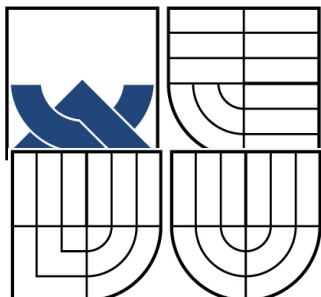


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

METODA NAPĚŤOVÉHO KONTRASTU PŘI DETEKCI SEKUNDÁRNÍCH ELEKTRONŮ SCINTILAČNÍM DETEKTOREM VE VP SEM

VOLTAGE CONTRAST METHOD AT DETECTION OF SECONDARY ELECTRONS BY
SCINTILLATION DETECTOR IN VP SEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LADISLAV JABUREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF JIRÁK, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Ladislav Jabůrek

ID: 70237

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Metoda napětového kontrastu při detekci sekundárních elektronů scintilačním detektorem ve VP SEM

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou činnosti rastrovacího elektronového mikroskopu pracujícího při vyšším tlaku v komoře vzorku (VP SEM), detekci signálu sekundárních elektronů scintilačním detektorem a s metodou napětového kontrastu pro sledování rozložení potenciálů na povrchu vzorků. Experimentálně stanovte a vyhodnoťte vhodné pracovní podmínky (tlak vodních par v komoře vzorku, potenciály na elektrodách scintilačního detektoru) pro pozorování napětového kontrastu na PN přechodu výkonového transistoru scintilačním detektorem sekundárních elektronů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektronového rastrovacího mikroskopu pracujícího při vyšším tlaku v komoře vzorku. Hlavním cílem práce bylo sledování napěťového kontrastu na přechodu PN výkonového transistoru za vhodných pracovních podmínek za pomoci environmentální rastrovacího mikroskopu. Pozorování vzorku bylo umožněno pomocí scintilačního detektoru určeného pro pozorování ve vysokém tlaku.

ABSTRACT

This thesis deals with scanning electron microscope working at higher pressure in the specimen chamber. The main goal was to study the voltage contrast on the PN junction of the transistor under suitable working conditions for using environmental scanning microscope. The observation of sample was enabled by a scintillation detector designed for observation of high pressure.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM), Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (ESEM, VP SEM), scintilační detektor pro vyšší tlak, sekundární elektrony, napěťový kontrast.

KEYWORDS

Scanning electron microscope (SEM), environmental scanning electron microscope (ESEM, VP SEM), scintillation detector for higher pressure, secondary electron, voltage contrast

OBSAH

ÚVOD	8
1 RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE [3].....	9
2 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY RASTROVACÍ ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE	10
2.1 INTERAKCE ELEKTRONŮ S TUHOU LÁTKOU [4]	10
2.2 PRUŽNÝ ROZPTYL [5]	11
2.3 NEPRUŽNÝ ROZPTYL [5].....	11
2.4 ZPĚTNĚ ODRAŽENÉ ELEKTRONY [5], [9].....	12
2.5 SEKUNDÁRNÍ ELEKTRONY[5], [9].....	12
2.6 DETEKCE SIGNÁLNÍCH ELEKTRONŮ VE VAKUU [9].....	14
3 ENVIRONMENTÁLNÍ RASTROVACÍ MIKROSKOPIE [5], [6]	16
3.1 ROZDÍL MEZI SEM A ESEM.....	16
3.2 ELEKTRONY V PLYNNÉM PROSTŘEDÍ	17
3.3 VAKUOVÁ SOUSTAVA ENVIRONMENTÁLNÍHO MIKROSKOPU	18
3.4 DETEKCE ELEKTRONŮ V PLYNNÉM PROSTŘEDÍ	19
3.4.1 <i>Detekce zpětně odražených elektronů pomocí scintilačního detektoru ...</i>	<i>19</i>
3.4.2 <i>Detekce sekundárních elektronů pomocí scintilačního detektoru [blah] ..</i>	<i>19</i>
3.4.3 <i>Detekce signálních elektronů pomocí ionizačního detektoru</i>	<i>20</i>
4 NAPĚŤOVÝ KONTRAST [7], [9]	22
5 STANOVENÍ PRACOVNÍCH PODMÍNEK PRO POZOROVÁNÍ NAPĚŤOVÉHO KONTRASTU VE VP SEM	24
5.1 ZADÁNÍ	24
5.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	24
5.3 VZOREK.....	25
5.4 PRACOVNÍ PODMÍNKY	25
5.5 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	26
6 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY	27
6.1 ZÁVISLOSTI NAMĚŘENÉHO KONTRASTU NA TLAKU V KOMOŘE VZORKU	27

6.2	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH ZÁVISLOSTÍ	31
6.2.1	<i>Vliv změny napětí na elektrodě E1</i>	<i>31</i>
6.2.2	<i>Vliv změny napětí na elektrodě E2</i>	<i>32</i>
6.2.3	<i>Vliv změny napětí na cloně C1</i>	<i>32</i>
6.2.4	<i>Vliv změny pracovní vzdálenosti.....</i>	<i>32</i>
6.3	OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY POZOROVÁNÍ NAPĚŤOVÉHO KONTRASTU	32
7	ZÁVĚR.....	34
8	POUŽITÁ LITERATURA.....	35
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	36
10	SEZNAM PŘÍLOH	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu, převzato z [8]	9
Obr. 2 Spektrum elektronů při dopadu primárního svazku elektronů na vzorek	10
Obr. 3 Závislost koeficientu emise zpětně odražených elektronů na protonovém čísle pro různé úhly dopadu, převzato z [7].....	12
Obr. 4 Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energii primárního svazku pro různé materiály, převzato z [9]	13
Obr. 5 Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energie primárního svazku pro různé úhly dopadu, převzato z [8].....	13
Obr. 6 Příspěvky k celkovému výtěžku sekundárních elektronů poredko dopadu primárních elektronů na v.....	14
Obr. 7 Schéma Everhart-Thornley detektoru, převzato z [7]	15
Obr. 8 Obraz vzorku zlata na uhlíku ve vysokém vakuu (vlevo) a při tlaku 600 Pa (vpravo). Energie primárního svazku 20 kV a jako plynné prostředí byly použitý vodní páry, převzato z [6]	16
Obr. 9 Průchod primárního svazku vysokým vakuem a), plynem b), plynem o větším tlaku c).	17
Obr. 10 Zjednodušené schéma vakuové soustavy EREM.....	18
Obr. 11 Detektor zpětně odražených elektronů se scintilačním monokrystalem, převzato z [5]	19
Obr. 12 Průřez scintilačního detektoru s ekvipotenciálními čarami.....	20
Obr. 13 Principiální schéma ionizačního detektoru, převzato z [5]	20
Obr. 14 Interakce primárních elektronů se vzorkem s potenciálem na povrchu	22
Obr. 15 Sledování přechodu PN pomocí napěťového kontrastu	23
Obr. 16 Zjištění chyby ve vodičích pomocí napěťového kontrastu, převzato z [10]	23
Obr. 17 Pracoviště environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu AQUASEM	24
Obr. 18 Vzorek pro měření napěťového kontrastu	25
Obr. 19 a) Přechod E-B výkonového tranzistoru s přiloženým napětím 6V v závěrném směru	26

- Obr. 20 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Napětí na E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 4mm, $I_p = 100$ pA.27
- Obr. 21 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost. = 4mm, p.s. = 100 pA.....28
- Obr. 22 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 550 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 4mm, $I_p = 100$ pA.28
- Obr. 23 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Pracovní podmínky E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5 mm, $I_p = 100$ pA.29
- Obr. 24 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, $I_p = 100$ pA.29
- Obr. 25 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, $I_p = 80$ pA.30
- Obr. 26 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Pracovní podmínky E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, $I_p = 80$ pA.30
- Obr. 27 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 550 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, $I_p = 80$ pA.31

Úvod

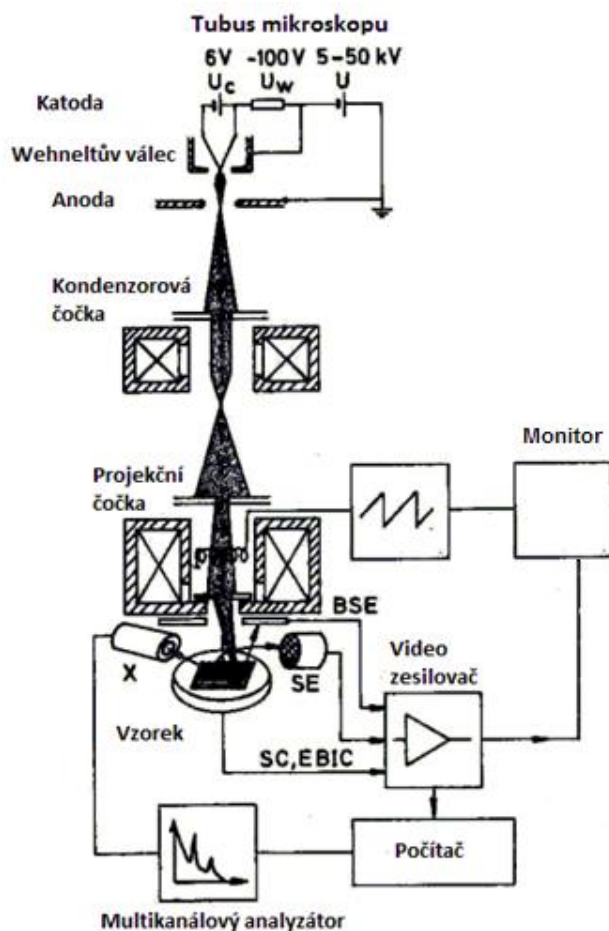
Rastrovací elektronová mikroskopie je hodně využívaná diagnostická metoda, která se dá použít v mnoha různých odvětvích průmyslu a technologie. Kvůli neustálé miniaturizaci v polovodičové technice, kde se integrované obvody zpracovávají postupy, kde se přímo využívá elektronový svazek, je zapotřebí integrovaný obvod sledovat s technologiemi se srovnatelným rozlišením, jako je rastrovací elektronová mikroskopie. Cílem diplomové práce bylo seznámení se s problematikou činnosti rastrovacího elektronového mikroskopu pracujícího při vyšším tlaku v komoře vzorku.

První část diplomové práce se zabývá fyzikálními základy rastrovací elektronové mikroskopie, principy rastrovacího elektronového mikroskopu, konstrukcí rastrovacího elektronového mikroskopu a detekci elektronů pomocí scintilačního detektoru. Další část diplomové práce se zabývá environmentální rastrovací elektronovou mikroskopií a detekcí elektronů v plynném prostředí pomocí scintilačního a ionizačního detektoru. Nakonec se diplomová práce zabývá vyhodnocením vhodných pracovních podmínek pro pozorování napěťového kontrastu na PN přechodu výkonového tranzistoru scintilačním detektorem sekundárních elektronů.

1 Rastrovací elektronová mikroskopie [2]

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) slouží především ke studiu povrchu tuhých látek. Jako signály pro zobrazení se používají sekundární elektrony (SE) a zpětně odražené elektrony (BSE). Rastrovací elektronový mikroskop má statisícinásobné zvětšení, rozlišovací schopnost až 1 nanometr a velkou hloubku ostrosti.

