

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická

Příprava a charakterizace tenkých vrstev Ge-Bi-Se

Bc. Ilona Štroblíková

Diplomová práce

2019

University of Pardubice  
Faculty of Chemical Technology

Preparation and characterization of Ge-Bi-Se thin films

Bc. Ilona Štroblíková

Master Thesis

2019

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ilona Štroblíková**  
Osobní číslo: **C17474**  
Studijní program: **N3441 Polygrafie**  
Studijní obor: **Polygrafie**  
Název tématu: **Příprava a charakterizace tenkých vrstev Ge-Bi-Se**  
Zadávající katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. S využitím veškerých dostupných pramenů zpracujte literární rešerši zaměřenou na přípravu a využití tenkých vrstev Ge-Bi-Se
2. Ze systému GeSe<sub>2</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> připravte tenké vrstvy technikou "co-sputtering"
3. Vhodnými experimentálními technikami charakterizujte připravené tenké vrstvy a získané výsledky diskutujte

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Marek Bouška, Ph.D.**

Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání diplomové práce:

**27. února 2019**

Termín odevzdání diplomové práce:

**10. května 2019**

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.  
děkan

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 27. února 2019

Prohlašuji

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 5. 5. 2019

Ilona Štroblíková

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Markovi Bouškovi, Ph.D., za cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. V neposlední řadě bych také ráda poděkovala mojí rodině a blízkým, kteří mě při studiu podporovali.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce je věnována přípravě a charakterizaci tenkých vrstev systému Ge-Bi-Se, které byly připraveny fyzikální depozicí z plynné fáze metodou co-sputtering. V teoretické části jsou uvedeny charakteristiky tenkých vrstev, mechanismy jejich růstu, systémy Ge-Bi-Se, rozdělení depozičních technik a přiblížení používaných materiálů.

Experimentální část je věnována charakterizaci připravených vrstev, přičemž každý vzorek obsahuje jiné zastoupení prvků. Tyto vzorky byly měřeny charakterizačními metodami: elipsometrie, mikroskopie atomárních sil, skenovací elektronová mikroskopie s energiově-disperzním rentgenovým analyzátozem, rentgenová difrakční analýza a profilometrie.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

tenké vrstvy, systém Ge-Bi-Se, co-sputtering, sputtering, charakterizace tenkých vrstev

## **TITLE**

Preparation and characterization of Ge-Bi-Se thin films

## **ANNOTATION**

This thesis is devoted to the preparation and characterization of thin films of the Ge-Bi-Se system, which were prepared by Physical Vapour Deposition co-sputtering method. The theoretical part has given characteristics of thin films, mechanism of their growth, Ge-Bi-Se systems, divided deposition techniques and approximation of used materials.

The goal, of experimental parts, is devoted to characterization of prepared thin films, each sample contains different representation of elements. These samples were measured by characterization methods on ellipsometry, atomic force microscopy, scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray analyzer, X-ray diffraction analysis and profilometry.

## **KEYWORDS**

thin films, system Ge-Bi-Se, co-sputtering, sputtering, characterization thin films

# OBSAH

|   |    |
|---|----|
| ÚVOD.....   | 11 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST.....  | 12 |
| 1.1 Tenké vrstvy .....  | 12 |
| 1.2 Parametry tenkých vrstev .....  | 14 |
| 1.3 Mechanizmy růstu tenkých vrstev .....   | 15 |
| 1.4 Chalkogenidová skla a systém Ge-Bi-Se .....   | 16 |
| 1.5 Příprava tenkých vrstev .....   | 18 |
| 1.5.1 Napařovací metody .....   | 21 |
| 1.5.2 Výbojové procesy.....   | 21 |
| 1.5.3 Chemické procesy z plynné fáze.....   | 22 |
| 1.5.4 Chemické procesy z kapalně fáze .....   | 22 |
| 1.6 Sputtering .....  | 23 |
| 1.6.1 Proces napařování.....  | 23 |
| 1.6.2 Účinky bombardování povrchů.....  | 25 |
| 1.6.3 Výtěžky napařování.....   | 26 |
| 1.6.4 Konfigurace napařování .....  | 26 |
| 1.7 Substrát pro PVD depozice .....   | 31 |
| 1.7.1 Kovy.....   | 31 |
| 1.7.2 Sklo a keramika.....  | 32 |
| 1.7.3 Polymery .....  | 32 |
| 1.8 Terče pro sputtering.....   | 32 |
| 1.8.1 Konfigurace terčů.....  | 32 |
| 1.8.2 Materiály terčů .....   | 33 |
| 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....  | 35 |
| 2.1 Příprava tenkých vrstev Ge-Bi-Se .....  | 35 |
| 2.2 Použité experimentální metody .....   | 36 |
| 2.2.1 Elipsometrie .....  | 36 |
| 2.2.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s energiově disperzním<br>rentgenovým analyzátozem (EDX)..... | 37 |
| 2.2.3 Mikroskopie atomárních sil (AFM) .....  | 39 |
| 2.2.4 Rentgenová difrakční analýza (XRD).....   | 40 |
| 2.2.5 Profilometrie .....   | 41 |



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3   | VÝSLEDKY A DISKUZE.....   | 42 |
| 3.1 | Elipsometrie.....   | 42 |
| 3.2 | Mikroskopie atomárních sil a skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzním rentgenovým analyzátozem..... | 46 |
| 3.3 | Rentgenová difrakční analýza .....  | 50 |
| 3.4 | Profilometrie.....  | 52 |
| 4   | ZÁVĚR .....   | 53 |
| 5   | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....   | 54 |

## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

|          |                                      |                                   |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| at. %    | atomární procento                    |                                   |
| AFM      | mikroskopie atomárních sil           | Atomic Force Microscopy           |
| Ar       | argon                                |                                   |
| Bi       | bismut                               |                                   |
| EDX      | energieově disperzní rtg. Analyzátor | Energy Dispersive X-Ray           |
| CL       | model Codyho-Lorentze                |                                   |
| CVD      | chemická depozice z plynné fáze      | Chemical Vapour Deposition        |
| Ge       | germanium                            |                                   |
| Hz       | hertz                                |                                   |
| MBE      | epitaxe molekulovým svazkem          | Molecular Beam Epitaxy            |
| Mm       | mikrometr                            |                                   |
| MSE      | střední kvadratická chyba            | Mean square error                 |
| Nm       | nanometr                             |                                   |
| PVD      | fyzikální depozice z plynné fáze     | Physical Vapour Deposition        |
| sccm     | standardní kubický cm/min. .         | standard cubic centimeters/minute |
| S        | síra                                 |                                   |
| Se       | selen                                |                                   |
| SEM      | skenovací elektronová mikroskopie    | Scanning Electron Microscopy      |
| Te       | tellur                               |                                   |
| XRD      | rentgenová difrakční analýza         | X-ray diffraction                 |
| %        | procento                             |                                   |
| $\Delta$ | fázový posun                         |                                   |
| $\Psi$   | poměr amplitud                       |                                   |

# ÚVOD

Aniž bychom si toho všimli, každý den nás obklopuje mnoho věcí a zařízení, která využívají tenké vrstvy, ať už z důvodu funkčních, ochranných nebo pro zlepšení povrchových vlastností materiálu. Počátky depozičních metod lze najít už v roce 1852, kdy byla popsána metoda sputteringu W. R. Grovem. Mondův proces byl vyvinut v roce 1899 a v roce 1860 byly zavedeny pojmy chemická depozice z plynné fáze (CVD) a fyzikální depozice z plynné fáze (PVD).

V dnešní době můžeme tenké vrstvy najít zejména v elektronických součástkách a displejích, dále se využívají jako optické vrstvy, pro datová úložiště nebo slouží jako ochranné vrstvy. Tyto vrstvy mohou mít širokou škálu vlastností, které jsou dány použitým materiálem, výběrem depoziční techniky a podmínkami depozice.

V rámci této práce bylo připraveno deset vzorků tenkých vrstev Ge-Bi-Se depoziční metodou co-sputtering ze systému  $\text{GeSe}_2$  a  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , které byly následně charakterizovány. Pro depozici tenkých vrstev je k dispozici mnoho metod. Je důležité znát jejich specifika, abychom dokázali vybrat tu nejlepší metodu právě pro naši vrstvu, která má mít určité vlastnosti pro co nejlepší aplikační využití. V teoretické části je uvedeno rozdělení těchto depozičních technik. S ohledem na depoziční techniku použitou pro tuto práci, je kladen důraz na fyzikální depozice z plynné fáze, zejména pak na sputtering.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Tenké vrstvy

Tenké vrstvy jsou nanášeny na substrát většinou pro zlepšení užitkových nebo estetických vlastností [1]. Tloušťka tenkých vrstev se pohybuje v rozmezí setin až jednotek mikrometrů (Obr. 1). Vrstvy s tloušťkou větší než 200 nanometrů jsou označovány jako tenké vrstvy a vrstvy menší než 200 nanometrů jsou označovány jako ultratenké vrstvy [2]. Tenké vrstvy můžeme najít v mnoha oblastech našeho života, ale pro tuto práci jsou podstatné tenké vrstvy aplikované na pevných substrátech. Tyto vrstvy mají uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. V následujícím rozdělení je uvedeno několik možností využití tenkých vrstev [3]:

- **Elektronické součástky**

Často využívané pro výrobu elektronických součástek, zejména polovodičů a mikroelektronických integrovaných obvodů. V tomto případě jsou nejčastěji používány polovodiče, dielektrické a izolační materiály nebo kovy.

- **Elektronické displeje**

Při výrobě displejů se vyžaduje použití vodivých filmů, transparentních vodivých filmů, luminiscenčních a fluorescenčních filmů a také nevodivých a izolačních vrstev.

- **Optické vrstvy**

Optické nátěry jsou aplikovány pro antireflexní efekt, jako interferenční filtry na solární panely, pro laserovou optiku nebo jako zrcadlová skla pro infračervené solární reflektory.

- **Optická datová úložiště**

Tenké vrstvy našly uplatnění i v komerčním využití pro optická datová úložiště jako jsou CD, blue ray disky a paměti počítače.

- **Magnetické filmy pro datová úložiště**

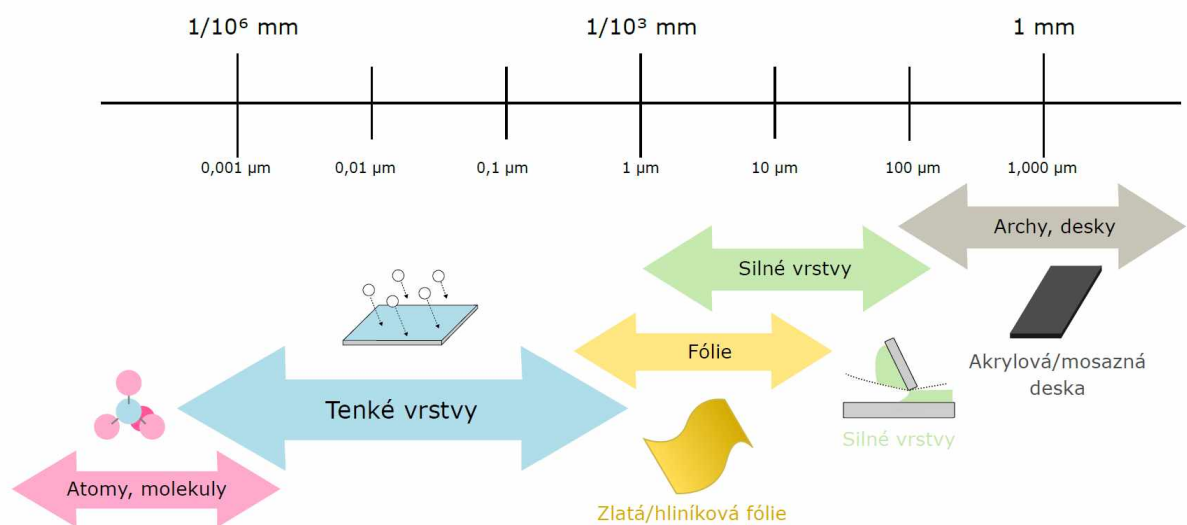
Tenké vrstvy magnetických materiálů mají široké uplatnění mezi aplikacemi pro datová úložiště v počítačích a kontrolních systémech. Jako substrát jsou nejčastěji používány materiály jako je kov, sklo nebo plastické polymerní materiály. Nanášení tenkých vrstev je vhodné pro magnetické materiály, a pro materiály s vysokým stupněm tvrdosti.

- **Antistatické vrstvy**

Tenké vrstvy vodivých a polovodivých materiálů jsou nanášeny pro poskytnutí ochrany před elektrostatickými výboji.

- **Ochranné vrstvy pro zlepšení povrchových vlastností**

Tenké vrstvy karbidů, silicidů, nitridů a boridů zajišťují lepší ochranu před opotřebením povrchů kovů, jako jsou ložiska nebo části strojů.



**Obr. 1:** Porovnání tloušťky vrstev (adaptováno z [4])

## 1.2 Parametry tenkých vrstev

Jak uvádí Seshan Krishna [3], požadované výsledné vlastnosti nanosených vrstev jsou ve většině případů rozhodujícím faktorem pro výběr depoziční technologie. Ve většině případů se jedná o charakteristiku tenkých filmů, které mohou mít zcela odlišné vlastnosti než silné vrstvy. Tenké filmy mohou mít jiné vlastnosti i co se týče morfologie, struktury, fyzikálních a chemických vlastností než silné vrstvy. Povrchové a mezipovrchové vlastnosti mohou zásadně ovlivnit vlastnosti tenkého filmu, a to v důsledku povrchové kontaminace, nukleačních účinků, povrchové mobility, povrchových reakcí, adsorbovaných plynů, topografie povrchu, krystalografickou orientaci nebo účinky napětí, způsobené rozdílnou tepelnou roztažností. Hlavní fyzikální a chemické parametry tenkých vrstev jsou podle [3] následující:

- **Elektrické:** Vodivost pro vodivé vrstvy, rezistivita pro vodivé vrstvy, dielektrická konstanta, dielektrická pevnost, dielektrické ztráty, stabilita při předpětí, polarizace, permitivita, elektromigrace.
- **Termální:** Koeficient expanze, tepelná vodivost, teplotní kolísání všech vlastností, stabilita nebo posun charakteristik, teplota tavení.
- **Mechanické:** Vnitřní, zbytkové a složené napětí, anizotropie, přilnavost, tvrdost, hustota, zlom, kujnost, elasticita.
- **Morfologie:** Krystalická nebo amorfni fáze, hustota strukturních vad, rozsah pokrytí, rovinnost plochy, mikrostruktura, topografie povrchu, orientace krystalů.
- **Optické:** Index lomu, absorpce, dvojlom, spektrální charakteristiky, rozptyl.
- **Magnetické:** Permeabilita, hustota toku.
- **Chemické:** Složení, nečistoty, reaktivita se substrátem a okolním prostředím, termodynamická stabilita, rychlost leptání, koroze a odolnost proti odírání, toxicita, hygroskopičnost.

### 1.3 Mechanizmy růstu tenkých vrstev

Kinematiku růstu tenkých vrstev můžeme rozdělit na tři mechanizmy růstu tenkých vrstev na substrátu [1]. Grafické znázornění možného růstu tenkých vrstev je znázorněno níže (Obr. 2.).

- **Volmer–Weberův mechanizmus**

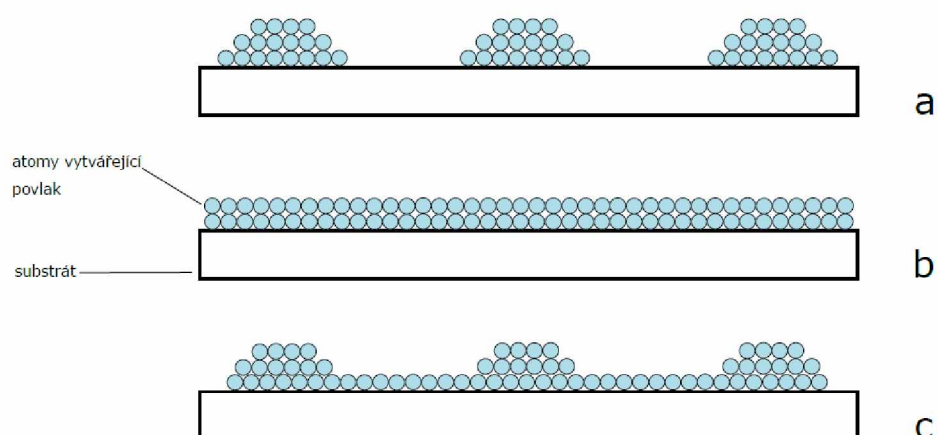
Předpokládá růst trojrozměrných ostrůvků, které narůstají až dojde k jejich spojení. Tímto způsobem vzniká na substrátu jednolitá vrstva. Vrstvy rostou tímto mechanismem v případě, že jsou mezi atomy deponovaného materiálu silnější chemické vazby, než mezi atomy deponovaného materiálu a substrátem.

- **Frank van der Mervův mechanizmus**

Vyskytuje se u dvojrozměrných povlaků a vzniká v případě, kdy jsou vazby mezi atomy deponovaného materiálu stejně silné nebo slabší, než vazby mezi atomy deponovaného materiálu a substrátem. Tyto vazby se tvoří v případě kombinací keramika-keramika, kov-kov.

- **Stranski–Krastanovův mechanizmus**

Tento mechanizmus je kombinací dvou předešlých mechanismů. Vrstva začíná růst jako dvojrozměrná a s přibývajícím atomy se začínají tvořit trojrozměrné ostrůvky. Je to důsledek snížení vnitřní energie. Vrstvy rostoucí tímto mechanismem vykazují horší spojení mezi atomy a substrátem.



