



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

PŘÍPRAVA ULTRATENKÝCH VRSTEV SIN

PREPARATION OF SIN ULTRATHIN FLIMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN DVOŘÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JINDŘICH MACH, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Dvořák

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)

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:

Příprava ultratenkých vrstev SiN

v anglickém jazyce:

Preparation of SiN ultrathin films

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem bakalářské práce bude realizace přípravy tenkých a ultratenkých vrstev Si. Studentem bude sestavena a kalibrována efuzní cela poskytující atomární svazky Si o termální energii. Během práce se student seznámí s problematikou přípravy tenkých vrstev v podmínkách UHV. Budou studovány možnosti přípravy SiN vrstev užitím dusíkových iontů o nízké energii. Vrstvy budou připravovány zejména s ohledem pro přípravu SiN nanomembrán.

Cíle bakalářské práce:

V rámci práce bude provedena rešeršní studie ultratenkých vrstev SiN. Během práce budou navrženy a realizovány úpravy UHV vakuové komory určené pro přípravu Si, Ge nanovláken. Dále bude realizována a testována efuzní cela pro depozici Si. Práce bude směřovaná k přípravě ultra tenkých vrstev SiN s využitím nízko energetických iontových svazků $E < 100$ eV.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na realizaci, testování a kalibrování efuzní cely poskytující atomární svazky Si o termální energii (0,1 - 1 eV). Tyto svazky jsou užity k přípravě ultratenkých vrstev Si a SiN. Je zpracována rešeršní studie dosavadních poznatků o nitridu křemíku a jeho aplikaci v polovodičovém průmyslu. Dále byly provedeny první experimenty s depozicemi ultratenkých vrstev Si a SiN. Tyto vrstvy byly analyzovány metodami rentgenová fotoelektronová spektroskopie (XPS) a mikroskopie atomárních sil (AFM).

Klíčová slova

SiN, růst ultratenkých vrstev, efuzní cely, UHV, MBE

Abstrakt anglicky

This bachelor's thesis deals with design, testing and calibration of an effusion cell generating silicon atomic beam having thermal energy (0,1 - 1 eV). These beams are used for the preparation of Si and SiN ultrathin films. Silicon nitride and its applications in semiconductor industry are reviewed. First experiments with deposition of ultrathin films of Si and SiN are described. These layers have been analyzed by x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and atomic force microscopy (AFM).

Keywords

SiN, growth ultra thin layers, effusion cell, UHV, MBE

DVOŘÁK, M. *Příprava ultratenkých vrstev SiN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jindřich Mach, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením
Ing. Jindřicha Macha, Ph.D., a s použitím uvedených informačních zdrojů.

Martin Dvořák

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jindřichovi Machovi, Ph.D. za předané zkušenosti, cenné rady a postřehy při práci v laboratoři. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za důvěru a podporu při studiu.

Martin Dvořák

Obsah

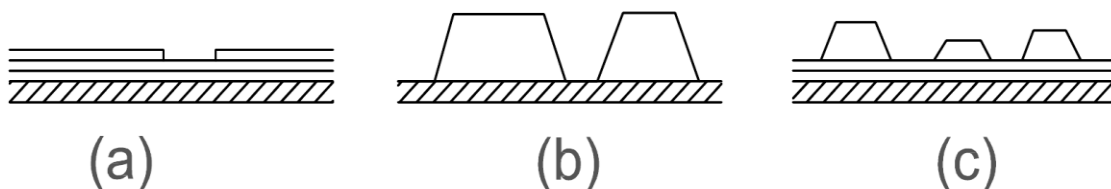
1. Růst tenkých a ultratenkých vrstev Si a SiN.....	11
1.1 Vlastnosti a aplikace Si, SiN tenkých vrstev.....	12
2. Efuzní cely poskytující atomární svazky Si.....	17
2.1 Princip a funkce efuzní cely.....	17
2.2 Detekce atomárních a iontových svazků.....	18
2.3 Realizace efuzní cely poskytující atomární svazky Si.....	20
3. Testování efuzní cely v experimentální aparatuře.....	23
3.1 Testovací komora.....	23
3.2 Těsnost a odplyňování efuzní cely.....	23
3.3 První depozice Si.....	24
3.4 Analýza vzorku pomocí XPS.....	25
3.5 Návrh na úpravu testovací komory.....	27
4. Depozice Si a SiN.....	29
4.1 Určení polohy a profilu atomárního svazku Si.....	29
4.2 Kalibrace rychlosti růstu Si vrstev.....	30
4.3 Růst ultratenkých vrstev SiN.....	31
4.4 Příprava ultratenkých vrstev SiN postnitridací povrchu Si (111) 7x7.....	32
5. Závěr.....	37
6. Literatura.....	39
7. Seznam zkratk a symbolů.....	41
8. Přílohy.....	43

1. Růst tenkých a ultratenkých vrstev Si a SiN

Růst vrstev a leptání jsou dvě nejdůležitější techniky modifikace povrchu. Jedná se o základní nástroje pro výrobu integrovaných obvodů, čipů a solárních článků. V této práci se budeme zabývat pouze růstem vrstev Si.

Při růstu tenkých vrstev rozlišujeme dva základní typy růstu, homoepitaxi a heteroepitaxi. V případě homoepitaxe má růstová vrstva stejnou strukturu mřížky a atomové rozměry jako substrát. Typickým příkladem může být růst Si na Si substrát. Naproti tomu u heteroepitaxe probíhá růst na chemicky odlišných vrstvách, kde žádná nemá stejnou strukturu jako substrát. Příkladem je germanium a křemík s mřížkovými konstantami 5,658 Å a 5,43 Å. Kvůli odlišným mřížkovým parametřům a chemickým vazbám mezi dvěma materiály vznikají jevy, které musíme pochopit a umět kontrolovat, pokud chceme získat vícevrstvou strukturu požadovaných vlastností. [1]

Růst vrstev můžeme rozdělit do tří základních módů dle formování stabilní fáze ultratenké vrstvy. První růstový mód se nazývá růst vrstvy po vrstvě, neboli Frank van de Merwův (obr. 1a). V tomto módu jsou deponované atomy silněji vázány k substrátu než samy mezi sebou. V případě, že deponované atomy jsou více přitahovány vzájemně mezi sebou než k substrátu, dochází k ostrůvkovému růstu, jinak nazývanému Volmerův-Weberův růst (obr. 1b). V případě rovnosti vazebných sil vzniká třetí mód růstu vrstvy, jenž je kombinací předchozích dvou módů. Jedná se o růst vrstva plus ostrůvky, jinak nazývaný Stranskiho-Krastanův mód (obr. 1c). Schematické znázornění všech tří módů je na obr. 1. [2]



Obr. 1: Růstové módy: (a) růst vrstva po vrstvě; (b) ostrůvkový růst; (c) růst vrstva plus ostrůvky.

Nejčastěji pozorovaným módem růstu je Stranskiho-Krastanův mód (obr. 1c). Tento růstový mód je někdy doprovázen jevem, kdy jsou pozorovány malé ostrůvky, které mohou tvořit pravidelné struktury. Tato samovolná formace ostrůvku reprezentuje jeden ze způsobů samouspořádacích procesů pro tvorbu kvantových teček. [1]

Existují i možnosti přechodu mezi jednotlivými růstovými módy v průběhu růstu. Aby se těmto změnám dalo předcházet je nutno znát následující parametry:

- Relativní síly při absorbat-absorbat a absorbat-substrát interakcích.
- Poměr mřížkových konstant substrátu a materiálu růstové vrstvy.
- Teplotu substrátu a povrchovou energii.
- Množství nadeponovaného materiálu a kritickou tloušťku vrstvy (tloušťka, při které vrstva buď popraská, nebo se náhle přejde do rovnovážné vrstvy) [1].

1.1 Vlastnosti a aplikace Si, SiN tenkých vrstev

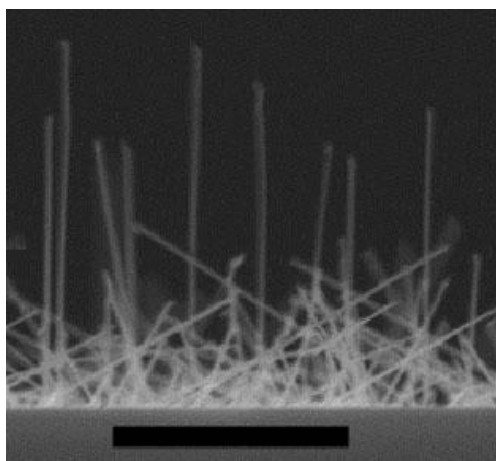
V této části se budu zabývat vlastnostmi, přípravou a použitím tenkých vrstev křemíku a nitridu křemíku v oblasti nanotechnologií a polovodičového průmyslu.

Křemík (lat. *Silicium*) je polovodičový prvek s atomovým číslem 14 a značkou Si. Zároveň patří i do skupiny polokovů. Křemík je druhým nejvíce se vyskytujícím prvkem na Zemi, avšak pouze vzácně ho lze nalézt v čisté formě. Většinou se vyskytuje ve sloučeninách (*silicite*) a oxidech (*silica*).

Křemík má spoustu uplatnění v průmyslu. Ve formách silikátů (kyslíkaté sloučeniny) a silicidů (sloučeniny s elektropozitivnějšími prvky, nejčastěji kovy) se používá pro výrobu skel, cementů a keramik. Ve své čisté formě tvoří základní součást dnešní polovodičové elektrotechniky (tranzistory, integrované obvody čipy). Elektrické vlastnosti křemíku jsou dnes dobře známy. Je to širokopásmový polovodič s nepřímým přechodem a velikostí zakázaného pásu $E_G = 1,12 \text{ eV}$.

V nanotechnologiích se křemík, mimo křemíkové desky, integrované obvody a čipy, převážně používá buď jako materiál pro výrobu nanovláken a nanodrátů, nebo pro růst kvantových teček.

Předpokládá se, že v budoucnu naleznou křemíková nanovlákna (NWs - *nanowires*) uplatnění v průmyslu. Od tranzistorů řízených polem (FET) a jiné nanoelektrokové součásti, přes chemické a biologické senzory až k solárním článkům. Téměř všechny Si nanodráty jsou v dnešní době vyráběny použitím zlatých kuliček jako katalyzátoru. Avšak zlato není vhodné pro použití v elektronice, proto se hledá jiný vhodný katalyzátor pro růst Si NWs. Vhodným prvkem se jeví platina. Má téměř stejné vlastnosti jako zlato a tvoří nanočástice se stejnou velikostní distribucí. Příklad nanodrátů je na obr. 2 z rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) [3].



Obr. 2: SEM fotografie křemíkových nanodrátů, měřítko je $1 \mu\text{m}$, převzato z [3].