Na vzorek dopadá tenký svazek elektronů. Vychylovací soustava mikroskopu zajišťuje, aby elektronový svazek postupně dopadal na všechna místa povrchu. Obraz vzorku se vytváří bod po bodu. Signály z jednotlivých míst vzorku se zpracují a přenesou na obrazovku monitoru.



Obr. 1 Princip rastrovacího elektronového mikroskopu, převzato z [5]

Na Obr. 1 jde vidět, že se rastrovací elektronový mikroskop skládá z elektronové trysky (katoda, anoda, Wehneltův válec), ze soustav čoček (kondenzorová, projekční), z rastrovacích cívek, detektorů pro jednotlivé typy signálu a počítače na zpracování signálu.

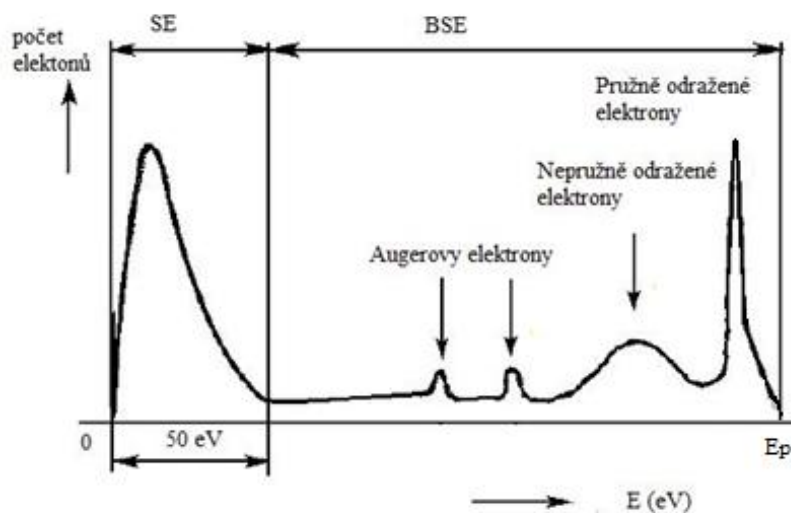
2 Fyzikální základy rastrovací elektronové mikroskopie

2.1 Interakce elektronů s tuhou látkou [2]

Při dopadu elektronového svazku lze pozorovat celou řadu dějů, jako je emise zpětně odražených elektronů, sekundárních elektronů, Augerových elektronů, katodoluminescence i emise rentgenového záření.

Primární svazek elektronů dopadá na povrch tuhé látky, část elektronů se odrazí a zbytek vnikne do látky. Elektrony, které vniknou do látky, způsobí řadu srážek s atomy materiálu, čímž se rozptýlí do objemu zvaného interakční objem. Rozměr a tvar interakčního objemu je závislý na protonovém čísle materiálu a na energii dopadajícího svazku. S větší hodnotou protonového čísla se interakční objem zmenšuje, s větší hodnotou energie svazku se interakční objem zvětšuje.

Rozdělení energie elektronů emitovaných tuhou látkou po dopadu primárního svazku s energií E_p lze vidět na Obr. 2. Pružně zpětně odražené elektrony se emitují s energií blízkou energii primárního svazku. V blízkosti maxima pružných zpětně odražených elektronů je maximum nepružných zpětně odražených elektronů. Dále směrem k nižší energii jsou malá maxima Augerových elektronů a maximum sekundárních elektronů. Sekundární elektrony jsou všechny elektrony s energií nižší než 50 eV, které se uvolní ze vzorku následkem vniknutí primárních elektronů.



Obr. 2 Spektrum elektronů při dopadu primárního svazku elektronů na vzorek

2.2 Pružný rozptyl [4]

Existují dva typy rozptylu, pružný a nepružný. Pružný a nepružný rozptyl elektronů a excitace elektronů jsou procesy, které ovlivňují dolet elektronů, hloubkové rozdělení ionizace atomů a emisi sekundárních a zpětně odražených elektronů.

Princip pružného rozptylu je, že při dopadu primárního svazku na vzorek se elektrony začnou odchylovat od svého původního směru vlivem působení Columbovy síly jádra atomu částečně stíněného okolními elektrony, což způsobí změnu dráhy elektronu. Úhel rozptylu může být jakýkoli od 0° - 180° . Literatura [10] uvádí, že úhel rozptylu je obvykle 2° - 5° . Při pružném rozptylu nedochází ke změně energie elektronu, pouze k jeho vychýlení z původního směru.

Pravděpodobnost, že primární elektron interaguje s atomem, je závislá na účinném průřezu, který se liší v závislosti na energii elektronu. Podle Rutherforda je elastický účinný průřez dán rovnicí

$$\sigma_E = 1,62 \cdot 10^{20} \left(\frac{Z^2}{E^2}\right) \cot^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \quad (1)$$

Pomocí účinného rozptylu se odvodí vzorec pro střední volnou dráhu elektronů, neboli vzdálenost, kterou elektron urazí, než dojde k rozptylu.

$$\lambda_E = \frac{A}{N_0 \rho \sigma_E} \quad (2)$$

2.3 Nepružný rozptyl [4]

Princip nepružného rozptylu spočívá v přenosu energie primárního elektronu na atom vzorku. Nepružný rozptyl snižuje kinetickou energii elektronu, zatímco odchylka elektronu z původního směru je podle literatury [10] v řádu $0,1^\circ$.

Nepružný rozptyl vede k emisi sekundárních elektronů, Augerových elektronů, ke spojitému rentgenovému záření či vzniku pár elektron-díra. Spíše než účinný průřez pro nepružný rozptyl se u nepružného rozptylu používají průměrné ztráty energie dE/ds . Podle literatury [10] je

$$\frac{dE}{ds} = -7,85 \cdot 10^4 \frac{Z\rho}{AE_0} \ln \frac{1,116E_0}{J} \quad (3)$$

Elektrony s menší energií mají větší šanci, že se srazí s atomem, rychlost ztráty energie je podstatně vyšší než u elektronů s vysokou energií.

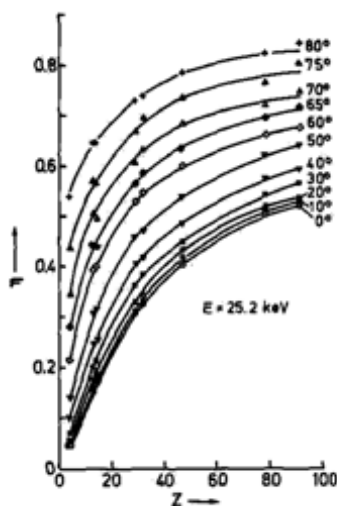
2.4 Zpětně odražené elektrony [6], [7], [8]

Zpětně odražené elektrony jsou elektrony primárního svazku, které dopadly na vzorek a po několika pružných a nepružných srážkách mají dost energie, aby mohly vzorek opustit. Nejčastější energie zpětně odražených elektronů se pohybuje v rozmezí 80 – 90 % energie primárního svazku. Pro zpětně odražené elektrony se používá koeficient emise zpětně odražených elektronů

$$\eta = \frac{I_{BSE}}{I_P}, \quad (4)$$

který se rovná podílu proudu zpětně odražených elektronů a proudu primárního svazku. V literatuře **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** se uvádí empirický vztah pro závislost koeficientu emise zpětně odražených elektronů na protonovém čísle materiálu pro energii primárního svazku 20 keV:

$$\eta = (-52,3791 + 150,48371Z - 1,6737Z^2 + 0,00716Z^3)10^{-4}. \quad (5)$$



Obr. 3 Závislost koeficientu emise zpětně odražených elektronů na protonovém čísle pro různé úhly dopadu, převzato z [8]

Množství zpětně odražených elektronů roste s protonovým číslem Z vzorku a úhlem dopadu primárního svazku, což je úhel mezi normálou k povrchu v místě dopadu primárního svazku a primárním svazkem.

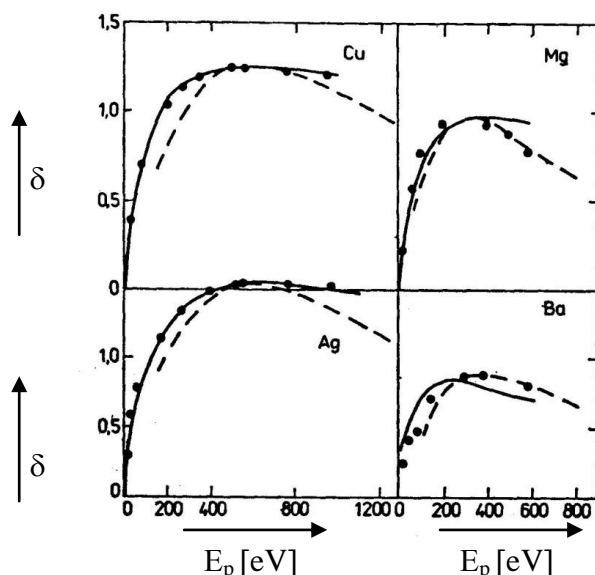
2.5 Sekundární elektrony [6], [7], [8]

Sekundární elektrony vzniknou pronikáním primárních elektronů hmotou, kdy dochází k uvolnění elektronů z elektronového obalu atomu látky. Tyto excitované elektrony se pak šíří

ve vzorku, dochází k nepružným srážkám a tedy i ke ztrátě energie. Pokud mají elektrony dostatečnou energii a nejsou hlouběji než v maximální hloubce d_s , mohou uniknout na povrch. Maximální hloubka, z které mohou sekundární elektrony proniknout na povrch, je přibližně 3 až 30 nm. Pro emisi sekundárních elektronů se zavádí koeficient emise sekundárních elektronů δ , který je dán vztahem

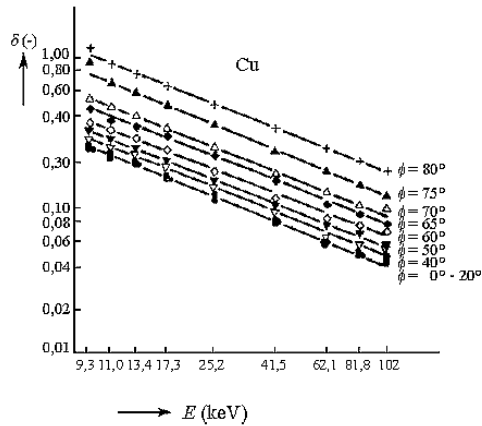
$$\delta = \frac{I_{SE}}{I_P} \quad (6)$$

Koeficient emise sekundárních elektronů při zvyšujícím se urychlovacím napětí zpočátku vzrůstá a po dosažení maxima při určitém urychlovacím napětí bude klesat.



Obr. 4 Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energii primárního svazku pro různé materiály, převzato z [7]

Množství emitovaných sekundárních elektronů se zvětšuje s úhlem dopadu primárního svazku viz Obr. 5.