**Obr. 2:** Mechanizmy růstu tenkých vrstev: a) Volmer–Weberův, b) Frank van der Mervův, c) Stranski–Krastanovův (adaptováno z [1])

## 1.4 Chalkogenidová skla a systém Ge-Bi-Se

Chalkogenidová skla [5], jsou anorganické amorfni materiály, které ve své struktuře obsahují alespoň jeden z chalkogenidů s výjimkou kyslíku, tedy S, Se a Te. Pro vytvoření sklovité matrice se chalkogenidy obvykle mísí s více elektropozitivními prvky 13., 14. a 15. skupiny periodické tabulky prvků. Nejčastěji využívanými prvky pro chalkogenidová skla jsou As a Ge. Ve srovnání s oxidovými skly mají chalkogenidová skla jedinečné vlastnosti, jako je vysoká optická transparentnost v infračervené oblasti, nebo vyšší hodnoty indexu lomu. Pokud je vzorek vystaven vhodnému záření, nebo je tepelně exponován, dochází ke strukturálním změnám, které snižují tvrdost chalkogenidových skel. Tyto strukturální změny potom způsobují změny jejich chemických nebo fyzikálních vlastností [6–8].

Základem této diplomové práce je ternární systém Ge-Bi-Se. Následující odstavce proto budou věnovány popisu vlastností jednotlivých prvků tohoto systému [9]:

Germanium je prvkem 14. skupiny, jeho elektronegativita je 1,9 a v přírodě se většinou vyskytuje v sulfidických rudách. Jedná se o polovodič, který je využíván v oblasti elektronického průmyslu. Jeho vodivost se s rostoucí teplotou exponenciálně zvyšuje. Germanium se také používá v infračervených detektorech, mikroskopech a jiných optických přístrojích.

Bismut je prvkem 15. skupiny, jeho elektronegativita je 1,67. V přírodě se vyskytuje v rudách bismutu, bismutu nebo bismutinitu. Vyskytuje se i v rudách zinku, stříbra, cínu a olova. Používá se v elektrických pojistkách, pro nízkotavitelné pájky, termoelektrické materiály a polovodiče nebo jako aditivum do oceli a do slitin k jiným kovům. Mnoho sloučenin bismutu se používá i v medicíně jako antacida, antisypilitika a antiinfekční látky. Dále se používá v kosmetice do rtěnek nebo očních stínů.

Selen je prvkem 16. skupiny, jeho elektronegativita je 2,4. Jedná se o vzácný prvek, který se v přírodě nevyskytuje v elementární podobě, ale například v některých měděných rudách. Selen má velké využití v průmyslové výrobě, a to zejména v elektronice. Má ojedinělé vlastnosti: převádí světlo přímo na elektřinu (fotovoltaické působení), elektrický odpor se snižuje se zvyšujícím se osvětlením (fotovodivost), je schopen převést střídavý proud na stejnosměrný proud. Selen se používá ve fotoelektrických člancích, solárních člancích a jako usměrňovač v rádiových a televizních přijímačích. Ve sklářském průmyslu je součástí růžových, oranžových a rubínově červených pigmentů. Pro zlepšení vlastností selenu se používají různé přísady, které zlepšují jeho vlastnosti [10].



Jak už bylo popsáno výše, selen patří mezi chalkogenidy, je doplněn o germanium, jehož přítomnost v systému by měla přispět k dlouhodobé stabilitě při pokojové teplotě a přítomnost atomů bismutu chalkogenidům přispívá k vodivosti n-typu [11].

Změnou optických vlastností tenkých vrstev  $\text{Bi}_5\text{Ge}_{40}\text{Se}_{55}$  působením tepelného žíhání se zabýval Farid M. Abdel-Rahim [11], v této studii byly tenké vrstvy naneseny napařováním. Na základě výsledků z rentgenové difrakční analýzy (dále XRD) bylo zjištěno, že připravená vrstva má amorfni strukturu, zatímco žíhané vrstvy vykazují krystalickou strukturu. Optická propustnost i odrazivost žíhaných filmů byly měřeny pomocí spektrofotometru s dvojitým paprskem v rozsahu vlnových délek 300–900 nm. Se zvyšováním teploty žíhání se snižovala šířka energetického pásu.

Další práce [10] byla zaměřena na studium amorfni vrstev  $\text{Ge}_5\text{Bi}_{18}\text{Se}_{77}$ , které se deponovaly vakuovým napařováním, a poté byly zjišťovány jejich tepelné a optické vlastnosti. Byla provedena diferenciální kompenzační kalorimetrie pro odhad velikosti aktivační energie, potřebné pro krystalizaci materiálu. Prokázala se dobrá stabilita amorfni fáze, protože hodnota aktivační energie byla vysoká 1,62 eV. Nanesené vrstvy vykazovaly polovodivé chování, kdy šířka zakázaného pásu pro amorfni a krystalickou vrstvu byla 0,92 eV a 0,8 eV. Těmito výsledky bylo potvrzeno, že jsou tyto vrstvy vhodné i pro optická paměťová média.

Vliv zvýšeného obsahu bismutu na optické vlastnosti systému  $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70-x}\text{Bi}_x$  studoval Adyasha Aparimita [12]. Bylo zjištěno, že se zvyšujícím se obsahem bismutu dochází k fyzikálním změnám v systému. Teoretická mezera vodivostního pásu a průměrná energie vazby se snižuje. Podle výsledků XRD nedošlo k žádné strukturní změně tenké vrstvy. Optická studie ukázala, že transmitance klesá s přidavkem bismutu a zvyšuje se absorpční koeficient. Optické změny způsobené přidavkem bismutu do systému bylo potvrzeno posunem píku v Ramanově spektru. Vlivem adice telluru a kontaminace kyslíku na chalkogenidových vrstvách Ge-Bi-Se, se zabývá ve své studii Haiwei Yin [13].

## 1.5 Příprava tenkých vrstev

Jak už je uvedeno v kapitole 1.1, tenké vrstvy se využívají v mnoha průmyslových oblastech, kdy je možné tyto vrstvy nanášet na rozmanité druhy substrátů jako jsou skla, kovy nebo polymery. Proto se musí dbát na vhodné zvolení depoziční metody, a to s ohledem na další použití tenkých vrstev.

Podle Krishny [3], existuje mnoho depozičních technologií, ale jelikož se jedná o metody pro nanášení tenkých vrstev, tedy tloušťky vrstev v rozmezí setin až jednotek mikrometrů, klasifikace depozičních technik se zužuje. Technologických procesů pro nanášení tenkých vrstev je mnoho, ale každá se do jisté míry liší, a to chemickými a fyzikálními principy. Každá technologie má oproti ostatním své výhody, ale i svá omezení. Pro vytvoření tenkých vrstev s požadovanými vlastnostmi je nezbytné znát výhody a nevýhody depozičních technologií. Požadovaná tloušťka filmu úzce souvisí s rychlostí depozice. Velký význam má také hustota částic spojená s deponovaným filmem. Částice pocházející ze zařízení, substrátu, okolního prostředí nebo z reaktivních materiálů dodávaných do depozičního zařízení, mohou negativně ovlivnit výsledek depozice, což je důležité zejména pro výrobu mikroelektronického zařízení. Technologie nanášení tenkých vrstev jsou čistě fyzikální, jako jsou například metody odpařování, nebo jsou čistě chemické, do kterých se řadí procesy v plynné a kapalně fázi. Většina depozičních technik je založena na žhavém výboji a kombinovaném reaktivním naprašování s fyzikálními a chemickými reakcemi. Tyto procesy, které se překrývají, jsou kategorizovány jako fyzikálně-chemické metody. V Tab. 1 je uvedeno jedno z často používaných rozdělení depozičních metod, které budou dále rozepsány [3]. Samotný proces depozice lze rozdělit do třech kroků [14]:

- **Vytvoření plynného skupenství z deponovaného materiálu**

Jsou tři způsoby, jak získat z materiálu plynné skupenství: odpařování, sputtering (naprašování) a chemické odpařování.

- **Přenesení par ze zdroje na substrát**

K přenesení par ze zdroje na substrát může dojít přímým tokem molekul (bez srážek mezi atomy a molekulami), pokud je tlak mezi plynnou fází kovu vysoký, často dochází k ionizaci (vzniká plazma), při transportu plynné fáze na substrát dochází k mnoha srážkám.

- **Růst filmu na substrátu**

Deponovaná vrstva se zvětšuje růstovými mechanizmy a nukleací. Mikrostruktura a složení filmu mohou být změněny bombardováním ionty plynné fáze, které dopadají na rostoucí vrstvu. Následně dochází k naprašování a znovusazení atomů filmu. Zvyšuje se mobilita atomů blízkého povrchu i samotného povrchu vrstvy.

Tab. 1: Klasifikace depozičních metod [3]

| NAPAŘOVACÍ METODY:          |   | CHEMICKÉ PROCESY V PLYNNÉ FÁZI:               |                                     |
|-----------------------------|---|---|-------------------------------------|
| Vakuové napařování          | Konvenční vakuové napařování            | Chemické metody přípravy tenkých vrstev (CVD) | CVD epitaxe                         |
|                             | Napařování elektronovým svazkem         |   | CVD při atmosférickém tlaku (APCVD) |
|                             | Epitaxe molekulovým svazkem (MBE)       |   | CVD při nízkém tlaku (LPCVD)        |
|                             | Reaktivní napařování                    |   | Organokovové CVD (MOCVD)            |
|                             | Pulsní laserová depozice (PLD)          |   | Foto-indukované CVD (PHCVD)         |
| VÝBOJOVÉ PROCESY:           |   | Termální procesy                              | Termální oxidace                    |
| Sputtering (naprašování)    | Naprašování stejnosměrným proudem (DC)  |   | Termální nitridace                  |
|                             | Reaktivní naprašování                   |   | Termální polymerizace               |
|                             | Iontové pokovení                        | CHEMICKÉ PROCESY V KAPALNÉ FÁZI:              |                                     |
|                             | Magnetronové naprašování                | Elektro procesy                               | Galvanizace                         |
|                             | Naprašování iontovým svazkem            |   | Bezprúdová galvanizace              |
|                             | Reaktivní iontové pokovení              |   | Elektrolytická anodizace            |
|                             | Depozice světelným svazkem (CBD)        |   | Pokovení chemickou redukcí          |
| Plazmové procesy            | Chemická depozice z plynné fáze (PECVD) |   | Pokovení chemickou substitucí       |
|                             | Plazmová oxidace                        |   | Elektroforézní depozice             |
|                             | Plazmová anodizace                      | Mechanické techniky                           | Rozprašovací pyrolýza               |
|                             | Plazmová polymerizace                   |   | Techniky Spray-on                   |
|                             | Plazmová nitridace                      |   | Techniky Spin-on                    |
|                             | Plazmová redukce                        |   |                                     |
| Depozice katodovým obloukem |   |   |                                     |

Mezi techniky nanášení tenkých vrstev patří chemická depozice z plynné fáze (dále jen CVD) a fyzikální depozice z plynné fáze (dále jen PVD). Jelikož pro tuto práci byla použita PVD příprava tenkých vrstev co-sputtering, bude v kapitole 1.6 popsána blíže metoda sputtering, ze které co-sputtering vychází.

### **1.5.1 Napařovací metody**

Jedná se o jednu z nejstarších technik používaná pro depozici tenkých vrstev. Tepelné nebo vakuové napařování je používáno v laboratořích a v průmyslu pro nanášení kovů a slitin. Při depozici se ohřívá deponovaný materiál, který poté přes plynnou fázi přechází a následně kondenzuje na substrátu a vzniká tenká vrstva. Odpařovače pokrývají rozmanitou oblast chemické reaktivity a tlaků par. Z toho důvodu je možné používat širokou škálu deponovaných materiálů, odporem zahřívání vlákna, lasery atd. Pro použití této metody je nutné zajistit vysoké vakuum. Epitaxe molekulovým svazkem (MBE) je propracovaná a pečlivě kontrolovaná metoda pro růst monokrystalických epitaxních vrstev při vysokém vakuu. Tenké vrstvy se tvoří na krystalických substrátech pomalým odpařováním elementárních nebo molekulárních složek.

### **1.5.2 Výbojové procesy**

Jevy využívané v těchto procesech představují širokou škálu způsobů, které lze využít pro depozici tenkých vrstev. Nejznámější z procesů je sputtering, princip této metody je popsán v kapitole 1.6, kde jsou také uvedeny vybrané konfigurace.

Dále do této skupiny patří i plazmové procesy. Některé chemické reakce jsou urychlovány dodáním teploty za přítomnosti energetického reaktivního iontu a bombardování je jeden z procesů pro povrchové úpravy, jako je oxidace plazmy nebo nitridace plazmy. Kov, který má být oxidován nebo nitridován se vyrábí katodou s výbojem záře a současně se zahřívá sálavými nebo RF-indukčními metodami. Tímto způsobem mohou být vyrobeny velmi silné (0,1–2 mm) ochranné vrstvy, a to na různých kovech, aby byly povrchy tvrdé nebo odolné proti korozi.

### 1.5.3 Chemické procesy z plynné fáze

CVD metody tvorby filmu zahrnují chemickou depozici par a termální oxidaci. Chemická depozice par je proces syntézy materiálů, kdy blízko povrchu substrátu chemicky reagují složky plynné fáze a vzniká tuhý film (tenká vrstva). Tato technologie se stala jednou z nejdůležitějších pro výrobu tenkých vrstev a nátěrů, kdy je možno využít širokou škálu materiálů, důležitých pro zdokonalení technologie. Náročné požadavky musí splňovat například polovodiče do elektroniky, kde musí být splněny náročné podmínky na čistotu a složení. CVD se dá použít pro syntézu jednoduchých a složitých sloučenin, a to i při relativně nízkých teplotách. Pomocí kontroly chemických reakcí a depozičních parametrů lze ovlivnit chemické složení a fyzikální strukturu vrstev. Základní principy CVD zahrnují interdisciplinární rozsah chemických reakcí plynné fáze, termodynamiku, kinetiku, transportní mechanismy a jevy růstu vrstev. Většina CVD procesů je vybrána tak, aby vznikaly heterogenní reakce. To znamená, že se uskutečňují spíše na povrchu substrátu než v plynné fázi. Nežádoucí homogenní reakce v plynné fázi vytváří částice, které mohou tvořit práškové usazeniny, což vede ke znečištění vrstvy, která není homogenní. Tenké vrstvy připravené technikou CVD mohou být připravovány velkým množstvím prvků a sloučenin. Jako výchozí materiály se používají anorganické, organokovové a organické reaktanty. Materiály deponované při nízkých teplotách ( $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro křemík) jsou obecně amorfni. Vyšší teploty mají tendenci vést k polykrystalickým fázím. Velmi vysoké teploty ( $900\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  u křemíku) jsou nezbytné pro růst jednodokrytalických vrstev. Tyto vrstvy jsou orientovány v souladu se strukturou krystalu substrátu. Tento jev je známý jako epitaxe (růst tenké krystalické vrstvy na substrátu) a je důležitý v technologii polovodičových zařízení.

### 1.5.4 Chemické procesy z kapalné fáze

Růst anorganických tenkých vrstev metodou kapalné fáze chemického procesu se provádí primárně elektrochemickými procesy (zahrnují eloxování a galvanické pokovování) a chemickými depozičními procesy (zahrnují redukční pokovování, bezproudé pokovování, přeměnu nanášení povlaků a nanášení substitucí). Dále do těchto procesů spadají mechanické techniky, kdy se vrstvy vytváří na bázi chemicky reagujících filmů kapalné fáze.

## 1.6 Sputtering

Prvním, kdo popsal metodu sputtering (dále naprašování), byl fyzik W. R. Grove v roce 1852, kdy nanášel vrstvu ze špičky drátu umístěného v blízkosti vysoce leštěného stříbrného povrchu při tlaku přibližně 0,5 Torr [15]. Tuto metodu popsali i další, jako například M. Faraday, Julius Plücker nebo A.W. Wright [15].

Tato depoziční technika umožňuje nanést souměrnou homogenní vrstvu na substrát, používá se pro modelování polovodičových destiček, čištění povrchů nebo mikroobrábění [3]. Naprašování se využívá také pro nanášení filmů na polovodičové destičky, magnetická média, pro povrchovou úpravu řezných ploch nástrojů, kde zvyšuje odolnost proti opotřebení nebo pro přípravu reflexních vrstev [3].

K. S. Sree Harsha [16] uvádí, že naprašování je proces, který se provádí ve vakuu. Zdroj deponovaného materiálu (dále terč) i substrát (např. sklo, křemík) jsou umístěny v depoziční komoře, která je evakuována v rozmezí cca  $10^{-6}$ – $10^{-10}$  Pa. Jako pracovní plyn je do komory nejčastěji zaváděn Argon. Terč je vystaven potenciálu 0,5–5 k eV, což způsobuje vytvoření elektrického výboje. Substrát má nulový potenciál, nebo může být ovlivňován řízením teploty. Terč je bombardován pomocí plazmy, která vytváří nabitě částice, které mohou být urychlovány směrem k povrchu.

