lze ovlivnit teplotou substrátu nebo dobou depozice. Substrát s ostrůvky Ga je následně vystaven svazku dusíkových nízkenergiových iontů N^+ a N_2^+ , tvořených v iontově-atomárním zdroji. Nitridace je prováděna po dobu 2 hodin za teploty $190 - 210^\circ\text{C}$. Teplota povrchu substrátu při nitridaci je klíčovým parametrem pro růst 2D GaN nanokrystalů. Při teplotě nad 220°C se vytváří

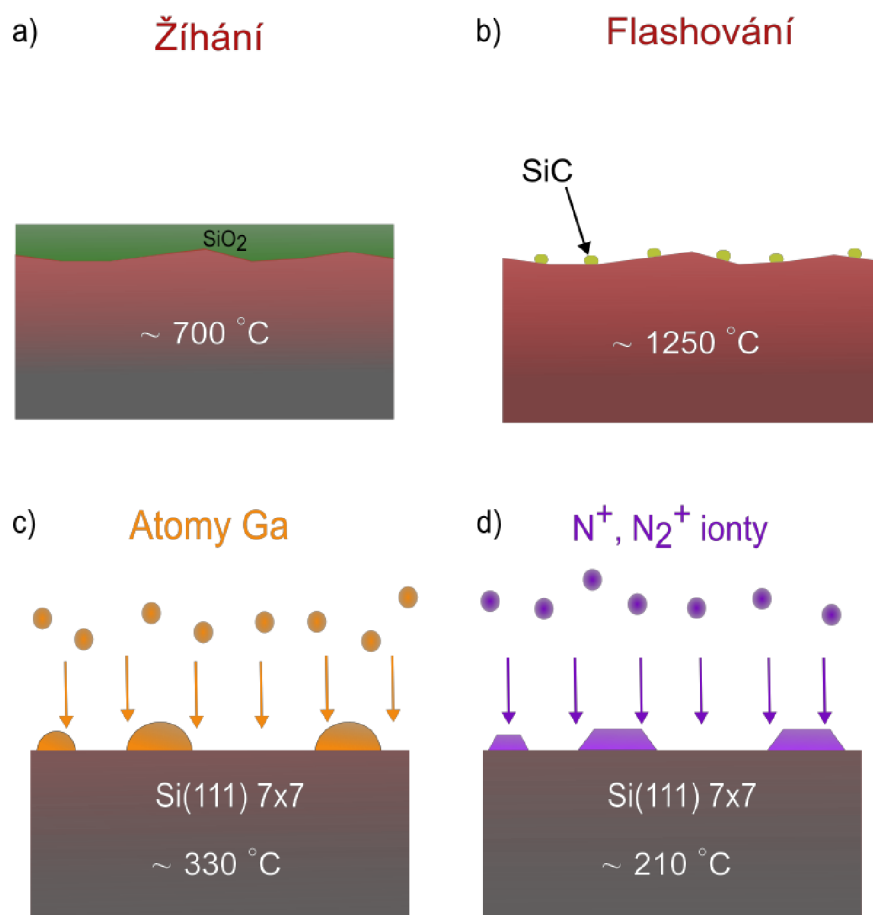
2.2. PŘÍPRAVA 2D POVRCHŮ

3D nanokrystaly GaN. Při teplotě pod 180 °C se růst nanokrystalů neuskuteční vůbec [49]. Schéma procesu úpravy povrchu a růstu 2D GaN pomocí nízkoteplotní kapkové epitaxe za asistence iontů o nízké energii je znázorněno na Obrázku 2.6.



Obrázek 2.5: Schéma komplexní experimentální UHV soustavy. Substráty se přes zakládací komoru vkládají do UHV systému. Manipulátorem se manuálně přesouvají vzorky z karuselu do depoziční komory, nebo do XPS komory pro analýzu povrchů.

Tloušťka nanokrystalů se pohybuje od 13 nm do 20 nm na substrátech řezaných pod úhlem 0.2° a od 6 do 8 nm na substrátech řezaných pod úhlem 4° [49, 51]. Detailněji je metoda popsána v Kapitole 3.

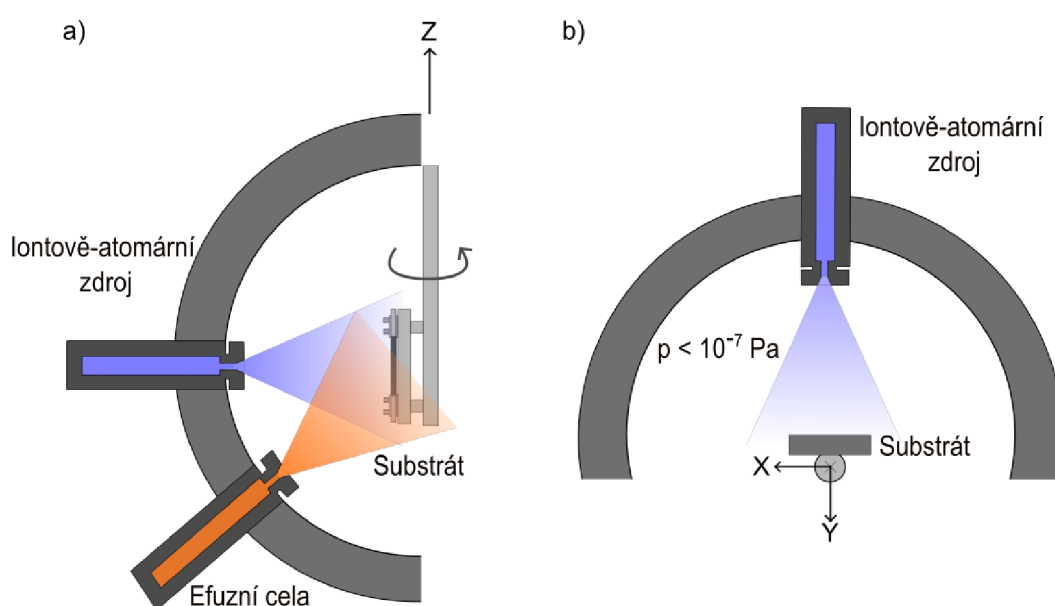


Obrázek 2.6: Proces růstu 2D GaN pomocí nízkoteplotní kapkové epitaxe: a) žihání substrátu $\text{Si}(111)$ s nativní vrstvou SiO_2 , b) odstranění vazeb SiC a zahlazení povrchu flashováním, c) depozice Ga atomů na upravený povrch $\text{Si}(111) 7\times 7$, d) dopad dusíkových iontů na povrch substrátu a následná nitridace Ga ostrůvků za vzniku 2D GaN nanokrystalů.

3. Příprava 2D GaN nízkoteplotní kapkovou epitaxí za asistence iontů

Proces růstu 2D GaN nanokrystalů připravených pomocí nízkoteplotní kapkové epitaxe není stále dostatečně vysvětlen. Ga ostrůvky na substrátu Si(111) 7x7 byly v předchozí práci nitridované vždy pod stejným úhlem 55° [49]. Úhel dopadu iontů by však mohl hrát klíčovou roli v růstu těchto nanokrystalů.

Abychom mohli studovat vliv úhlu dopadu iontů dusíku na substrát s ostrůvky Ga, bylo zapotřebí upravit uspořádání UHV depoziční komory. Vzorek byl upevněn v manipulátoru uvnitř UHV komory, který umožňuje jeho otáčení kolem osy z . Iontově-atomární zdroj byl umístěn ve vodorovné poloze naproti vzorku tak, že lze otáčením manipulátoru kolem osy z měnit úhel dopadu dusíkových iontů. UHV depoziční komora je znázorněna na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: UHV depoziční komora pro depozici GaN nanokrystalů na Si(111) 7x7 umožňující studium vlivu úhlu dopadu iontů na růst 2D GaN: a) pohled na UHV depoziční komoru ze strany, b) pohled na UHV depoziční komoru ze shora.

3.1. Příprava povrchu Si(111) 7x7

Volba vhodného substrátu je klíčová pro růst 2D nanostruktur. Vlastnosti povrchu substrátu ovlivňují adhezi deponované vrstvy a odolnost vůči deformacím. Homogenita povrchu substrátu a jeho čistota mají výrazný vliv na výsledné vlastnosti nanokrystalů [52].

3. PŘÍPRAVA 2D GAN NÍZKOTEPLTNÍ KAPKOVOU EPITAXÍ ZA ASISTENCE IONTŮ

Pro přípravu 2D GaN nanokrystalů byly použity n-dopované destičky Si(111) s rezistivitou $\rho = 0.01 - 0.02 \text{ } \Omega/\text{cm}$ řezané pod úhlem 0.2° .

Žihání a flashování

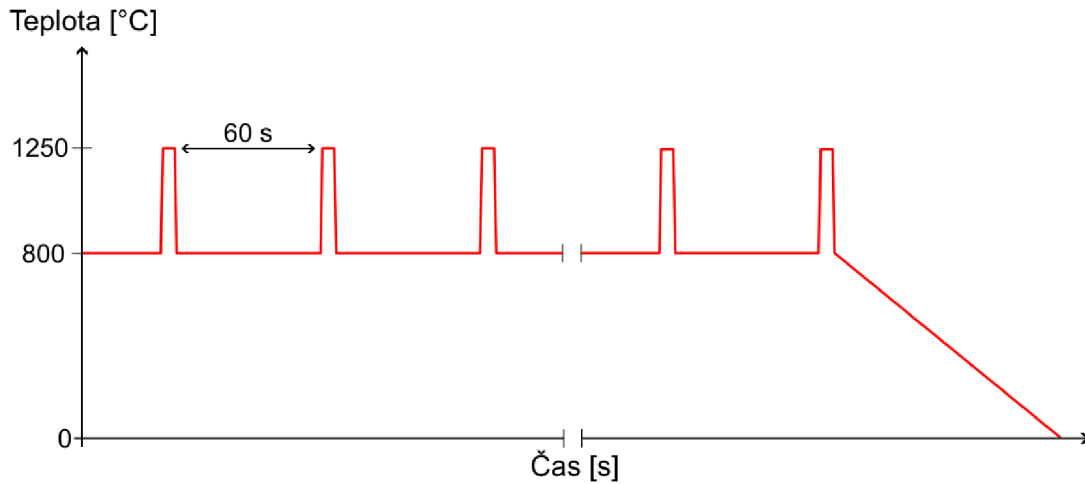
Substrát Si(111) pokrývá tenká nativní vrstva SiO_2 , molekuly vody a uhlovodíky. K odstranění SiO_2 vrstvy a dalších nečistot bylo zapotřebí vzorek žíhat při teplotě $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ alespoň 2 hodiny v UHV komoře, kde byl ohřev vzorku realizován průchodem proudu. Držák (paletka), v kterém byl vzorek uchycen, je na Obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Paletka sloužící k realizaci ohřevu substrátu průchodem proudu v UHV komoře.