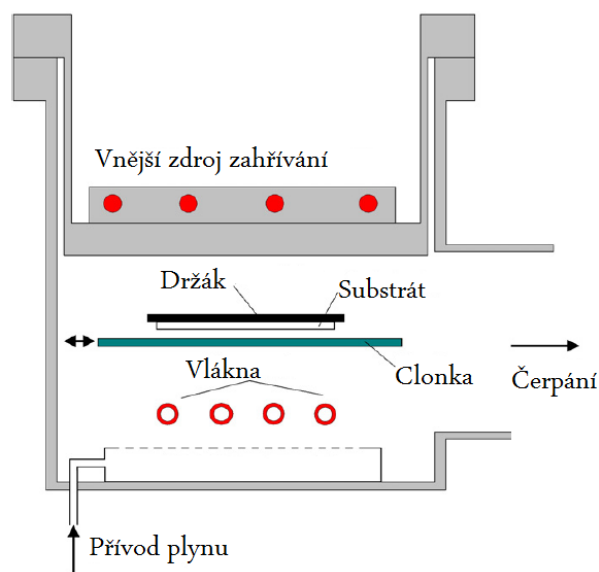
Další zajímavou oblastí pro výrobu nanostruktur je růst křemíku na křemíkovém substrátu. Depozice je prováděna metodou molekulární epitaxy (MBE - *Molecular beam epitaxy*). Zatím jsou známy dvě pravidelná uspořádání Si nanostruktur, obě jsou dosaženy samsopřádávacími procesy v průběhu Si homoepitaxy. Jedna distribuce

odpovídá růstu na Si (001) 2x1 povrchu, v tomto případě se tvoří 3D ostrůvky ve tvaru pyramid. Druhý typ růstu probíhá na povrchu Si (111) 7x7. Tady se tvoří útvary ve tvaru trojúhelníků až stovky nanometrů velké a desítky nanometrů vysoké [4].

Nitrid křemíku (Si_3N_4) je považován za „materiál budoucnosti“ především pro vysokoteplotní aplikace, pro svou velkou tvrdost při zvýšené teplotě, odolnost proti náhlým teplotním změnám a odolnost proti oxidaci. Hlavně kvůli teplotní stabilitě a chemicky inertnímu chování se SiN vrstvy používají jako hradlové dielektrikum (nebo izolační a pasivační nebo antireflexní vrstvy) při výrobě integrovaných obvodů a solárních článků.

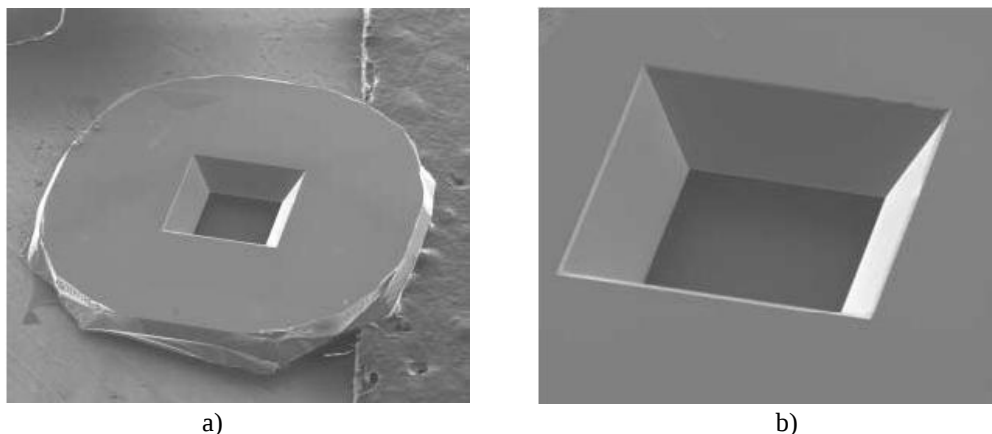
Jeden ze způsobů přípravy nitridu křemíku (Si_3N_4) je pomocí tzv. perhydropolysilazanů (PHPS). PHPS obsahují pouze prvky křemíku, dusíku a vodíku. Hořením se pak PHPS změní na bezuhlíkatý nitrid křemíku. [5].

Jiný způsob výroby spočívá v technologii „Hot Wire“ CVD (HWCVD), která se liší od jiných metod hlavně vyšší rychlostí depozice. Schéma HWCVD je na obr. 2. Při depozici je do komory napouštěna směs silanu a amoniaku (SiH_4/NH_3). Silan slouží jako zdroj křemíku a amoniak jako zdroj dusíku, vodík se z komory vyčerpá. Právě pomocí HWCVD byl vyvinut vlastní (*intrinsic*) protokrystalický křemík (proto-Si:H). Struktura protokrystalického křemíku deponovaná při specifických podmínkách představuje vývoj od amorfni k mikrokystalické fázi a obsahuje amorfni fázi s oblastmi uspořádanými na krátkou vzdálenost. Proto-Si:H má zajímavé vlastnosti pro fotovoltaický průmysl. Tento materiál pohlcuje téměř celou intenzitu krátkovlnného záření a dlouhé vlnové délky propouští. Tato část spektra pak může být pohlcena amorfni křemíkem. Kombinací proto-Si:H a amorfni křemíku pak lze dostat solární články efektivně využívající celé viditelné sluneční spektrum. Aplikace proto-Si:H se proto předpokládá při výrobě nových solárních článků nebo pokrytí stávajících novou vrstvou právě protokrystalickým křemíkem [6].



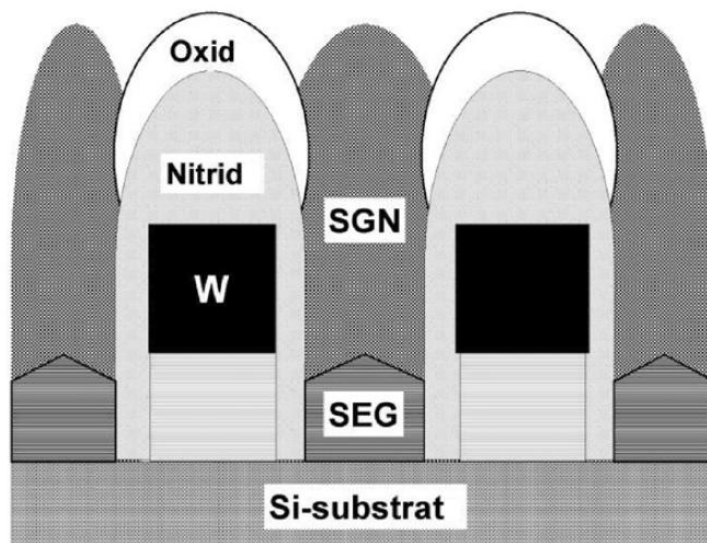
Obr. 3: Schéma experimentální aparatury HWCVD, převzato z [6].

Další důležitou aplikací Si_3N_4 je produkce nanomembrán z nitridu křemíku. Jeden ze způsobů výroby spočívá v plazmou iniciované depozici z plynné fáze (PECVD) s následním plazmovým leptáním přes fotorezist do požadovaného tvaru a hloubky [11]. Nanomembrány pro použití v transmisních elektronových mikroskopech (TEM) jsou komerčně dostupné. Příklady takových nanomembrán jsou na obr. 4a), 4b) [7].



Obr. 4: a), b) Nanomembrány z nitridu křemíku, velikost okna 0,75 mm, tloušťka křemíku 200 μm , tloušťka SiN membrány 100 nm, převzato z [7].

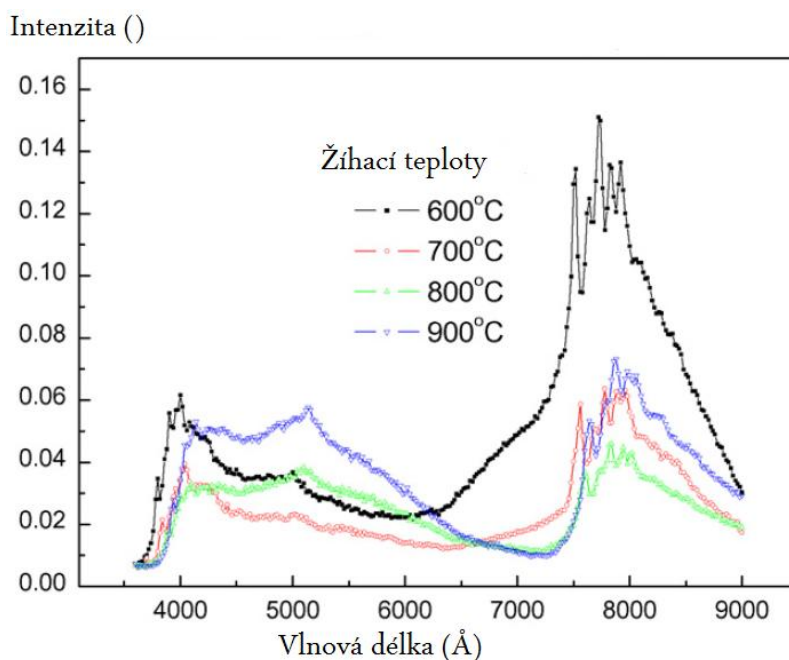
Další zajímavou vlastností křemíku je selektivní růst křemíku na nitridové vrstvě (rozdílná nukleace na oxidovém a nitridovém povrchu). Tento fakt se používá pro vyplňování kontaktních mezer ve vysokohustotních ULSI (*ultra-large-scale integration*) zařízeních (například paměti DRAM) pro zajištění požadovaných elektrických vlastností. Nejdříve se na povrchu provede čištění pomocí plazmy, čímž se také zvětší počet nukleačních míst na nitridovém povrchu. Kombinací selektivního epitaxního růstu křemíku (SEG) a selektivního růstu křemíku na nitridu (SGN) dojde k vyplnění prázdných míst (voidů). Schéma procesu je na obr. 5 [8].



Obr. 5: Schéma struktury růstu SEG a SGN, převzato z [8].

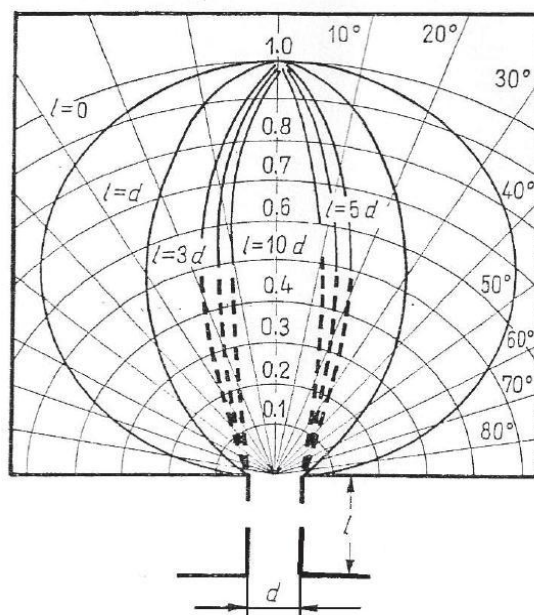
Nitrid křemíku (SiN) vyrobený metodou PECVD je široce používán ve fotovoltaickém průmyslu jako antireflexní vrstva. Navíc po přidání vodíku do SiN vrstvy v solárním článku dojde k efektivní pasivaci povrchu. Někdy se ovšem vyskytuje na takovémto povrchu efekt nazývaný blistering (puchýřovatění). Ze studie vyplynulo, že tento fenomén je ovlivněn přípravou povrchu ještě před depozicí. Proto se hledal způsob jak tento jev bez nežádoucích důsledků, co nejvíce potlačit. Pozitivní výsledky přinesla povrchová úprava pomocí plazmové amoniakové aktivace, která dokázala eliminovat blistering efekt a přitom nijak nezměnit parametry a životnost solárních článků [9].