Obr. 5 Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energie primárního svazku pro různé úhly dopadu, převzato z [5]

Celkový výtěžek sekundárních elektronů se skládá z příspěvku SE1, excitovaného primárními elektrony, SE2, excitovaného zpětně odraženými elektrony a SE3, které se excitují zpětně odraženými elektrony dopadajícími na konstrukční části mikroskopu.

$$I_{SE} = I_{SE1} + I_{SE2} + I_{SE3} \quad (7)$$



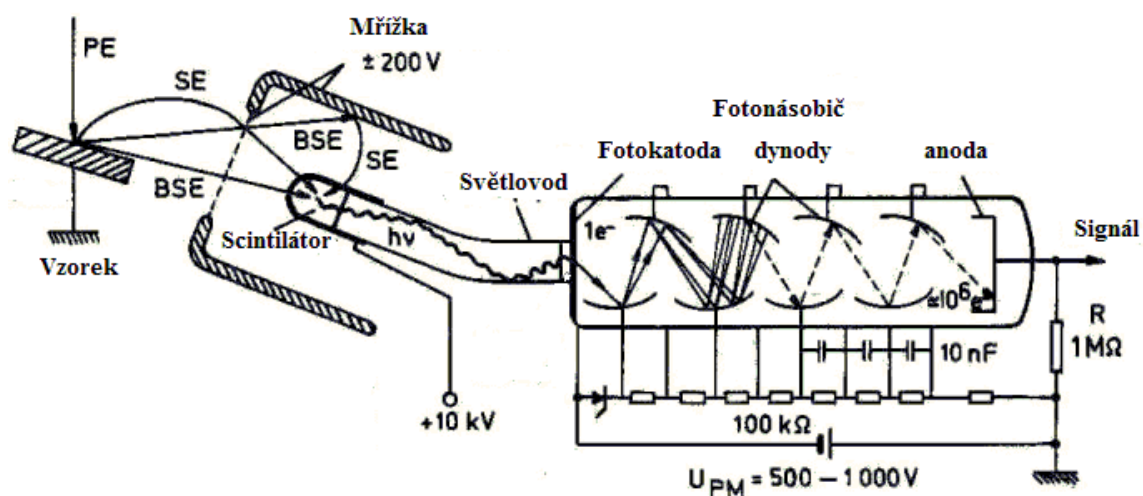
Obr. 6 Příspěvky k celkovému výtěžku sekundárních elektronů poremko dopadu primárních elektronů na v

2.6 Detekce signálních elektronů ve vakuu [7], [8]

Scintilační detektor se též nazývá Everhart-Thornley detektor. Skládá se z kolektoru, scintilátoru, světlovodu a fotonásobiče. Princip je takový, že elektron směřuje ke kolektoru a vniká do scintilačního krystalu, kde se absorbuje a část jeho energie se přemění na fotony. Fotony putují světlovodem až k fotonásobiči, který převede fotony na elektrický signál. Fotonásobič obsahuje fotokatodu a soustavu dynod. Fotony dopadají na fotokatodu a vyráží

z ní elektrony. Elektrony potom směřují k dynodám a na každé vyrazí další dva elektrony. Na anodu dopadá řádově 10^5 až 10^6 elektronů, což je dost elektronů k vyvolání elektrického impulsu. Citlivost detektoru závisí na velikosti plochy scintilátoru, kam dopadají elektrony, a velikosti fotokatody fotonásobiče, kam dopadají fotony. Detektor je velmi citlivý na světlo, proto musí být komora světlotěsně uzavřena.

Elektrická pole, která se vytvářejí mezi povrchem vzorku a kolektorem slouží k odsávání sekundárních elektronů z povrchu vzorku. Na kolektor lze vkládat napětí -100 až 400 V vůči vzorku. Tak se přebírá funkce mřížky, která při -100 V zcela zamezí přístup sekundárních elektronů. Zpětně odražené elektrony nejsou tímto elektrickým polem ovlivněny, a když detektor směřuje ke vzorku, dopadnou na detektor. Obraz je tvořen v daném případě jen zpětně odraženými elektrony.



Obr. 7 Schéma Everhart-Thornley detektoru, převzato z [8]

Pro detekci pouze sekundárních elektronů se detektor umísťuje pod rovinu povrchu vzorku, neboť zpětně odražené elektrony se pohybují pouze přímočaře. Dále pro detekci sekundárních elektronů je nutné pokrýt detektor tenkou vodivou vrstvou. Používá se hliník nebo ITO vrstva s přivedeným napětím kolem $+10$ kV.

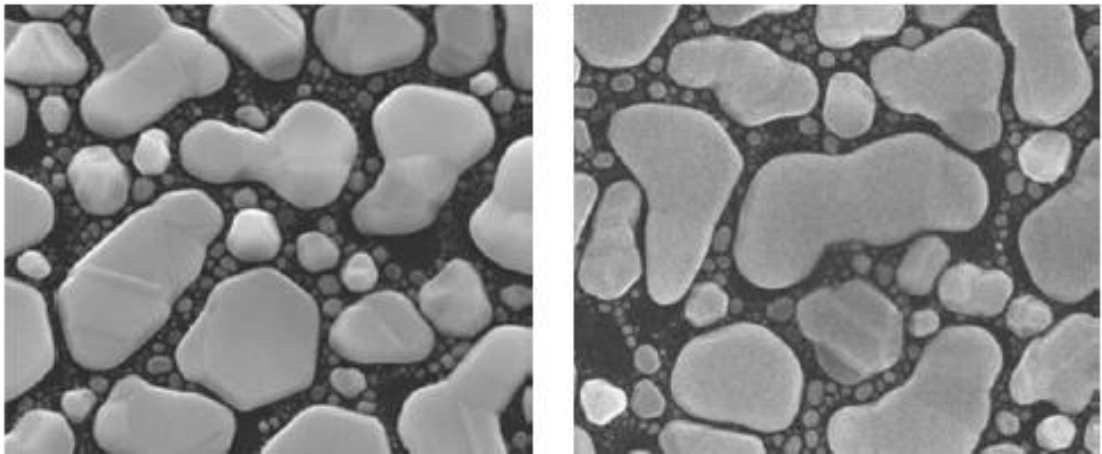
3 Environmentální rastrovací mikroskopie [6], [10]

3.1 Rozdíl mezi SEM a ESEM

Problémem SEM je, že při bombardování vzorku elektrony s relativně vysokou energií se začne hromadit záporný náboj na povrchu vzorku. Pokud je vzorek vodivý, dá se záporný náboj odstranit uzemněním vzorku. Elektricky nevodivé vzorky jako izolanty rozptylují náboj méně efektivně a na povrchu se vytvoří elektrické pole, které zkresluje výsledný signál. Obvykle se na izolanty nanese vrstva kovu jako zlato, platina, paladium či chróm. Existuje ale riziko změny reliéfu povrchu. Pokovené vzorky dávají taky někdy pouze informaci o topografii vzorku kvůli krátké hloubce průniku elektronů kovovou vrstvou.

V 70. letech minulého století bylo zjištěno, že v důsledku ionizačních srážek atomů a molekul plynu s primárními a signálními elektrony se neprojevuje žádný povrchový náboj na izolačním vzorku, neboť je kompenzován kladnými ionty. Kompenzace elektrického náboje vedla k přímému pozorování elektricky nevodivých preparátů. V roce 1979 jsou popisovány základní principy ESEM za podmínek vysokého tlaku. V 80. letech se začaly u mikroskopů ESEM používat dvě clony, které oddělují tlak v komoře vzorku a tlak v optické části mikroskopu.

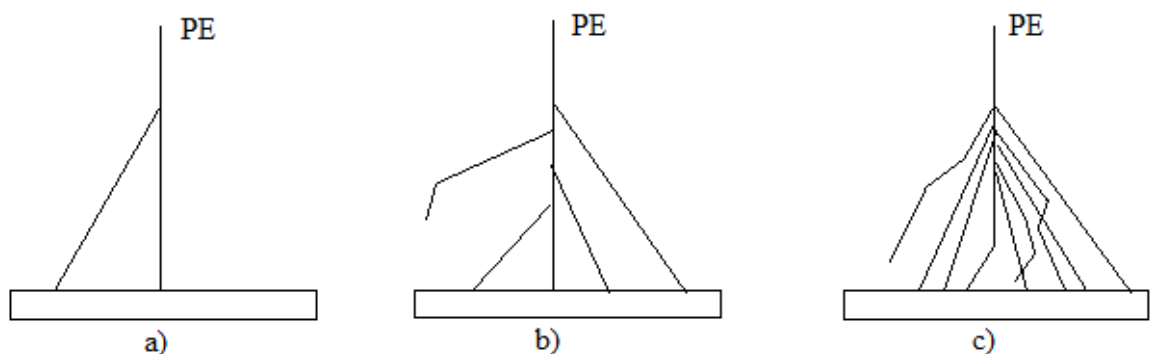
Podstata environmentální rastrovací elektronové mikroskopie (ESEM – environmental scanning electron microscopy, nazývána taky VP SEM – Variable Pressure scanning electron microscopy) spočívá v možnosti pozorovat vzorky obsahující určité množství vody nebo je pozorovat při vyšších tlacích v komoře vzorku. U ESEM je to kolem 300 až 2000 Pa.



Obr. 8 Obraz vzorku zlata na uhlíku ve vysokém vakuu (vlevo) a při tlaku 600 Pa (vpravo). Energie primárního svazku 20 kV a jako plynné prostředí byly použity vodní páry, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

3.2 Elektrony v plynném prostředí

Plynné prostředí má vliv na trajektorii primárních elektronů, neboť dochází k srážkám primárního svazku s atomy a molekulami plynu. Při vakuu se primární elektrony pouze občas odchýlí od trajektorie primárního svazku Obr. 9 a). V případě přítomnosti molekul plynu v komoře vzorku je četnost rozptylu větší Obr. 9 b). Při vyšších tlacích je primární svazek rozptýlen úplně Obr. 9 c).



Obr. 9 Průchod primárního svazku vysokým vakuem a), plynem b), plynem o větším tlaku c).

Při působení plynu a primárního svazku kromě rozptylu elektronů, dochází i ke generaci sekundárních elektronů, zpětně odražených elektronů, fotonů, rentgenového záření, kladných iontů a dochází i ke změně stavu plynu. Přítomnost plynu v komoře vzorku rozšiřuje aplikační oblast elektronových mikroskopů. Dají se pozorovat vlhké vzorky, korozivní reakce či

krystalizace z kapaln fze. Plyn v komoře vzorku omezuje pouit některých klasických detektorů a naopak umožňuje využití nov způsoby detekce.

Prmrn uhel vychlen a ztráta energie vzhledem k pvodn energii primárního svazku jsou při jedné srážce velmi mal. Pokud je prmrn počet srážek připadající na elektron mal, bude mal i vsledn odchlen elektronu od pvodn trajektorie. Prmrn počet srážek p_s lze stanovit ze vztahu

$$p_s = \frac{\sigma_T p d_p}{kT} \quad (8)$$

Pravděpodobnost, že se elektron srázů na sv dráze s atomy plynu x -krát, je dána Poissonovým rozloenm.

