

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**NÁVRH EFUZNÍ CELY PRO DEPOZICI ULTRATENKÝCH
VRSTEV SN A ZN**

DESIGN OF AN EFFUSION CELL FOR THE DEPOSITION OF SN AND ZN ULTRATHIN LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Horák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Stanislav Horák**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Jindřich Mach, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Návrh efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Sn a Zn

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sn a Zn jsou v současné době velmi studované materiály pro jejich široké uplatnění v polovodičovém průmyslu. Tyto materiály jsou vhodné pro tvorbu nízkodimenzionálních struktur (nanotrubky, nanosloupečky, nanotečky, ...). Jednou z možností přípravy takovýchto struktur je užití metody růstu depozice z pevné fáze, kdy je často při procesu růstu vyžadováno silné oxidační prostředí. Pro tyto účely je vhodné vyvinout zdroj atomů o nízké energii (0,1-1 eV) umožňující depozici těchto prvků v takovýchto podmínkách.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedení návrhu zdroje atomů umožňující depozici Sn, Zn materiálů v oxidačním prostředí a podmínkách ultravysokého vakua (UHV).
- 2) Student provede rešeršní studii přípravy Sn a Zn ultratenkých vrstev a jednodimenzionálních nanostruktur (nanotrubice,...).
- 3) Provedení testování a měření základních fyzikálních vlastností (teplotní charakteristiky, průměr svazku, intenzita svazku,) vyhotoveného zdroje atomů.

Seznam literatury:

H. Pauly, Atom, Molecule, and Cluster Beams I., Springer Berlin, (2000).

Valyi, Atom a Ion Source, Akademiai Kiado, Budapest, (1977).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a sestavením efuzních cel pro depozici ultratenkých vrstev zinku a cínu. V práci jsou úvodem vysvětleny principy funkce efuzních cel, jako je metoda molekulární svazkové epitaxe (MBE) a tvorba efuzního toku. Dále je uvedené shrnutí obecné konstrukce atomárních zdrojů a rešeršní studie o růstu ultratenkých vrstev a nanostruktur zinku, cínu a jejich sloučenin. V praktické části byl vytvořen dva návrhy efuzních cel s radiačním ohřevem z karbidu křemíku a ohřevem pomocí dopadu elektronu. Přílohou práce je kompletní výkresová dokumentace navržených efuzních cel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Atomární zdroj, efuzní cely, MBE, ultratenká vrstva, ZnO, nanotrubičky, SiC, CVD.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design and the construction of effusion cells for the deposition of zinc and tin ultrathin layers. In the introductory part there is an explanation of principles of effusion cells' functions, like a molecular beam epitaxy (MBE) or a construction of the effusion flow. Furthermore, the work describes a general principles of a creation of the atom sources. Theoretical part ends with review about the growth of ultrathin layers and nanostructures of zinc, tin and their compounds. Experimental part provides a design of the effusion cells with radiation heating from silicon carbide and heating by electrons impact. The complete drawing documentation of the designed effusion cells is included in the attachment.

KEYWORDS

Atom source, effusion cell, MBE, ultrathin layer, ZnO, nanotubes, SiC, CVD.

HORÁK, Stanislav *Návrh efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Sn a Zn*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2016. 56 s. Vedoucí práce Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh efuzní cely pro depozici ultra-tenkých vrstev Sn a Zn“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Jindřichu Machovi Ph.D., který měl se mnou trpělivost a uvedl mě do teorie atomárních zdrojů a tenkých povrchů. Můj velký dík patří také mé rodině, která mi vytvořila výborné zázemí pro studium a za to jsem jim neskonale vděčný. Dále bych chtěl poděkovat svým kolegům ze školy, kteří mě motivují a pomáhají k dosahování stále vyšších cílů. Jmenovitě bych rád poděkoval především panu Michału Grygovi a panu Vítu Hertlovi, bez nichž bych si nedokázal studium fyzikálního inženýrství představit. Také bych rád poděkoval své přítelkyni Monice Slovikové, která to se mnou neměla při psaní práce lehké. Mé díky by si zasloužili, také mnozí další, a ač tu nejsou jmenovitě, či konkrétně, tak moje poslední poslední poděkování je zde právě pro ně.

OBSAH

Úvod	1
1 Molekulární svazková epitaxe	3
1.1 Typy epitaxního růstu	3
1.2 Módy růstu a detekce vrstev	3
2 Teorie atomárních svazků	7
2.1 Tvorba efuzního toku	7
2.2 Usměrnění efuzního toku	9
3 Zdroje atomů o nízké energii	11
3.1 Popis efuzních cely	11
3.2 Napařování materiálu	12
4 Ultratenké vrstvy a nanostruktury zinku a cínu	15
4.1 Zinek	15
4.2 Oxid zinečnatý ZnO	16
4.3 Příprava nanostruktur a ultratenkých vrstev Zn, ZnO a jiných sloučenin zinku	16
4.3.1 Elektrolytický růst	16
4.3.2 Pulsní laserové depozice	17
4.3.3 Chemická depozice z plynné fáze	18
4.3.4 Depozice zinku a jeho sloučenin molekulární svazkovou epitaxí	19
4.4 Cín	24
4.5 Příprava ultratenkých vrstev Sn a jeho sloučenin	25
4.5.1 Depozice Sn a jeho sloučenin metodou CVD	25
4.5.2 Příprava ultratenkých vrstev metodou MBE	26
5 Návrh zdroje atomů zinku Zn	31
5.1 Požadavky na výrobu efuzních cel	31
5.2 Kalíšek	33
5.3 Ohřev	35
5.3.1 Tantal	35
5.3.2 Super Kanthal	35
5.3.3 Karbid křemíku	36
5.4 Měděný masiv s chlazením	39
5.5 Kolimátor	40
5.6 Příruba	40

5.7	Celková sestava efuzní cely	41
6	Návrh zdroje atomu cínu Sn	43
6.1	Ohřev	43
6.2	Kalíšek	43
6.3	Měděný masiv s chlazením	44
6.4	Kolimátor	44
6.5	Celková sestava	46
7	Závěr	47
	Seznam zdrojů	49
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55

ÚVOD

Efuzní cely, které jsou termálním typem atomárního zdroje, se v dnešní době vyskytují, jak ve vědecké, tak průmyslové oblasti. Jejich použití je zásadní pro nanášení ultratenkých vrstev atomů či molekul nebo pro tvorbu nanostruktur.

První použití atomárních svazků, se datuje počátkům 20. století [1]. Atomární zdroje jak, je známe dnes, se začaly vyvíjet v 60. letech dvacátého století [2]. Potřeba vytvořit kvalitní tenké vrstvy v té době značně vzrostla, díky nárokům polovodičového průmyslu na čisté vrstvy pro tranzistory a integrované obvody.

V dnešní době se za pomoci depozice z atomárních zdrojů vytváří ultratenké vrstvy atomů a nanostruktur za účelem zlepšení vlastností povrchů materiálů, či aplikace v polovodičovém průmyslu. Jako konkrétní příklad využití lze uvést vytvoření fotodetektorů nebo plynových senzorů za pomoci atomárního zdroje zinku [3].

Ke vzniku svazku neutrálních atomů se využívá nasycených par deponované látky. Umístění atomárního zdroje v ultravysokém vakuu (UHV¹) umožňuje proudění sublimovaných atomů ve formě svazku na vzorek [1]. Ohřev nutný k sublimaci atomů je nejčastěji realizován termální radiací vlákna žhaveného průchodem proudu nebo dopadem urychlených elektronů. V této práci budou studovány obě možné varianty.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit návrh atomárních zdrojů pro zinek a cín. Na základě těchto návrhů bude vyhotovena kompletní výkresová dokumentace, která bude užita k výrobě těchto zdrojů. Efuzní cely při úspěšném sestavení budou používány v čistých laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) Vysokého učení technického v Brně.

¹Anglicky *ultrahigh vacuum*. Tlak v tomto prostředí je menší než $p \doteq 10^{-7}$ Pa.

1 MOLEKULÁRNÍ SVAZKOVÁ EPITAXE

Molekulární svazková epitaxe (MBE¹) je metoda, při které se pomocí svazku atomů o nižších energiích (0,1 – 1 eV) deponuje na substrát ultratenká, případně tenká vrstva požadovaného složení. Při takto nízkých energiích deponované atomy nepronikají pod svrchní vrstvu substrátu. Tímto způsobem lze nanášet většinu látek a připravit povrchy různých materiálových vlastností [4].

Podmínkou pro realizaci depozice je prostředí UHV. Nedodržení této podmínky znamená, že na substrát, kromě nanášeného materiálu dopadá mnoho nečistot, které znehodnocují kvalitu rostlé vrstvy. Zároveň dochází k srážkám mezi volnými částicemi zbytkové atmosféry v experimentální aparatuře s atomy vytvořeného svazku. Tyto srážky mohou degradovat kvalitu atomového svazku, a tedy i samotné depozice. Neinertní materiály reagují s oxidačním prostředím a následně vytváří nežádoucí sloučeniny oxidů [4]. Tyto reakce mohou být naopak používány při tvorbě vrstev a nanostruktur oxidů.

1.1 Typy epitaxního růstu

U epitaxního růstu se rozlišují dva základní typy, a to homoepitaxní a heteroepitaxní. Rozdíl mezi oběma je ve shodnosti chemického složení rostlé vrstvy oproti substrátu.

Při homoepitaxní depozici odpovídá chemické složení nanášené vrstvy a substrátu, a tudíž se shodují mřížkové parametry (tzv. souhlasný růst), viz 1.1 a).

Oproti tomu u heteroepitaxe se mřížkové parametry mohou lišit kvůli rozdílnému chemickému složení. Pokud jsou mřížkové parametry odlišné, může to vést k napětí mezi vrstvami (tzv. napnutý růst) nebo vzniku defektů mezi nimi (tzv. relaxovaný růst), viz Obr. 1.1b), c). Za vhodnější pro depozici, pokud to jinak nevyžaduje experiment, lze považovat souhlasný růst, kdy si mřížkové parametry odpovídají [4].

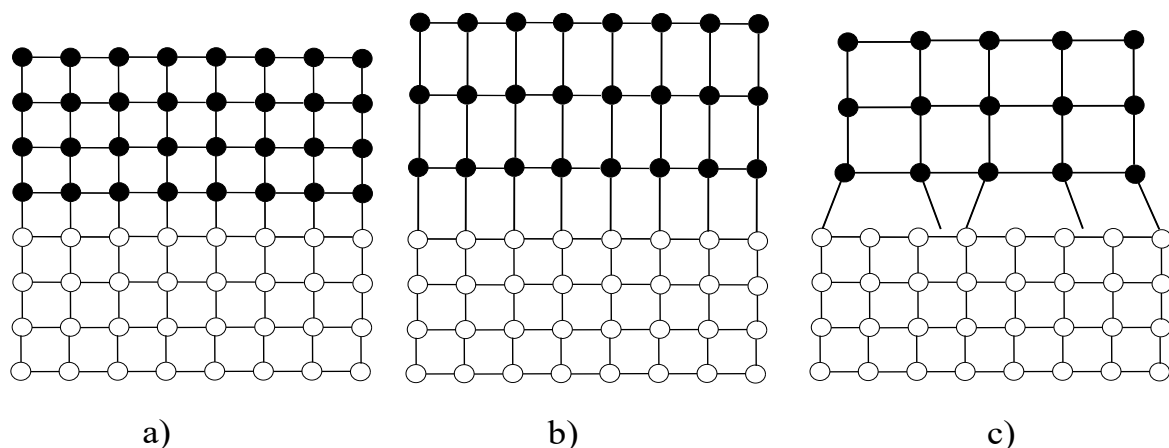
1.2 Módy růstu a detekce vrstev

Vlivem působení přitažlivých sil se deponované atomy na povrchu seskupují různým způsobem. Dle jejich rozložení se rozlišují 3 základní módy růstu [4]:

- **Frankův-van der Merweův mód** (růst vrstva po vrstvě):

Atomy v tomto módu jsou vázány silněji k substrátu, než mezi sebou, proto se vytváří rovnoměrné vrstvy atomů, viz Obr. 1.2 a).

¹Anglicky *molecular beam epitaxy*.



Obr. 1.1: Schématické nákresy krystalických mřížek vzniklých epitaxním růstem. a) Homoepitaxe nebo heteroepitaxe – souhlasný růst (shodné mřížkové parametry). b) Heteroepitaxe – napnutý růst (rozdílné mřížkové parametry, díky kterým vzniká napětí, ale bez defektů). c) Heteroepitaxe – relaxovaný růst (rozdílné mřížkové parametry, vznik defektů). Převzato a upraveno z [5].

- **Volmerův-Weberův mód** (ostrůvkový růst):

Pro tento případ atomové síly mezi deponovanými atomy převyšují sílu vazby mezi atomy a substrátem. Vytvářejí se ostrůvky deponovaných atomů, které přitahují další dopadající atomy, viz Obr. 1.2 b).

- **Stranskiho-Krastanovův mód** (přechodný růst):

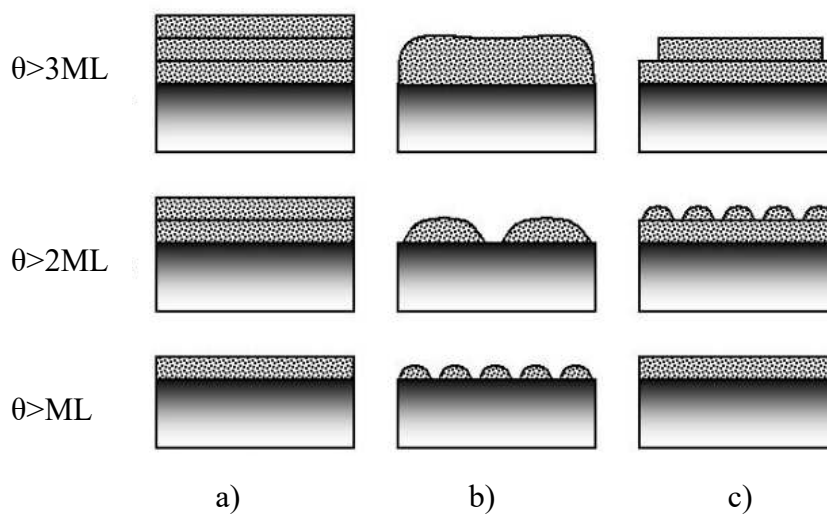
Přitažlivé síly mezi deponovanými atomy a silová interakce mezi atomy a substrátem jsou podobné velikosti. Vzniká tedy kombinace předchozích dvou módů růstu, viz Obr. 1.2 c).

Nanesené množství částic se dá definovat jako proměnná θ , která je určitým násobkem materiálu potřebného pro vytvoření monovrstvy (ML) [6]. Pro různé hodnoty θ je nastíněn vzhled vrstev podle módu epitaxního růstu na Obr. 1.2.

Pro samotnou MBE je důležitá kontrola tloušťky nanášené vrstvy, která ovlivňuje vlastnosti vytvořených struktur. K přesné detekci se užívá metody difrakce elektronů s vysokou energií na odraz (RHEED²) umožňující kontrolu růstu jednotlivých vrstev.

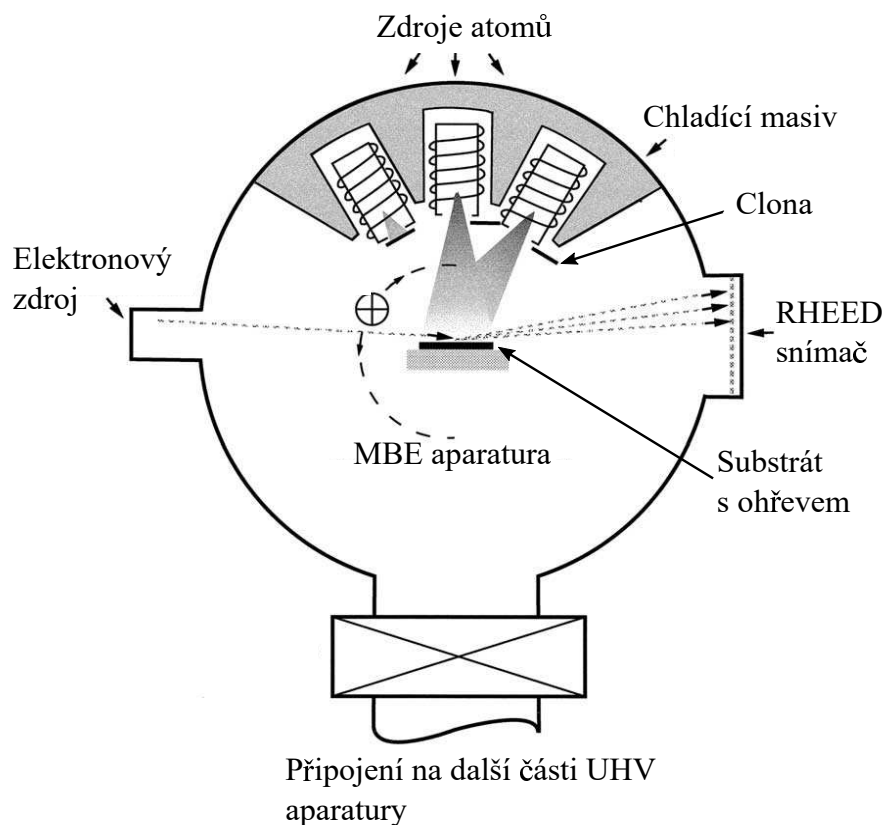
Při této metodě urychlené elektrony dopadají pod určitým úhlem na povrch substrátu v průběhu depozice. Během růstu vrstev lze pozorovat difrakční obrazec tvořený elektrony měnící se v čase. Při vyhodnocení energie dopadajících elektronů na stínítku, se objeví energiová maxima. Maxima jsou způsobena vhodným uspořádáním vrstvy. Její nejlepší odrazivost nastává právě při vytvoření celistvé

²Anglicky *reflection high energy electron diffraction*.



Obr. 1.2: Schéma řezu vzorky s epitaxně rostlými vrstvami, kde θ představuje množství materiálu a ML jednu monovrstvu [6]. Také jsou zde vyobrazeny módy růstu. a) Frankův-van der Merweův (růst vrstva po vrstvě). b) Volmerův-Weberův mód (ostrůvkový růst). c) Stranskiho-Krastanovův mód (přechodný růst). Převzato a upraveno z [4].

vrstvy. Každé maximum odpovídá vytvoření jedné monovrstvy nanášeného materiálu. Tímto způsobem lze určit potřebnou dobu k nadeponování vrstvy požadované tloušťky [7]. Na Obr. 1.3 je příklad jednoduché UHV aparatury pro MBE s atomárními zdroji a měřením rostlých vrstev metodou RHEED.



Obr. 1.3: Aparatura pro molekulární svazkovou epitaxi se skládá z atomárních zdrojů, které jsou umístěny v aktivně chlazeném masivu. Pro nastavení přesné délky depozice se používá clona. Částice rostou na substrátu. Tloušťka rostlé vrstvy je kontrolována pomocí RHEED, v níž jsou elektrony emitovány ze zdroje a dopadají pod úhlem na vzorek, kde dochází k difrakci směrem ke snímači. Převzato a upraveno z [5].