SiN tvoří i nanokrystalické struktury. Křemík na substrátu nitridu křemíku připravený metodou PECVD a následně žíhaný v UHV v teplotním rozmezí 600 °C až 900 °C, vykazuje fotoluminiscenci při teplotě 11 K v důsledku fonon-exciton interakcí. Závislost intenzity fotoluminiscence na vlnové délce je zobrazena na obr. 6. Byl zjištěn vliv velikosti krystalu křemíku na posunu energie jednotlivých píků. Čím menší krystal tím vyšší energie luminiscence. Tato metoda dokáže potvrdit existenci křemíkových nanostruktur nezávisle na TEM a difrakčních metodách [10].



Obr. 6: Spektrum fotoluminiscence křemíku při teplotě 11 K žíhaného za různých teplot, převzato z [10].

Vrstva SiN může sloužit i jako substrát pro výrobu vysoce kvalitního krystalického galium nitridu (GaN). Růst GaN na křemíkovém substrátu je obtížný, převážně z důvodu různé mřížkové konstanty a rozdílného koeficientu teplotní roztažnosti. Při nanesení SiN tenké vrstvy na křemíkový substrát jsou tyto rozdíly potlačeny. SiN vrstva slouží nejen jako růstová iniciační vrstva, ale brání i difuzi křemíku a kyslíku do rostoucí vrstvy GaN. Navíc SiN potlačuje žlutou luminiscenci v GaN, která je nežádoucí pro využití v optoelektronických součástech [11].



Obr. 8: Kosinová distribuce svazku v závislosti na poměru l/d , převzato z [12].

Stále však musíme dbát na podmínku efuze (1), nyní rozšířenou o podmínku pro délku kolimátoru l :

$$l \leq \lambda_A . \quad (2)$$

Je jasné, že prodlužováním kolimátoru v rámci podmínky (2) získáváme fokusovanější svazek, avšak za cenu snižující se množství vystupujících částic. Proto je vhodné najít ideální kompromis pro daný experiment.

2.2 Detekce atomárních a iontových svazků

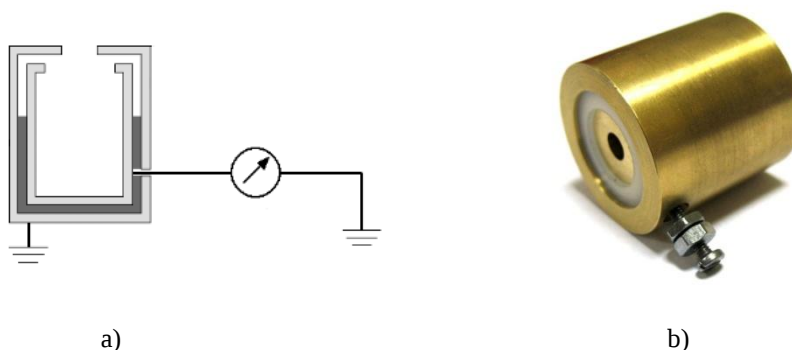
Pro práci s atomárními svazky je často nutné znát jejich profil, charakter částic (ionty nebo neutrály) a případně jejich energii. K těmto účelům slouží různé detektory částic, založené na různých principech.

Krystalový měřič (*quartz crystal microbalances*)

Krystalový měřič měří přírůstek hmotnosti na jednotku plochy v důsledku změny rezonanční frekvence křemenného rezonátoru. Tento rezonátor je pomocí piezoejektu rozkmitán na svou vlastní frekvenci. Pokud na krystalový měřič dopadne částice, změní se hmotnost rezonátoru a tím se změní i rezonanční frekvence. Tímto způsobem lze rozlišit přírůstky až do hmotnosti 10^{-8} g. Kvůli přesnosti se tato metoda používá v UHV prostředí [13].

Faradayova sonda (*Faraday cup*)

Faradayova sonda slouží pro detekci nabitých částic (iontů nebo elektronů) ve vakuu. Sonda se skládá ze vstupního otvoru, za kterým následuje sběrná elektroda. Schéma a fotografie Faradayovi sondy jsou na obr. 9a), 9b). Vzniklý proud mezi stěnou elektrody a zemí se detekuje například pikoampérmetrem. Sonda je dvouplášťová, obě vrstvy od sebe musí být elektricky odizolovány. Pro zvýšení přesnosti jsou některé sondy vybaveny decelerační elektrodou, která zabraňuje úniku částic z komory a umožňuje určení energie částic.



Obr. 9: a) Schematická konstrukce Faradayovy sondy, b) Faradayova sonda převzato z [14].

Hmotnostní spektrometr (*Mass spectrometer*)

Hmotnostní spektrometr dokáže detekovat a určit chemické složení nabitých svazků částic. Základem této metody je skutečnost, že nabitě částice v elektrickém poli zakřivují své trajektorie. Hmotnostní spektrometr je proto navržena tak, že na prolétávající ionty působí kolmá elektrická síla. Tato síla určuje trajektorie iontů v závislosti na jejich hmotnosti. Různě hmotné částice dopadnou v analyzátoru na různá místa. V místech dopadu částic jsou umístěny detektory částic, které udávají velikost proudového signálu pro každou hmotnost. Pak jestliže známe hmotnost částic, není problém určit, o jaký prvek se jedná [13].

Terčik pro měření proudu na cm^2

V depoziční komoře na Ústavu Fyzikálního inženýrství v Brně je k dispozici Faradayova sonda, připevněná na manipulátoru. Avšak některé svazky z iontových zdrojů v komoře proudí do Faradayovy sondy pod ostrým úhlem a tím detekovaný proud neodpovídá realitě. Proto byl na manipulátor připevněn vodivý plíšek o rozměrech $1 \times 1 \text{ cm}$ a napojen přes průchodku k pikoampérmetru.

2.3 Realizace efuzní cely poskytující atomární svazky Si

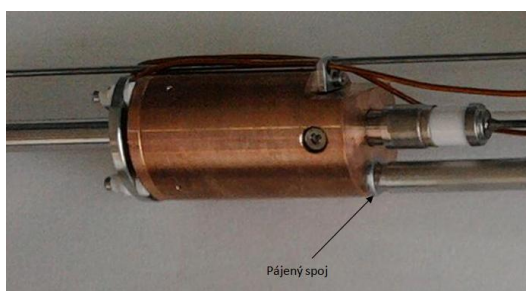
Zásady při sestavování zařízení pracující v UHV:

- Všechny použité součásti musí být nemagnetické, v případě opaku by to mohlo vést k ovlivnění iontových nebo elektronových částic (svazků).
- Kaptonové vodiče musí být voleny s ohledem na jejich užití, ty které vedou vysoký proud (žhavení vlákna) musí mít větší průměr, než vysokonapěťové (fluxmetr, napětí na kalíšku).
- Je nutno dodržovat vysokou čistotu jednotlivých dílů.

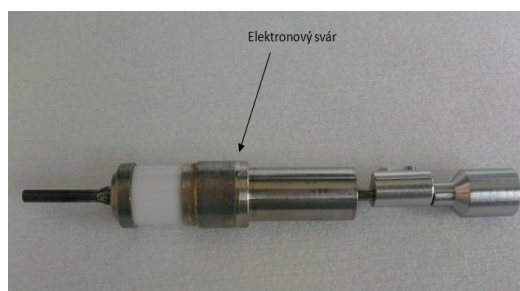
Jednotlivé součásti efuzní cely byly dle zadání vyrobeny firmou Vakuum Praha spol. s.r.o. [15]. K výrobě byla užita výkresová dokumentace z bakalářské práce Ondřeje Křápka [16]. Po vyhotovení všech dílů byla sestavena efuzní cela. Nejprve bylo nutno provést dodatečné nerozebíratelné spoje. Tyto spoje byly vyhotoveny na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně. Jako první spoj bylo provedeno vakuové pájení niklem mezi chladičem a přívodem vodního chlazení (obr. 10a)).

Vakuové pájení se používá ke spojení dvojice různých materiálů. Pájení probíhá v několika krocích: 1) nanese se vrstva pájky na místo sváru, 2) pak se celý obrobek vloží do vakuové pece, kde se zahřeje na vysoké teploty závislé dle materiálu pájky po dobu několika desítek minut, 3) poté se nechá pomalu vychladit. Důležité je vybrat vhodný materiál pro pájku, nejlépe tak, aby pájka smáčela oba povrchy pájených materiálů. Hlavní výhodou tohoto procesu je, že svár při vysokých teplotách nepraská.

Dále byl vyhotoven svár elektronovým svařováním mezi vedením a elektrodou kalíšku (obr. 10b)). Svařování elektronovým svazkem je jedním z tavných způsobů svařování provádějících se v podmínkách vysokého vakua, který využívá pro ohřev spojovaných materiálů fokusovaný svazek elektronů s vysokou energií. Při dopadu se kinetická energie elektronů přemění v teplo, které je využito k ohřevu svařovaných součástí. Svařování probíhá zpravidla bez přídavného materiálu. Díky tzv. hloubkovému efektu lze, v závislosti na parametrech svářečky, svařovat značné tloušťky materiálu na jeden průchod – přes 10 cm v nerez oceli [17].



a)

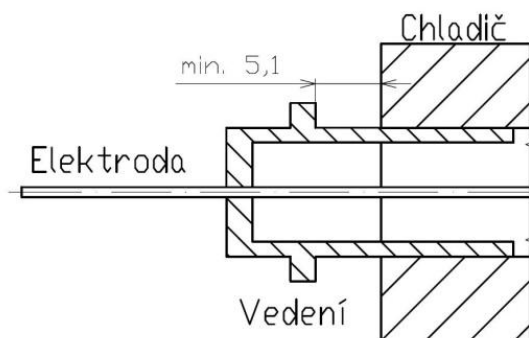


b)

Obr. 10: a) Pájený spoj mezi tělem chladiče a chladicím vedením, b) svár elektronovým svazkem mezi elektrodou a vedením kalíšku.

Wolframové vlákno, pokryté thoriem pro zvýšení emisivity, bylo přivařeno bodovým svarem na elektrické průchodky, které jsou přivedeny z čela zdroje. Tyto průchodky byly realizovány nerezovými šrouby, které byly odizolovány keramikou

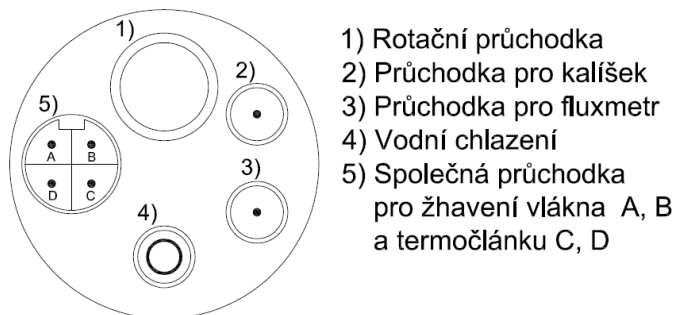
od těla chladiče. Do molybdenového kalíšku byla vložena vložka z pyrolytického nitridu bóru (PBN). PBN je neporézní, elektricky izolační, chemicky inertní keramický materiál s vysokou tepelnou vodivostí a odolností proti teplotním změnám. Kalíšek byl poté připojen pomocí spojky k průchodce. Byla určena maximální hloubku zasunutí kalíšku (tzn. minimální vzdálenost hrany vedení kalíšku od chladiče, obr. 11). Vzdálenost kalíšku od žhavicího vlákna rozhoduje o počtu elektronů dopadajících na kalíšek a tím i o rychlosti depozice. Minimum je stanoveno na $d_{\min} = 5,1$ mm.