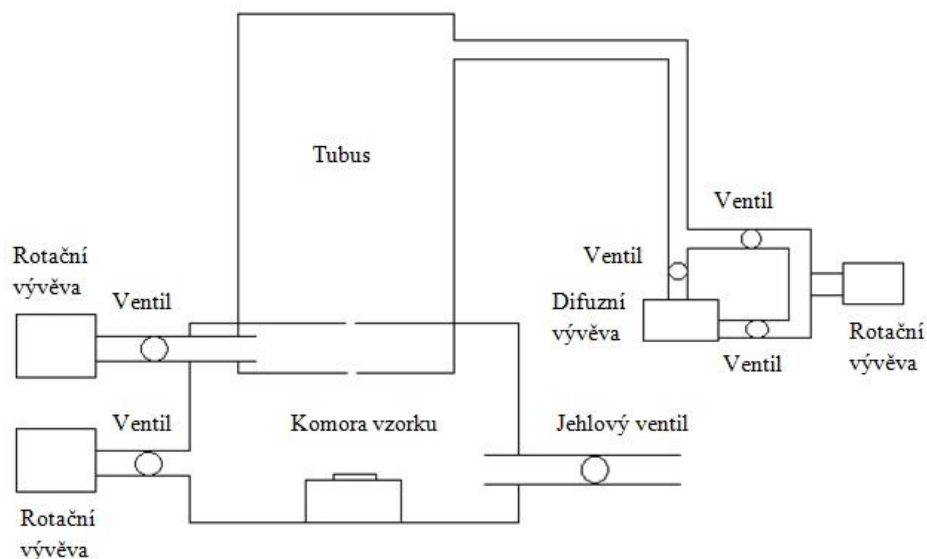
$$P(x) = \frac{p_s^x e^{-p_s}}{x!} \quad (9)$$

3.3 Vakuov soustava environmentálního mikroskopu

Environmentální rastrovací mikroskopie využívá obvykle dvou tlak omezujících clon s malými otvory, kter umožňují potlačit proudění plynů mezi jednotlivými prostory s rozdílnými tlaky. Otvory ve clonách souasn umožňují elektronům primárního svazku pjt z tubusu až do komory. Clona blíže k tubusu pln souasn funkci aperturní clony objektivu mikroskopu a prostor mezi n a druhou clonou se nazývá komora diferenciálního erpn.

Připouštění požadovaných plynů do komory vzorku zajituje jehlov ventil. Prostor mezi oběma clonami je obvykle čerpání pomocí rotační vývěvy nebo soustavou rotační a turbomolekulární vývěvy. Kvůli omezujícím rozměrům prostoru mezi clonami je požadavek na uinn čerpání spojen s dostatečnou čerpací rychlostí. Prostor tubusu je čerpání klasickými vakuovými systémy.

Jako plynn médiím se používá obvykle buď vzduch, nebo vodn páry. Výhodou pouit vzduchu nebo vodních par je snadn dostupnost plyn, snadn ovladatelnost a nízká cena. Vodn páry jsou uiten při zkoumání vlhkých a tekutých vzorků. Jako médiím mohou být použity i dali plyny. Pro zkoumání materiálů, které snadno oxidují, lze zvolit argon. Pro pokusy při nízkých teplotách je vhodn pouit helium, dusík, nebo oxid dusný.

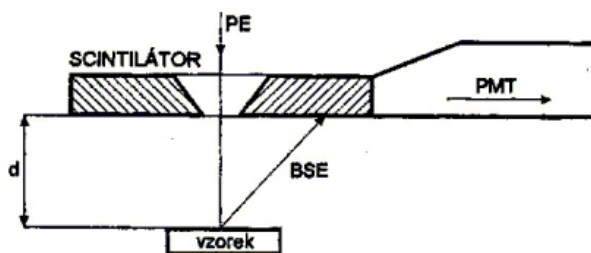


Obr. 10 Zjednodušené schéma vakuové soustavy EREM

3.4 Detekce elektronů v plynném prostředí

3.4.1 Detekce zpětně odražených elektronů pomocí scintilačního detektoru

Zpětně odražené elektrony se pohybují plynným prostředím na kratší vzdálenosti bez velké ztráty energie. Detektory zpětně odražených elektronů musí být konstrukčně navrženy tak, aby jejich geometrické uspořádání vyhovovalo požadavku na omezení délky dráhy elektronů v plynném prostředí. U scintilačního detektoru se používá scintilační monokrystal s kruhovým otvorem o průměru stovek mikrometrů, který umožňuje průchod primárního svazku elektronů do komory vzorku a současně omezuje proudění plynu. Aby se zajistily co nejmenší ztráty elektronů primárního svazku, je nutné použít co nejmenší pracovní vzdálenost vzorku od clony.

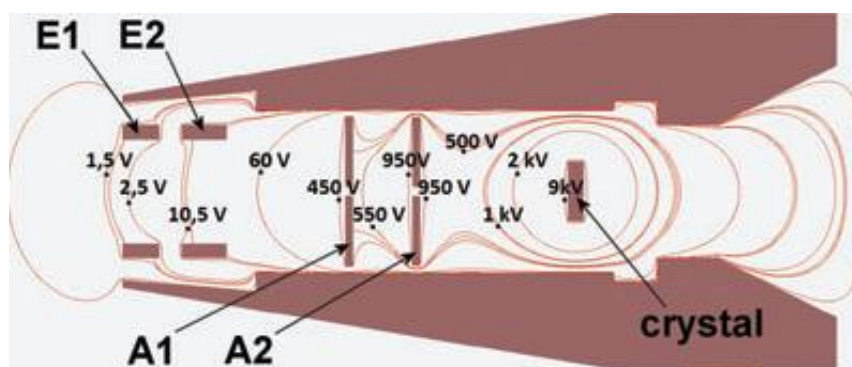


Obr. 11 Detektor zpětně odražených elektronů se scintilačním monokrystalem, převzato z [6]

3.4.2 Detekce sekundárních elektronů pomocí scintilačního detektor [9]

Způsob jak detekovat sekundární elektrony ve vysokém tlaku, je oddělit komoru se scintilátorem od komory vzorku tak, aby byl omezen průtok plynu, ale zase aby mohly elektrony projít. Komory se oddělí buď pomocí tenké hliníkové folie posílené polyesterovou mřížkou, nebo pomocí kombinace clony a mikroporézní desky, nebo pomocí dvou clon. Další odstavec se bude zabývat pouze scintilačním detektorem se dvěma clonami.

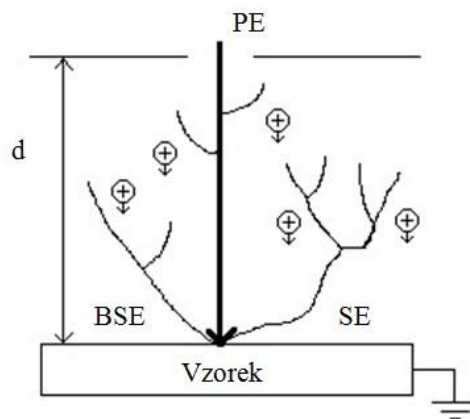
Detektor obsahuje tři části s různým tlakem. Komora vzorku, komora mezi clonami a komora se scintilátorem. Komora vzorku je oddělena komory se scintilátorem dvěma clonami A1 a A2 (viz Obr. 12). Tyto clony, nastavené na vhodný potenciál, vytvoří elektrostatické pole pro přenos signálu ze vzorku komory k scintilátoru detektoru. Komora mezi clonami je čerpána rotační vývěvou. Komora se scintilátorem je čerpán pomocí turbomolekulární vývěvy. Pomocí napětí, přivedené na elektrody E1 a E2, lze vytvořit elektrické pole, které optimalizuje sběr elektronů a nasměrování k optické ose. Obě elektrody stejně jako obě clony jsou izolovány od uzemněné kostry detektoru. Tlak v komoře vzorku by neměl přesáhnout hodnotu tlaku 5 Pa.



Obr. 12 Průřez scintilačního detektoru s ekvipotenciálními čarami

3.4.3 Detekce signálních elektronů pomocí ionizačního detektoru

Ionizační detektor, který se používá v environmentální rastrovací elektronové mikroskopii, využívá k zesílení signálu nárazovou ionizaci v plynech. Pro popis činnosti ionizačního detektoru lze použít funkci deskového kondenzátoru s plynným dielektrikem.



Obr. 13 Principiální schéma ionizačního detektoru, převzato z [4]

Horní elektroda je oproti vzorku na kladném potenciálu řádově stovek voltů. Při dopadu primárního svazku na vzorek dochází k emisi sekundárních a zpětně odražených elektronů. V procesu nárazové ionizace, charakterizované první Townsendovým ionizačním součinitelem, dochází k lavinovitému zesílení signálu. Vznikající kladné ionty se pohybují směrem ke vzorku a z jeho povrchu uvolňují elektrony s pravděpodobností danou druhým Townsendovým ionizačním součinitelem. Tyto elektrony se opět účastní nárazové ionizace a přispějí k celkovému proudu elektronů a iontů. Elektrony generované v plynném prostředí nárazovou ionizací jsou zachyceny horní elektrodou.

Celkové zesílení ionizačního detektoru se vyjádří jako

$$Zes = \frac{I_{GP} + I_{GS} + I_{GZ}}{I_P} = pk \left[S_p + \frac{\delta\alpha}{p} + \eta S_Z \frac{d'}{d} \right] \quad (10)$$

Kde k (m) se vyjádří jako

$$k = \frac{e^{\alpha d} - 1}{\alpha [1 - \beta (e^{\alpha d} - 1)]} \quad (11)$$

A jednotlivé proudy

$$I_{GP} = I_P S_p p k \quad (12)$$

$$I_{GS} = I_P \delta \alpha k \quad (13)$$

$$I_{GZ} = I_P \eta S_Z p k \frac{d'}{d} \quad (14)$$

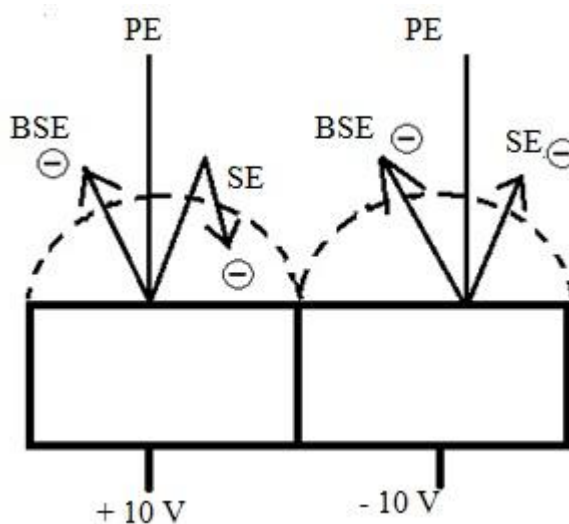
Konstrukčním uspořádáním elektrod ionizačního detektoru lze potlačit podíl zpětně odražených elektronů na celkovém detekovaném signálu.

4 Napěťový kontrast [7], [8]

Metoda napěťového kontrastu spočívá v možnosti zobrazení elektrických potenciálů na povrchu vzorku. Experimentálně bylo prokázáno, že kladné potenciály na vzorku se projeví nižší úrovní signálu a proto bude obraz tmavý, než místa se záporným potenciálem, kdy obraz bude světlý. Neexistuje žádný vztah mezi napěťovým potenciálem a jasnem místa, protože kontrast je ovlivněn vedlejšími potenciály a celkovou deformací elektrostatického pole nad povrchem vzorku.