2 TEORIE ATOMÁRNÍCH SVAZKŮ

Atomární svazky vznikají po sublimaci atomů z povrchu ohřívaného materiálu. Po výstupu z atomárních zdrojů se rozlišují dva typy toků atomů, efuzní a aerodynamický.

2.1 Tvorba efuzního toku

Tok atomů lze nazvat efuzní, pokud před výstupem z atomárního zdroje nedochází ke kolizím atomů, jak mezi sebou tak s vnitřní částí atomárního zdroje. Jinými slovy musí být zachována prostorová a rychlostní distribuční funkce vysupujících částic, a proto musí být vhodně zvolen tlak ve zdroji a tvar šterbiny pro výstup částic. Efuzní tok se vytváří zejména ve vakuových prostředích, a aby mohl vznikat musí být pro výstupní šterbinu splněna podmínka efuze

$$d \ll \lambda, \quad (2.1)$$

kde d znamená průměr otvoru a λ střední volnou dráhu částic¹.

V několika dalších krocích se bude pracovat s podmínkou efuze podobně jako v [8] a ukáže se, že její znění bude vhodnějši upravit na tvar tzv. tvarové podmínky

$$d \leq \lambda. \quad (2.2)$$

Nejprve je nutno si vyjádřit z kinetické teorie plynů

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_k n}, \quad (2.3)$$

kde n je koncentrace atomů a σ_k účinný průřez, který můžeme zjistit z poloměru atomů δ : $\sigma_k = \frac{\pi\delta^2}{4}$. Dále si ze stavové rovnice ideálního plynu lze vyjádřit koncentraci atomů

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (2.4)$$

zde k je Boltzmannova konstanta, p vyjadřuje tlak ve zdroji a T absolutní teplotu ve zdroji v kelvinech. Dosazením rovnice (2.4) do rovnice (2.3) lze získat vztah pro střední volnou dráhu atomů

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma_k p}. \quad (2.5)$$

¹Průměrná dráha, kterou částice urazí mezi dvěma srážkami.

Důležitý je také vztah pro množství atomů dN , které vylétují z atomárního zdroje pod prostorovým úhlem $d\omega$ a úhlem θ při zvoleném průměru štěrbin d a délce štěrbin l zanedbatelného rozměru, jak je zobrazeno na Obr. 2.1.

$$dN = n\bar{v}A_S \cos\theta \frac{d\omega}{4\pi}. \quad (2.6)$$

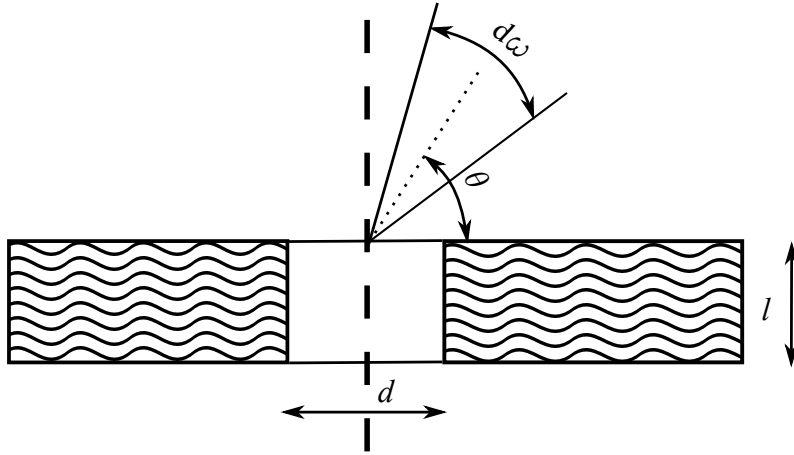
Tento vztah lze popsat jako kosinovu distribuční funkci, jelikož θ v této rovnici vystupuje jako argument kosínu. A_S má zde význam plochy výstupního otvoru, a $\bar{v}$ střední rychlosti částic

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (2.7)$$

V rovnici (2.6) lze vyjádřit všechny nediferenciální členy a rovnici je možno ji integrovat přes celý prostorový úhel 2π , kdy získáme vztah pro celkový počet atomů opouštějících zdroj

$$N = \frac{1}{4}n\bar{v}A_S. \quad (2.8)$$

Z tohoto výrazu plyne, že celkový počet částic vycházejících z atomárního zdroje narůstá s koncentrací atomů (potažmo tlaku viz rovnice (2.4)), střední rychlostí a plochou (velikostí) výstupního otvoru. Tlak a velikost otvoru propojuje podmínka efuze (2.1). Se vzrůstajícím tlakem p , viz rovnice (2.5), klesá střední volná dráha λ , a proto se omezuje velikost štěrbin. S ohledem na výše uvedené propojení veličin se pro řešení výstupního otvoru kvůli velkým omezením pro reálnou soustavu uvažuje mírnější tvarová podmínka $d \leq \lambda$ (2.2) [8].



Obr. 2.1: Výstupní štěrbina efuzní celý kruhového průřezu o průměru d a délce l . Na obrázku je také vyjádřen směrový úhel θ a prostorový úhel $d\omega$ vylétávajících atomů. Převzato a upraveno z [6].

2.2 Usměrnění efuzního toku

V předchozí části bylo uvažováno o nulové délce štěrbiny $l = 0$. Pro tento případ byl svazek atomů opouštějící atomární zdroj popsán kosinovou distribuční funkcí, viz (2.6), za předpokladu, že platí tvarová podmínka (2.2). V reálných aplikacích je ovšem potřebné uvažovat určitou délku l štěrbiny. Tento rozměr ovlivňuje tvar svazku, a pomocí něj lze usměrňovat svazek neutrální atomů na požadovanou šířku. Štěrbina v konstrukci efuzní cely se nazývá kolimátor a musí pro její délku platit podmínka

$$l \leq \lambda. \quad (2.9)$$

Při narůstající hodnotě l začne v důsledku srážek docházet ke snížení množství atomů opouštějících atomární zdroj. Do vztahu (2.11) je tedy potřeba zahrnout geometrický redukční člen ξ . Redukční člen ξ vyjadřuje bezrozměrnou veličinu závislou jen na rozměrech kolimátoru. Pro kruhový průřez kolimátoru lze redukční konstantu ξ zapsat jako

$$\xi = \frac{4d}{3l}. \quad (2.10)$$

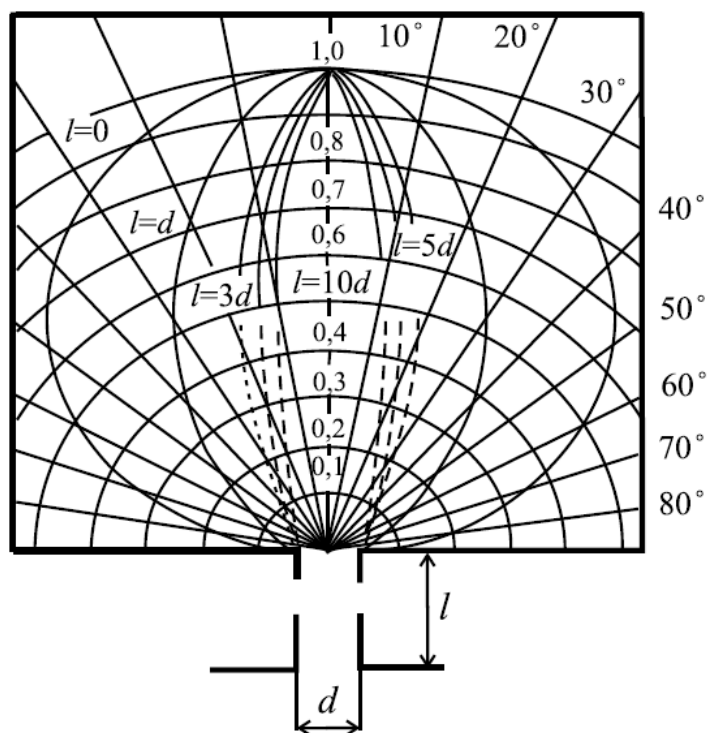
Pomocí výše uvedených vztahů je možné velmi dobře odhadnout počet atomů opouštějících efuzní celu s kolimátorem kruhového průřezu o ploše $A_S = \frac{\pi d^2}{4}$

$$N = \frac{1}{4} \xi n \bar{v} A_S = \frac{\pi d^3}{12l} n \bar{v}. \quad (2.11)$$

Další podstatnou částí charakterizace atomárního svazku je jeho intenzita a šířka. Pro stanovení šířky svazku je vhodné použít úhel $\theta_{0,5}$, ve kterém se maximální intenzita sníží na polovinu. Velikost, tohoto úhlu se dá také přibližně určit pomocí parametrů kolimátoru

$$\theta_{0,5} = \frac{0,84d}{l}. \quad (2.12)$$

Obr. 2.2 zobrazuje distribuční funkci pro různé poměry hodnot d a l . Úpravou tvaru kolimátoru, pak lze dosáhnout atomárního svazku odpovídající velikosti substrátu, a tak zamezit nepatřičnému naprašování na stěny a zařízení UHV aparatury [8].



Obr. 2.2: Úhlová distribuční funkce atomárního svazku procházejícího přes kolimátor kruhového průřezu o průměru d a délce l . Převzato z [8].

3 ZDROJE ATOMŮ O NÍZKÉ ENERGII

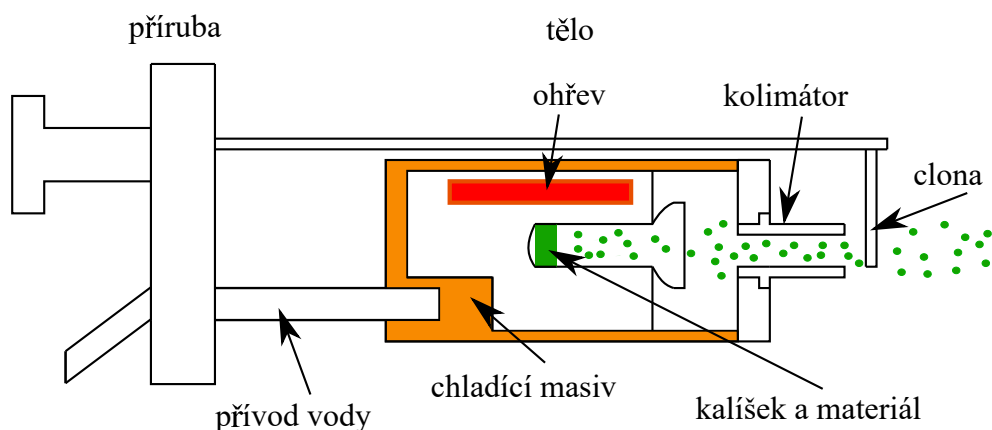
V předcházejících dvou kapitolách byly vyloženy základní principy fungování atomárních zdrojů (efuzních cel), kdy zahříváním materiálu pro depozici je vytvořen efuzní tok atomů o nízké kinetické energii ($0,1 - 1 \text{ eV}$). V této kapitole bude nastíněno, jak se obecně provádí konstrukční a funkční řešení atomárních zdrojů nízkých energií.

3.1 Popis efuzních cely

Podoba a popis základních částí efuzní cely je na Obr. 3.1. Každá efuzní cela se skládá ze dvou důležitých částí – těla a příruby.

Tělo musí být vyrobeno z materiálů, které nebudou plynit a znečišťovat UHV prostředí, a také nebudou reagovat s deponovaným materiálem. Každá efuzní cela obsahuje kalíšek s materiálem nebo samotný materiál ve vhodné formě pro depozici. Existují různé způsoby napařování materiálu, jež jsou podrobněji rozvedeny níže (část 3.2). Kalíšek a ohřev by měl být umístěn v chladicím masivu, jelikož otevřený ohřev by mohl poškozovat jak UHV, tak konstrukční prvky efuzní cely. Pro usměrnění efuzního toku se využívá kolimátoru. Ke kontrolovanému průběhu depozice lze použít manuálně nebo strojově ovládanou clonu.

Příruba zajišťuje kompatibilitu efuzní cely s UHV aparaturami pomocí standardizovaného připojení. Dále umožňuje pomocí průchodek pohyb mechanismů (ovládání clony), přívod vody pro chlazení a přístup elektrického napájení či obvodů pro vyhodnocování funkčnosti cely.



Obr. 3.1: Nákres efuzní cely s popisem jednotlivých částí.

3.2 Napařování materiálu

Materiál, popřípadě kalíšek, může být zahříván radiačním distančním ohřevem, dopadem termoemisních elektronů, nebo přiváděným napětím přímo na materiál.

Radiační distanční ohřev

Tento typ ohřevu funguje na principu přivádění proudu do topného tělesa, které je umístěno v chladícím masivu efuzní cely. Pomocí tepelné radiace se ohřívá vnitřní prostor cely (Obr. 3.2).

Pro odhadnutí výkonu topného tělesa P při dosažené teplotě T , je vhodné nejprve ze Stefan-Boltzmannova zákon a určit celkovou intenzitu záření I_e

$$I_e = \epsilon \sigma T^4, \quad (3.1)$$

ϵ znamená emisivitu použitého materiálu ohřevu. Ta se určuje jako poměr intenzity vyzařování použitého tělesa ku vyzařování černého tělesa. Pro zjednodušení výpočtů bude uvažováno $\epsilon \doteq 1$. Dále σ vyjadřuje Stefan-Boltzmannovu konstantu o hodnotě $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a T teplotu v Kelvinech, jakou dosáhne ohřev při dané intenzitě I_e . Výkon P , pak získáme, pokud je znám, povrch ohřevu S ze vztahu

$$I_e = \frac{P}{S}. \quad (3.2)$$

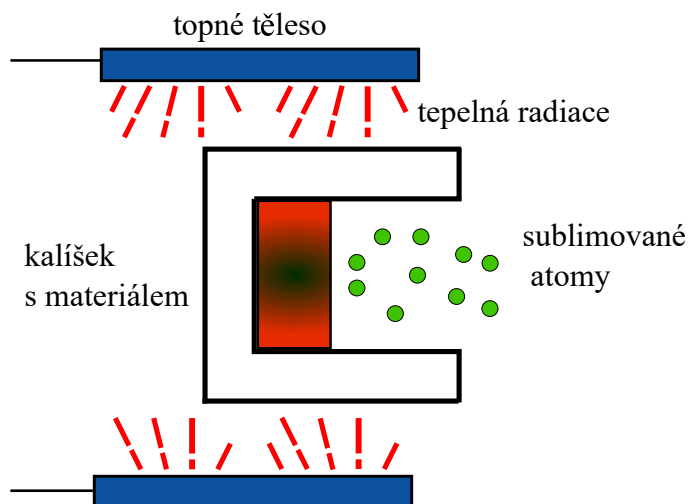
Výkon topného tělesa při průchodu elektrického proudu I je určen pomocí vztahu

$$P = UI = RI^2. \quad (3.3)$$

U zde vyjadřuje napětí a R odpor, který lze zjistit z parametrů topného tělesa – rezistivity ϱ materiálu a tvaru (délky a a obsahu průřezu S_p)

$$R = \frac{\varrho a}{S_p}. \quad (3.4)$$

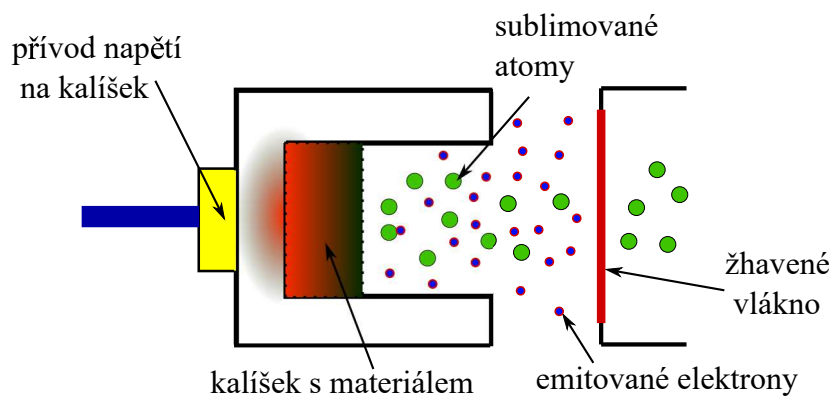
Po úvaze nad výše uvedenými rovnicemi vyplyne, že při zadání parametrů topného tělesa, lze zjistit jeho celkový odpor R (3.4). Poté při známé hodnotě přiváděného proudu I na ohřev lze dopočítat jeho výkon P (3.3), z kterého lze ze vztahů (3.2), (3.1) určit výslednou teplotu radiačního ohřevu T [9].



Obr. 3.2: Nákres principu radiačního ohřevu, kdy průchodem elektrického proudu je ohříváno topné těleso. To následně tepelnou radiací ohřívá kalíšek s materiálem.

Ohřev dopadem elektronů

V tomto typu ohřevu jsou emitovány termoemisionní elektrony díky proudu procházejícím vláknem topného tělesa, které je nejčastěji vyrobeno z wolframu. Termoemisionní elektrony jsou následně urychlovány ke kalíšku, na který je přivedeno kladné napětí. Dopadem elektronů na kalíšek se ohřívá do něj vložený materiál (Obr. 3.3). Urychlenými elektrony lze dosáhnout vyššího zahřátí materiálu než radiačním ohřevem.



Obr. 3.3: Schéma ohřevu materiálu dopadem elektronů. Ze žhaveného vlákna jsou emitovány elektrony, které dopadem ohřívají kalíšek s materiálem.

Přímý ohřev materiálu elektrickým proudem

Tento případ je dosti specifický a je k němu zapotřebí patřičný materiál pro depozici. Materiál není umístěn v ohřívaném kalíšku, ale přímo na něj jsou připojeny kontakty a přiváděn elektrický proud. V důsledku průchodu proudu materiálem je způsobeno zvýšení jeho teploty a následná sublimace atomů z povrchu materiálu.

4 ULTRATENKÉ VRSTVY A NANOSTRUKTURY ZINKU A CÍNU

V této kapitole budou nastíněny základní vlastnosti prvků, které jsou při jejich depozici důležité pro funkčnost efuzních cel. Poté bude ukázáno za jakých podmínek a jakým způsobem, probíhá příprava nanostruktur a ultratenkých vrstev jednotlivých materiálů.

4.1 Zinek

Zinek je bílý, lesklý a neušlechtilý kov 12. skupiny periodické soustavy prvků. Krystalizuje v šesterečné mřížkové struktuře (hcp¹) a snadno sublimuje za nízkých teplot. Základní vlastnosti zinku jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Vlastnosti	
atomové číslo	30
elektronová konfigurace	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²
relativní atomová hmotnost	65,38
oxidační čísla	+II(+I, 0, -II)
teplota tání	419,53 °C
teplota varu	907 °C

Tab. 4.1: Přehled vlastností zinku [10].

Zinek je používán v průmyslu jako antikorozní povlak, jelikož dobře snáší atmosférické podmínky a v suchém prostředí téměř neoxiduje. V kombinaci se stříbrem či uhlíkem se využívá také k výrobě galvanických článků. Dále se hojně vyskytuje v různých běžných slitinách kovů pro zlepšení jejich vlastností [10].

