



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

# STUDIUM CHEMICKÉHO ČIŠTĚNÍ POVRCHŮ METODOU LEIS

STUDY OF CHEMICAL CLEANING OF SURFACES BY LEIS METHOD

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Staněk

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bábor, Ph.D.

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství  
Student: **Jan Staněk**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bábor, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

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:

## Studium chemického čištění povrchů metodou LEIS

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Čistota povrchů hraje v elektrotechnickém průmyslu důležitou roli při výrobě polovodičových součástek. Případné kontaminace povrchů zvyšují počet vadných čipů. V laboratořích Středoevropského technologického institutu – CEITEC je k dispozici unikátní zařízení Qtac (na světě jich bylo vyrobeno firmou IONTOF jen 11) umožňující kvantitativně měřit složení horní atomové vrstvy různých materiálů včetně izolátorů. Qtac k tomu využívá nízkoenergieového rozptylu iontů, tzv. metodu LEIS. Zařízení je natolik citlivé, že na měření má vliv i vrstva uhlovodíkových adsorbátů, které povrch kontaminují při jeho expozici atmosférou. Cílem bakalářské práce bude vypracovat různé experimentální postupy pro chemické čištění povrchů, tak aby byl povrch vybraných materiálů terminován pouze žádoucími atomy.

### Cíle bakalářské práce:

1. Navrhněte různé postupy chemického čištění vzorků tak, aby povrch byl terminován žádoucími atomy
2. Ověřte a optimalizujte tyto postupy pomocí zařízení Qtac

### Seznam literatury:

- Feldman L. C., Mayer J.W.: Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis, North Holland, New York 1986, 1-123.
- Rabalais J. W.: Low energy ion-surface interactions, John Wiley & Sons, New York 1994.
- Woodruff D. P., Delchar T. A.: Modern Techniques of Surface Science, Cambridge University Press 1986, 195-236.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně,

L. S.

---

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.  
ředitel ústavu

---

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



# ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem chemicky čištěných povrchů krystalů teluridu kademnatého (CdTe krystalů) pomocí rozptylu nízkoenergiových iontů (metoda LEIS). V teoretické části je popsána fyzikální podstata metody LEIS, včetně experimentálního uspořádání přístroje Qtac<sup>100</sup>, na kterém byl experiment měřen. Metoda LEIS je také porovnána s rentgenovou fotoelektronovou spektroskopií (XPS).

Jsou zde také shrnuty základní vlastnosti a struktura CdTe krystalů, včetně principu fungování detektorů rentgenového záření, pro něž jsou použité krystaly primárně využívány. V experimentální části je popsán samotný proces měření, od kalibračního měření, přes chemické leptání, až po zkoumání leptaného povrchu. Jsou zde ukázky LEISovských spekter s komentáři a interpretacemi, včetně porovnání s daty naměřenými pomocí metody XPS.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Rozptyl nízkoenergiových iontů, CdTe krystaly, XPS, detektor rentgenového záření, hloubkové profilování, analýza povrchu

## ABSTRACT

This thesis deal with studying chemical etched surfaces of cadmium telluride crystals (CdTe crystals) by low-energy ion scattering spectroscopy (LEIS method). In the theoretical part, there is description of physical essence of LEIS method, including experimental arrangement of Qtac<sup>100</sup> instrument, on which the experiment is measured. The LEIS method is also compared with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

There is summary of properties and structure of CdTe crystals including principle of X-ray detectors, which are the primary use of the crystals.

In experimental part there is a description of measuring process, starting with a calibration measurement, ongoing with a chemical etching and ending with a surface analysis. There are examples of LEIS spectra with comments and interpretation including comparison with XPS data.

## KEY WORDS

Low-energy ion scattering, CdTe crystals, XPS, X-ray detector, depth profiling, surface analysis

STANĚK, Jan *Studium chemického čištění povrchů metodou LEIS*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí práce Ing. Petr Bábora, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Studium chemického čištění povrchů metodou LEIS*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou 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.

V České Skalici dne

.....

(podpis autora)

## Poděkování

Především děkuji Ing. Petru Báborovi, Ph.D. celkově za vedení mé bakalářské práce, za to, jak trpělivě zvládal mé všudypřítomné dotazy a nízkou pracovní morálku, děkuji mu za zaškolení na přístroji Qtac<sup>100</sup> a za první uvítání a uvedení do podivuhodného světa iontové rozptylové spektroskopie, děkuji mu za to, že nepříjemnosti spojené s vedením mé práce zvládl vždy s úsměvem a nadhledem. Děkuji mu, že nade mnou nikdy nezlomil hůl a jen díky němu mohla být tato práce dovedena do zdárného konce.

Děkuji Ing. Ondřeji Šikovi, Ph.D. za poskytnutí a vyleptání vzorků CdTe krystalů a za cenné konzultace, které mi ohledně krystalů a jejich vlastností poskytl. Také děkuji za vyhodnocení spekter naměřených pomocí XPS.

Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině, především pak své mamince, za stálou podporu, bez které bych své studium a všechny těžkosti s ním spojené rozhodně nezvládl a bez které bych si svůj život nedokázal představit.

Rozhodně bych chtěl poděkovat i Ing. Zdeňku Schrollovi a jeho rodině za podporu ve studiu vždy, když jsem ji potřeboval.

Dovolte mi též poděkovat všem vyučujícím z Ústavu fyzikálního inženýrství, kteří svou energií, ochotou a vysokou odborností dělají studium tak zajímavé a smysluplné.

Děkuji i svým spolužákům a přátelům, bez jejichž pomoci a spolupráce bych některé překážky a zkoušky překonal jen s těžkostmi, pokud vůbec a bez jejichž kolektivu by byly zážitky ze studia třetinové. Především pak děkuji panu Radku Holeňákovi za vždy připravenou pomocnou ruku a podporu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat slečně Karolíně Pěčkové, bez níž bych o oboru Fyzikální inženýrství a nanotechnologie patrně dodnes neměl ponětí.

Úplně na závěr připojuji i drobné poděkování Bc. Jakubu Křenkovi za sebeobětování, kterým mě podpořil při psaní bakalářské práce.

Analýzy vzorků byly provedeny ve Sdílené laboratoři přípravy a charakterizace nanostruktur CEITEC VUT a hrazeny z projektu CEITEC - Open access LM2011020.

# OBSAH

1	ÚVOD .....	1
2	LEIS A STRUČNÁ HISTORIE IONTOVÉ ROZPTYLOVÉ SPEKTROSKOPIE .....	2
2.1	Počátky iontové rozptylové spektroskopie .....	2
2.2	LEIS .....	3
2.2.1	Kolize částic .....	3
2.2.1.1	Kinematika srážky .....	3
2.2.1.2	Interakční potenciál .....	5
2.2.1.3	Účinný průřez a diferenciální účinný průřez .....	6
2.2.1.4	Rozptylový integrál .....	8
2.2.2	Ionizace a emise částic .....	10
2.2.2.1	Ionizace částic .....	11
2.2.3	Detekce částic .....	12
2.2.4	Srovnání metody LEIS s dalšími spektroskopickými metodami .....	12
2.2.4.1	XPS .....	13
3	EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA .....	15
4	CDTE KRYSTALY .....	18
4.1	Struktura a vlastnosti CdTe .....	18
4.1.1	Základní charakteristika .....	18
4.1.2	Krystalografická polarita .....	20
4.2	Detektory RTG záření .....	20
4.2.1	Vnitřní fotoelektrický jev .....	20
4.2.2	Základní princip detektoru .....	21
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	23
5.1	Kalibrační měření .....	23
5.1.1	Vyhodnocení energiových LEIS spekter .....	23
5.2	Příprava vzorku .....	29
5.3	Vyhodnocení dat .....	30
5.3.1	Svrchní monovrstva .....	31

5.3.2 První spektra a srovnání s XPS.....	32
5.3.3 Hlubkový profil .....	35
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>39</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>41</b>



# 1 ÚVOD

Studium povrchů je v dnešní době jednou z klíčových disciplín v oblasti výzkumu chování materiálů. Povrch součástek je totiž často nositelem funkce, kterou využíváme, nebo celkově ovlivňuje efektivitu, se kterou je součástka schopná pracovat. Mezi ovlivňované atributy patří například výstupní práce při fotoelektrickém jevu, optické vlastnosti nebo povrchová vodivost. Při výrobě přístrojů, u nichž povrch ovlivňuje funkci, je tedy důležité, aby byla vnější vrstva terminována pokud možno jen žádoucími atomy.

Povrch je možné zkoumat mnoha různými způsoby. Jedním z nich je i iontová rozptylová spektroskopie. Stručný vhled do tohoto odvětví poskytuje úvodní teoretická část. Zvláštní pozornost je pak věnována metodě LEIS, tedy rozptylu pomocí nízkoenergetických iontů. Ten patří mezi nejvhodnější metody zkoumání povrchu zvláště pro svou citlivost, kvazinedestruktivnost a schopnost zkoumat výlučně několik horních monovrstev vzorku. Práce se věnuje jak fyzikálnímu objasnění metody LEIS, tak i konkrétnímu uspořádání zařízení Qtac<sup>100</sup> od firmy IONTOF, na kterém je měření prováděno.

Jednou z oblastí, kde je složení povrchu kriticky důležité pro funkčnost, jsou polovodičové součástky a detektory. V našem případě jsme zkoumali krystaly teluridu kademnatého (dále pouze CdTe krystaly), které se užívají především k detekci rentgenového záření. V samostatné podkapitole je objasněna struktura zkoumaných krystalů, jejich mechanické a elektrické vlastnosti a průmyslové využití, včetně principů, kterých k pochopení funkcí krystalu zapotřebí.

V praktické části byl potom metodou LEIS zkoumán povrch CdTe krystalů vyčištěných pomocí roztoků bromu a byla zjišťována efektivita, se kterou jednotlivé roztoky povrch vyčistí a který roztok je optimálním pro zachování požadovaných vlastností.

V oblasti detektorů CdTe krystaly kvalitativně překonávají dříve užívané scintilační metody a správnou terminací povrchu bychom byli v budoucnu schopni dosáhnout ještě větší efektivitu a mnohem ostřejšího rozlišení snímků v medicíně, či průmyslu.

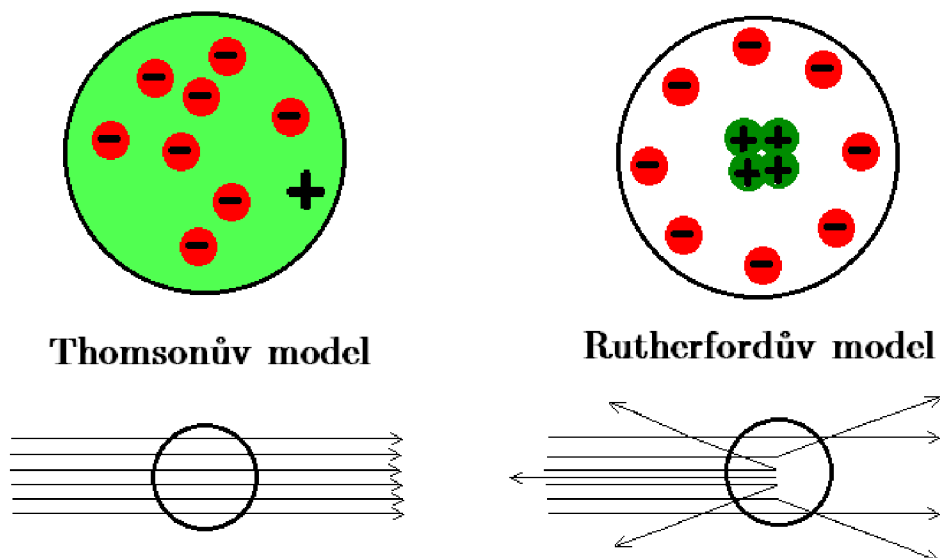


## 2 LEIS a stručná historie iontové rozptylové spektroskopie

Iontová rozptylová spektroskopie (Ion scattering spectroscopy) využívá k detekci atomů, jak již sám název napovídá, rozptylu nabitých částic neboli iontů. Tato spektroskopie má své kořeny na počátku 20. století a pojí se se jmény Ernest Rutherford, Johannes Gieger a Ernest Marsden.

### 2.1 Počátky iontové rozptylové spektroskopie

Gieger a Marsden pod Rutherfordovým vedením provedli roku 1909 experiment, který vyvrátil dosavadní představu o uspořádání částic v atomu. Do té doby byl většinou vědecké obce uznáván Thomsonův model atomu tzv. pudinkový model, podle něhož byl atom vykreslován, jako měkká kladně nabitá koule a v ní záporně nabitě elektrony, jako rozinky v pudinku. Výsledky výše zmíněného experimentu, při kterém Gieger s Marsdenem ostřelovali zlatou folii kladnými ionty (konkrétně jádru helia), ukázaly, že musí existovat velice husté jádro a kolem něj řídký obal. Vystřelované ionty se totiž kromě přímého průchodu i rozptylovaly do různých úhlů, nebo se dokonce odrazily nazpět. (Sám Thomson se daný pokus zpočátku pokoušel interpretovat jako sekvenci po sobě jdoucích drobných rozptylů)



**Obrázek 1:** Thomsonova a Rutherfordova představa o podobě atomu spolu s předpokládaným výsledkem Rutherfordova experimentu pro daný model

## 2.2 LEIS

Na stejném principu je založena i metoda LEIS, tedy rozptyl pomocí nízkoenergiových iontů (low-energy ion scattering). Rozdílem je pouze energie, s jakou jsou ionty emitovány – zatímco v Rutherfordově pokusu měly ionty energii v řádech MeV, v případě LEISu jde řádově o jednotky keV.

Na počátku šedesátých let byla ukázána jasná souvztažnost mezi energií ztrátou rozptylovaných iontů a typem atomů na povrchu [15]

Spektroskopie pomocí rozptylu nízkoenergiových iontů se pak jako moderní technika analýzy povrchu začala užívat na konci šedesátých let minulého století. [15]

Nízká energie zajišťuje větší účinný průřez, a tudíž větší pravděpodobnost srážky. Proto je metoda LEIS užívána k výzkumu několika svrchních vrstev vzorků.

Důležitými pojmy v iontové spektroskopii, které je třeba pochopit, jsou částicové srážky, kterým předchází ionizace a emise částic, a dále také konečné zachycení iontů na detektoru.

### 2.2.1 Kolize částic

Kolize projektilu a terče je nejdůležitějším článkem celého procesu. Právě tato část charakterizuje samotnou metodu LEIS. V této podkapitole je podrobně uveden kinematický popis srážky a nejdůležitější části dynamického popisu, konkrétně je zde rozebrán interakční potenciál, účinný průřez a rozptylový integrál.