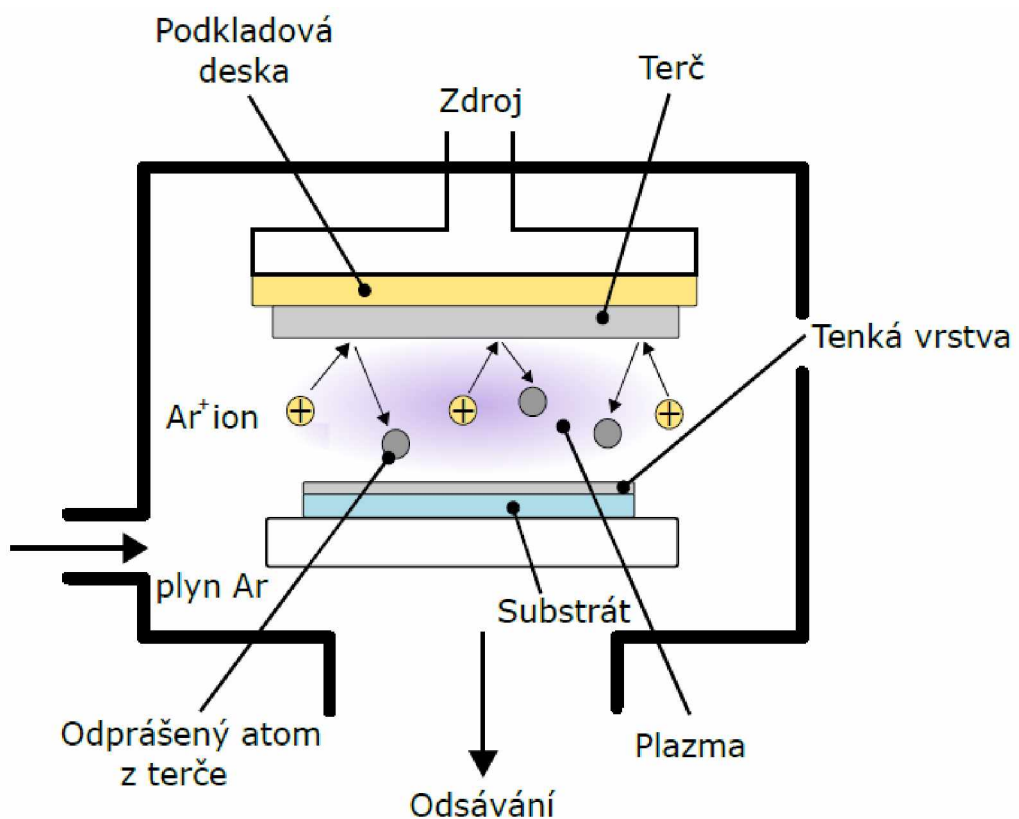
### 1.6.1 Proces naprašování

Jak uvádí Donald M. Mattox [17], katody s deponovaným materiálem jsou bombardovány ionty pracovního plynu, čímž dochází k narušení vrstvy a vytrhávání atomů z terče. Uvolněné atomy poté kondenzují na substrátu a dochází tak k vytvoření tenké vrstvy (Obr. 3).

V následujících řádcích je uvedeno několik jevů vyskytujících se při naprašování [17], které jsou důležité pro růst tenké vrstvy naprašováním.

- Výtěžek rozprašování (poměr rozprášených atomů k počtu částic s vysokou energetickou hodnotou) závisí na hmotnosti a energii bombardovací částice.
- Výtěžek rozprašování je také ovlivněn úhlem dopadu bombardovací částice.
- Je také důležitá tzv. prahová energie, pod kterou nedochází k rozprašování, a to bez ohledu na velikost bombardovacího toku.

- Mnoho rozprášených atomů má vyšší energii než tepelně odpařené atomy.
- Atomy vypuzené z jednotlivých krystalů mají tendenci být rozprášené v těsné blízkosti plochy v krystalu.
- Při rozprašování polykrystalického materiálu jsou některé části polykrystalu rozprášeny dříve než jiné.
- Výtěžek naprašování klesá při použití vysokých energií, protože u iontů dochází k velké ztrátě energie hlouběji pod povrchem.
- Sekundární elektronová emise je malá.
- Pro výtěžek naprašování je vliv teploty rozprašovací elektrody zanedbatelný.



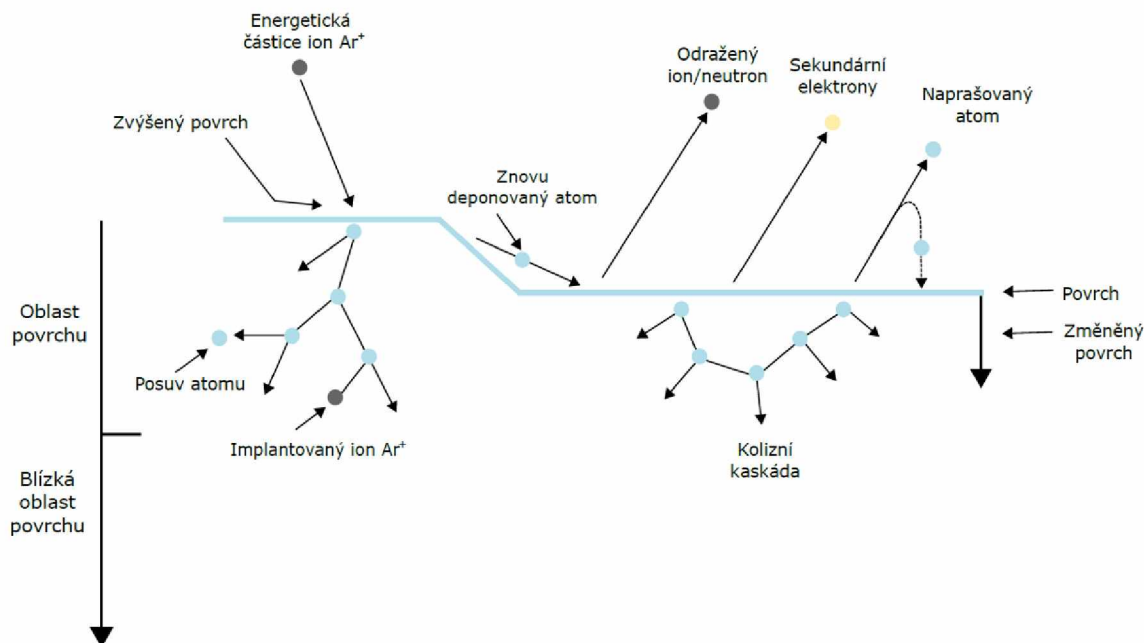
*Obr. 3: Proces naprašování (adaptováno z [18])*



## 1.6.2 Účinky bombardování povrchů

Na Obr. 4 jsou naznačeny procesy, které se dějí při bombardování v povrchové oblasti a blízké povrchové oblasti. Jak popisuje [17], bombardující částice mohou proniknout do povrchové oblasti terče, ale ke kolizím může docházet i v blízké oblasti povrchu terče. Bombardující částice vytváří kolizní kaskádu, kdy se část energie přenáší na povrchové atomy, které mohou být rozprášeny. Většina přenesené energie se objevuje jako teplo v oblasti povrchu. Některé bombardující částice se odrážejí jako vysokoenergetické neutrální částice, z nichž jsou některé přeneseny do povrchu. Pokud se naprašování provádí v prostředí s nízkým tlakem nebo ve vakuu, vysoká energie odráží neutrální částice bombardovacího plynu. Atomy s vysokou energií rozprášené z terče bombardují rostoucí tenkou vrstvu a ovlivňují proces jeho tvorby. Vysokoenergetické odražené neutrony mohou opustit deponovaný materiál s energií, která se pohybuje v rozmezí několika eV do stovky eV, což záleží na energii dopadajícího iontu a relativních hmotnostech deponovaného materiálu a bombardujících iontů. Po opuštění terče mohou ztratit energii díky kolizím se zbytkovými atomy plynu. Vysoká energie při bombardování deponovaného materiálu plynem může způsobit opakované naprašování nanášeného materiálu, což vede k poklesu výtěžku naprašování z deponovaného materiálu.

U vrstev nanesených magnetronovým naprašováním je důležitá orientace katody a použitý tlak. Energeticky neutrální bombardování rostoucího filmu záleží především na tlaku. Elektroda bývá u naprašování chlazená, protože studený povrch minimalizuje množství sálavého tepla v systému. Tím, že systém obsahuje méně sálavého tepla, umožňuje umístění tepelně citlivých povrchů v blízkosti rozprašovacího terče.



*Obr. 4: Procesy nastávající na povrchu bombardovaném částicemi (adaptováno z [17])*

### 1.6.3 Výtěžky naprašování

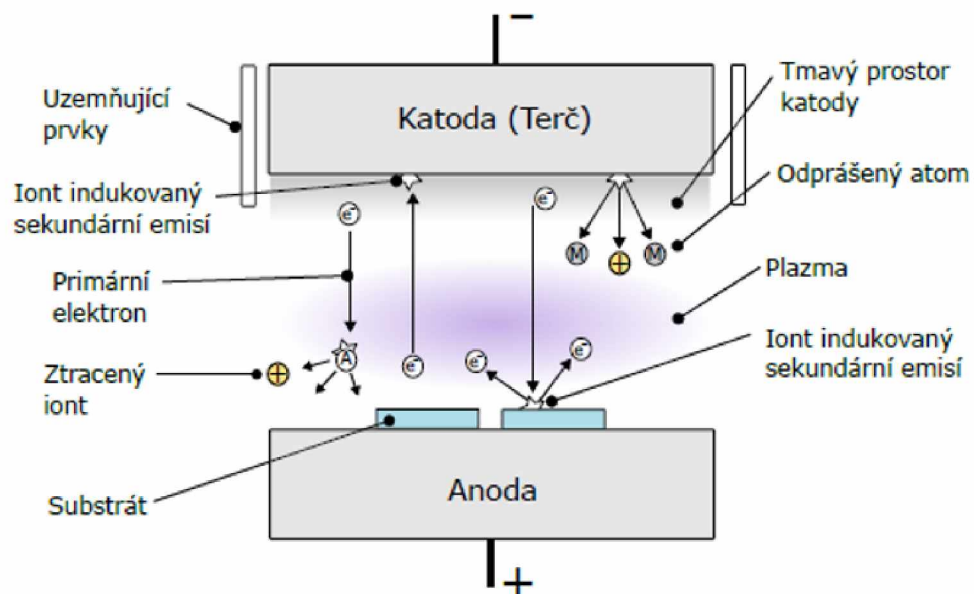
Výtěžek naprašování je poměr počtu rozprášených atomů k počtu dopadajících bombardujících částic a závisí na chemických vazbách mezi atomy v terči a energii přenesené srážkami [17].

### 1.6.4 Konfigurace naprašování

Nejčastěji se využívá naprašování za přítomnosti plazmy, kdy jsou kladné ionty urychlovány na terč, který má vůči plazmě negativní potenciál. Ve vakuovém naprašování je iontový nebo plazmový paprsek vytvořen v odděleném ionizačním zdroji, urychlen a extrahován do komory, ve které je zajištěno dobré vakuuum. Při tomto procesu dochází u bombardování ke vzniku vysokých energií. Naprašování iontovým paprskem je výhodné v tom, že se dá energie bombardujících iontů dobře regulovat. V následujících řádcích je uvedeno rozdělení a popis konfigurací naprašování podle [14]:

- **Planární DC diodové naprašování**

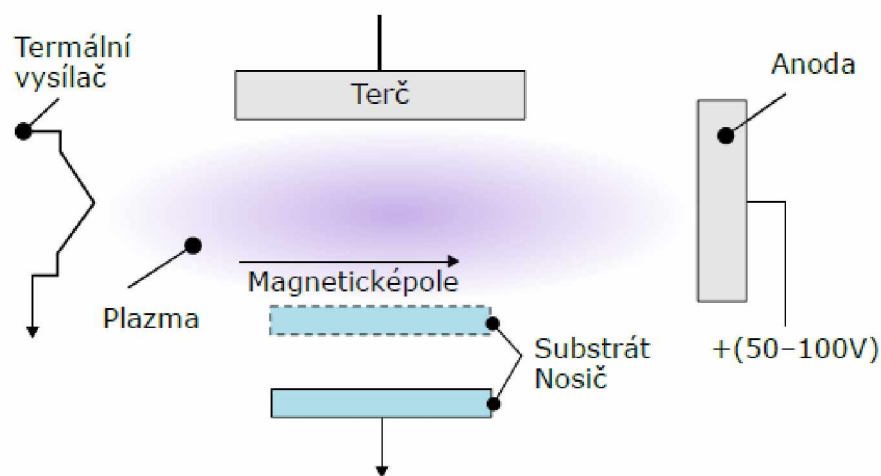
Jedná se o nejjednodušší plazmovou konfiguraci. Zařízení má dvě paralelní elektrody (Obr. 5), kdy je na katodu umístěn terč a na anodu substrát. Průměr katody má většinou 10–30 cm a vzdálenost katody od anody se pohybuje mezi 5–10 cm. Katodou je terč (cíl bombardování), který se k podložce připevňuje letováním nebo vodivým epoxidem. Katoda je chlazená vodou a depozice se provádí za nízkého tlaku. Uzemňující prvky slouží k tomu, aby rychlost narušování cílového povrchu (deponovaného materiálu) byla rovnoměrná a předešlo se tak naprašování ze stran a zadní plochy deponovaného materiálu. Výboj se přenáší v blízkosti negativně nabitě katody a kladně nabitě ionty jsou získávány z plazmy. V blízkosti anody elektrony přechází z prostoru, kde se vytváří plazma, k anodě. Většina elektrického potenciálu, který je mezi katodou a anodou, je spotřebována v katodovém tmavém prostoru („dark space“), jehož velikost je většinou 1–4 cm v závislosti na podmínkách depozice. Silná elektrická pole a ionty, které pochází z plazmy, se v tomto prostoru urychlují, aby dopadly na katodu. Tyto ionty zároveň způsobují emitování malého počtu sekundárních elektronů z povrchu deponovaného materiálu. Sekundární elektrony se urychlují v tmavém prostoru katody a vstupují do prostoru plazmy, kde se jako primární elektrony srazí s atomy pracovního plynu, což je nezbytné pro udržení výboje. Planární diodové naprašování je široce používáno i přes to, že dochází k ohřevu substrátu a depoziční rychlost je nízká. Důvodem je jednoduchost a relativně snadné použití planárních terčů, které mohou být vyrobeny ze široké škály materiálů.



*Obr. 5: Schéma planárního DC naprašování (adaptováno z [14])*

- **Triodové naprašování**

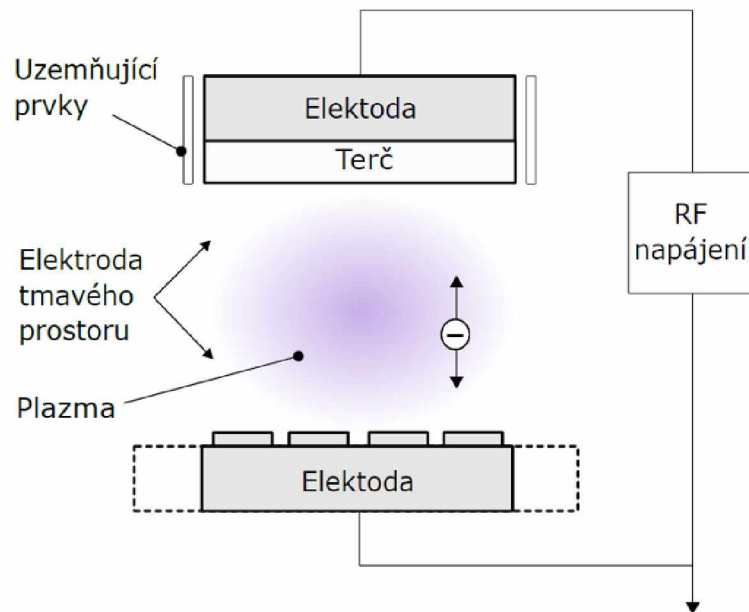
Tato konfigurace využívá přídavnou elektrodu, pro kterou není potřeba terč, aby se udržel výkon. Nejčastěji je používána konfigurace s termálním vysílačem (Obr. 6). Elektronky jsou z povrchu katody emitovány pomocí tepla a ne bombardováním, což umožňuje depozice při nízkém tlaku (0,5–1 mTorr). Hnací napětí je pouze 50–100 V. Tato konfigurace umožňuje vysokou rychlost depozice (setiny nm/min), které je dosaženo i při nízkých tlacích. Ačkoli mohou být touto konfigurací deponovány i silnější vrstvy, je použití triodového naprašování limitována z důvodu citlivosti emitoru tepla vůči reaktivním plynům.



*Obr. 6: Schéma triodového naprašování (adaptováno z [14])*

- **RF naprašování**

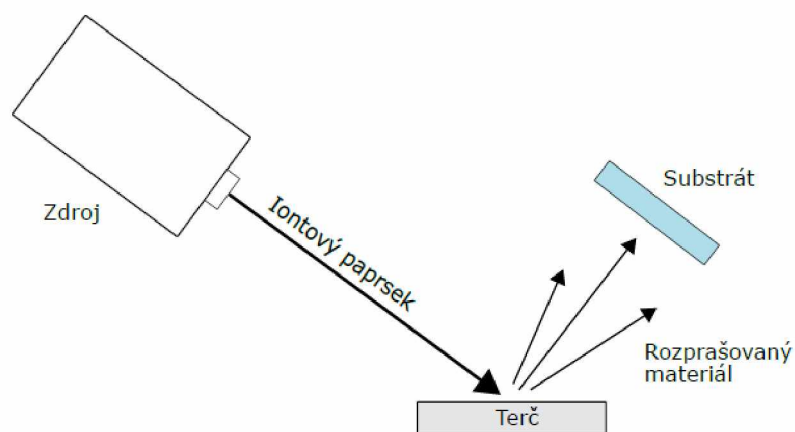
DC metody není možné použít k naprašování nevodivých depozicních materiálů kvůli akumulaci náboje na povrchu terče. Tomu lze předejít použitím vysokofrekvenčního naprašování (RF), který může být jako jediný použit pro naprašování vodivých, polovodivých i nevodivých materiálů. Díky těmto vlastnostem je tato konfigurace využívána v elektronickém průmyslu. Obvykle bývá ve vakuové komoře umístěno několik terčů s depozicním materiálem a v případě nanášení vícevrstevných povlaků tak nedochází k porušení vakua. Na Obr. 7 je náčrt typického RF planárního uspořádání pro naprašování, kde je umístěna elektroda s terčem na straně jedné a na straně druhé je umístěna elektroda se substrátem. V půlce cyklu si elektrody střídají úlohy.