Už samotná tvorba tenkých povlaků je vhodné téma pro zkoumání tenkých vrstev, ovšem zinek tvoří různé sloučeniny, které mají další velmi zajímavé vlastnosti. Například oxid zinečnatý (ZnO) a sulfid zinečnatý (ZnS) mají velmi široký zakázaný pás a velkou vazební energii excitonu, což nachází dobré uplatnění v polovodičovém průmyslu [3, 11].

¹Anglicky *hexagonal closed-pack*.

4.2 Oxid zinečnatý ZnO

Využití navrhované efuzní cely na ÚFI je plánované zejména pro studium růstu a tvorby nanostruktur oxidu zinečnatého.

Oxid zinečnatý je bílý polovodič tvořící šesterečnou krystalovou strukturu (hcp). Má vysokou pohyblivost nosičů náboje, dobrou tepelnou vodivost, velmi široký zakázaný pás $E_g = 3,37$ eV, a zároveň obrovskou vazební energii excitonů (60 meV). Tyto vlastnosti nachází uplatnění především na poli elektroniky a optoelektroniky. Lze z něj vyrábět LED² diody vyzařující v modré až ultrafialové části spektra, fotodetektory, plynové senzory či piezorezonátory [3].

Oxid zinečnatý se jako polovodič potýká s problémy při dopování, kdy není snadné kontrolovat jeho vodivost. Zejména výskyt defektů (kyslíkové nebo zinkové vakance) způsobují neúmyslnou n -vodivost, což může činit určité potíže v jeho aplikacích. Pro n -typ vodivosti už je dopování úspěšně zvládnuto, když se jako donor použije vodík. Stablní vodivost typu p je zatím předmětem studia. Velmi dobré výsledky byly dosaženy pro dopování sodíkem, dusíkem či prvky spadající do 1. nebo 15. skupiny periodické soustavy prvků [3].

4.3 Příprava nanostruktur a ultratenkých vrstev Zn, ZnO a jiných sloučenin zinku

Příprava ultratenkých vrstev a nanostruktur zinku a jeho sloučenin může probíhat pomocí různých dějů. Používá se elektrolýza [12], metoda pulsní laserové depozice (PLD³) [13], metoda metalorganické chemické depozice z plynné fáze (MO-CVD⁴) [14], metoda MBE [15] a mnoho dalších procesů.

4.3.1 Elektrolytický růst

Pro vytvoření ultratenkých vrstev kovů pomocí anodické oxidace (elektrolýzy) je potřeba nalézt vhodný substrát. Jeden z možných kandidátů pro růst nanostruktur kovů je porézní hliník [12]. Ten je pokryt několik nanometrů širokou transparentní vodivou vrstvou hliníku. Na vrstvě hliníku je rozložen elektrolyt obsahující kationty zinku Zn^{+2} (nejčastěji z roztoku $ZnCl_2$). Jelikož zinek na vzduchu oxiduje, je na elektrolyt potřeba nanést krycí vrstvu. Krycí vrstvu lze vytvořit přidáním $LiClO_4$,

²Anglicky *light emitting diode*.

³Anglicky *pulsed laser deposition*.

⁴Anglicky *metalorganic chemical vapor deposition*.

do svrchní vrstvy elektrolytu [16].

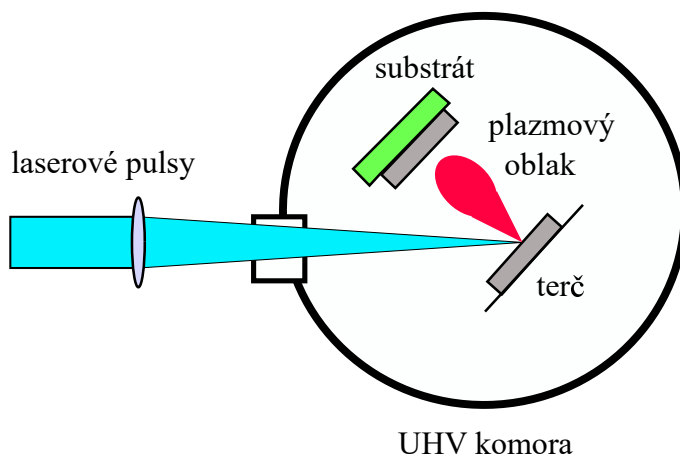
Pokud je na transparentní vrstvu přivedeno napětí, začne docházet k elektrochemické redukci Zn^{+2} na Zn. Po vytvoření několikananometrové zinkové vrstvy se na povrch zinku začne automaticky nanášet vrstva kationtů Li^+ , které na vzduchu vytváří ochrannou vrstvu v podobě vrstvy složené z Li_2CO_3 a oxidů lithia.

Ultratenké vrstvy zinku se využívá ke zlepšení vlastností elektrického papíru, jeho zabarvení, ochraně proti UV⁵ záření a zvýšení tepelné odolnosti. Elektronický papír je v poslední době složka obrazovek elektronických čteček a podobných zařízení [16].

4.3.2 Pulsní laserové depozice

Metoda pulsní laserové depozice PLD je založena na ablaci deponovaných látek z jednoho nebo více terčů pomocí pulsů laseru. Odpařené částice z terče vytváří „plasmatický oblak“, který je následně nanášen na substrát umístěný v blízkosti terče (2 - 10 cm) [13]. Jednoduché schéma uspořádání PLD je znázorněno na Obr. 4.1.

Tato metoda se v případě zinku používá nejčastěji pro růst oxidu zinečnatého, za použití přímo ZnO jako terče Růst ZnO je realizován na substrátech křemíku Si (111) [17], Si (100) [18], či safíru [19].



Obr. 4.1: Schéma uspořádání pulsní laserové depozice. Laserové pulsy vytváří plazmatický oblak z materiálu terče. Částice z oblaku následně dopadají na substrát. Převzato a upraveno z [13].

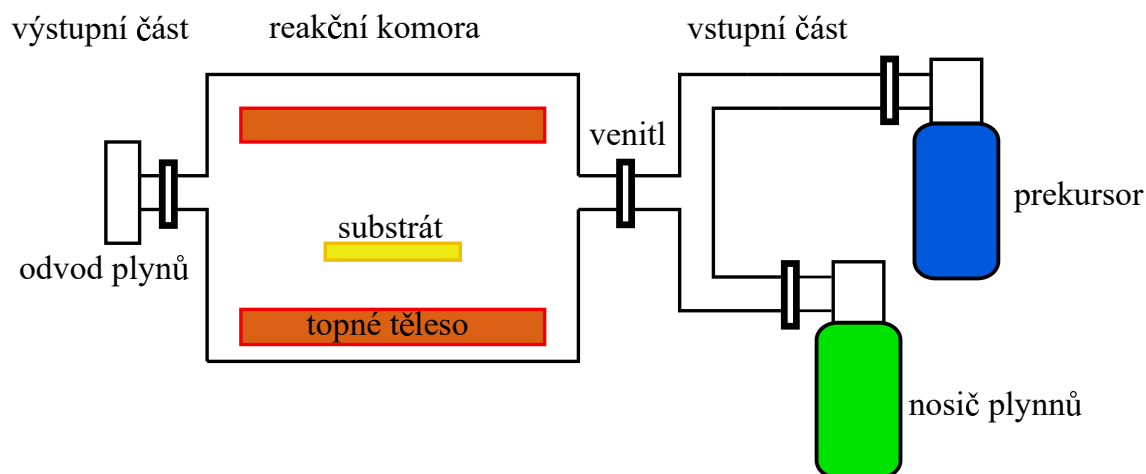
⁵Ultrafialovým, anglicky *ultraviolet*

Růstový proces ZnO probíhá v kyslíkovém prostředí při tlacích v rozsahu 1 - 500 Pa. Podle počtu pulsů laseru lze kontrolovat rychlost depozice, která závisí na umístění substrátu vůči terči. Poloha substrátu od terče se pro oxid zinečnatý pohybuje nejčastěji v rozmezích 2 - 5 cm.

4.3.3 Chemická depozice z plynné fáze

Metoda chemické depozice z plynné fáze (CVD⁶) je založena na depozici odvíjející se od chemických reakcí. Schéma typické CVD sestavy (pece) je na Obr. 4.2. Pec je složena ze tří hlavních částí: vstupní část, reaktor (reakční komora) a výstupní část. Vstupní část slouží k řízení toků plynů do reakční komory (reaktoru). Do reakční komory jsou vpouštěny především dva typy plynů: prekursory a nosiče plynů. Nosiče plynů usnadňují transport prekursorů do a skrz reakční komoru. Z prekursorů se vytváří požadované ultratenké vrstvy, když v CVD peci, zahřáté na vysoké teploty chemicky reagují na vhodně zvoleném substrátu. Výstupní část CVD sestavy je složená z vakuových vývěv a ventilu kontrolujícího tlak v reakční komoře. Tlak, teplota, tok plynů a čas depozice, patří k základním parametrům metody CVD [20].

Na úspěšný výsledek depozice má vliv mnoho faktorů. Problémy mohou nastat například s prouděním plynů, které může narušit uniformitu vrstvy. Jedna ze zajímavostí metody CVD je reakční mechanismus prekursorů při tvorbě vrstev, kdy některé kroky průběhu reakcí nejsou zcela objasněny.



Obr. 4.2: Schéma CVD pece. Převzato a upraveno z [21].

⁶Anglicky *chemical vapor deposition*.

Metalorganická chemická depozice z plynné fáze

Metalorganická chemická depozice z plynné fáze (MOCVD⁷) využívá jako prekursorů metalorganických sloučenin. Pro zinek to jsou diethyl zinku (DEZn) nebo dimethyl zinku (DMZn) [14]. Nejčastěji se metoda MOCVD využívá k depozici ZnO. K nárůstu ultratenké vrstvy oxidu zinečnatého je potřeba do vakuové aparatury umístit také prekursor kyslíku, například plyny N₂O a H₂O. Použití N₂O vykazuje lepší vlastnosti výsledné vrstvy [14].

Při použití substrátu Si (111) pro růst ZnO se používá vyrovnávací vrstva AlN kvůli odstranění defektů z rostlé vrstvy [22]. Dále se před samotnou depozicí kvalitních vrstev ZnO nechá pro lepší srovnání mřížkových parametrů (při nízkých teplotách 160 °C) narůst tenká vyrovnávací vrstva ZnO. Na ní lze při teplotách v rozmezí 650 – 900 °C vytvořit tenké vrstvy ZnO bez velkých defektů.

Metodou MOCVD lze vytvářet také nanostruktury. Například nanotyčinky, jejichž růst probíhá stejně jako pro ultratenké vrstvy na Si (111) jen v tomto případě nejsou použity vyrovnávací vrstvy [23, 24].

4.3.4 Depozice zinku a jeho sloučenin molekulární svazkovou epitaxí

Metoda MBE využívá k depozici zinkových atomárních zdrojů. Jelikož zinek oxiduje, používá se v kombinaci s jinými atomárními zdroji nebo ve vhodném prostředí, za tvorby ultratenkých vrstev a nanostruktur různých sloučenin zinku (ZnO, ZnS, ZnTe, ...)

ZnO

Jak je uvedeno v podkapitole 4.2, oxid zinečnatý je vhodný materiál pro elektrooptický a polovodičový průmysl a lze z něj vytvářet celou řadu nanostruktur.

Obecně se připravuje ultratenká vrstva ZnO tak, že se využívá oxidačního prostředí reaktivních sloučenin jako H₂O₂ [15, 25], O₃, [26] a nebo plazmatického zdroje kyslíku [27, 28]. K růstu nanostruktur ZnO nestačí běžné kyslíkaté prostředí, protože vysoká vazebná molekulová energie molekuly kyslíku (5,16 eV [29]) zabraňuje termální disociaci kyslíku na povrch substrátu. K tvorbě ZnO vrstvy se tudíž využívají reaktivní kyslíkaté sloučeniny.

Reaktivní kyslíkaté sloučeniny lze vytvořit pomocí plazmatického zdroje nebo zdroje oxidantů. Lepších a kvalitnějších vrstev je v dnešní době dosahováno použitím

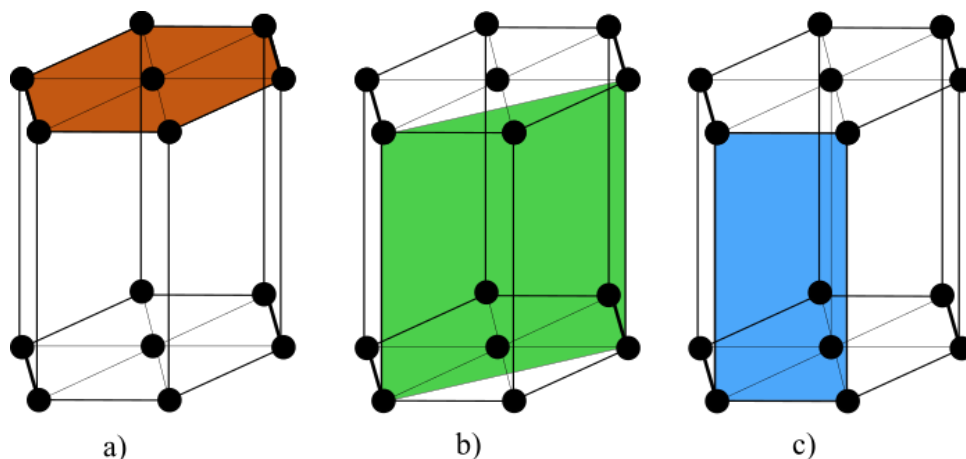
⁷Anglicky *chemical vapor deposition*.

oxidantů [25]. Při deponování metodou P-MBE⁸ se nevytváří tak kvalitní vrstvy, jelikož roslá vrstva je znečišťována odpařeným materiálem z plazmatického zdroje. Kyslíkové plazmatické zdroje navíc vytváří vysokoenergievé částice, které ničí roslou vrstvu ZnO, a také samotné zdroje kyslíku [30].

Příprava nanostruktur probíhá pomocí atomárního zdroje, kde je zinek nahříván na teploty mezi 300-500 °C. Ze zdroje je poslán svazek neutrálních zinkových atomů. Zároveň jsou do UHV komory vpouštěny kyslíkové sloučeniny, které určují tlak při depozici pohybující se okolo $3,5 \cdot 10^{-5}$ Torr [15].

S ohledem na dobrou využitelnost jsou nejvíce zkoumanými druhy substrátů safír (Al_2O_3) a Si v různých modifikacích.

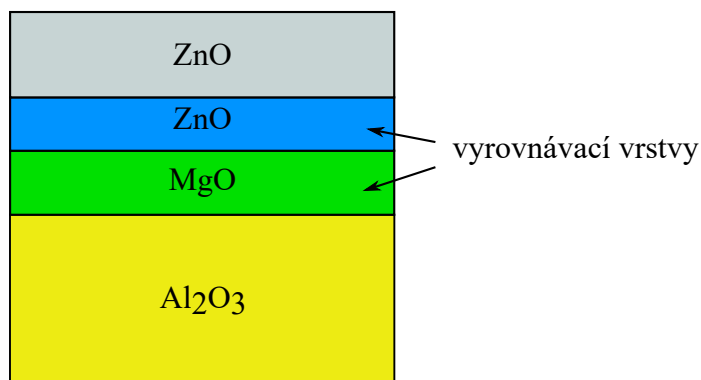
Orientace safírového substrátu ovlivňuje orientaci rostené vrstvy ZnO. Nejvíce se používá c-orientovaný safír (0001) pro tvorbu c-orientovaných vrstev ZnO [15]. Pro růst nepolární a-orientované ($11\bar{2}0$) vrstvy ZnO se využívá r-orientovaný ($1\bar{1}02$) safír [19]. Také jsou prováděny růsty m-orientovaných ($10\bar{1}0$) vrstev ZnO na m-orientovaném substrátu [31]. Pro a-orientaci a m-orientaci vrstvy safíru ovšem zatím nebylo tvorba vrstev dostatečně odlazena [31, 32], takže v následujícím odstavci je uvažována pouze c-orientace ZnO. Na Obr. 4.3 jsou vyobrazeny jednotlivé orientace rovin růstu ZnO.



Obr. 4.3: Jednoduché nákresy šestiúhelné mřížky s vyobrazením preferovaných rovin růstu ZnO. a) c- orientace (0001), b) a- orientace ($11\bar{2}0$). c) m- orientace ($10\bar{1}0$) ZnO.

⁸Anglicky *plasma assisted molecular beam epitaxy*- metoda, kdy se využívá plazmatického zdroje kyslíku k vytvoření nanostruktur

Pro dosažení kvalitních vrstev se substrát vždy musí dobře očistit a je vhodné použít vyrovnávací vrstvy, pro snížení napětí mezi substrátem a deponovanou vrstvou. Pro růst kvalitních vrstev ZnO na safíru je nejlepší nanést několik nanometrů širokou vrstvu MgO a vyrovnávací vrstvu ZnO, která se na substrátu přirozeně vytvoří [15]. Vzorok tedy vypadá jako na Obr. 4.4. Dále lze jako vyrovnávací vrstvu využít GaN [33], či jiné sloučeniny.



Obr. 4.4: Řez vzorkem při nanášení vrstvy ZnO na safír Al_2O_3 . Nejprve se nanese vyrovnávací vrstva MgO. Poté při vytváření vrstvy ZnO vzniká další vyrovnávací vrstva (ZnO), kvůli neshodám mřížkových parametrů navazujících vrstev. Převzato a upraveno z [25].

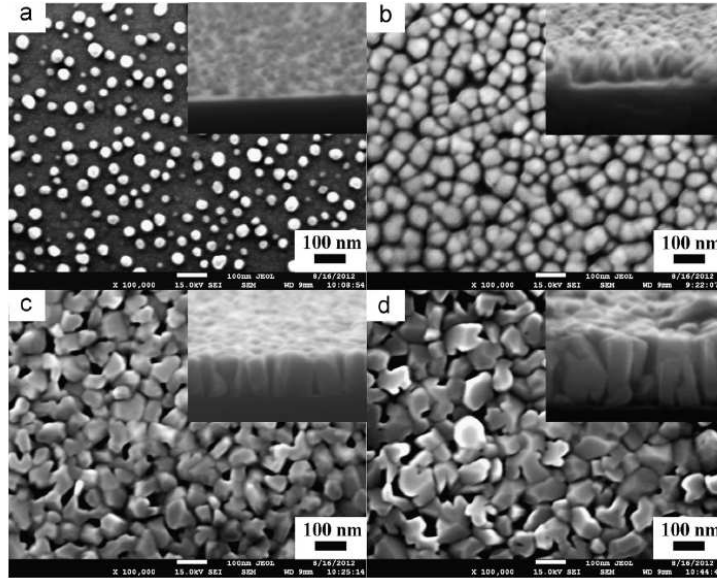
Při depozicích na vyžíhaný a čistý Si (111) dochází k oxidaci křemíkového substrátu, a tím vznikají defekty při růstu ZnO vrstev. Proto se nejprve deponuje pouze tenká vrstva Zn, která zabráňuje oxidaci samotného substrátu, a až poté se používá zdroj kyslíku [27]. Alternativou toho postupu, při použití zdroje kyslíkových radikálů, může být nitridace, kdy je těsně před depozicí ZnO nadeponovaná ultratenká vrstva nitridů zabráňující oxidaci Si substrátu [34]. Využívá se taky jiných vyrovnávacích a krycích vrstev pro depozici na Si jako GaN [35], MgO [36], SiC [37] a jiné.