#### 2.2.1.1 Kinematika srážky

Kinematický popis kolize poskytuje informace o konečných stavech interagujících částic. Jejich konečné energie jsou určeny z jejich rozptylových úhlů. Vzhledem k tomu, že konečné stavy jsou získány v čase  $t=\infty$  když jsou částice v nekonečné vzdálenosti od interakční oblasti, kinematický popis nám nedává informace o pozici a rychlosti (energii) částic v jakémkoli konečném čase během interakce. Kvůli tomu tvar interakčního potenciálu  $V(r)$  není podstatný. Výsledné rozptylové energie mohou být nalezeny pouhým užitím zákona zachování hybnosti a zákona zachování energie. Pro systém dvou částic, z nichž druhá (dále jen terč) částice je původně v klidu v laboratorních podmínkách a v případě, že žádná energie není disipována během srážky, rovnice popisující zákony zachování mohou být zapsány ve tvaru

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2, \quad (1)$$

$$E_0 = E_1 + E_2, \quad (2)$$

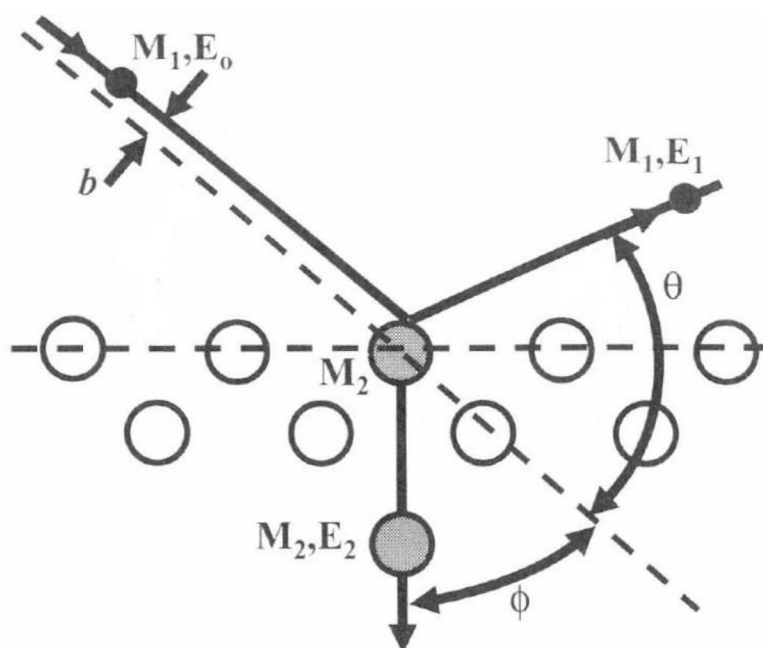
kde  $E_0$ ,  $\mathbf{p}_0$  a  $E_1$ ,  $\mathbf{p}_1$  jsou po řadě kinetické energie a hybnosti emitované částice (dále jen projektilu) před a po srážce a  $E_2$ ,  $\mathbf{p}_2$  je energie a hybnost terče po srážce. [15]

Po úpravách rovnic (1) a (2) můžeme vyjádřit velikost hybnosti projektilu po srážce  $p_1$  ve tvaru [15]

$$p_1 = p_0 \frac{\cos \theta \pm \sqrt{\cos^2 \theta - \left(1 - \frac{M_2}{M_1}\right)\left(1 + \frac{M_2}{M_1}\right)}}{1 + \frac{M_2}{M_1}}, \quad (3)$$

kde  $M_1$  je hmotnost projektilu,  $M_2$  je hmotnost terče a  $\theta$  je úhel mezi směrem dopadu a odrazu dopadající částice.

Vzhledem k tomu, že v rovnici (3)  $p_1 = |\mathbf{p}_1| \geq 0$ , pouze případ „+“ je realizován pro  $M_1 < M_2$  a oba případy „+“ a „-“, jsou realizovány pro  $M_1 > M_2$ . To je jeden z důvodů, proč metoda LEIS zaznamenává jen částice těžší než projektily. V opačném případě je totiž řešení nejednoznačné.



**Obrázek 2:** Pružný rozptyl emitovaného atomu na atomu vzorku [15]

Je běžnější vyjadřovat konečný stav rozptylovaných částic pomocí kinetické energie než za pomoci hybnosti.

Úpravou rovnic (2) a (3) dostáváme energii projektilu po srážce ve tvaru [15]

$$E_1 = E_0 \left( \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right)^2 \left( \cos \theta \pm \sqrt{\left( \frac{M_2}{M_1} \right)^2 - (\sin \theta)^2} \right)^2 = KE_0, \quad (4)$$

kde  $K$  je tzv. kinematický faktor.

Podobně můžeme úpravami dostat hybnost a energii terče [15]

$$p_2 = p_0 \frac{2 \cos \phi}{\left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right)}, \quad (5)$$

$$E_2 = E_0 \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} (\cos \phi)^2 = TE_0, \quad (6)$$

kde  $\phi$  je rozptylový úhel terče a  $T$  popisuje, jak velká část energie byla přenesena na terč.

V rovnicích (4) a (6) je vidět, že energie částic nijak nezávisí na užití speciálního potenciálu, ale pouze na hmotnostech částic a na dopadových a odrazových úhlech. [15]

Je záhodno poznamenat, že z rovnice (4) plyne, že pokud částice zaznamená dvě srážky pod úhly  $\theta_1$  a  $\theta_2$  bude mít větší energii, než když zaznamená jednu srážku pod úhlem  $\theta = \theta_1 + \theta_2$ . [15]

Dle [15] dosahuje  $K$  nejvyšších hodnot v případě, že je rozptylový úhel  $180^\circ$ . V tomto případě také dochází k nejmenším energetickým ztrátám, proto se v praxi snažíme detekovat ionty pod úhlem pokud možno blízkým hodnotě  $180^\circ$  (běžně jde o úhel okolo  $140^\circ$  [1]).

Pro kinematický popis jsme mezi částicemi uvažovali pružné srážky a terč byl před kolizí v klidu. Ve skutečnosti srážky nejsou zcela pružné a terč vibruje. Z toho důvodu dochází k drobným energetickým ztrátám, které se ve výsledných spektrech, které LEIS poskytuje, projeví v posunutí a v rozšíření píků do Gaussovského tvaru. [1]

### 2.2.1.2 Interakční potenciál

Jak se energetický atom přibližuje k jinému atomu představujícímu terč, na velké vzdálenosti (desítky atomových rozměrů) mezi nimi není žádná zaznamatelná interakce. Ovšem ve chvíli, kdy se dostatečně přiblíží a jejich elektronové oblaky se překryjí, objeví se komplexní interakce mezi elektrony a jádry. Detailní popis této interakce by musel zahrnovat všechny elektron-elektronové, jádro-jaderné a elektron-jaderné interakce. Pro praktické užití nás zajímá funkce  $V = V(r)$  popisující potenciál v závislosti na vzdálenosti jader  $r$ . [15]

Odpudivá interakce jader je při srážkách stále dominantní, ale vzhledem k nízké primární energii projektilu hrají relativně významnější roli interakce, ve kterých jsou zapojeny elektronové obaly obou atomů. Odpudivý potenciál jader je částečně stíněn elektronovými obaly. Interakční potenciál má tvar [13]

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \Phi\left(\frac{r}{a}\right), \quad (7)$$

kde  $Z_1$ ,  $Z_2$  jsou atomová čísla projektilu a terče,  $e$  je elementární náboj,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $r$  je vzdálenost jader atomů a  $\Phi(r/a)$  je tzv. stínící funkce (screening function), která zohledňuje stínění odpudivého potenciálu jader elektronovými obaly. Parametr  $a$  vystupující v argumentu stínící funkce se nazývá stínící délka (screening length). Stínící funkce musí splňovat okrajové podmínky  $\Phi(r \rightarrow \infty) = 0$  a  $\Phi(r \rightarrow 0) = 1$ . [13]

Protože neexistuje přesné analytické vyjádření stínící funkce, používá se aproximace pomocí součtu exponenciálních poklesů [13]

$$\Phi\left(\frac{r}{a}\right) = \sum_i c_i e^{-d_i \left(\frac{r}{a}\right)}, \quad (8)$$

V oblasti LEIS se nejčastěji používají dva typy stínící funkce:

a) Molierova aproximace stínící funkce v Thomasově-Fermiho modelu atomu:

$$\Phi\left(\frac{r}{a}\right) = 0,35e^{-0,3\frac{r}{a}} + 0,55e^{-1,2\frac{r}{a}} + 0,10e^{-6,0\frac{r}{a}}, \quad (9)$$

b) stínící funkce plynoucí z modelu podle Zieglera, Biersacka a Littmarka (ZBL):

$$\Phi\left(\frac{r}{a}\right) = 0,1818e^{-3,199\frac{r}{a}} + 0,5099e^{-0,9423\frac{r}{a}} + 0,2802e^{-4,029\frac{r}{a}} + 0,0282e^{-0,2016\frac{r}{a}}, \quad (10)$$

Pro každý z typů existují i samostatné modely stínících délek. [13]

### 2.2.1.3 Účinný průřez a diferenciální účinný průřez

Hlavním důvodem, proč metodou LEIS zkoumáme pouze vrchní vrstvy vzorku, je skutečnost, že projektily mají ve srovnání s RBS nebo MEIS velký účinný průřez. Účinný průřez je vhodný způsob vyjádření pravděpodobnosti, že projektil bude jistým způsobem interagovat s částicí terče. V podstatě jím zobrazujeme každou částici terče jako určitou malou plochu nastavenou dopadajícím částicím. Všechny částice, které směřují na tuto plochu, interagují. Pravděpodobnost interakce tedy roste s velikostí účinného průřezu. [4]

Tato veličina je pro iontovou rozptylovou spektroskopii definována následujícím vztahem [11]:

$$\sigma(\theta) = \left[ \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right]^2 \frac{4 \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M_2} \sin \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \cos \theta \right\}^2}{\sin^4 \left( \frac{\theta}{4} \right) \left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M_2} \sin \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

kde  $Z_1$ ,  $Z_2$  jsou atomová čísla projektilu a terče,  $e$  je elementární náboj,  $E$  je energie projektilu,  $M_1$  je hmotnost projektilu,  $M_2$  je hmotnost terče a  $\theta$  je rozptylový úhel.

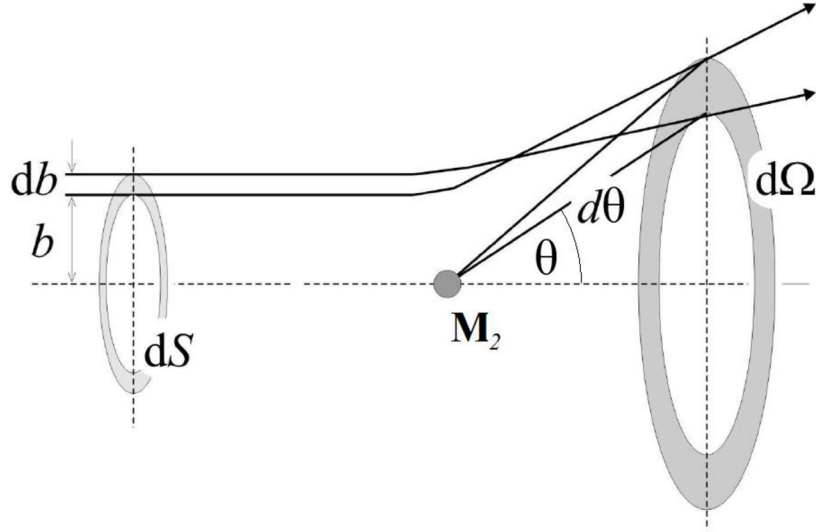
Zde je vidět, že účinný průřez klesá s kvadrátem energie a pracuje-li např. RBS s energiemi vyššími o tři řády, je pravděpodobnost, že se srazí s částicí terče, o šest řádů menší. To v praxi znamená, že vysokoenergievé částice proniknou mnoho desítek atomových vrstev do vzorku, zatímco v případě nízkoenergievých jde jen o několik nejsvrchnějších vrstev.

Pro kvantifikaci většího množství rozptylovaných částic nás však více zajímá diferenciální účinný průřez, který je vztažen k rozmezí úhlů. To odpovídá praxi, neboť v našem případě detekujeme pouze částice rozptýlené pod jedním pevně daným úhlem [13] (viz 2.2.3)

Máme-li tedy terč bombardovaný konstantním proudem identických částic stejné rychlosti, pak diferenciální účinný průřez  $\sigma_{diff}$  definujeme jako podíl počtu částic  $dN_{d\Omega}$  rozptýlených na terči pod pevně daným prostorovým úhlem  $d\Omega$  a počtu částic  $N$  dopadajících na jednotkovou plochu násobených elementem prostorového úhlu  $d\Omega$ . [15]

$$\sigma_{diff} = \frac{dN_{d\Omega}}{Nd\Omega}, \quad (12)$$

O diferenciálním účinném průřezu můžeme uvažovat i tak, že jednotlivé částice dopadají na terč v záměrné vzdálenosti  $b$ . Vlivem interakčního potenciálu jsou trajektorie projektilů zakřivovány, přičemž částice s menší záměrnou vzdáleností jsou vychylovány intenzivněji než projektily, které se původně pohybovaly dál od osy primárního svazku. [13]



Obrázek 3: Geometrie diferenciálního účinného průřezu [13]

Uvažujme trajektorie projektilů, které projdou mezikružím, které je ohraničeno soustřednými kružnicemi o poloměrech  $b$  a  $b + db$  kolem osy primárního svazku. Všechny tyto trajektorie po interakci s terčem projdou obdobně definovanou plochou, která je vymezena rozptylovými úhly  $\theta$  a  $\theta + d\theta$ . Plocha mezikruždí je [13]

$$dS = 2\pi b(\theta) db = 2\pi b(\theta) \left| \frac{db}{d\theta} \right| d\theta . \quad (13)$$

Element prostorového úhlu  $d\Omega$  lze vyjádřit jako [13]

$$d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta . \quad (14)$$

Diferenciální účinný průřez je pak roven [13][15]

$$\sigma_{diff} = \frac{dS}{d\Omega} = \frac{b}{\sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| . \quad (15)$$

Znalost účinného průřezu je zásadní pro kvantitativní analýzu rozptylových experimentů. Počet projektilů  $dy$  rozptýlených do elementu prostorového úhlu  $d\Omega$  je [13]

$$dy = \sigma_{diff} N N_s d\Omega , \quad (16)$$

kde  $N_s$  je počet nestíněných atomů terče. Pro určení diferenciálního účinného průřezu je nutné z rozptylového integrálu (26) určit vychylovací funkci  $b(\theta)$ .

#### 2.2.1.4 Rozptylový integrál<sup>1</sup>

Při kolizi dvou částic, kde závisí pouze na jejich vzájemné vzdálenosti  $\mathbf{r}$  a nepůsobí zde žádné příčné síly, můžeme pro popis použít tzv. rozptylu

<sup>1</sup> Podkapitola byla vypracována na základě [15] a [7]

v centrálním poli, kde používáme právě pouze vzájemné vzdálenosti.

Lagrangián tohoto systému má tvar

$$L = \frac{1}{2} (M_1 \dot{\mathbf{r}}_1^2 + M_2 \dot{\mathbf{r}}_2^2) - V(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|), \quad (17)$$

kde  $\dot{\mathbf{r}}_1$  a  $\dot{\mathbf{r}}_2$  jsou rychlosti dopadající částice a částice terče,  $V(|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|)$  je interakční potenciál (viz 2.2.1.2) a  $\mathbf{r}_1$  a  $\mathbf{r}_2$  jsou polohy dopadající částice a částice terče.