*Obr. 7: Schéma RF naprašování (adaptováno z [14])*

- **Naprašování iontovým paprskem**

Naprašování iontovým paprskem umožňuje kontrolu nad energií a nad proudem bombardujících iontů. Terč s deponovaným materiálem je nakloněn tak, aby ji protínal iontový svazek o dané energii a hustotě toku pod správným úhlem. Substrát je umístěn tak, aby co nejlépe přijímal vrstvu, která je na něj deponována (Obr. 8). Depozici lze provádět i při velmi nízkém tlaku pracovního plynu ( $\leq 0,1$  mTorr) na substráty, které nejsou v kontaktu s plazmou. Tato zařízení není možné použít pro deponování substrátů, které mají větší rozměry, ale jsou vhodné spíše pro leptání iontovým svazkem nebo pro speciální aplikace a výzkumné studie.



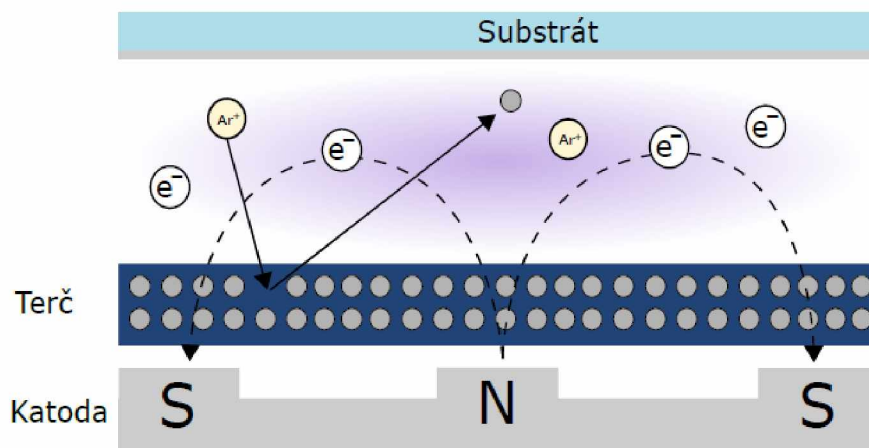
*Obr. 8: Schéma naprašování iontovým paprskem (adaptováno z [14])*

- **Magnetronové naprašování**

Magnetronové naprašování využívá vysoce výkonných zdrojů magnetronového naprašování, které umožňují relativně vysoké rychlosti depozice, širokou oblast deponování, a to bez zahřívání substrátu. Zdrojem magnetronového naprašování jsou díody, které jsou umístěny v rovině s povrchem katody. Díky tomuto umístění se vytvoří tzv. elektronové lapače. Ty jsou konfigurovány tak, aby byly elektronové driftové proudy  $E \times B$  blízko sebe. Magnetické pole je rovnoběžné s rovinou katody. Z terče jsou bombardováním vypuzeny elektrony, které jsou ovlivněny magnetickým polem tak, aby se pohybovaly ve směru kolmém k poli  $E$  a k magnetickému poli  $B$ . Existuje více konfigurací magnetronů, např. planární magnetrony, typ S-gun a válcový typ.

Nejjednodušší geometrii má konfigurace magnetronu označena jako „válcový-post magnetron“. Je složený z válcové hlavice s koncovými deskami, kdy je vše sestaveno z materiálu, který bude deponován. Tato hlavice je připevněna v komoře s jednotným magnetickým polem paralelně s osou katody. Výhodou válcové konfigurace je velikost katody a rovnoměrné naprašování. Nevýhodou může být obtížná výroba terčů.

Nejrozšířenější formou magnetronů je planární konfigurace (Obr. 9), kdy dobrá konstrukce katody může poskytnout rovnoměrnost deponovaného filmu lepší než  $\pm 5\%$ . Velké systémy tohoto typu se používají k potahování architektonických skleněných panelů.



*Obr. 9: Schéma naprašování iontovým paprskem (adaptováno z [19])*

## 1.7 Substrát pro PVD depozice

Podle Mattoxe [17], je nutné mít reprodukovatelný povrch substrátu, aby bylo možné dosáhnout reprodukovatelného procesu PVD a produktu. Můžeme použít dva termíny pro popis povrchu, a to „technologický povrch“ a „skutečný povrch“ materiálů. Toto jsou povrchy, na které jsou vrstvy nanášeny. Skutečný povrch se chemicky liší od zbytku materiálu tím, že jeho povrchové vrstvy reagují a adsorbují s oxidy a uhlovodíky. Tyto vrstvy spolu s blízkou spodní vrstvou materiálu zahrnují skutečný povrch, který musí být změněn tak, aby vznikly požadované povrchové vlastnosti. V některých případech musí být povrch vyčištěn a někdy může být chemicky, mechanicky tepelně nebo jinak modifikován. Těmito modifikačními technikami lze dosáhnout požadovaného povrchu. Jak bylo popsáno v kapitole 1.2, pro přilnavost, tvorbu vrstev a výsledné vlastnosti vrstev je důležitá povrchová chemie, morfologie nebo mechanické vlastnosti. Pokud je tvrdý povlak na měkkém substrátu, může vlivem nerovnosti substrátu docházet k prasknutí vrstvy. Substrát může ovlivňovat i přípravu povrchu a depoziční proces vytlačováním vnitřních složek. Při opracování křehkých materiálů, jako je keramika, sklo nebo uhlík, může docházet ke vzniku povrchových vad. Když je vrstva nanášena na takový povrch, vady zůstávají v rozhraní mezi substrátem a vrstvou. Po vytvoření mechanického namáhání dochází k šíření těchto vad, což způsobuje špatnou přilnavost. Tyto povrchové vady by měly být odstraněny chemickým leptáním před samotnou depozicí. Hlavním důvodem úpravy povrchů je získání homogenního povrchu pro nukleaci a růst vrstvy. Homogenita vrstev je důležitá pro následné vlastnosti filmů, protože pokud je nehomogenní povrch, jsou pravděpodobně nehomogenní i vlastnosti filmu. Následující odstavce budou věnovány rozdělení a charakteristice substrátů dle [17].

### 1.7.1 Kovy

Jsou to pevné látky, které mají kovové chemické vazby, kde jsou atomy vázány elektrony. Kovy jsou kujné, tažné a elektricky vodivé. Většinou jsou kovy pokryty vrstvou oxidu, která je tak skutečným povrchem materiálu. Někdy je vrstva oxidu odstraněna před deponováním, ale v mnoha případech je vrstva deponována na povrch oxidu. Oxidy kovů mají vysokou povrchovou energii, takže absorbují nízkoenergetické absorbenty, aby snížil svoji povrchovou energii. Absorbenty jsou nečistoty, které se musí odstranit před nanesením vrstvy.

### **1.7.2 Sklo a keramika**

Sklo a keramika jsou pevné látky které jsou vázány iontovou nebo kovalentní chemickou vazbou. Jedná se o křehký materiál s malou elektrickou a tepelnou vodivostí. Také se vyznačují nízkou tažností a houževnatostí. Pokud má materiál amorfni fázi, jedná se o sklo a pokud má fázi krystalickou, jedná se o keramiku.

### **1.7.3 Polymery**

Jedná se o velkou molekulu, která je tvořena malými molekulárními jednotkami (monomery). Chemické vlastnosti povrchu polymeru budou záviset na funkčních skupinách, které jsou přítomny na povrchu, nebo plynu, který je v kontaktu s povrchem. Povrch může být odlišný například v případě, že byl v inertní atmosféře nebo v atmosféře obsahující vodní páru. Mechanické vlastnosti polymeru závisí na množství a typu zesílení polymerního materiálu. Většinou má oblast blízkého povrchu materiálu odlišné vlastnosti než zbytek materiálu.

## **1.8 Terče pro sputtering**

Terče jsou cílové materiály [17], které jsou deponovány na substrát. Před samotným nanášením depozičního materiálu na substrát, je potřeba znát jeho vlastnosti, abychom dosáhli žádané kvality vytvořené vrstvy. Mohou mít mnoho podob, například určitý tvar, aby se vešly do depozičního zařízení nebo aby odpovídaly tvaru substrátu. Terč může mít tvar kužele, pak slouží k deponování rotujícího kužele, tvar polokoule slouží k potažení polokoule. Dále jsou také používány terče ve tvaru tyče k deponování vnitřních částí trubek apod. Běžně se používají planární, duté válcové, tyčové, kuželové a rotující válcové terče. Tvary terčů jsou zobrazeny na Obr. 10. Další charakteristiky terčů dle [17] jsou uvedeny v dalších odstavcích.

### **1.8.1 Konfigurace terčů**

Terč může být vytvořen z více částí, kdy každá z těchto částí obsahuje jiný materiál. Tyto terče se mohou používat pro depozice slitin a směsí. Mozaikový terč může mít každou část z jiného materiálu, stejně tak tyčový terč může mít válce z několika materiálů. Složení deponované vrstvy lze ovlivnit změnou poměrů jednotlivých složek. Při použití těchto terčů,



by měla depozice probíhat při nižším tlaku, aby nedocházelo ke zpětnému rozptylu mezi cílovými oblastmi terče. Pokud dojde ke zpětnému rozptylu, může se snížit rychlost napařování, protože jeden materiál překrývá druhý. Pomocí složených terčů neboli „multiple targets“ je možné napařovat více materiálů najednou, a tím dosáhnout vícevrstevných vzorků. V případě použití velkoplošných depozic se substráty před terčem postupně otáčejí pro získání vrstvené struktury.



*Obr. 10: Ukázka tvarů terčů [20]*

### 1.8.2 Materiály terčů

Čistota materiálu pro napařování by měla být vysoká podle toho, jaké čistoty nanesené vrstvy chceme dosáhnout. Pro určité aplikace je vyžadována extrémně vysoká čistota terčů, například v elektronice. Některé materiály mají velmi nízkou přípustnou hodnotu nečistot. Dále je důležité znát i hustotu terče, kdy platí, že čím vyšší hustota, tím lépe. Je to z toho důvodu, že pokud má terč hustotu nižší než 96 %, dochází při depozici k otevření dutin

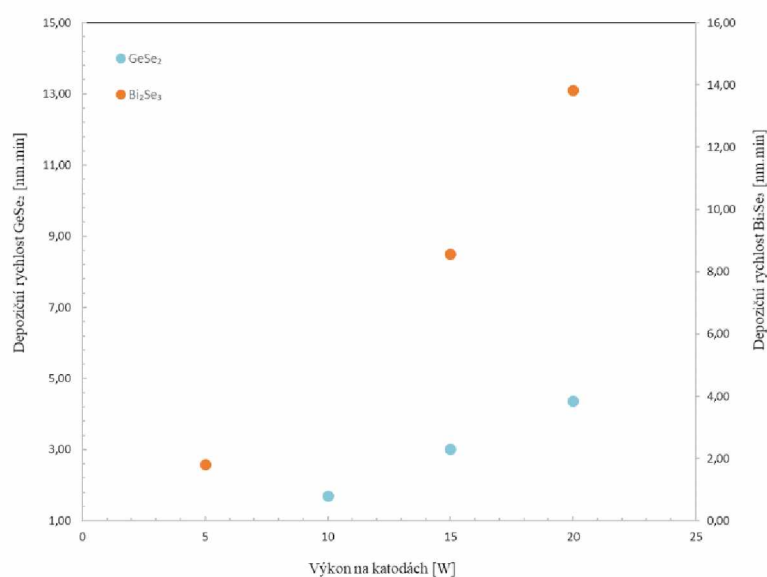
a propojení pórů. Porézní terče potom adsorbují kontaminanty jako je voda. Pokud je hustota terče vyšší 96 %, tak během používání dochází pouze k otvírání dutin, ale už ne k jejich propojení. Dále budou uvedeny materiály pro jednotlivá využití tenkých vrstev deponovaných sputteringem:

- **Jednovrstvé a vícevrstvé kovové vodivé filmy pro mikroelektroniku a polovodiče:** Al, Mo, Ta, Ti, Cr, Mo/Au, Ta/Au, Ti/Au, Ti/Pd/Au, Ti/Pd/Cd/Au, Cr/Au
- **Vodivé filmy pro polovodičové elektrody:** WSi<sub>2</sub>, TaSi<sub>2</sub>, MoSi<sub>2</sub>, PtSi
- **Bariérové vrstvy pro metalizaci polovodičů:** TiN, WTi
- **Magnetické vrstvy pro záznam:** Fe/Al/Si, Co/Nb/Zr, Co/Cr, Fe/Ni/Mo, Fe/Si, Co/Ni/Cr, Co/Ni/Si
- **Optické vrstvy (reflexní nebo částečně reflexní):** Cr, Al, Ag
- **Transparentní elektrické vodiče:** InO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1 Příprava tenkých vrstev Ge-Bi-Se

Metodou co-sputtering bylo připraveno deset vzorků s tenkými vrstvami Ge-Bi-Se. Na každém vzorku byl nanesen jiný poměr jednotlivých prvků. Pro přípravu tenkých vrstev byly použity dva terče:  $\text{GeSe}_2$  a  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Terče používané pro depozice byly upravovány na pile s diamantovým drátem (3500 Premium Saw) a povrch byl leštěn na leštícím zařízení (MANUÁLNÍ LEŠTIČKA MINITECH 233). Jako substrát pro depozici byly použity dva materiály: mikroskopické sklo a křemík. Volná povrchová energie vybraných substrátů byla upravována pomocí koronového výboje zařízením Lab Treator typ ASL-400-TUM firmy Ahlbrandt System GmbH. Dále byly substráty sušeny v trubkové peci pod vakuem. Přípravou substrátů před samotným deponováním se zabývá například [6 a 21]. Cílem bylo vytvořit tenké vrstvy o tloušťce cca 800 nm–1  $\mu\text{m}$ . Bylo tedy nutné zjistit, jak se materiál odprašuje z terče a jak bude vrstva růst, tedy jaká je depoziční rychlost. Používané terče a připravené tenké vrstvy byly uchovávány v rukavicovém boxu Jacomex GP concept T2. Pro uschování a přenos vzorků byla pomocí řezacího plotteru Mimaki Cutter CFL 605 RT vytvořena krabička vybraná z katalogů v programu Artios Cad. Povrch krabičky byl polepen fólií potištěnou na tiskovém zařízení HP Latex 335. Tloušťka deponovaných vrstev byla následně zjištěna pomocí elipsometrie. Na Obr. 11 je znázorněn průběh depoziční rychlosti v závislosti na výkonu na katodách pro zkušební vzorky



**Obr. 11:** Průběh rychlosti depozice v závislosti na výkonu na jednotlivých katodách pro oba terče

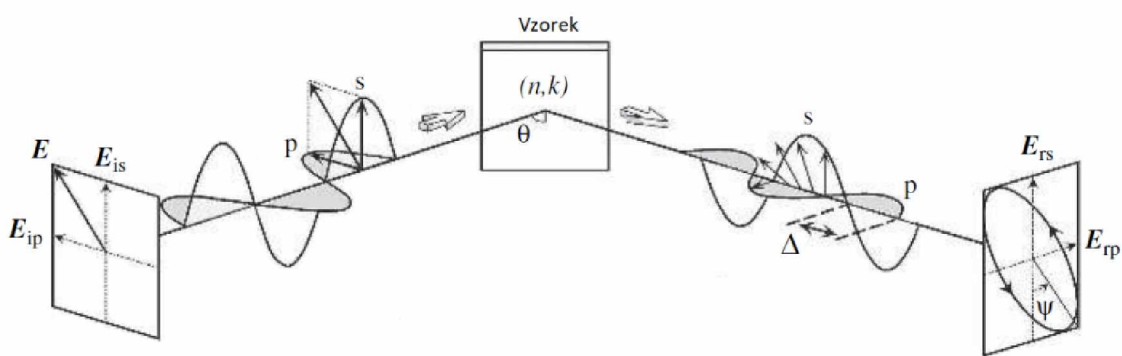
## 2.2 Použité experimentální metody

Pro charakterizaci tenkých vrstev je možné použít mnoho metod, díky kterým jsme schopni zjistit vlastnosti vrstev, jako je složení, optické vlastnosti, morfologie povrchu nebo hodnota zakázaného pásu. V této kapitole budou přiblíženy metody charakterizace použité v této práci.

### 2.2.1 Elipsometrie

Elipsometrie je optická metoda, která umožňuje analyzovat optické vlastnosti materiálů na základě změny elektromagnetického vlnění, které se odráží po interakci se vzorkem [22]. Jak uvádí [23], jedná se o citlivou a nedestruktivní metodu, pomocí které lze určit tloušťku vrstvy a optické charakteristiky mnoha materiálů jako jsou kovy, sklo, keramika, polovodiče nebo kompozity. Měřené materiály mohou být anizotropní, izotropní a může se také jednat o vícevrstvé tenké vrstvy nebo o sytké materiály.