Důležité pro růst vrstev je také, zahřívání substrátu kvůli zlepšení podmínek pro vznik oxidu zinečnatého. Teploty nahřívání substrátu se pohybují mezi 300 – 700 °C. K dosažení uniformity vrstvy se může využít také rotace substrátu.

V poslední řadě je podstatné se zmínit o růstu nanotyčinek a nanotrubiček, k jejichž tvorbě je efuzní cela pro depozici zinku navrhována.

Růst nanotyčinek lze obdržet správným nastavením poměru tlaků Zn a O zdrojů při růstu na křemíkovém substrátu Si (111) [38]. Nanotyčinky se vyvábí svévolně a ultratenké vrstvy oxidu zinečnatého jsou tvořeny z právě z těchto tyčinek „šesterečného

tvaru“. U tohoto růstu se vyskytují problémy s oxidací křemíku, a tak mezi vrstvou Si (111) a nanotyčinkami ZnO vzniká amorfnní vrstva SiO₂. Na Obr. 4.5 lze vidět, jak tlak zdroje částic ovlivňuje tvar a rozměry nanotyčinek.



Obr. 4.5: Nanotyčinky rostené na substrátu Si(111) při tlaku kyslíkové plazmy $1,5 \cdot 10^{-5}$ Torr a tlaku zinku a) $1,99 \cdot 10^{-8}$ Torr b) $3,38 \cdot 10^{-8}$ Torr c) $5,86 \cdot 10^{-8}$ Torr d) $8,61 \cdot 10^{-8}$ Torr. Se zvyšujícím se tlakem Zn se zvětšují rozměry nanotyčinek. Na obrázku d) už lze zřetelně vidět, že jejich tvar začíná být nepravidelný. Snímky byly pořízeny na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM¹⁰). Převzato z [38].

Růst nanotrubiček by měl být hlavním předmětem použití atomárního zdroje zinku. Pomocí metody P-MBE lze růst nanotrubičky na substrátu Si (111). Křemíkový substrát je zvolen, kvůli následné dobré využitelnosti v optoelektronice [39].

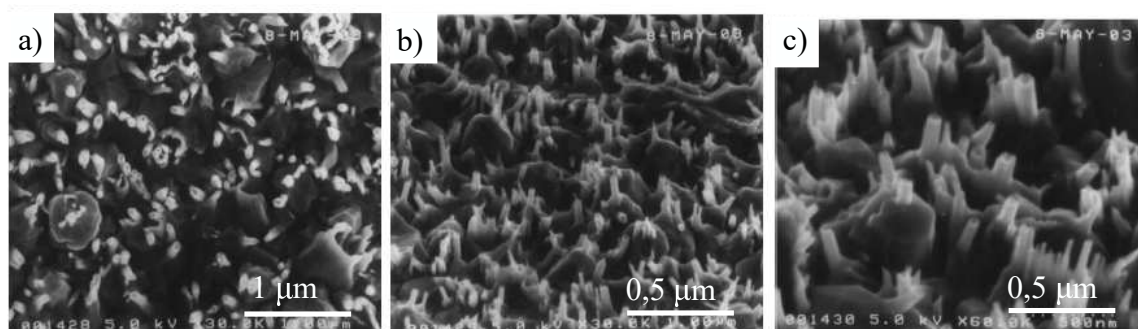
Před výrobou nanotrubiček ZnO je potřeba kvalitně očistit substrát Si od oxidů pomocí roztoků kyselin H₂SO₄, HF, HCl. Následně se substrát vyžihá a poté se nechává narůst tenká vrstva ZnO obdobně, jak je uvedeno u růstu ultretenkových vrstev ZnO. Aby rostly nanotrubičky ZnO, musí se poté povrch ZnO upravit pomocí O₂⁺ – plazmy, která je tvořena plazmovým kyslíkovým zdrojem. Tím se vytvoří základ pro tvorbu hexagonálních trubiček, které se dále tvoří za stejných podmínek, jako byla vytvářena první nanášená vrstva ZnO. Během růstu samotných nanotrubiček lze použít stejný plazmový kyslíkový zdroj, ovšem kationty O₂⁺ musí být odstíněny vychylovací soustavou. Pomocí tohoto postupu je množné nadeponovat strukturu nanotrubiček o délce 10 – 90 nm s preferovaným směrem růstu [0002] [39].

Podobným způsobem lze nechat narůst nanotrubičky na substrát Al₂O₃ jen za

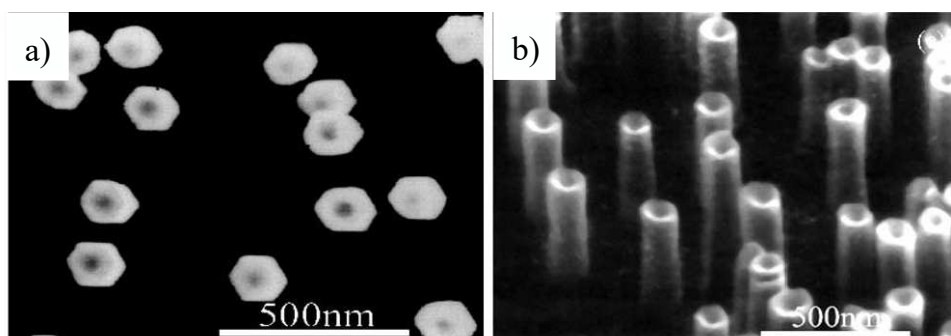
¹⁰Anglicky *scanning electron microscopy*.

použití jiného čistícího procesu vzorku. Nadeponovaná vrstva ZnO se opět upravuje O_2^+ -plasmou [40]. Na Obr. 4.6 a Obr. 4.7 ze SEM lze vidět nanotrubičky, jejich rozložení na povrchu substrátu a tvar.

Nanotrubičky ZnO mají potenciál být použity pro ukládání energie, jako plynové senzory, solární články či nanodutinky [39].



Obr. 4.6: SEM snímky nanotrubiček. a) Pohled shora, kde je zřetelně vidět hexagonální struktura nanotrubiček, b) a c) pohledy pod úhlem 45° ukázka morfologie povrchu a ověření existence nanotrubiček. Převzato a upraveno z [39].



Obr. 4.7: Obrázek hexagonálních trubiček ZnO na substrátu Al_2O_3 ze SEM. a) Pohled shora, b) pohled pod úhlem 45° . Převzato a upraveno z [40].

ZnS

Sulfid zinečnatý má podobné vlastnosti jako oxid zinečnatý. Je to polovodič, tvoří šesterečnou nebo kubickou krystalovou strukturu. Má velmi široký zakázaný pás $\sim 3,7$ eV [11, 41] a jeho vazební energie excitonu je okolo 40 meV [42]. Jeví se tedy také jako vhodný materiál pro optoelektronické polovodičové součástky.

Při růstu ultratenkých vrstev metodou MBE se používá UHV komora, ve které jsou umístěny dva atomární zdroje pro Zn a S. Je také možné použít různé alternativy, kdy se jako zdroj S používá například H_2S či přímo ZnS [43], nebo lze použít

jednu efuzní celu ZnS. Jako substrát se dá využít CaF_2 či GaAs, ale také už je prováděn růst na safíru či křemíku [43].

Z tohoto materiálu lze také vytvářet nanovlákná. Ty se deponují na předpřipravenou vrstvu kovového katalyzátoru Au. Podle použité teploty nahřívání vzorku, se poté vytvářejí nanovlákná kubické nebo hexagonální struktury [44].

4.4 Cín

Cín je kujný, stříbrobílý, lesklý a velmi odolný kov. Odolává atmosférickému působení i při vysokých vlhkostech. V periodické soustavě patří do 14. skupiny. Souhrn základních fyzikálních vlastností cínu je uvedený v tabulce 4.2.

Cín má několik alotropických podob. Nejdůležitější z nich jsou šedý α -cín a bílý β -cín. α -cín je práškový materiál stálý při teplotách pod $13,2\text{ }^\circ\text{C}$ a tvoří kubickou diamantovou mřížkovou strukturu. Tato podoba nemá kovové vlastnosti a je považována za „polovodič s nulovým zakázaným pásem“. Přeměněna do formy α -cínu z β -cínu probíhá tzv. cínovým morem. β -cín má kovové vlastnosti a tvoří tetragonální krystalovou mřížku [45].

Vlastnosti	
atomové číslo	50
elektronová konfigurace	$[\text{Kr}]4d^{10}5s^25p^2$
relativní atomová hmotnost	118,71
oxidační čísla	$+II, +IV$
teplota tání	$231,93\text{ }^\circ\text{C}$
teplota varu	$2586\text{ }^\circ\text{C}$
teplota přechodu $\beta - \alpha$	$13,2\text{ }^\circ\text{C}$

Tab. 4.2: Přehled vlastností cínu.

Cín se přidává do různých slitin. Nejznámější je bronz. Velmi se využívá jeho zdravotní nezávadnosti pro výrobu různých potravinových obalů, od plechovek až po tenký plech (staniol). Peněžní hodnota cínu je vysoká, a proto se v makroskopickém měřítku nejvíce užívá jako přísada do různých slitin [45].

Vrstvy cínu mají dobrý potenciál pro růst různých nízkodimenzionálních struktur, z důvodu zajímavých polovodičových vlastností α -cínu a jiných jeho sloučenin.

4.5 Příprava ultratenkých vrstev Sn a jeho sloučenin

Při přípravě ultratenkých vrstev lze použít několik metod. Nejčastější jsou metody MBE a modifikace CVD pro přípravu vrstev a nanostruktur α -cín, SnO_2 , GeSn , ...

4.5.1 Depozice Sn a jeho sloučenin metodou CVD

Touto metodou se nejvíce připravují sloučeniny GeSn , či SiSnGe . Tyto materiály mají zajímavé vlastnosti, protože jsou polovodiče s přímým zakázaným pásem. To umožňuje rychlou odezvu a vhodnou elektronovou strukturu pro mnohé fotoelektrické a polovodičové součástky. Další výhodou těchto slitin je jejich kompatibilita se substrátem Si , což zvyšuje jejich využitelnost v polovodičovém průmyslu [46, 47].

Při růstu GeSn , SiSnGe metodou CVD se jako prekursorů využívají plyny SnCl_4 a SnD_4 ¹¹ [46]. Růst probíhá ve vakuové CVD komoře, do které se umístí substrát ošetřený kyselinou fluorovodíkovou. Pro růst vrstev SiSnGe se nejprve vpustí do reakční komory plyny silan SiH_4 , GeH_4 , prekursorů Si a Ge a Ar , který zde slouží jako nosný plyn. Až následně se přidává SnD_4 , protože se rychle rozpadá a jeho zdroj musí být chlazen [46].

Laserem indukovaná chemická depozice z plynné fáze

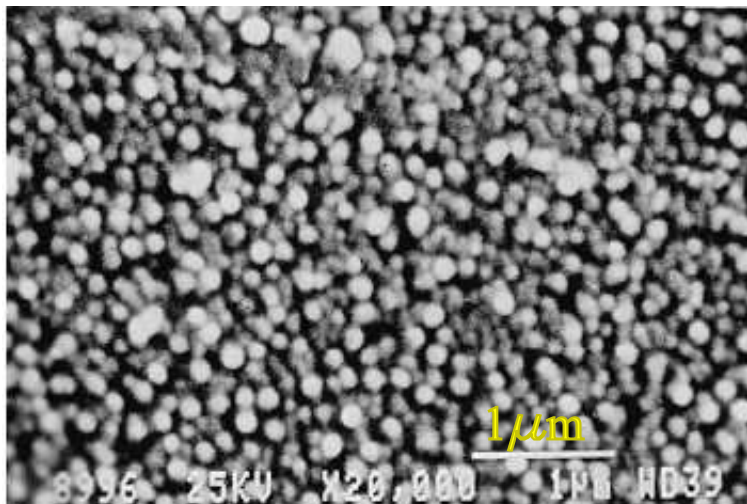
Metodou Laserem indukované chemické depozice z plynné fáze (L-CVD¹²) lze vytvořit ultratenké vrstvy SnO_2 . Tento polovodič má relativně široký zakázaný pás energií, okolo $E_g = 3,6$ eV. Spektrum použití vrstev SnO_2 je široké. Lze z něj vytvořit transparentní elektrody, plynové senzory, či vrstvy do solárních článků [48].

Touto metodou lze růst SnO_2 na substrátu Si (100), který je před depozicí očištěn a vyžlhlán. Prekursorů pro růst Sn mohou být plyny SnCl_4 [49] či $\text{Sn}(\text{CH}_3)_4$ (TMT¹³.) [50]. Vlivem působení pulsů laseru dochází k reakcím, při kterých se ve vakuové aparatuře vytváří z prekursorů ultratenké vrstvy SnO_2 . Při použití nahřívajícího substrátu a masky na odclonění laseru, lze vytvořit na povrchu libovolné struktury. Zahřívání substrátu k teplotám okolo $T = 300$ °C (Obr.4.8), zamezuje růstu amorfni vrstvy SnO_2 [49].

¹¹Deuterid ziničitý, anglicky *tin deuteride*.

¹²Anglicky *laser assisted chemical vapor deposition*.

¹³Tetramethylcín



Obr. 4.8: SEM snímek struktury SnO_2 při nahřátí substrátu na teplotu $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$. Je zde vidět, že se netvoří amorfni struktura. Převzato a upraveno z [49].

Metalorganická chemická depozice z plynné fáze

Další metodou je MOCVD, kterou lze vytvářet nejen SnO_2 , ale také jiné sloučeniny jako například sloučeniny FeSn .

SnO_2 lze růst na safírovém substrátu v různých orientacích za použití prekurzorů tetraethylcínu $\text{Sn}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ a O_2 [51, 52]. Jako nosič metalorganické sloučeniny se využívá plynný dusík N_2 . Při správném nastavení tlaků prekurzorů vstupujících do reakční komory a vhodném zahřátí vzorku lze vytvořit kvalitní až jednovrstevný film SnO_2 .

Slitinu FeSn lze získat použitím prekurzorů $\text{CpFe}(\text{CO})_2(\text{SnMe}_3)$ a $\text{cis-Fe}(\text{CO})_4(\text{SnMe}_3)_2$. V tomto případě stačí vždy pouze jeden z těchto prekurzorů obsahující obě klíčové složky Sn a Fe . Organokovový prekurzor se udržuje na teplotách $T = 19\text{ }^\circ\text{C}$ a může být pomocí N_2 dopraven do depoziční komory, kde se na zahříváném substrátu ($500 - 800\text{ }^\circ\text{C}$) vytváří ultratenké vrstvy ve složení FeSn , nebo FeSn_2 [53]. Tyto vrstvy jsou zajímavé z pohledu vývoje intermetalických vrstev, kdy stačí pro vytvoření použít pouze jeden prekurzor pro slitinu dvou kovů.

4.5.2 Příprava ultratenkých vrstev metodou MBE

Metodou MBE lze růst nanostruktury Sn a jeho sloučeniny jako například GeSn [54, 55], SnO_2 [56], a jiné. V současné době je věnována velká pozornost růstu α -cínu, který lze touto metodou vytvářet.

α -cín

Příprava vrstvy α -cínu je obtížná kvůli zachování polovodičové struktury cínu, který se při vyšších teplotách přeměňuje na kovový β -cín. Ovšem u ultratenkých vrstev nastává přeměna pro vrstvy do tloušťky 1 μm až od $T = 120^\circ\text{C}$ [57].

Ultratenké vrstvy α -cínu s polovodičovými vlastnostmi lze úspěšně růst na substrátech s podobnými mřížkovými parametry, které má cín. Jako substráty se využívají InSb či CdTe, kde je jejich nesoulad mřížkových parametrů pouze 0,14 %. Je také možné použít substráty GaSb, Ge nebo Si, u kterých je shoda s mřížkových parametrů menší [57].

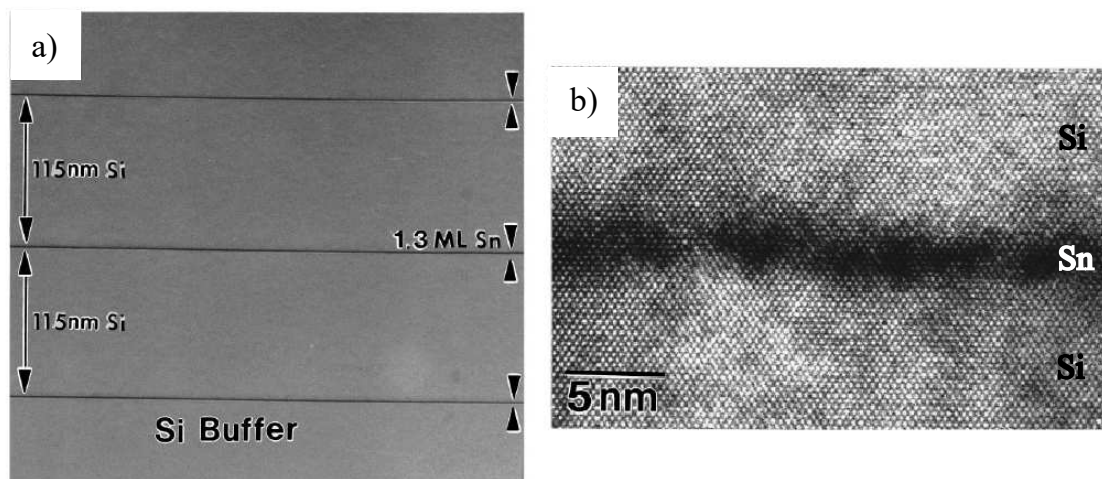
Depozice α -cínu na substrát InSb (100) probíhá po očištění substrátu chemicky, pomocí iontového odprašování a tepelně. Pro depozici je nutno efuzní celu cínu zahřát až na teploty $T = 1100^\circ\text{C}$, kdy začne proudit tok neutrálních atomů cínu o ekvivalentním tlaku svazku přibližně $p = 3 \cdot 10^{-7}$ Torr. Během depozice je důležité zamezit ohřevu substrátu, způsobené osvitom svazku vycházejícího z kalíšku. Tento ohřev může způsobit přeměnu z α -cínu na β -cín. V první fázi lze růst cín vrstvu po vrstvě. Při tloušťce nad 50 nm začne převládat ostrůvkový růst a nad 300 nm už dochází k poškozování vrstvy cínovým morem [58].

Velmi zajímavou oblastí je studium růstu cínu vrstvy v kombinaci s křemíkem Si (100). Cín a křemík mají velmi rozdílné mřížkové parametry a to až o 19,5 %. Tento nedostatek se řeší nanášením krycí vrstvy křemíku. Nejprve se substrát pokryje při teplotě $T = 550^\circ\text{C}$ vyrovnávací vrstvou, viz Obr. 4.9, na kterou se nadeponuje při stejné teplotě substrátu ultratenká vrstva cínu. Teplota efuzní cely cínu je držena na teplotách okolo $T = 700^\circ\text{C}$. Poté se substrát ochladí na $T = 150^\circ\text{C}$ a velmi pomalou depozicí se nanese přibližně 5 nm vyrovnávací vrstvy křemíku. Tato vrstva se vytváří, kvůli tvorbě amorfního křemíku na cínu při rychlém růstu a vysokých teplotách. Na tuto ultratenkou vrstvu křemíku se může nanést další vrstva Si při vyšších teplotách a rychlosti depozice stjně jako na počátku. Opakovaným postupem můžeme takto vytvořit několik vrstev Sn, jak je ukázáno na Obr. 4.9. Takovéto struktury jsou vhodné pro vytvoření kvantových jam a heterostruktur [59].