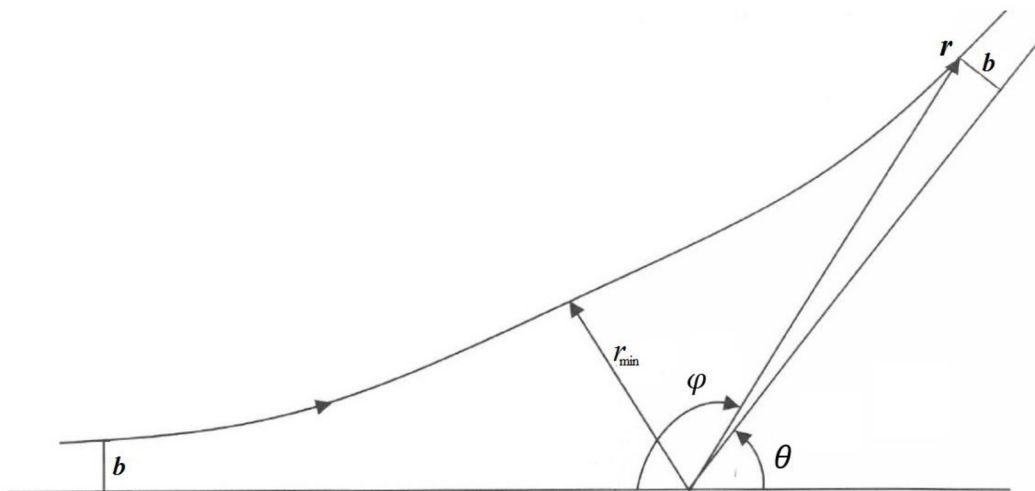
Pro zjednodušení můžeme využít zápis v tzv. CM systému (z angl. Center of Mass). Jedná se o klasickou těžišтовую soustavu, v níž Lagrangián (17) nabývá jednodušší formy [7]

$$L = \frac{1}{2} (\mu \dot{\mathbf{r}}^2) - V(|\mathbf{r}|), \quad (18)$$

kde vektor  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$  je vektorem relativního posunutí mířící od částice terče k dopadající částici a  $\mu$  je redukovaná hmotnost systému definovaná vztahem

$$\mu = \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)}. \quad (19)$$

Celý problém je tedy převeden na pohyb projektilu o redukované hmotnosti  $\mu$ .



Obrázek 4: Rozptyl částice o redukované hmotnosti  $\mu$  v centru sil [15]

Z povahy trajektorie rozptýleného projektilu využijeme výhodný přechod k polárním souřadnicím. Lagrangián přepíšeme do tvaru

$$L = \frac{1}{2} \mu (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) - V(|\mathbf{r}|), \quad (20)$$

kde  $r$  je vzdálenost projektilu od rozptylového centra a  $\varphi$  je polární úhel.

Polární úhel je cyklická veličina, proto se zachovává moment hybnosti a můžeme tedy psát

$$p_\varphi = \mu r^2 \dot{\varphi} = konst. \quad (21)$$



Lze ukázat, že výraz (21) vyjadřuje celkový moment hybnosti, tedy

$$L = \mu r^2 \dot{\varphi}. \quad (22)$$

Lagrangián (20) nezávisí explicitně na čase. V takovém případě se zachovává celková energie systému.

$$E = \frac{1}{2} \mu (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) + V(r). \quad (23)$$

Nyní můžeme z rovnic (22) a (23) odvodit samotný rozptylový integrál

$$\varphi(r) = \int \frac{\frac{p_\varphi}{r^2} dr}{\sqrt{2\mu[E - V(r)] - \frac{p_\varphi^2}{r^2}}} + C. \quad (24)$$

Moment hybnosti  $p_\varphi$  můžeme za pomoci srážkového parametru  $b$  a velikosti rychlosti  $v_0$ , respektive energie  $E_0$ , s níž projektil přilétá k rozptylovému centru, zapsat ve tvaru

$$p_\varphi = \mu b v_0 = b \sqrt{2\mu E_0}. \quad (25)$$

Po dosazení (25) do (24) je rozptylový integrál vyjádřen za pomoci kýžených veličin. V reálném experimentu jsou detektor i iontový zdroj dostatečně vzdáleny od centra rozptylu, z toho důvodu se trajektorie projektilu asymptoticky blíží k přímkám vymežujícím úhel  $\theta$  (viz Obrázek 4). Rozptylový úhel  $\theta$  je základním parametrem rozptylu a můžeme ho vyjádřit ve tvaru

$$\theta(b) = \pi - 2 \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{\frac{b}{r^2} dr}{\sqrt{1 - \frac{V(r)}{E} - \frac{b^2}{r^2}}}, \quad (26)$$

kde  $r_{\min}$  je minimální vzdálenost projektilu od rozptylového centra.

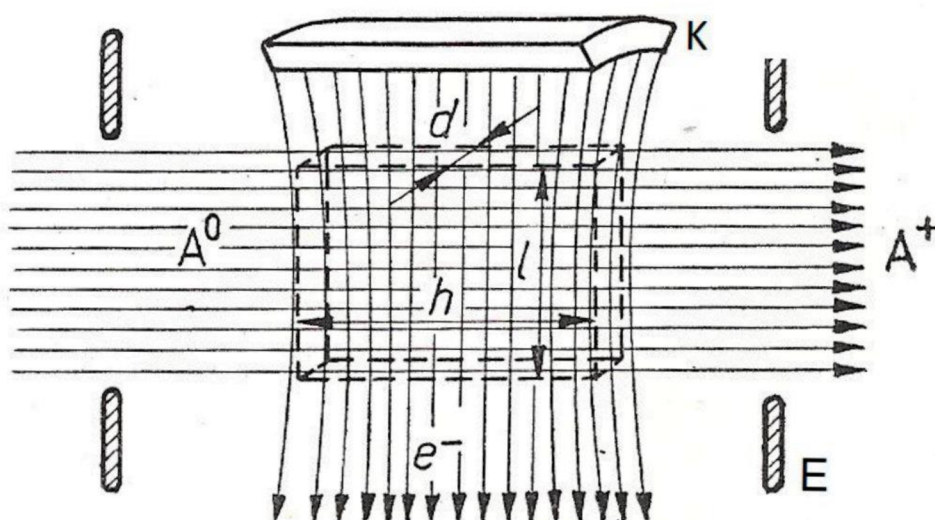
Pro výpočet rozptylového integrálu je stěžejní znát interakční potenciál (viz 2.2.1.2).

### 2.2.2 Ionizace a emise částic

Před samotným procesem srážky je třeba zajistit ionizaci částic, včetně jejich následné emise a fokusace.

### 2.2.2.1 Ionizace částic<sup>2</sup>

K ionizaci částic v našem případě užíváme elektronově srážkového zdroje. Je to jeden z mála zdrojů, které k ionizaci nevyužívají plazmatu. Jde o v průmyslu velice rozšířený typ zdroje, a to především z důvodů jeho jednoduché konstrukce a snadné údržby.



**Obrázek 5:** Schéma elektronově srážkového zdroje. K – katoda, E – extrakční anoda, A<sup>0</sup> – atomy ionizovaného plynu, A<sup>+</sup> – vzniklé ionty, e<sup>-</sup> – elektrony V<sub>ef</sub> = d x h x l – oblast ionizace. [3]

Jak je znázorněno na Obrázku 5, elektrony jsou emitovány z katody K a elektrickým polem urychlovány k extrakční anodě E. Při tomto procesu procházejí skrze oblast V<sub>ef</sub>, kde se střetávají s atomy vzácných plynů A<sup>0</sup>. Pokud mají elektrony dostatečnou energii, dochází skrze nepružné srážky k ionizaci atomů, které jsou jako ionty A<sup>+</sup> urychlovány extrakční anodou E (schematicky znázorněno směrem šipek).

Ve většině elektronově srážkových zdrojů se užívá elektronů vzniklých termoemisí. Elektrony jsou emitovány z katody ve formě žhaveného vlákna, jež je zahříváno průchodem elektrického proudu. Proudová hustota j<sub>e</sub> elektronů emitovaných z tohoto vlákna se určuje pomocí Richardsonovy-Dushmanovy rovnice ve tvaru:

$$j_e = AT^2 e^{-\left(\frac{\Phi}{kT}\right)}, \quad (27)$$

<sup>2</sup> Podkapitola byla vypracována na základě [3]

kde  $A$  je Richardsonova-Dushmanova konstanta,  $T$  je teplota vlákna a  $\Phi$  je výstupní práce materiálu katody.

Známe-li proudovou hustotu elektronů  $j_e$  můžeme snadno určit maximální proud iontů  $I_i$ , který v komoře vzniká. Ten je dán vztahem

$$I_i = j_e V_{ef} n \sigma_i = j_e V_{ef} \frac{p}{kT} \sigma_i, \quad (28)$$

kde  $n$  je koncentrace atomů plynu, jež lze vyjádřit pomocí klasické stavové rovnice (kde  $p$  je tlak plynu,  $T$  je teplota a  $k$  je Boltzmanova konstanta) a  $\sigma_i$  je účinný srážkový průřez ionizace.

### 2.2.3 Detekce částic

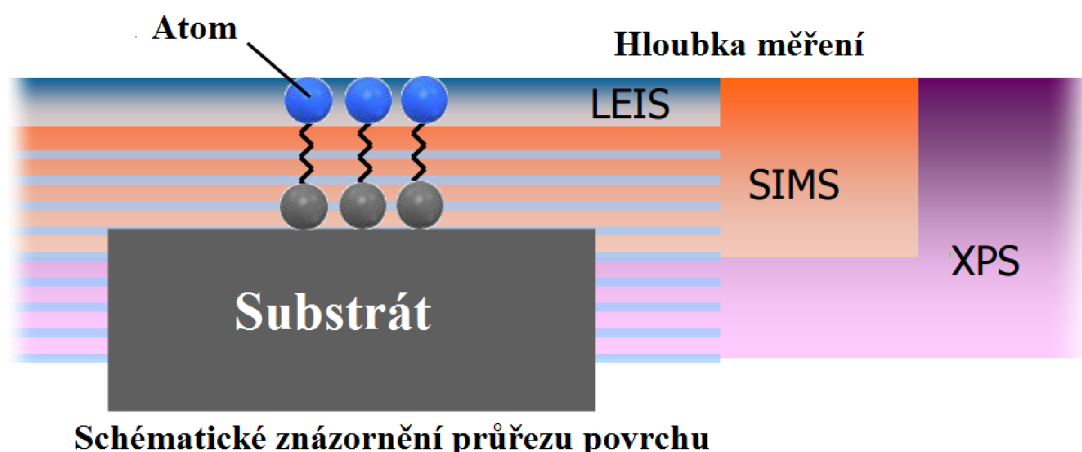
Částice, které jsou po kolizi rozptýleny mimo vzorek, jsou rozptylovány do všech možných úhlu v celém poloprostoru. Pro potřeby analýzy jsou zachytávány pouze v jednom polárním úhlu, avšak v plném azimutálním úhlu, což zajišťuje maximální výtěžek, a tedy i velkou citlivost.

Dále jsou částice pomocí elektrostatických čoček fokusovány a urychlovány směrem k detektoru, který je citlivý na polohu dopadu částic.

Během fokusace se jasně oddělí částice s různou energií do různých svazků. Protože jsou ale částice fokusovány stejným zařízením při rozdílné energii, nejsou všechny paprsky fokusovány stejně dobře. Různé fokusovací schopnosti pro různou energii nám dávají rozdílnou šířku píků ve spektrech.

### 2.2.4 Srovnání metody LEIS s dalšími spektroskopickými metodami

Je jistě opodstatněné položit si otázku, v čem se liší metoda LEIS od jiných spektroskopických metod a v čem vůči nim vyniká. Pro porovnání jsem vybral hmotnostní spektroskopii sekundárních iontů neboli SIMS (z *angl.* Secondary Ion Mass Spectrometry) a rentgenovou fotoelektronovou spektroskopii neboli XPS (z *angl.* X-ray Photoelectron Spectroscopy), která bude podrobněji představena v samostatné podkapitole, neboť data získaná touto metodou ve své práci také používám.



Obrázek 6: Schématické porovnání jednotlivých spektroskopických metod. [10]

Jak ukazuje Obrázek 6, metoda LEIS dokáže prozkoumat vrchní atomovou vrstvu (modrá oblast) a při opakovaném měření dokáže prozkoumat vrstvu po vrstvě a udělat tak hloubkový profil (modré čáry).

SIMS pomocí iontů destruktivně odpráší několik vrchních vrstev atomů, které detekuje a analyzuje, ale neposkytne vám kvantitativní analýzu nejsvrchnější vrstvy. Dostanete pouze celkové složení odprášené části (řádově nm). Pomocí metody SIMS lze vyhotovit hloubkový profil, ale rozhodně nejde říct, že zkoumáte jednu atomovou vrstvu po druhé.

XPS vám poskytne nedestruktivní analýzu deseti (či více) atomových vrstev včetně informace o vazbách mezi jednotlivými atomy, ale veškeré informace jsou pouze zprůměrovanými hodnotami z celé zkoumané oblasti. Neposkytuje hloubkový profil.

#### 2.2.4.1 XPS

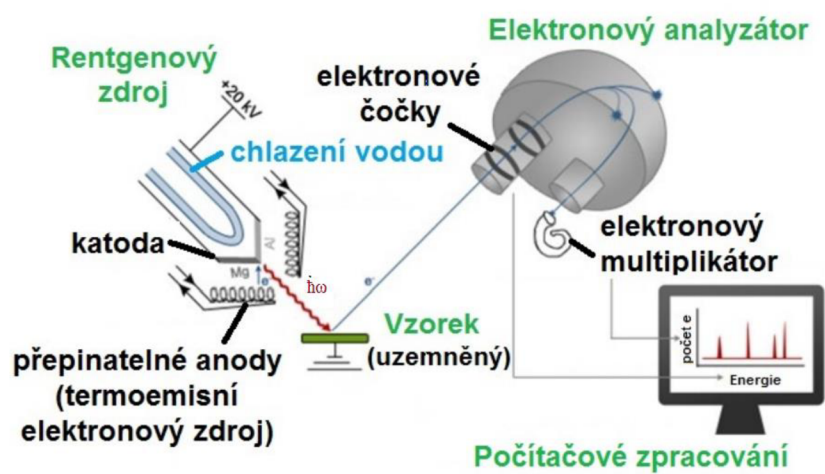
XPS neboli fotoelektronová rentgenová spektroskopie je spektroskopická metoda využívající fotoelektrického jevu.

Foton rentgenového záření dopadá na zkoumaný vzorek a vyráží z něj elektron, ten je detekován analyzátozem a z jeho energie jsme na základě znalosti vazebné energie pro jednotlivé prvky schopni určit složení vzorku. Tento proces je popsán vztahem [17]:

$$\hbar\omega = \phi + E_k + E_b, \quad (29)$$

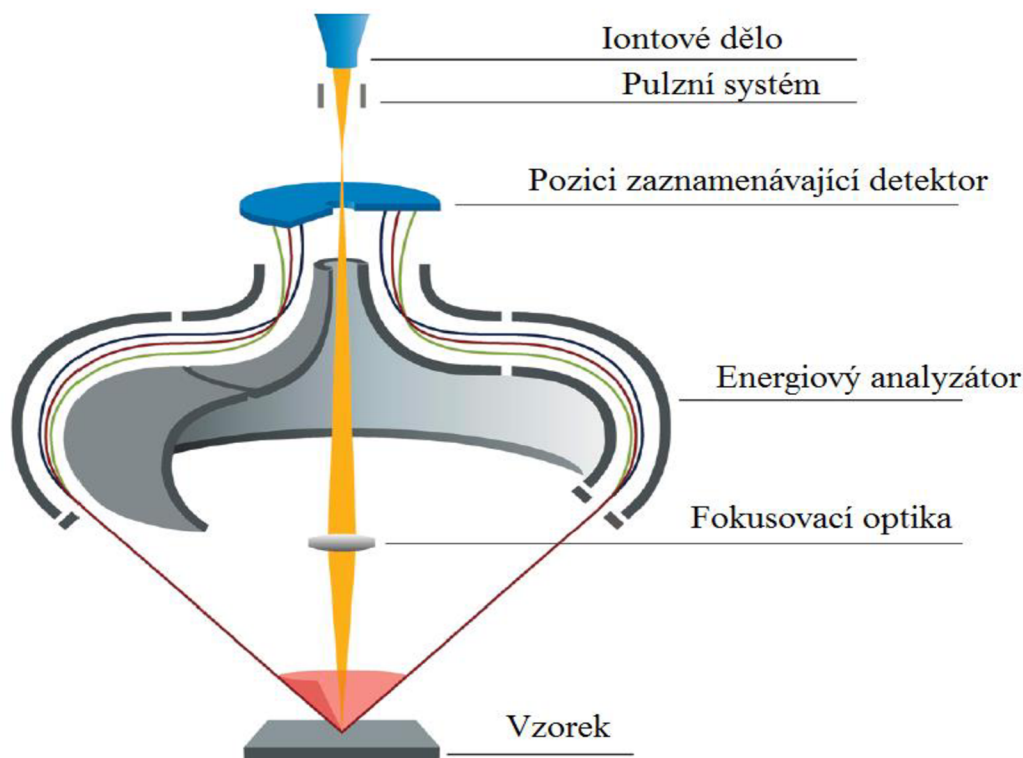
kde  $\hbar$  je redukovaná Planckova konstanta,  $\omega$  je frekvence záření,  $\phi$  je výstupní práce materiálu,  $E_k$  je kinetická energie emitovaného elektronu a  $E_b$  je vazebná energie.