Na Obr. 12 je znázorněn princip měření elipsometrií, kdy na vzorek dopadá lineárně polarizované záření o známé vlnové délce. Amplitudy p- a s- polarizace jsou stejné, to znamená, že fázový posun mezi polarizacemi je nulový. Při odrazu záření ze vzorku se mění amplituda p- a s-, a tím se polarizace záření mění na eliptickou. Poté se měří dvě hodnoty, které vyjadřují poměr amplitudy a fázový rozdíl mezi polarizací p a s.



*Obr. 12: Princip měření elipsometrie (adaptováno z [24])*

Podle [24], se v elipsometrii se měří spektrální závislosti, kde  $\Psi$  je poměr amplitud dvou polarizovaných kolmých vln odrazu od vzorku a  $\Delta$  je fázový posun. U elipsometrie se změna polarizace zaznamenává dle vztahu:

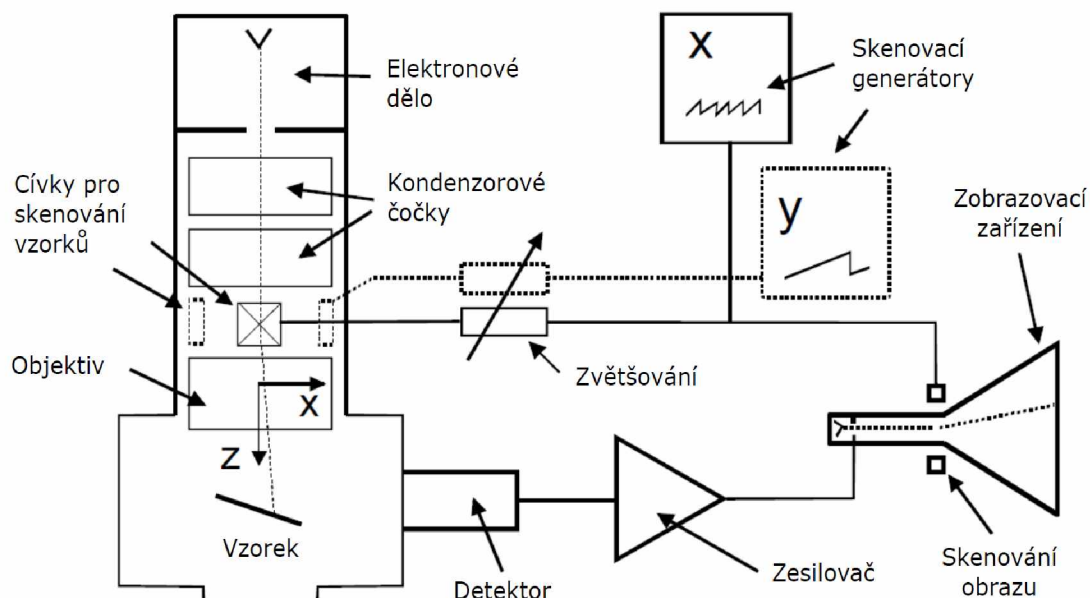
$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (1)$$

Kde jsou elipsometrické úhly ( $\Psi$ ,  $\Delta$ ) definovány pomocí  $r_p$  a  $r_s$ , což jsou koeficienty amplitud  $p$ - a  $s$ - po odrazu od vzorku.

### 2.2.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s energiově disperzním rentgenovým analyzátozem (EDX)

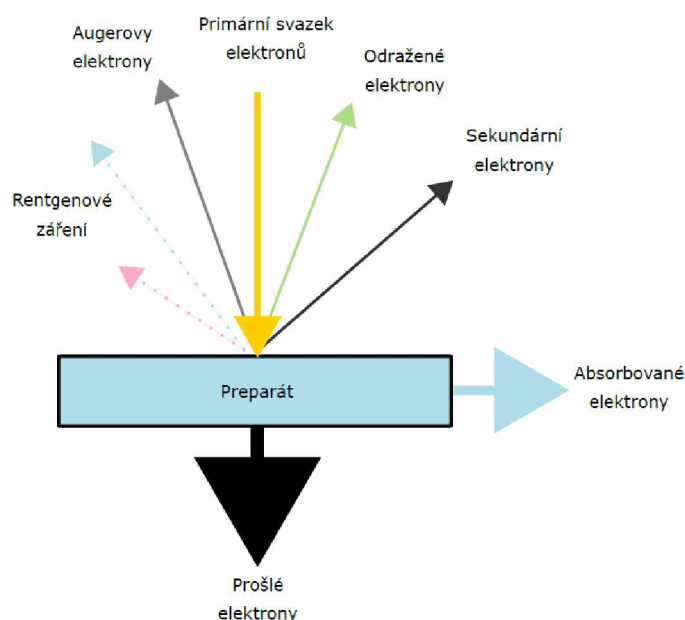
Jak uvádí [25], jedná se o techniku elektronové mikroskopie, která umožňuje studovat mikrostrukturu vzorku, která je studována ve vakuu pomocí svazku elektronů.

Na Obr. 13 je zobrazeno schéma skenovacího elektronového mikroskopu [26], který se skládá ze zdroje elektronů (elektronové dělo), kondenzorových čoček, skenovacích cívek, objektivu, vzorku, detektoru, zesilovače signálu, skenovacího obvodu, skenovaného obrazu a displeje.



**Obr. 13:** Schéma skenovacího elektronového mikroskopu s CRT displejem (adaptováno z [26])

Podle [27] je obraz ve skenovacím elektronovém mikroskopu tvořen následovně: Na vzorek dopadá elektronový svazek (primární elektrony), jehož energie je dána použitým urychlovacím napětím. Energie primárních elektronů ovlivňuje tvar oblasti pod povrchem vzorku, ze kterého jsou uvolňovány jednotlivé signály. Čím menší je urychlovací napětí, tím mělčí a širší je oblast pod povrchem vzorku a zvětšení šířky oblasti je příčinou snížení rozlišovací schopnosti mikroskopu. Jak hluboko do vzorku proniknou primární elektrony závisí i na složení vzorku. U vzorku tvořeného lehkými prvky bude průnik primárních elektronů menší, ale vzorek tvořený těžšími prvky (např. kovy), bude produkovat dostatek odražených elektronů. Interakce elektronů se vzorkem je znázorněna na Obr. 14.



**Obr. 14:** Interakce elektronů se vzorkem (adaptováno z [27])

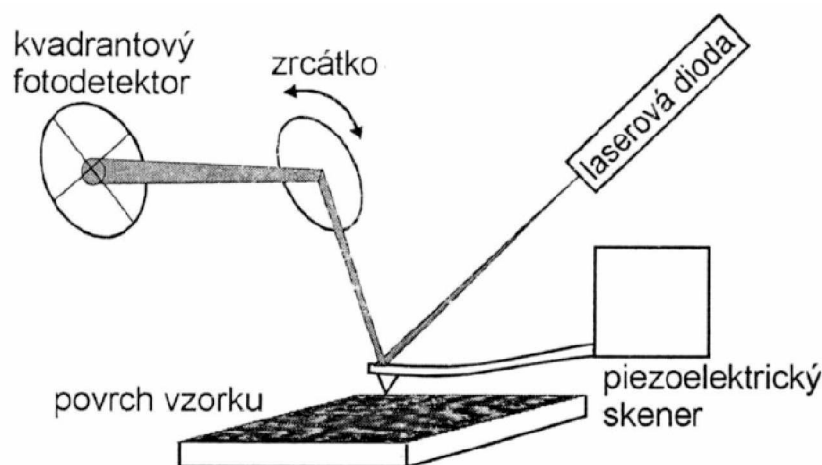
Pro studium povrchu jsou tyto signály důležité, protože s jejich pomocí se dají studovat specifické vlastnosti vzorku. V dalších odstavcích budou uvedeny charakteristiky jednotlivých signálů [27].

K zobrazení povrchu vzorku se využívají sekundární a odražené elektrony. Sekundární elektrony vystupují z hloubky desítek nm, kopírují povrch vzorku a přináší informace o jeho topografii. Odražené elektrony vystupují z větší hloubky a reagují na změnu složení vzorku. Množství zpět odražených elektronů je závislé na protonovém čísle, místa tvořená těžšími prvky budou vypadat světlejší, a naopak místa tvořená lehkými prvky budou tmavá. To

znamená, že lze určit složení jednotlivých oblastí vzorku. Augerovy elektrony vznikají při vyražení elektronů z vnitřních vrstev elektronového obalu atomu, kdy vzniká nezaplněná slupka, která je posléze zaplněna elektronem z vnějších vrstev atomu. Tato uvolněná energie může být vyzářena ve formě rentgenového záření, ale někdy je energie předána některému z elektronů ve vnější slupce, který ji může opustit. Pokud se dostane na povrch jako Augerův elektron, má velmi nízkou energii. Tyto elektrony (Augerovy elektrony) se používají pro popis povrchových jevů pevných látek. Rentgenové záření (katodoluminiscence) vzniká při přechodu elektronu z vyšších elektronových pásů na volné hladiny. Emitované rentgenové záření má spektrum, a tak lze charakterizovat prvky obsažené ve vzorku, čehož se využívá pro EDX.

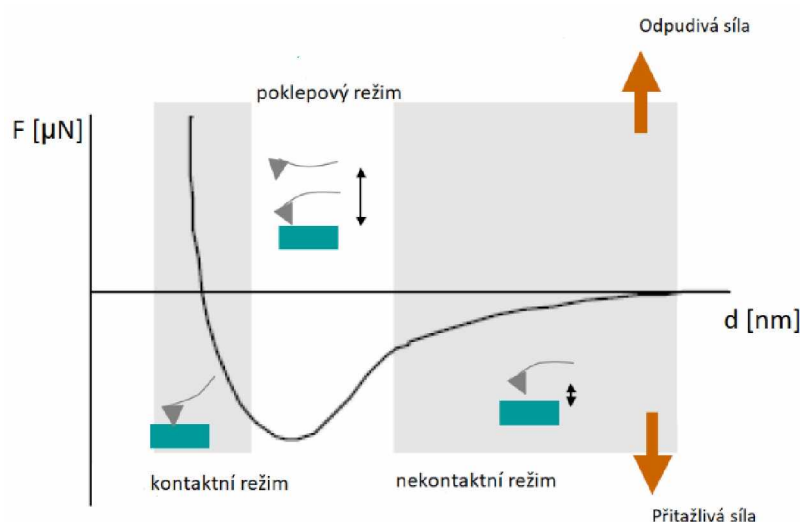
### 2.2.3 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Pomocí mikroskopie atomárních sil lze mapovat rozložení atomárních sil na povrchu vzorku [28]. Jedná se o velmi citlivou a přesnou metodu. Měřicím prvkem je podle [29] ostrý hrot pohybující se těsně nad vzorkem. Hrot, který interaguje s povrchem vzorku, je připevněn na konci pružného raménka. Interakční síly mezi hrotem a vzorkem způsobují ohýbání raménka. Tyto nepatrné pohyby raménka, jsou detekovány optickým systémem, který vytváří světelné body používané pro rekonstrukci 3D obrazu povrchu vzorku (Obr. 15). Jedná se o všestrannou techniku měření, která je vhodná pro pevné vzorky, ale i biologický materiál.



Obr. 15: Princip detekce AFM (adaptováno z [27])

Podle citlivosti vzorku se volí vhodný režim [30]. Kontaktní režim, kdy je raménko s hrotem v konstantní výšce a při nerovnostech povrchu vzorku dochází k ohybu raménka, které přesně kopíruje povrch vzorku. Síla na hrotu je odpudivá. Tato metoda je vhodná pro hrubší povrchy. Výhodou je vysoká skenovací rychlost. Naopak nevýhodou je větší riziko poškození nebo deformování měkkých vzorků. Pokleповý režim využívá kmitání raménka, kdy se hrot občas dotkne povrchu vzorku. Výhodou je možnost měření vzorků, u kterých by v případě kontaktního režimu hrozilo poškození. Bezdotykový režim využívá pro měření změnu rezonanční frekvence, přičemž se hrot nedotýká vzorku. Výhodou je delší životnost sondy a malá síla působící na vzorek. Nevýhodou je, že kontaminovaný povrch vrstvy může zkreslit kmitání, a také nižší rozlišení snímku. Režimy AFM jsou zobrazeny na Obr. 16.



*Obr. 16: Režimy a působení sil u AFM (adaptováno z [28])*

## 2.2.4 Rentgenová difrakční analýza (XRD)

Jak uvádí [31], tato metoda charakterizace je používána pro stanovení fázového složení pro látky s krystalickou fází. Krystaly obsahují mřížkové krystalové roviny, které mohou být rovnoběžné nebo proložené. Rovnoběžné roviny jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od sebe a označují se jako stejnocenné roviny  $h$ ,  $k$ ,  $l$  (Millerovy indexy). Pro měření je používáno charakteristické rentgenové záření, které obsahuje linie s vlnovými délkami, které lze přesně změřit. Princip spočívá v tom, že na vzorek dopadá monochromatické záření. Toto záření se na atomech uvnitř krystalu rozptyluje do všech směrů. Rozptýlené sekundární záření se interferencí zesiluje (v některých směrech) a vzniká difraktované záření.



### 2.2.5 Profilometrie

Profilometrie se využívá pro měření profilů nebo pro zjišťování struktury povrchu. Jak uvádí [32], může se jednat o bezkontaktní nebo kontaktní zařízení. Pro bezkontaktní měření se používá laser, nebo bílé světlo. U kontaktního měření (Obr. 17) je měřicí sondou diamantový hrot kuželového tvaru s určitým poloměrem křivosti. Hrot se pohybuje po povrchu vzorku a jeho poloha je snímána kapacitním, nebo induktivním snímačem. Síla, kterou se dotýká hrot vzorku, se pohybuje v rozmezí 10–30  $\mu\text{N}$ . Některé přístroje umožňují použití bezkontaktního i kontaktního módu.

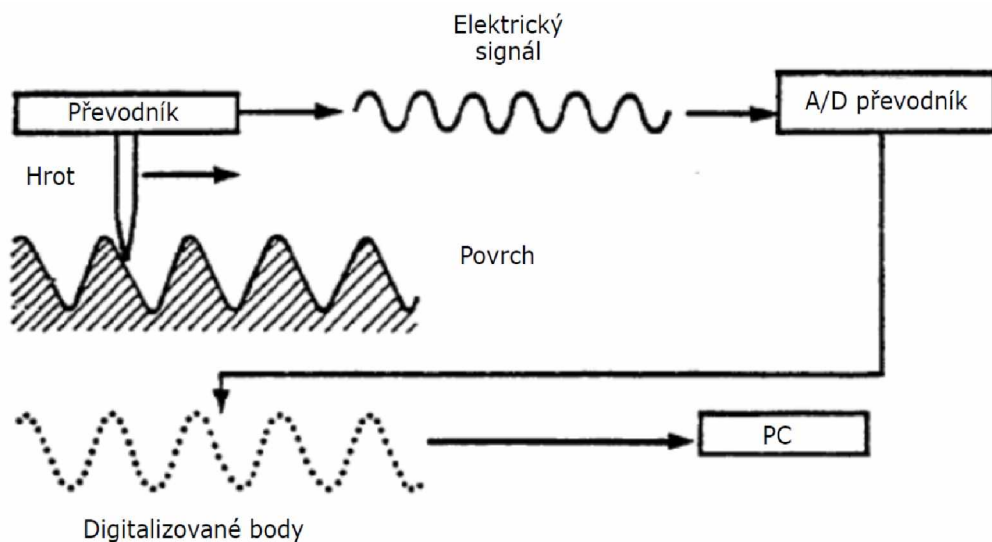
V případě měření tloušťky vrstvy je dobré mít na vzorku místo, kde je ostré rozhraní mezi substrátem a deponovaným materiálem. V případě, že už je vzorek nadeponován bez tohoto rozhraní, lze ho vytvořit selektivním leptáním nebo vrypem.