Při žihání mohou interagovat uhlíkové nečistoty s povrchem Si(111) a tvořit vazby SiC. Zahřívání substrátu nad teplotu $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ způsobuje pohyb jednotlivých rovin na povrchu, které se mohou zachytávat o částice SiC a vytvářet vysoké nepravidelné schody, zdrsňující povrch substrátu. Flashování (z anglického *flashing*) je proces, při kterém se z povrchu odstraňuje SiC a vytváří se hladký povrch s rekonstrukcí 7×7 . Tento povrch je vhodný pro epitaxní růst 2D GaN. Zásadní roli při flashování hraje teplota a čas. K porušení vazeb SiC bylo potřeba vzorek zahřát nad teplotu $1250 \text{ } ^\circ\text{C}$. Protože je tato teplota velmi blízká teplotě tání samotného křemíku ($1410 \text{ } ^\circ\text{C}$), může snadno dojít k poškození vzorku. Substrát musí být zahříván na uvedenou teplotu po dobu 2 - 3 minut. Zvýšením teploty prudce vzroste tlak v komoře, který musí být udržován pod hodnotou $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ [49]. Aby se nepřekročila tato hodnota, je třeba proces rozdělit na cykly. Vzorek se zahřeje na teplotu $800 \text{ } ^\circ\text{C}$ a teplota se skokově zvýší na $1250 \text{ } ^\circ\text{C}$ na dobu 2 - 4 sekund, následně se sníží zpět na původní hodnotu. Tento proces se opakuje v minutových cyklech. Po ukončení potřebného množství cyklů se vzorek pomalu ochladí na pokojovou teplotu. Průběh flashování je znázorněn na Obrázku 3.3. Teplota substrátu se v průběhu experimentu měřila optickým pyrometrem Land System 4.

3.2. DEPOZICE GA



Obrázek 3.3: Průběh teploty v závislosti na čase při flashování.

3.2. Depozice Ga

Depozice Ga na substrát Si(111) 7x7 probíhala v UHV depoziční komoře (viz. Obrázek 2.5) pomocí efuzní cely EFM 3 od firmy *Scienta Omicron*. Cella je složena z wolframového vlákna, molybdenového kalíšku, který je naplněn tekutým Ga a z kolimátoru.

Wolframové vlákno je žhaveno průchodem proudu na teplotu, kdy se na jeho povrchu vyskytují termoemisní elektrony. Tyto elektrony jsou napětím 800 V urychlovány na molybdenový kalíšek, který se tímto způsobem zahřívá na teplotu vypařování Ga. Mezi urychlovanými elektrony a odpařenými atomy Ga může docházet ke srážkám a k ionizaci Ga. Ionty Ga^+ a atomy Ga jsou pak po průchodu výstupním otvorem (kolimátorem) usměrňovány na substrát. Díky přítomnosti parazitních iontů Ga^+ ve svazku neutrálních atomů Ga lze měřit celkový tok neutrálních částic. Schéma Ga efuzní cely je znázorněno na Obrázku 3.4.

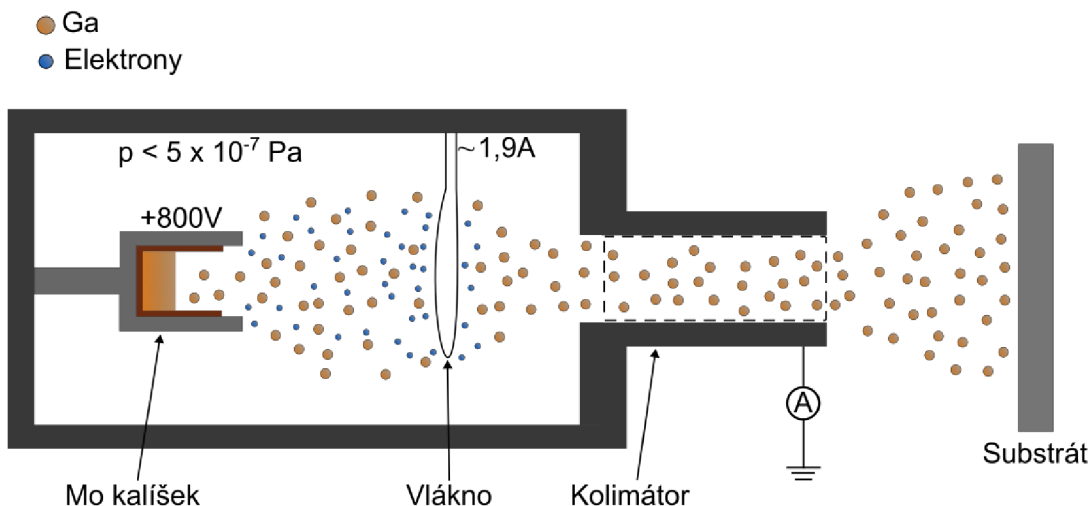
Tok parazitních iontů Ga^+ z efuzní cely byl nastaven na 77 nA, což odpovídá rychlosti růstu jedné monovrstvy za 5 minut. Depozice probíhala 50 minut za teploty ~ 330 °C. Tlak se v průběhu celé depozice udržoval pod hodnotou 2.0×10^{-7} Pa.

3.3. Nitridace

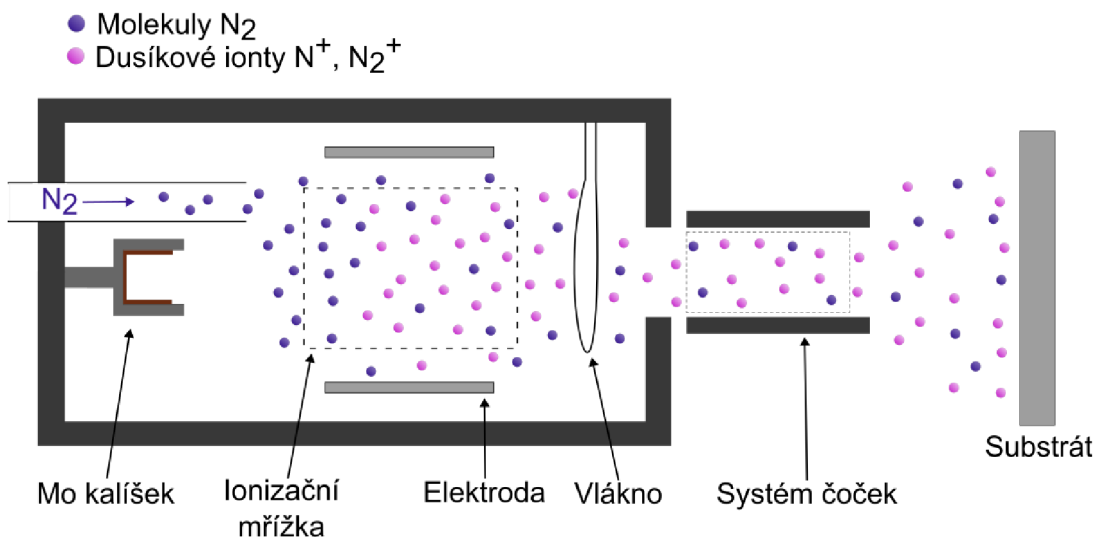
V druhém kroku přípravy 2D GaN nanokrystalů byly Ga ostrůvky vystaveny toku dusíkových iontů o energii menší než 50 eV. Úhel dopadu svazku byl nastaven natočením vzorku vůči ose iontově-atomárního zdroje. UHV komora byla naplněna dusíkem na tlak maximálně 1.0×10^{-4} Pa.

V iontově-atomárním zdroji, který má podobné uspořádání jako efuzní cely, je umístěna ionizační mřížka mezi molybdenovým kalíškem a vláknem. V prostoru ionizační mřížky dochází vlivem srážek elektronů s plynem k jeho ionizaci. Vzniklé ionty jsou usměrňovány směrem na substrát za pomoci soustavy elektromagnetických čoček. Schéma iontově-atomárního zdroje je vyobrazeno na Obrázku 3.5. Lze ho využít na současnou depozici

3. PŘÍPRAVA 2D GAN NÍZKOTEPLTNÍ KAPKOVOU EPITAXÍ ZA ASISTENCE IONTŮ



Obrázek 3.4: Schéma uspořádání Ga efuzní cely.



Obrázek 3.5: Schéma uspořádání iontově-atomárního zdroje.

Ga atomů a dusíkových iontů, avšak v této práci byl využíván pouze jako zdroj nízkoenergetických iontů. Teplota substrátu byla nastavena na teplotu 210 °C a nitridace probíhala po dobu 2 hodin.

Po ukončení nitridace se substrát s 2D GaN nanokrystaly na povrchu zchladí na pokojovou teplotu a vytáhne se z UHV systému ven.

4. Depozice 2D GaN

Existuje mnoho parametrů ovlivňujících růst 2D GaN nanokrystalů na Si(111) 7x7 a právě úhel dopadu iontového svazku by mohl být jedním z nich. Po provedení série depozic 2D GaN pod různými úhly dopadu svazku dusíkových iontů na Ga ostrůvky proběhla analýza morfologie povrchů pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu VERIOS (*High resolution Scanning Electron Microscope FEI Verios 460L*) a mikroskopu atomárních sil ICON-SPM (*Scanning Probe Microscope Bruker Dimension Icon*) v prostorech středoevropského technologického institutu CEITEC (*Central European Institute of Technology*) Nano. SEM (*Scanning Electron Microscopy*) a AFM (*Atomic Force Microscopy*) jsou užitečnými nástroji k analýze 2D materiálů, neboť jejich rozlišení umožňuje pozorování nanostruktur.