Obr. 11: Schéma uložení vedení kalíšku (vyznačeno maximální zasunutí vedení kalíšku).

Poté bylo připojeno víčko chladiče spolu s kolimátorem k tělu chladiče. Kolimátor byl odizolován od chladiče keramikou z důvodu jeho funkce jako sběrná elektroda (fluxmetr). Otočná clonka byla umístěna ve vzdálenosti 5 mm od konce kolimátoru, a přes závitovou tyč byla spojena s rotační průchodkou. Následně byl připojen termočlánek, který měří teplotu chladiče.

Elektrické vedení bylo realizováno pomocí vodičů izolovaných kaptonem. Kapton je tepelně stabilní polyamid, který se v podmínkách UHV používá pro izolaci, protože nezhoršuje tlak, tzn. neplynní. Žhavení a termočlánek byly připojeny ke společné průchodce se čtyřmi elektrodami. Podle technické dokumentace elektrody A, B odpovídají žhavení a C, D termočlánek (obr. 12).



Obr. 12: Schéma zapojení průchodek při čelním pohledu na efuzní cele.

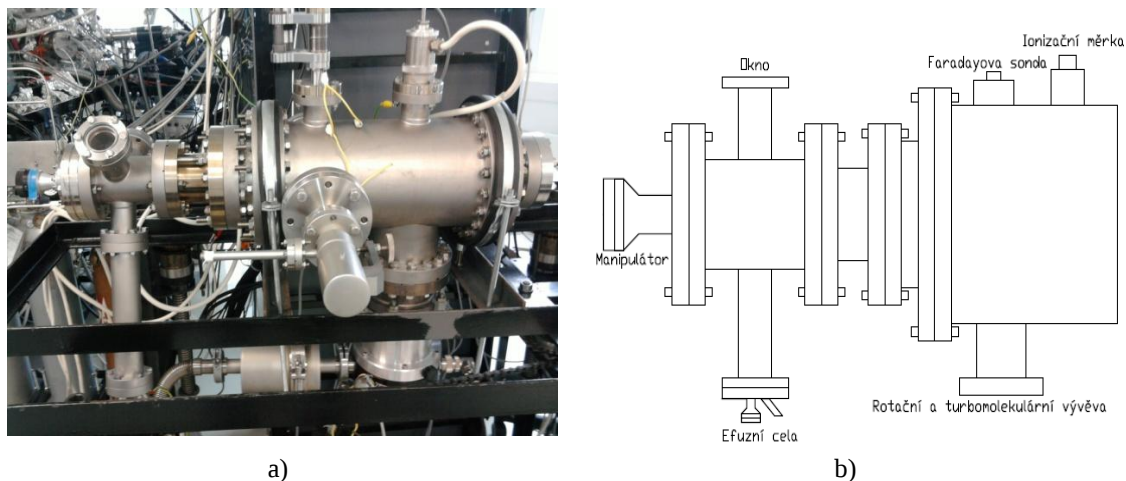
Kalíšek byl připojen přes SHV průchodku, která může nést maximální napětí 5kV. Posledním krokem bylo vložení kousků křemíku jako materiálu do kalíšku. Tímto byla efuzní cela poskytující atomární svazky Si sestavena (obr. 13). Přešlo se k testování.



Obr. 13: Fotografie sestavené efuzní cely poskytující atomární svazky křemíku.

3. Testování v experimentální aparatuře

Sestavená efuzní cela byla umístěna do experimentální aparatury (obr. 14a)) do pozice, ve které nehrozí vysypání, případně vytečení materiálu v kalíšku, tzn. do polohy svislé. Schéma této aparatury je na obr. 14b).



Obr. 14: a) Fotografie testovací aparatury, b) schéma testovací aparatury.

3.1 Testovací komora

Testovací aparatura (obr. 14a) se skládá z hlavní HV (*high vacuum*) depoziční komory, ve které jsou umístěny tři příruby: pro okno, pro efuzní celu a pro elektrické průchodky. Celá soustava je čerpána soustavou rotační a turbomolekulární vývěvy, základní tlak dosahuje hodnoty řádově 10^{-5} Pa. Navazuje další část komory, ve které je umístěna vakuová ionizační měrka a Faradayova sonda pro detekci svazků částic. Experimentální soustava není vybavena zakládací komorou, proto při každé výměně vzorku je nutné aparaturu napustit atmosférou. Do komory se zakládá přes manipulátor, na kterém je upevněn držák vzorku. Držákem vzorku lze otáčet v ose aparatury v rozsahu úhlu 360° . Testovací komora se využívá pro testování nových efuzní cel nebo iontových zdrojů, slouží k růstu nanovláken nebo testování vysokofrekvenčního plazmatického atomárního zdroje. K testovací komoře je proto v plánu přidat další tři příruby pro druhou efuzní celu, přívod plynu a okno (viz kap. 3.5).

3.2 Těsnost a odplyňování efuzní cely

Testování těsnosti všech spojů efuzní cely proběhlo v testovací komoře popsané v kapitole 3.1. Kontrolní jednotka turbomolekulární vývěvy nenahlásila chybu, což znamená, že v čerpaném systému se po složení nenacházejí žádné větší netěsnosti. Malé netěsnosti by bylo nutno hledat pomocí detekce hélia nebo izopropylalkoholu.

Například He se nechá proudit kolem komory a uvnitř aparatury lze detekovat přítomnost částic plynu. Tím se určí místo netěsnosti.

Odplynování vlákna probíhá bez chlazení. Vláknem bylo žhaveno pomalým zvyšováním proudu až na hodnotu $I_F = 2,3 \text{ A}$ a zároveň byl sledován tlak nepřesáhl $p > 10^{-3} \text{ Pa}$. Na této hodnotě proudu se pak nechá efuzní cela odplynovat 30 až 60 minut, až teplota měděného masivu vzroste na $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Pak se pomalu klesá s proudem na nulu a necháme celou zchladnout. Pomalý pokles žhavicího proudu pomáhá ke zvýšení životnosti vlákna.

Mohlo se přejít k první depozici.

3.3 První depozice Si

Po odplynění efuzní cely byla provedena první testovací depozice. Důvodem bylo nutno zjistit, zda efuzní cela správně plní svoji funkci a poskytuje atomární svazky křemíku. Nejprve je však vhodné kousky křemíku v kalíšku roztavit, tak aby se vytvořil spojitý útvar, který pak bude dávat konstantní proud atomů. Do experimentální komory byl vložen vzorek germania. Při otevřené clonce a vhodném natočení sloužil jako zrcadlo a tudíž bylo možno přímo pozorovat děje v kalíšku.

Tavení a následná depozice probíhaly následujícím postupem. Bylo spuštěno chlazení, nastaveno napětí na kalíšku na hodnotu $U = 800 \text{ V}$ a pomalu se začalo najíždět proudem na vlákně. Jelikož s křemíkovým materiálem a jeho deponováním v laboratoři na Ústavu Fyzikální inženýrství v Brně nebyly doposud žádné zkušenosti, nebyl znám přesný výkon k roztavení křemíku a následné depozice. Proto se výkon postupně zvedal a sledovaly se změny deponovaného materiálu. Celkový výkon, který ohřívá kalíšek, se vypočte ze vztahu:

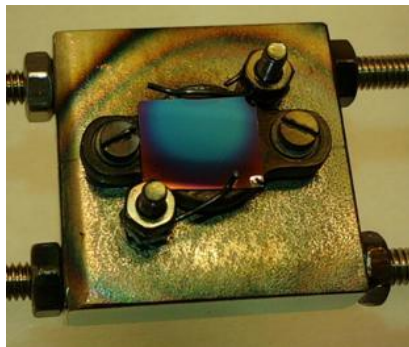
$$P = U \cdot I_E \quad (3)$$

Testované emisní proudy I_E byly 20 mA, 24 mA, 30 mA, 32 mA, 35 mA; stále bez výrazného nárůstu na straně proudu iontů (fluxu). Takto se pokračovalo se zvyšováním emisního proudu až na hodnotu 50 mA. Při této hodnotě flux dosáhl hodnoty 111 nA, což je s porovnáním k Ag nebo Au efuzní cele vysoká hodnota. Křemík v kalíšku však stále nebyl roztaven.

Pro dosažení vyššího výkonu ohřevu kalíšku při zachování vhodného žhacení vlákna byl potenciál na kalíšku zvýšen na hodnotu $U = 1000 \text{ V}$. Flux dosáhl hodnoty 259 nA, avšak křemík od pohledu stále nebyl roztaven. Emisní proud byl nastaven na hodnotu 60 mA. Při těchto hodnotách nastal zlom, když flux náhle vyskočil na $20,5 \mu\text{A}$. Tato hodnota se jevila vysoká, proto se okamžitě kleslo s emisí na hodnotu 52 mA při fluxu $11,9 \mu\text{A}$, avšak po pěti minutách klesl flux samovolně na $7,3 \mu\text{A}$ (pokles lze vysvětlit pomocí desorpce nečistot, které nebyly odstraněny odplyněním). Tato hodnota se už dala považovat za ustálenou. Bylo pozorováno, že křemík se roztavil. Vzorek byl nastaven kolmo vůči atomárnímu svazku Si a byla zahájena první depozice.

Substrátem byl povrch Si pokrytý tlustou vrstvou HfO_2 . Parametry první depozice: proud vláknem $I_F = 2,38 \text{ A}$, napětí na kališku $U = 1000 \text{ V}$, emisní proud $I_E = 52 \text{ mA}$, proud iontů (flux) $I_{\text{FLUX}} = 500 \text{ nA}$, doba depozice $t = 20 \text{ min}$.

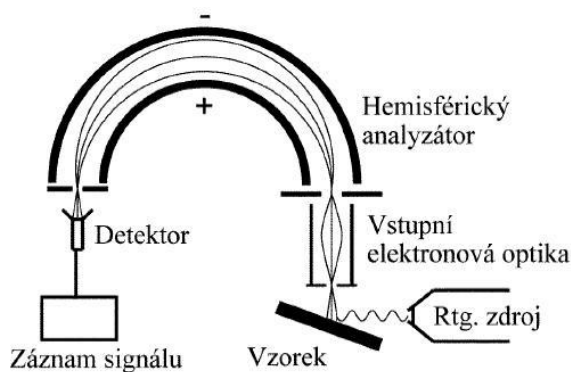
Vzorek byl vytáhnut z komory a už pouhým okem byla viditelná silná nadeponovaná vrstva křemíku (obr. 15).



Obr. 15: Fotografie držáku vzorku se substrátem HfO_2 a vzniklé Si vrstvy po první depozici.

