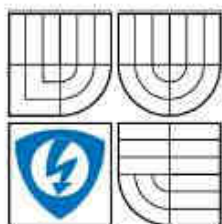


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

HODNOCENÍ STRUKTUR SPOJŮ PÁJEK S DESKAMI PLOŠNÝCH SPOJŮ

EVALUATION OF STRUCTURES OF SOLDER JOINT WITH PRINTED BOARD CIRCUIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

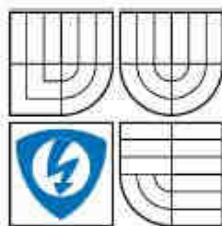
Bc. JIŘÍ JAKUBEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ČERNOCH

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Jakubec Jiří Bc.

ID: 89817

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení struktur spojů pájek s deskami plošných spojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou detekce signálu a s možností prvkové analýzy v rastrovací elektronové mikroskopii a v environmentální rastrovací elektronové mikroskopii. Sledujte strukturu spojů mezi několika typy pájek a deskami plošných spojů, které byly upraveny různými typy povrchových vrstev, s využitím environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Získané výsledky vyhodnotte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

AUTRATA, R., JIRÁK J. Metody analýzy povrchů - Iontové, sondové a speciální metody, část Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie. Praha: Academia, 2002. s. 458-484.

HULÍNSKÝ, V., JUREK K. Zkoumání látek elektronovým paprskem. Praha: SNTL, 1982. 280 stran.

REIMER, L. Scanning electron microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis (Second Edition). Berlin: Springer Verlag, 1998. 527 pages. ISBN 3-540-63976-4.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Pavel Černocho

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Jakubec
Bytem: Fleischnerova 9, Brno, 635 00
Narozen/a (datum a místo): 22.7.1983, Boskovice

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Ing. Zdenka Rozsivalová
(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Hodnocení struktur spojů pájek s deskami plošných spojů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Pavel Černoch

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Diplomová práce se v teoretické části zabývá základními principy rastrovacího elektronového mikroskopu a environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Součástí práce je popis signálů vzniklých po dopadu elektronů na vzorek a jejich možností detekce v uvedených mikroskopech. Praktická část práce je věnována zkoumání kvality spojů pájených odlišnými metodami na deskách plošných spojů po různém namáhání při použití vizuální kontroly, světelného mikroskopu a environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Získané údaje jsou vyhodnoceny a shrnuty.

Abstract

The theoretical part of the diploma thesis deals with the basic principles of the scanning electron microscope and the environmental scanning electron microscope. A description of the signals generated by an electrons incidence onto a specimen and detection options of these signals in the mentioned microscopes is included in the work. The experimental part of the work concerns an examination of a quality of several joints soldered by different methods on the printed circuit boards after different stresses by use of a visual check and the instruments of the light microscope and the environmental scanning electron microscope. The acquired data are evaluated and summarized.

Klíčová slova

Rastrovací elektronová mikroskopie, environmentální rastrovací elektronová mikroskopie, signální elektrony, RTG spektroskopie

Keywords

Scanning electron microscopy, environmental scanning electron microscopy, signal electrons, X-ray spectrometry

Bibliografická citace díla:

JAKUBEC, J. *Hodnocení struktur spojů pájek s deskami plošných spojů*. Brno, 2008. 54 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Černoch. FEKT VUT v Brně.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 Brně dne 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Černochovi za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. (Akademie věd České republiky, Královopolská 147, 612 64 Brno, Česká republika) za umožnění realizace experimentálních prací. Dále děkuji Ing. Petru Stejskalovi za pomoc a odborné rady při přípravě pozorovaných vzorků a vyhodnocování výsledků experimentu.

Obsah

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY	8
2. RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	10
2.1 Zdroj elektronů.....	10
2.2 Fokusace paprsku.....	12
2.3 Komora vzorku	12
2.3.1 Nabíjení pozorovaných vzorků.....	13
2.3.2 Dopad svazku na vzorek	14
2.3.3 Typy signálů	16
2.3.4 Kontrasty.....	20
2.3.5 Detekce signálů.....	21
3. ENVIRONMENTÁLNÍ RASTROVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	27
4. PRAKTICKÁ ČÁST	29
4.1 Příprava vzorků	29
4.1.1 Výroba výbrusů	30
4.2 Pozorování světelným mikroskopem.....	31
4.3 Pozorování environmentálním SEM.....	31
4.3.1 Parametry a nastavení mikroskopu pro pozorování.....	31
4.3.2 Použité detektory	32
4.4 Sledování kvality spojů	33
4.4.1 Popis pozorovaných spojů	33
4.4.2 Spoje po namáhání cyklováním při pájení přetavením.....	33
4.4.3 Spoje po namáhání stárnutím při pájení přetavením.....	39
4.4.4 Spoje po namáhání stárnutím při pájení vlnou	42
4.4.5 Spoje po namáhání stárnutím při pájení přetavením vs. vlnou.....	44
4.5 Shrnutí	46
5. ZÁVĚR	47
6. POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	49
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	51
8. SEZNAM PŘÍLOH.....	53

1. Úvod do problematiky

Již odedávna měli lidé zájem pozorovat a analyzovat objekty, jejichž rozměry lidské oko nedokáže rozlišit. Zřejmě první úspěšné zvětšení objektů se datuje do 17. století, kdy holandský vědec A. van Leeuwenhoek sestrojil jednoduchý světelný mikroskop (LM), kterým dosáhl zvětšení 400. Dnešní světelné mikroskopy dosahují zvětšení přibližně 2000, konfokální laserové mikroskopy v řádu až tisíců (zvětšení 15 000 [14]). Dalšími nástroji zkoumání objektů malých rozměrů jsou rastrovací mikroskopy (SPM), mezi něž se řadí metody rastrovací tunelová (STM), mikroskopie atomových sil aj., a elektronové mikroskopie. Porovnání některých zobrazovacích soustav ukazuje Obr. 1.

Elektronové mikroskopy lze rozlišit na dva typy, transmisní elektronové (TEM) a rastrovací elektronové mikroskopy (SEM, REM). Hlavním rozdílem je způsob detekce. TEM prozáří vzorek najednou, SEM rastruje bod po bodu po povrchu vzorku. Existuje také jejich kombinace STEM.

Myšlenka zkonstruovat transmisní elektronový mikroskop se zrodila okolo roku 1928, a to v Berlíně v kolektivu vedeném M. Knollem a E. Ruskou. Tento tým pokračoval ve výzkumu a v roce 1935 uveřejnil v článku první fotografie získané z elektronového mikroskopu a popis konstrukce elektromagnetické čočky.

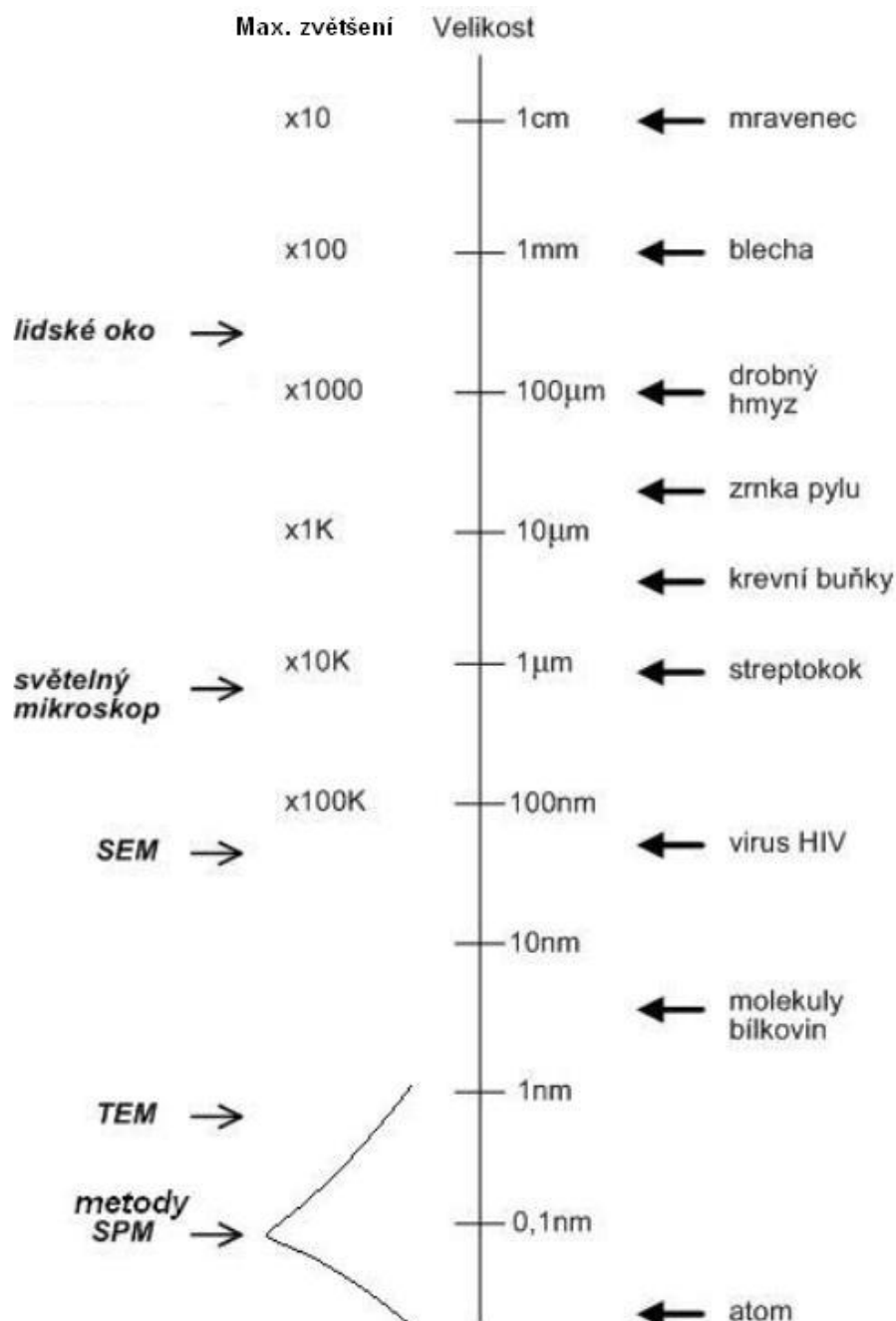
Komerční výroba na sebe nenechala dlouho čekat a v roce 1939 firma Siemens a Halske zahájila prodej prvních transmisních elektronových mikroskopů. U svých přístrojů garantovala rozlišovací schopnost 10 nm. Se zpožděním řady let, v roce 1986, dostal E. Ruska za konstrukci elektronového mikroskopu Nobelovu cenu.