Zdrojem pro vznik napěťového kontrastu jsou sekundární elektrony. Jednou z důležitých podmínek vzniku napěťového kontrastu je elektrické pole. Složka elektrického pole kolmá na povrch polovodičového vzorku zmenšuje nebo zvětšuje energii sekundárních elektronů a složka elektrického pole rovnoběžná s povrchem polovodičového vzorku mění směr pohybu sekundárních elektronů.

V místě s kladným potenciálem se sekundární elektrony sice uvolní, ale jsou hned zpátky přitáhnuty. V místě se záporným potenciálem jsou naopak sekundární elektrony urychleny. Zpětně odražené elektrony mají vysokou energii, takže ovlivnění polem je nepatrné.

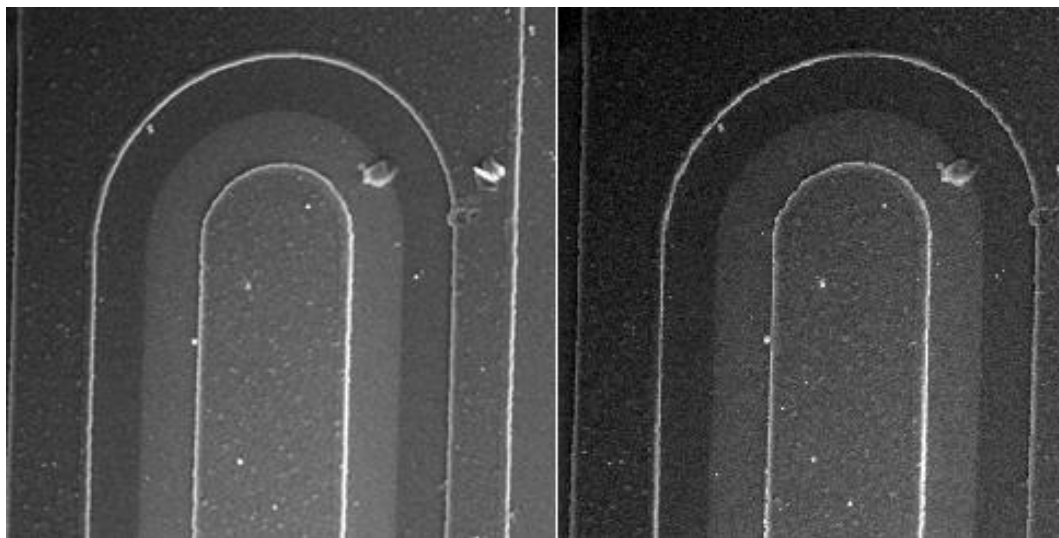


Obr. 14 Interakce primárních elektronů se vzorkem s potenciálem na povrchu

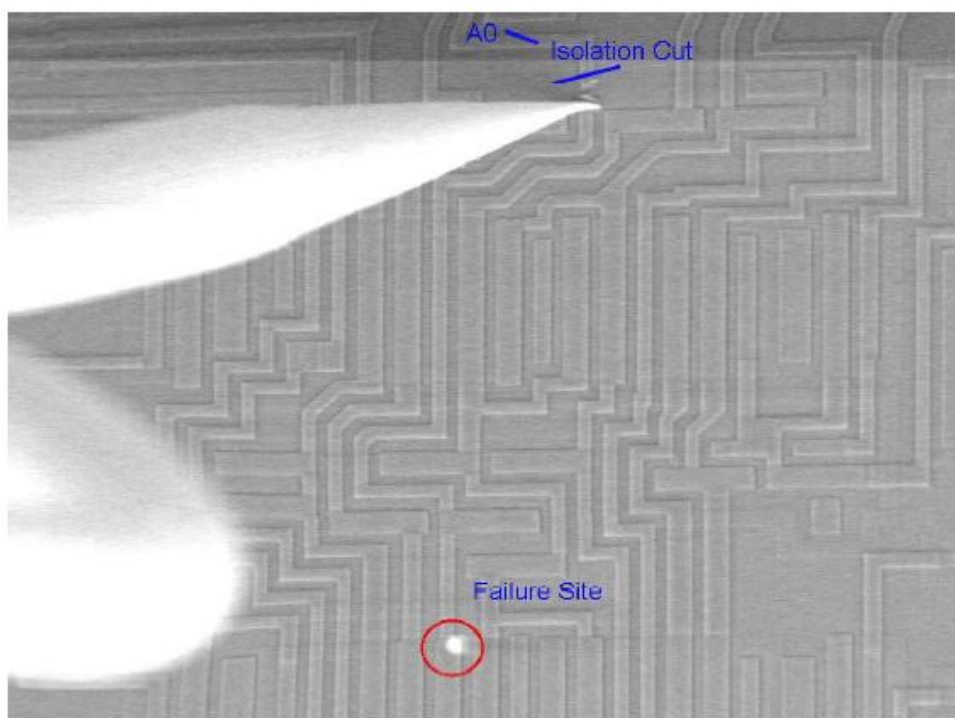
Mezi hlavní rušící vlivy napěťového kontrastu je topografický kontrast. Další rušící vliv je detekce zpětně odražených elektronů, zejména při přítomnosti těžkých kovů jako zlato a platina při kontaktování součástky. Tento problém se ale dá odstranit umístěním detektoru elektronů pod rovinu vzorku.

Další problémy jsou přítomnost izolantů ve vzorku a zapouzdření vzorků, neboť způsobují nabíjecí jevy. Ve vakuové elektronové mikroskopii se doporučuje pracovat se sníženým urychlovacím napětím primárního svazku. U environmentální rastrovací elektronové mikroskopie nabíjecí jevy nevznikají.

Metoda napěťového kontrastu se využívá pro studium a diagnostiku polovodičových materiálů a součástek.



Obr. 15 Sledování přechodu PN pomocí napěťového kontrastu



Obr. 16 Zjištění chyby ve vodičích pomocí napěťového kontrastu, převzato z [1]

5 Stanovení pracovních podmínek pro pozorování napětového kontrastu ve VP SEM

5.1 Zadání

Cílem praktické části diplomové práce bylo sledování změn napětového kontrastu na polovodičovém bipolárním tranzistoru pomocí scintilačního detektoru za různých pracovních podmínek v environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu.

5.2 Měřicí zařízení

Měření bylo prováděno na environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu AQUASEM, který je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, viz Obr. 17. Mikroskop má rozlišení do 10 nm a dovoluje zvětšení až 250 000x. Zdrojem elektronů je přímo žhavená wolframová katoda. Urychlovací napětí je nastavitelné v rozmezí od 1 do 30 kV. Jednotlivé prostory mikroskopu jsou čerpány pomocí rotačních, difuzních a jedné turbomolekulární vývěvy. Maximální tlak, který může být v komoře vzorku při rastrování, je 1500 Pa. Mikroskop je propojen s počítačem a je vybaven dvěma detektory elektronů a to scintilačním detektorem a ionizačním. Měření bylo prováděno pouze pomocí scintilačního detektoru, který je popsán v kapitole 3.4.2.



Obr. 17 Pracoviště environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu AQUASEM

5.3 Vzorek

Jako vzorek byl použit výkonový bipolární tranzistor NPN. Napěťový kontrast byl sledován na přechodu báze-emitor v závěrném směru. Přivedené napětí na tranzistoru bylo 6 V.



Obr. 18 Vzorek pro měření napěťového kontrastu

5.4 Pracovní podmínky

Neměnná nastavení mikroskopu

- Plynné médium: Vodní pára
- Urychlovací napětí elektronové trysky: 20 kV
- Přivedené napětí na mřížku scintilátoru: 9 kV
- Zvětšení mikroskopu: 600x
- Rastrovací rychlost: Slow 2
- Napětí na cloně C2 detektoru: 1000 V

Měnicí se nastavení pracoviště

- Napětí na elektrodě C1 detektoru: 500 a 550 V
- Napětí na elektrodě E1 detektoru: 300 – 425 V
- Pracovní vzdálenost: 4 a 5,5 mm

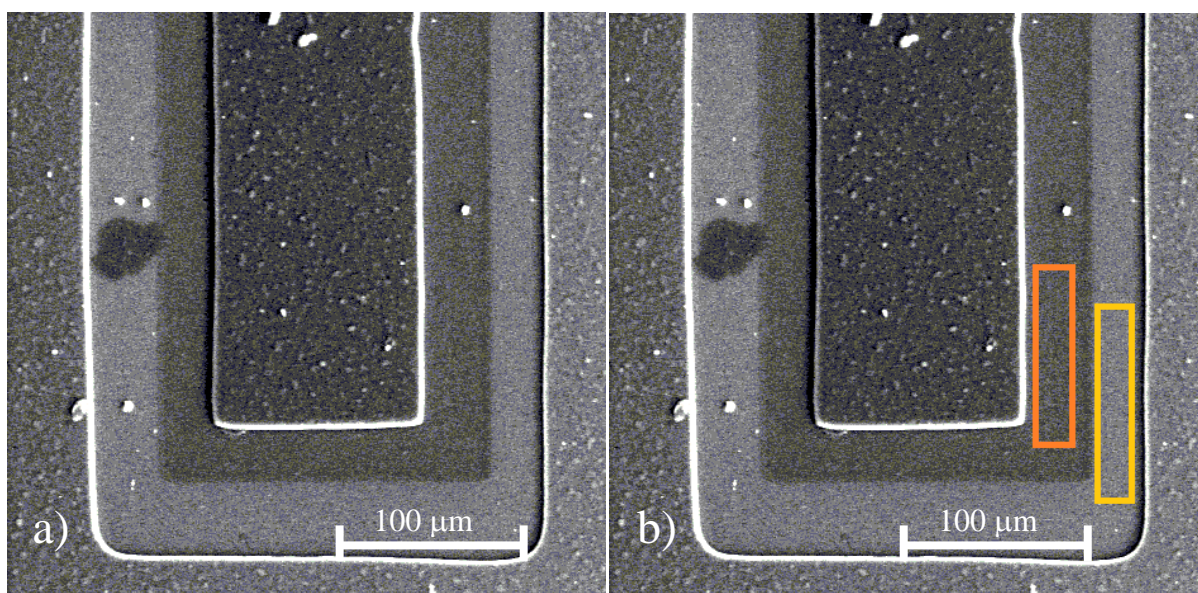
- Proud primárního svazku: 100, 80 a 50 pA – v průběhu měření bylo nutno snížit hodnotu proudu primárního svazku, aby se dal z důvodu velkého nárůstu signálu pozorovat vzorek
- Napětí na dynodách fotonásobiče: pro pracovní vzdálenost 4 mm 650 V, pro pracovní vzdálenost 5,5 mm 500 V

5.5 Zpracování naměřených hodnot

Pomocí environmentální rastrovacího elektronového mikroskopu byl získán obraz přechodu emitor-báze bipolárního tranzistoru s připojeným napětím v závěrném směru. (Obr. 19 a). Soubor obrazu byl otevřen programem Corel PHOTO-PAINT 9. Střední hodnota úrovně šedi byla stanovena pro dvě místa – emitor s kladným potenciálem, který se v obraze napěťového kontrastu jeví jako tmavý, a bázi, která se v obraze napěťového kontrastu jeví jako světlá. Střední hodnota úrovně šedi nabývala hodnot od 0 do 255. Střední hodnota úrovně šedi tmavé oblasti byla označena jako Φ_T a střední hodnota úrovně šedi světlé oblasti jako Φ_S . Napěťový kontrast byl potom vyhodnocen jako:

$$Kontrast = \frac{\Phi_S - \Phi_T}{255}$$

Kontrast tedy mohl nabývat hodnot od 0 do 1.