GeSn

Slitiny $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$, kde x udává procentuální obsah cínu, jsou vhodné k výrobě různých optoelektronických součástek díky dobrému růstu na křemíku. Také lze této slitiny využít do aplikací namísto čistého germania kvůli zlepšení vodivostních vlastností. Uplatnit se může například jako LED dioda, či vysokorychlostní optický detektor [54].

¹⁵Anglicky *transmission electron microscopy*.



Obr. 4.9: a) Příčný profil heterosturktury Si a Sn měřený transmisním elektronovým mikroskopem (TEM¹⁵). b) Rozhraní Sn a Si při velkém přiblížení. Převzato a upraveno z [59].

Vrstvy $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ se deponují kvůli dobré použitelnosti na substrát Si (001) [54, 55]. Také se mohou deponovat i na jiné substráty jako GaSb [57].

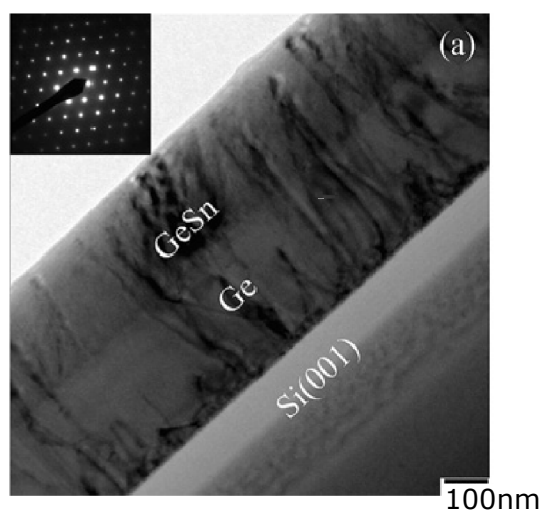
Růst probíhá po očištění a vyžhání substrátu. Nejprve se na substrát nadeponuje vyrovnávací vrstva Ge a poté další vyrovnávací vrstva GeSn za nízkých teplot (100 °C) o tloušťce 25 nm. Nakonec kvalitní vrstva $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ roste při teplotě ~ 200 °C [54]. Pomocí úpravy poměru rychlostí depozice efuzních cel Sn a Ge, pak se dá ovlivnit koncentrace jednotlivých prvků ve slitině, a tím docílit požadovaných vlastností vrstvy. Na Obr. 4.10 je ukázán řez narostlé vrstvy $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$.

Pomocí GeSn se vytváří nanostruktury jako například nanovlákná [60]. Pokud se k GeSn přidá křemík vzniknou vrstvy SnGeSiGe zajímavých polovodičových vlastností, kdy podílem cínu ve vzorku lze snadno upravovat šířku zakázaného pásu SnGeSiGe [61].

SnO₂

SnO₂ je možné také růst pomocí metody MBE [56]. Jako substrát lze použít r-orientovaný safír (101). Samotná depozice je dosaženo pomocí dosažena pomocí elektornového bombardu, který z terče Sn vyráží částice. Ty jsou poté usměrněny do svazku dopadajícího na vzorek. Pro tvorbu oxidu na substrátu se využívá plazmový kyslíkový zdroj. Vhodným nastavením podmínek v UHV aparatuře, pak lze dosáhnout ultratenké vrstvy, kterou lze nakontaktovat a použít jako plynový senzor [56].

¹⁵Anglicky *selected area electron diffraction*.



Obr. 4.10: Řez vzorkem pomocí TEM. Vyrovnávací vrstva Ge na substrátu Si (001) a na ní roste vrstva $\text{Ge}_{0,922}\text{Sn}_{0,078}$. V horním rohu ve výřezu je zobrazen obrazec metodou lokalizovaných difraktovaných elektronů (SAED¹⁷), z něho lze usoudit na hcp mřížku GeSn. Převzato a upraveno z [54].

5 NÁVRH ZDROJE ATOMŮ ZINKU ZN

Záměrem bylo navrhnout komplexní a pokud možno univerzální, snadno nastavitelnou a sestavitelnou efuzní celu.

Před návrhem proběhlo seznámení s konstrukcí efuzní cely, která musela splňovat předem dané požadavky.

5.1 Požadavky na výrobu efuzních cel

Před návrhem byly definovány následující požadavky.

- Technická kompatibilita s UHV komorami
- Dosažení teploty pro depozici
- Měření teploty důležitých částí efuzní cely
- Chlazení efuzní cely
- Homogenita atomárního svazku
- Přesné dávkování deponovaného materiálu

Technická kompatibilita s UHV komorami představuje použití odpovídající standardizované příruby DN 40, což umožní použití efuzní cely v různých laboratořích. Vakuové trubky bezprostředně navazující na přírubu DN 40 mají menší rozměry vnitřního průměru než $\phi 40$ mm. Tato skutečnost se musí vzít v úvahu při návrhu, kdy vnější průměr těla efuzní cely může být maximálně $\phi 35$ mm.

Také musí být použity materiály vhodné do UHV prostředí. Pro efuzní celu zinku, musí být materiály také odolné vůči umístění v oxidačnímu prostředí.

Pro začátek depozice musí dosáhnout materiál nejméně teploty nasycených par. Tato teplota je nejmenší možná pro tvorbu efuzního toku a mění se v závislosti na tlaku okolního prostředí. Na Obr. 5.1 je tato závislost zobrazena pro některé prvky, především pro zinek a cín.

Pro efuzní celu cínu budou tlaky v aparatuře nabývat okolo $p \doteq 10^{-6}$ Pa $\doteq 10^{-8}$ Torr. Proto lze orientačně stanovit nejnižší potřebné teploty v efuzní cele těsně pod 900 °C. Za těchto teplot se cín nachází v kapalně fázi, což může při depozici způsobovat jisté komplikace [45].

V případě zinku je uvažováno o oxidačním prostředí, kde tlaky nabývají hodnot $p \doteq 10^{-4}$ Pa $\doteq 10^{-6}$ Torr. Potřebná teplota v efuzní cele bude dosahovat těsně nad hranici 200 °C [62].

Pro tvorbu vzorků rozměrů 10×10 mm² je třeba navrhnout systém usměrnění atomárního svazku efuzní cely (kolimátorem či dalšími usměrňovacími prvky).

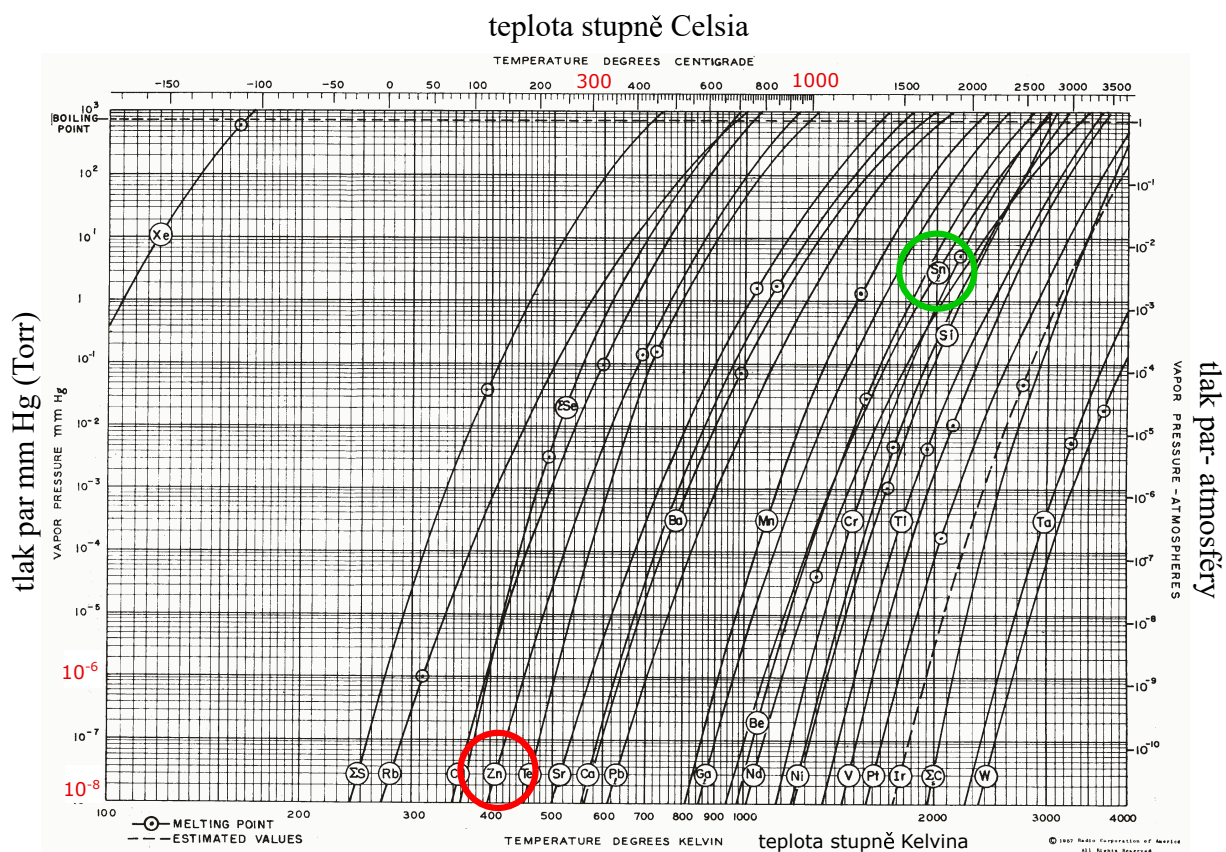


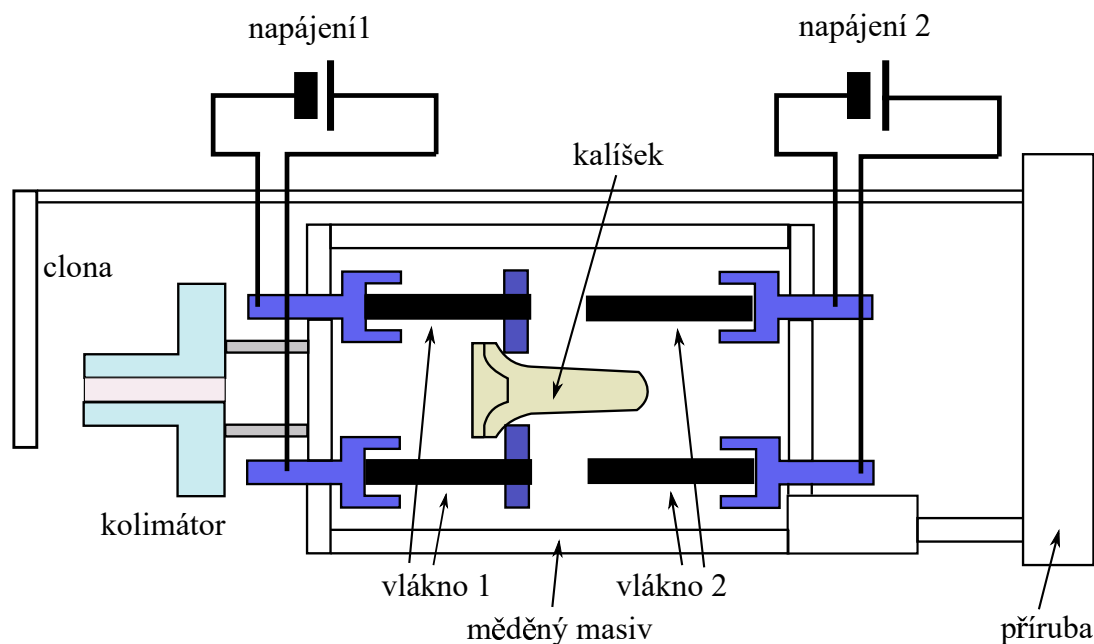
Figure A1(b). Vapor pressure curves for the more common elements (cont.). After Honig (Ref. 5:14).
(Courtesy RCA Laboratories.)

○ Cín
○ Zinek

—●— bod tání
----- odhadované hodnoty

Obr. 5.1: Graf závislosti tlaku nasycených par na teplotě pro různé prvky. Nejdůležitější jsou vyznačené prvky zinek a cín. Z tohoto grafu, lze pak zjistit hodnoty potřebné pro dosažení začátku depozice. Převzato a upraveno [62].

Před popisem jednotlivých částí navrhované efuzní cely pro depozici zinku je nejprve ukázáno její zjednodušené schéma (Obr.6.1). V chladicím masivu jsou umístěny dva odděleně napájené ohřevy a kalíšek s materiálem pro depozici. Mimo masiv jsou prvky pro ovlivnění svazku atomů kolimátor a clona. Vše je napojeno na přírubu zajišťující celou v UHV komoře. V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé části efuzní cely a postup při jejich výrobě. Kompletní návrh efuzní cely byl zpracován v programu Autodesk Inventor.



Obr. 5.2: Schéma efuzní cely zinku.

5.2 Kalíšek

Kalíšek uchycený uvnitř efuzní cely (Obr. 5.3) slouží jako zásobník odpařovaných atomů. Je vyroben z materiálu PBN¹. Ten je prezentován jako čistý a téměř nereaktivní, tudíž vhodný do UHV prostředí. Má dobrou tepelnou vodivost a snáší velmi prudké ochlazení. Přehled jeho základních vlastností je uveden v Tab. 5.1. Všechny jeho vlastnosti z něj činí materiál s vhodnými parametry pro výrobu kalíšku [63].

Ke kalíšku bylo navržen protioxidační víčko (kryt) také z PBN, viz Obr. 5.3 b), které je umístěno v atomárním zdroji na kalíšku. Kryt kalíšku by měl do značné míry zamezovat oxidaci zinku kyslíkem, a tím zvýšit kvalitu depozice a životnost materiálu v kalíšku.

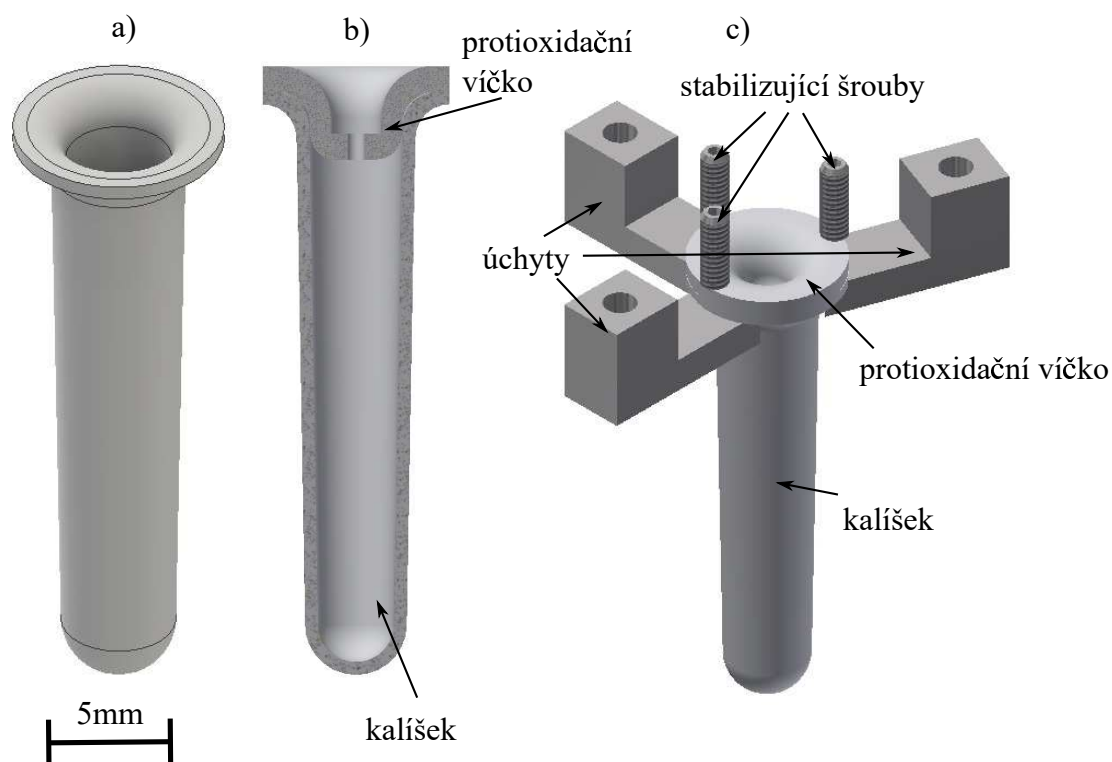
Kalíšek je v efuzní cele uchycen pomocí úchytek spojených s měděným masivem

¹Anglicky *pyrolytic boron nitride*.

Vlastnosti PBN	
maximální teplota	2500 °C
tepelná vodivost	"a" směr $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ "c" směr $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
rezistivita (25 °C)	$10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$
kovové nečistoty	10 ppm ²

Tab. 5.1: Přehled základních vlastností PBN [63].

a z druhé strany stabilizován šrouby vystupujícími z předního krytu, viz Obr. 5.3 c).



Obr. 5.3: a) 3D model kalíšku. b) Řez kalíšku s protioxidačním víčkem. c) 3D model kalíšku s uchycením kalíšku pomocí 3 úchytek a 3 stabilizačních šroubů.

²ppm znamená počet částic z miliónu („particles per million“).

5.3 Ohřev

Pro depozici zinku se teplota napařovaného materiálu pohybuje okolo $T = 300\text{ °C}$. Z důvodu nízkých teplot byl vybrán pro zahřání kalíšku radiační ohřev.

Bylo zvoleno rozdělení radiačního ohřevu na 2 části, připojené na přední a zadní kryt, viz schéma na Obr. ???. Dva ohřevy byly zvoleny především z důvodu rovnoměrného ohřevu celého prostoru kalíšku, jelikož v oblastech kalíšku s nižšími teplotami by mohlo docházet ke kondenzaci zinku. Tento jev je nežádoucí a mohlo by docházet k zanášení otvoru protioxidačního víčka.

Jako nejvhodnější materiály pro tvorbu ohřevu byly shledány Tantal (Ta), Kanthal Super a karbid křemíku (SiC). Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v Tab. 5.2.

Vlastnosti	Tantal	Super kanthal	Rocar SiG (SiC)
maximální pracovní teplota (°C)	~ 2000	~ 1700	~ 1350
tepelná vodivost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	57,5	30	115
rezistivita při 20 °C ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$13,5 \cdot 10^{-6}$	$\sim 5 \cdot 10^{-5}$	$< 1 (\sim 0,024 (400^\circ\text{C}))$
hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	16,4	5,6	3,07

Tab. 5.2: Přehled vlastností tantalu Ta, Super Kanthalu a karbidu křemíku Rocar SiG.