3.4 Analýza pomocí XPS

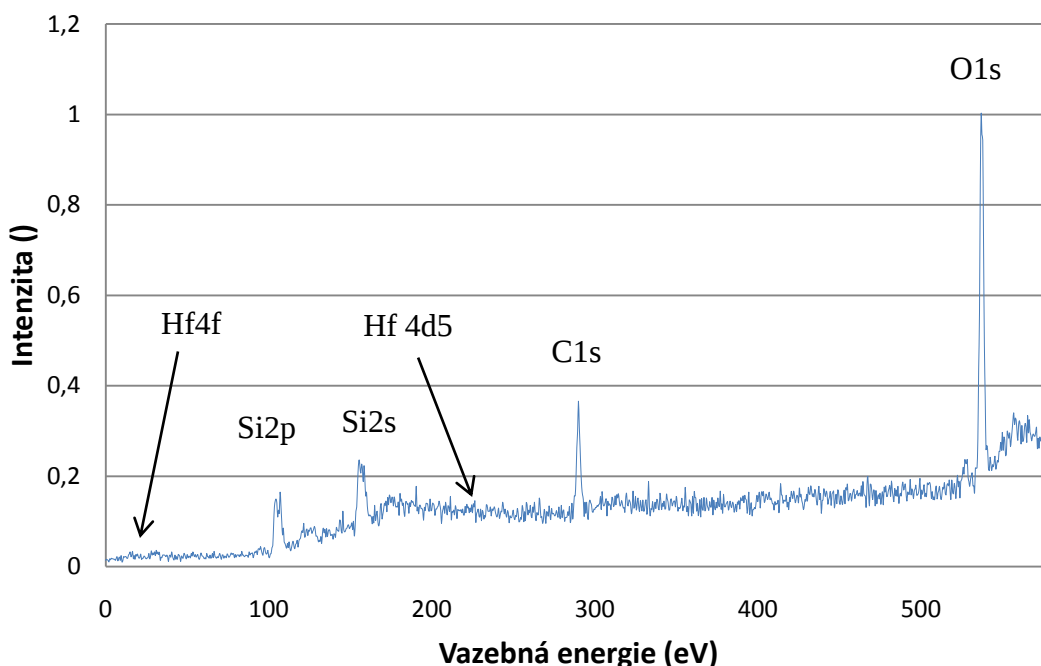
Připravený vzorek byl měřen pomocí XPS (*X-ray photoelectron spectroscopy*) sloužícího k analýze povrchu. Aparatura XPS se skládá ze zdroje rentgenového záření, hemisférického analyzátoru a detektoru (viz. obr. 16). Rentgenovské fotony, vyletující ze zdroje, dopadají na vzorek, odkud vlivem interakce záření s povrchem jsou emitovány fotoelektrony, které pak prolétávají hemisférickým analyzátozem. V analyzátoru můžeme měnit elektrické pole, to znamená, můžeme vybrat elektrony s danou energií, které proletí až do detektoru. Tak lze získat spektrum počtu prošlých elektronů na energii, které je typické pro každý prvek.



Obr. 16: Schéma XPS, převzato z [18].

Z principu metody je jasné, že celá měřicí soustava musí být umístěna v UHV prostředí, protože je nutné, aby střední volná dráha částice byla co největší. Kdybychom tuto podmínku nedodrželi, vzájemné srážky by ovlivnily energii detekovaných elektronů a měření by vykazovalo velké chyby.

Na vzorku HfO_2 s nadeponovanou vrstvou křemíku bylo provedeno XPS měření přehledového spektra (obr. 17).



Obr. 17: Přehledové spektrum vzorku hafnia HfO_2 s nadeponovanou vrstvou křemíku.

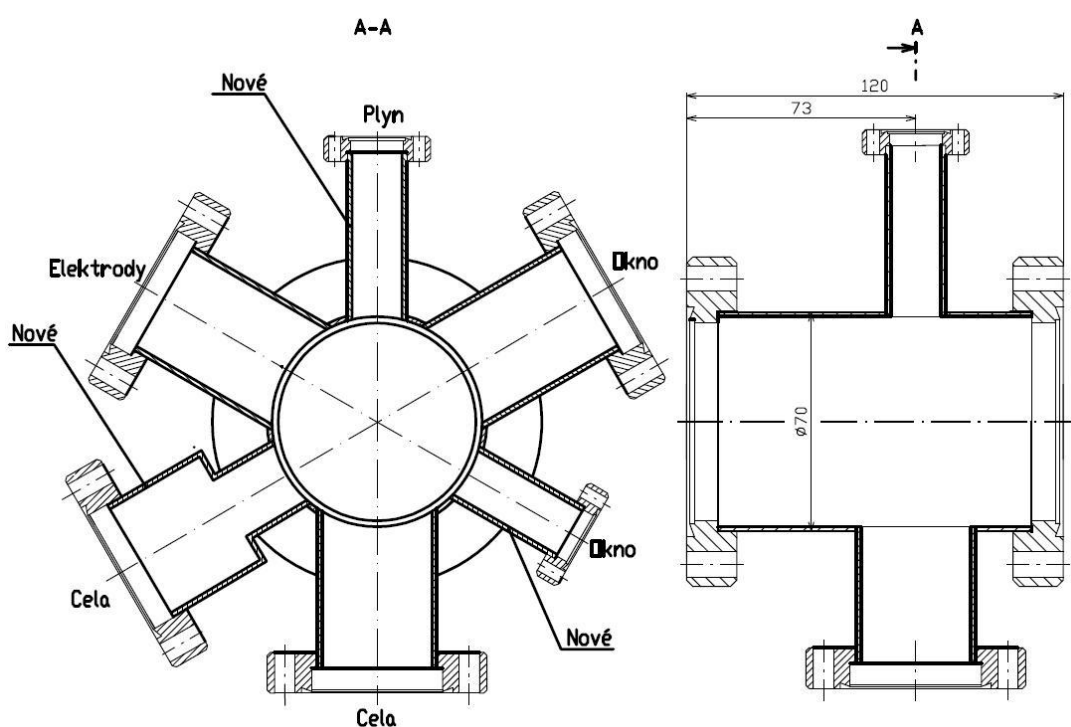
Ve spektru můžeme vidět píky kyslíku O1s, uhlíku C1s a křemíku Si2s a Si2p. Výrazně vyšší intenzity kyslíku a uhlíku jsou způsobeny vystavením vzorku na vzduch při přesunu z testovací komory do měřicí aparatury. Dále lze pozorovat oba hlavní píky křemíku Si2s a Si2p, jejichž slabší intenzita je pravděpodobně způsobena oxidem křemíku. Pík materiálu substrátu hafnia, není na spektru pozorovatelný. Vysvětlit to můžeme silnou vrstvou křemíku, která překryla signál ze substrátu.

Závěrem lze shrnout, že se podařilo nadeponovat silnou vrstvu Si. Pro ověření funkce efuzní cely je tato skutečnost dostačující.

3.5 Návrh úpravy testovací komory

V rámci bakalářské práce byla navrhována úprava testovací komory a vypracována výkresová dokumentace.

Testovací komora (obr. 14, v 3. kapitole) se nyní skládá ze tří hlavních přírub: příruby pro efuzní cel, okno a elektrody. Testovací komora se využívá pro testování nových efuzní cel, slouží k růstu nanovláken nebo k experimentům s vysokofrekvenčními výboji plazmatu. Jelikož počet a nároky experimentů přibývají, je nutno rozšiřovat i množství přírub. V tomto případě byl proveden návrh na přidání dalších tří přírub: pro druhou efuzní cel, pro přívod plynu a pro další okno. Tyto úpravy povedou k rozšíření škály experimentů. Schéma depoziční části, kde se budou příruby přidávat je na obr. 18. V příloze lze nalézt výkresovou dokumentaci návrhu.

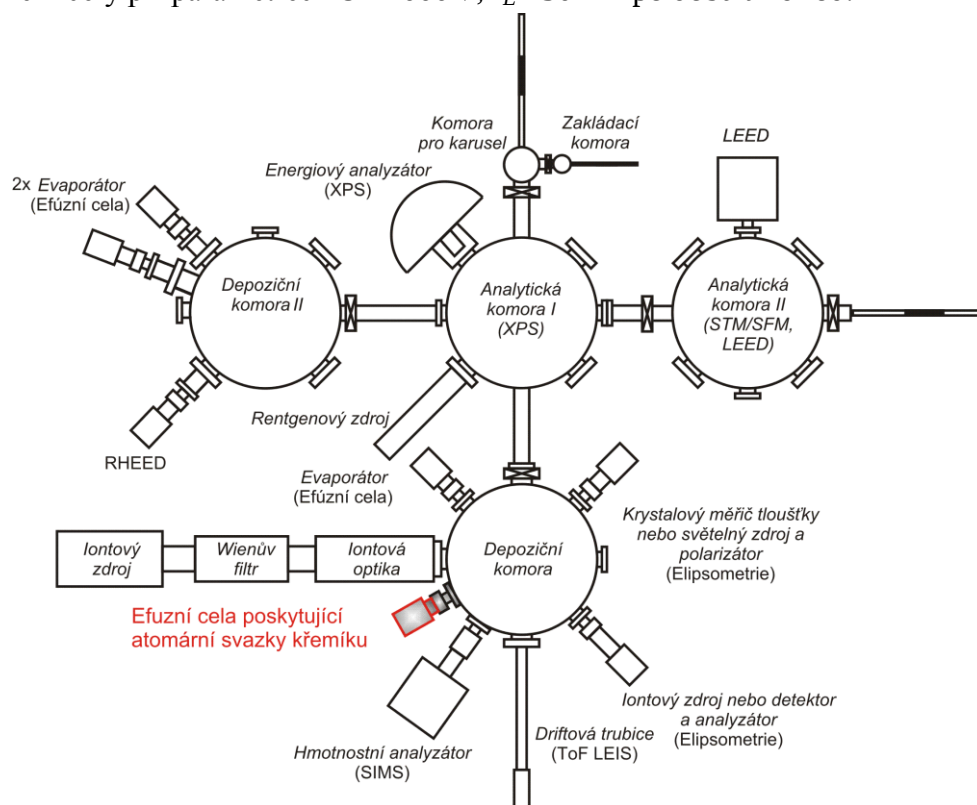


Obr. 18: Návrh úpravy experimentální komory.

4. Kalibrace efuzní cely

Po úspěšném testování efuzní cely poskytující atomární svazky Si (kap. 3.) byla efuzní cela přesunuta do depoziční UHV komory, systému pro MBE (*molecular beam epitaxy*) tenkých a ultratenkých vrstev. Schéma celého komplexu v laboratoři na Ústavu Fyzikální inženýrství v Brně je na obr. 19.

Provedlo se odplynění vlákna proudem $I_F = 2\text{ A}$ po dobu $t = 90\text{ min}$ a následně odplynění cely při parametrech $U = 1000\text{ V}$, $I_E = 50\text{ mA}$ po dobu $t = 6\text{ hod.}$



Obr. 19: Uspořádání systému UHV komor v laboratoři na Ústavu Fyzikální inženýrství v Brně, s vyznačeným umístěním efuzní cely poskytující atomární svazky Si (zeleně).

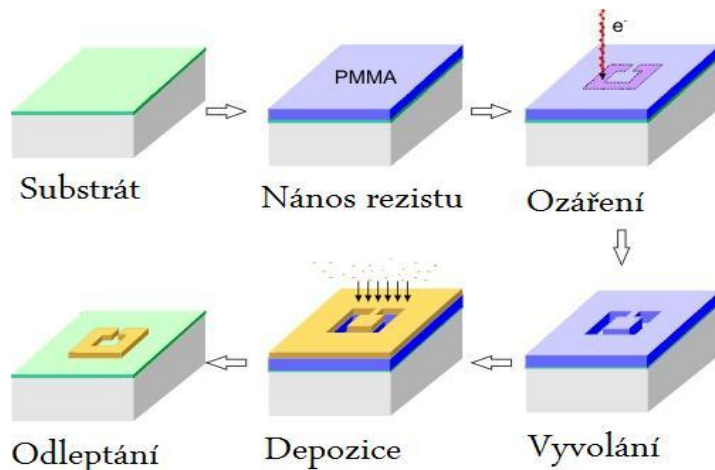
4.1 Určení polohy a profilu atomárního svazku Si

Tvar svazku je ovlivněn kolimátorem, který dává kruhovou stopu. Právě tuto stopu jsme se snažili nalézt. Z tohoto účelu byla provedena testovací depozice na substrátu HfO_2 , při parametrech depozice: $I_F = 2,02\text{ A}$; $U = 1000\text{ V}$; $I_E = 50\text{ mA}$; $I_{\text{FLUX}} = 550\text{ nA}$. Počáteční poloha manipulátoru: $z = 90\text{ mm}$, $x = 0\text{ }\mu\text{m}$; $\text{tilt} = 2,25\text{ }\mu\text{m}$; $\varphi = 160\text{--}180$.