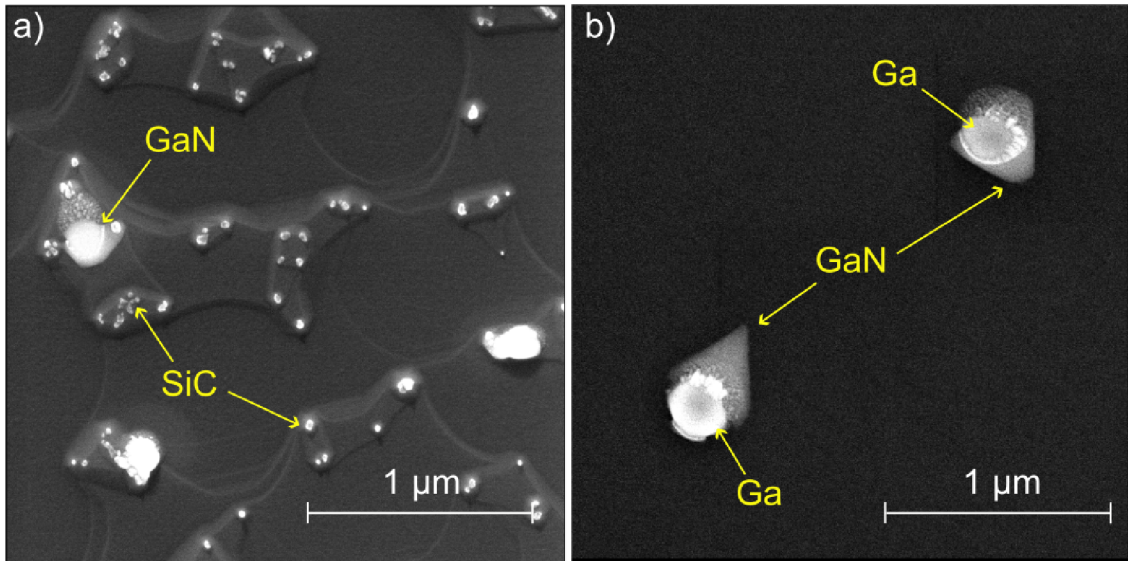
4.1. Parametry ovlivňující růst 2D GaN

Úprava povrchu substrátu, teplota substrátu při depozici, proud atomů Ga a dusíkových iontů, energie iontů, natočení vzorku v UHV komoře vůči iontově-atomárnímu zdroji jsou hlavními parametry ovlivňující růst 2D GaN. Tyto parametry musejí být optimálně nastaveny, aby byl růst 2D GaN nanokrystalů umožněn.

Povrch substrátu

První experimenty ukázaly důležitost správné úpravy povrchu substrátu. Jestliže teplota při flashování nedosáhla potřebné hodnoty, nebo bylo provedeno málo cyklů, zůstávaly na povrchu nečistoty a výsledný povrch substrátu byl příliš schodovitý a nanokrystaly tedy neměly prostor pro růst a Ga ostrůvky se při nitridaci přeměnily na 3D GaN nanokrystaly. Nanokrystaly GaN rostly výhradně na hranicích jednotlivých teras. Při správném flashování substrátu není na povrchu pozorovatelné žádné zvrásnění a povrch je hladký, což zajišťuje žádoucí podmínky pro růst 2D GaN.

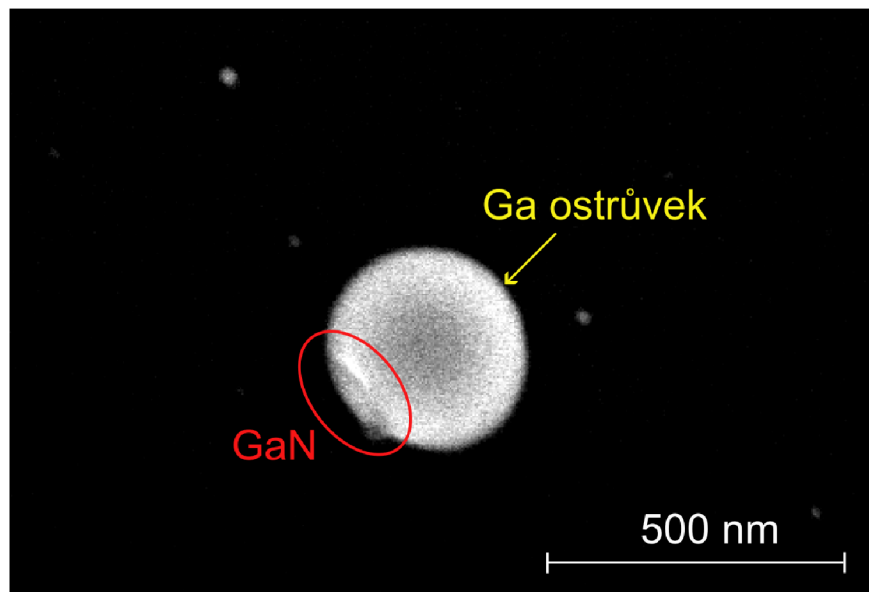
Flashování vyžaduje velmi opatrné a přesné zacházení s proudem zahřívajícím substrát. Každý vzorek je jinak nakontaktován s paletkou, do které je vložen, a má rozdílný odpor, a tedy se zahřívá jinak při průchodu stejného elektrického proudu. Prvotní počet cyklů flashování byl nastaven na 20 cyklů (vzorek byl vystaven teplotě 1250 °C po dobu 1 minuty). Doba flashování nestačila k vyhlazení povrchu Si(111) a ke vzniku rekonstrukce 7x7. Zvýšením počtu cyklů z 20 na 40 a množstvím praktických zkušeností byl vytvořen hladký a čistý povrch vhodný pro růst 2D GaN nanokrystalů. Obrázek 4.1 porovnává povrchy substrátů Si(111) s 2D GaN nanokrystaly flashované 20 a 40 cyklů.



Obrázek 4.1: a) SEM snímek povrchu substrátu flashového po dobu 20 cyklů s viditelnými schody a terasami, b) SEM snímek substrátu flashovaného 40 cyklů s hladkým povrchem.

Proud částic a poloha vzorku v komoře

Doba depozice Ga atomů i doba nitridace dusíkovými ionty byla pro všechny experimenty stejná. Aby se zajistila reprodukovatelnost experimentů, byl nastaven vždy stejný tok Ga částic a stejná energie dusíkových iontů. Experimenty ukázaly, že pro vhodný růst 2D GaN je potřeba dosáhnout proudu dusíkových iontů alespoň $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Pokud je dávka iontů menší než 2.72×10^{16} iontů/ cm^2h , ostrůvky Ga se znitridují částečně a nebo se znitridují vůbec. Prodloužením doby depozice dusíkových iontů na substrát by se mohlo dosáhnout lepšího znitridování Ga ostrůvků. Na Obrázku 4.2 lze pozorovat povrch Si(111) 7x7, který byl nitridován nízkým proudem dusíkových iontů ($0.36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a na kterém je viditelný pouhý náznak nitridace Ga ostrůvku.



Obrázek 4.2: SEM snímek Ga ostrůvku s nepatrným náznakem znitridování.

4.2. VLIV ÚHLU DOPADU IONTOVÉHO SVAZKU

Teplota substrátu

Teplota hraje zásadní roli při depozici, neboť správná teplota povrchu umožňuje přichycení Ga atomů na povrchu a vytvoření ostrůvků. Při depozici dusíkových iontů na substrát určuje teplota míru nitridace Ga ostrůvků. Během realizace experimentů se objevil problém při nastavování teploty nižší než 500 °C. Pro nižší teploty nemohlo být měření provedeno pomocí optického pyrometru, neboť pyrometr užívaný v laboratořích ÚFI (*Ústav Fyzikálního Inženýrství*) VUT měří teploty v rozsahu 500 - 1400 °C. Hodnoty proudu zahřívajícího substrát musely být tedy odhadnuty z lineární závislosti 4.1 mezi proudem, který procházel vzorkem, a teplotou.

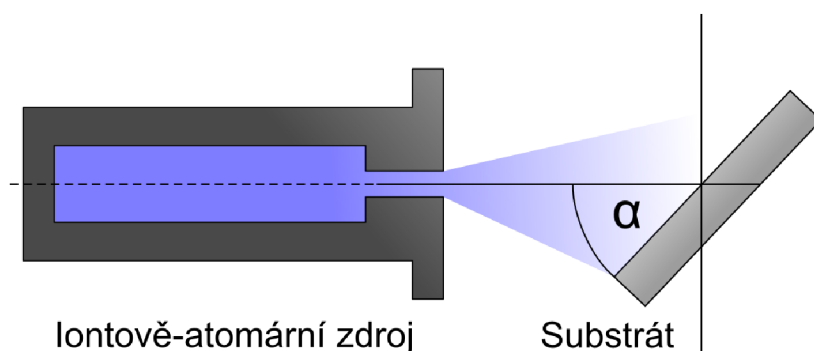
$$T = kI, \quad (4.1)$$

kde T je teplota substrátu, I je proud a k je konstanta. Nastavením teploty na 500 °C se vypočítala konstanta k, pomocí níž se dopočítaly potřebné hodnoty proudu odpovídající teplotám 330 °C a 210 °C.

4.2. Vliv úhlu dopadu iontového svazku

Parametrem ovlivňujícím růst 2D GaN nanokrystalů, který byl v této práci podrobněji studován, je úhel dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky. Byla studována míra nitridace Ga ostrůvků a velikost a orientace nanokrystalů. Samotný proces depozice 2D GaN je velmi náročný a úspěšnost růstu kvalitních nanokrystalů je stále velmi nízká. Ovšem i zdánlivě nepovedené experimenty nám dávají vhled do mechanismu růstu 2D GaN nanokrystalů.