Experimentální uspořádání pro měření metodou XPS je na Obrázku 7.



Obrázek 7: Uspořádání XPS přístroje [9] [6]

### 3 Experimentální sestava



Obrázek 8: Schéma zařízení [1]

Na Obrázku 8 vidíme schéma zařízení Qtac<sup>100</sup>. Iontové dělo je tvořeno elektronově srážkovým zdrojem, ve kterém jako katoda slouží žhavené wolframové vlákno pokryté iridiem, a kladně nabitou mřížkou, která vzniklé ionty urychlí na zvolenou energii.

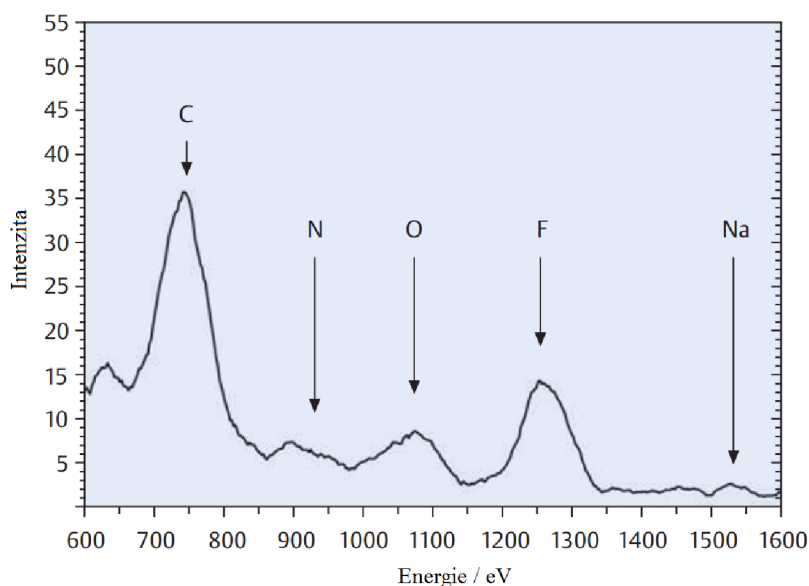
Pulzní systém je využíván v případě, že při měření užíváme metody TOF (z *angl.* Time of flight) a dovoluje nám, jak sám název napovídá, vysílat ionty v jasně definovaných pulsech.

Iontový svazek je potom pomocí fokusovací optiky zaostřen a dopadá na vzorek. Na vzorku, který je upevněn na paletce, se ionty rozptylují pod různými úhly. Ionty, které se rozptylují pod (polárním) úhlem  $145^\circ$  jsou zachycovány analyzátozem (Obrázek 9) v plném azimutálním úhlu.



Obrázek 9: Energový analyzátor v Qtac<sup>100</sup> [14]

Tento analyzátor je unikátním zařízením, které vzniklo z návrhu prof. Hidde H. Brongersmy a jeho týmu ve společnosti Calipso. Právě tento dvojitě toroidní analyzátor zajišťuje přístroji Qtac<sup>100</sup> unikátní citlivost. V analyzátoru dochází k separaci částic o různé energii. Ty jsou detekovány na detektoru zaznamenávajícím polohu. Z něho je signál převáděn do počítače, jenž zaznamenává jednotlivé počty dopadů. Tento signál je převáděn do spektra (viz Obrázek 10) udávajících závislost počtu dopadů (tedy intenzity) na energii dopadajících částic. Z energie dopadajících částic lze na základě rovnic z podkapitol 2.2.1.1-4 určit, na kterých atomech se zachycené ionty rozptýlily.



Obrázek 10: Ukázka spektra zařízení Qtac<sup>100</sup> [14] šipky ukazují na polohy píků pro jednotlivé prvky

Jako ionizovaných částic se užívá výhradně atomů vzácných plynů, a to především kvůli tomu, že při procesu nereagují s částicemi povrchu ani případnými nečistotami v atmosféře komory.

Omezení metody LEIS tkví v tom, že z důvodu jednoznačnosti dokáže měřit pouze prvky, které jsou těžší, než použité ionty (to vychází z kinematiky srážek viz 2.2.1.1). Největší rozsah detekovatelných částic má tedy helium, s jehož pomocí lze detekovat všechny prvky krom vodíku a helia. Nevýhodou měření pomocí heliových iontů je fakt, že čím nižší je hmotnost iontů, tím více jsou píky jednotlivých prvků blíže k sobě a pokud měříme prvky s blízkou hmotností, tyto píky se začínou „slévat“ dohromady. Opačně, použijí-li těžší ionty, mám lepší rozlišení jednotlivých prvků, ale ubírám si na hmotnostním rozsahu detekovatelnosti.

Z důvodu co největšího výtěžku probíhá měření v UHV komoře (komoře ultra vysokého vakua z *angl.* Ultra High Vacuum chamber) při tlacích, které se řádově pohybují okolo  $10^{-10}$  mbar. UHV zajišťuje minimum srážek během průletu iontů komorou.



## 4 CdTe krystaly

CdTe krystaly neboli krystaly teluridu kademnatého jsou polovodičové krystaly s vlastnostmi vhodnými k výrobě fotovoltaických článků, elektrooptických modulátorů či detektorů vysokoenergievého záření (RTG, gama...). Mají tedy potenciál být využívány v lékařství (tomografie, rentgenové snímky), v oblasti bezpečnosti (v elektrárnách, či ve významných objektech ohrožených např. teroristickými útoky) či v oblasti energetiky (solární elektrárny). V této kapitole se zaměřím na krystalickou strukturu a vlastnosti materiálu a pak také přiblížím konkrétní využití krystalů, které zkoumám tedy jako součást detektoru rentgenového záření.

### 4.1 Struktura a vlastnosti CdTe

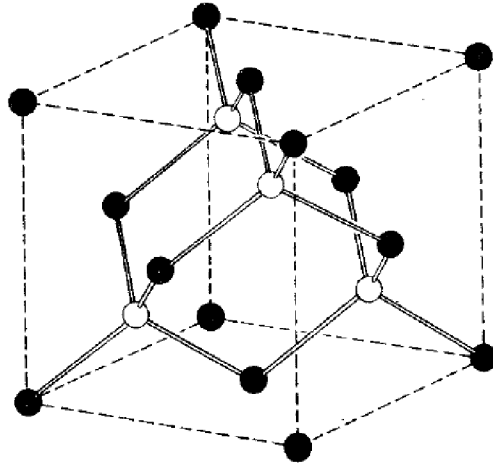
#### 4.1.1 Základní charakteristika

Nejprve je záhodno definovat pojem polovodič. Polovodiče jsou elektronové vodiče, jejichž měrný elektrický odpor při pokojové teplotě leží v rozmezí  $10^{-2}$  až  $10^9 \Omega \text{cm}$ , tj. mezi hodnotou pro dobré vodiče ( $10^{-6} \Omega \text{cm}$ ) a pro izolátory ( $10^{14} - 10^{22} \Omega \text{cm}$ ). [8]

Vlastnosti polovodičů závisí na teplotě. Na rozdíl od kovů však měrný elektrický odpor polovodičů s rostoucí teplotou klesá. To je způsobeno tepelnými excitacemi elektronů do vodivostního pásu (v kovech naopak tepelný pohyb zhoršuje vodivé vlastnosti). [5] [8] Při absolutní nule se čisté, dokonalé krystaly většiny polovodičů budou chovat jako izolátory. [8] I pásová struktura polovodičů je stejná jako u izolátorů, s tím rozdílem, že zakázaný pás (energetický interval mezi nejnižším bodem vodivostního pásu a nejvyšším bodem valenčního pásu) je v jejich případě mnohem menší (v některých případech i třicetkrát [8]).

Polovodiče můžeme rozdělit mnoha kritérií, v našem případě je vhodné zavést dělení na základní a směsné. Základní se nacházejí v periodické tabulce ve *IV* skupině a patří mezi ně např. křemík. Směsné polovodiče tvoří zpravidla sloučeniny prvků *III-V* skupiny či *II-VI* skupiny. Mezi *II-VI* sloučeniny patří právě i krystaly CdTe. [12]

CdTe krystaly mají krystalickou strukturu sfaleritu (*angl.* Zinc-Blende), jde o dvě vzájemně posunuté kubické plošně centrované mřížky, z nichž je v našem případě jedna tvořena výhradně atomy kadmia a druhá výhradně atomy teluru. [12]



Obrázek 11: Krystalická struktura sfaleritu [8]

CdTe krystaly patří mezi přímé polovodiče a k jeho výhodám (z pohledu využití v oblasti detektorů elektromagnetického záření) patří poměrně velká šířka zakázaného pásu ( $E_g \approx 1,44$  eV při 300 K), která zajišťuje schopnost měřit i vysokoenergetické záření a snižuje váhu tepelného šumu detektorů. Kadmium i telur mají navíc vysoká atomová čísla ( $Z(\text{Cd})=48$ ,  $Z(\text{Te})=52$ ), s jejichž hodnotou vzrůstá absorpční koeficient. Další nespornou výhodou je pak vysoký měrný elektrický odpor, který přímo zvyšuje citlivost měření (ten je v případě CdTe o několik řádů vyšší než v případě křemíku, který se k výrobě těchto detektorů také hojně využívá). [12] Porovnání výše zmíněných a dalších zajímavých vlastností mezi CdTe a jinými užívanými polovodiči najdete v Tabulce 4.1 [16]

Tabulka 4.1: Typické fyzikální vlastnosti vybraných polovodičů

Materiál	CdTe	Si	Ge	GaAs
Krystalová struktura	Struktura sfaleritu	Struktura diamantu	Struktura diamantu	Struktura sfaleritu
Atomové číslo	48, 52	14	32	31, 33
Zakázaný pás (eV) při 300 K	1,44	1,12	0,67	1,43
Měrný elektrický odpor ( $\Omega$ cm)	$10^9$	$10^4$	50	$10^7$
$\mu_e \tau_e$ ( $\text{cm}^2/\text{V}$ )	$10^{-4}$	$>1$	$>1$	$10^{-6}$

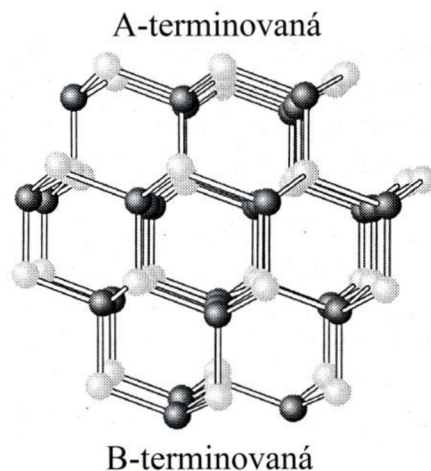
$\mu_e$  – mobilita elektronů,  $\tau_e$  – střední doba života elektronů

Součin  $\mu_e\tau_e$  charakterizuje transport náboje v polovodiči (čím je vyšší, tím lepší transportní vlastnosti látka má).

I přes nižší hodnotu součinu  $\mu_e\tau_e$  mají CdTe krystaly vhodné vlastnosti pro výrobu detektorů elektromagnetického záření.

#### 4.1.2 Krystalografická polarita

Nesymetrické uspořádání sfaleritové struktury vede k jevu označovaném jako krystalografická polarita. Nesymetrií je myšlen fakt, že vzájemné posunutí obou fcc mřížek není o polovinu mřížkové konstanty, ale je menší viz Obrázek 12.



**Obrázek 12:** Uspořádání částic ve struktuře sfaleritu. Ustálené označení je bílá pro A (alabastr) a černá pro B (black) terminovanou stranu. Bílé kuličky znázorňují kadmium a černé telur [2]

Pokud je CdTe krystal řezán, je mnohem pravděpodobnější, že řez povede mezi vzdálenějšími atomovými rovinami. Po nařezání tedy zůstane jedna strana krystalu terminovaná atomy kadmia a protilehlá atomy teluru.

V případě terminace kadmíem hovoříme o A-terminovaném povrchu, v případě terminace telurem hovoříme o B-terminovaném povrchu.

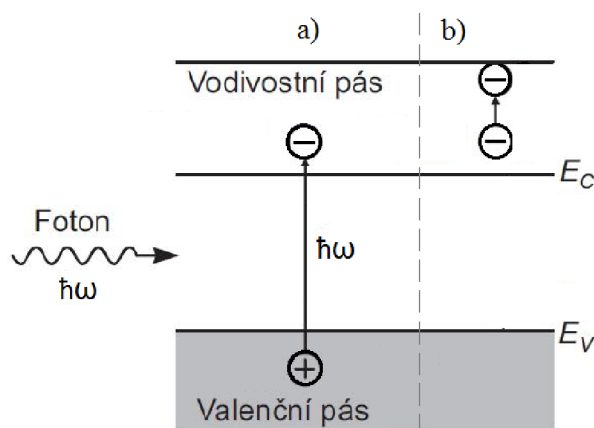
## 4.2 Detektory RTG záření

### 4.2.1 Vnitřní fotoelektrický jev

V detektorech RTG a gama záření využíváme tzv. vnitřního fotoelektrického jevu. Obecně jde o jev, kdy foton interagující s látkou nemá dostatečnou energii

na to, aby uvolnil elektron z povrchu látky, ale má dostatečnou energii na vnitřní elektronový přechod. Elektronů pak zůstávají v látce a způsobují zvýšení vodivosti, v tomto případě hovoříme o fotovodivosti. [12]

Na Obrázku 13 vidíme dva typy elektronových přechodů:

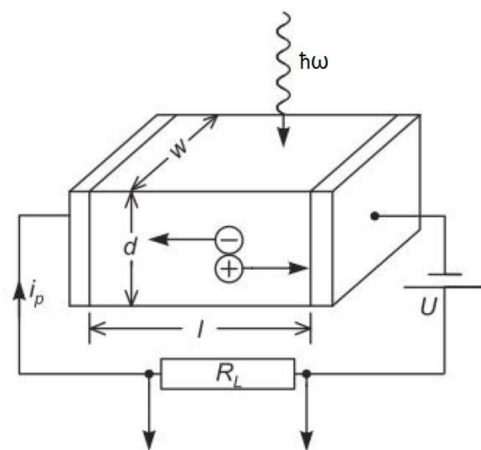


**Obrázek 13:** Vnitřní fotoelektrický jev;  $E_C$  – nejnižší energie vodivostního pásu,  $E_V$  – nejvyšší energie valenčního pásu,  $\hbar\omega$  – kvantum energie. a) Elektron je fotonem excitován z valenčního pásu do vodivostního pásu způsobuje tzv. vlastní fotovodivost. b) Elektron po excitaci přechází pouze mezi stavy vodivostního pásu [12]

Většina detektorů RTG a gama záření pracuje v režimu vlastní fotovodivosti.