Historie rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) byla o něco složitější a pomalejší. V roce 1935 M. Knoll zveřejnil první teoretický popis rastrovacího elektronového mikroskopu. Důležitým vynálezem pro vývoj rastrovacího elektronového mikroskopu byl fotonásobič, použitý k detekci sekundárních elektronů (V. K. Zworykin). První popis zkonstruovaného SEM s rozlišovací schopností 50 nm a zvětšením 8000 uveřejnila trojice vědců J. Hillier, V. K. Zworykin a E. J. Snijder. Konstrukcí SEM se ve stejné době zabývala skupina anglických vědců vedená C. W. Oatleyem. V roce 1965 vedly jejich výsledky a poznatky k výrobě komerční verze SEM firmou Cambridge Scientific Instruments pod označením STEREOSCAN [2].

V bývalém Československu vznikla v šedesátých letech 20. století na Ústavu přístrojové techniky v Brně silná skupina vedená V. Drahošem a A. Delonem. Výsledkem činnosti této skupiny byla úspěšná řada elektronových mikroskopů Tesla BS. V roce 1976 byl uveden na trh rastrovací elektronový mikroskop TESLA BS 300. Mezi současné výrobce

elektronových mikroskopů patří např. firmy Delong Instruments, FEI COMPANY, Hitachi, JEOL, Tescan a Carl Zeiss.

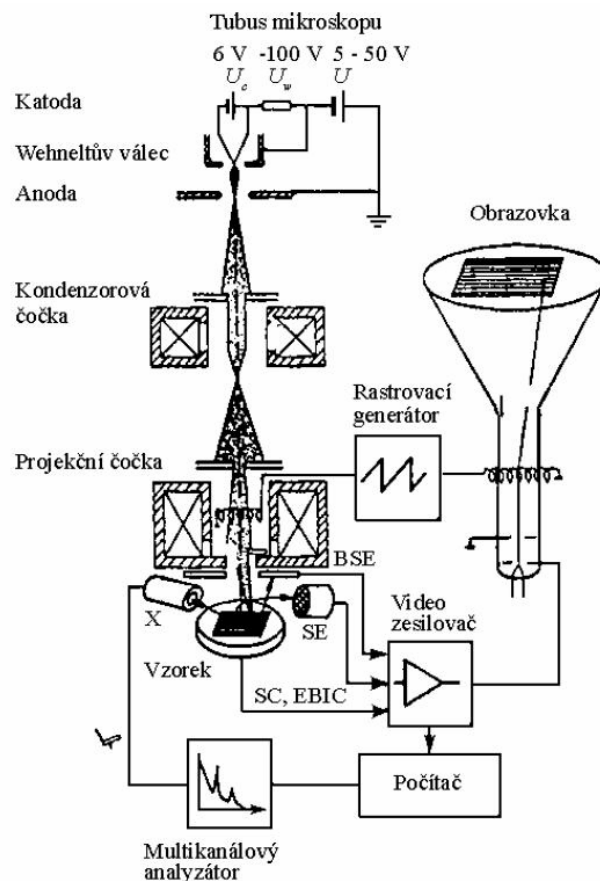
Elektronové mikroskopy jsou uplatňovány v mnoha vědeckotechnických oborech a mezi jejich hlavní přednosti řadíme vysokou rozlišovací schopnost a rozsah zvětšení, vynikající hloubka ostrosti a schopnost zobrazit topografie povrchu.



Obr. 1: Porovnání některých zobrazovacích soustav

2. Rastrovací elektronová mikroskopie

Na Obr. 2 je zjednodušené schéma rastrovacího elektronového mikroskopu.



Obr. 2: Zjednodušené schéma SEM [6]; SE – sekundární elektrony, BSE – zpětně odražené elektrony, SC – proud vzorkem, EBIC – proud indukovaný elektronovým svazkem, X – RTG záření.

Ze zdroje elektronů v horní části mikroskopu jsou emitovány elektrony, z nichž je elektronovou optikou v tubusu mikroskopu získáván a upravován svazek elektronů. Svazek elektronů je zaostřen na povrch vzorku a rastruje po něm po vybrané ploše. Vznikající signály jsou zachyceny detektory v komoře vzorku, zpracovány a zobrazeny.

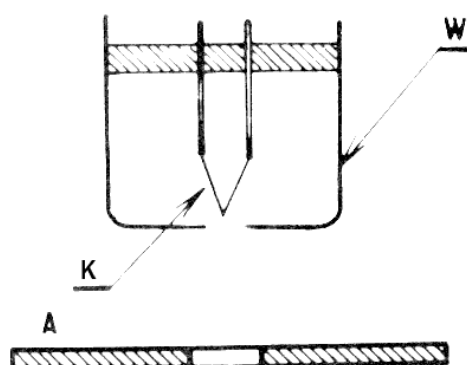
2.1 Zdroj elektronů

V elektronové mikroskopii jsou používány dva typy zdrojů elektronů, a to termoemísí tryska (žhavená katoda) a autoemísí tryska.

Zahřejeme-li látku na vysokou teplotu, dodáme tím elektronům dostatečnou energii k překonání energetické bariéry, která jim brání v úniku z ní. Tuto energii označujeme výstupní prací.

V SEM k zahřátí a následné termoemisi dojde při průchodu elektrického proudu vláknem. Pravděpodobnost úniku elektronů z vlákna může být ještě zvýšena vytvarováním do tvaru písmene V. Tím porušíme ultrastrukturu v místě ohybu a usnadníme uvolnění elektronů. Nejčastěji používaným materiálem je v termoemisních tryskách wolframové vlákno pro jeho nízkou výstupní energii ($W = 4,5 \text{ V}$, [1]), vysoký bod tání ($W = 3653 \text{ K}$, [1]) a vyšší tlak (10^{-3} Pa , [1]), který vyžaduje pro svůj provoz. Velmi kvalitním termoemisním zdrojem elektronů s životností více jak 1000 h a výstupní prací $W = 2,5 \text{ V}$ jsou katody z LaB_6 a CeB_6 [16], které však vyžadují pro svou činnost vyšší nároky na vakuový systém (10^{-4} Pa , [1]).

V praxi požadujeme, aby elektronového zdroje poskytovaly koherentní svazek elektronů. Elektronovou trysku tvoří katoda emitující elektrony a anoda s kruhovým otvorem ve svém středu, která je přitahuje a udává jim dostatečné zrychlení pro průlet tubusem mikroskopu (Obr. 3).



Obr. 3: Konstrukce termoemisní trysky elektronů [2]; W – Wehneltův válec, K – katoda, A – anoda

Vláknem katody je vystředěno do otvoru tzv. Wehneltova válce, který má záporné předpětí a díky jehož působení se okolo emitujícího hrotu katody vytvoří mrak elektronů. Tyto elektrony jsou potom postupně odsávány z otvoru Wehneltova válce k anodě. Elektrony, které mají správný směr se pohybují dále do tubusu.