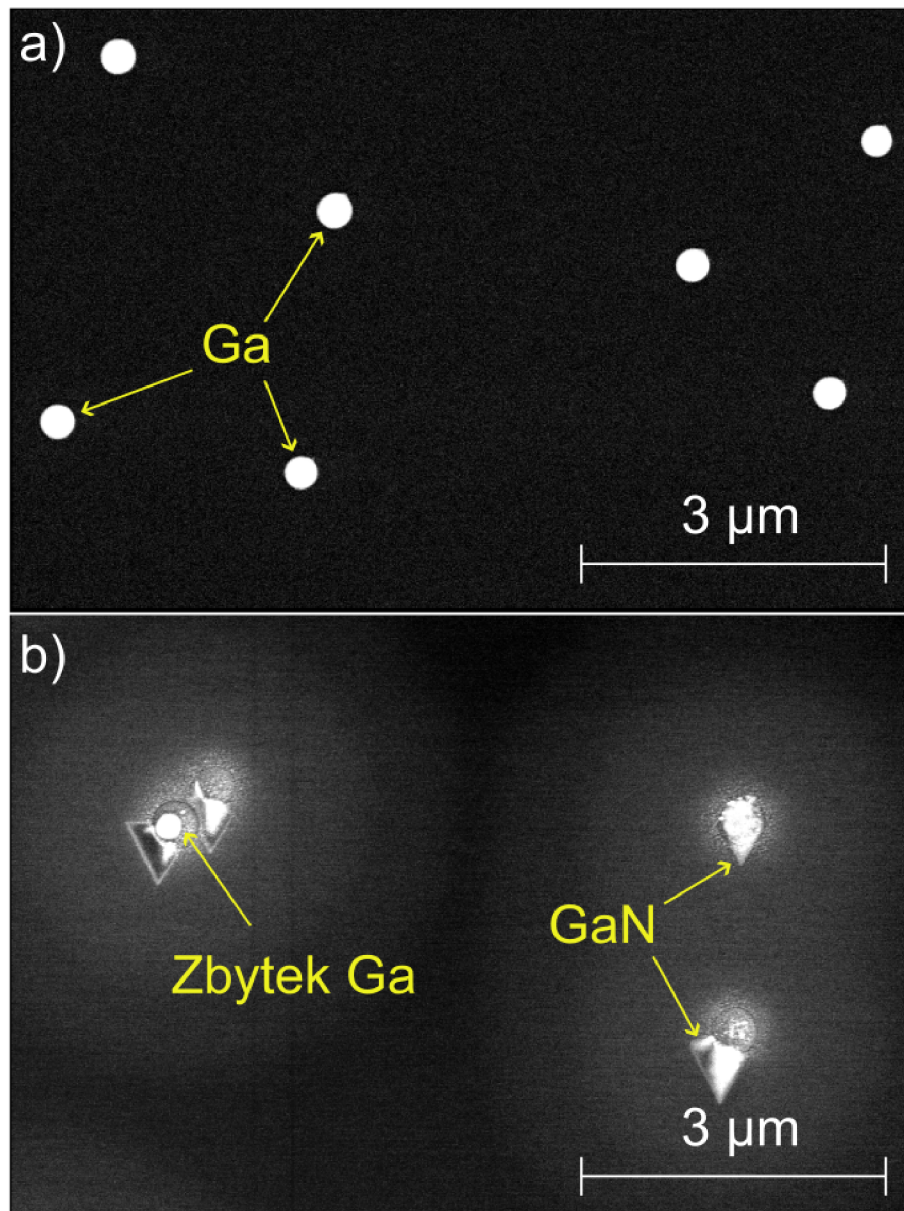
V rámci této práce bylo provedeno 18 depozic 2D GaN pod různými úhly dopadu iontového svazku v intervalu od 10° do 90° (úhel je znázorněn na Obrázku 4.3). Některé depozice bylo nutno opakovat, kvůli špatnému flashování, nízkému proudu iontů nebo špatné poloze vzorku v depoziční komoře.



Obrázek 4.3: Uspořádání experimentu s vyznačeným úhlem dopadu iontového svazku α .

4.2.1. Úhel dopadu 10° a 90°

První experimenty byly prováděny pod úhly 10° a 90° , za účelem zjistit, zda vůbec dochází k růstu 2D GaN při kolmém dopadu iontového svazku a při velmi nízkém úhlu. Výsledky potvrzují, že při malém úhlu dopadu iontového svazku 10° na substrát nedochází k vytvoření 2D GaN nanokrystalů a na povrchu zůstávají pouze Ga ostrůvky. Naproti tomu depozice pod úhlem 90° ukázala, že dochází k úplné nitridaci Ga ostrůvků a k růstu nejen trojúhelníkových struktur typických pro 2D GaN, ale také struktur lichoběžníkového tvaru. Srovnání obou depozic je na Obrázku 4.4.

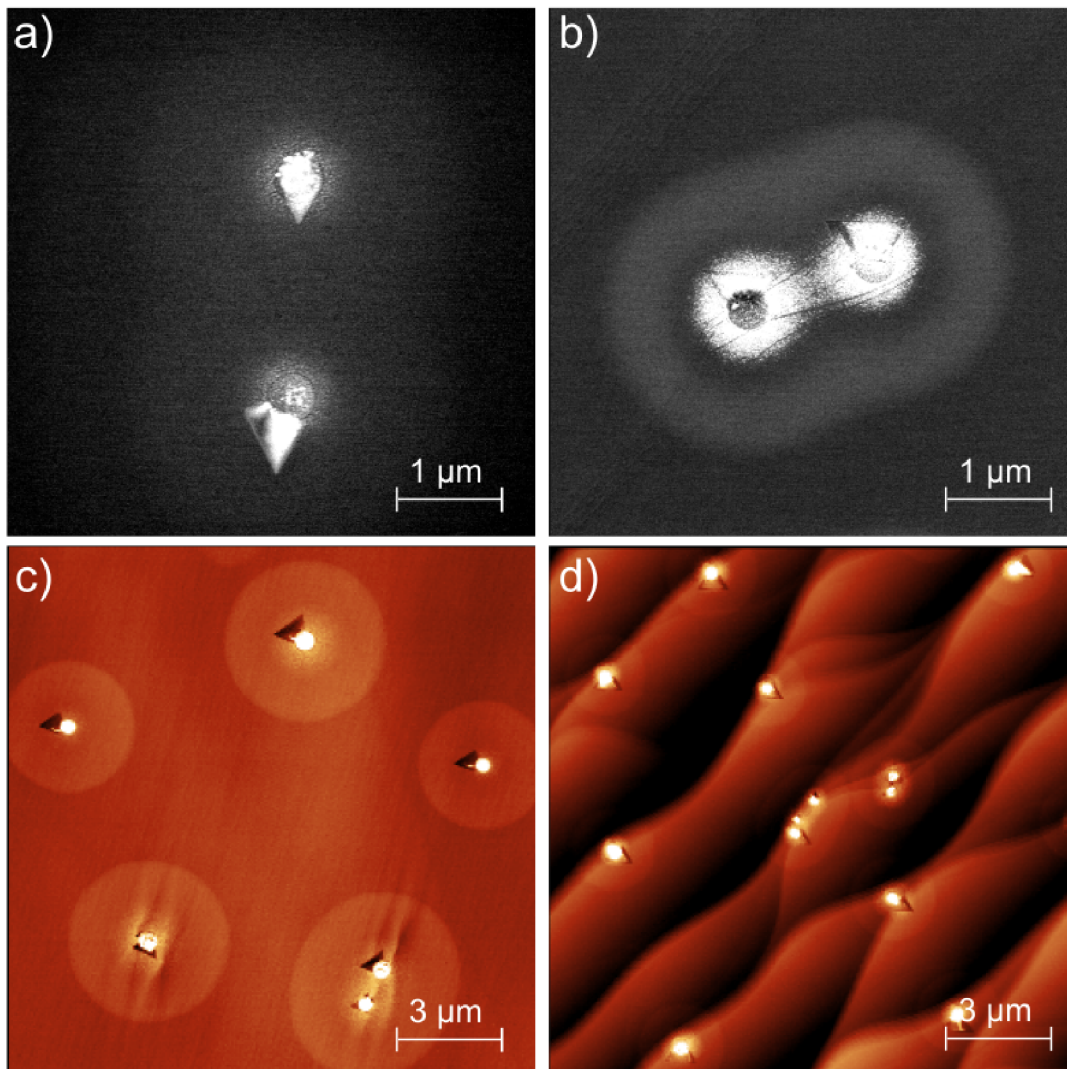


Obrázek 4.4: Porovnání depozic pod úhly dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky: a) 10° a b) 90° .

4.2. VLIV ÚHLU DOPADU IONTOVÉHO SVAZKU

4.2.2. Kolmý dopad svazku

Nitridace Ga ostrůvků pod kolmým dopadem iontového svazku se vydařila na dvou vzorcích, avšak jeden ze vzorků má velmi hladký povrch a na povrchu druhého se nacházejí výrazné nerovnosti. Porovnání dvou povrchů ukazuje Obrázek 4.5.

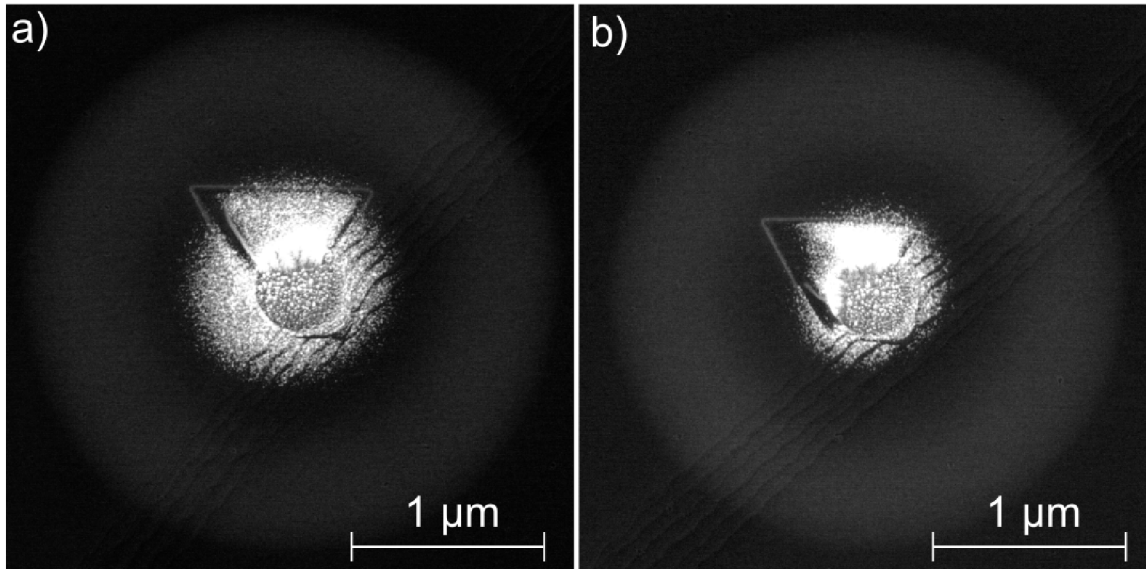


Obrázek 4.5: Porovnání dvou povrchů Si(111) nitridovaných pod úhlem 90°: SEM snímky a) hladkého povrchu a b) zvrásněného povrchu. AFM snímky c) hladkého povrchu a d) zvrásněného povrchu.

Hladký povrch substrátu umožnil růst struktur 2D GaN do velikostí až 700 nm z Ga ostrůvků o průměru 452 ± 27 nm. Na povrchu se objevovaly jak trojúhelníkové struktury, tak lichoběžníky, které dosahovaly větších rozměrů než struktury trojúhelníkové.