V této práci byla profilometrie využita pro měření drsnosti povrchu vzorku, kdy jsou důležité následující veličiny:

$R_a$  – průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti

$R_t$  – celková výška profilu drsnosti

$R_z$  největší výška profilu drsnosti

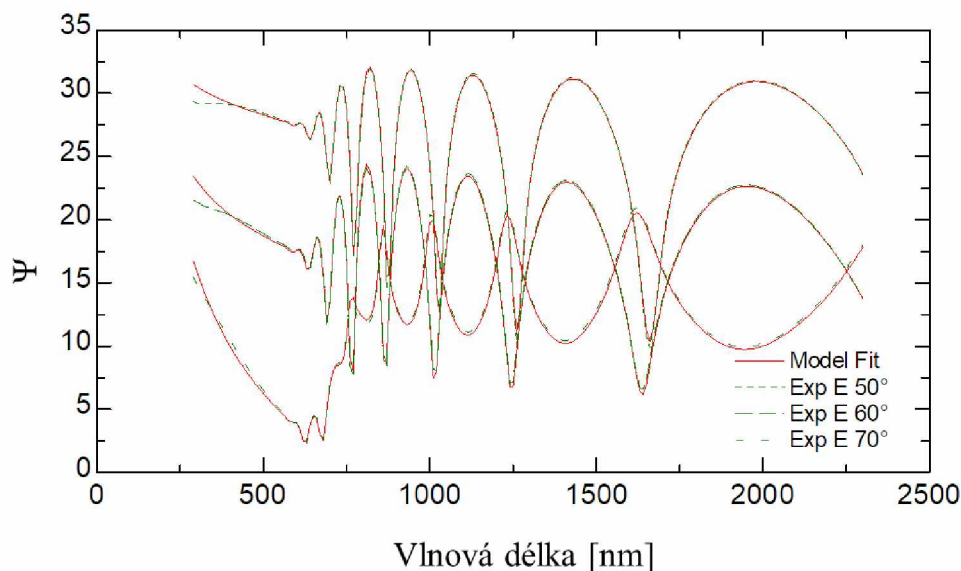


*Obr. 17: Ukázka principu profilometrie pro kontaktní mód (adaptováno z [33])*

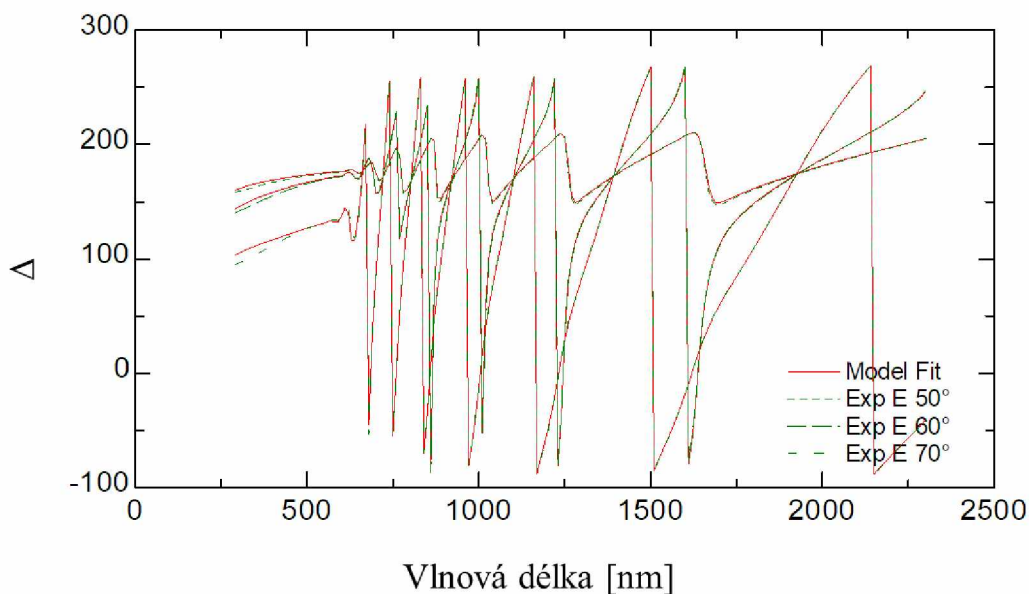
## 3 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 3.1 Elipsometrie

Pomocí spektrální elipsometrie s proměnným úhlem dopadu (VASE, J. A. Woollam Co., Inc.) byly proměřeny tenké vrstvy ve spektrální oblasti 290–2300 nm s krokem vlnové délky 10 nm a úhly dopadu 50°, 60° a 70° (Obr. 18–19). Optické parametry byly získány pomocí CL modelu (Codyho-Lorentze). Pro vyhodnocení experimentálních elipsometrických dat byl použit model, který byl složen ze tří částí. Spodní vrstvu tvořil substrát z mikroskopického skla, následující vrstva byla vlastní tenká vrstva (popsána CL modelem), poslední část byla tvořena vrstvou korespondující s povrchovou nerovností tenké vrstvy. Experimentální data jsou porovnávána s vygenerovanými hodnotami za použití srovnávací funkce. Odchylku experimentálních dat od modelových dat určuje střední kvadratická chyba (MSE - „mean square error“), snahou je dosažení co nejnižší hodnoty MSE. Maximální hodnota MSE byla 4,36, což ukazuje na dobrou shodu zvoleného modelu s experimentálními daty.



*Obr. 18: Spektrální závislost  $\Psi$  na vlnové délce pro úhly dopadu 50°, 60° a 70° (druhý vzorek)*



**Obr. 19:** Spektrální závislost  $\Delta$  na vlnové délce pro úhly dopadu  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $70^\circ$  (druhý vzorek)

Pomocí elipsometrie byly naměřeny další parametry (Tab. 2–3). U desátého vzorku musel být použit jiný model kvůli vysoké absorpci v měřené spektrální oblasti. Z tohoto důvodu byl tento vzorek měřen na infračerveném elipsometru ( $6000\text{--}300\text{ cm}^{-1}$ ), a proto jsou uvedeny pouze vybrané hodnoty. Všechny vzorky byly deponovány při tlaku Ar  $0,5\text{ Pa}$  a průtoku Ar  $75\text{ sccm}$ .

Bylo zjišťováno, jak se mění hodnota  $E_g$  v závislosti na obsahu jednotlivých prvků ve vzorcích. Nejvyšší hodnota  $E_g$  byla naměřena u prvního vzorku  $2,08$ , tedy čistého  $\text{GeSe}_2$  a nejnižší u devátého vzorku  $0,84$ , který obsahuje velké množství bismutu a žádné germanium, jak je vidět na Obr. 20.

Nejvyšší hodnoty povrchové nerovnosti byly zaznamenány u vzorků připravených naprašováním z jednoho terče ( $\text{GeSe}_2$  a  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) viz. Tab. 3.

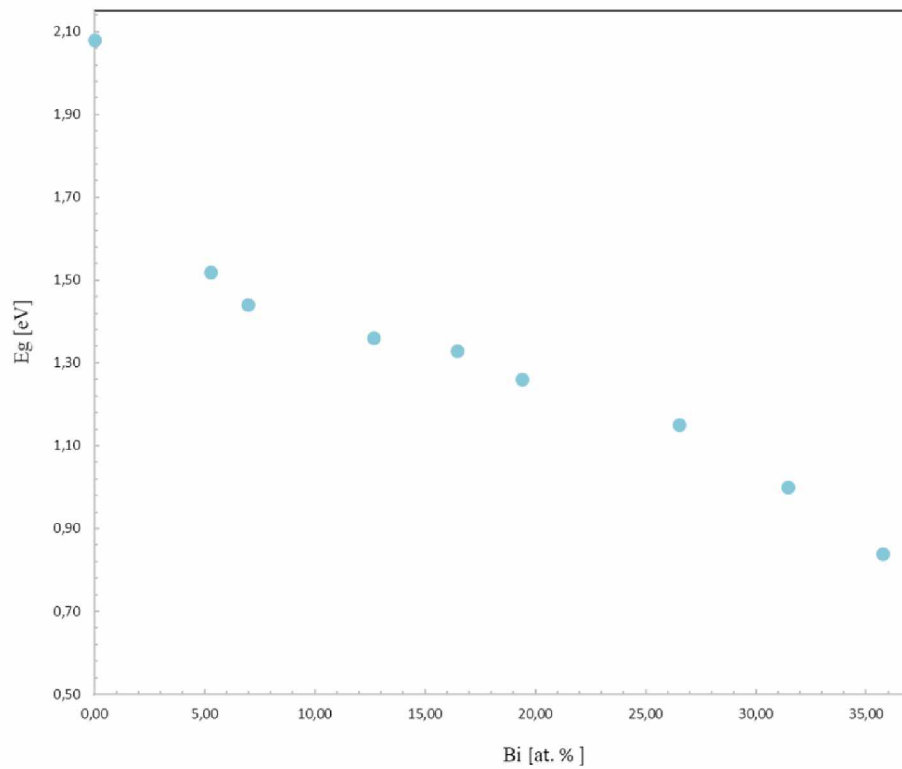
Na Obr. 21 je znázorněna závislost indexu lomu na vlnové délce pro vzorky 1–9. S přibývajícím množstvím bismutu se index lomu zvyšoval. Nejnižší hodnota indexu lomu (při  $1500\text{ nm}$ ) byla u prvního vzorku, a to  $2,37$ , naopak nejvyšší hodnota byla u devátého vzorku, a to  $3,99$ .

**Tab. 2:** Naměřená data z elipsometrie

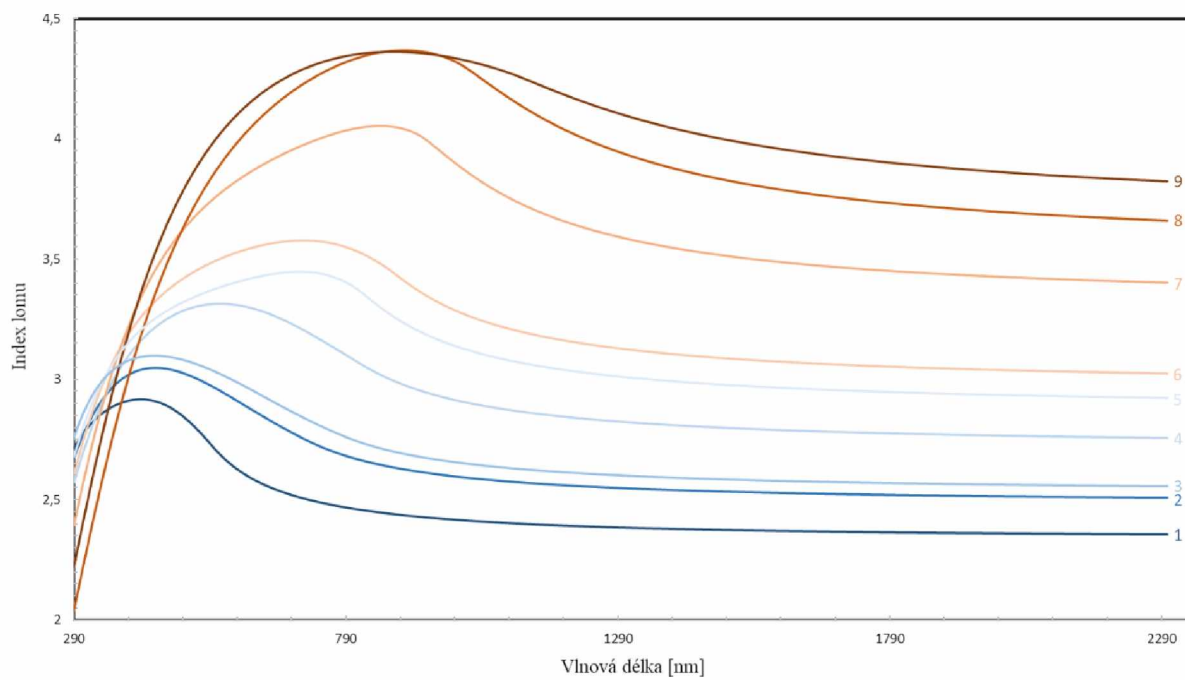
| Vzorek | MSE  | Eg [eV]   | Tloušťka vrstvy [nm] |
|--------|------|-----------|----------------------|
| 1      | 1,75 | 2,08±0,02 | 862,1±1              |
| 2      | 2,00 | 1,52±0,02 | 975,1±1              |
| 3      | 1,85 | 1,44±0,02 | 1012,7±1             |
| 4      | 2,46 | 1,36±0,02 | 940,5±1              |
| 5      | 1,84 | 1,33±0,02 | 972,0±1              |
| 6      | 2,46 | 1,26±0,02 | 940,5±1              |
| 7      | 1,06 | 1,15±0,02 | 934,5±1              |
| 8      | 1,38 | 1,00±0,02 | 842,6±1              |
| 9      | 4,36 | 0,84±0,02 | 769,4±1              |
| 10     | 0,79 | -         | 654,9±1              |

**Tab. 3:** Naměřená data z elipsometrie

| Vzorek | Povrchová nerovnost [nm] | Index lomu | Depoziční čas [min.ss] |
|--------|--------------------------|------------|------------------------|
| 1      | 4,6±0,5                  | 2,37       | 171                    |
| 2      | 3,5±0,5                  | 2,53       | 55                     |
| 3      | 1,6±0,5                  | 2,58       | 56                     |
| 4      | 2,7±0,5                  | 2,80       | 60                     |
| 5      | 2,7±0,5                  | 2,98       | 63                     |
| 6      | 2,7±0,5                  | 3,09       | 62                     |
| 7      | 2,4±0,5                  | 3,51       | 59                     |
| 8      | 1,9±0,5                  | 3,82       | 52                     |
| 9      | 2,1±0,5                  | 3,99       | 44                     |
| 10     | 26,1±0,5                 | -          | 55                     |



**Obr. 20:** Změna  $E_g$  v závislosti na obsahu Bi ve vzorku



**Obr. 21:** Index lomu v závislosti na vlnových délkách pro vzorky 1–9

### 3.2 Mikroskopie atomárních sil a skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzním rentgenovým analyzátozem

Pomocí mikroskopu atomárních sil Solver NEXT, NT-MDT, byla zjištěna drsnost povrchů jednotlivých vzorků. Vzorky byly měřeny vždy 3×, a to na dvou plochách o velikostech 2×2 μm a 5×5 μm (Tab. 4). Nejvyšší drsnost byla prokázána u čisté vrstvy Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, ale nedá se říci, že by se se vzrůstající hodnotou bismutu zvyšovala i drsnost povrchu. Profilometrie tyto výsledky potvrdila. Snímky získané z AFM a SEM jsou zobrazeny na Obr. 22–31.

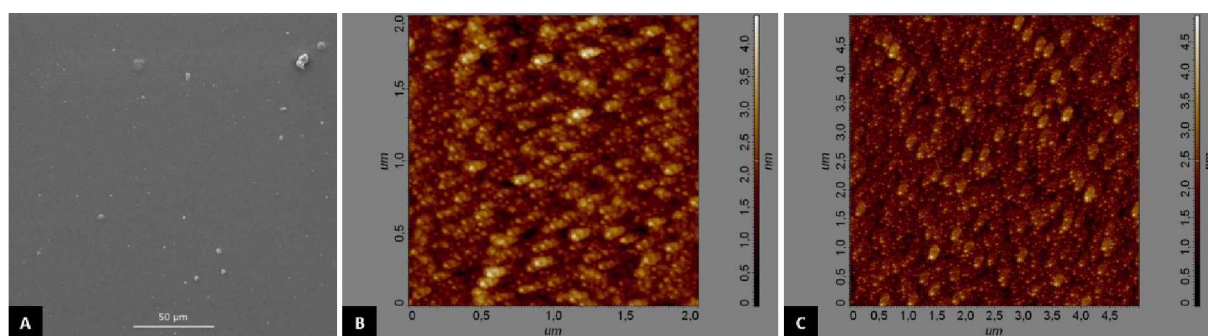
*Tab. 4: Drsnost jednotlivých vzorků naměřena pomocí AFM pro políčka o velikostech 2×2 μm a 5×5 μm*

| Vzorek | Drsnost [nm]  |               |
|--------|---------------|---------------|
|        | pole 2×2 [μm] | pole 5×5 [μm] |
| 1      | 0,533         | 0,556         |
| 2      | 0,382         | 0,376         |
| 3      | 0,222         | 0,233         |
| 4      | 0,309         | 0,354         |
| 5      | 0,154         | 0,164         |
| 6      | 0,369         | 0,424         |
| 7      | 0,718         | 0,746         |
| 8      | 0,360         | 0,335         |
| 9      | 0,155         | 0,160         |
| 10     | 1,799         | 1,816         |

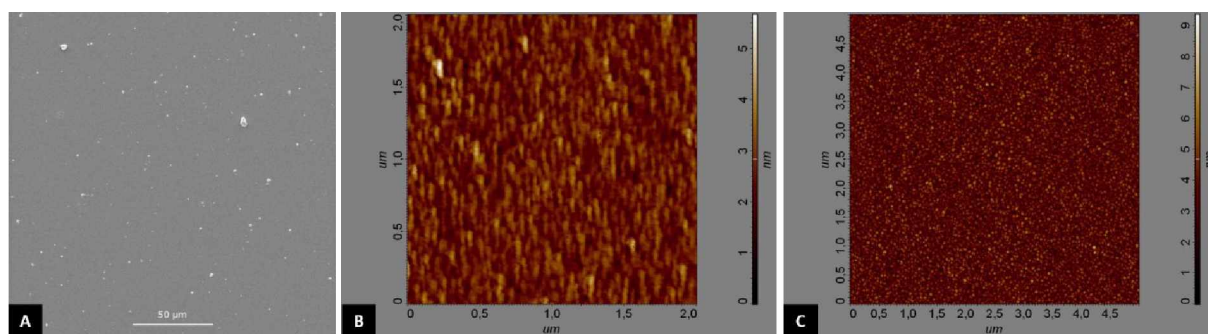
Skenovacím elektronovým mikroskopem TESCAN VEGA 3 EasyProbe spojeným s energiově-disperzním rentgenovým analyzátozem (EDX) byl studován povrch vzorků, ale také složení tenkých vrstev (Tab. 5). SEM potvrzuje, že použitá depoziční metoda umožňuje nanesení homogenní vrstvy bez větších defektů (Obr. 22–31). Poměry zastoupení jednotlivých prvků v at. % jsou uvedeny v Tab. 5.