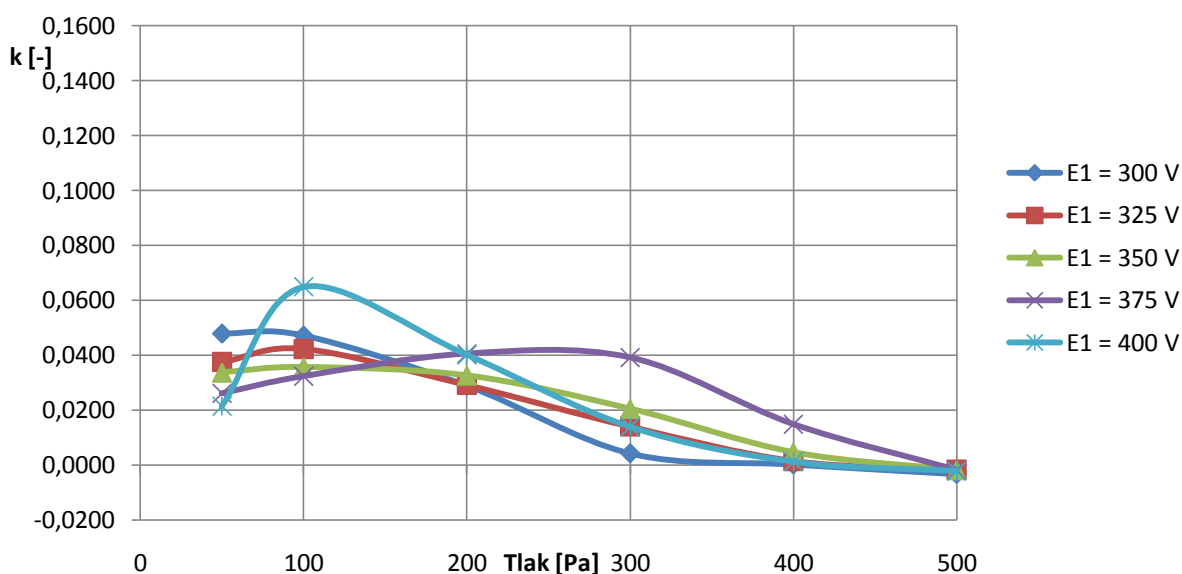


Obr. 19 a) Přejchod E-B výkonového tranzistoru s přiloženým napětím 6V v závěrném směru
 b) Vymezení oblastí pro stanovení střední hodnoty úrovně šedi v oblasti emitoru a báze

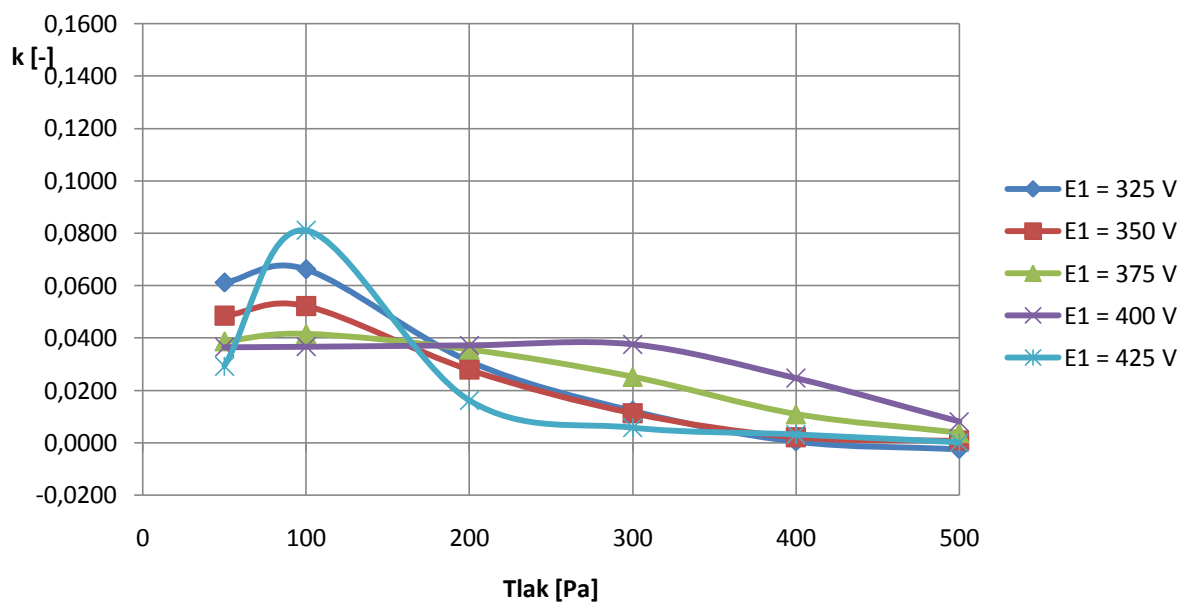
6 Experimentální výsledky

Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par a měnících se pracovních podmínek byla v rozmezí od 50 do 500 Pa. Pro pracovní vzdálenost vzorku 4 mm jsou závislosti zobrazeny na Obr. 20 až Obr. 22, pro pracovní vzdálenosti vzorku 5,5 mm jsou závislosti zobrazeny na Obr. 23 až Obr. 27. Vypočítané hodnoty napěťového kontrastu jsou uvedeny v příloze č.1, jednotlivé snímky přechodu emitor-báze v příloze č.2.

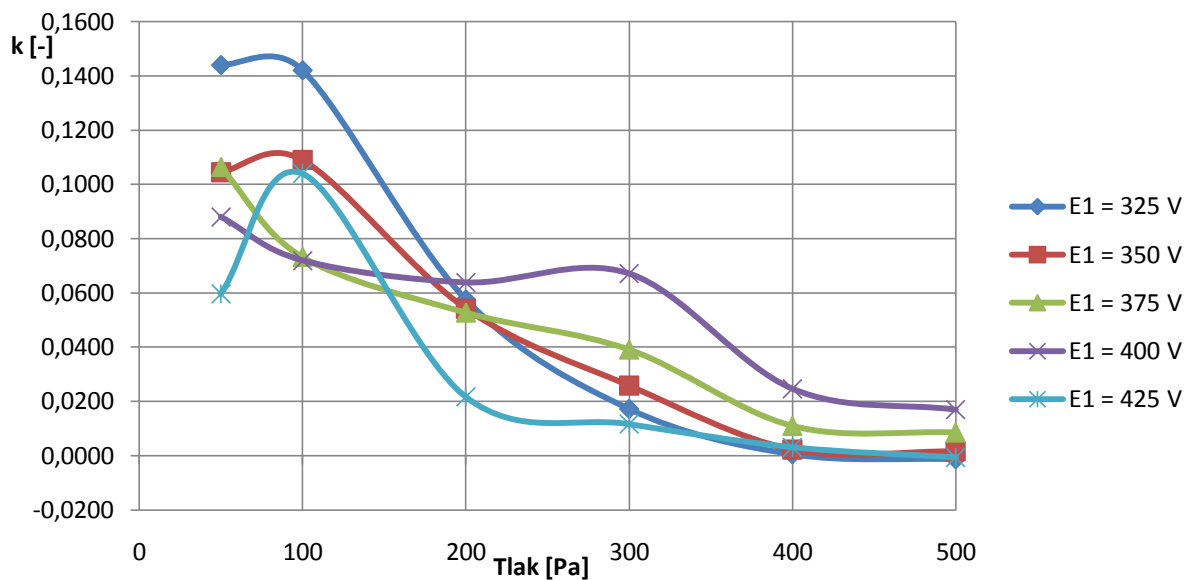
6.1 Závislosti naměřeného kontrastu na tlaku v komoře vzorku



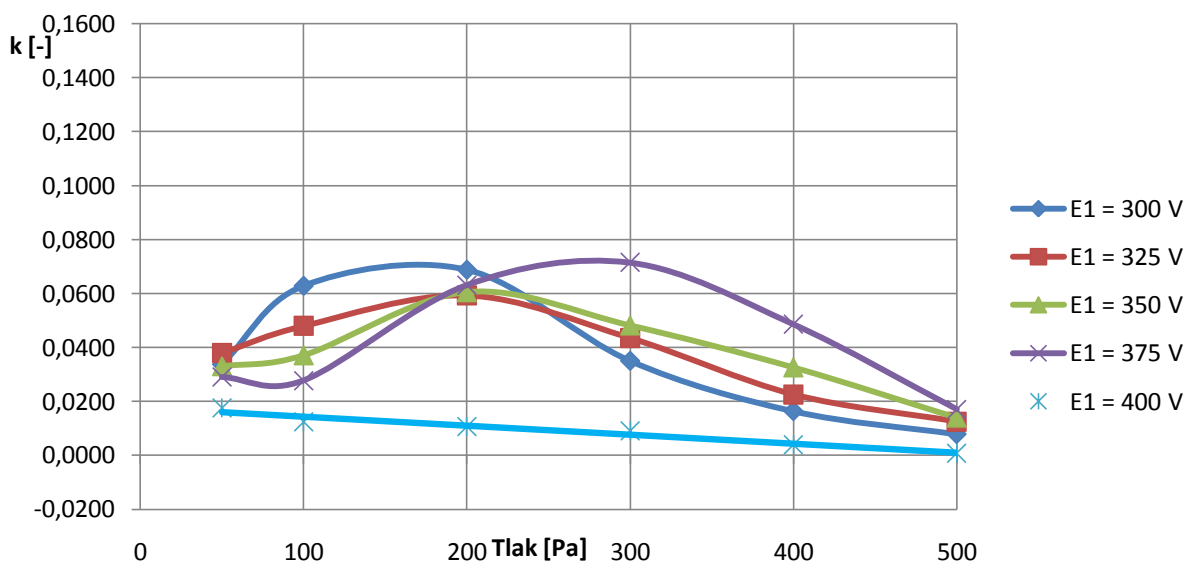
Obr. 20 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Napětí na E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 4mm, $I_p = 100 \text{ pA}$.