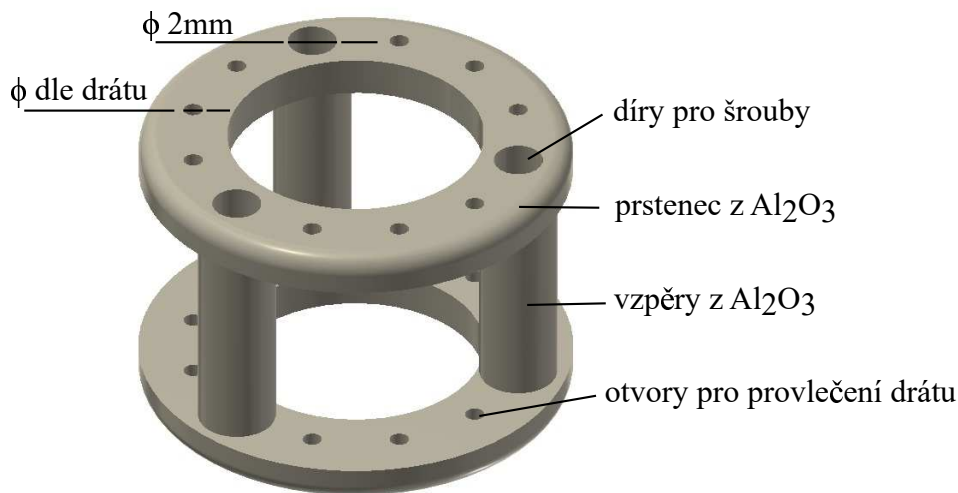
5.3.1 Tantal

Tantal je vzácný modro-stříbrný kov odolný vůči korozi. Díky vlastnostem uvedeným vlastnostem v Tab. 5.2 se jeví jako dobrý materiál pro radiační ohřev [64].

Pro uchycení tantalových drátků byl vytvořen návrh keramické klece z Al_2O_3 , do které lze navléct tantalová vlákna (Obr. 5.4). Tato klec je plně kompatibilní s dalším návrhem. Jako ohřev byl nakonec zvolen karbid křemíku, kvůli lepším vlastnostem do UHV prostředí a menší pravděpodobnosti zkratu.

5.3.2 Super Kanthal

Super Kanthal je složen z molybdenových silicidů. Tento materiál je velmi slibný pro použití do různých plynných atmosfér, avšak za zvýšených teplot má tendenci oxidovat za tvorby MoO_3 , vlastnosti viz Tab. 5.2. Pro efuzní celu zinku tento materiál nelze vybrat, z důvodu přítomnosti oxidačního a UHV prostředí, pro které není zcela kompatibilní [65].

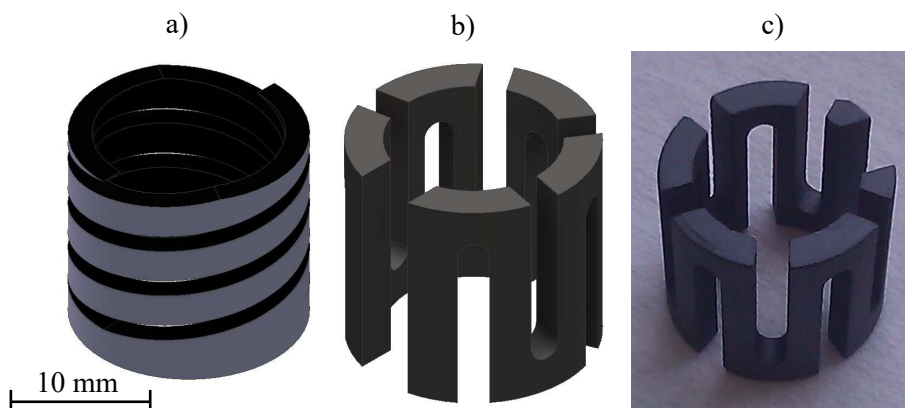


Obr. 5.4: Návrh klece pro ohřev pomocí tantalového vlákna.

5.3.3 Karbid křemíku

Karbid křemíku je velmi inertní a tvrdý materiál s malou tepelnou roztažností a rezistivitou danou poměrem obsahu křemíku a uhlíku. Vyradí teploty do $T = 1800^{\circ}\text{C}$.

Z různých druhů karbidu křemíku společnosti CeramTec byl vybrán typ Rocar SiG [66]. Rocar SiG je černý polovodič s vhodnými vlastnostmi pro tvorbu radiačního ohřevu (viz. Tab. 5.2). Ovšem kvůli výrobě lisováním z něj nelze vyrobit klasické vlákno. Z tohoto důvodu byly navrženy byly dva typy ohřevů z materiálu Rocar SiG – šroubovice (Obr. 5.5 a)) a válce se zářezy (Obr. 5.5 b)). Jelikož v efuzní cele jsou rozměry velmi malé, technologie firmy CeramTec umožnila vyrobit pouze variantu se zářezy. Fotografie vyrobeného ohřevu se zářezy z karbidu křemíku je na Obr. 5.5 c).



Obr. 5.5: 3D model a) ohřevu ve tvaru šroubovice a b) ohřevu ve tvaru válce se zářezy. c) Fotografie vyrobeného ohřevu se zářezy z karbidu křemíku.

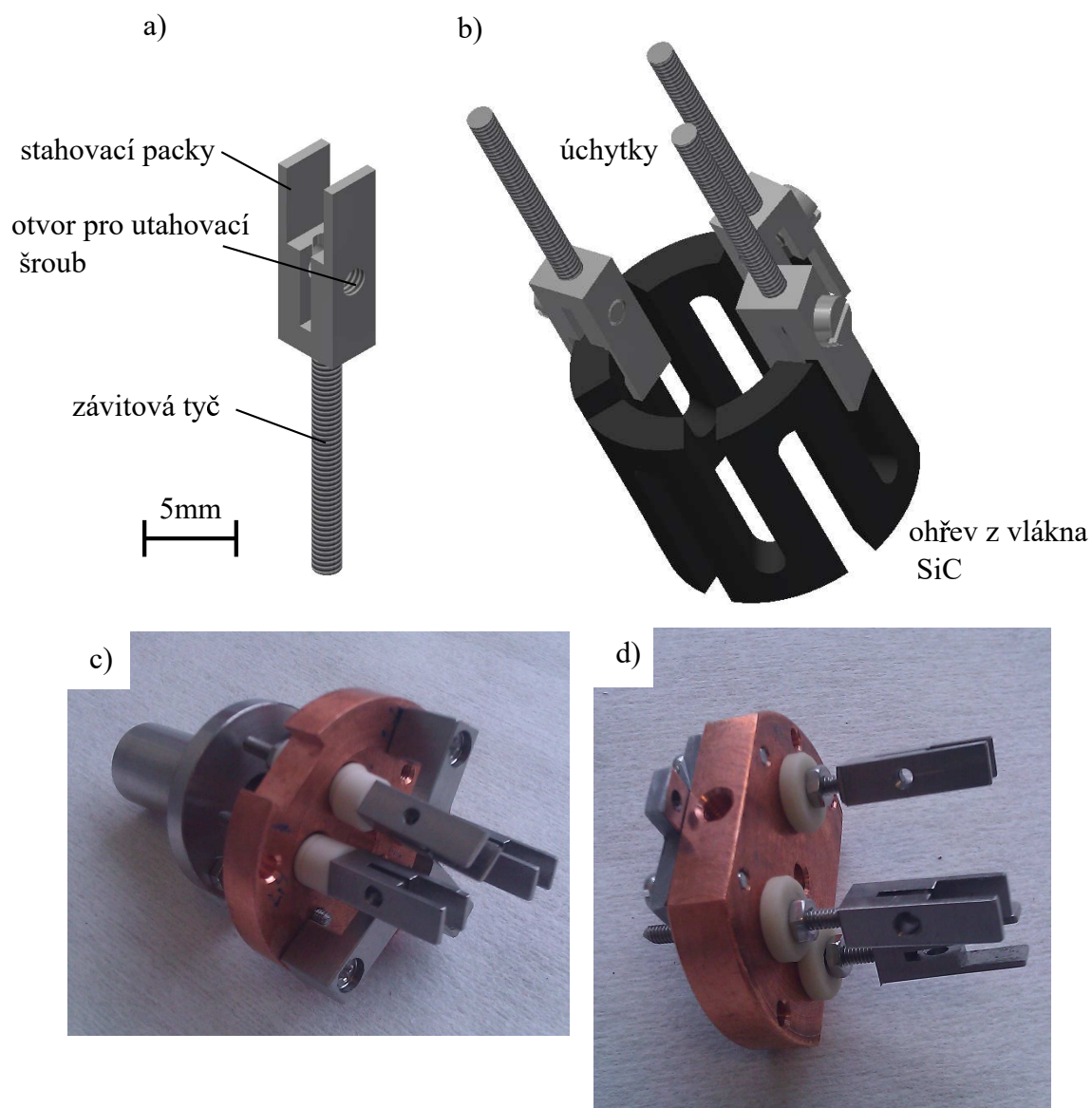
Dále byl proveden výpočet teoreticky potřebného proudu požadovaného pro získání patřičných teplot ohřevu.

Z průřezu a délky ohřevu při uvažované rezistivitě $0,024 \Omega \cdot \text{cm}$ (Tab. 5.2) lze pomocí vztahu (3.4) spočítat teoretickou hodnotu odporu $R_{\text{teor}} \doteq 6,3 \Omega$. Ze vztahů (3.1),(3.2) při známé velikosti povrchu SiC vlákna $S = 2,294 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ a možné maximální teplotě užití vlákna $T_{\text{max}} = 1350 \text{ }^\circ\text{C}$, je možné zjistit vyzařovaný výkon P . Poté již z rovnice (3.3) vyjde hodnota proud potřebná pro zahřátí $I_v \doteq 12 \text{ A}$.

Výpočet I_v platí pro zidealizovanou soustavu, proto bude efuzní cela dimenzována na elektrický proud $I_v = 15 \text{ A}$.

Pro ověření alespoň přibližné platnosti vypočtené hodnoty proudu I_v , bylo provedeno proměření vyrobených ohřevů při pokojové teplotě. Naměřená hodnota odporu topné těleso byla $R_{\text{real}} \doteq 7,1 \Omega$. Rocar SiG je polovodič, tedy při vysokých teplotách by měla jeho rezistivita klesat. Hodnota odporu R_{real} naměřená při pokojové teplotě je lehce větší než R_{teor} při pracovní teplotě 400°C . Vypočtené hodnoty tedy mohou přibližně odpovídat reálným hodnotám.

Oba ohřevy jsou připevněny pomocí tří držáků (Obr. 5.6) k přednímu a zadnímu krytu měděného masivu. Dva z držáků jsou zároveň použity jako kontakty přivádějící proud. Úchyt SiC ohřevu jsou proveden stahováním pacek úchyty šroubem.



Obr. 5.6: 3D model a) úchytky SiC vlákna sloužící také k přivedení elektrického napětí a b) přichycení úchytek k SiC vláknu. c) Fotografie připevnění úchytek k přednímu krytu masivu a d) připevnění úchytek k zadnímu krytu.

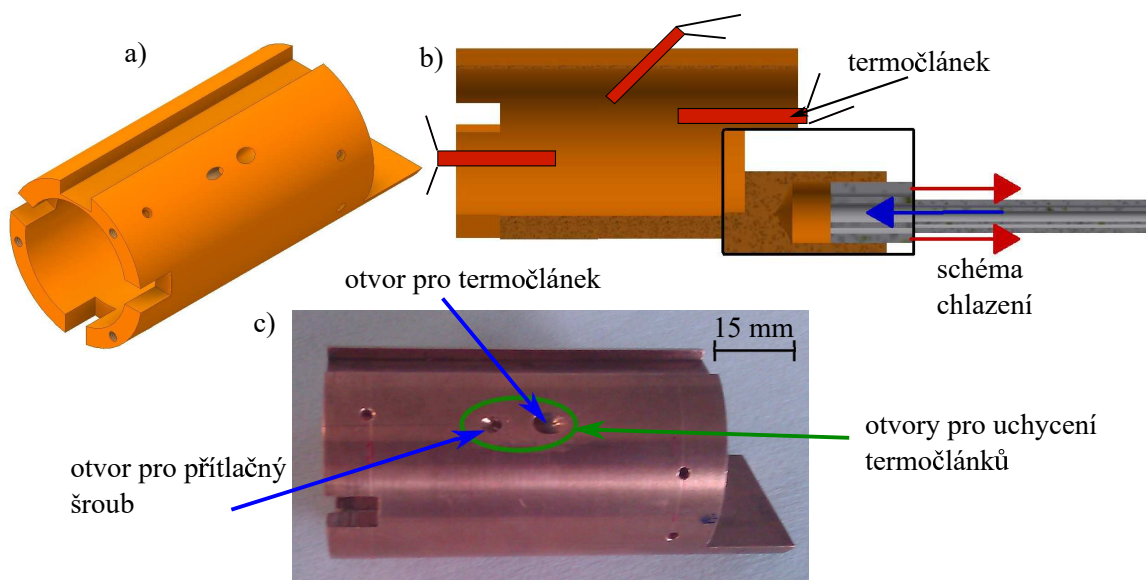
5.4 Měděný masiv s chlazením

Vlákno i kalíšek je umístěn uvnitř měděného válce (masivu) (Obr. 5.7). Měděný masiv má vnitřní průměr $\phi_i = 26$ mm a vnější průměr $\phi_o = 34$ mm. Pro výrobu masivu byla užita bezkyslíkatá měď³. Díky vysoké čistotě je měď vhodná do UHV prostředí i při vysokých teplotách. Bezkyšlíkatá měď má výbornou tepelnou vodivost, a proto se používá také jako chladicí element. Pomocí přívodu proudící vody koaxiální trubicí lze z masivu úspěšně odvádět teplo.

Na Obr. 5.7 b) je znázorněna funkce chlazení, kdy studená voda je vháněna vnitřní trubicí do otvoru v měděném masivu, a přebytečné teplo kumulující se v mědi, je odváděno vodou vystupující vnější části koaxiálu.

Měděný masiv je z přední i zadní strany uzavřen kryty, které jsou rovněž vyrobeny z bezkyslíkaté mědi. Na těchto krytech jsou uchyceny kontakty ohřevů. K přednímu krytu je zároveň připevněn kolimátor a kalíšek.

Důležitou součástí efuzní cely je kontrola teploty, která bude uskutečněna pomocí termočlánků. Tyto termočlánky budou umístěny v prostoru efuzní cely a zajištěny pomocí přitlačných šroubů (Obr. 5.7 c)). Kontrola teploty bude probíhat v prostoru před kalíškem, na spodní straně kalíšku a také v blízkosti ohřevu (5.7 b)).



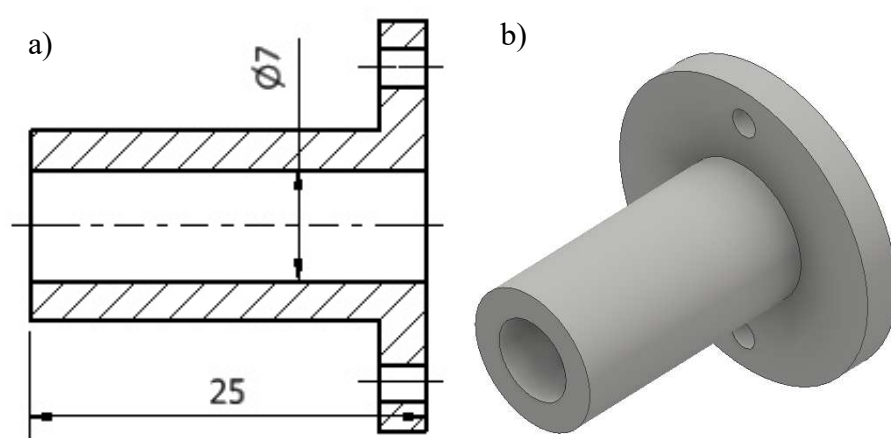
Obr. 5.7: a) 3D návrh chladicího měděného masivu. b) Řez masivem s přiblíženým chlazením, kde studená voda je přiváděna vnitřní trubicí koaxiálu a teplo nakumulované na masivu je poté odváděno vodou vnější trubicí. V řezu je vyobrazena také ukázka umístění termočlánků v efuzní cele. c) Fotografie masivu s vyznačenými otvory pro uchycení termočlánku.

³Anglicky *oxygen-free copper*. Tento materiál dosahuje čistoty 99,995 %.

5.5 Kolimátor

Kolimátor z nerezové oceli (Obr. 5.8) je připevněn k chladicímu masivu pomocí závitových tyčí. Nejdůležitější parametry kolimátoru jsou délka štěrbiny $l = 25$ mm a šířka štěrbin $d = 7$ mm. Z těchto hodnot lze stanovit dle rovnice (2.10) redukční konstantu $\xi \doteq 0,37$.

Z parametrů kolimátoru lze určit za použití vztahu (2.12) úhel poloviční intenzity $\theta_{0,5} = 13,5^\circ$. Pro vzorky o rozměrech 10×10 mm² lze díky znalosti úhlů $\theta_{0,5}$ přibližně určit ideální pracovní vzdálenost od konce kolimátoru ze zjednodušené geometrie problému $\frac{5[mm]}{b} = \text{tg}(\theta_{0,5})$, pak $b \doteq 21$ mm.

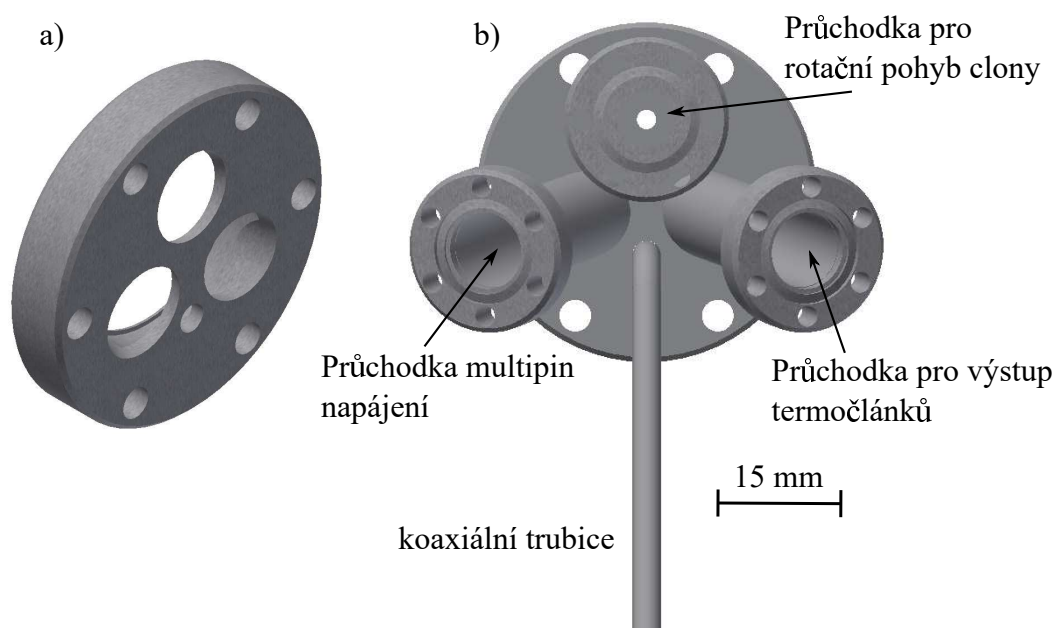


Obr. 5.8: a) Náčrsek kolimátoru s vyznačenými průměrem štěrbin d a délkou l . b) 3D model kolimátoru.