Na vzorku byla po depozici pozorovatelná čtvrtkruhová stopa svazku pozorovatelná okem. Z předpokládaného tvaru svazku byla odhadnuta nová poloha manipulátoru: $z = 87\text{ mm}$, $x = 0\text{ }\mu\text{m}$; $\text{tilt} = 2,25\text{ }\mu\text{m}$; $\varphi = 150\text{--}180$, která se v následujících depozicích ukázala jako vhodná a použila se ve všech depozicích s efuzní celou Si.

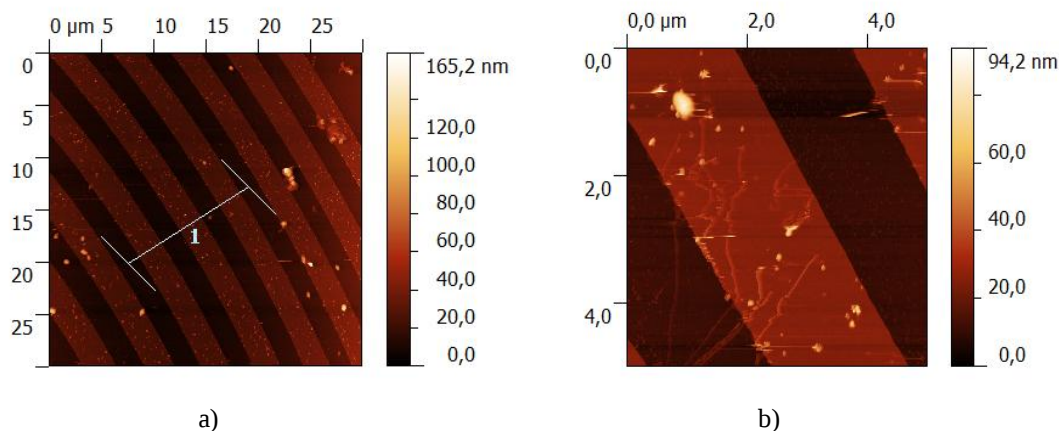
4.2 Kalibrace rychlosti růstu Si vrstev

Rychlost růstu se určovala pomocí křemíkového substrátu, na kterém byla nanесena vrstva polymethylmetakrylátu (PMMA). PMMA slouží jako pozitivní rezist a v této rezistové vrstvě jsou vyleptány soustavy čar. Vzorek byl vytvořen pomocí elektronové litografie na mikroskopy od firmy Tescan panem Mgr. Ostřížkem. Schéma přípravy vzorku až po vyvolání nadeponovaných struktur je zobrazeno na obr. 20.



Obr. 20: Schéma elektronové litografie včetně depozice a následného odleptání rezistu, převzato z [19].

Na tomto vzorku byla provedena depozice po dobu 90 minut s parametry: $I_F = 1,95 \text{ A}$; $U = 1000 \text{ V}$; $I_E = 50 \text{ mA}$; $I_{\text{FLUX}} = 400 \text{ nA}$. Poté byl vzorek leptán 14 hodin v acetonové lázni a pak vyčištěn v ultrazvuku, čímž byly odstraněny zbytky rezistové vrstvy PMMA a křemíku, který byl nadeponován mimo čárové struktury. Zbyly nám pouze křemíkové čáry, jejichž výška se změřila pomocí mikroskopu atomárních sil (AFM). Změřená morfologie vzniklého povrchu pomocí AFM je na obr. 21a), 21b). Z těchto obrázků byl pomocí programu „Gwyddion“ získán profil a statistickým výpočtem byla určena průměrná rychlost depozice hodnotou: $v = (9,8 \pm 0,7) \text{ nm} \cdot \text{hod}^{-1}$.



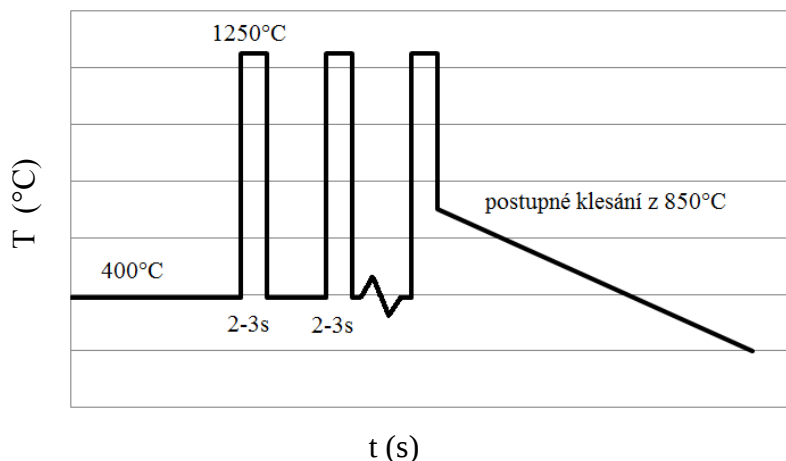
Obr. 21: a) Soustava křemíkových čar s vyznačeným profilem, b) křemíkové čáry – detail.

4.3 Růst ultratenkých vrstev SiN

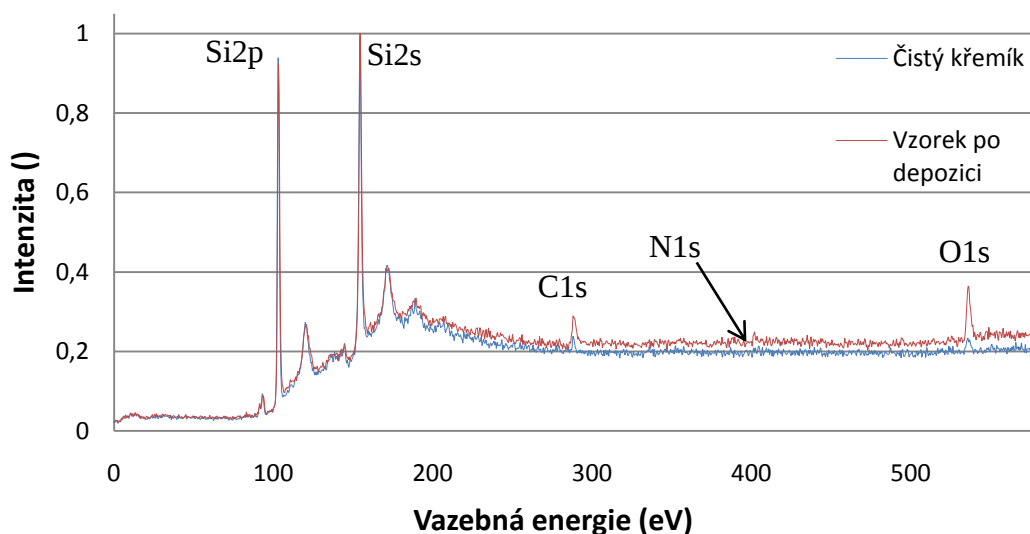
Depozice Si s molekulárním dusíkem za pokojové teploty

Po zjištění základních charakteristik efuzní cely byly zahájeny experimenty s depozicemi za přítomnosti dusíku molekulární N_2 . Základní tlak v komoře před napuštěním plynu byl $5 \cdot 10^{-8}$ Pa. Dusík byl do komory napouštěn přes jehlový ventil až do tlaku v komoře $2,3 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Použitý substrát byl Si (111) 7x7, s vodivostí 0,03 - 0,05 Ωcm , který byl 16 hodin žhán při teplotě 500 °C proudem 1,7 A a poté 30 minut flashován (z anglického *flashing*). Popis flashování je na obr. 22. Žhánění se provádí z důvodu odstranění naabsorbovaných nečistot z povrchu vzorku, flashováním se odstraní nativní oxid a uhlík ze substrátu. Teplota byla v obou případech kontrolována pomocí optického pyrometru. Výsledkem těchto procesů je čistý povrch křemíku. Pro zjištění čistoty povrchu bylo provedeno referenčním měření XPS.

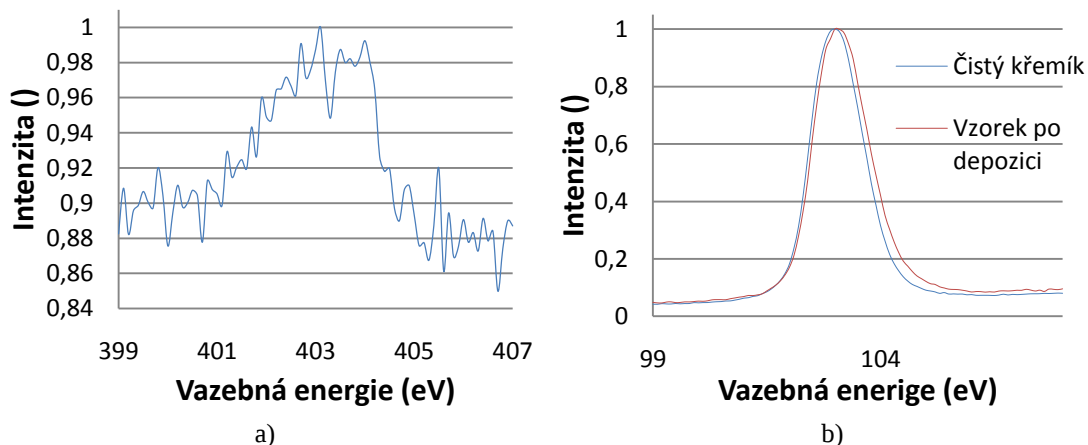


Obr. 22: Schematický popis flashování. Vzorek se každou minutu náhle žhaví proudem na teplotu přes 1200°C po dobu 2-3 sekundy, tento proces se opakuje po dobu 30-ti minut. Pro ukončení flashování se nastaví teplota 850°C a po dobu 9-ti minut se postupně klesá s proudem až na nulu.



Obr. 23: XPS přehledové spektrum čistého Si (111) 7x7 (modrá) a spektrum Si (111) 7x7 po depozici (červená).

Na první pohled lze říci, že obě spektra jsou skoro totožná. Liší se pouze v intenzitách píku kyslíku O1s a uhlíku C1s, způsobené nečistotami z komory, a píku dusíku N1s. Z detailu regionu dusíku (obr. 24a)) je pozorovatelný mírný nárůst intenzity píku. Nicméně nelze s jistotou určit, jestli se jedná o dusík chemicky vázaný na křemík. Na obr. 24b) je pozorovatelná změna Si2p píku, která mlže odpovídat vazbě Si-N nebo Si-O. Tuto skutečnost lze určit pomocí fitování zmíněného píku.