#### 4.2.2 Základní princip detektoru

Základní princip detektoru využívajícího vnitřní fotoelektrický jev si popíšeme na konstrukčně nejjednodušším zařízení tohoto typu – fotorezistoru nebo také fotoodporu. Jak je patrné ze schématu na Obrázku 14, dopadající fotony generují páry elektron-díra. Přiložíme-li k fotorezistoru vnější elektrické pole, dojde k transportu nosičů, v jehož důsledku vzrůstá hodnota elektrického proudu. Na detektorech můžeme měřit buď zvýšený proud (fotovodivost), který je úměrný intenzitě dopadajícího záření, nebo pokles napětí na zatěžovacím odporu  $R_L$ . [12]



**Obrázek 14:** Schéma fotorezistoru.  $w$ ,  $l$ ,  $d$  - rozměry fotorezistoru,  $R_L$  - zatěžovací odpor,  $U$  - napětí zdroje,  $i_p$  - protékající proud [12]

## 5 Experimentální část

V této kapitole se bude představen celý proces experimentu, od kalibračního měření provedeného na čistých vzorcích kadmia a teluru a poté i na čistých CdTe, přes leptání pomocí roztoků bromu, až po vyhodnocení naměřených dat. Veškeré měření bylo prováděno v laboratořích CEITEC Nano. Veškerá měření na přístroji Qtac<sup>100</sup> jsem provedl pod dohledem Ing. Petra Bábora, Ph.D.

### 5.1 Kalibrační měření

Před samotným leptáním a měřením vzorků je třeba provést kalibrační měření na čistých vzorcích zkoumaných prvků. Tato měření slouží pro zjištění citlivosti LEISu pro dané prvky. Ta se liší pro různou energii iontů konkrétního vzácného plynu. Dalším cílem je ověření složení CdTe krystalů, tedy jsou-li tvořeny opravdu pouze kadmíem a telurem a je-li poměr prvků v krystalu 1:1.

Měření bylo provedeno na CdTe krystalu a vzorcích kadmia a teluru poskytnutých Ing. Ondřejem Šikem, Ph.D. Vzorky byly vloženy do UHV komory zařízení Qtac<sup>100</sup> v laboratořích CEITEC Nano, zde při tlacích řádově  $10^{-10}$  mbar byly ostřelovány částicemi neonu. Základní informace jsou uvedeny v Tabulce 5.1.

Tabulka 5.1

Zkoumaný vzorek	Telur	Kadmium	CdTe
Plyn	Neon	Neon	Neon
Dávka (částic)	$4,36 \cdot 10^{13}$	$2,53 \cdot 10^{13}$	$3,40 \cdot 10^{13}$
Hustota dávky (částic/cm <sup>2</sup> )	$1,73 \cdot 10^{16}$	$2,53 \cdot 10^{15}$	$1,17 \cdot 10^{16}$
Energie částic/eV	5000 eV	5000 eV	5000 eV
Plocha/ $\mu\text{m}^2$	500 x 500	500 x 500	500 x 500
Počáteční proud/nA	1,02	1,07	1,14
Koncový proud/nA	0,93	1,00	1,03

#### 5.1.1 Vyhodnocení energiových LEIS spekter

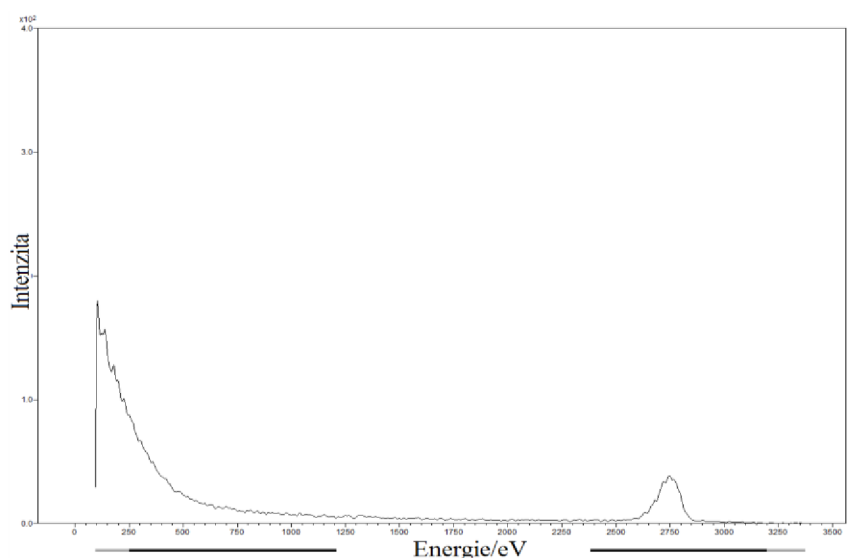
Energiová spektra, která jsou výstupem měření, nám poskytují mnoho důležitých informací. Je třeba ovšem třeba správně interpretovat, co znamenají jednotlivé skutečnosti, jež ze spekter dokážeme vyčíst.

**Pozadí** – mluvíme-li o pozadí, myslíme tím záznamy iontů, které se rozptýlily v hlubších vrstvách, kde ztratily část své energie. Tato ztráta je způsobena interakcí s elektrony a jádry atomů, jde o tzv. brzdny účinek (*angl.* stopping power). Dále jde o odprašené ionty. To jsou ionty, které ve vzorku byly, či do něj byly implantovány a poté je dopadající ionty vyrazily. Také jde o ionizované prvky povrchu, jež jsou lehčí než projektily a jsou tedy proudem iontů odprašovány.

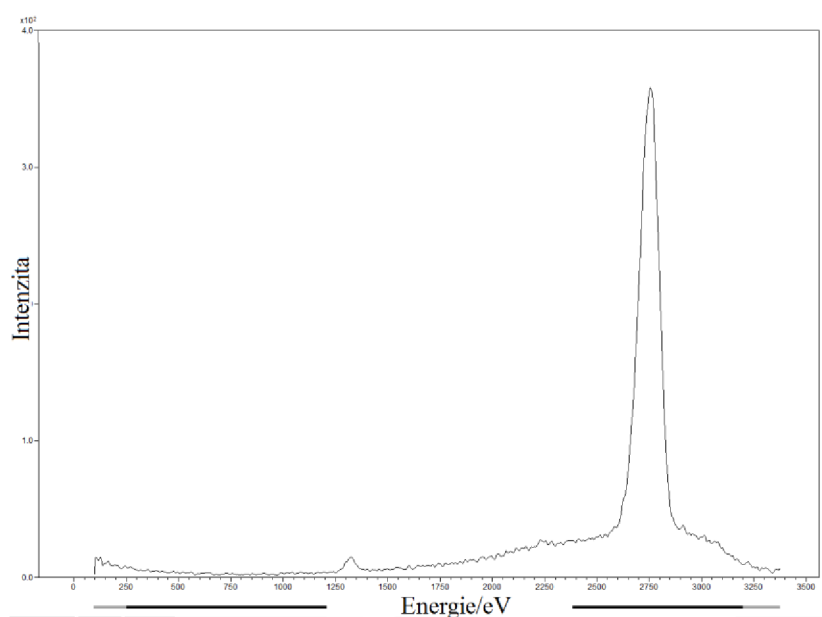
**Pík** – nám dává informaci o zastoupení prvku ve sloučenině. Výška píku, a tedy počet zaznamenaných částic s danou energií, je závislá na obsahu prvku ve vzorku. Dále ovšem také souvisí s diferenciálním účinným průřezem, citlivostí LEISu pro daný prvek a hustotou částic v látce. Pík pro každý prvek není pouze úzký sloupec (typu Diracovy delta funkce), ale má tvar Gaussovského píku, to je způsobeno jednak tím, že nedetekujeme částice rozptýlené pod jedním konkrétním úhlem  $\theta$ , ale v rozmezí úhlů  $\Delta\theta$ , a také tím, že ionty interakcí na povrchu a při případné reionizaci ztratí část energie, což vede k vytvoření tzv. *tailu*. Dalším důvodem je i různá schopnost fokusace pro různé energie detekovaných iontů.

**Použité ionty** – důležité je zmínit i vliv použitých iontů na tvar a vlastnosti spekter. Jak již bylo zmíněno a popsáno v podkapitole 2.2.3 a kapitole 3 nejvíce prvků v LEIS spektrech vidíme pomocí iontů helia, neboť vidíme vždy jen těžší prvky (heliem tedy vidíme všechny prvky kromě vodíku a helia). Avšak čím těžší jsou ionty, tím více jsou píky jednotlivých prvků oddělené. To, co nám argon ukáže jako dva oddělené píky, by heliem bylo vidět jako jeden slitý široký pík. V experimentu byly užity pouze ionty neonu. Při užití iontů helia byly totiž prvky ve vzorku slité a skryté v šumu, což znemožnilo vyhodnocení.

Na Obrázku 15, resp. Obrázku 16 vidíme LEISovské spektrum teluru. Konkrétně jde o první, resp. sto šedesáté sedmé spektrum měřené při podmínkách uvedených v Tabulce 5.1.



Obrázek 15: První naměřené spektrum čistého teluru



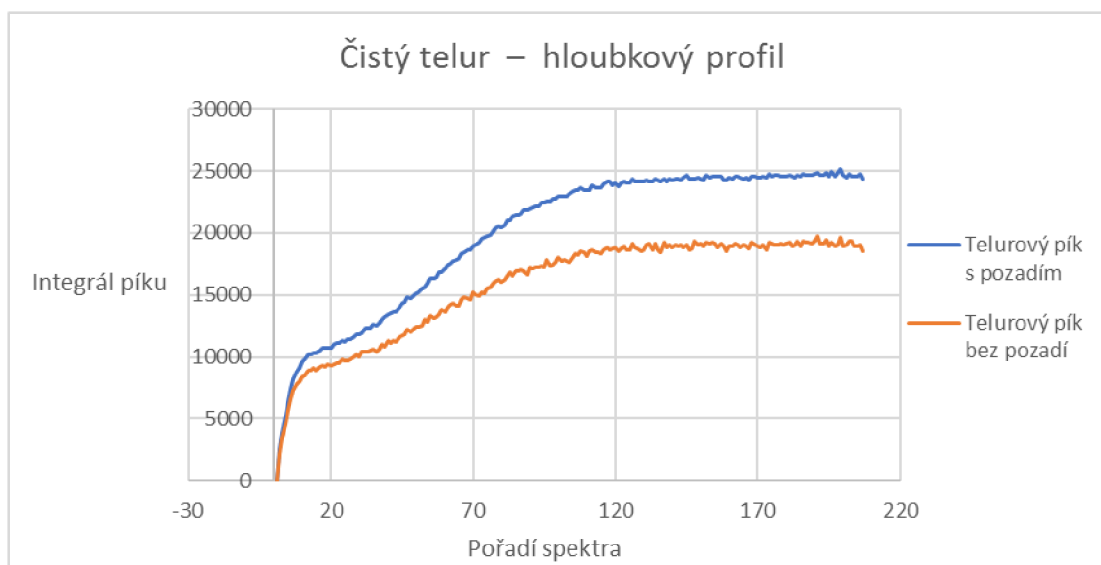
Obrázek 16: Sto šedesáté sedmé naměřené spektrum čistého teluru

Jasně vidíme, že v prvním spektru (Obrázek 15) se vyskytuje velké množství nečistot, tedy odprášených iontů. S největší pravděpodobností jde o nečistoty, které kontaminovaly povrch při přenosu v běžné atmosféře, tedy o uhlík, kyslík a vodík (uhlovodíky a voda jsou častými kontaminanty).

Naproti tomu sto šedesáté sedmé spektrum (Obrázek 16) ukazuje už prakticky pouze telur, neboť popisuje složení až několikáté atomové vrstvy (dostatečným proudem a opakovaným ostřelováním jsme se dostali hlouběji).

Důležitý je pro nás hlavně hloubkový profil, který nám LEIS dokáže poskytnout. Ten vidíme na Obrázku 17 konkrétně pro pík teluru.

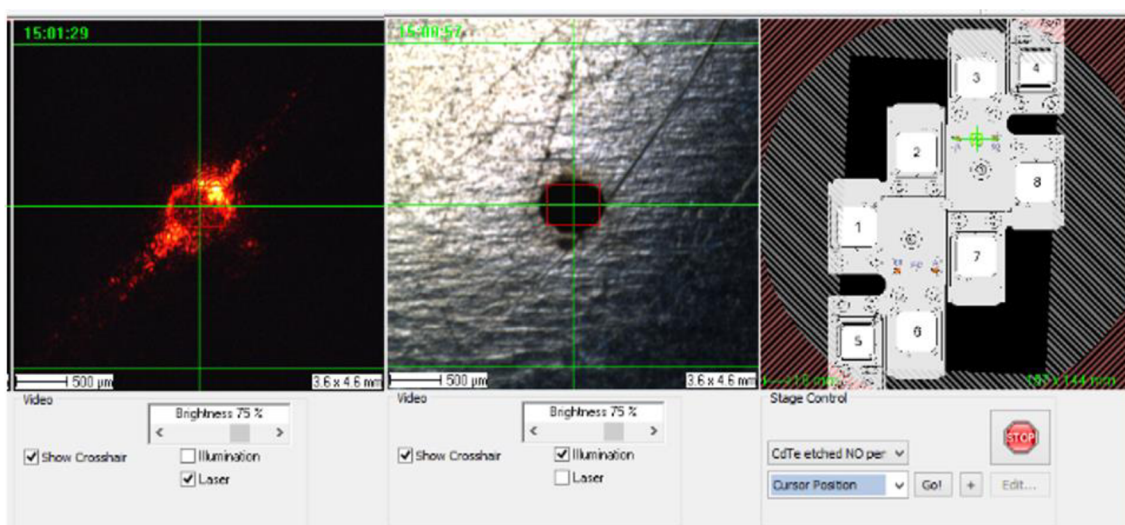




**Obrázek 17:** Hloubkový profil pro pík teluru

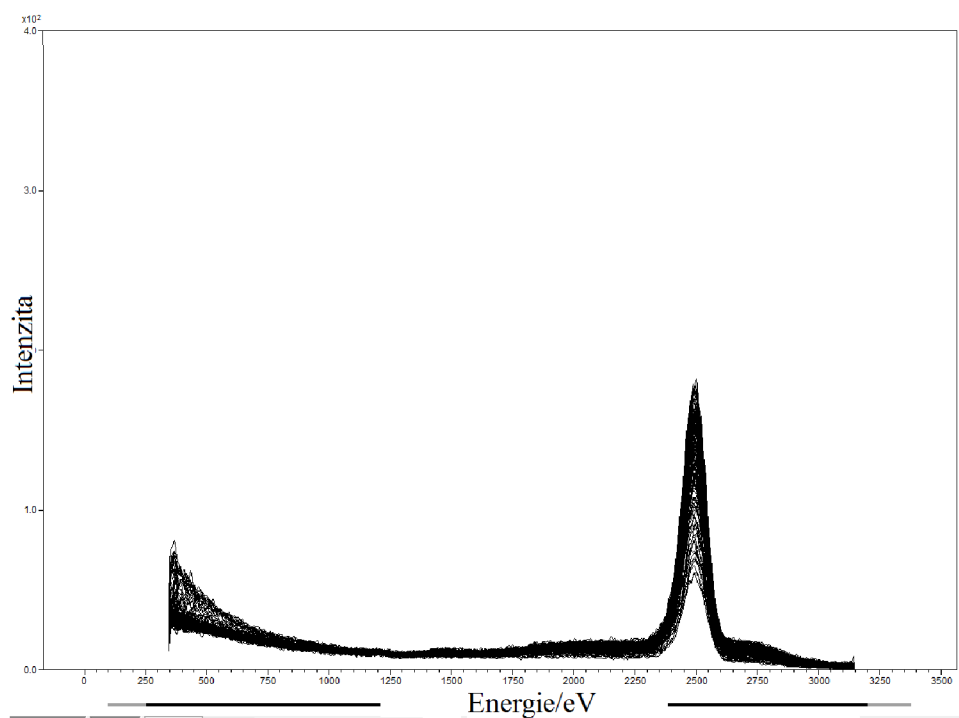
Jak je vidět na Obrázku 17, plocha pod píkem postupně narůstá až do určité chvíle, kdy se stabilizuje. Důležitá je pro nás hodnota integrálu pod píkem někde v oblasti, kdy už je ustálený, neboť zde můžeme prohlásit, že jde o čistý telur. Podle tohoto výsledku lze kalibrovat ostatní měření.