5.6 Příruba

Dle zadání byl použit standard příruby DN40 (Obr.5.9 a)). Na přírubu musí být umístěno několik vakuových průchodek, odpovídajících velikostí přírub DN 16.

Na příruby DN 16 je napojena průchodka napájení dvou ohřevů, která budou uskutečněna přes napájecí multipin, s odolností až do 16 A. Dále je připojen výstup termočlánků a rotační průchodka pro clonu, zajišťující správné dávkování deonovaného materiálu. Nedílnou součástí sestavené příruby je koaxiální trubice chlazení (Obr.5.9 b)).



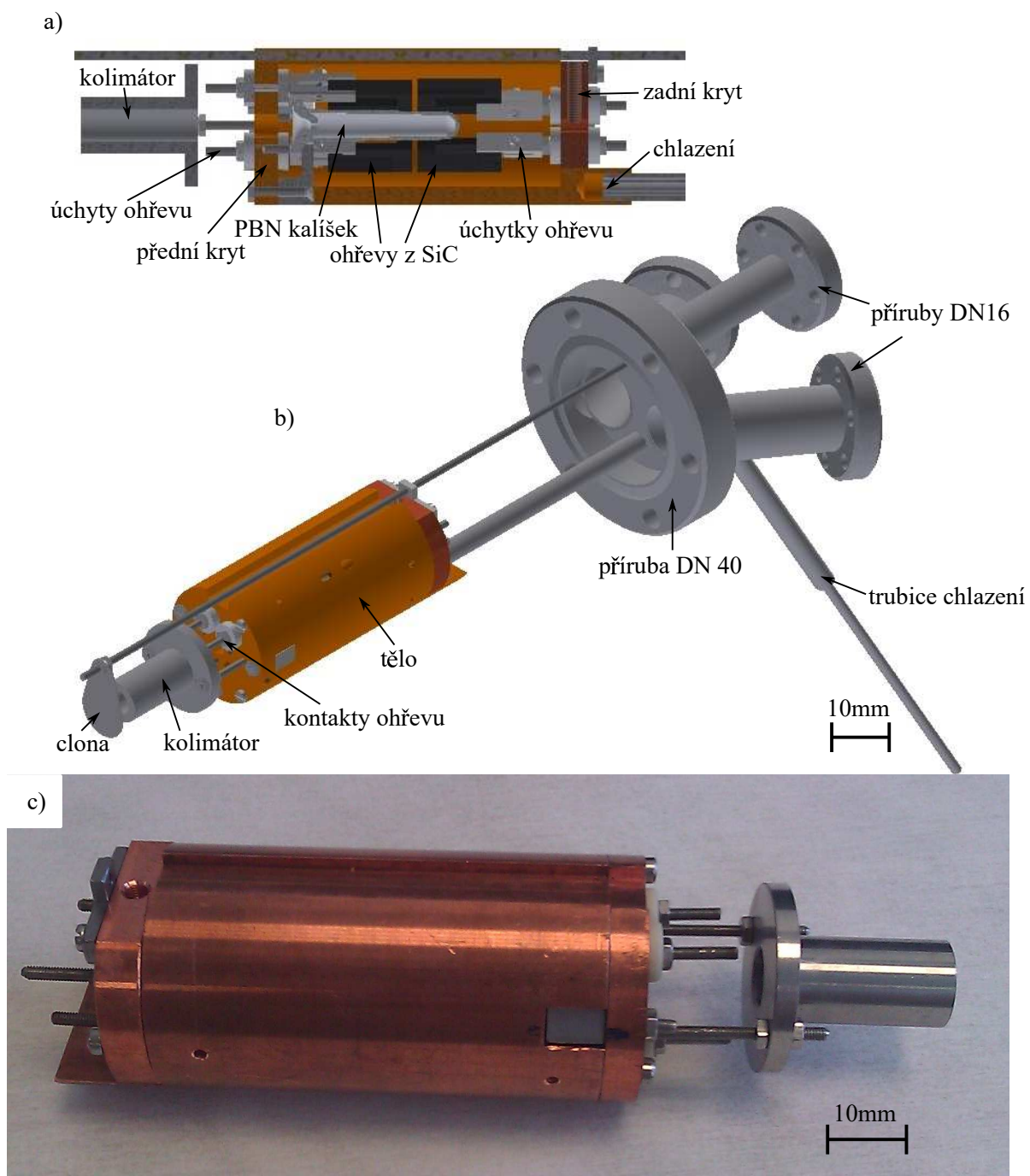
Obr. 5.9: 3D modely a) příruby DN 40 pro efuzní celu zinku, b) pohled na uspořádání průchodek na přírubě.

5.7 Celková sestava efuzní cely

K sestavení efuzní cely jsou použity šroubové spoje. Výjimku tvoří měděný masiv s přírubou, které jsou k sobě speciálně pájeny pomocí stříbra, a samotná příruba, která je zkompletována svařováním.

Maximální pracovní teploty $T_{\max}$ takto sestavené efuzní cely bude možné stanovit až po testování ohřevu z karbidu křemíku Rocar SiG. Při dobrých výsledcích bude možné vyzkoušet tuto efuzní celu i pro depozici cínu. V případě sestrojení ohřevu z tantalového vlákna, bude následně vyhodnoceno, který z ohřevů vykazuje lepší vlastnosti.

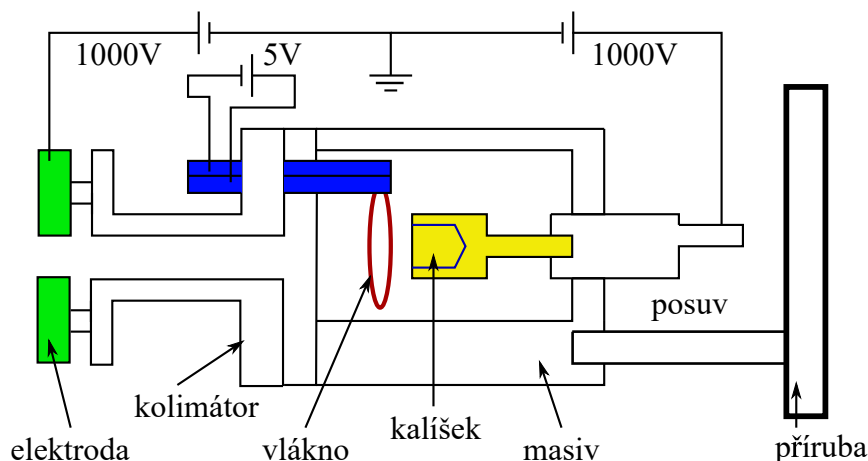
Na závěr této kapitoly je pro ilustraci umístěn 3D model a fotografie doposud vyrobené části efuzní cely (Obr. 5.10). K celkové sestavě efuzní cely byla vypracována kompletní výkresová dokumentace, která je přílohou této práce.



Obr. 5.10: a) Řez tělem efuzní cely. b) 3D model efuzní cely. c) Fotografie sestaveného těla efuzní cely.

6 NÁVRH ZDROJE ATOMU CÍNU SN

Pro depozici cínu bude zřejmě potřeba ohřívat kalíšek na vyšší teploty než, kterých je možné dosáhnout užitím radiálního ohřevu z SiC. Proto byl vytvořen návrh efuzní cely tentokrát s užitím ohřevu urychlenými elektrony. Schéma efuzní cely je zobrazeno na Obr.6.1. Tato efuzní ceta je částečně inspirována bakalářskou prací Ondřeje Křáпка [67].



Obr. 6.1: Schéma efuzní cely pro depozici Sn.

6.1 Ohřev

Ohřev je realizován pomocí wolframového vlákna, které je bodově přivařeno ke kontaktům. Při zahřívání wolframového vlákna procházejícím proudem, dochází k emitování termoemisních elektronů, které jsou vlivem elektrického pole přitahovány na kalíšek (anodu). Na kalíšek je přivedeno elektrickou průchodkou kladné napětí (1000V) přes zadní část chladicího masivu. Urychlené elektrony dopadají na kalíšek, čímž se zahřívá a následně odpařuje materiál.

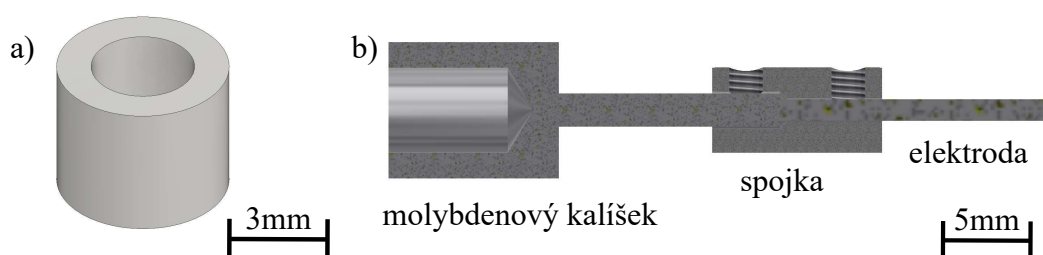
6.2 Kalíšek

Kalíšek je vyroben z molybdenu¹ a je do něj vložena vložka z PBN. Molybden je materiál, který je dobře elektricky a tepelně vodivý, proto se jedná o vhodný materiál pro výrobu kalíšku (vlastnosti viz 6.1). Kalíšek je připojen k elektrické průchodce o vysokém napětí přes spojku, viz Obr. 6.2 b).

¹Čistota molybdenu je 99,95%.

Vlastnosti Molybdenu 99,95%	
teplota tání	2620 °C
tepelná vodivost	142 W · m ⁻¹ · °C ⁻¹
rezistivita (25 °C)	0,052 mΩ · cm
hustota	10,2 g · cm ⁻³

Tab. 6.1: Přehled vlastností Molybdenu 99,95% [68].



Obr. 6.2: a) 3D model vložky z PBN, která se vkládá do molybdenového kalíšku. b) Řez molybdenového kalíšku uchyceného pomocí spojky k elektrodě elektrické průchodky.

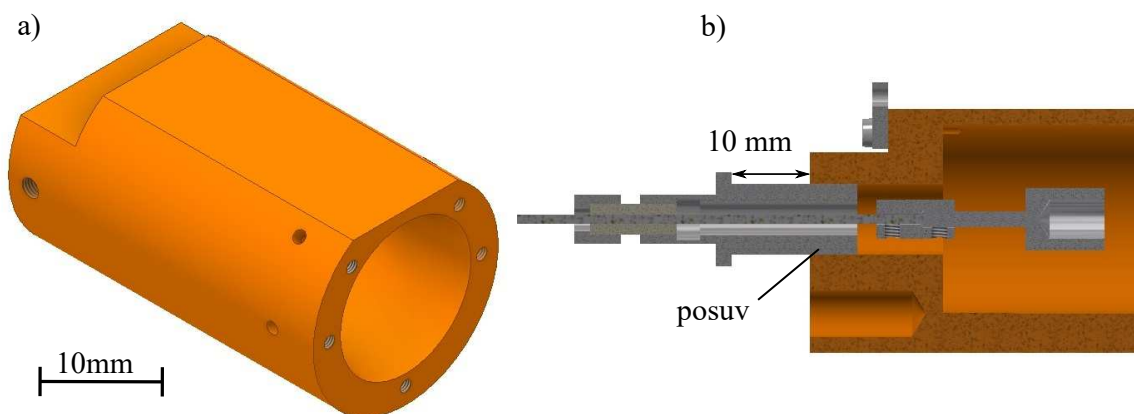
6.3 Měděný masiv s chlazením

Materiálem na výrobu masivu je opět bezkyslíkatá měď a používá se stejné chlazení jako v kapitole 5.4. Tvar měděného masivu je ukázán na Obr. 6.3 a).

Na měděný masiv navazuje kryt přední části, který drží kontakty ohřevu. V zadní části měděného masivu je umístěn otvor pro posuv kalíšku (Obr. 6.3 b)). Posuv je zde důvodu ohřevu dopadem elektronů, kdy vhodným oddálením kalíšku od vlákna lze pozměnit parametry zahřívání kalíšku. Zadní stranou masivu je vyvrtán otvor pro vstup termočláнку pro kontrolu teploty v blízkosti kalíšku.

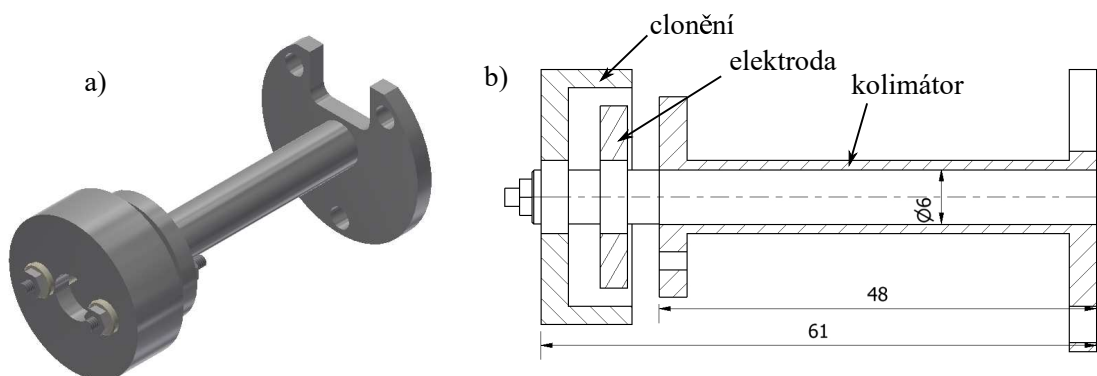
6.4 Kolimátor

Tvar kolimátoru je oproti efuzní cele pro depozici zinku změněn, viz Obr. 6.4. Základním rozdílem je výřez pro vstup kontaktů a hlavně umístění elektrody na výstupu z kolimátoru. Elektroda o kladném napětí odklání ionty vzniklé srážkami urychlených elektronů s vypařovanými neutrálními atomy. Poslední částí kolimátoru je odstínění elektrody, tak aby volně nepůsobila do UHV aparatury.



Obr. 6.3: a) 3D model měděného masivu. b) Řez částí modelu. Na obrázku je zásuvný člen plnící funkci posuvu kalíšku a ve spodní části otvor pro chlazení.

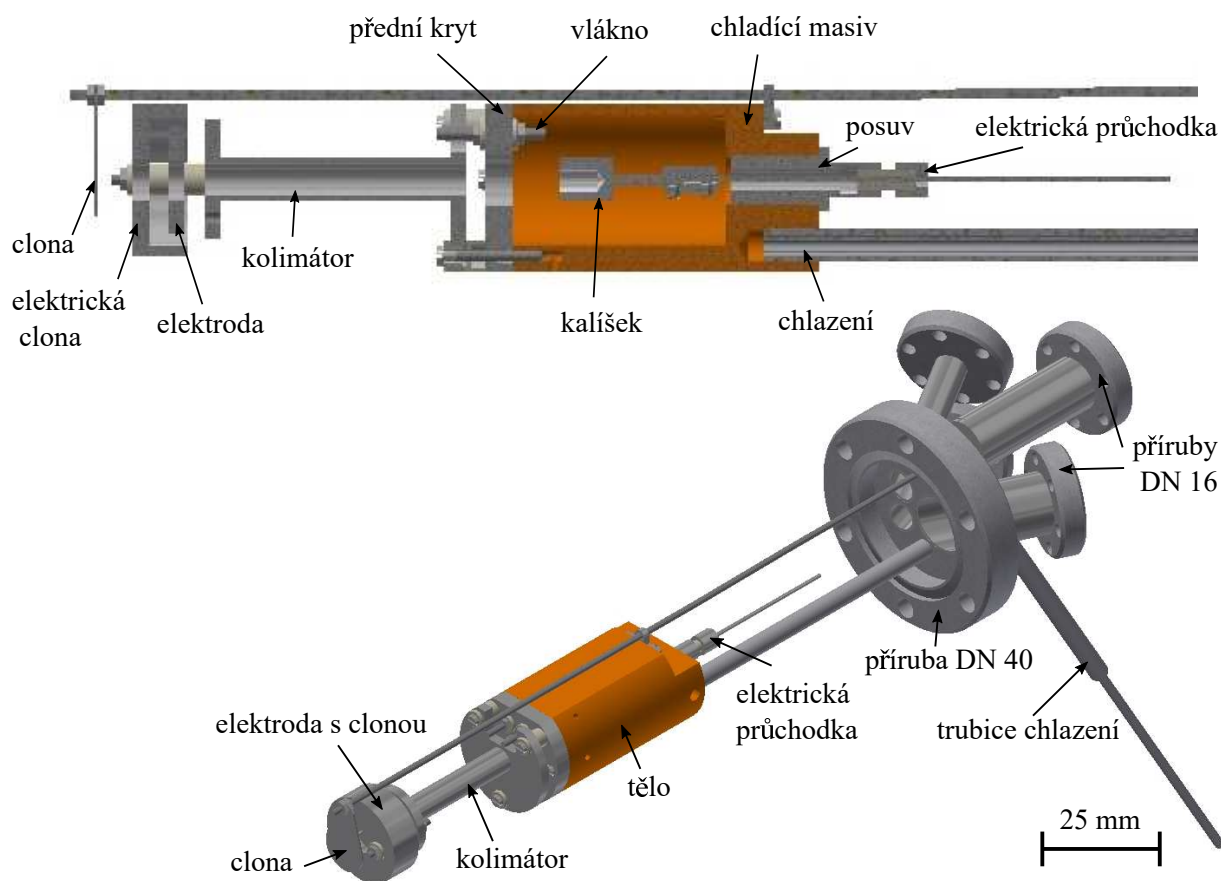
Základními parametry kolimátoru, jsou průměr štěrby $d = 6$ mm a délka štěrby $l = 48$ mm. Z těchto parametrů kolimátoru lze získat odhad redukčního koeficientu $\xi = 0,16$, úhlu poloviční intenzity $\theta_{0,5} = 6^\circ$ a pracovní vzdálenost $b \doteq 47,5$ mm



Obr. 6.4: a) 3D model kolimátoru s elektrodou. b) Náčrtek řezu kolimátoru efuzní cely pro depozici Sn s vyznačenými důležitými rozměry a především průměrem štěrby d a délky kolimátoru l .

6.5 Celková sestava

Na závěr je uveden řez a 3D model efuzní cely (Obr. 6.5). Také k této efuzní cele byla zkompletována celá výkresová dokumentace, která je přílohou této práce.



Obr. 6.5: a) Řez tělem efuzní cely cínu. b) 3D model efuzní cely.

7 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout a otestovat efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev zinku a cínu, které budou používány v laboratořích ÚFI. Zásadním problémem bylo navržení zadaných efuzních cel, tak aby byla umožněna depozice v oxidačním nebo UHV prostředí.