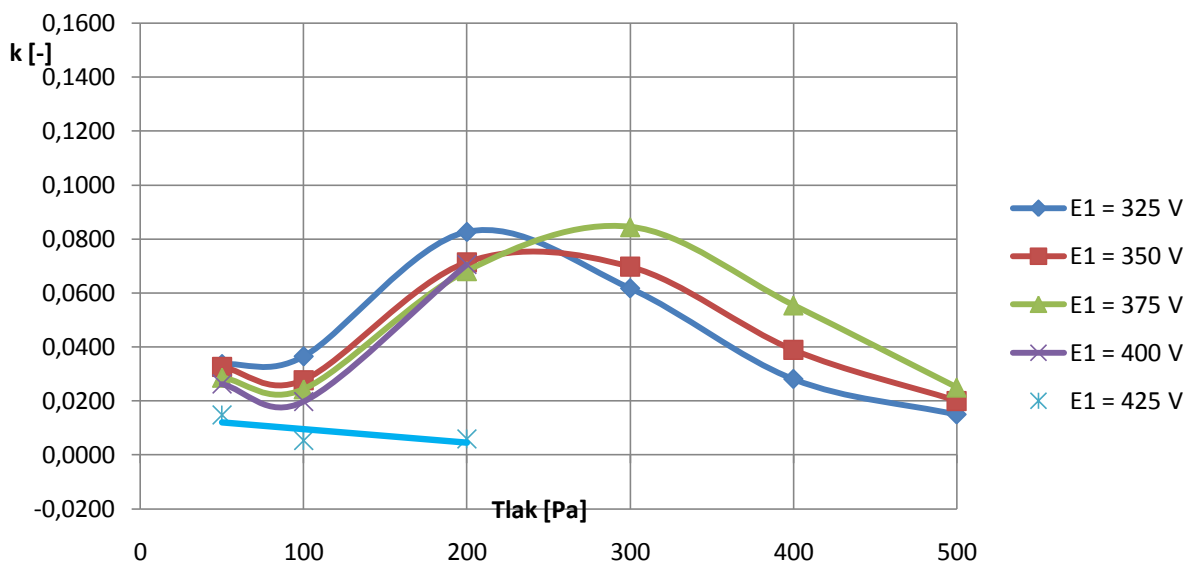
Obr. 21 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 4mm, p.s. = 100 pA.



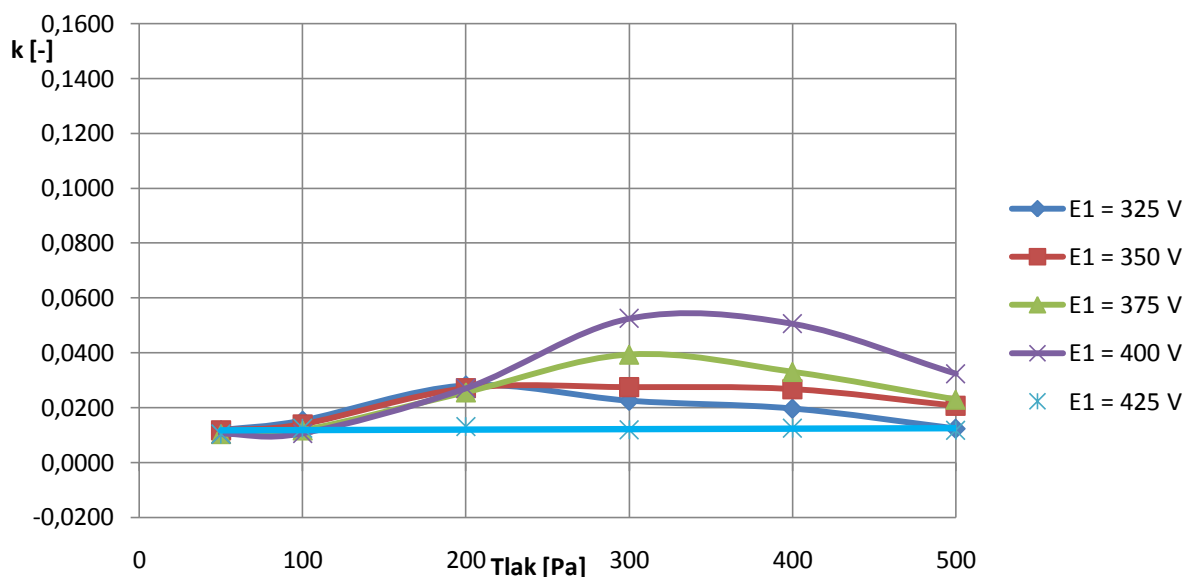
Obr. 22 Závislost napěťového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 550 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 4mm, I_p = 100 pA.



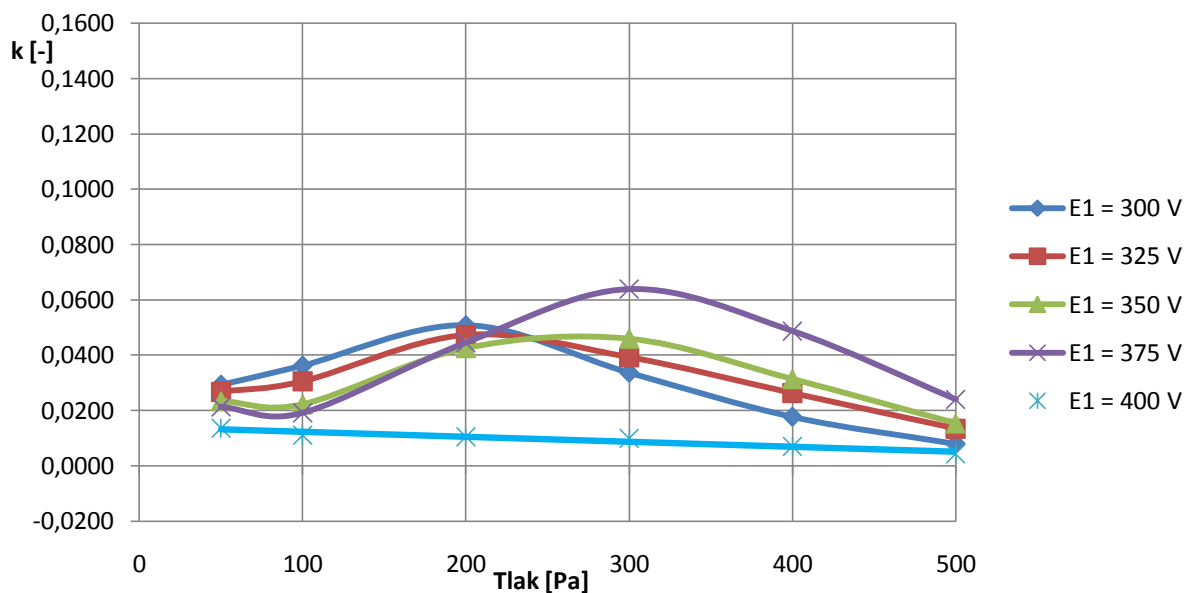
Obr. 23 Závislost napět'ového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Pracovní podmínky E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5 mm, I_p = 100 pA.



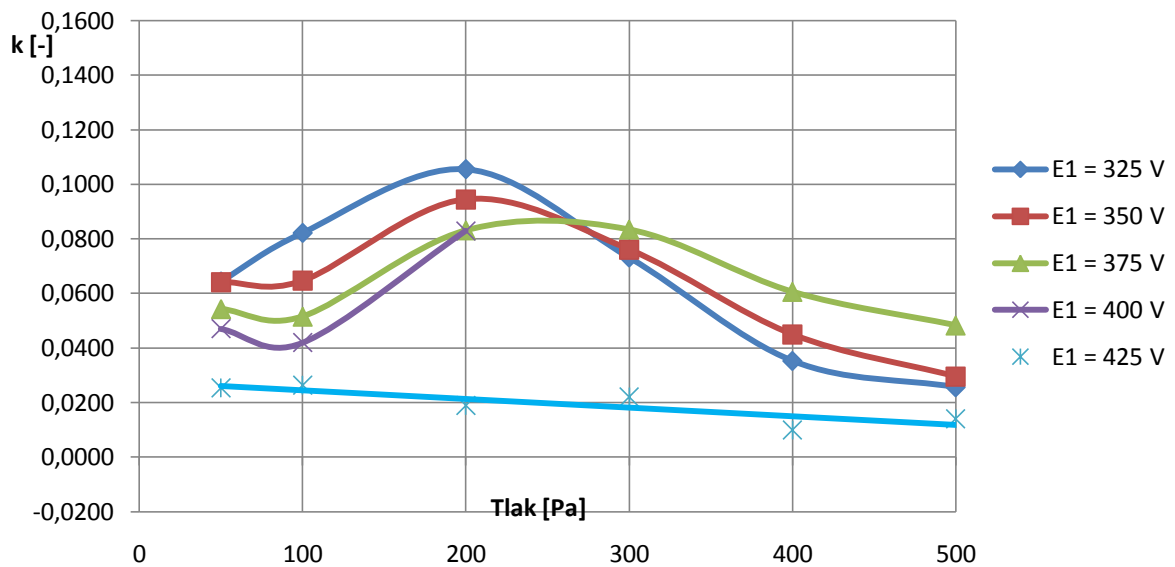
Obr. 24 Závislost napět'ového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, I_p = 100 pA.



Obr. 25 Závislost napět'ového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, I_p = 80 pA.



Obr. 26 Závislost napět'ového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 300 až 400 V. Pracovní podmínky E2 = 400 V, C1 = 500 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, I_p = 80 pA.



Obr. 27 Závislost napět'ového kontrastu na tlaku vodních par v komoře vzorku s parametrem napětí na elektrodě E1 v rozmezí 325 až 425 V. Pracovní podmínky E2 = 425 V, C1 = 550 V, C2 = 1000 V, pracovní vzdálenost = 5,5mm, I_p = 80 pA.

6.2 Vyhodnocení naměřených závislostí

6.2.1 Vliv změny napětí na elektrodě E1

Pro pracovní vzdálenost 4 mm a napětí na cloně C1 detektoru 500 V (Obr. 20 a Obr. 21) bylo největšího napět'ového kontrastu dosaženo při tlaku 100 Pa v případě, že se napětí na extrakční elektrodě E1 = E2. Z uvedených závislostí lze vyhodnotit, že malý rozdíl napětí mezi extrakční elektrodou E1 a E2 je vhodný z hlediska pozorování napět'ového kontrastu pro oblast tlaků nad 200 Pa. Velký rozdíl napětí na extrakčních elektrodách je vhodný pro oblast tlaků pod 200 Pa.

Pro pracovní vzdálenost 5,5 mm se stejné napětí na extrakčních elektrodách E1 a E2 zdálo jako nevhodné, neboť napět'ový kontrast byl vždy nejmenší (Obr. 23 až Obr. 27). Stejně jako pro pracovní vzdálenost 4 mm platí, že malý rozdíl napětí na extrakčních elektrodách E1 a E2 je vhodný pro pozorování napět'ového kontrastu při tlaku nad 200 Pa. Malý rozdíl napětí na elektrodách E1 a E2 je vhodný pro pozorování napět'ového kontrastu při tlaku pod 200 Pa.

6.2.2 Vliv změny napětí na elektrodě E2

Změna napětí na extrakční elektrodě E2 ze 400 V (Obr. 20) na 425 V (Obr. 21), s pracovní vzdáleností 4 mm a napětím na cloně C1 500 V, přinesla zvýšení kontrastu u všech tlaků. Rovněž lze pozorovat zvýšení kontrastu při všech nastaveních extrakční elektrody E1 kromě případu, kdy se napětí na extrakční elektrodě $E1 = E2$. V tomto případě nastává pokles kontrastu.