Stejně měření bylo provedeno i pro vzorek kadmia. Protože jsou vzorky různě vysoké, je třeba před každým měřením zkontrolovat, zda je iontový svazek správně fokusován a zaměřen pro danou výšku. V opačném případě hrozí snížení dopadajícího proudu iontů anebo dokonce úplné vychýlení iontového svazku mimo vzorek. Před každým měřením je také třeba na tzv. Faraday cupu provést měření velikosti proudu částic. Tuto hodnotu je třeba zaznamenat na počátku a na konci měření, aby s ní přístroj při vyhodnocování mohl kalkulovat. Proces zaměřování svazku a měření proudu na Faraday cupu je ukázán a popsán na Obrázku 18.



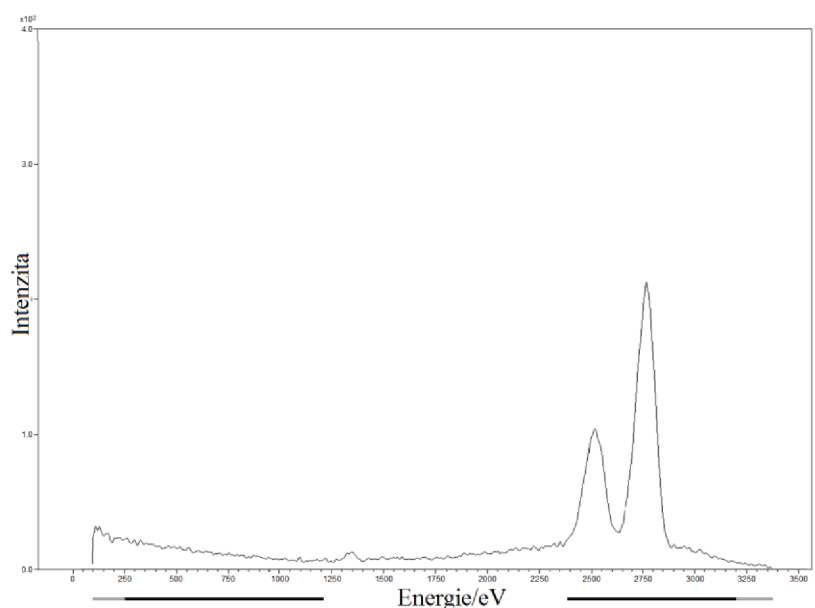
Obrázek 18: Navigační okno v softwaru ovládajícího zařízení Qtac<sup>100</sup>. Na obrázku vlevo je kontrola zaměření svazku pomocí laseru (pro dobrou fokusaci je třeba, aby nejsvětlejší místo bylo přesně na středu). Na prostředním obrázku je foto Faraday cupu, na kterém probíhá měření hodnoty proudu. Na obrázku vpravo je navigační schéma dávající zpětnou vazbu o poloze iontového svazku.

Na Obrázku 19 jsou vykreslena spektra čistého kadmia, aby ilustrovala změny profilů spekter v průběhu měření.



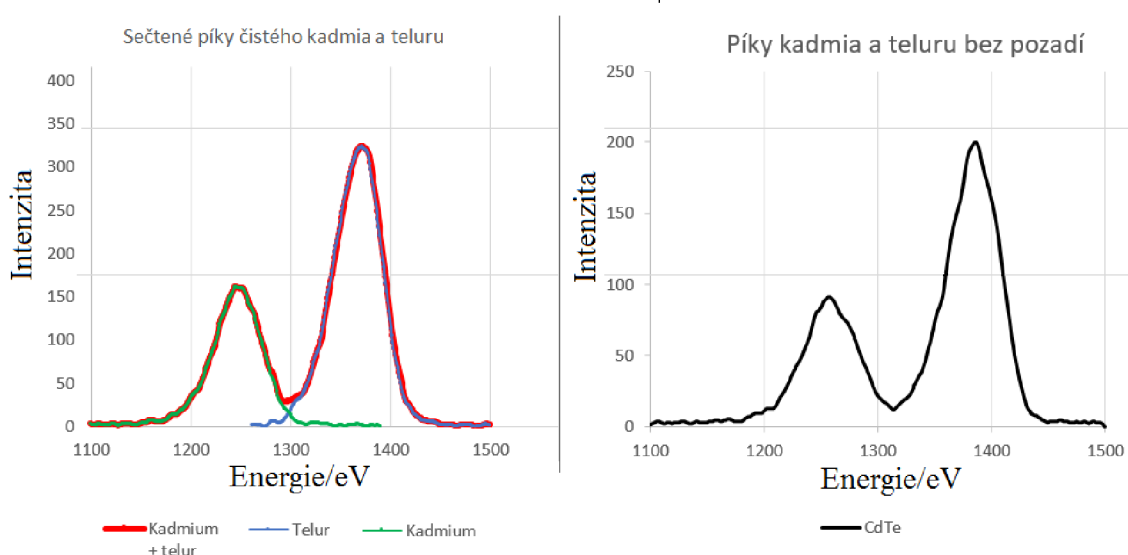
Obrázek 19: Složení všech naměřených spekter čistého kadmia

V poslední části kalibračního měření byl měřen i samotný CdTe krystal. Spektrum z ustálené části je vidět na Obrázku 20.



**Obrázek 20:** Spektrum CdTe z ustálené části (sto čtyřicáté třetí spektrum)

Složíme-li naměřená spektra čistého kadmia a čistého teluru, měli bychom teoreticky dostat stejný graf, jako v případě měření CdTe krystalů. Spektra byla vyexportována do matic a složena. Porovnání obou spekter (spektra nemají stejnou měřítko, protože signál z čistých prvků je o dost větší než z CdTe krystalu) je vidět na Obrázku 21.



**Obrázek 21:** Porovnání spekter (různé rozsahy na svislé ose)

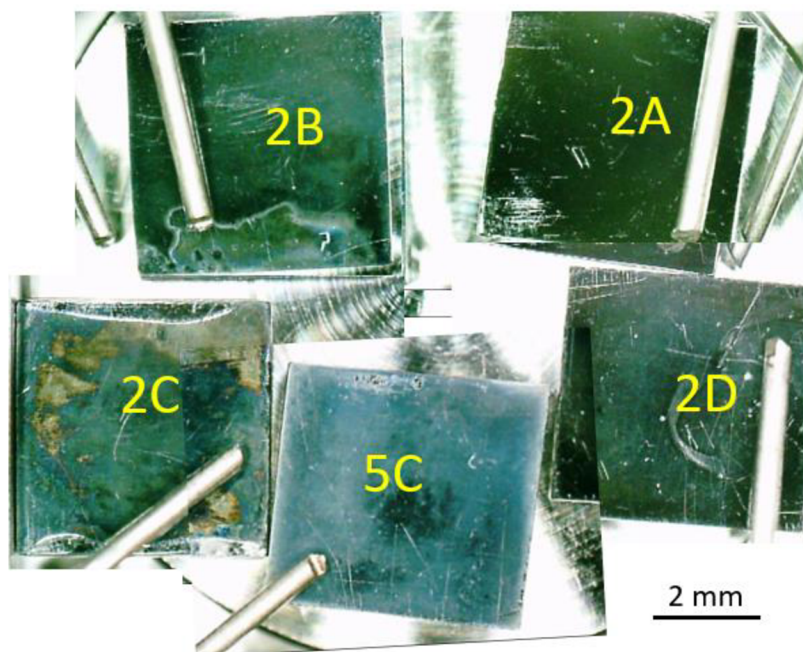
Z Obrázku 21 vyplývá, že poměry kadmia a teluru jsou v CdTe krystalech 1:1. Ale zároveň je vidět, že LEIS ukazuje pro telur přibližně dvojnásobný pík oproti kadmiu (66,5 : 33,5). Tento fakt musí být zahrnut v měření. Kadmium musíme tímto faktorem násobit, abychom dostali skutečné zastoupení ve vzorku.

V rámci kalibračního měření bylo provedeno i měření na vzorku kadmia, které ukazovalo mnohem větší signál kadmia. Tyto hodnoty byly po vydělení diferenciálními účinnými průřezy takřka shodné s intenzitou teluru. Zároveň však nesouhlasí se všemi ostatními naměřenými hodnotami. Proto ho zde neuvádím. Je však v plánu provést opakované měření na kadmiu, pro vyloučení možnosti, že použité kalibrační měření je chybné.

## 5.2 Příprava vzorku

Bylo zkoumáno celkem pět CdTe krystalů. Krystaly byly poskytnuty japonskou firmou Acrorad Co. Všechny byly chemicky leptány v roztocích brómu, který se k úpravě povrchu CdTe krystalů běžně užívá. [2] [12]

Vzorky (Obrázek 22) byly leptány Ing. Ondřejem Šikem, Ph.D. v laboratořích Fakulty chemické Vysokého učení technického v Brně.



Obrázek 22: Zkoumané CdTe krystaly

V Tabulce 5.2 jsou uvedeny označení vzorků a typy, koncentrace a objemy použitých roztoků. Všechny vzorky byly leptány po dobu 60 s.

Tabulka 5.2

Označení vzorku	2A	2D	2B	2C	5C
Použitý roztok	Brommetanol <sup>3</sup>	Hypobromit <sup>4</sup>	Hypobromit + 0,5 % Brommetanol	Hypobromit + 1 % Brommetanol	Hypobromit + 2 % Brommetanol
Objem	30 ml	30 ml	(10 + 30) ml	(10 + 30) ml	(10 + 30) ml

Důvodem leptání je zvýšení citlivosti detektorů. Veškeré nečistoty a mechanické poruchy krystalické mřížky totiž vedou k rekombinaci s jedním z páru elektron-díra a tím ke snížení detekovaného proudu, což samozřejmě přímo ochuzuje měřený signál. Čistý telurid kademnatý má ovšem nepříjemnou vlastnost, kdy postupně přechází v jiné sloučeniny kadmia a teluru s nežádoucími vlastnostmi. Proto je zde i myšlenka zcela ochudit leptáním několik vrchních vrstev o kadmium (to se očekává především od hypobromitu) a tím terminovat povrch vrstvou stabilního  $\text{TeO}_2$ .

Metodou LEIS jsme zkoumali vrchní monovrstvy a potom též vytvářeli hloubkový profil. Zároveň byly vzorky měřeny metodou XPS na přístroji Kratos Ing. Josefem Polčákem, Ph.D. a data byla vyhodnocena Ing. Ondřejem Šikem, Ph.D., v následující podkapitole 5.3 budou výsledky z obou metod porovnány a interpretovány.

### 5.3 Vyhodnocení dat

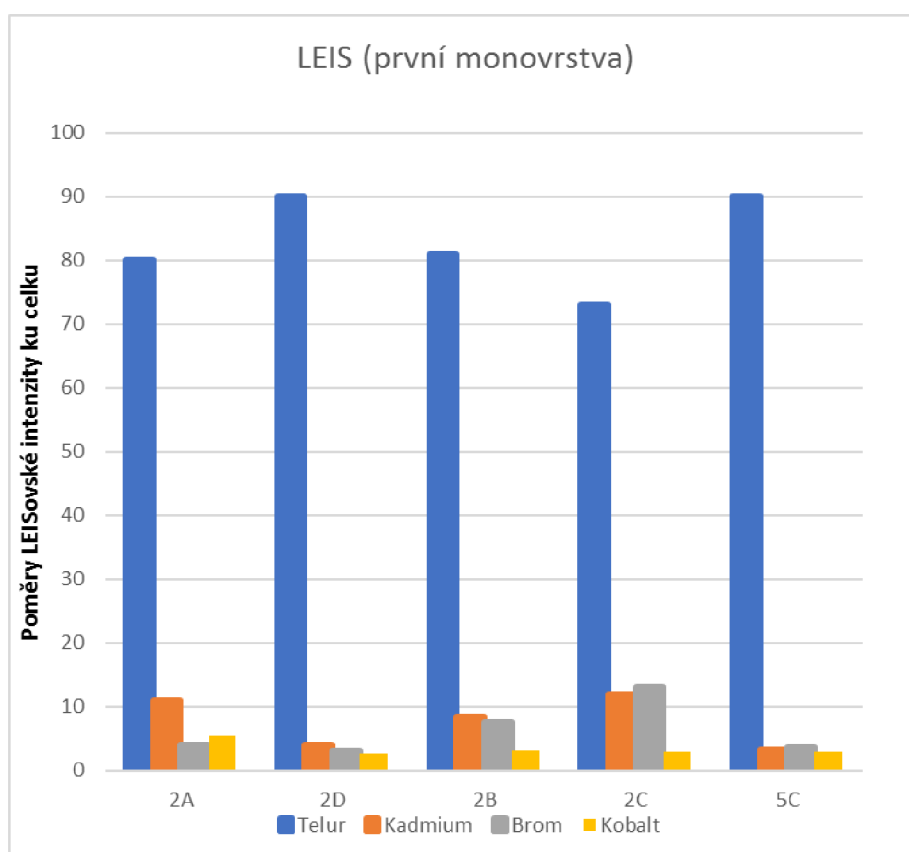
V experimentu byla zkoumána A-terminovaná strana CdTe krystalů, tedy strana jejíž povrch by měl být bohatý na kadmium (viz podkapitola 4.1.2). Protože B-terminovaná strana byla označena fixou, nemohla zde být zcela vyloučena kontaminace povrchu. Z těchto a časových důvodů bylo měření hloubkového profilu za pomoci LEISu, výzkum nejsvrchnější monovrstvy a měření pomocí XPS prozatím provedeno a vyhodnoceno pouze na A-terminované straně.

<sup>3</sup> Je to ustálené označení pro roztok bromu ( $\text{Br}_2$ ) a methanolu ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), přičemž koncentrace označuje podíl bromu v roztoku

<sup>4</sup> Někdy také bromnan

### 5.3.1 Svrchní monovrstva

Nejprve byla naměřena spektra pomocí menší dávky částic (hustota dávky cca  $5 \cdot 10^{14}$  částic/cm<sup>2</sup>), tímto měřením byla zkoumána pouze nejsvrchnější monovrstva vzorku. V každém měření byly vyhodnoceny plochy pod píky pro jednotlivé prvky obsažené ve vzorku, respektive pro všechny prvky, které vidíme pomocí neonu. Konkrétně pro telur, kadmium, brom a kobalt (kobaltu bylo ve vzorku stopové množství, nemůžeme vyloučit kontaminaci vzorku při výrobě). Vzájemné poměry naměřených intenzit pro dané prvky byly vyneseny do Obrázku 23.