Jiným zdrojem elektronů je autoemisní tryska. Jedná se o výkonnější zdroj s delší životností. Princip je založen na uvolňování elektronů z povrchu wolframového hrotu silným elektrickým polem. Výhodou autoemisních trysek je dosažení vyšší proudové hustoty a tím menšího průměru svazku primárních elektronů. Hlavní nevýhodou autoemisní trysky jsou vysoké nároky na hodnotu vakua, které je zapotřebí pro její správnou činnost (10^{-6} až 10^{-8} Pa , [1]).

2.2 Fokusace paprsku

Urychlené primární elektrony postupují do soustavy elektromagnetických čoček. Hlavním úkolem soustavy elektromagnetických čoček je zmenšit průměr svazku elektronů, které pak dopadají na povrch vzorku. Elektromagnetické čočky vykazují řadu vad.

Chromatická vada vzniká v důsledku rozdílných energií elektronů v elektronovém svazku. Elektrony s větší vlnovou délkou jsou v magnetickém poli cívek vychylovány jinak, a proto protínají osu cívky v jiném bodě, než elektrony s menší vlnovou délkou. Chromatické vady lze eliminovat zlepšením koherentnosti elektronového svazku. Toho lze dosáhnout maximální stabilizací urychlovacího napětí mikroskopu.

Sférickou vadou rozumíme neschopnost čočky zaostřovat všechny paprsky vycházející z bodového zdroje opět do jednoho bodu. Elektrony, které procházejí vnější částí čočky, jsou zaostřovány do bodu, který leží blíže k čočce. Naopak elektrony, které procházejí čočkou v těsné blízkosti optické osy jsou zaostřovány dále od čočky.

Osový astigmatismus je vada, způsobená nesymetrií magnetického pole. V důsledku toho elektrony procházející čočkou v různých rovinách, mají různé ohnisko. Mezi nejčastější zdroje astigmatismu čoček řadíme nečistoty na vnitřních plochách mikroskopu, pólových nástavcích čoček, clonách atd.. Většinou elektricky nevodivé nečistoty se nabíjejí a svým rušivým elektrickým polem způsobují deformaci drah letících elektronů. Astigmatismus je vadou, která se v mikroskopu koriguje magnetickým polem stigmátoru.

Difrakční vada vzniká difrakcí elektronového svazku při průchodu elektromagnetickou čočkou. Difraktované části svazku interferují a kolem původní stopy svazku elektronů vznikají interferenční kruhy.

Paprsek primárních elektronů je elektromagnetickými čočkami před dopadem na povrch vzorku rozpořehován vychylovacími (rastrovacími) cívkami. Svazek řádkuje po vybrané oblasti vzorku. Aby bylo možné vytvořit finální obraz vzorku, primární svazek elektronů je synchronizován se zobrazovací soustavou mikroskopu (např. se svazkem tvořící obraz v CRT monitoru). Počet řádků je možné měnit od desítek do několika tisíc a zároveň lze měnit i rychlost přeběhu svazku v jednom řádku. Čím pomaleji se pohybuje rastrovací svazek elektronů po vzorku, tím se obvykle zlepšuje poměr signál-šum.

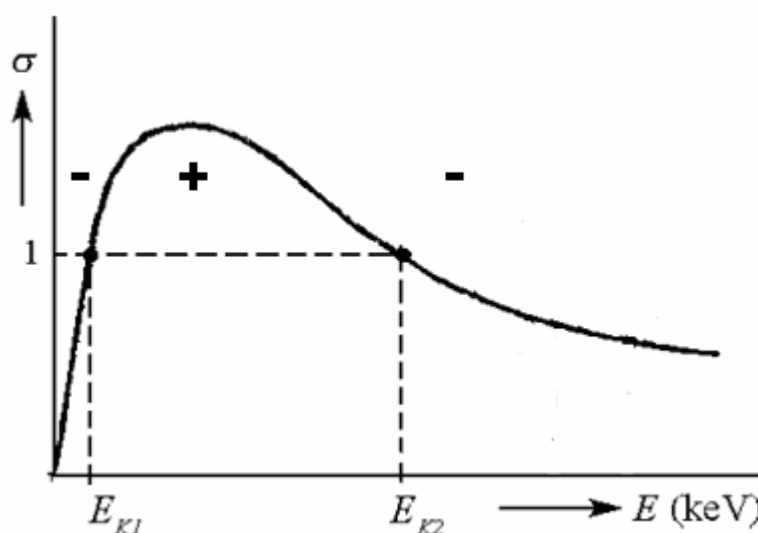
2.3 Komora vzorku

Pod tubusem se nachází komora vzorku. V ní je umístěn goniometrický stolek, na který se upevňují vzorky. Goniometrický stolek umožňuje pohybovat se vzorkem, otáčet ho, naklánět a měnit teplotu vzorku. V současné době se mikroskopy vybavují stolem, jehož součástí jsou patřičné servomotory, a díky tomu je možno ovládat tento stolek se vzorkem

pomocí joysticku nebo myši řídicího počítače. Hlavní předností takovýchto stolků je možnost jednoduše zaznamenávat pohyb po vzorku a především možnost se vracet přímo do jednotlivých prohlížených míst.

2.3.1 Nabíjení pozorovaných vzorků

Zobrazování vzorku je často doprovázeno rušivými jevy. K nim patří především nabíjení povrchu vzorku. Dopadem elektronů na pozorovaný vzorek, který není dostatečně elektricky vodivý, dochází k jeho nabíjení. Na vzorku může docházet ke kladnému nebo zápornému nabíjení. Obr. 4 ukazuje závislost oblastí kladného a záporného nabíjení na energii primárních elektronů. Kladně nabitě oblasti vzorku jsou pozorovatelná jako tmavší místa, záporně nabitě oblasti jako světlejší místa. Poloha kritických energií (E_{K1} a E_{K2}) závisí na složení vzorku.



Obr. 4: Závislost celkového koeficientu emise signálních elektronů σ na energii primárních elektronů [6]

Odstranění nabíjení

Řešením je potažení vzorku tenkou vrstvou kovu s dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Jako materiál pro tvorbu kovové vrstvy se nejčastěji používá např. uhlík, zlato, platina nebo slitina platiny a paládia. Pokovení vzorku se provádí např.:

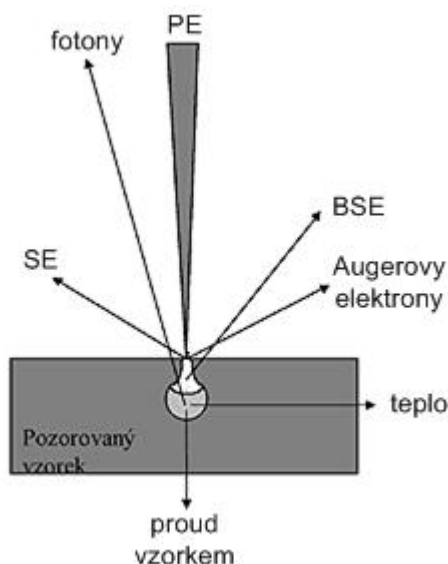
- *vakuovým napařováním* – princip spočívá v elektrickém zahřátí daného kovu na teplotu, při které se z jeho povrchu začnou odpařovat jednotlivé molekuly. Ty se pak šíří všemi směry od zdroje a po dopadu na chladnější předměty na nich kondenzují. Vzhledem k náhodnému směru šíření odpařovaného kovu vznikají touto metodou na vzorku stíny, které lze jen zčásti odstranit rotací stolku se vzorkem.

- *iontovým naprašováním* - základem je vznik usměrněného výboje v prostředí nízkotlaké argonové atmosféry účinkem elektrického napětí. Při výboji dochází k ionizaci plynu a vzniklé ionty jsou přitahovány ke katodě. Ta je obkroužena prstencem z naprašovaného kovu a urychlené ionty z něj vyrážejí částice kovu. Částice se srážejí s dalšími molekulami, vzniká prostorový mrak, který dokonale obalí povrch vzorku tenkou vrstvičkou kovu.
- *nános chemickou cestou* - princip spočívá ve vytvoření nánosů kovu na povrch vzorku chemickou cestou [2].

Dalšími možnostmi, jak předcházet nabíjení vzorku je impregnace, práce s environmentálním rastrovacím elektronovým mikroskopem nebo v nízkonapěťovém módu SEM.