**Tab. 5:** Zastoupení prvků ve vzorcích v at. % s přesností měření  $\pm 1$  at. %

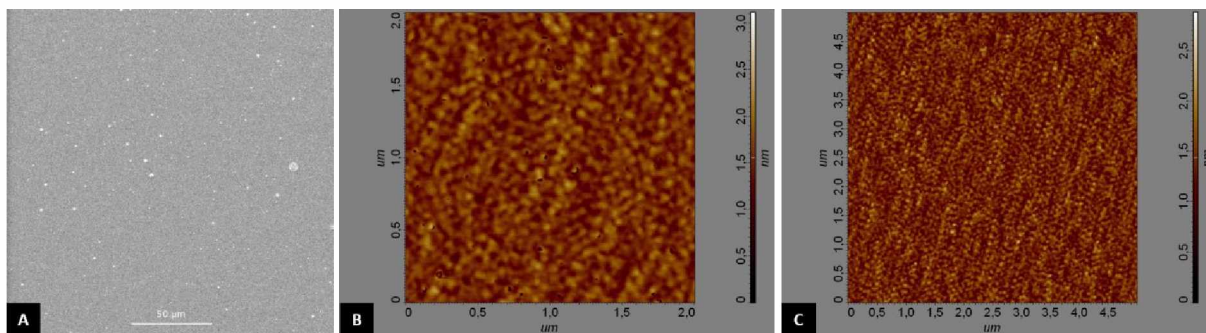
| Vzorek | Zastoupení jednotlivých prvků ve vzorcích [at. %] |       |       |
|--------|---|-------|-------|
|        | Ge  | Bi    | Se    |
| 1      | 32,10   | 0,00  | 67,90 |
| 2      | 28,49   | 5,28  | 66,23 |
| 3      | 27,60   | 6,96  | 65,44 |
| 4      | 22,54   | 12,66 | 64,80 |
| 5      | 20,53   | 16,45 | 63,02 |
| 6      | 18,24   | 19,40 | 62,37 |
| 7      | 12,37   | 61,13 | 26,50 |
| 8      | 8,77  | 31,47 | 59,76 |
| 9      | 6,08  | 35,75 | 58,17 |
| 10     | 0,00  | 45,71 | 54,29 |



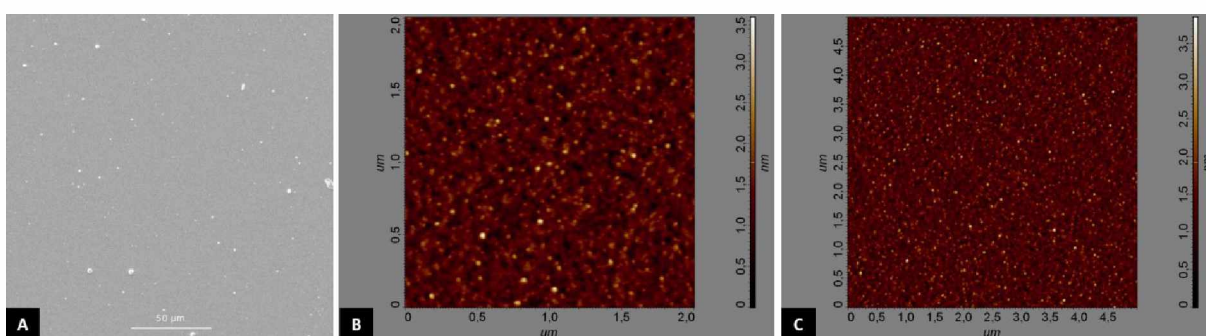
**Obr. 22:** Snímky 1. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti 2 $\times$ 2  $\mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti 5 $\times$ 5  $\mu\text{m}$



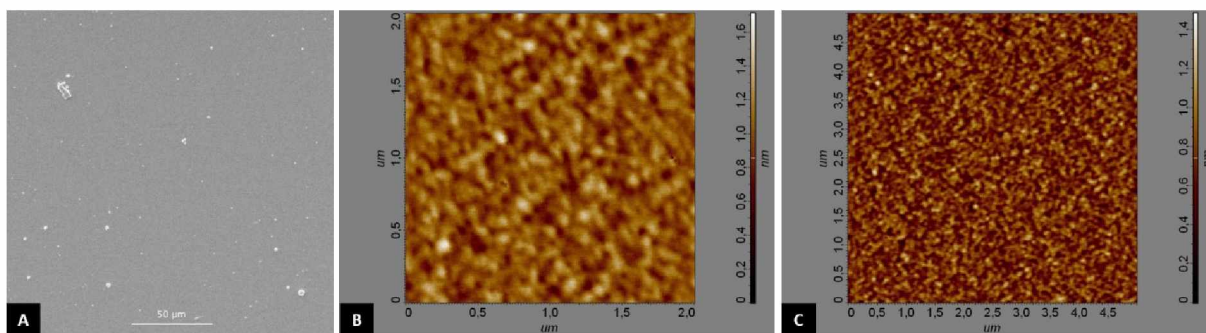
**Obr. 23:** Snímky 2. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti 2 $\times$ 2  $\mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti 5 $\times$ 5  $\mu\text{m}$



**Obr. 24:** Snímky 3. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$

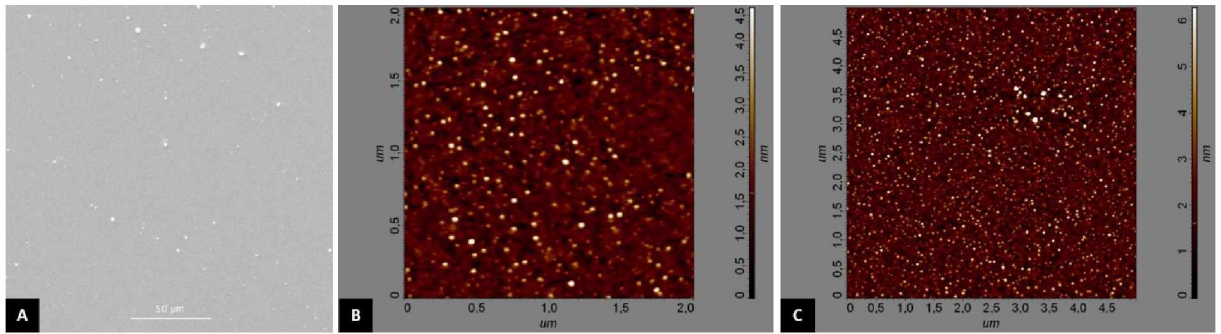


**Obr. 25:** Snímky 4. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$

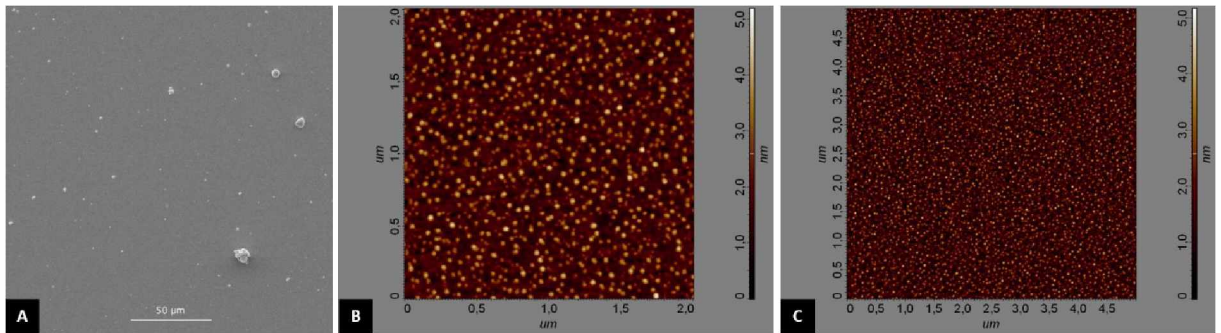


**Obr. 26:** Snímky 5. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$

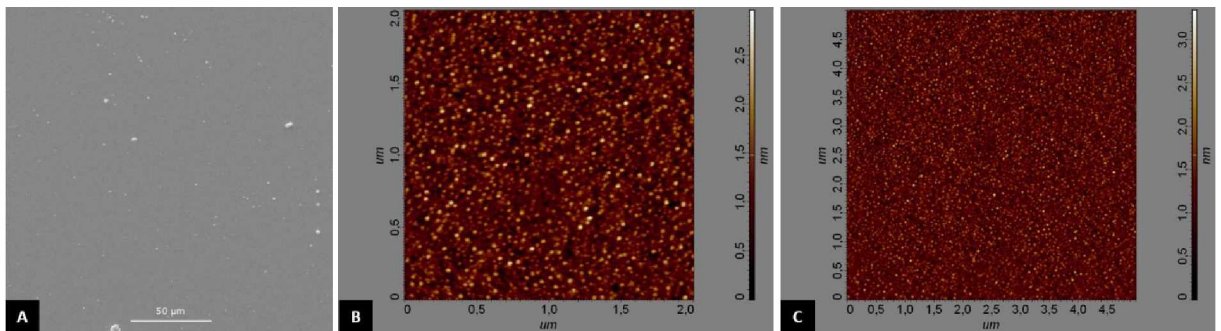




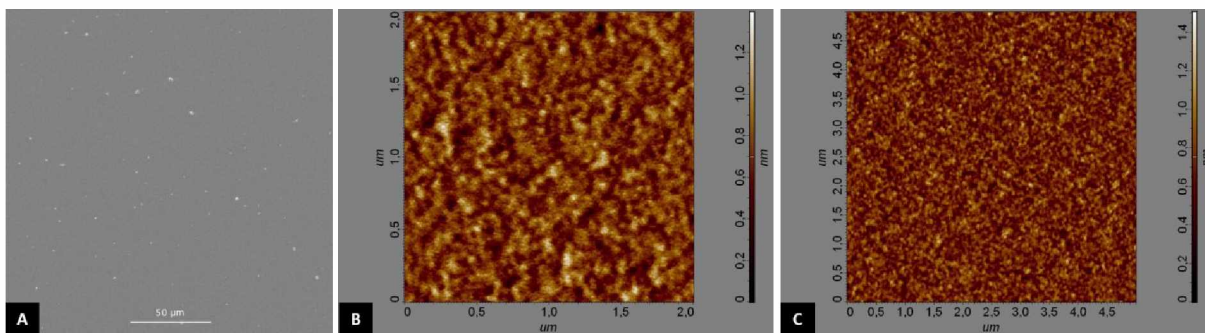
**Obr. 27:** Snímky 6. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$



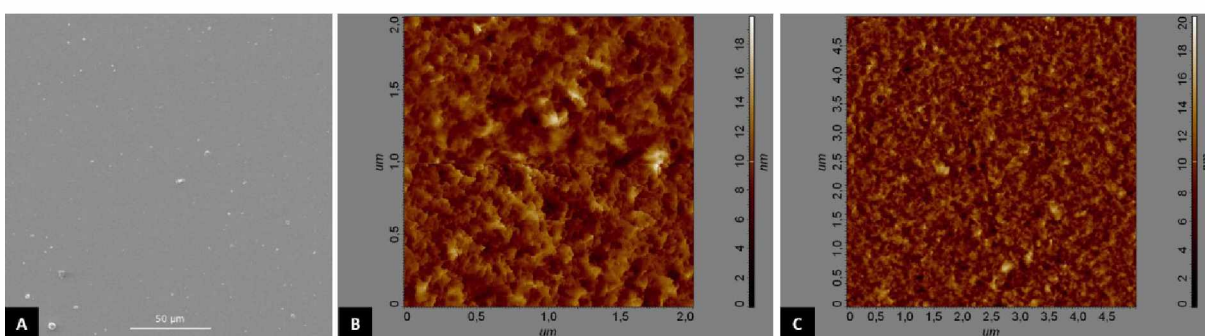
**Obr. 28:** Snímky 7. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$



**Obr. 29:** Snímky 8. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$



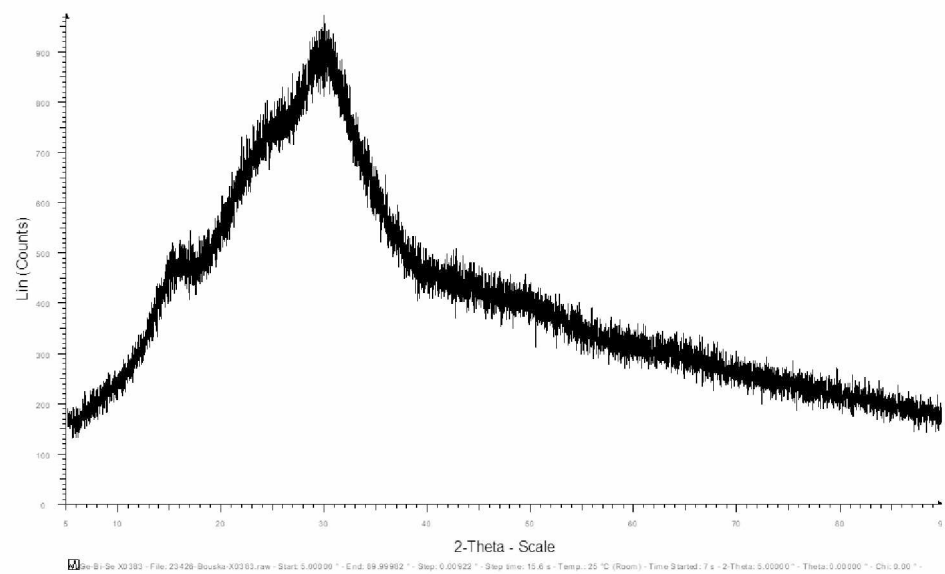
**Obr. 30:** Snímky 9. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$



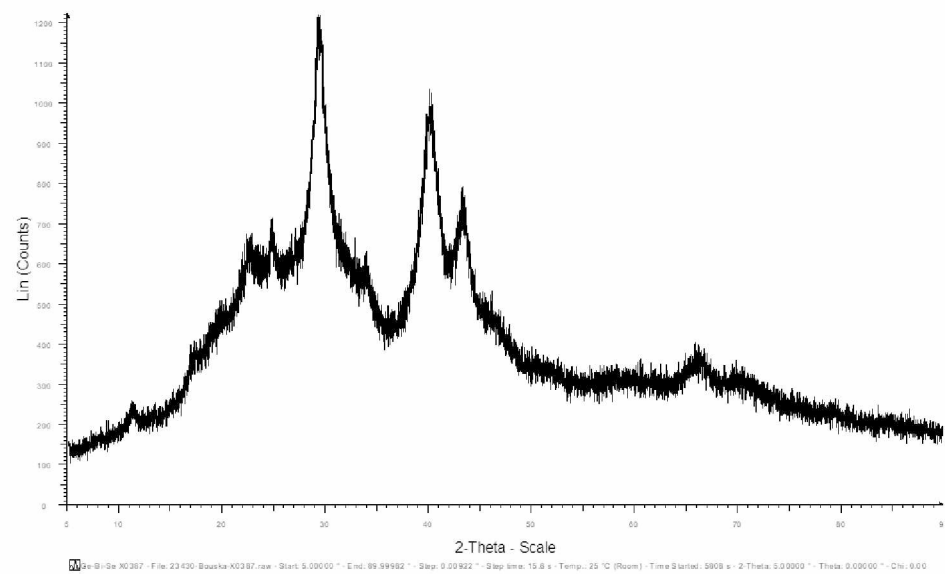
**Obr. 31:** Snímky 10. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50  $\mu\text{m}$ , b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti  $5 \times 5 \mu\text{m}$

### 3.3 Rentgenová difrakční analýza

Pomocí rentgenové difrakční analýzy s použitím difraktometru Bruker AXE D8-Advance za použití  $\text{Cu K}\alpha$  záření se sekundárním grafitovým monochromátorem bylo zjišťováno, zda vrstvy vykazují amorfni nebo krystalickou fázi. Difraktogramy vrstev 1–9 jsou analogické, z toho důvodu je uveden difraktogram šestého vzorku (Obr. 32). Naměřená data potvrzují, že se jedná o amorfni vrstvy. U desátého vzorku byla nalezena krystalická fáze. Difrakční čáry odpovídají  $\text{BiSe}$  nebo  $\text{Bi}_8\text{Se}_9$  a ve vzorku byl identifikován také selen (Obr. 33).



*Obr. 32: Difraktogram šestého vzorku, vykazující amorfni fázi*



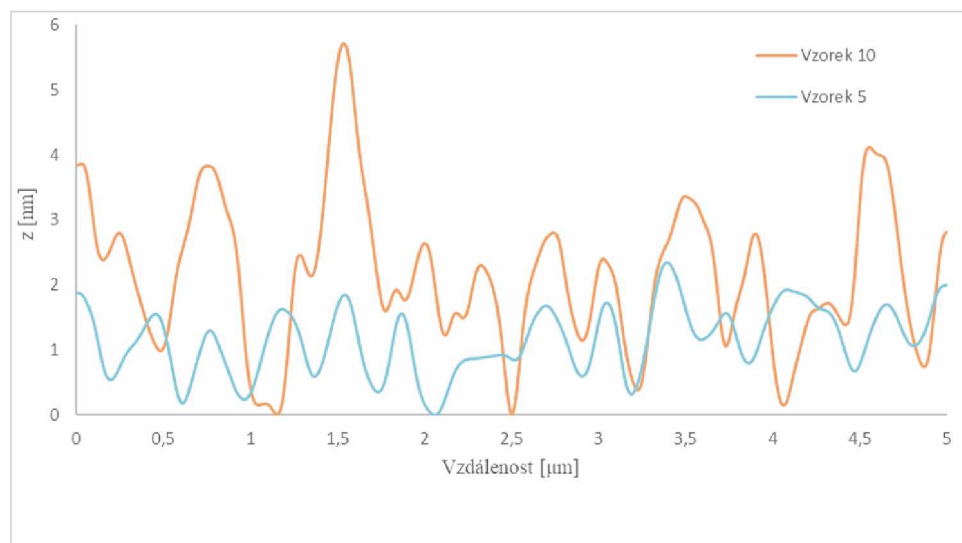
*Obr. 33: Difraktogram desátého vzorku, vykazující krystalickou fázi*

### 3.4 Profilometrie

Profilometrem KLA Tencor P-7 byla zjišťována drsnost povrchu vzorků. Na Obr. 34 jsou zobrazeny profily povrchů s nejvyšší drsností pro desátý vzorek a nejnižší drsností pro pátý vzorek. Parametry použité pro měření jsou v Tab. 6. Výsledky z profilometrie odpovídají výsledkům z měření pomocí AFM.