Při změně napětí na extrakční elektrodě E2 ze 400 V (Obr. 23) na 425 V (Obr. 24) s pracovní vzdáleností 5,5 mm a napětím na cloně C1 500 V dochází k přesunu maximálních hodnot směrem k vyšším tlakům vlivem snížení kontrastu při tlaku 50 a 100 Pa a k zvýšení hodnot kontrastu při tlaku 200, 300, 400 a 500 Pa. Za pracovních podmínek, kterými byl pořízen Obr. 24, nastal při tlaku 200 Pa rapidní nárůst signálu, kvůli kterému nešlo doměřit dané závislosti.

6.2.3 Vliv změny napětí na cloně C1

Kvůli zvýšení napětí na cloně C1 z 500 V (Obr. 21) na 550 V (Obr. 22), s napětím na extrakční elektrodě E2 detektoru 425 V a s pracovní vzdáleností 4 mm, nastává rapidní nárůst signálu především v oblasti tlaku 50 a 100 Pa. Menší nárůst nastává při tlaku 200, 300, 400 a 500 Pa.

Zvýšení napětí na cloně C1 z 500 V (Obr. 25) na 550 V (Obr. 27) s napětím na extrakční elektrodě E2 detektoru 425 V a s pracovní vzdáleností 4 mm, mělo za následek nárůst signálu při všech hodnotách tlaku. Proud svazku musel být z důvodů velkého nárůstu signálu a nemožnosti pozorovat zkoumaný vzorek snížen na hodnotu 80 pA.

6.2.4 Vliv změny pracovní vzdálenosti

Se změnou pracovní vzdálenosti ze 4 mm (Obr. 20) na 5,5 mm (Obr. 23), s napětím na extrakční elektrodě E2 detektoru 400 V a s napětím na cloně C1 550 V, se kontrast zvýší při všech tlacích kromě případu kdy se napětí na elektrodě E1 rovná napětí na elektrodě E2.

Se změnou pracovní vzdálenosti ze 4 mm (Obr. 21) na 5,5 mm (Obr. 24), s napětím na extrakční elektrodě E2 detektoru 425 V a s napětím na cloně C1 550 V, dochází k poklesu kontrastu při tlaku 50 a 100 Pa, ale k nárůstu při tlaku 200, 300, 400 a 500 Pa.

6.3 Optimální podmínky pozorování napěťového kontrastu

Při tlaku 50 a 100 Pa je největší napěťový kontrast s napětím na elektrodě E1 325 V, E2 425 V, napětím na cloně C1 550 V a s pracovní vzdáleností 4 mm. Pro tlak 200 Pa byly

nejlepší podmínky pro pozorování napěťového kontrastu s napětím na elektrodě E1 325 V, E2 425 V a pracovní vzdáleností 5,5 mm. Pro tlak 300 Pa by byly nejvhodněji pozorované podmínky s napětím na elektrodě E1 400 V, E2 425 V, s napětím na cloně 550 V a s pracovní vzdáleností 5,5 mm, kdyby se snížilo napětí na dynodách. Pro tlak 400 a 500 Pa jsou nejlepší pracovní podmínky, když je napětí na extrakční elektrodě E1 blízké hodnotě E2.

Obecně lze říci, že velký rozdíl napětí na extrakčních elektrodách E1 a E2 je vhodný pro pozorování kontrastu při tlaku pod 200 Pa, malý rozdíl napětí na extrakčních elektrodách E1 a E2 je vhodný pro pozorování kontrastu nad 200 Pa. Větší napětí na extrakční elektrodě E2 má za následek posun maximálních hodnot k vyšším hodnotám tlaku. S větší pracovní vzdáleností se zvýší kontrast, a jak bylo zjištěno, zvětší se i signál. Větší napětí na cloně C1 rapidně zvýší napěťový kontrast.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s problematikou rastrovacího elektronového mikroskopu pracujícího při vyšším tlaku v komoře vzorku, s detekcí signálu pomocí scintilačního detektoru a s metodou napěťového kontrastu.

Metoda napěťového kontrastu je užitečná metoda pro studium polovodičových materiálů a součástek. Vznik samotného napěťového kontrastu je umožněn pomocí potenciálních rozdílů na povrchu vzorku.

Bylo provedeno měření s různými pracovními podmínkami jako rozdílné napětí na extrakční elektrodě E1 a E2, změna napětí na cloně C1, změna pracovní vzdálenosti. Sledování rozložení potenciálů na povrchu vzorku bylo provedeno na PN přechodu výkonového tranzistoru. Po provedení měření byly vyhodnoceny optimální podmínky, při kterých lze pozorovat napěťový kontrast při tlaku 50 - 500 Pa. Při tlaku vodních par v komoře vzorku nad 500 Pa byl napěťový kontrast scintilačním detektorem sekundárních elektronů neměřitelný.

Při tlaku 50 a 100 Pa se ukázal největší napěťový kontrast s napětím na elektrodě E1 325 V, E2 425 V, napětím na cloně C1 550 V a s pracovní vzdáleností 4 mm. Při tlaku nad 200 Pa byl největší kontrast při tlaku 300 Pa s napětím na elektrodě E1 400 V, E2 425 V, s napětím na cloně 550 V a s pracovní vzdáleností 5,5 mm. Nad 300 Pa se vzrůstajícím tlakem napěťový kontrast klesal vlivem srážek elektronů primárního svazku s částicemi plynu.

Změna napětí na extrakční elektrodě E2 k vyšším hodnotám zvyšuje a posouvá maximum kontrastu směrem k vyššímu tlaku. Změna napětí na cloně C1 k vyšším hodnotám měla za následek nárůst kontrastu. Se změnou pracovní vzdálenosti k vyšší hodnotě se posunulo maximum směrem k vyššímu tlaku a zvětšil se i kontrast.

Práce přispěla k pochopení problematiky činnosti mikroskopu pracujícího při vyšším tlaku v komoře vzorku, pochopení problematiky spojené se sledováním potenciálů na povrchu vzorku a k pochopení principu činnosti scintilačního detektoru se dvěma clonami určeného pro pozorování vzorků ve vyšším tlaku.

8 Použitá literatura

- [1] *Analytical Solutions Inc.* [cit. 2010-10-10]. Voltage Contrast and EBIC Failure Isolation Techniques. Dostupné z WWW: <http://www.asinm.com/files/TechnicalArticles/VC_EBIC_MStrizich.pdf>
- [2] BOROVEC, Z. *Elektronová mikroskopie a elektronová difrakce*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1985. 104 s.
- [3] ČERNOCH, P. *Detekce signálů segmentovým ionizačním detektorem v environmentální sem*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2008. 30 s. ISBN 978-80-214-3744-9.
- [4] FIEDLER, R. *Metody analýzy a kontroly materiálů*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1986. 138 s.
- [5] FRANK, L., JIRÁK, J., REK, A., ROZSÍVALOVÁ, Z., *Speciální diagnostika*, Brno : Vysoké učení technické v Brně. 79 stran.
- [6] FRANK, L.; KRÁL, J. *Metody analýzy povrchu, iontové sondové a speciální metody*. Praha : Academica, 2002. 483 s. ISBN 80-200-0594-3.
- [7] HULÍNSKÝ, V; JUREK, K. *Zkoumání látek elektronovým paprskem*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1982. 79 s.
- [8] REIMER, L. *Elektron Microscopy, Physic of Image and Microanalysis*. Heidelberg : Springer, 1998. 405 s. ISBN 3-540-63976-4.
- [9] *Scintillation SE detector for variable pressure scanning electron microscopes*. Journal of Microscopy. 2008-10-29, 239, s. 233-238.
- [10] STOKE, D.J., *Principles and Practise of Variable Pressure/ Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-SEM)*. Nakladatelství John Wiley and Sons Ltd, 2008. 221 s. ISBN 978-0-470-06540-2

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

$A [-]$	Atomová hmotnost
$B [T]$	Magnetická indukce
$d [m]$	Vzdálenost elektrod deskového kondenzátoru
$d' [m]$	Střední dráha zpětně odražených elektronů v deskovém kondenzátoru
$d_p [m]$	Tloušťka vrstvy plynu, kterou elektron prochází
$E [Vm^{-1}]$	Intenzita svazku
$E_i [eV]$	Vazební energie
$E_p [eV]$	Energie primárního elektronového svazku
$e [C]$	Náboj elektronu $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$
$e [eV]$	Energie elektronu
$F [N]$	Síla působící na elektron
$h [m]$	Tloušťka
$I [A]$	proud svazku
$I_{BSE} [A]$	Proud zpětně odražených elektronů
$I_{GP} [A]$	Proud elektronů generovaných primárním svazkem
$I_{GP+} [A]$	Proud kladně nabitých iontů generovaných primárním svazkem
$I_{GS} [A]$	Proud elektronů generovaných sekundárními elektrony
$I_{GS+} [A]$	Proud kladně nabitých iontů generovaných sekundárními elektrony
$I_{GZ} [A]$	Proud elektronů generovaných zpětně odraženými elektrony
$I_{GZ+} [A]$	Proud kladně nabitých iontů generovaných zpětně odraženými elektrony
$I_{SE} [A]$	Proud sekundárních elektronů
$I_p [A]$	Proud primárního svazku
$m_e [kg]$	Klidová hmotnost elektronu $9,109 \cdot 10^{-31}$
$N_0 [mol^{-1}]$	Avogadrova konstanta $6,022 \cdot 10^{23}$
$p [Pa]$	tlak
$p_n [-]$	Pravděpodobnost úniku elektronů
$p_s [-]$	Průměrný počet srážek
$r [m]$	Poloměr
$S_p [m^{-1}Pa^{-1}]$	Ionizační účinnost primárních elektronů
$S_z [m^{-1}Pa^{-1}]$	Ionizační účinnost zpětně odražených elektronů
$t [s]$	Čas
$V_1, V_2 [V]$	Potenciály v bodech x_1 a x_2

$v [ms^{-1}]$	Rychlost
Z	Protonové číslo
z	Hloubka
$Zes [-]$	Zesílení
$\alpha [m^{-1}]$	První Townsendův ionizační součinitel
$\alpha_z [-]$	Lineární zeslabovací koeficient
$\beta [m^{-1}]$	Drownsendův ionizační součinitel
$\delta [-]$	Koeficient emise sekundárních elektronů
$\eta [-]$	Koeficient emise zpětně odražených elektronů
$\lambda_e [m]$	Střední volná dráha elektronů
$\theta [rad]$	Úhel vychýlení elektronu
$\rho [g.cm^{-3}]$	Hustota
$\sigma_E [m^2]$	Elastický účinný průřez
$\sigma_T [m^2]$	Záchytný průřez plynu
$\phi [^\circ]$	Úhel rozptylu

10 Seznam příloh

Příloha č. 1 – Tabulky napěťového kontrastu pro jednotlivé pracovní podmínky.....I

Příloha č. 2 – Pořízené snímky pro různé pracovní podmínky.....VIII