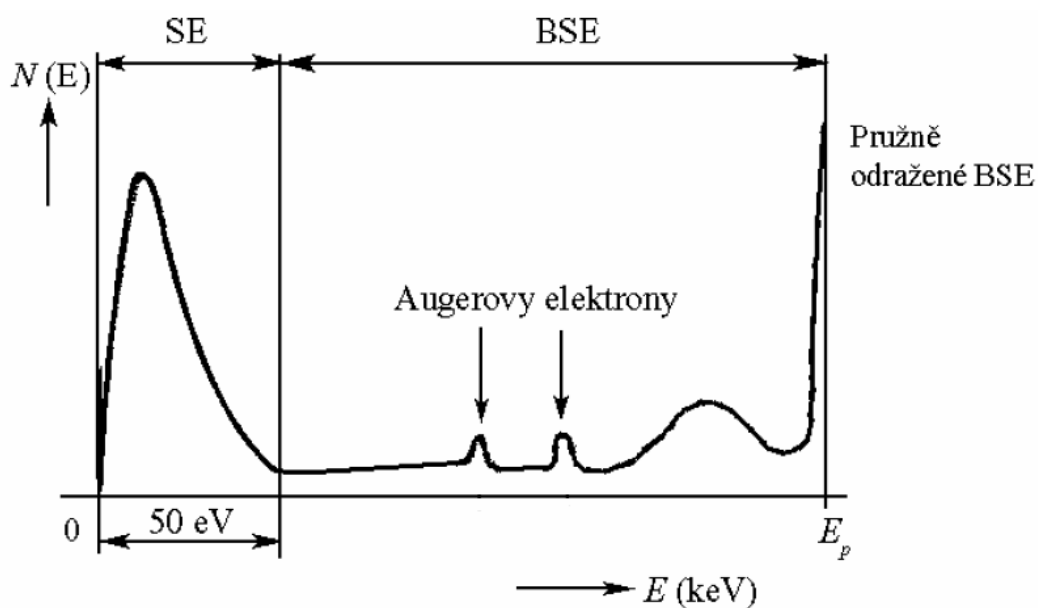
2.3.2 Dopad svazku na vzorek

Princip získání obrazu pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu je založen na interakci svazku primárních elektronů s povrchem vzorku. Ze vzorku jsou emitovány sekundární elektrony (SE), zpětně odražené elektrony (BSE), Augerovy elektrony, RTG, UV, viditelné a IR záření. Vzniklé signální složky jsou zachyceny v detektorech, zpracovávány a převáděny na signál, který je zobrazován na monitoru počítače.



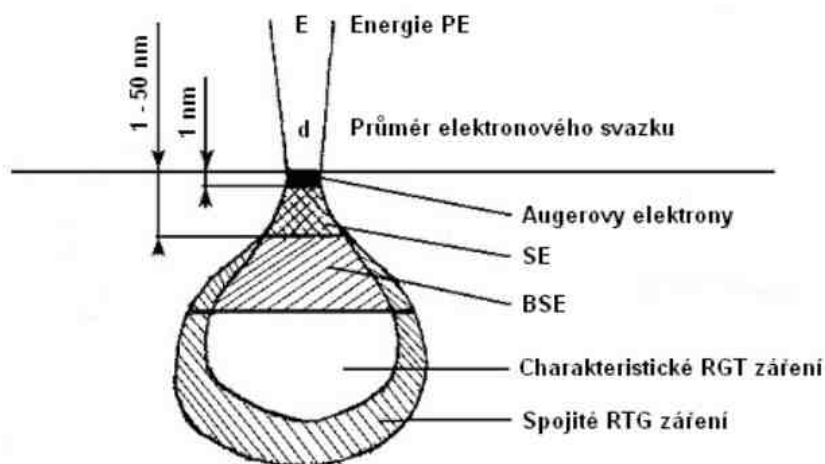
Obr. 5: Interakce primárních elektronů s povrchem vzorku

Energetické spektrum elektronů uvolněných při interakci primárních elektronů s pozorovaným vzorkem ukazuje Obr. 6.



Obr. 6: Energetické rozložení signálních elektronů (E_p – energie primárních elektronů) [6]

Na Obr. 7 je schematicky znázorněn tzv. excitační objem, představující oblast pod povrchem vzorku, ve které dochází k interakci PE se vzorkem za vzniku jednotlivých signálů.



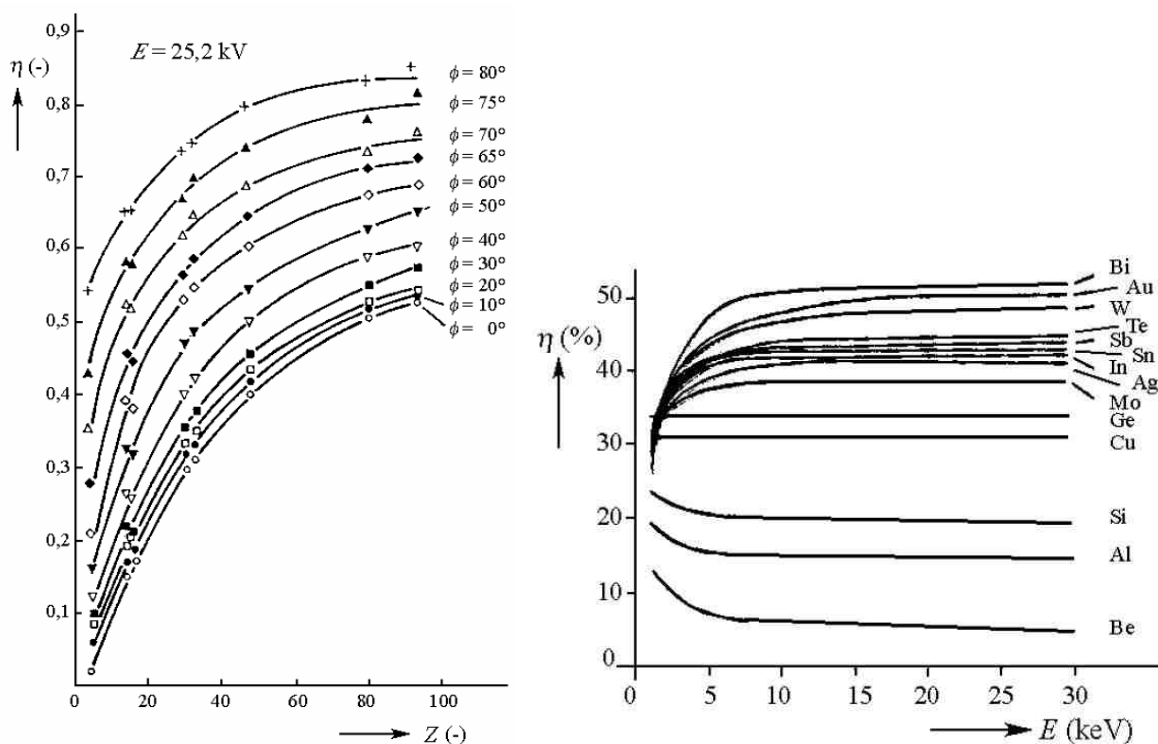
Obr. 7: Excitační objem pro některé signály [6]

Interakce mezi primárními elektrony a atomy vzorku můžeme rozdělit na elastické srážky, které způsobují vznik zpětně odražených elektronů a neelastické, při kterých dochází k předávání energie primárních elektronů atomům vzorku.

2.3.3 Typy signálů

Zpětně odražené elektrony

Na hloubku vniku (doletu) primárních elektronů má také vliv složení vzorku. U vzorků tvořených těžšími prvky (např. kovy) je dolet primárních elektronů menší a dochází k uvolnění více zpětně odražených elektronů ze vzorku. Na Obr. 8 je znázorněn graf vyjadřující závislost koeficientu emise BSE na protonovém čísle a na energii primárních elektronů.



Obr. 8: Závislost koeficientu emise BSE (η) na protonovém čísle Z a úhlu dopadu PE na vzorek a závislost koeficientu emise BSE (η) na energii primárních elektronů E [6]

Z výše uvedené závislosti koeficientu emise BSE na protonovém čísle prvku plyne, že místa s vyšším průměrným atomovým číslem se jeví v obraze BSE světlejší.

Sekundární elektrony

SE se od BSE odlišují svojí nízkou energií (nejběžněji 2 až 5 eV) a způsobem svého vzniku. Tab. 1 udává závislost koeficientu emise SE na protonovém čísle Z při energii PE 20 keV [12]. SE se mohou uvolňovat z několik nm pod povrchem látky.

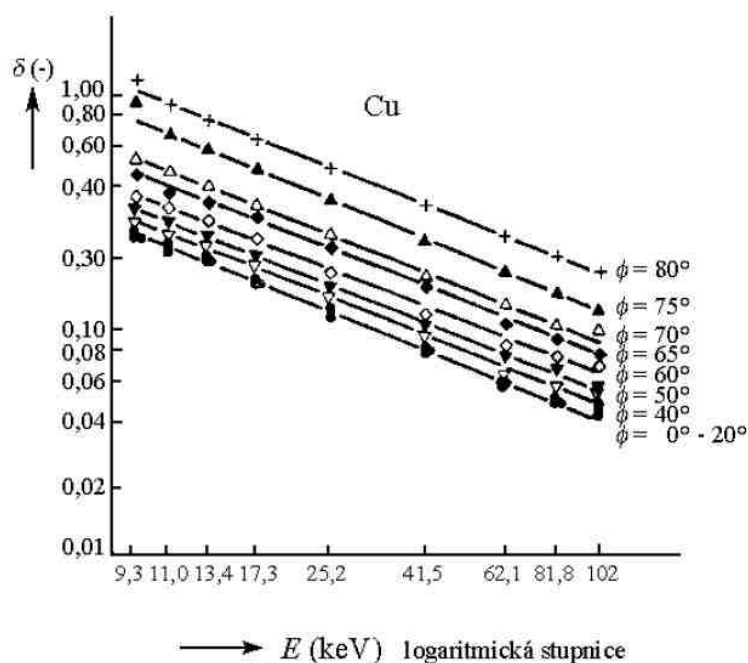
Rozlišujeme šest typů sekundárních elektronů.