Na vzorku s nerovným povrchem dosahovaly schody velikostí jednotek mikrometrů a na hladkém povrchu pouze jednotek nanometrů. Na obrázku 4.5 d) lze pozorovat, že struktury rostou na hranicích jednotlivých teras a jejich orientace je jimi ovlivněna, na rozdíl od hladkého povrchu, kde je orientace struktur zcela náhodná. Lze tedy říci, že nerovnostmi povrchu můžeme částečně kontrolovat orientaci struktur 2D GaN. Také lze

rozdělit struktury na dva typy, zobrazené na Obrázku 4.6, které mají odlišný tvar a odlišné rozměry.



Obrázek 4.6: SEM snímky dvou odlišných typů struktur 2D GaN nitridovaných pod úhlem 90°: a) Typ A lichoběžníkového tvaru, b) Typ B trojúhelníkového tvaru.

Typ A se na povrchu substrátu vyskytoval v 56.25 % případů a dosahoval rozměrů až 900 nm. V porovnání s trojúhelníkovým typem B, který se vyskytuje na povrchu ve zbylých 43.75 % a dosahuje v průměru velikostí 720 nm, jsou lichoběžníkové struktury výrazně větší. Rozdíl velikostí struktur nemůže být způsoben mírou nitridace Ga ostrůvků, neboť v obou případech docházelo k úplné nitridaci. Průměr výchozích Ga ostrůvků byl však rozdílný. Struktury typu A rostly z původních Ga ostrůvků o průměru 468 ± 25 nm a typ B z ostrůvků o průměru 435 ± 40 nm.

K úplnému znitridování docházelo v případě hladkého i zvrásněného povrchu, a tedy pro dopad iontového svazku pod úhlem 90° a s velikostí proudu $\sim 1.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ je dvouhodinová nitridace dostatečná.

Nitridace pod kolmým dopadem iontového svazku na substrát přináší ještě další velmi zajímavý výsledek. Na Obrázku 4.5 i na Obrázku 4.6 lze pozorovat světlé kruhy v blízkosti struktur 2D GaN. Tyto světlé kruhy se objevují jen při kolmém dopadu, může se tedy jednat o rozptýlené Ga atomy, které byly odprášeny z povrchu Ga ostrůvku dopadajícími ionty. Jestliže by se snížila energie iontů a zachoval by se kolmý úhel dopadu, pravděpodobně by k tomuto jevu nedocházelo. Jedno z možných vysvětlení původu těchto kruhů kolem struktur 2D GaN může být jemné pokrytí substrátu tenkou vrstvou Ga atomů.

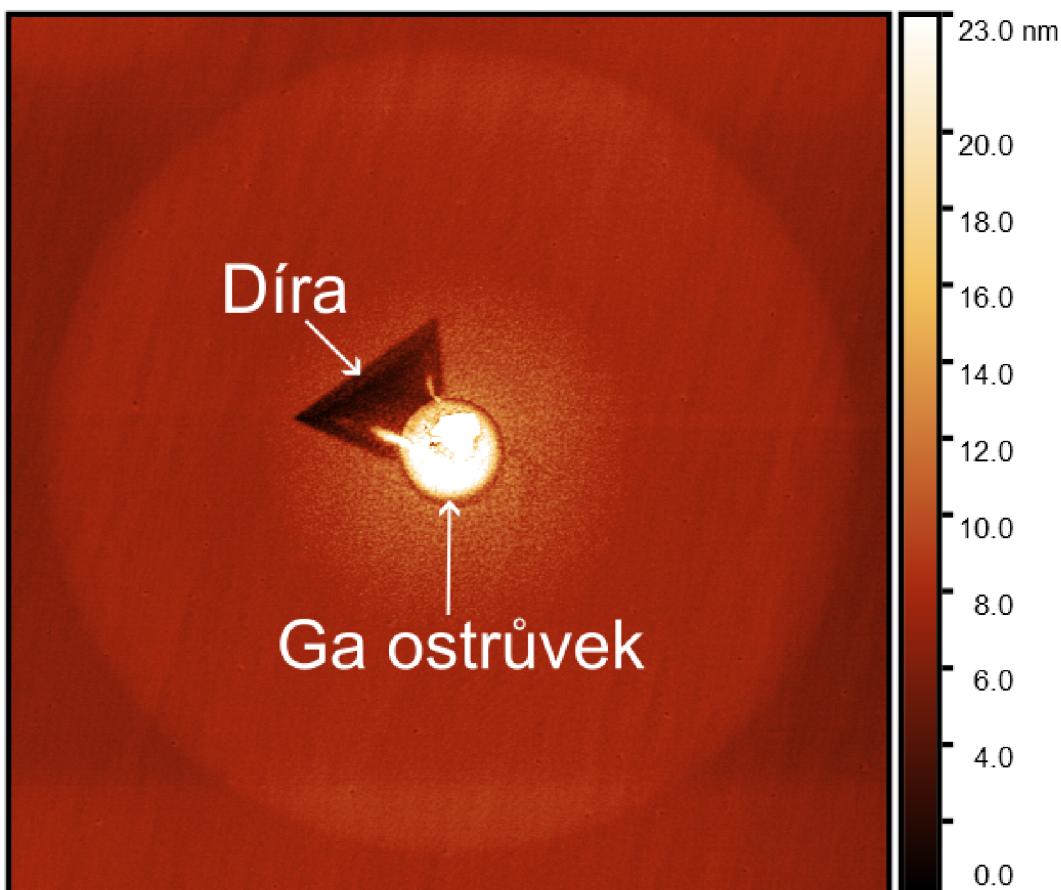
4.2. VLIV ÚHLU DOPADU IONTOVÉHO SVAZKU

Výška těchto kruhů byla změřena pomocí AFM a dosahovala velikostí jednotek nanometrů.

Na hladkém povrchu tyto světlé kruhy dosahovaly průměru až $4.0\ \mu\text{m}$ a v případě zvrásněného povrchu dosahovaly průměru pouze $2.8\ \mu\text{m}$. Lze tedy předpokládat, že nerovnosti povrchu zabraňují odprašování Ga atomů z ostrůvku. Odprašování atomů z Ga ostrůvků snižuje množství Ga, které by mohlo difundovat do růstové oblasti 2D GaN a podílet se na růstu 2D struktur, a proto dosahují struktury na zvrásněném povrchu větších rozměrů než na hladkém povrchu.

Jev, při kterém dochází k odprašování Ga atomů z ostrůvku, lze prohlásit za nežádoucí a je potřeba ho eliminovat. Toho by se mohlo dosáhnout malou změnou úhlu dopadu iontového svazku (jednotky stupňů) tak, aby stále docházelo k úplné nitridaci.

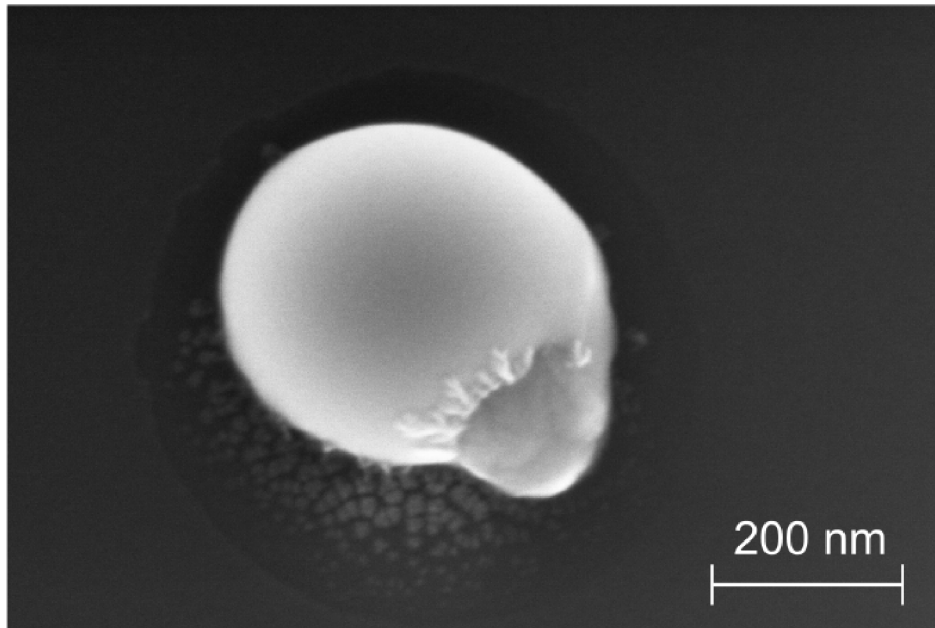
Struktury se na SEM jeví jako nanokrystaly 2D GaN, avšak analýza AFM ukázala jiné zajímavé výsledky. Na obrázku 4.7 lze pozorovat, že na místě, kde by se měl nacházet nanokrystal 2D GaN se ve skutečnosti nachází díra. Tyto díry mají hloubku 1 - 2 nm. Vznik díry je pravděpodobně způsoben odprašováním Si(111) nízkoenergovými ionty dopadajícími na povrch. Při změně úhlu dopadu iontů na Ga ostrůvky nebyl tento jev pozorován. Zatím nedokážeme tento jev dostatečně vysvětlit.



Obrázek 4.7: AFM detail 2D GaN struktury vzniklé nitridací pod úhlem 90° dopadu dusíkových iontů s energií $E < 50\ \text{eV}$.

4.2.3. Úhel dopadu 25° a 55°

Byly provedeny také depozice pod úhlem 55°, přesně podle článku *Low temperature 2D GaN growth on Si(111) 7x7 assisted by hyperthermal nitrogen ions* [49], avšak tento experiment se nepodařilo zreprodukovat ve stejné kvalitě. Substrát měl hladký povrch a tedy byly vytvořeny ideální podmínky pro růst 2D GaN. Ga ostrůvky se na povrchu vytvořili, nedošlo však k jejich úplnému znitridování. Na Obrázku 4.8 je pozorovatelný detail zárodku nanokrystalu 2D GaN.