Obrázek 23: Vzájemné poměry naměřených intenzit v první monovrstvě pomocí LEISu

Je vidět, že metodou LEIS je na povrchu vzorku vidět především telur. To může být způsobeno vyleptáním kadmia roztoky bromu a mimo jiné je to podporováno faktem, že telur má největší pík, který je v poměrně vysokých energiích a není, na rozdíl od ostatních prvků, tolik zatížen šumem, který je pro první spektra (navíc měřená malou dávkou částic) typicky dost velký.

Dále je vidět, že na vzorku 2D není prakticky žádné kadmium, což bylo očekáváno, neboť hypobromit by měl kadmium zcela vyleptat. Neočekávané je

ovšem nízké zastoupení kadmia pro vzorek 5C, kde bychom očekávali podobnost se vzorkem 2A.

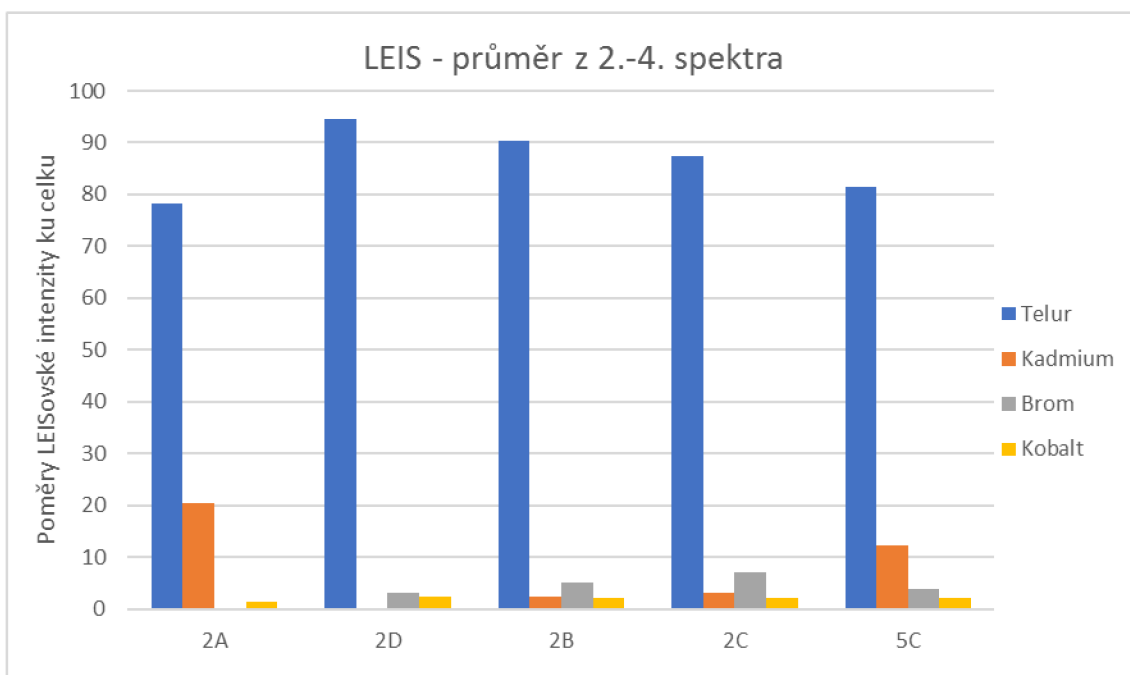
### 5.3.2 První spektra a srovnání s XPS

Poté byl vzorek ostřelován větší dávkou iontů, atributy měření každého ze vzorků jsou uvedeny v Tabulce 5.3. Během prvních čtyř spekter jsme se dostali do hloubky necelých 3 nm, což je přibližně hloubka, pro kterou měří XPS. Data z této hloubky budou vzájemně porovnávána. Konkrétně jsou použita druhá, třetí a čtvrtá LEISovská spektra, neboť první je příliš zatížené šumem a nečistotami.

Tabulka 5.3

Zkoumaný vzorek	2A	2D	2B	2C	5C
Plyn	Neon	Neon	Neon	Neon	Neon
Dávka (částic)	$9,13 \cdot 10^{13}$	$1,94 \cdot 10^{14}$	$1,65 \cdot 10^{14}$	$1,51 \cdot 10^{14}$	$9,09 \cdot 10^{13}$
Hustota dávky (částic/cm <sup>2</sup> )	$1,46 \cdot 10^{17}$	$3,10 \cdot 10^{17}$	$2,64 \cdot 10^{17}$	$2,42 \cdot 10^{17}$	$1,45 \cdot 10^{17}$
Energie částic/eV	5000	5000	5000	5000	5000
Plocha/ μm <sup>2</sup>	500 x 500	500 x 500	500 x 500	500 x 500	500 x 500
Počáteční proud/nA	15,1	15,1	15,1	16,0	14,2
Koncový proud/nA	15,1	14,0	13,4	14,4	14,0

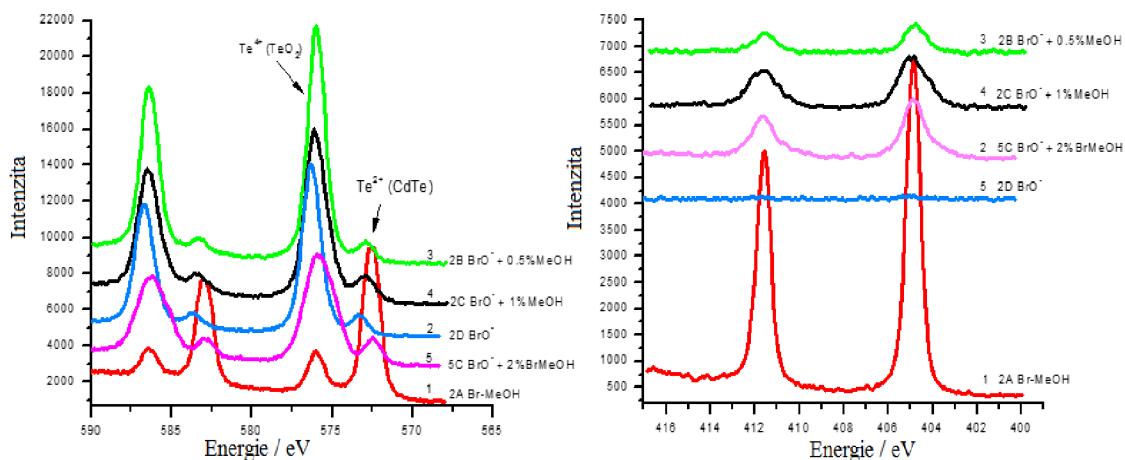
Poměry naměřených intenzit byly zprůměrovány a vyneseny v grafu na Obrázku 24. Je třeba explicitně poznamenat, že naměřené intenzity nebyly kalibrovány, protože pro některé prvky nebyla provedena kalibrační měření.



Obrázek 24: Vzájemné poměry LEISovských intenzit jednotlivých prvků

Naměřené výsledky už lépe odpovídají očekávání. Ve vzorku 2A je největší zastoupení kadmia (brommetanol je ke kadmiu méně agresivní, než hypobromit), ve vzorku 2D není žádné kadmium a ze tří ostatních vzorků se vzorku 2A nejvíce podobá vzorek 5C.

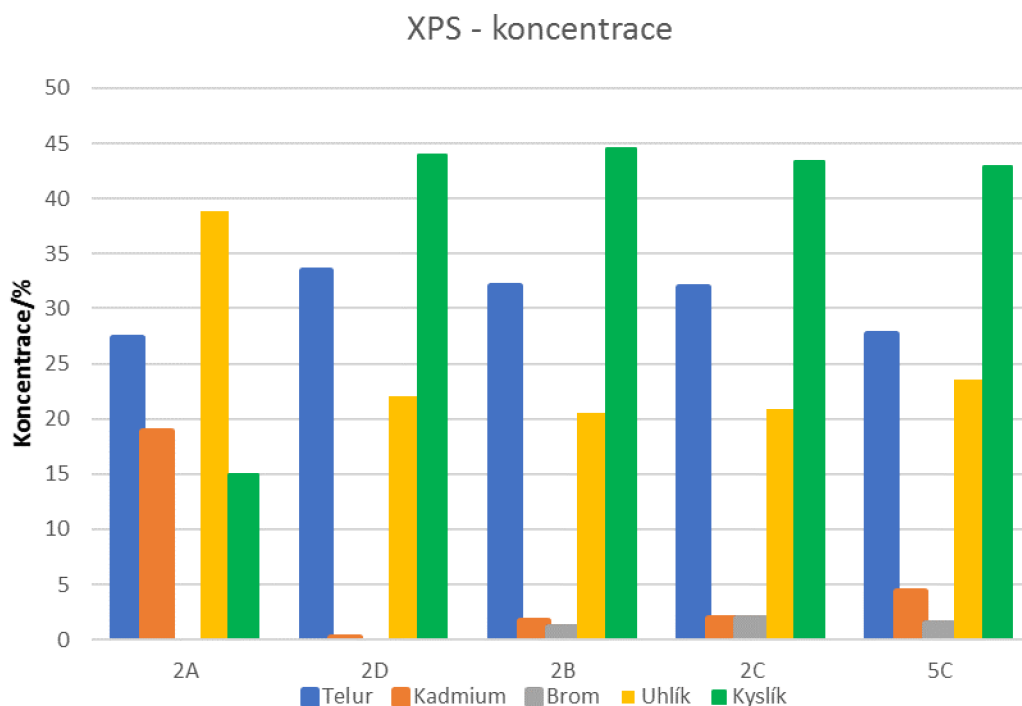
Dále jsou k dispozici spektra naměřená pomocí metody XPS (Obrázek 25), které naměřil Ing. Josef Polčák, Ph.D. a vyhodnotil Ing. Ondřej Šik, Ph.D. v těchto spektrech jsou ovšem zastoupeny i prvky lehčí než neon, neboť XPS není nikterak omezeno hmotností prvků. Proto se těžko porovnávají hodnoty naměřené pomocí XPS a LEISu.



Obrázek 25: XPS spektra pro telur (vlevo) a kadmium (vpravo)



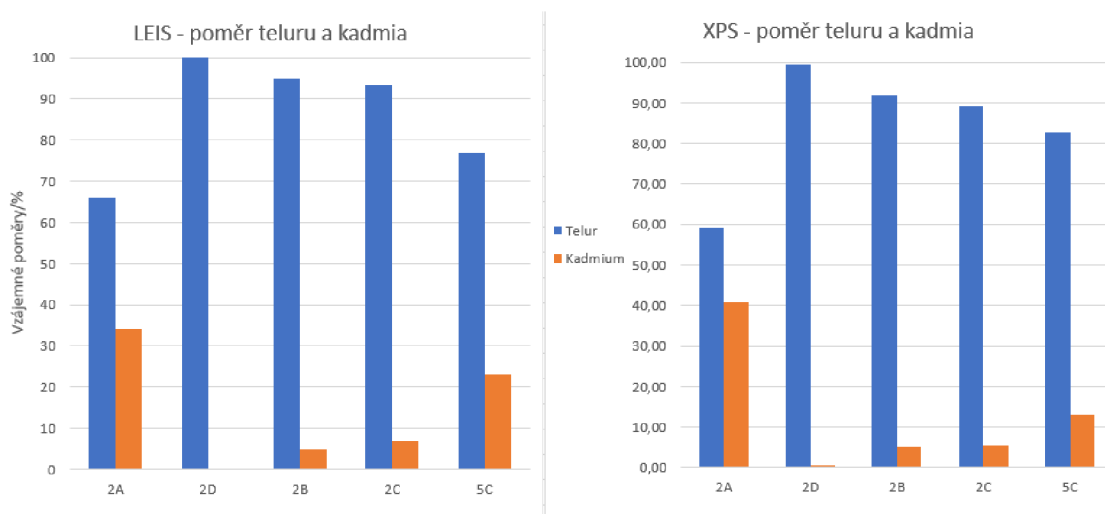
V naměřených spektrech je možno pozorovat, že vzorek 2A se od ostatních v mnoha ohledech liší. Má například povrch více terminovaný čistým CdTe, kdežto vzorky, které byly leptány i pomocí hypobromitu jsou terminovány spíše TeO<sub>2</sub>. Na vzorku 2A byl také naměřen výrazný pík kadmia, zatímco v ostatních vzorcích je ho podstatně méně, ve vzorku 2D kadmium zcela chybí. To odpovídá jak předpokladům, tak hodnotám naměřeným pomocí LEISu.



**Obrázek 26:** Relativní koncentrace prvků ve vzorku na základě XPS spekter  
 Data naměřená XPS vykazují oproti LEISu výrazné rozdíly způsobené zastoupením jiných prvků jako kyslíku, kterého je dokonce ve vzorcích leptaných pomocí hypobromitu většina, nebo uhlíku, jehož je ve vzorcích také nezanedbatelné množství.

Co se týče zastoupení kadmia a teluru, hodnoty odpovídají předpokladům stejně jako datům naměřeným pomocí LEISu.

Abychom byli schopni nějakého porovnání dat získaných pomocí obou metod, byly porovnány pouze vzájemné poměry kadmia a teluru, pro které máme kromě naměřených hodnot provedeno pro LEIS i kalibrační měření. Výsledné závislosti kalibrovaných hodnot pro LEIS a naměřených hodnot pro XPS jsou vyneseny v Obrázku 27.

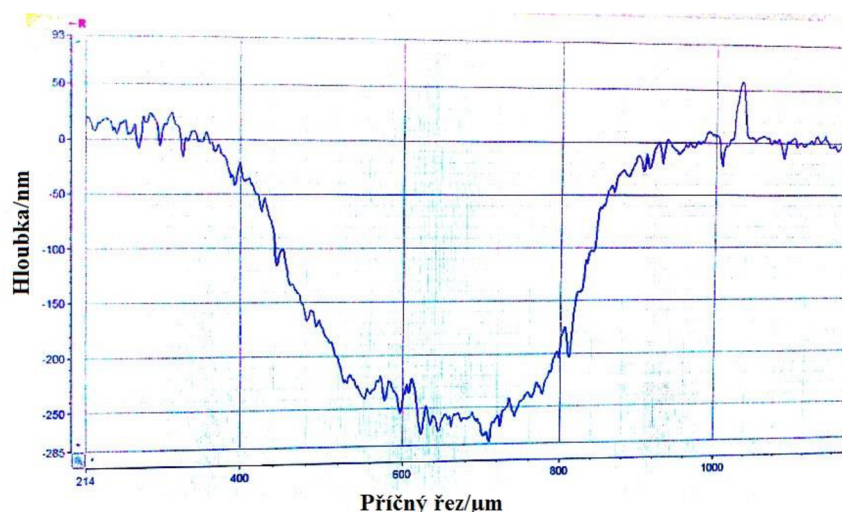


**Obrázek 27:** Vzájemné poměry zastoupení kadmia a teluru ve vzorcích

Na Obrázku 27 je vidět, že měření oběma metodami pro stejnou hloubku vychází prakticky totožně. To můžeme brát jako ověření toho, že XPS průměruje hodnoty z prvních několika nanometrů, neboť odpovídá průměru druhého až čtvrtého spektra naměřeného pomocí metody LEIS. Metodu LEIS lze tedy považovat za kvantitativní.