Na začátku práce bylo provedeno seznámení s teorií atomárních zdrojů, jejich principy fungování a konstrukcí. Poté byla provedena rešeršní studie depozice a tvorby ultratenkých vrstev a nanostruktur cínu, zinku a jejich sloučenin. Byly studovány různé metody přípravy ultratenkých vrstev (MBE, CVD, PLD). Právě metoda MBE je vhodná k využití námi vyráběných efuzních cel.

Souběžně s rešeršní studií probíhal návrh efuzních cel zinku a cínu v programu Autodesk Inventor, v kterém byla vyhotovena celková výkresová dokumentace obou efuzních cel. Výkresy a 3D modely jednotlivých součástí a sestav jsou umístěny přílohách této práce.

Hlavním problémem bylo vybrání materiálů pro výrobu efuzních cel, aby byla zajištěna kompatibilita s oxidačním a zároveň UHV prostředím. Tepelně namáhané součásti těla efuzních cel byly vyrobeny z bezkyslíkaté mědi. Na kalíšek byl použit v případě zinkové cely materiál PBN, a pro efuzní celu cínu byl použit molybden s PBN vložkou. Rozdílně byly navrženy ohřevy jednotlivých cel. Pro zinek byl použit radiální ohřev vyroben z inovativního polovodičového materiálu karbidu křemíku (Rocar SiG od firmy Ceramtec) o speciálně vytvořeném tvaru. V případě efuzní cely cínu byl použit ohřev dopadem termoemisních elektronů z wolframového vlákna.

Navržené součástky byly následně zadány do výroby, ale bohužel s ohledem na dlouhé dodací lhůty součástí, bylo zatím sestaveno pouze tělo efuzní cely pro depozici zinku (Obr. 5.10 c)). U ostatních součástí se čeká na dodání, po němž proběhne sestavení a následné testování efuzních cel.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] PAULY, H.: *Atom, Molecule, and Cluster Beams I*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2000. ISBN 978-3-642-08623-6.
- [2] ORTON, J.; FOXON, T.: *Molecular Beam Epitaxy: A Short History*. Oxford: Oxford University Press, 2015. ISBN 978-0-19-969582-9.
- [3] SHUZO, H.; TOSHIRO, T. et al.: Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on progress in physics* 2009, č.72, 29 s., DOI:10.1088/0034-4885/72/12/126501.
- [4] MORESSI, L.: *Silicon Based Thin Film Solar Cells: Molecular beam epitaxy*. Bentham Science, 2013, s. 81-107. DOI: 10.2174/9781608055180113010008.
- [5] ARTHUR, J. R.: Molecular beam epitaxy. *Surface Science*. 2002, s.189-217. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01525-4.
- [6] MACH, J.: *Vývoj a aplikace UHV zařízení pro depozice tenkých vrstev (Atomární a iontové svazkové systémy)*[Dizertační práce]. Brno: VUT, FSI, 2009, 103 s.
- [7] BOZOVIC, I.; ECKSTEIN, J. N.; BOZOVIC, N.: *In Situ Process Diagnostics and Intelligent Materials Processing: Reflection High-Energy Electron Diffraction as a Tool for Real-Time Characterization of Growth of Complex Oxides*. Wiley Science, 2000, s. 29-56.
- [8] VÁLYI, L.: *Atom and Ion Sources*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1977, 429 s., ISBN 963 05 1113 4.
- [9] HOLIDAY, B.; REZNIK, A.; WANKER B.: *Fyzika 1, 2* České vydání (Dub, P.), Brno: Vutium, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [10] Periodic Table: Zinc. *Royal society of chemistry*[online].[cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/30/zinc>.
- [11] ONGA, H. C.; Chang R. P. H.: Optical constants of wurtzite ZnS thin films determined by spectroscopic ellipsometry. *Applied Physics Letters*. 2001, č. 22, s. 3612-3614. DOI: 10.1063/1.1419229.
- [12] MASUDA, H.; FUKUDA, K.: Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*. 1995, s. 1466-1468.

- [13] KREBS, H.- U.; WEISHEIT, M. et al.: Pulsed Laser Deposition (PLD) – A Versatile Thin Film Technique. *Advances in Solid State Physics*. 2003, č. 43, p. 505-518.
- [14] JIANGAN, D.; HONGBO, S. et al.: Properties of ZnO films grown on (0 0 1) sapphire substrate using H₂O and N₂O as O precursors by atmospheric pressure MOCVD. *Journal of Crystal Growth*. 2006, č. 290, s. 426–430, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2006.01.009.
- [15] EL-SHAER, A.; CHE MOFOR, A. et al.: High-quality ZnO layers grown by MBE on sapphire. *Superlattices and Microstructures*. 2005, č. 38, s. 265-271. DOI:10.1016/j.spmi.2005.08.025.
- [16] SHUZO, H.; TOSHIRO, T. et al.: Reversible Coloration Enhanced by Electrochemical Deposition of an Ultrathin Zinc Layer onto an Anodic Nanoporous Alumina Layer *Advanced function materials*, 2012., s. 4195- 4201. DOI: 10.1002/adfm.201200353.
- [17] FAN, X. M.; LIAN, J.S. et al.: ZnO thin film formation on Si(1 1 1) by laser ablation of Zn target in oxygen atmosphere. *Journal of Crystal Growth*. 2005, č. 279, s. 447–453. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.02.065.
- [18] VALERINI, D.; CARICATO, A. P. et al.: Zinc oxide nanostructures grown by pulsed laser deposition. *Applied Physics A. Materials science and processing*. 2008, č. 93, s. 729–733. DOI: 10.1007/s00339-008-4703-z.
- [19] HANA, S.K.; HONGA, S.K. et al.: Structural and optical properties of non-polar A-plane ZnO films grown on R-plane sapphire substrates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth* . 2007, s. 121–127. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.09.025.
- [20] HANA, S.K.; HONGA, S.K. et al.: Structural and optical properties of non-polar A-plane ZnO films grown on R-plane sapphire substrates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth* . 2007, s. 121–127. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2007.09.025.
- [21] PROCHÁZKA, P.: *Příprava grafenu metodou CVD*[Diplomová práce]. Brno: VUT, FSI, 2012, 65 s.
- [22] WANG, L.; PU, Y. et al.: MOCVD growth of ZnO films on Si(1 1 1) substrate using a thin AlN buffer layer. *Journal of Crystal Growth*. 2005, č. 284, s. 459–463, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2005.06.058.

- [23] PERILLAT-MERCEROZ, G.; JOUENAU, P. H. et al.: MOCVD growth mechanisms of ZnO nanorods. *Journal of Physics: Conference Series*. 2010, č. 209, s. 1-4, doi: 10.1088/1742-6596/209/1/012034.
- [24] ROSINA, M.; FERRET, P. et al.: Morphology and growth mechanism of aligned ZnO nanorods grown by catalyst-free MOCVD. *Microelectronics Journal* . 2009, č. 40, s. 242–245, doi:10.1016/j.mejo.2008.07.019.
- [25] BAKINA, A.; EL-SHAER, A. et al.: MBE growth of ZnO layers on sapphire employing hydrogen peroxide as an oxidant. *Journal of Crystal Growth*. 2006, č. 287, s. 7-11. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.10.033.
- [26] HEO, Y. W.; Ip, K. et al.: Growth of ZnO thin films on c-plane Al₂O₃ by molecular beam epitaxy using ozone as an oxygen source. *Applied Surface Science*. 2006, č. 252, s. 7442–7448. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.08.094.
- [27] KAWAMOTO, N.; FUJITAZ, M. et al.: Growth of ZnO on Si Substrate by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy. *The Japan Society of Applied Physics*. 2003, č.12, s. 7209–7212. DOI: 10.1143/JJAP.42.7209.
- [28] DING, P.; PAN, X. et al.: Growth of p-type a-plane ZnO thin films on r-plane sapphire substrates by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Materials Letters*. 2012, č. 71, s. 18- 20. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.12.030.
- [29] LIDE, D. R.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 1998–1999, , 79. edice, ISBN: 0849304792.
- [30] NAKAHARA, K.; TANABE, T. et al.: Growth of Undoped ZnO Films with Improved Electrical Properties by Radical Source Molecular Beam Epitaxy. *Japan. J. Appl. Phys.* 2000, č. 40, s. 250.
- [31] WOOLLEE, J.; KIM, J.-H. et al.: Interface and defect structures in ZnO films on m-plane sapphire substrates. *Journal of Crystal Growth*. 2010, s. 238–244. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.10.023.
- [32] PENG, CH.-Y.; TIAN, J.-S. et al.: Morphology evolution of a-plane ZnO films on r-plane sapphire with growth by pulsed laser deposition *Applied Surface Science*. 2013, č. 265, s. 553– 557. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.11.044.
- [33] Ko, H. J.; Chen, Y. et al.: MBE growth of high-quality ZnO films on epi-GaN. *Journal of Crystal Growth*. 2000, č. 209, s. 816-821.
- [34] IWATA, K.; FONS, P. et al.: ZnO growth on Si by radical source MBE. *Journal of Crystal Growth*. 2000 č. 214/215, s. 50-54.

- [35] NAHHAS, N.; KIMA, H. K.; BLACHERE, J.: Epitaxial growth of ZnO films on Si substrates using an epitaxial GaN buffer. *Applied Physics Letters*. 2001, č.78, s. 1511-1513. DOI: 10.1063/1.1355296.
- [36] WANG, X. N.; WANG, Y. et al.: Low-temperature interface engineering for high-quality ZnO epitaxy on Si(111) substrate. *Applied Physics Letters*. 2007, č. 90, s. 151912-1-151912-3. DOI: 10.1063/1.2722225.
- [37] OSIPOV, A.; KUKUSHKIN, S.A et al.: Structural and optical properties of high quality ZnO thin film on Si with SiC buffer layer. *Thin Solid Films*. 2012, č. 520, s. 6836–6840. DOI: 10.1016/j.tsf.2012.07.094.
- [38] TZOU, A.J.; Chien, K.F. et al.: The study of self-assembled ZnO nanorods grown on Si(111) by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*. 2013, č. 378, s. 466–469. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.12.137.
- [39] JIAN-FENGA, Y.; YOU-MING, L. et al.: Growth and properties of ZnO nanotubes grown on Si(1 1 1)substrate by plasma-assisted molecular beam epitaxy *Journal of Crystal Growth*. 2005, č. 280, s. 206–211. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.03.045.
- [40] LIANG, H. W.; LU, Y. M. et al.: Growth of vertically aligned single crystal ZnO nanotubes by plasma-molecular beam epitaxy. *Solid State Communications*. 2006, č.137, p. 182–186. DOI: 10.1016/j.ssc.2005.11.028
- [41] TRAN, T. K.; PARK, W. et al.: Photoluminescence properties of ZnS epilayers. *Journal of Applied Physics*. 1997, č. 81, s. 2803-2809.
- [42] NAKAMURA, S.; TAKAGIMITO, S. et al.: Structural Characterization of High-Quality ZnS Epitaxial Layers Grown on GaAs Substrates by Low-Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001 12, č. 40, s. 6993.
- [43] YASUDA, T.; YASUI, T.; Segawa, Y.: Optical properties of ZnS and ZnCd-S/ZnS MQW grown by molecular beam epitaxy on GaAs and CaF₂ substrates. *Journal of Crystal Growth*. 1996, č. 159, s. 447-450.
- [44] LOK, S. K.; Wang, G. et al.: Growth temperature dependence of the structural and photoluminescence properties of MBE-grown ZnS nanowires. *Journal of Crystal Growth*. 2009, č. 311, s. 2630–2634. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2009.03.011.
- [45] Periodic Table: Tin. *Royal society of chemistry*[online].[cit. 2016-05-21]. Dostupné z:<http://www.rsc.org/periodic-table/element/50/tin>

- [46] MOSLEH, A.; ALHER, M. et al.: Buffer-Free GeSn and SiGeSn Growth on Si Substrate Using In Situ SnD₄ Gas Mixing *Journal of electronic materials*. 2016, č. 45, p. 2051-2058. DOI: 10.1007/s11664-016-4402-z.
- [47] COOK, C. S.; ZOLLNER, S. et al.: Optical constants and interband transitions of Ge_{1-y}Sn_x alloys (x<0.2) grown on Si by UHV-CVD. *Thin Solid Films*. 2004, č. 455–456, s. 217–221. DOI: 10.1016/j.tsf.2003.11.277.
- [48] IHOKURA, K.; WATSON, J.: *The stannic oxide gas sensor principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, 1994, 208 s., ISBN 9780849326042.
- [49] DAI, G.; Jiang, X.: Excimer laser deposition and characteristics of tin oxide thin films.. *Thin Solid Films*. 1998, č. 320, s. 216–219.
- [50] KWOKA, M.; OTTAVIANO, L. et al.: Influence of Si substrate preparation on surface chemistry and morphology of L-CVD SnO₂ thin films studied by XPS and AFM. *Applied Surface Science*. 2010, č. 256, s. 5771–5775. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.03.093.
- [51] FENG, X.; JIN, M. et al.: Preparation and characterization of single crystalline SnO₂ films deposited on α -Al₂O₃ (0001) by MOCVD. *Materials Letters*. 2008, č. 62, s. 1809–1811. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.10.007.
- [52] ZHU, Z.; MA, J. et al.: Heteroepitaxy of SnO₂ thin films on m-plane sapphire by MOCVD. *Journal of crystal growth*. 2011, č. 324, s. 98–102. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.04.024.
- [53] CHI, K.-M.; LIU, S.-H.; CHIEN, S.-H.: Single-source MOCVD of Fe/Sn alloy thin films. *Chem. Mater.* 2002, č. 14, s. 2028-2032.
- [54] SU, S.; Wang, W. et al.: Epitaxial growth and thermal stability of Ge_{1-x}Sn_x alloys on Ge-buffered Si(0 0 1) substrates. *Journal of Crystal Growth*. 2011, č. 31, s. 43–46. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2011.01.015.
- [55] SHIMURA, Y.; TSUTSUI, N. et al.: Low temperature growth of Ge_{1-x}Sn_x buffer layers for tensile-strained Ge layers. *Thin Solid Films*. 2010, č. 518, s. 2–5. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.044.
- [56] KRONELD, M.; NOVIKOVA, S. et al.: Gas sensing properties of SnO₂ thin films grown by MBE. *Sensors and Actuators B*. 2006, č. 118, s. 110–114. DOI: 10.1016/j.snb.2006.04.006.
- [57] HOSCHTT, H.; ENGELHART, E. et al.: Characterisation of MBE-grown α -Sn films and α -Sn, - x Ge, alloys. *Semicond. Sci. Technol.* . 1990, č. 5, s. 240-244.

- [58] YUENT, W. T.; LIU, W. K. et al.: RHEED studies of the surface morphology of a-Sn pseudomorphically grown on InSb(1 0 0) by MBE-a new kind of non-polar/polar system. *Semicond. Sci. Technol.* 1990, č. 5, s. 375-384.
- [59] MIN, K. S.; ATWATER, H. A.: Ultrathin pseudomorphic Sn/Si and $\text{Sn}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si heterostructures *Applied Physics Letters*. 1998, č. 72, s. 1884-1886, doi: 10.1063/1.121215.
- [60] RAGAN, R.; AHN, C. C.; ATWATER, H. A.: Nonlithographic epitaxial $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$ dense nanowire arrays. grown on Ge(0 0 1) *Applied Physics Letters*. 2003, č. 82, s. 3439-3441.
- [61] DONDL, W.; SILVEIRA, E.; ABSTREITER, G.: MBE growth of ternary Sn-GeSiGe superlattices. *Journal of Crystal Growth*. 1995, č. 157, s. 400-404.
- [62] Vapor Pressure of the Chemical Elements. *PowerStream*[online].[cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.powerstream.com/vapor-pressure.htm>.
- [63] Condensed Product Bulletin: Pyrolytic Boron Nitride. *Momentive* [online].[cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://momentive.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=27499>.
- [64] Periodic Table: Tantalum. *Royal society of chemistry*[online].[cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/73/tantalum>.
- [65] Kanthal Super: Electric heating elements. *Sandvik*[online].[cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating-%20elements/MoSi2%20heating%20elements/S-KA058-B-ENG-2012-01.pdf>.
- [66] ROCAR: Silicon carbide. *Ceramtec*[online].[cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.ceramtec.com/files/cz_rocar_en.pdf.
- [67] Křápek, O.: *Návrh a konstrukce efuzní cely pro přípravu ultratenkých vrstev* [Bakalářská práce]. Brno: VUT, FSI, 2009, 25 s.
- [68] Molybdenum: Molybdenum properties. *Torrey Hills Technology* [online].[cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.torreyhillstech.com/modata.html>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A_s Výstupní plocha kolimátoru

a Délka

b Pracovní vzdálenost

CVD Chemická depozice z plynné fáze („*chemical vapor deposition*“)

d Průměr štěrbinu kolimátoru

E_g Energie zakázaného pásu

hcp Hexagonální krystalová struktura („*hexagonal closed-pack*“)

I Elektrický proud

I_e Intenzita vyzařování

k Boltzmannova konstanta

L-CVD Laserem indukovaná chemická depozice z plynné fáze („*laser assisted chemical vapor dposition*“)

l Délka kolimátoru

MBE Molekulární svazková epitaxe („*molecular beam epitaxy*“)

MOCVD Metalorganická chemická depozice z plynné fáze („*metalorganic chemical vapor deposition*“)

m Hmotnost

N Počet atomů

n Koncentrace atomů

P Výkon radiačního ohřevu

P-MBE Plasmatická molekulární svazková epitaxe („*plasma-assisted molecular beam epitaxy*“)

PLD Pulsní laserová depozice („*pulsed laser deposition*“)

p Tlak

R Odpor

RHEED Difrakce elektronů s vysokou energií na odraz („*reflection high energy electron diffraction*“)

S Celková plocha povrchu tělesa (ohřevu)

S_p Plocha průřezu radiačního ohřevu

SEM Skenovací elektronová mikroskopie („*scanning electron microscopy*“)

T Teplota

TEM Transmisní elektronová mikroskopie („*transmission electron microscopy*“)

T_{max} Maximální pracovní teplota

T_t Teplota tání

T_v Teplota varu

U Elektrické napětí

UHV Velmi vysoké vakuum („*ultra high vacuum*“)

ÚFI Ústav fyzikálního inženýrství

UV Ultrafialové („*ultraviolet*“)

$\bar{v}$ Střední rychlost

ϵ Emisivita materiálu

θ Střední volná dráha atomů

$\theta_{0,5}$ Úhel, kde se sníží maximální intenzita svazku na polovinu

λ Střední volná dráha atomů

ξ Redukční člen

ϱ Rezistivita

σ Stefan-Boltzmannova konstanta

σ_k Účinný průřez

ω Prostorový úhel

SEZNAM PŘÍLOH

- **Výkresová dokumentace** – Ve výkresové příloze jsou zpracovány všechny součástí efuzních cel pro depozici ultratenkých vrstev zinku a cínu.
- **Přiložené CD** – CD obsahuje kompletní výkresovou dokumentaci ve formátu pdf a 3D modely vytvořené v prostředí Autodesk Inventor.