- *SEI* – SE uvolňující se pouze z místa dopadu svazku PE.

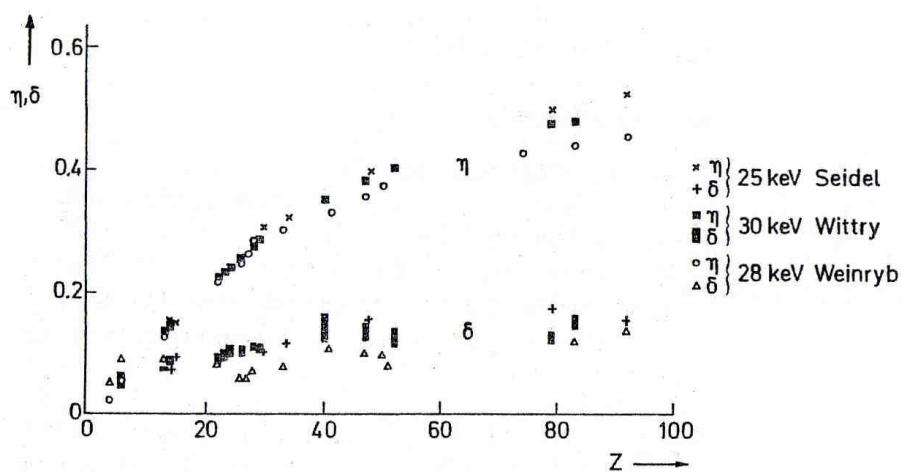
- *SE2* – emitované SE, které jsou generované BSE.
- *SE3* – SE, které jsou generované na vnitřních stěnách komory vzorku.
- *SE4* – SE, které generují PE na vnitřních stěnách tubusu.
- *SE5* – SE, které vznikají po dopadu kladných iontů a záření na vzorek mimo místo dopadu svazku PE. Platí pro environmentální SEM.
- *ESE* – environmentální SE, které vznikají při ionizačních srážkách. Platí pro environmentální SEM.

Tab. 1: Závislost koeficientu emise SE (δ) na protonovém čísle Z [12]

Z	Atom	δ (20 keV)	Z	Atom	δ (20 keV)
3	Li	0,13	41	Nb	0,36
4	Be	0,18	42	Mo	0,34
5	B	0,34	43	Tc	0,34
6	C	0,28	44	Ru	0,34
11	Na	0,17	45	Rh	0,34
12	Mg	0,24	46	Pd	0,42
13	Al	0,28	47	Ag	0,42
14	Si	0,3	48	Cd	0,3
15	P	0,38	49	In	0,45
16	S	0,38	50	Sn	0,4
19	K	0,15	51	Sb	0,4
20	Ca	0,24	52	Te	0,47
21	Sc	0,22	55	Cs	0,17
22	Ti	0,22	56	Ba	0,22
23	V	0,3	57	La	0,22
24	Cr	0,3	58	Ce	0,15
25	Mn	0,3	72	Hf	0,34
26	Fe	0,38	73	Ta	0,37
27	Co	0,32	74	W	0,38
28	Ni	0,37	75	Rc	0,42
29	Cu	0,38	76	Os	0,42
30	Zn	0,3	77	Ir	0,52
31	Ga	0,42	78	Pt	0,52
32	Ge	0,34	79	Au	0,47
33	As	0,47	80	Hg	0,3
34	Se	0,28	81	Tl	0,47
37	Rb	0,2	82	Pb	0,37
38	Sr	0,22	83	Bi	0,4
39	Y	0,22	90	Th	0,34
40	Zr	0,3			



Obr. 9: Závislost koeficientu emise SE (δ) na energii PE pro měď a úhlu dopadu PE na vzorek [6]



Obr. 10: Závislost koeficientu emise BSE (η) a SE (δ) na protonovém čísle Z pro energie PE 25 ÷ 30 keV [1]

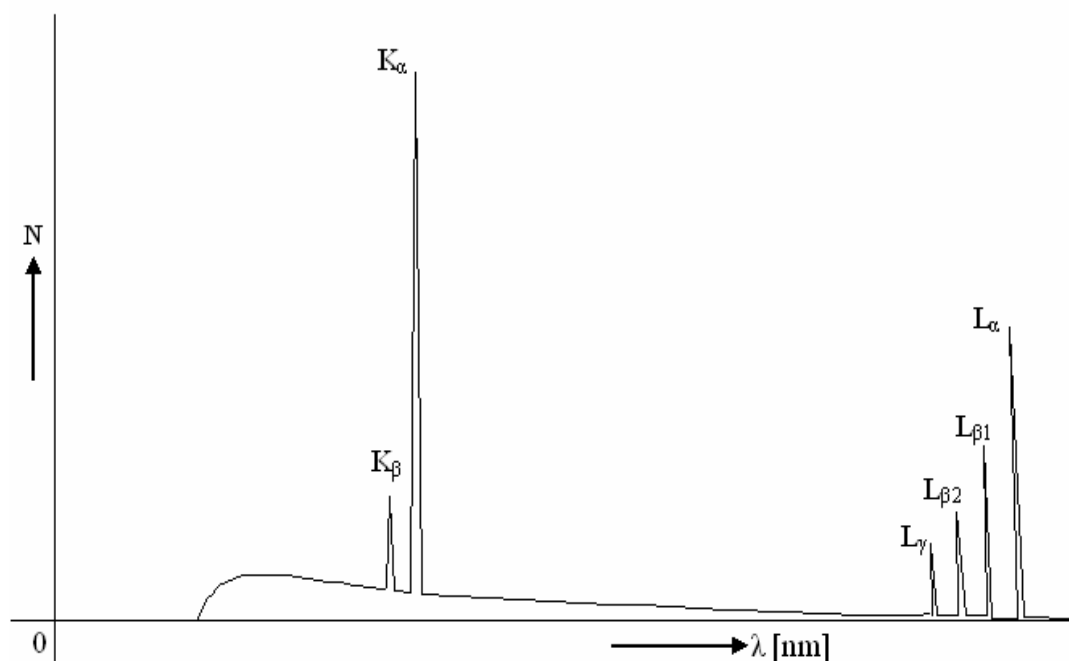
Charakteristické RTG spektrum [4]

Vznik charakteristického spektra je podmíněn uvolněním elektronu z některé vnitřní slupky atomu. K tomu může dojít při nárazu rychle letícího elektronu, fotonu rentgenového nebo γ -záření, protonu apod. Vznik vakance proběhne po uvolnění elektronu např. ze slupky K. Ionizovaný atom tak získá energii, která odpovídá ionizační energii dotyčné slupky. Při přechodu atomu z vyšší hladiny na nižší dojde k vyzáření energie, jejíž hodnota odpovídá rozdílu energií hladin, mezi nimiž přechod nastal. Jde o náhodný jev, tudíž nelze

v jednotlivých případech předpovědět, který přeskok nastane. Pravděpodobnosti emise jednotlivých čar jsou však rozdílné.

Protože povrch vzorku je bombardován elektrony o stálé intenzitě proudu elektronového svazku, nedojde k vyzaření pouze jednoho souboru charakteristického RTG kvanta, ale vyzařování probíhá tak dlouho, dokud ozařujeme povrch zkoumaného vzorku. Pro vznik charakteristického RTG záření musí atom mít alespoň dvě elektronové hladiny. Z toho důvodu nelze analyzovat vodík a hélium. Obvykle je možné detekovat prvky s atomovým číslem vyšším, než $Z = 4$ (berilium), ze kterého je vytvořeno okénko oddělující tlak v komoře vzorku od tlaku v RTG spektrometru. Existují také bezokénkové spektrometry.

Na Obr. 11 je uveden příklad rentgenového spektra.



Obr. 11: Příklad RTG spektra

Maxima (s energiemi typickými pro daný prvek) vystupují z nízké úrovně pozadí tvořeného brzdným zářením vznikajícím při zpomalování rychlých elektronů.