### 5.3.3 Hloubkový profil

Měření, ze kterého bylo v předchozí podkapitole použito několik prvních spekter, zahrnovalo asi dvě stě spekter, to znamená (při vysoké použité dávce), že bylo ionty odprášeno mnoho nanometrů vzorku a je tedy možnost z naměřených dat sestavit hloubkový profil. Prvně je dobré si ověřit, jaké hloubky bylo při měření dosaženo. To lze změřit pomocí profilometru. Naměřený profil vzorku 5C můžeme vidět na Obrázku 28.



Obrázek 28: Profil měřené části vzorku získaný profilometrem

Z hodnoty naměřené profilometrem (pro vzorek 5C jde o hloubku cca 260 nm) lze určit hloubku, které bylo při měření dosaženo u všech vzorků. Ke každému ze vzorků je totiž k dispozici počet měřených spekter, který s hloubkou profilování přímo souvisí, a je tedy možné spočítat závislost počtu spekter na hloubce profilování (máme-li srovnatelnou hustotu dávky).

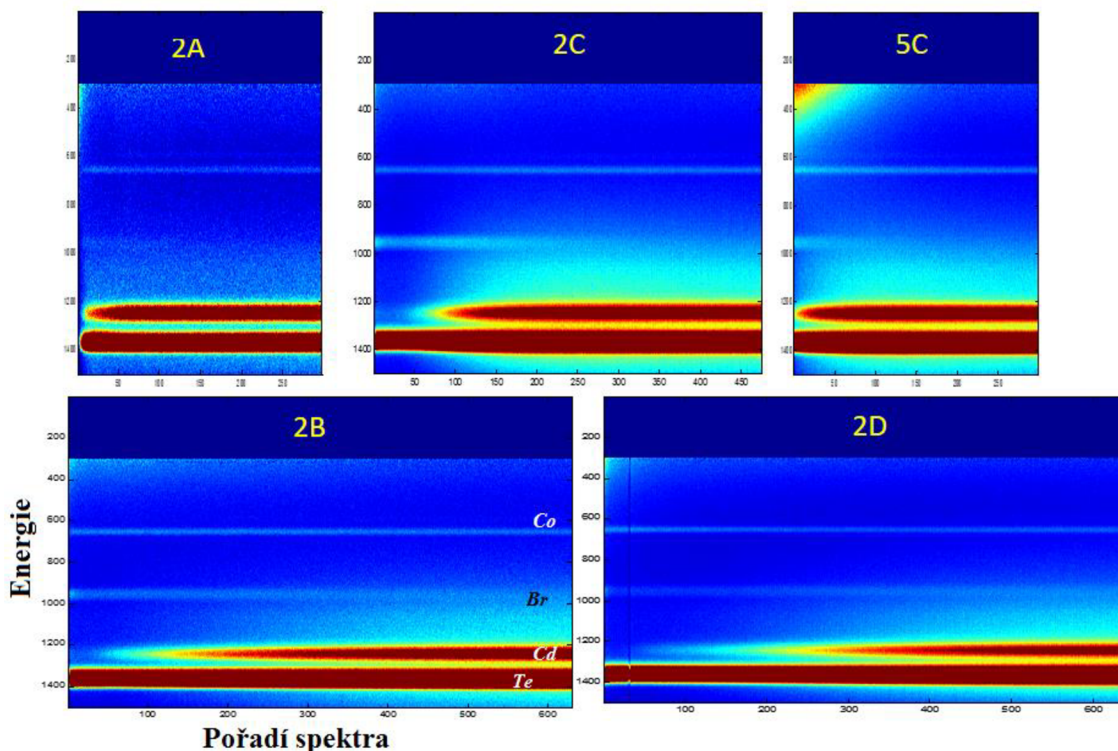
Dosažené hloubky pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tabulce 5.4.

Tabulka 5.4

Označení vzorku	2A	2D	2B	2C	5C
Hloubka profilu /nm	250	565	487	416	260

Naměřená data byla vynesena do hloubkových profilů viz Obrázek 29.

### Hlubkové profily pro jednotlivé vzorky



Obrázek 29: Hlubkové profily jednotlivých vzorků, šířka profilů respektuje hloubku měření. Čáry po řadě (bráno vzestupně) označují telur, kadmium, brom a kobalt. Hlubkové profily nám poskytují mnoho názorných informací o vzorku.

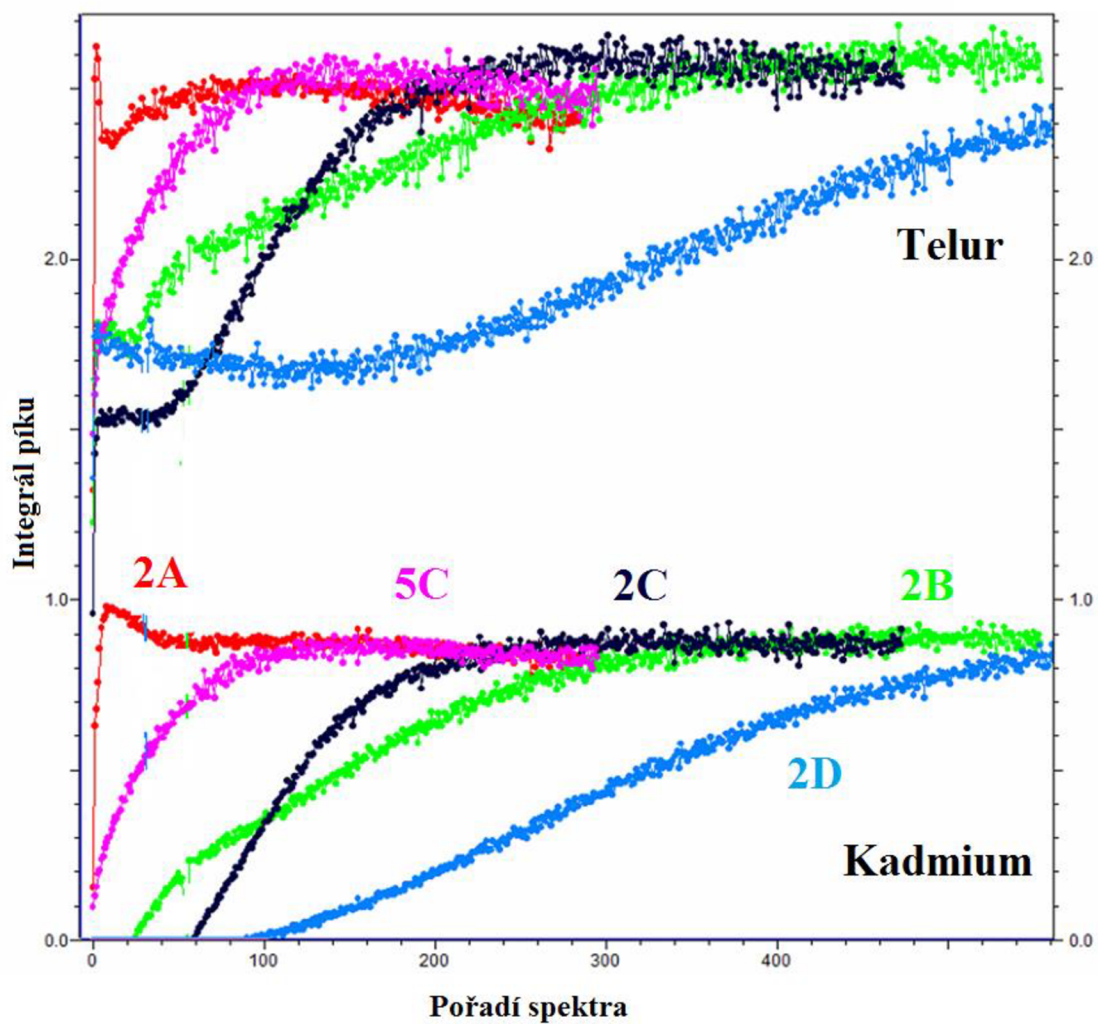
Ve vzorku 2A se prakticky vůbec nevyskytuje brom a kadmium je intenzivní už od prvních spekter.

Vzorek 5C se oproti ostatním vzorkům zpočátku vyznačuje výrazným znečištěním (velká intenzita v levém horním rohu).

Ve vzorku 2D se dle očekávání kadmium objevuje až po několika desítkách naměřených spekter.

Na vzorcích 5C, 2C a 2B je patrné, že s vyšší koncentrací brommetanolu je vyleptána menší vrstva kadmia.

Zajímavé jsou též závislosti velikosti integrálů píků kadmia a teluru na počtu naměřených spekter (tedy na dosažené hloubce). Tyto závislosti jsou vidět na Obrázku 30.



Obrázek 30: Vývoj integrálů píků kadmia a teluru pro jednotlivé vzorky  
 Z Obrázku 30 je patrné, že se vzrůstající hloubkou se velikosti všech integrálů blíží pro jednotlivé prvky stejné hodnotě, což je fakt, který jsme očekávali, neboť ve větší hloubce by měly být čisté CdTe krystaly.

## 6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala studiem chemicky čistěných povrchů krystalů teluridu kadmnatého (CdTe krystalů) pomocí spektroskopie rozptylu nízkooenergiových iontů neboli metodou LEIS.

V teoretické části byla osvětlena fyzikální podstata metody LEIS a bylo představeno experimentální uspořádání včetně důležitých komponent. Dále byla popsána struktura a vlastnosti CdTe krystalů, včetně základního principu detektoru rentgenového záření, pro něž jsou zkoumané krystaly primárně užívány. První podkapitola experimentální části obsahuje stručný návod, jak číst informace z LEISovských spekter a věnuje se kalibračnímu měření, v němž byla určena intenzita, s jakou LEIS zaznamenává kadmium a telur. Výrazně větší intenzita je zaznamenána pro telur. Tuto skutečnost nelze vysvětlit rozdílným diferenciálním účinným průřezem, neboť ten by měl v případě kadmia a teluru způsobovat rozdíl menší než 10 %, kdežto naše měření ukazuje až 50 % rozdíl. Tato skutečnost nejde vysvětlit ani zastoupením kadmia a teluru v CdTe krystalech, protože ten by měl být stejný. Bylo provedeno i opětovné měření čistého kadmia, které vykazovalo intenzitu srovnatelnou s píkem čistého teluru. Tyto nejasnosti nebyly zatím uspokojivě vysvětleny a bude jim věnována pozornost v dalším měření.

Další podkapitola experimentální části popisuje přípravu vzorků zahrnující chemické leptání a popisuje předpokládaný vliv a motivaci pro leptání vzorků jednotlivými chemikáliemi. V našem případě šlo o roztoky bromu, které se pro leptání CdTe krystalů užívá k vyčištění plochy, eliminaci mechanických poruch a v případě hypobromitu i k vyleptání vrstvy kadmia, které vede k terminaci povrchu vrstvou stabilního  $\text{TeO}_2$ .

V poslední podkapitole jsou zkoumány leptané krystaly, a to za pomoci metody LEIS i za pomoci rentgenové fotoelektronové spektroskopie neboli metody XPS. Nejprve byla zkoumána pouze nejsvrchnější monovrstva poměrně malou dávkou iontů. Toto měření ukázalo zastoupení prvků na povrchu. Bylo však omezeno použitým plynem, kterým byl v tomto případě neon, neboť pomocí metody LEIS můžeme principiálně zaznamenávat pouze prvky, které jsou těžší než použité ionty.

První spektra (svrchní monovrstva) jsou také dost poznamenána nečistotami, které kontaminovaly povrch mezi leptáním a umístěním do komory. Spektra ukazovala poměrně malé zastoupení kadmia a vysoké zastoupení teluru, především na vzorcích leptaných roztokem obsahujícím hypobromit.

Vzorky byly poté ostřelovány vyšší dávkou iontů po delší dobu. Z tohoto měření byly vyhotoveny hloubkové profily, které dobře ukazují, do jaké hloubky leptání bromem zasáhly. Největší část krystalu ochuzená o kadmium byla zjištěna na vzorku leptaném čistým hypobromitem, nejmenší část byla pozorována na vzorku leptaném čistým brommetanolem, v ostatních vzorcích rostla koncentrace kadmia s rostoucí koncentrací brommetanolu v roztoku, což odpovídá předpokladu.

Byla porovnána spektra XPS s průměrem prvních spekter LEISu a bylo názorně ukázáno, že metoda LEIS dokáže poskytnout kvalitativní informace o složení povrchu vzorku.

## Literatura

- [1] BRONGERSMA, Hidde H. Low-Energy Ion Scattering. *Characterization of Materials* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2002 [cit. 2017-05-16]. DOI: 10.1002/0471266965.com144. ISBN 0471266965.  
Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/0471266965.com144>
- [2] *CdTe and related compounds: physics, defects, hetero- and nano-structures, crystal growth, surfaces and applications*. Editor Robert TRIBOULET, editor Paul SIFFERT. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 9780080464091
- [3] GLAJC, P.: *Testování a optimalizace iontového zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 75 s. Vedoucí Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.
- [4] Glosář Aldebaran. In: *Aldebaran* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=359>
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika*. Svazek 2. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [6] HORTON, Hugh. *Research Projects*. Dr. J. Hugh Horton [online]. 2009. Dostupné z: <http://faculty.chem.queensu.ca/people/faculty/horton/research.html>
- [7] JOCH V., *Nízkoenergiový rozptyl iontů inertních plynů na zlatých strukturách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 53 s. Vedoucí Ing. Stanislav Průša, Ph.D.
- [8] KITTEL, Charles. *Úvod do fyziky pevných látek*. 5. vyd. v orig. Praha: Academia, 1985. 598 s.
- [9] KRAJŇÁK, T. *Studium lokálně modifikovaných povrchů pro selektivní růst kobaltu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí doc. Ing. Jan Čechal, Ph.D.
- [10] LEIS Technique Handout. In: *Calipso* [online]. Mendelstr 17, 48149 Münster, Germany: Tascon [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.calipso.nl/media/pdf/handout%202007.pdf>
- [11] MARTIN, Peter M. *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings: Science, Applications and Technology*. 3. Elsevier Science, 2009. ISBN 9780815520313.



- [12] PEKÁREK, Jakub. *Detektory RTG a gama záření na bázi polovodiče CdTe/CdZnTe*. Praha, 2013, 67 s. Diplomová. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce doc. Ing. Eduard Belas, CSc.
- [13] PRŮŠA, Stanislav. *Rozptyl nízkoenergiových iontů LEIS - nástroj pro zkoumání povrchů pevných látek = Low energy ion scattering - a tool for surface analysis: zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2011, 29 s. : il., grafy. ISBN 978-80-214-4278-8.
- [14] Qtac Brochure. In: *IONTOF* [online]. Heisenbergstraße 15, 48149 Münster Germany [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [https://www.iontof.com/download/IONTOF\\_Qtac\\_Brochure.pdf](https://www.iontof.com/download/IONTOF_Qtac_Brochure.pdf)
- [15] RABALAIS, J. Wayne. *Principles and applications of ion scattering spectrometry: surface chemical and structural analysis*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, xvi, 306 s. : il. ISBN 0-471-20277-0.
- [16] ŠIK, Ondřej. *Transportní, šumové a strukturální vlastnosti detektorů vysokoenergetického záření na bázi CdTe*. Brno, 2016, 95 s. Disertační. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce prof. Ing. Lubomír Grmela, CSc.
- [17] WOODRUFF, D. P a T. A DELCHAR. *Modern Techniques of Surface Science*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994, 586 s. ISBN 0-521-42498-4.