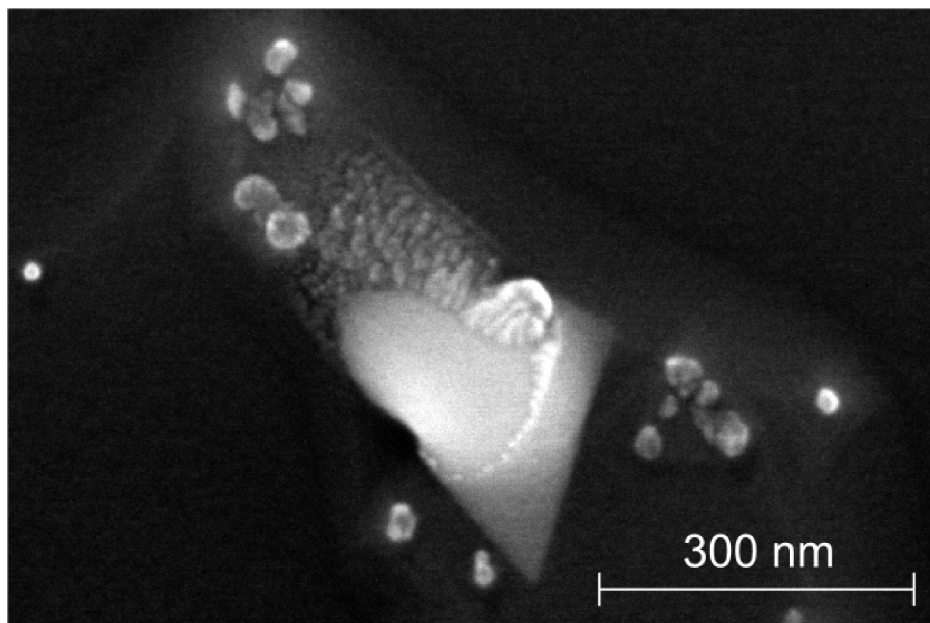


Obrázek 4.8: SEM snímek zárodku nanokrystalu 2D GaN nitridovaného pod úhlem 55°.

Na míru nitridace Ga ostrůvků má velký vliv hustota proudu iontů, v tomto experimentu naměřila faradayova sonda až $2.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, více než při kterékoli jiné provedené depozici. Téměř dvojnásobný proud iontů než je potřebný k nitridaci Ga ostrůvků, by měl znamenat větší míru nitridace, avšak efekt byl opačný. Hodnota proudu mohla být chybně naměřena, nebo byla špatně odhadnuta teplota substrátu při depozici dusíkových iontů, jestliže tedy byla teplota nižší než $190 \text{ }^\circ\text{C}$ probíhala nitridace Ga ostrůvku velmi pomalu a dvouhodinová nitridace nebyla dostatečná.

Částečné znitridování Ga ostrůvků se vyskytovalo i na substrátu, na který dopadal svazek dusíkových iontů pod úhlem 25°. V tomto případě však nešlo o teplotu substrátu při depozici, nebo o hustotu proudu iontů, která dosahovala $1.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Substrát byl flashován pouze 20 cyklů a tedy nedošlo k přetrhání vazeb SiC a k zahlazení povrchu. Na Obrázku 4.9 je viditelný vliv špatně upraveného povrchu na růst 2D GaN. Z Ga ostrůvku roste trojúhelníkový nanokrystal 2D GaN, avšak kvůli nerovnému schodovitému povrchu nemá prostor k růstu. Již původní Ga ostrůvek byl deformován a nanokrystal z něj vzniklý roste do všech směrů jinou rychlostí v závislosti na prostoru. Důsledkem těchto parametrů jsou malé rozměry nanokrystalů 2D GaN, které dosahují maximálně 200 nm.

4.2. VLIV ÚHLU DOPADU IONTOVÉHO SVAZKU



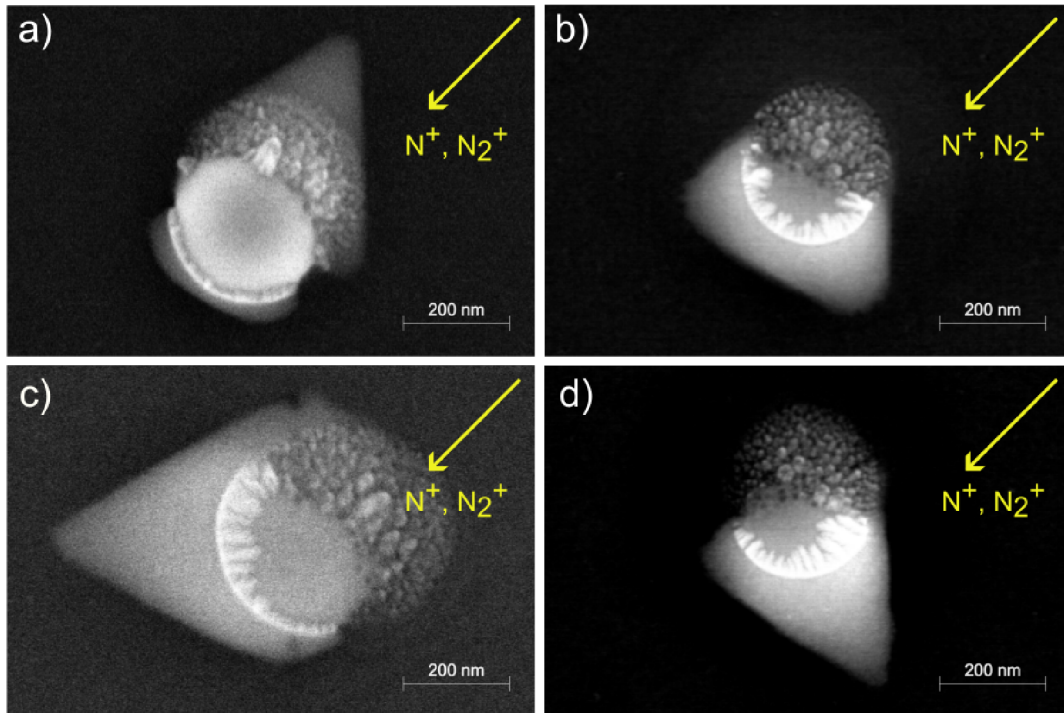
Obrázek 4.9: SEM snímek 2D GaN nanokrystalu omezeného špatně upraveným povrchem Si(111).

4.2.4. Úhel dopadu 65°

Dalším vydařeným experimentem byla depozice dusíkových iontů pod úhlem 65° . Povrch s rekonstrukcí 7×7 byl kvalitně zahlazen a tedy vytvářel ideální podmínky pro růst 2D GaN. Téměř všechny ostrůvky Ga byly znitridovány, žádný však nebyl znitridován celý, vždy se u nanokrystalů nacházel patrný pozůstatek Ga ostrůvku. Při prodloužení času nitridace by nejspíše došlo k úplné transformaci Ga na 2D GaN, i přesto přinesl experiment hodnotné výsledky.

Z původních Ga ostrůvků o průměru 304 ± 25 nm rostly nanokrystaly 2D GaN o rozměrech až 480 nm a míra nitridace byla přibližně 67 %.

Další z důležitých informací, které je možné vyčíst ze SEM, je orientace nanokrystalů 2D GaN. Bylo zjištěno, že takto rostené nanokrystaly lze dělit podle orientace růstu na 4 typy, které se liší tvarem i velikostí. Rozdíly v orientaci růstu jsou na Obrázku 4.10 a Tabulka 4.1 ukazuje zastoupení jednotlivých typů nanokrystalů.



Obrázek 4.10: SEM snímek různých typů orientace nanokrystalů s šipkou vyznačující směr dopadu iontového svazku: a) typ A, b) typ B, c) typ C, d) typ D.

Typ	Četnost
A	46 %
B	41 %
C	4 %
D	9 %

Tabulka 4.1: Tabulka četnosti jednotlivých typů orientace nanokrystalů.

Z tabulky lze vyčíst, že nejzastoupenějšími typy jsou typ A a typ B. Typ A má trojúhelníkovou strukturu a roste přímo proti směru dopadu iontového svazku. Lze si povšimnout, že nevzniká pouze trojúhelník proti směru dopadu svazku, ale také malý nanokrystal za Ga ostrůvkem připomínající typ B. U typu A překrývá 2D GaN místo původního Ga ostrůvku, u ostatních typů nanokrystalů roste 2D GaN směrem od Ga ostrůvku. Domnívám se, že vznik typu A probíhá následovně. Na Ga ostrůvek dopadá svazek dusíkových iontů a vytváří malý nanokrystal 2D GaN za ostrůvkem (typ B), avšak zmenšující se ostrůvek za sebou zanechává zbytky Ga (viditelné na Obrázcích 4.10 b-d), které mohou reagovat s dopadajícími ionty a vytvářet tak nanokrystal rostoucí opačně. Tento nanokrystal následně převezme prioritu a atomy Ga začnou difundovat do růstové zóny nanokrystalu typu A.

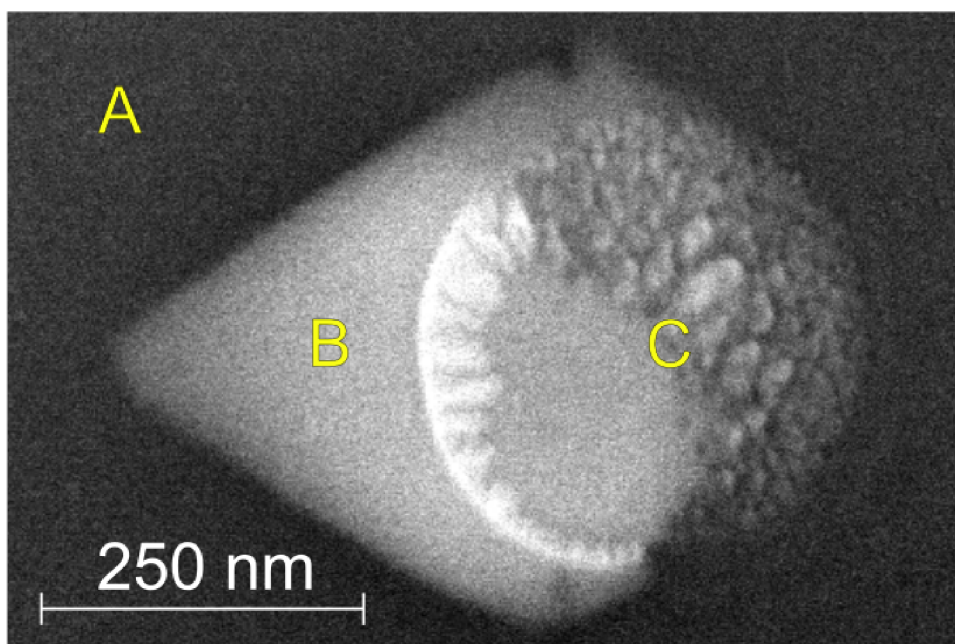
Druhá nejčastější orientace nanokrystalů na vzorku byla typu B. Namísto trojúhelníkové struktury vznikal lichoběžník 2D GaN za ostrůvkem. Při dopadu iontů na Ga ostrůvek vzniká klastr GaN, který difunduje po ostrůvku Ga na substrát, kde vytváří

4.2. VLIV ÚHLU DOPADU IONTOVÉHO SVAZKU

tenký nanokrystal 2D GaN. Jedna z možností je, že vzniklý klastr na ostrůvku má určitou hybnost, kterou mu předává dopadající iont, proto se po ostrůvku nepřesune rovnou na substrát, ale putuje za ostrůvek, kde se teprve usadí. Vznikají tak „závěje“ lichoběžníkového tvaru.