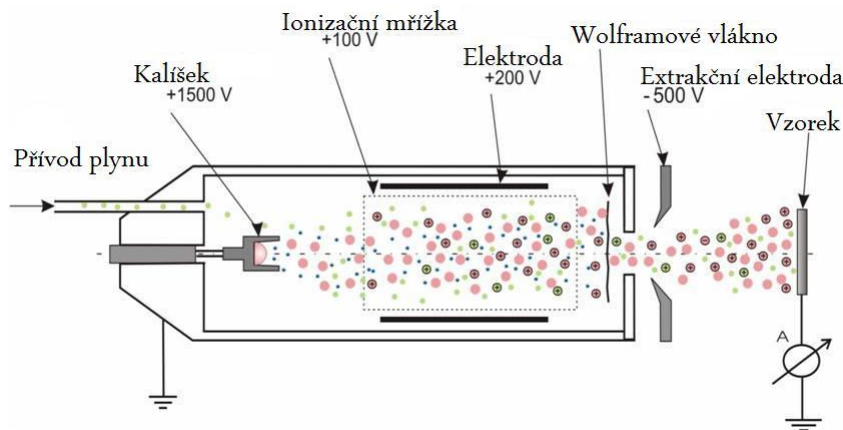


Obr. 24: a) XPS detail píku dusíku N1s po depozici, b) XPS detail píku křemíku Si2p s porovnáním před a po depozici.

4.4 Příprava ultratenkých vrstev SiN postnitridací povrchu Si (111) 7x7

Depozice SiN ionty dusíku za pokojové teploty

Další experiment pro zkoumání vzniku SiN vazby byla zvolena postnitridace nízkoenergiovými ionty dusíku N_2^+ (50 eV) za pokojové teploty. Zdrojem iontů byl iontově-atomární zdroj, který se používal pouze v iontovém režimu. Iontově-atomární zdroj je kombinací efuzní cely a elektron-srážkového iontového zdroje. Energie vzniklých iontů je dána rozdílem potenciálů mezi místem vzniku iontu a místem dopadu. Schéma iontově-atomárního zdroje je na obr. 25.

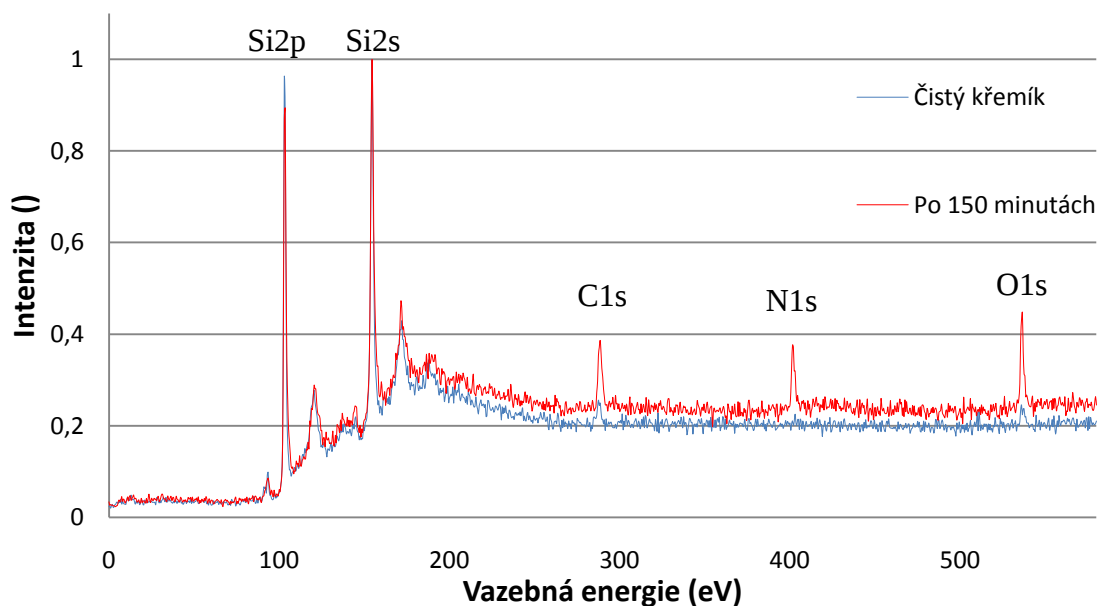


Obr. 25: Schéma iontově-atomárního zdroje, převzato z [2].

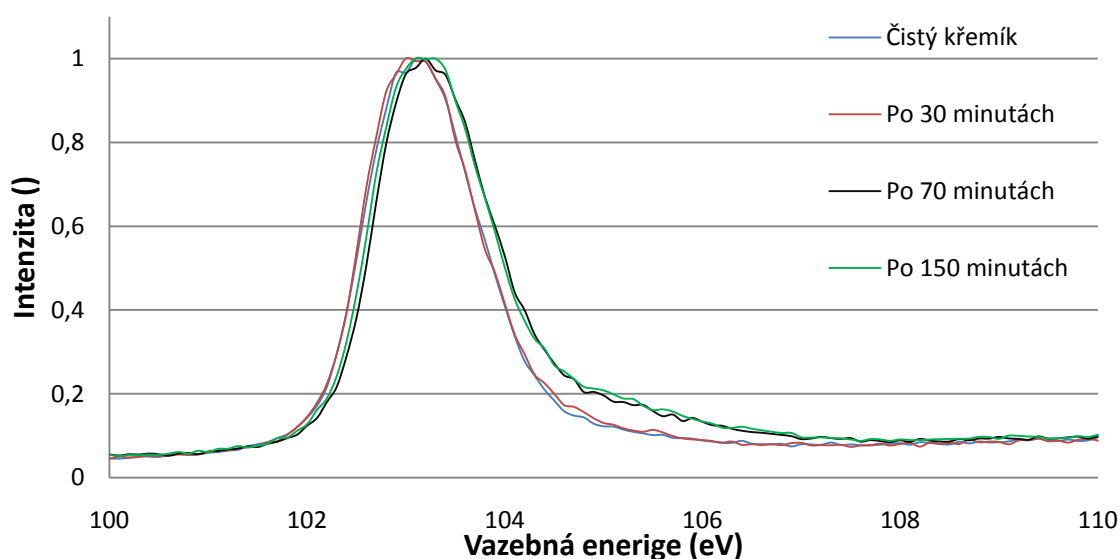
Jako substrát byl použit Si (111) 7x7, který byl získán procesem žíhání a flashování. Na iontově-atomárním zdroji a fokusačních čočkách (kolimátor, čočka a extrakce) byly nalezeny ideální parametry: proud vláknem $I_F = 5,8 \text{ A}$; plovoucí potenciál $U_Z = -50 \text{ V}$; napětí na mřížce $U_M = 50 \text{ V}$; napětí na kolimátoru $U_K = 305 \text{ V}$; napětí na čočce $U_C = 43 \text{ V}$; napětí na extrakční elektrodě $U_{EXT} = 220 \text{ V}$.

Poloha manipulátoru pro depozice s iontovým zdrojem byla vždy: $z = 90 \text{ mm}$, $x = 1 \mu\text{m}$; $tilt = 2,95 \mu\text{m}$; $\varphi = 220 - 260$. Tlak v komoře po napuštění dusíku do zdroje byl $4,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Bylo provedeno pět depozic na stejný vzorek. Po každé depozici bylo změřeno XPS pro sledování růstu dusíku, příp. nitridu křemíku. Získané XPS přehledové spektrum je na obr. 26, a detailní pohled na křemíkový pík Si2p je zobrazen na obr. 27.



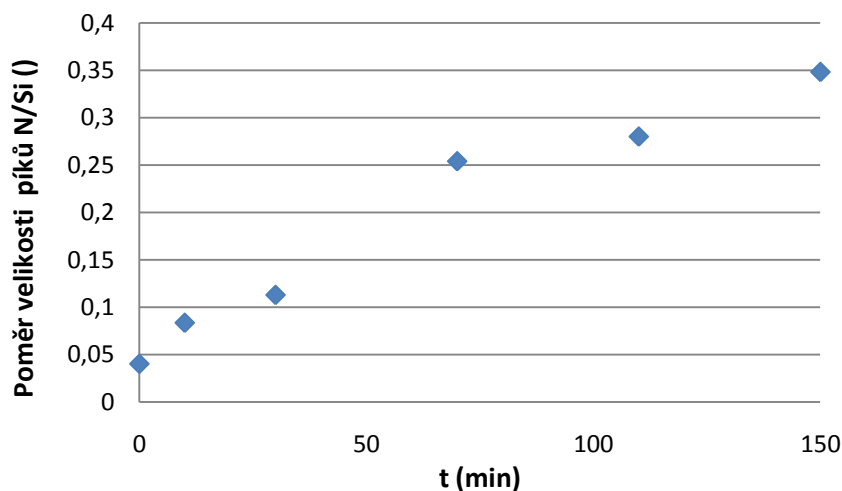
Obr. 26: XPS přehledové spektrum čistého křemíku (modrá) a po 150 minutách depozice (červená).



Obr. 27: Detail měření XPS křemíkového píku Si2p pro čistý křemík (modrá), po 30 minutách depozice (červená), po 70 minutách (černá) a po 150 minutách depozice (zelená).

Z přehledového spektra na obr. 26 lze pozorovat změny píku uhlíku C1s, dusíku N1s a kyslíku O1s. Nárůsty píku uhlíku a kyslíku jsou způsobeny nečistotami v komoře. Nárůst píku dusíku spolu se změnou píku křemíku Si2p může znamenat vznik vazby Si-N. Tuto skutečnost můžeme potvrdit změnou tvaru píku křemíku Si2p po nitridaci nízkoenergií ionty svazku (50 eV). Vývoj změny píku Si2p po postupné nitridaci je zobrazena na obr. 27.

Pro názornější zobrazení vývoje nárůstu intenzity dusíkového píku N1s, byla vynesena do grafu závislost poměru ploch píku dusíku a píku křemíku (obr. 28). Lze říci, že i po 150 minutách depozice intenzita píku dusíku ku píku křemíku lineárně vzrůstá. To naznačuje, že dusík stále interaguje s povrchem substrátu.



Obr. 28: Závislost poměru N/Si na čase depozice.