Spektrální čary charakteristického záření tvoří série, které jsou rozloženy v různých částech spektra. Série se označují písmeny K, L, M, N atd. Série K (s nejkratší vlnovou délkou) obsahuje dvě intenzivní čary K_{α} a K_{β} . Čára K_{α} má nejdelší vlnovou délku a je přibližně desetkrát intenzivnější než čára K_{β} . Další série obsahují větší počet čar. Spektra všech chemických prvků nevykazují žádnou periodičnost. Spektrální čary se pouze posouvají ke kratším vlnovým délkám s rostoucím protonovým číslem prvků. Mezi frekvencí

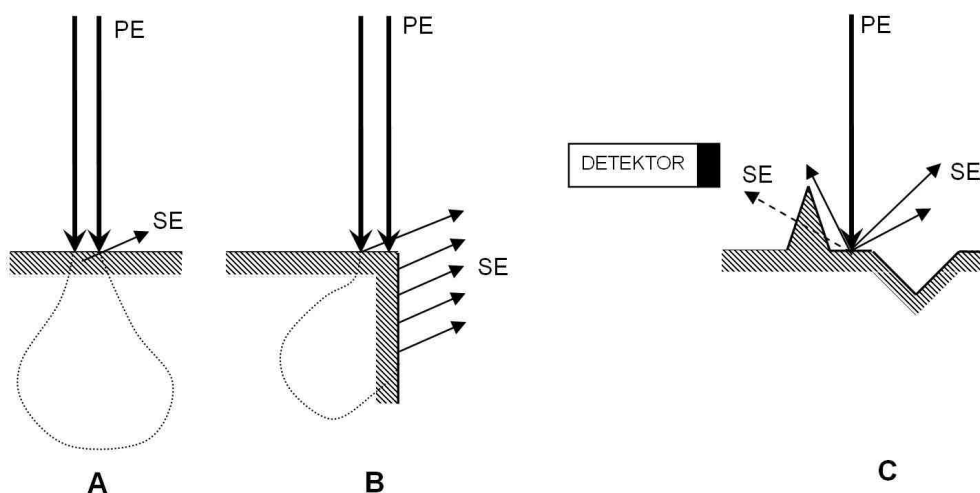
rentgenové čáry a atomovým číslem prvku existuje přímá úměra (1913, Moseley). Je to dáno tím, že RTG spektrum má svůj původ ve vnitřních elektronových sférách atomů.

Augerovy elektrony

Po dopadu primárních elektronů a následném odtržení elektronu z některé hladiny je vakance po něm vzniklá zaplněna elektronem z některé vyšší hladiny. Vybuzený atom přejde z vyššího stavu do nižšího, ale přebytečná energie pak nemusí být vyzářena emisí rentgenového fotonu, ale z atomu může být uvolněn další elektron, nazývaný Augerův.

2.3.4 Kontrasty

- *materiálový kontrast* – je dán závislostí koeficientu emise SE a BSE na atomovém čísle.
- *topografický kontrast* - koeficient emise SE a BSE je závislý na náklonu vzorku vůči PE. Z nakloněného místa vzorku je emitováno více signálních elektronů. K hranovému jevu (Obr. 12B) může dojít při náklonu blížícím se 90° a na snímku se tato místa objevují přesvětlená. Stínový jev (Obr. 12C) je závislý na nerovnostech povrchu vzorku a umístění detektoru. Může docházet k zastínění emitovaných signálů směrem k detektoru.



Obr. 12 A, B: Princip hranového (B) a stínového (C) jevu v porovnání s dopadem PE na rovný povrch (A)

- *kontrast kanálováním (polykrystalických materiálů)* – elektrony se pohybují mezi atomy v krystalické mřížce, jež má za důsledek uvolňování BSE s různým

koeficientem emise BSE z různě orientovaných zrn. Při naklánění vzorku vůči dopadajícímu svazku se koeficient emise BSE jednotlivých zrn mění a dochází ke zvýraznění jevu. Koeficient emise BSE při kanálování je menší, než při neorientovaném průchodu PE [10].

- *typ 1 magnetického kontrastu* – SE s výstupní energií několika málo elektronvoltů jsou odchýleny vnějším magnetickým polem. Toto pole může být vytvářeno magnetickými doménami, polem magnetických hlav a pásek nebo magnetickým polem vodičů integrovaného obvodu apod. [1].
- *typ 2 magnetického kontrastu* – tento typ kontrastu je způsoben vlivem Lorenzovy síly magnetických domén na trajektorii BSE ve feromagnetickém materiálu. Výsledným obrazem jsou tmavší a světlejší proužky odpovídá struktuře magnetických domén [1].
- *kontrast mezi P a N typem polovodiče* – kontrast závislý na úhlu emise SE vůči povrchu a množství dopantu. Z místa dopadu PE se z N typu do vakua dostane menší část z celkového počtu emitovaných elektronů. K tomuto kontrastu nejvíce přispívají SE, které emitují v blízkém okolí normály k povrchu vzorku. Pokud zvětšujeme úhel, pod kterým detekujeme SE vystupující ze vzorku, kontrast mezi P a N typem polovodiče postupně klesá a dochází i k jeho inverzi [9].
- *napěťový kontrast* – oblasti, na kterých je přiložený kladný potenciál, přitahují SE a tyto oblasti se jeví tmavší, oblasti se záporným potenciálem naopak [1]. Lze využít např. ke sledování potenciálů na povrchu integrovaných obvodů.

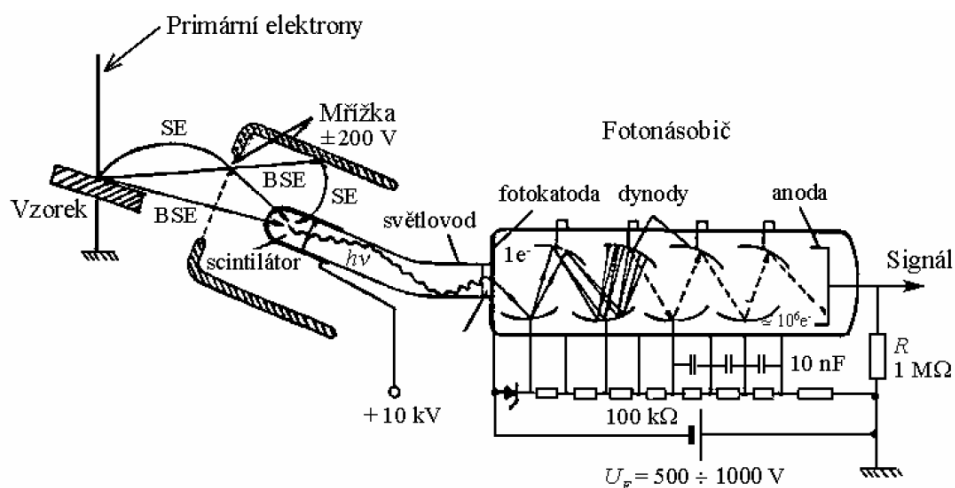
2.3.5 Detekce signálů

Pro detekci signálů lze použít různé typy detektorů. Pro detekci BSE a SE jsou používány často detektory scintilační, ionizační a polovodičové, pro detekci RTG záření detektory EDS (Energy-Dispersive Spectrometer) a WDS (Wavelength-Dispersive Spectrometer).

Detekce SE a BSE

- *Scintilační detektor*

Široce rozšířenými detektory sekundárních elektronů pro SEM jsou scintilační detektory s fotonásobičem. Jsou známé jako Everhart – Thornleyho detektory (Obr. 13).

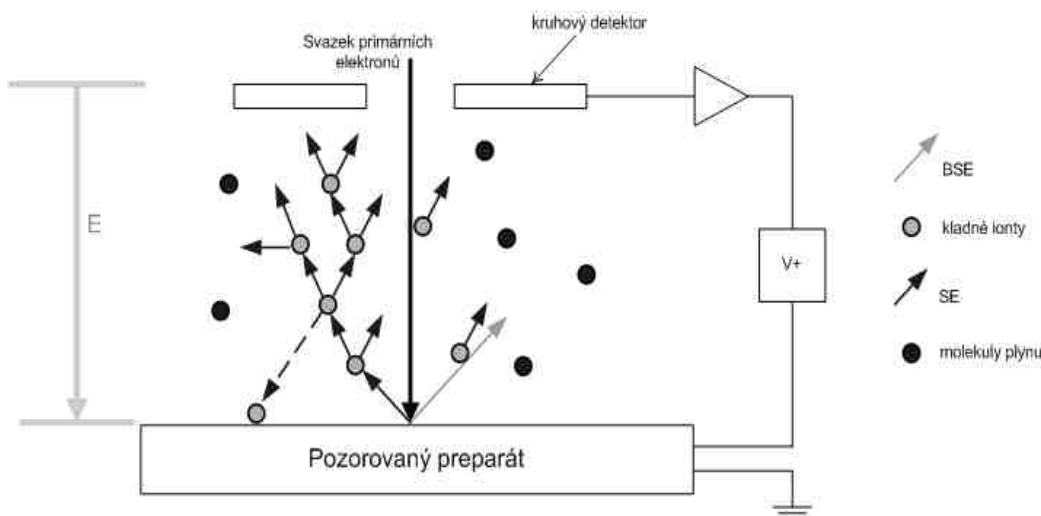


Obr. 13: Schéma Everhart - Thornleyho detektoru pro SE [1]

Detektor je tvořen scintilátorem (např. Naton, YAP nebo YAG), který po dopadu elektronů s dostatečnou energií uvolní záblesk světla ve viditelné oblasti. Intenzita záblesku je přímo úměrná energii elektronů, které ho způsobily. Elektrony jsou urychlovány potenciál 10 kV přivedeným na tenký kovový film na přední straně scintilátoru, aby získaly energii dostatečnou k vyvolání scintilace. Světlo pokračuje světlovodem k fotonásobiči, kde je zachycen světelný signál a převeden na elektrický. Přitom dojde k zesílení signálu přibližně 1000 až 1000000 krát. Možnou nevýhodou Everhart – Thornleyho detektoru je, že některé typy scintilátoru postupně ztrácí citlivost a musí být časem vyměněny. Jelikož napětí na scintilátoru by mohlo negativně ovlivňovat dopadající svazek primárních elektronů, umísťuje se detektor do Faradyovy klece s předpětím 200 V. Scintilační detektory je možné použít i pro detekci zpětně odražených elektronů, u kterých nemusí být na scintilátoru přiloženo vysoké napětí.