*Tab. 6: Parametry měření při profilometrii*

| Parametr                       | Hodnota | Jednotka |
|--------------------------------|---------|----------|
| Délka skenu                    | 5       | mm       |
| Skenovací rychlost             | 2       | mm/s     |
| Vzorkovací frekvence           | 100     | Hz       |
| Síla hrotu (působící hmotnost) | 0,1     | mg       |



*Obr. 34: Reprezentativní profily povrchů s nejvyšší drsností pro desátý vzorek a nejnižší drsností pro pátý vzorek*

## 4 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly připraveny a charakterizovány tenké vrstvy Ge-Bi-Se. Tyto vrstvy byly připraveny fyzikální depoziční metodou co-sputtering, kdy byly pro nanášení použity dva terče, a to  $\text{GeSe}_2$  a  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Jako substrát byly použity dva materiály mikroskopické sklo a křemík. Bylo připraveno deset tenkých vrstev s tloušťkou 800 nm–1  $\mu\text{m}$ .

Každý ze vzorků měl jiné složení, kdy byl první vzorek deponován pouze z terče  $\text{GeSe}_2$  a desátý vzorek pouze z terče  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Ostatní vzorky měly různé zastoupení jednotlivých prvků v závislosti na použitém výkonu pro jednotlivé katody.

Z elipsometrických měření je zřejmé, že index lomu se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem bismutu a hodnota  $E_g$  naopak klesá se vzrůstajícím obsahem bismutu.

Mikroskopií atomárních sil bylo potvrzeno, že připravené vrstvy jsou bez povrchových defektů a maximální drsnost okolo 1,8 nm byla naměřena u desátého vzorku připraveného z jednoho terče, a to  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Nejnižší drsnost byla naměřena u pátého vzorku. Tento výsledek byl potvrzen i profilometrií, kde byla také zkoumána drsnost povrchu.

Rentgenová difrakční analýza potvrdila, že nanesené vrstvy jsou amorfni, kromě vzorku připraveného pouze z terče  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , který vykazuje krystalickou strukturu.

Výsledky získané v rámci diplomové práce budou sloužit jako podklady pro publikování i další zkoumání tenkých vrstev Ge-Bi-Se. Vrstvy připravené v této práci by mohly být použity pro elektroniku jako displeje nebo elektrické součástky apod.

## 5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOTTFER, Daniel, FERDINANDY, Milan. Tenké vrstvy. Košice: Edícia štúdijskej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0359-8
- [2] HALL, David. B., UNDERHILL, Patrick a TORKELSON, John M. (1998). Spin Coating of Thin and Ultrathin Polymer Films. *Polymer Engineering*, [online] [cit. 2019-02-01] 38(12), s 2039-2045. Dostupné z: [http://homepages.rpiscscrews.us/~underp3/Pubs/Underhill\\_PolyEngSci\\_1998.pdf](http://homepages.rpiscscrews.us/~underp3/Pubs/Underhill_PolyEngSci_1998.pdf)
- [3] SESHAN, Krishna. Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment, and applications. 2. vyd. New York: Noyes Publications, 2002. ISBN 0-8155-1442-5.
- [4] Manufacturing methods and characteristics of thin film resistors [online] Susuu Co., Ltd. A Specialist in Thin Film Technology. © 2019 [cit. 20.12.2018]. Dostupné z: [https://www.susumu.co.jp/english/tech/know\\_how\\_02.php](https://www.susumu.co.jp/english/tech/know_how_02.php)
- [5] BŮŽEK, J., PÁLKA, K., VOYNAROVYCH, I., VLČEK, M. Photo and thermally induced changes in As-S-Se chalcogenide thin films. [online]. [cit. 20.01.2019]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1612/1612.03781.pdf>
- [6] HAWLOVA, Petra. Fotostabilita amorfních chalcogenidů systému Ge-As-Se. Pardubice, 2012. Diplomová práce, Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Katedra obecné a anorganické chemie.
- [7] ANASTASESCU, M., GARTNER, M., SZEKERES, A., PAMUKCHIEVA, V. (2014). Surface topographic study of chalcogenide thin films of  $\text{Ge}_x\text{Sb}(\text{As})_{40-x}\text{S}_{50}\text{Te}_{10}$  glasses. *Micron*. [online]. [cit. 22.01.2019] 59, s. 1–7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968432813001972>
- [8] AL-AGEL, F.A. (2011) Influence of composition on electrical and optical properties of new chalcogenide thin films from Ge–Se–Te systém. *Optics & Laser Technology*. [online]. [cit. 22.01.2019] 43, s. 781–786. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399210002823>
- [9] PATNAIK, Pradyot. Handbook of inorganic chemicals. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 00-704-9439-8.

- [10] RAJAGOPALAN, T., REDDY, G. B. (2000). Thermal and optical properties of  $\text{Ge}_5\text{Bi}_{18}\text{Se}_{77}$  films. *Journal of materials science: Materials in electronics*. [online]. [cit. 23.01.2019] 11, s. 397–400. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008958903218>
- [11] ABDEL-RAHIM, F. M., HAFIZ, M. M., ALSORORY, H. (2013). Thermal annealing effect on the struktura and optical properties of  $\text{Bi}_5\text{Ge}_{40}\text{Se}_{55}$  thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. [online]. [cit. 22.01.2019] 570, s. 76–80. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838813006622>
- [12] APARIMITA, A., BEHERA, M., SRIPAN, C., GANESAN, R., JENA, S., NAIK, R. (2018). Effect of Bi addition on the optical properties of  $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70-x}\text{Bi}_x$  thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. [online]. [cit. 22.01.2019] 739, s. 997–1004. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838817344997>
- [13] YIN, H., LIU, Y. LI, L., ZHENG, J., ZENG, H., CHEN, G. (2017). Study of effects of te addition and oxygen contamination on the surface short range order structure of  $\text{GeBiSe}$  glass by XPS. *Journal of Alloys and Compounds*. [online]. [cit. 28.01.2019] 712, s. 560–566. Dostupné z: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-0783522a-477f-3755-911a-20b2bb8fc162>
- [14] BUNSHAH, R. F. *Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, technology, and applications*. 2. vyd. Noyes Publications, 1994. ISBN: 0-8155-1337-2.
- [15] MATTOX, D. M. *The foundations of vacuum coating technology*. New York: Noyes Publications, 2003. ISBN: 0-8155-1495-6.
- [16] SREE HARSHA, K. S. *Principles of physical vapor deposition of thin films*. Boston: Elsevier, 2006. ISBN: 978-0-08-044699-8
- [17] MATTOX, D. M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. 2. vyd. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-81-552037-5.
- [18] The Sputtering Target Division [online]. Kobelco research institute. © 2015 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.kobelcokaken.co.jp/target/english/index.html>.

- [19] Magnetron Sputtering Deposition Systems – Denton Vacuum. [online]. Thin Film Deposition Systems – Denton Vacuum. Denton Vacuum. All Rights Reserved. © 2019 [cit. 20.04.2019]. Dostupné z: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/>.
- [20] Cathodic for thin-layer deposition sputtering target – Angstrom Sciences, Inc. [online]. DirectIndustry – The online industrial exhibition: sensors, automation, motors, pumps, materials handling, packaging. © 2019 [cit. 20.04.2019]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/angstrom-sciences-inc/product-22021-340838.html>
- [21] SVĚTLÍK, Tomáš. Příprava tenkých vrstev ze systému Ga-S metodou spin coating a jejich charakterizace mikroskopií atomárních sil. Pardubice, 2015. Diplomová práce, Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Katedra polygrafie a fotofyziky
- [22] TICHOPÁDEK, Petr. Elipsometrie povrchů a tenkých vrstev-vývoj a aplikace zařízení. zkrácená verze. Brno: Vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-214-3138-5.
- [23] ZHENG, Yu-Xiang, Rong-Jun ZHANG a Liang-Yao CHE. (2012) Ellipsometry and Its Applications in Stoichiometry. Stoichiometry and Materials Science - When Numbers Matter [online]. InTech, [cit. 2019-01-22]. ISBN 978-953-51-0512-1. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/stoichiometry-and-materials-science-when-numbers-matter/ellipsometry-and-its-application-in-stoichiometry>
- [24] FUJIWARA, Hiroyuki. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications. Hoboken, John Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-01608-4.
- [25] MIKMEKOVÁ, Šárka. Kvantitativní mapování dopantu v polovodiči pomocí kontrastu injektovaného náboje v rastrovacím mikroskopu s velmi pomalými elektrony [online]. Brno, 2009 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/10935>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [26] EGERTON, R. F. Physical principles of electron microscopy: an introduction to TEM, SEM, and AEM. New York: Springer, 2005. ISBN 978-0387-25800-0.
- [27] KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. Elektronová mikroskopie. Olomouc, 2011. ISBN 978-80-244-2739-3.



- [28] KUBÍNEK, R., VÚJTEK, M., ZBOŘIL, R. Mikroskopie atomárních sil a její aplikace při studiu povrchů a nanočástic. [online]. [cit. 25.01.2019] s. 1–4. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/14kf02-t.pdf>
- [29] CHATTERJEE, S., GADAD, S., KUNDU, T. (2010) Atomic Force Microscopy. A Tool to Unveil the Mystery of Biological System. [online]. [cit. 25.01.2019] s. 630–642. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12045-010-0047-z>
- [30] WILSON, R. A., BULLEN, H. A. (2006). Basic Theory Atomic Force Microscopy (AFM). [online]. [cit. 25.01.2019] Dostupné z: [https://asdlib.org/onlineArticles/courseware/Bullen/SPMModule\\_BasicTheoryAFM.pdf](https://asdlib.org/onlineArticles/courseware/Bullen/SPMModule_BasicTheoryAFM.pdf)
- [31] KLEKNER, Martin. Aplikace analytických metod využívajících RTG záření v oblasti analýz stavebních materiálů. [online]. Brno, 2012. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/11281/10115.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [32] FOŘT, Tomáš. Charakterizace nanostruktur deponovaných PVD a CVD technologiemi. [online]. Brno, 2009. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=20198](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=20198) Doktorská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky.
- [33] AMIRZADA, Muhammad R. Optimization in the Technological Steps for the Fabrication of Large Area Micromirror Arrays. [online]. Kassel, 2014. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/291937982\\_Optimization\\_in\\_the\\_Technological\\_Steps\\_for\\_the\\_Fabrication\\_of\\_Large\\_Area\\_Micromirror\\_Arrays](https://www.researchgate.net/publication/291937982_Optimization_in_the_Technological_Steps_for_the_Fabrication_of_Large_Area_Micromirror_Arrays). Doktorská práce. University of Kassel, Fakulta Electrical Engineering and Informatics.

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| <i>Tab. 1: Klasifikace depozičních metod [3]</i> .....   | 20 |
| <i>Tab. 2: Naměřená data z elipsometrie</i> .....  | 44 |
| <i>Tab. 3: Naměřená data z elipsometrie</i> .....  | 44 |
| <i>Tab. 4: Drsnost jednotlivých vzorků naměřena pomocí AFM pro políčka o velikostech <math>2 \times 2 \mu\text{m}</math><br/>a <math>5 \times 5 \mu\text{m}</math></i> ..... | 46 |
| <i>Tab. 5: Zastoupení prvků ve vzorcích v at. % s přesností měření <math>\pm 1</math> at. %</i> .....  | 47 |
| <i>Tab. 6: Parametry měření při profilometrii</i> .....  | 52 |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| <i>Obr. 1: Porovnání tloušťky vrstev (adaptováno z [4])</i> .....   | 13 |
| <i>Obr. 2: Mechanizmy růstu tenkých vrstev: a) Volmer–Weberův, b) Frank van der Merův, c) Stranski–Krastanoviův (adaptováno z [1])</i> .....  | 15 |
| <i>Obr. 3: Proces naprašování (adaptováno z [18])</i> .....   | 24 |
| <i>Obr. 4: Procesy nastávající na povrchu bombardovaném částicemi (adaptováno z [17])</i> .....   | 26 |
| <i>Obr. 5: Schéma planárního DC naprašování (adaptováno z [14])</i> .....   | 27 |
| <i>Obr. 6: Schéma triodového naprašování (adaptováno z [14])</i> .....  | 28 |
| <i>Obr. 7: Schéma RF naprašování (adaptováno z [14])</i> .....  | 29 |
| <i>Obr. 8: Schéma naprašování iontovým paprskem (adaptováno z [14])</i> .....   | 29 |
| <i>Obr. 9: Schéma naprašování iontovým paprskem (adaptováno z [19])</i> .....   | 30 |
| <i>Obr. 10: Ukázka tvarů terčů [20]</i> .....   | 33 |
| <i>Obr. 11: Průběh rychlosti depozice v závislosti na výkonu na jednotlivých katodách pro oba terče</i> .....   | 35 |
| <i>Obr. 12: Princip měření elipsometrie (adaptováno z [24])</i> .....   | 36 |
| <i>Obr. 13: Schéma skenovacího elektronového mikroskopu s CRT displejem (adaptováno z [26])</i> .....   | 37 |
| <i>Obr. 14: Interakce elektronů se vzorkem (adaptováno z [27])</i> .....  | 38 |
| <i>Obr. 15: Princip detekce AFM (adaptováno z [27])</i> .....   | 39 |
| <i>Obr. 16: Režimy a působení sil u AFM (adaptováno z [28])</i> .....   | 40 |
| <i>Obr. 17: Ukázka principu profilometrie pro kontaktní mód (adaptováno z [33])</i> .....   | 41 |
| <i>Obr. 18: Spektrální závislost <math>\Psi</math> na vlnové délce pro úhly dopadu <math>50^\circ</math>, <math>60^\circ</math> a <math>70^\circ</math> (druhý vzorek)</i> .....  | 42 |
| <i>Obr. 19: Spektrální závislost <math>\Delta</math> na vlnové délce pro úhly dopadu <math>50^\circ</math>, <math>60^\circ</math> a <math>70^\circ</math> (druhý vzorek)</i> .....  | 43 |
| <i>Obr. 20: Změna <math>E_g</math> v závislosti na obsahu <math>B_i</math> ve vzorku</i> .....  | 45 |
| <i>Obr. 21: Index lomu v závislosti na vlnových délkách pro vzorky 1–9</i> .....  | 45 |
| <i>Obr. 22: Snímky 1. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem <math>50\ \mu\text{m}</math>, b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>2 \times 2\ \mu\text{m}</math>, c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>5 \times 5\ \mu\text{m}</math></i> ..... | 47 |
| <i>Obr. 23: Snímky 2. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem <math>50\ \mu\text{m}</math>, b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>2 \times 2\ \mu\text{m}</math>, c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>5 \times 5\ \mu\text{m}</math></i> ..... | 47 |
| <i>Obr. 24: Snímky 3. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem <math>50\ \mu\text{m}</math>, b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>2 \times 2\ \mu\text{m}</math>, c) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti <math>5 \times 5\ \mu\text{m}</math></i> ..... | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Obr. 25: Snímky 4. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 48 |
| Obr. 26: Snímky 5. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 48 |
| Obr. 27: Snímky 6. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 49 |
| Obr. 28: Snímky 7. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 49 |
| Obr. 29: Snímky 8. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 49 |
| Obr. 30: Snímky 9. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ .....  | 50 |
| Obr. 31: Snímky 10. vzorku a) Snímek ze skenovací elektronové mikroskopie s měřítkem 50 $\mu\text{m}$ ,<br>b) Snímek z mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $2 \times 2 \mu\text{m}$ , c) Snímek z<br>mikroskopie atomárních sil pro pole o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ ..... | 50 |
| Obr. 32: Difraktogram šestého vzorku, vykazující amorfní fázi .....   | 51 |
| Obr. 33: Difraktogram desátého vzorku, vykazující krystalickou fázi .....   | 51 |
| Obr. 34: Reprezentativní profily povrchů s nejvyšší drsností pro desátý vzorek a nejnižší<br>drsností pro pátý vzorek .....   | 52 |

Diplomová práce vznikla za podpory projektu Modernizace praktické výuky a zkvalitnění praktických dovedností v technicky zaměřených studijních programech, reg. číslo CZ.02.2.67/0.0/0.0/16\_016/0002458 operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií.



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



## ÚDAJE PRO KNIHOVNICKOU DATABÁZI

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Název práce</b>      | Příprava a charakterizace tenkých vrstev Ge-Bi-Se  |
| <b>Autor práce</b>      | Bc. Ilona Štroblíková  |
| <b>Studijní program</b> | N3441 Polygrafie   |
| <b>Rok obhajoby</b>     | 2019   |
| <b>Vedoucí práce</b>    | Ing. Marek Bouška, Ph.D.   |
| <b>Anotace</b>          | <p>Tato diplomová práce je věnována přípravě a charakterizaci tenkých vrstev systému Ge-Bi-Se, které byly připraveny fyzikální depozicí z plynné fáze metodou co-sputtering. V teoretické části jsou uvedeny charakteristiky tenkých vrstev, mechanismy jejich růstu, systémy Ge-Bi-Se, rozdělení depozičních technik a přiblížení používaných materiálů. Experimentální část je věnována charakterizaci připravených vrstev, přičemž každý vzorek obsahuje jiné zastoupení prvků. Tyto vzorky byly měřeny charakterizačními metodami: elipsometrie, mikroskopie atomárních sil, skenovací elektronová mikroskopie s energiově-disperzním rentgenovým analyzátozem, rentgenová difrakční analýza a profilometrie.s</p> |
| <b>Klíčová slova</b>    | Tenké vrstvy, systém Ge-Bi-Se, co-sputtering, sputtering, charakterizace tenkých vrstev  |