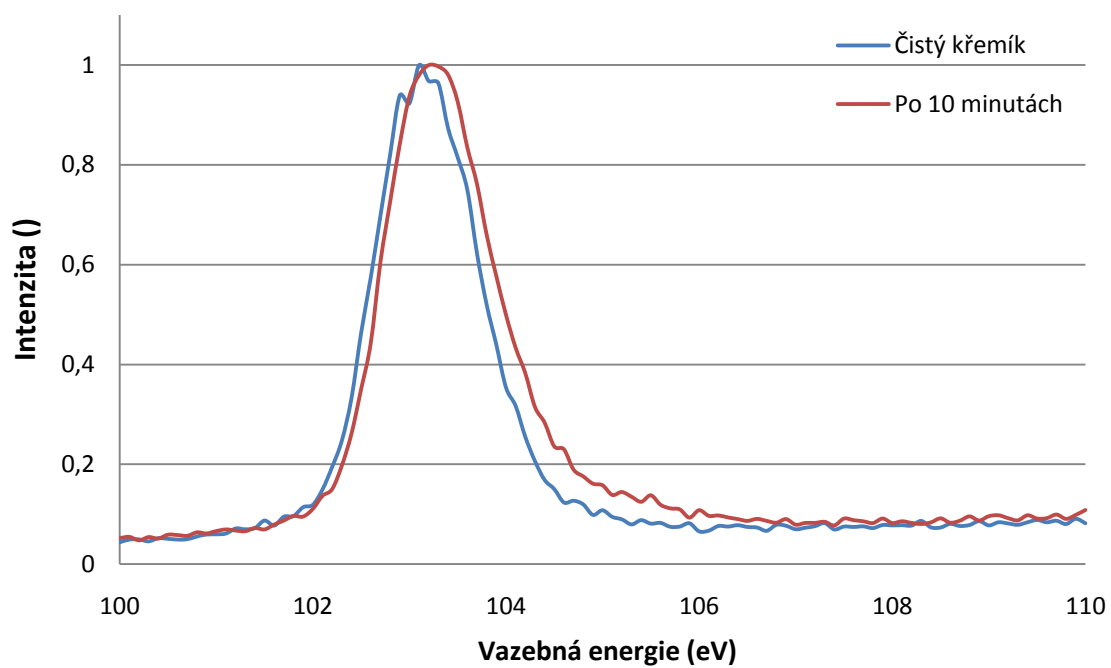
Depozice SiN ionty dusíku za teploty 200 °C

Dále byly provedeny experimenty s postnitridací za teploty 200 °C. Postnitridace za zvýšené teploty byla opět prováděna na žíhaném a flashovaném substrátu Si (111) 7x7. Teplota vzorku byla realizována průchodem proudu 0,8 A, což odpovídalo přibližně teplotě 200 °C.

Při postnitridaci byly použity následující parametry iontově-atomárního zdroje: $I_F = 5,8 \text{ A}$; $U_Z = -50 \text{ V}$; $U_M = 50 \text{ V}$; $U_K = 305 \text{ V}$; $U_C = 43 \text{ V}$; $U_{EXT} = 220 \text{ V}$. Tlak v komoře se ustálil na hodnotě $4 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Proběhla jedna depozice s délkou 10 minut. Změna křemíkového píku Si2p získaná pomocí měření XPS je zobrazena na obr. 29.

Už po pouze desíti minutách depozice při teplotě 200 °C je zřejmá změna píku křemíku Si2p, oproti předchozímu experimentu za pokojové teploty. Proto si myslíme, že vznikla vazba mezi křemíkem a dusíkem, která se projevila právě rychlejším nárůstem píku křemíku Si2p.

Další depozice nebyly provedeny z časových důvodů a kolize vzorku v komoře.



Obr. 29: Detaily píku křemíku Si2p pro případy před a po depozici.

5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium problematiky růstu tenkých a ultratenkých vrstev Si a SiN a sestavení, testování, kalibrace a depozice tenké vrstvy efuzní cely poskytující atomární svazky křemíku.

V první kapitole této práce jsou shrnuty poznatky o vlastnostech, přípravě a použití tenkých a ultratenkých vrstev Si a SiN v průmyslu. Křemík a nitrid křemíku mají uplatnění především v polovodičové technice a solárních článcích. Poslední dobou se dostávají do popředí díky svým nanomechanickým vlastnostech a pravděpodobného využití pro výrobu nanodráťů.

V druhé kapitole je popsán princip a funkce efuzní cely. Efuzní cely jsou primárním nástrojem pro MBE (*Molecular beam epitaxy*) a růst tenkých vrstev a multivrstev. Celý proces probíhá v podmínkách UHV. Dále jsou popsány některé metody pro detekci atomárních nebo iontových svazků. S těmito znalostmi byla sestavena efuzní cely poskytující atomové svazky křemíku o termální energii.

V třetí kapitole proběhlo testování efuzní cely a první zkušební depozice v testovací komoře. Hlavními kroky byla kontrola těsnosti všech spojů, odplynění efuzní cely a roztavení depozičního materiálu (křemíku). Po úspěšném testování proběhla první depozice Si na substrát HfO₂. Následnou analýzou vzorku pomocí XPS byla ověřena funkčnost efuzní cely. Dále byl proveden návrh na úpravu experimentální komory.

Čtvrtá kapitola se zabývá kalibrací efuzní cely a depozicemi SiN různými metodami. Byla nalezena poloha a tvar atomárního svazku Si. Dále byla zjištěna rychlost depozice z profilu nadeponované vrstvy křemíku na kalibrační strukturu hodnotou $v = (9,8 \pm 0,7) \text{ nm} \cdot \text{hod}^{-1}$. Proběhla depozice Si na Si substrát za přítomnosti molekulárního dusíku N₂. Další metoda přípravy SiN byla zkoušena postnitridace povrchu křemíku pomocí nízkoenergiových iontů dusíku (50 eV) z iontově-atomárního zdroje. Byla provedena depozice za pokojové teploty a poté i za zvýšené teploty substrátu při 200 °C.

Na Ústavu Fyzikálního inženýrství na VUT Brno doposud nebyly zkušenosti s depozicemi křemíku a tato nová efuzní cely poskytující atomární svazky bude jistě velkým přínosem. Zároveň se tímto ušetřily finanční prostředky, protože komerční efuzní cely nejsou zrovna levnou záležitostí. Cena komerčně vyráběných obdobných atomárních zdrojů se pohybuje kolem 800 000,-Kč. Cena námi vyrobené efuzní cely se odhaduje do částky 50 000,-Kč.

Práce na této bakalářské práci a hlavně v laboratoři byla časově náročná, avšak získané zkušenosti budou v budoucnu určitě využity, hlavně při růstu GaN nebo růstu nanovláken.

6. Literatura

- [1] Kurt W. Kolasinski: Surface Science: Foundations of Catalysis and Nanoscience - Second Edition. John Wiley and Sons Ltd, Great Britain, 2009, ISBN 978-0-470-03308-1
- [2] J. Mach, Disertační práce - Vývoj a aplikace UHV zařízení pro depozice tenkých vrstev, VUT Brno, FSI, Ústav fyzikálního inženýrství, (2009).
- [3] E.C. Garnett, W. Liang, P. Yang: Growth and Electrical Characteristics of Platinum-Nanoparticle-Catalyzed Silicon Nanowires. *Advanced Materials* 19 (2007) 2946-2950.
- [4] N. Galiana et al.: MBE fabrication of self-assembled Si and metal nanostructures on Si surfaces. *Surface Science* 600 (2006) 3956-3963.
- [5] S. T. Schwab, R.A. Page: Nanostucture of polymer-derived silicon nitride. *Materials Science and Engineering A204* (1995) 201-204.
- [6] R.E.I. Schropp et al.: Ultrafast deposition of silicon nitride and semiconductor silicon thin ilms by hot wire chemical vapor deposition. *Thin Solid Films* 517 (2009) 3039-3042.
- [7] SPI Supplies, [online] <http://www.2spi.com/catalog/grids/silicon-nitride.php>
- [8] W.-S. Cheong et al.: Selective silicon growth on nitride for silicon-plugging process in LPCVD. *Journal of Crystal Growth* 254 (2003) 329-335.
- [9] A. Hauser et al.: Influence of an amomonia activation prior to the PECVD SiN deposition on the solar cell performance. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 75 (2003) 357-362.
- [10] I.O. Parm, J. Yi: Exciton luminescence from silicon nanocrystals embedded in silicon nitride. *Materials Science and Engineering B* 134 (2006) 130-132.
- [11] J. Huang et al.: Comparison of GaN epitaxial films on silicon nitride buffer and Si (111). *Solid-State Electronics* 46 (2002) 1231-1234.
- [12] Vályi, Atom a Ion Source, Akadémiai Kiadó, Budapest, (1977).
- [13] H. Pauly, Atom, Molecule, and Cluster Beams I., Springe Berlin, (2000).
- [14] Wikipedia, [online] http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_cup
- [15] Vakuum Praha, spol. s. r. o., [online] <http://www.vakuum.cz/>
- [16] KŘÁPEK O. Návrh a konstrukce efuzní cely pro přípravu ultratenkých vrstev. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jindřich Mach, Ph.D..
- [17] Ústav přístrojové techniky AV ČR, [online] <http://ebt.isibrno.cz/Svarovani>

[18] P. M. A. Sherwood v knize Handbook of Surface Imaging and Visualisation, ed. by A.T. Hubbard, Bocaraton, London CRC Press, London 1995.

[19] Karlsruhe Institute of Technology, [online] <http://www.aph.kit.edu/wegener/?id=31>

7. Seznam zkratek a symbolů

E_G	velikost energie zakázaného pásu
λ_A	střední volná dráha
d	charakteristický rozměr otvoru
I_F	proud žhavicí vlákno
U	napětí na kalíšku
l	délka kolimátoru
$d_{\min}$	minimální délka zasunutí vedení kalíšku do chladiče
P	výkon
I_E	emisní proud
I_{FLUX}	proud iontů z efuzní cely
t	doba depozice
$z, x, \textit{tilt}, \varphi$	parametry pozice manipulátoru
v	rychlost depozice
U_Z	plovoucí potenciál
U_M	napětí na mřížce
U_K	napětí na kolimátoru
U_C	napětí na čočce
U_{EXT}	napětí na extrakční elektrodě
XPS	rentgenovská fotoelektronová spektroskopie
AFM	mikroskop atomárních sil
UHV	ultravysoké vakuum
HV	vysoké vakuum
MBE	epitaxe molekulárními svazky
NWs	nanodráty
FET	tranzistor řízený polem
SEM	skenovací elektronový mikroskop
PHPS	perhydropolysilazan (polymer)
HWCVD	„hot wire“ chemická depozice z plynné fáze
PECVD	plazmou iniciovaná chemická depozice z plynné fáze
TEM	transmisní elektronový mikroskop
ULSI	zkratka pro Ultra-Large Scale Integration
DRAM	druh počítačové paměti
SEG	selektivní epitaxní růst křemíku
SGN	selektivní růst křemíku na nitridu
PBN	pyrolitický nitrid bóru
SHV	typ vysokonapěťové průchodky do vakua
PMMA	polymetylmetakrylát (polymer)

8. Přílohy

Seznam součástí

Seznam vyrobených součástí ve firmě Vakuum Praha spol. s.r.o. [15].

- Svarek příruby s koaxiálním chlazením
- Chladič
- Žhavení – čelo chladiče
- Kolimátor
- Elektroda kalíšku
- Vedení kalíšku
- Clonka
- Vedení tyče

Chladič a žhavení jsou vyrobeny z čisté mědi 99,5 %, tzv. Free Oxygen Copper. Vše ostatní je z nerezové nemagnetické oceli.

Další součásti:

- průchodka pro napětí na kalíšku
- průchodka pro fluxmetr
- společná průchodka pro žhavení a termočlánek
- rotační průchodka
- molybdenový kalíšek
- PBN kalíšková vložka
- termočlánek typu J - FeKo
- žhavicí vlákno – WhTh 15, průměr 150 μm
- Swagelok chladicí šroubení
- závitová tyč
- kaptonové vodiče
- spojovací materiál – tj. čokoládky (svorkovnice), izolační keramika, měděná těsnění pro příruby DN16 a DN40, šrouby, matice a podložky

Seznam výkresové dokumentace

Výkres sestavy	BC-2011-SIN-01
Hrdlo okno (nové)	BC-2011-SIN-01-01
Hrdlo plyn (nové)	BC-2011-SIN-01-02
Hrdlo Si cela (nové)	BC-2011-SIN-01-03
Příruba DN16	BC-2011-SIN-01-04
Příruba DN40	BC-2011-SIN-01-05