- *Ionizační detektor*

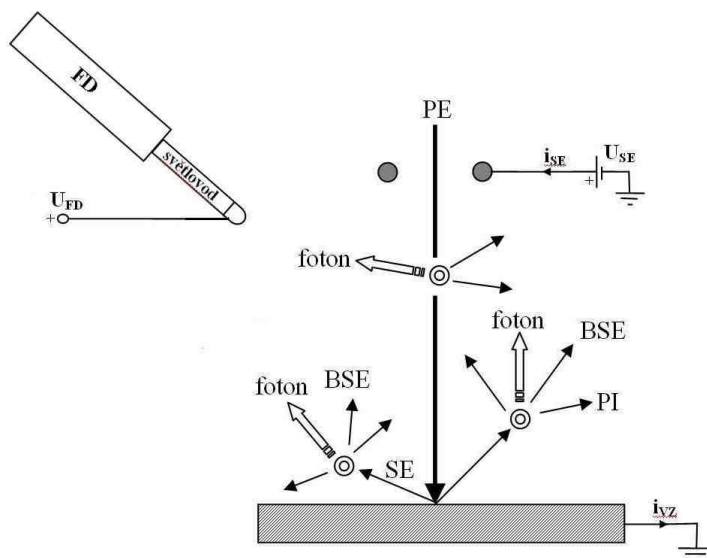
Lze použít pouze v environmentální SEM. Ionizačního detektoru těží ze zesílení signálních elektronů v nárazové ionizaci vytvořené mezi uzemněným vzorkem a elektrodou detektoru. Elektroda detektoru registruje proud elektronů, který je následně převeden na napětí a dále zpracován. Na elektrodách bývá přiložen pozitivní potenciál mezi 300 a 500 V. Sekundární elektrony s nízkou energií jsou urychlovány v elektrickém poli mezi vzorkem a detektorem a účastní se ionizujících srážek s molekulami plynu. Do zesilovaného signálu přispívají menší měrou také BSE a PE. Princip je uveden na Obr. 14.



Obr. 14: Detekce iontů ionizačním detektorem [8]

- *Detektor fotonů*

V environmentálním rastrovacím elektronovém mikroskopu nachází uplatnění také jeden z typů ionizačních detektorů – detektor fotonů.



Obr. 15: Schéma detekce fotonů [5]; BSE – zpětně odražené elektrony, SE – sekundární elektrony, PE – primární elektrony, PI – kladné ionty, FD – fotonový detektor [5]

Při srážkách PE, SE a BSE s částicemi plynu vznikají fotony IR, UV a viditelném spektru, které jsou detekovány a jejich signál zesilován ve fotonovém detektoru obdobně jako ve scintilačním detektoru s fotonásobičem.

- *Polovodičové detektor*

Polovodičové detektory lze využít stejně jako scintilační, ale vyžadují větší proud PE [1].

Detekce RTG záření

Rentgenové záření je detekováno a analyzováno rentgenovými spektrometry. Rozlišujeme dva základní přístupy k detekci RTG záření - energiově disperzní spektroskopii (EDS) a vlnově disperzní spektroskopii (WDS) a dva typy analýzy.

- *Kvalitativní analýza* je používána pro stanovení přítomnosti prvku. Přesahuje-li ve vybuzeném RTG spektru intenzita charakteristických RTG kvant o energii příslušející prvku hodnotu spojitého spektra (šumu), je prvek v analyzovaném bodě přítomen. Na základě známých údajů lze téměř jednoznačně přiřadit chemickému prvku příslušnou spektrální čáru ve spektru.

- *Kvantitativní analýza* se využívá pro stanovení obsahu prvku. Princip spočívá ve srovnání intenzity charakteristického RTG záření určitého prvku analyzovaného vzorku s intenzitou charakteristického RTG záření téhož prvku vhodného standardu. Udává se v hmotnostních procentech (dále jen hmot. %).

Analýzy pomocí EDS a WDS je možné provést v bodě, na úsečce nebo na ploše vzorku.

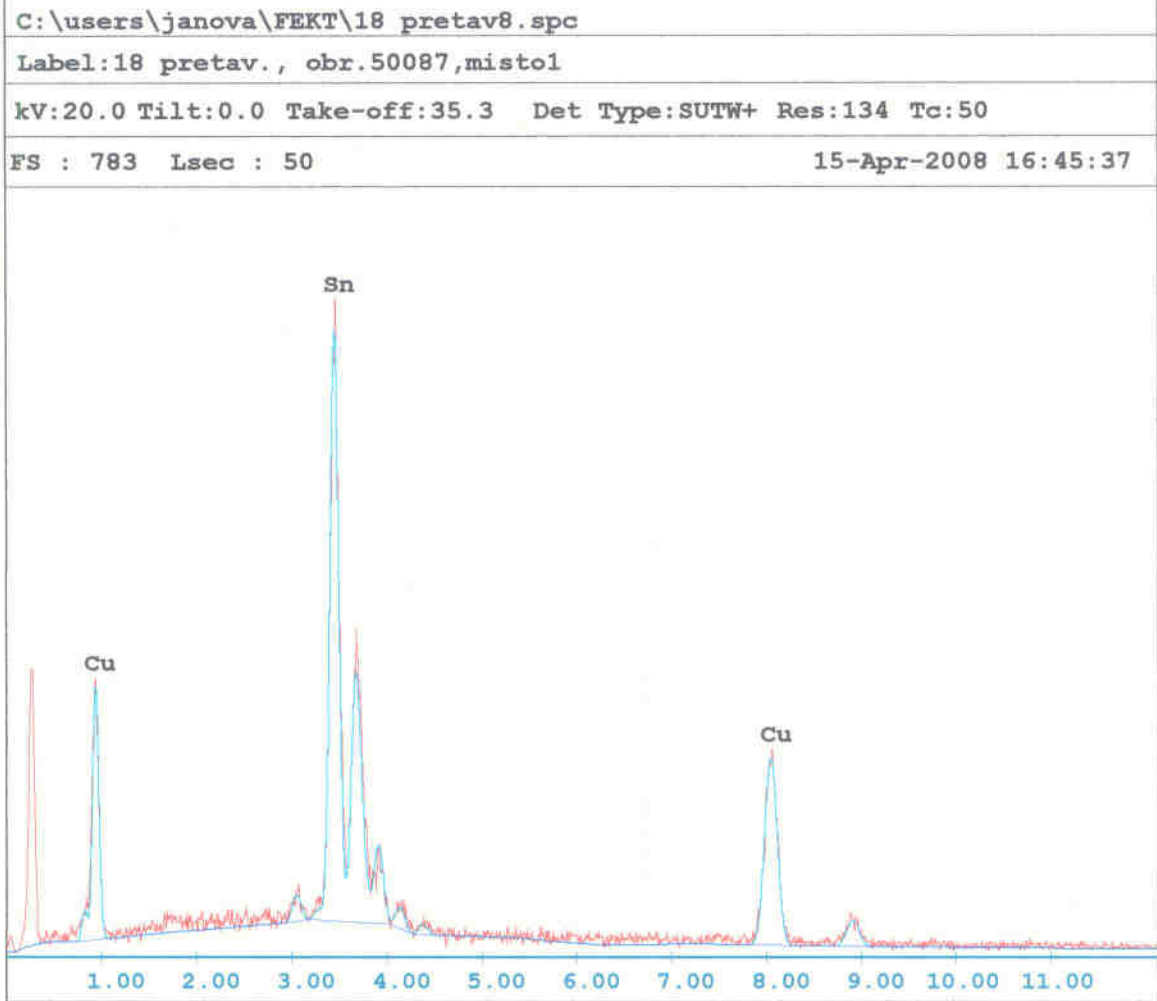
- *Energiově disperzní spektrometry*

Záření dopadá na polovodičový detektor s P–N přechodem, kde je přeměněno na napěťový impuls. Amplituda vzniklých impulsů je úměrná energii dopadajících RTG kvant. Impulsy jsou v A/D převodníku převedeny do digitální formy a dále zpracovány. Výstupem je celé vyzářené RTG spektrum zobrazující četnost jednotlivých energií RTG záření.