Oba typy C a D se na vzorku vyskytovaly zhruba v 13 % případů, přesto přinesly zajímavé výsledky. Jedná se o nanokrystaly, které jsou nejvíce znitridované a dosahují největších rozměrů. Oba typy nejspíše vznikají z nanokrystalů typu B, při větším proudu iontů dopadajících na ostrůvek Ga. Při nitridaci Ga ostrůvku vznikne nanokrystal typu B a následně se protáhne jeden nebo druhý hrot základny lichoběžníku a vznikne trojúhelníková struktura 2D GaN.

Na detailním Obrázku 4.11 2D GaN nanokrystalu typu C lze pozorovat tři hlavní oblasti. Oblast A je povrch substrátu Si(111), povrch je hladký a tedy na něm nejsou viditelné žádné schody zamezující růst 2D GaN. Oblast B je růstová zóna nanokrystalu ve tvaru trojúhelníku. V oblasti C se nachází malý neznitridovaný ostrůvek Ga a zbytky Ga, které se nestihly difuzí přesunout do růstové oblasti.



Obrázek 4.11: Detail nanokrystalu 2D GaN. A) Si(111) 7x7, B) 2D GaN, C) zbytky Ga ostrůvku.

Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši na téma 2D GaN, provést sérii depozic nanokrystalů 2D GaN na Si(111) 7x7 pod různými úhly dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky a vzniklé struktury analyzovat pomocí SEM a AFM. Hlavním úkolem bylo zjistit, jaký má úhel dopadu iontového svazku vliv na tvorbu nanokrystalů.

Teoretická část práce je rozdělena na dvě kapitoly. V první kapitole jsou popsány základní vlastnosti objemového GaN, metody jeho přípravy a jeho uplatnění v elektronice, optoelektronice či medicíně. Druhá kapitola se podrobně zabývá 2D materiály, konkrétně 2D GaN. Jsou zde zmíněny teoreticky a experimentálně zjištěné vlastnosti 2D GaN, jako například šířka zakázaného pásu o velikosti 4.9 eV. Zabývá se také metodami přípravy 2D vrstev a nanokrystalů GaN.

Experimentální část práce je rozdělena na dvě části. První část podrobně popisuje metodu nízkoteplotní kapkové epitaxe za asistence iontů, která byla užita v této práci k přípravě 2D GaN nanokrystalů na substrátu Si(111) 7x7. Příprava vzorků sestává z několika procesů, mezi které patří: žihání vzorku, flashování, depozice Ga a nitridace Ga ostrůvků nízkenergiiovými dusíkovými ionty ($E < 50$ eV). Bylo provedeno 18 depozic 2D GaN pod různými úhly dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky v rozmezí 10° až 90° . Celý experiment probíhal v UHV depoziční komoře v laboratořích VUT ÚFI.

V druhé části je pozornost věnována analýze vzorků pomocí SEM a AFM v laboratořích CEITEC Nano. Jsou zde rozebírány důležité parametry růstu 2D GaN, mezi které patří čistota a zvrásnění povrchu, hustota proudu iontů a jejich energie.

Pro malý úhel dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky bylo zjištěno, že nedochází k nitridaci Ga. Naopak u kolmého dopadu svazku docházelo k úplnému znitridování původního Ga ostrůvku. SEM analýza ukázala, že pokud je povrch zvrásněný, vznikají Ga ostrůvky na hranicích teras a struktury vzniklé nitridací mají danou orientaci. Pomocí AFM se však odhalilo, že se při kolmém dopadu nejedná o nanokrystal 2D GaN, ale o díry v substrátu o hloubce jednotek nanometrů. Při kolmém dopadu vznikaly kolem 2D struktur kruhy o průměru jednotek mikrometrů. Jedná se o tenkou nanometrovou vrstvu atomů Ga odprášených z původního Ga ostrůvku dopadajícími ionty.

Další zajímavé výsledky byly získány při depozici dusíkových iontů pod úhlem dopadu 65° . Byly vytvořeny 2D GaN nanostruktury o velikostech až 480 nm. Na povrchu se vyskytovaly 4 druhy orientace nanokrystalů, každá s jiným procentem zastoupení, a jejich růst byl podrobně popsán.

Výsledky potvrdily, že změna úhlu dopadu iontového svazku na Ga ostrůvky má významný vliv na tvar, orientaci a velikost 2D GaN nanokrystalů. Jedná se o důležitý pokrok ve studiu 2D GaN nanokrystalů.

Literatura

- [1] Nitride Semiconductor Technology: Power Electronics and Optoelectronic Devices. Weinheim: Wiley-VCH, 2020. ISBN 9783527825264.
- [2] DARAKCHIEVA, V., B. MONEMAR a A. USUI. On the lattice parameters of GaN. Applied Physics Letters [online]. 2007, 91(3) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.2753122
- [3] LESZCZYNSKI, M., H. TEISSEYRE, T. SUSKI, et al. Lattice parameters of gallium nitride. Applied Physics Letters [online]. 1996, 69(1), 73-75 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.118123
- [4] AREHART, A. R., T. HOMAN, M. H. WONG, C. POBLENZ, J. S. SPECK a S. A. RINGEL. Impact of N- and Ga-face polarity on the incorporation of deep levels in n-type GaN grown by molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters [online]. 2010, 96(24) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.3453660
- [5] YU, E. T., X. Z. DANG, P. M. ASBECK, S. S. LAU a G. J. SULLIVAN. Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III-V nitride heterostructures [online]. 1999, 17(4) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0734211X. Dostupné z: doi:10.1116/1.590818
- [6] WANG, X. a A. YOSHIKAWA. Molecular beam epitaxy growth of GaN, AlN and InN. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials [online]. 2004, 48-49, 42-103 [cit. 2023-05-17]. ISSN 09608974. Dostupné z: doi:10.1016/j.pcrysgrow.2005.03.002
- [7] NEUDECK, P. G., R. S. OKOJIE a L.-Y. CHEN. High-temperature electronics - a role for wide bandgap semiconductors?. Proceedings of the IEEE [online]. 2002, 90(6), 1065-1076 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2002.1021571
- [8] JAIN, S. C., M. WILLANDER, J. NARAYAN a R. Van OVERSTRAETEN. III-nitrides: Growth, characterization, and properties. Journal of Applied Physics [online]. 2000, 87(3), 965-1006 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.371971
- [9] NANIWAE, K., S. ITOH, H. AMANO, K. ITOH, K. HIRAMATSU a I. AKASAKI. Growth of single crystal GaN substrate using hydride vapor phase epitaxy. Journal of Crystal Growth [online]. 1990, 99(1-4), 381-384 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00220248. Dostupné z: doi:10.1016/0022-0248(90)90548-Y
- [10] PARK, S. S., W. PARK a S. H. CHOH. Free-Standing GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy. Japanese Journal of Applied Physics [online]. 2000, 39(11B) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0021-4922. Dostupné z: doi:10.1143/JJAP.39.L1141

- [11] VORONENKOV, V., N. BOCHKAREVA, A. ZUBRILOV, A. LEONIDOV a Y. SHRETER. Reactor materials for high purity HVPE GaN growth: a thermodynamic analysis. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, 1410(1) [cit. 2023-05-17]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1410/1/012004
- [12] RINALDI, F. Basics of molecular beam epitaxy (MBE). UNIVERSITÄT ULM, 2002, 31-38 [cit. 2023-05-17].
- [13] FRANCHI, S. Chapter 1 - Molecular beam epitaxy: fundamentals, historical background and future prospects. In: HENINI, Mohamed. *Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production* [online]. Oxford: Elsevier, 2013, s. 1-46 [cit. 2023-05-17]. ISBN 978-0-12-387839-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123878397000014>
- [14] MORI, Y., M. IMANISHI, K. MURAKAMI a M. YOSHIMURA. Recent progress of Na-flux method for GaN crystal growth. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 2019, 58(SC) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0021-4922. Dostupné z: doi:10.7567/1347-4065/ab112e
- [15] MORI, Y., M. IMADE, M. MARUYAMA a M. YOSHIMURA. Growth of GaN Crystals by Na Flux Method. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* [online]. 2013, 2(8), N3068-N3071 [cit. 2023-05-17]. ISSN 2162-8769. Dostupné z: doi:10.1149/2.015308jss
- [16] SONG, Y., F. KAWAMURA, T. TANIGUCHI, K. SHIMAMURA a N. OHASHI. High-Quality GaN Crystal Growth Using Flux-Film-Coated LPE with Na Flux. *Crystal Research and Technology* [online]. 2020, 55(8) [cit. 2023-05-17]. ISSN 02321300. Dostupné z: doi:10.1002/crat.202000042
- [17] YOSHIKAWA, A., E. OHSHIMA, T. FUKUDA, H. TSUJI a K. OSHIMA. Crystal growth of GaN by ammonothermal method. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2004, 260(1-2), 67-72 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00220248. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcrysgro.2003.08.031
- [18] HASHIMOTO, T., F. WU, J. S. SPECK a S. NAKAMURA. Ammonothermal growth of bulk GaN. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2008, 310(17), 3907-3910 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00220248. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcrysgro.2008.06.005
- [19] XU, K., J. F. WANG a G. Q. REN. Progress in bulk GaN growth. *Chinese Physics B* [online]. 2015, 24(6) [cit. 2023-05-17]. ISSN 1674-1056. Dostupné z: doi:10.1088/1674-1056/24/6/066105
- [20] ZHANG, X., L. JIN, X. DAI, G. CHEN a G. LIU. Two-Dimensional GaN: An Excellent Electrode Material Providing Fast Ion Diffusion and High Storage Capacity for Li-Ion and Na-Ion Batteries [online]. 2018, 10(45), 38978-38984 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.8b15139

LITERATURA

- [21] SARANGADHARAN, I., A. REGMI, Y. W. CHEN, et al. High sensitivity cardiac troponin I detection in physiological environment using AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) Biosensors. *Biosensors and Bioelectronics* [online]. 2018, 100, 282-289 [cit. 2023-05-17]. ISSN 09565663. Dostupné z: doi:10.1016/j.bios.2017.09.018
- [22] IIDA, D. a K. OHKAWA. Recent progress in red light-emitting diodes by III-nitride materials. *Semiconductor Science and Technology* [online]. 2021, 37(1) [cit. 2023-05-17]. ISSN 0268-1242. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6641/ac3962
- [23] MUTHU, S. a J. GAINES. Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003 [online]. IEEE, 2003, 515-522 [cit. 2023-05-17]. ISBN 0-7803-7883-0. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.2003.1257549
- [24] ALFATTANI, S. Review of LiFi Technology and Its Future Applications. *Journal of Optical Communications* [online]. 2021, 42(1), 121-132 [cit. 2023-05-17]. ISSN 2191-6322. Dostupné z: doi:10.1515/joc-2018-0025
- [25] FUJIMOTO, Y., J. NAKANISHI, T. YAMADA, O. ISHII a M. YAMAZAKI. Visible fiber lasers excited by GaN laser diodes. *Progress in Quantum Electronics* [online]. 2013, 37(4), 185-214 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00796727. Dostupné z: doi:10.1016/j.pquantelec.2013.04.002
- [26] SANDERS, N., D. BAYERL, G. SHI, K. A. MENGLE a E. KIOUPAKIS. Electronic and Optical Properties of Two-Dimensional GaN from First-Principles. *Nano Letters* [online]. 2017, 17(12), 7345-7349 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/acs.nanolett.7b03003
- [27] FENG, C., H. QIN, D. YANG a G. ZHANG. First-Principles Investigation of the Adsorption Behaviors of CH₂O on BN, AlN, GaN, InN, BP, and P Monolayers. *Materials* [online]. 2019, 12(4) [cit. 2023-05-17]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12040676
- [28] NAJDA, S. P., P. PERLIN, T. SUSKI, et al. AlGaInN diode-laser technology for optical clocks and atom interferometry. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2017, 810 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/810/1/012052
- [29] WU, Y.-F., B.P. KELLER, S. KELLER, D. KAPOLNEK, P. KOZODOY, S. P. DENBAARS a U. K. MISHRA. High power AlGaIn/GaN HEMTs for microwave applications. *Solid-State Electronics* [online]. 1997, 41(10), 1569-1574 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00381101. Dostupné z: doi:10.1016/S0038-1101(97)00106-8
- [30] SHUR, M. S., R. GASKA, A. KHAN a G. SIMIN. Wide band gap electronic devices. *Proceedings of the Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices*,

- Circuits and Systems (Cat. No.02TH8611) [online]. IEEE, 2002, D051-1-D051-8 [cit. 2023-05-17]. ISBN 0-7803-7380-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICCDCS.2002.1004074
- [31] REUSCH, D. a J. STRYDOM. Effectively paralleling gallium nitride transistors for high current and high frequency applications. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [online]. IEEE, 2015, 2015, 745-751 [cit. 2023-05-17]. ISBN 978-1-4799-6735-3. Dostupné z: doi:10.1109/APEC.2015.7104433
- [32] FRAYSSINET, E., W. KNAP, P. LORENZINI, et al. High electron mobility in Al-GaN/GaN heterostructures grown on bulk GaN substrates. Applied Physics Letters [online]. 2000, 77(16), 2551-2553 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.1318236
- [33] HEIKMAN, S., S. KELLER, Y. WU, J. S. SPECK, S. P. DENBAARS a U. K. MISHRA. Polarization effects in AlGa_N/Ga_N and Ga_N/AlGa_N/Ga_N heterostructures. Journal of Applied Physics [online]. 2003, 93(12), 10114-10118 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.1577222
- [34] IKEDA, N., Y. NIIYAMA, H. KAMBAYASHI, Y. SATO, T. NOMURA, S. KATO a S. YOSHIDA. GaN Power Transistors on Si Substrates for Switching Applications. Proceedings of the IEEE [online]. 2010, 98(7), 1151-1161 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2009.2034397
- [35] OKAMOTO, Y., Y. ANDO, K. HATAYA, et al. Improved Power Performance for a Recessed-Gate AlGa_N-Ga_N Heterojunction FET With a Field-Modulating Plate. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques [online]. 2004, 52(11), 2536-2540 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0018-9480. Dostupné z: doi:10.1109/TMTT.2004.837159
- [36] ZENG, F., J. AN, G. ZHOU, W. LI, H. WANG, T. DUAN, L. JIANG a H. YU. A Comprehensive Review of Recent Progress on GaN High Electron Mobility Transistors: Devices, Fabrication and Reliability. Electronics [online]. 2018, 7(12) [cit. 2023-05-17]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: doi:10.3390/electronics7120377
- [37] TREW, R. J. SiC and GaN transistors - is there one winner for microwave power applications?. Proceedings of the IEEE [online]. 2002, 90(6), 1032-1047 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2002.1021568
- [38] MOUFFOKI, F., D. BOUGUENNA, F. Z. DAHOU, A. BELOUFA a S. A. LOAN. Performance evaluation of electrical properties of GaN MOS-HEMTs based biosensors for rapid detection of viruses. Materials Today Communications [online]. 2022, 33 [cit. 2023-05-17]. ISSN 23524928. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtcomm.2022.104726
- [39] WEN, X., S. GUPTA, T. R. NICHOLSON, S. C. LEE a W. LU. AlGa_N/Ga_N HFET biosensors working at subthreshold regime for sensitivity enhancement. Physica status solidi c [online]. 2011, 8(7-8), 2489-2491 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1862-6351. Dostupné z: doi:10.1002/pssc.201001174

LITERATURA

- [40] LEE, C.-T. a Y.-S. CHIU. Photoelectrochemical passivated ZnO-based nanorod structured glucose biosensors using gate-recessed AlGa_N/Ga_N ion-sensitive field-effect-transistors. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2015, 210, 756-761 [cit. 2023-05-17]. ISSN 09254005. Dostupné z: doi:10.1016/j.snb.2015.01.042
- [41] DICKINSON, R. G. a L. PAULING. THE CRYSTAL STRUCTURE OF MOLYBDENITE. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1923, 45(6), 1466-1471 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja01659a020
- [42] GEIM, A. K. Graphene prehistory. *Physica Scripta* [online]. 2012, T146 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0031-8949. Dostupné z: doi:10.1088/0031-8949/2012/T146/014003
- [43] MIRÓ, P., M. AUDIFFRED a T. HEINE. An atlas of two-dimensional materials. *Chem. Soc. Rev* [online]. 2014, 43(18), 6537-6554 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0306-0012. Dostupné z: doi:10.1039/C4CS00102H
- [44] GRIGORENKO, A. N., M. POLINI a K. S. NOVOSELOV. Graphene plasmonics. *Nature Photonics* [online]. 2012, 6(11), 749-758 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1749-4885. Dostupné z: doi:10.1038/nphoton.2012.262
- [45] CHUNG, C., Y.-K. KIM, D. SHIN, S.-R. RYOO, B. H. HONG a D.-H. MIN. Biomedical Applications of Graphene and Graphene Oxide. *Accounts of Chemical Research* [online]. 2013, 46(10), 2211-2224 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0001-4842. Dostupné z: doi:10.1021/ar300159f
- [46] AL BALUSHI, Z. Y., K. WANG, R. K. GHOSH, et al. Two-dimensional gallium nitride realized via graphene encapsulation. *Nature Materials* [online]. 2016, 15(11), 1166-1171 [cit. 2023-05-17]. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat4742
- [47] ZHANG, G., L. CHEN, L. WANG, et al. Subnanometer-thick 2D Ga_N film with a large bandgap synthesized by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2022, 10(8), 4053-4059 [cit. 2023-05-17]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/D1TA10450K
- [48] CHEN, Y., K. LIU, J. LIU, et al. Growth of 2D Ga_N Single Crystals on Liquid Metals. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2018, 140(48), 16392-16395 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/jacs.8b08351
- [49] MANIŠ, J., J. MACH, M. BARTOŠÍK, et al. Low temperature 2D Ga_N growth on Si(111) 7 × 7 assisted by hyperthermal nitrogen ions. *Nanoscale Advances* [online]. 2022, 4(17), 3549-3556 [cit. 2023-05-17]. ISSN 2516-0230. Dostupné z: doi:10.1039/D2NA00175F
- [50] ZHAO, H., E. LI, Z. CUI, C. LIU, Y. SHEN, P. SHEN a D. MA. Two-dimensional Ga_N nanosheets realized via hydrothermal reaction and ammoniation two-step method. *Vacuum* [online]. 2022, 203 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2022.111329

- [51] MACH, J., J. PIASTEK, J. MANIŠ, et al. Low temperature selective growth of GaN single crystals on pre-patterned Si substrates. *Applied Surface Science* [online]. 2019, 497 [cit. 2023-05-17]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2019.143705
- [52] SURYANARAYANA, C. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. *Jom* [online]. 2000, vol. 52, no. 6, s. 48. ISSN 10474838.
- [53] KIRSCHNER, J., H. ENGELHARD a D. HARTUNG. An evaporation source for ion beam assisted deposition in ultrahigh vacuum. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2002, 73(11), 3853-3860 [cit. 2023-05-17]. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.1511791

Seznam použitých zkratek a symbolů

LED	Light-Emitting Diode
HVPE	Hydride Vapor Phase Epitaxy (epitaxní růst z hydridů v plynné fázi)
MBE	Molecular Beam Epitaxy (epitaxe z molekulárních svazků)
UHV	Ultra-High Vacuum (ultravysoké vakuum)
RHEED	Reflection High Energy Electron Diffraction (difrakce elektronů s vysokou energií na odraz)
NFM	Na-Flux Method (metoda růstu pomocí sodíku)
LD	Laser Diode (laserová dioda)
HFET	Heterostructure Field-Effect Transistor (heterostrukturní tranzistor řízený elektrickým polem)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (tranzistor řízený elektrickým polem s kovovou řídicí elektrodou)
FET	Field-Effect Transistor (tranzistor řízený elektrickým polem)
MEEG	Migration Enhanced Epitaxial Growth (migrací podmíněný epitaxní růst)
HAADF-STEM	High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscope
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze pomocí organokovových prekurzorů)
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (plazmou posílená chemická depozice z plynné fáze)
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy (fotoelektronová spektroskopie)
VERIOS	High resolution Scanning Electron Microscope FEI Verios 460L
ICON-SPM	Scanning Probe Microscope Bruker Dimension Icon
CEITEC	Central European Institute of Technology
SEM	Scanning Electron Microscopy (rastrovací elektronová mikroskopie)
AFM	Atomic Force Microscopy (mikroskopie atomárních sil)
α	úhel dopadu iontového svazku
λ	střední volná dráha
k_b	Boltzmannova konstanta
T	teplota
p	tlak

D	průměr částic ve svazku
k	konstanta lineární závislosti
I	elektrický proud
E	energie