Výhodou EDS analýzy je požadavek krátkého času (řádově desítky sekund) pro získání a vyhodnocení celého RTG spektra. Nevýhodou je horší spektrální rozlišení (cca 140 eV u Si (Li) detektorů a 120 eV u Ge detektorů) [6].

Mez stanovitelnosti je pro různé prvky odlišná, pro prvky mezi ${}^5\text{B}$ až ${}^{10}\text{Ne}$ se pohybuje mezi 1 – 2 hmot. %, pro prvky od ${}^{11}\text{Na}$ výše mezi 0,1 – 0,2 hmot. % [13].

Se svolením autora [15] je na Obr. 16 a Obr. 17 uveden příklad prvkové analýzy provedené na výzkumném pracovišti FSI VUT v Brně.

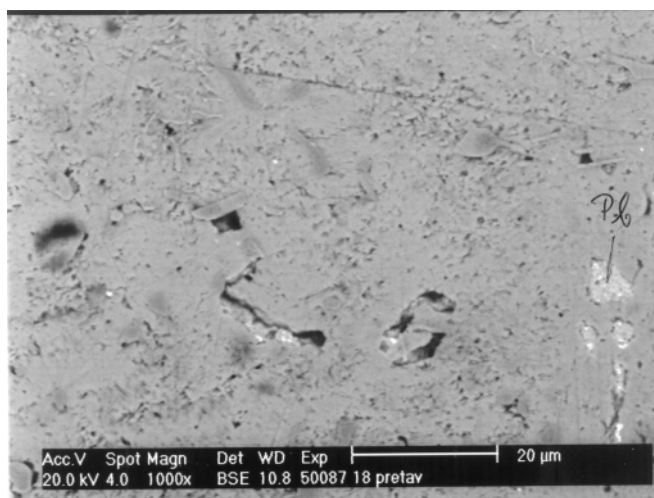


EDAX ZAF Quantification (Standardless)
 Element Normalized
 SEC Table : Default
 Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
SnL	61.84	46.45	0.5796	0.9553	0.9811	1.0000
CuK	38.16	53.55	0.3922	1.0789	0.9524	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
SnL	114.56	7.64	1.41	14.99
CuK	49.72	2.24	2.09	22.20

Obr. 16: Příklad prvkové analýzy [15]



Obr. 17: Snímek detailu pájecí pasty [15]

- *Vlnově disperzní spektrometry*

WDS analyzuje rentgenové záření pomocí difrakce na krystalu (monokrystal s přesně definovanou mezivinnou vzdáleností). Rentgenové záření dopadá na krystal, kde podle úhlu dopadu dochází k difrakci spektrální čáry o příslušné délce. Součástí detektoru je mechanika pro pohyb krystalu a detektoru RTG záření.

Aby bylo možno analyzovat jiný prvek, je nutno natočit krystal do odpovídajícího úhlu. Obvykle je možné detekovat tři až čtyři prvky najednou. Difraktované rentgenové záření o dané vlnové délce dopadá štěrbinou do proporcionálního čítače, kde je zesíleno a převedeno na elektrický signál. Signál je dále zpracováván počítačem.

Pomocí WDS je možno poměrně přesně stanovovat zastoupení většiny prvků těžších než ${}^5\text{B}$ na povrchu vzorku. Mez stanovitelnosti této metody je pro ${}^5\text{B}$ až ${}^{10}\text{Ne}$ $0,3 \div 0,5$ hmot. %, pro ${}^{11}\text{Na}$ a těžší prvky $0,03 \div 0,05$ hmot. % [13]. Nevýhodou je vyšší doba prováděného měření.

3. Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie

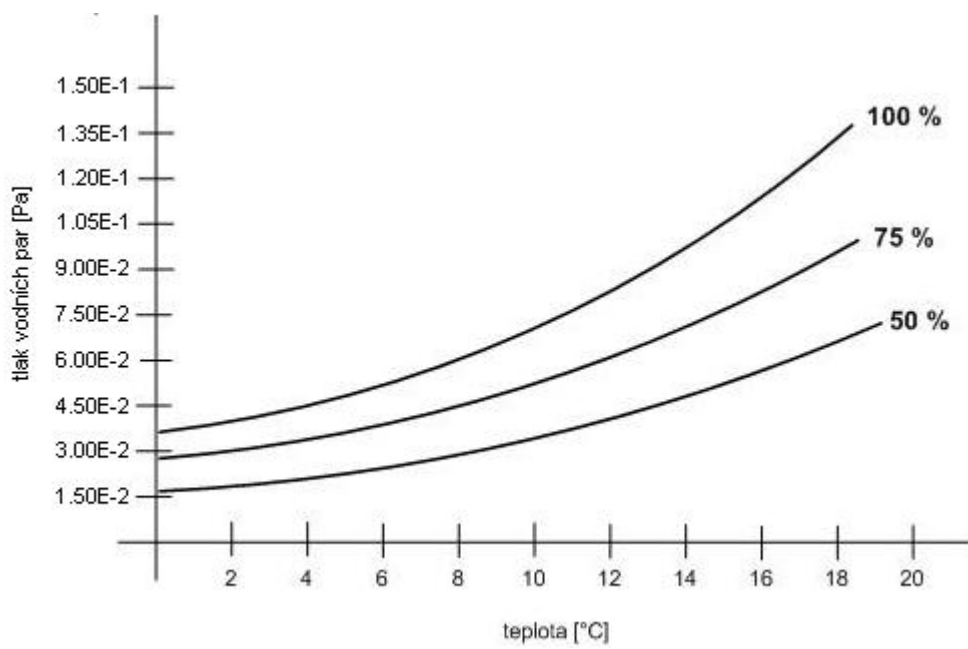
Jedním z posledních vývojových trendů SEM jsou tzv. environmentální rastrovací elektronové mikroskopy, které umožňují pozorovat vlhké a elektricky nevodivé materiály bez relativně složité přípravy pozorovaného vzorku, jak tomu je v klasické rastrovací elektronové mikroskopii. Environmentálního SEM je využíváno ve studiích „přirozených“ povrchů vzorků izolantů, hornin, minerálů, biologických tkání a buněk, dále pak u farmaceutických výrobků, potravin, drahých artefaktů apod. Výhodami oproti klasické SEM je nedestruktivní pozorování a potlačení vysoušení, nabíjení a kontaminace vzorku.

Hlavním znakem environmentální SEM je přítomnost plynu v komoře vzorku (tlak může nabývat hodnot obvykle do 2000 Pa), který znemožňuje detekci pomocí scintilačního Everhart – Thornleyho detektoru. Je možné využít ionizačního, scintilačního nebo polovodičového detektoru. Při nárazové ionizaci vznikají kladné ionty, které kompenzují náboj na případně nabitých místech vzorku. Proto mohou být pozorovány vzorky bez předem prováděných úprav povrchů. Nejčastěji používaným plynem v komoře vzorku bývá vodní pára [8].

V tubusu je udržován tlak jako v klasickém SEM a oddělení prostorů s různým tlakem je realizováno pomocí clon, které omezují proudění plynu mezi jednotlivými částmi mikroskopu, přičemž umožňují průchod primárních elektronů. Pro tlak v komoře vzorku nad 300 Pa je zapotřebí použití alespoň dvou omezujících clon s meziprostorem nazývaným komorou diferenciálního čerpání. K čerpání jsou obvykle používána rotační vývěva [11].

Důležitým parametrem je vzdálenost pozorovaného vzorku a detektoru (řádově milimetry). Jestliže je vzdálenost moc malá, elektrony se zesílí nedostatečně. Rovněž, je-li vzdálenost moc velká, je zesílení elektronů příliš malé a signál je degradován velkým rozptylem PE v plynném prostředí. Tyto dva extrémní stavy jsou závislé na chemickém složení plynu, jeho tlaku a umístění detektoru vůči vzorku. Lze najít optimální vzdálenost pro dané plynné prostředí. Dalšími důležitými faktory, které je třeba mít na paměti je atomové číslo vzorku a jeho dielektrické vlastnosti.

Tlak v komoře vzorku umožňuje pozorovat vzorky s obsahem vody až 100 % [8]. Udržování termodynamické rovnováhy v komoře vzorku vyžaduje chladit vzorek na patřičnou teplotu při daném tlaku vodních par (Obr. 18). U hydratovaných vzorků např. na cca. 5°C pro 867 Pa.



Obr. 18: Část fázového diagramu pro vodu, křivka pro 50, 75 a 100% relativní vlhkosti [8]

4. Praktická část

Pro vyhodnocování bylo zvoleno několik vzorků, podrobených různým úpravám, způsobům výroby a namáhání [15]. Praktická část této práce se sestávala z následujících fází. První fází byla příprava vzorků, druhou bylo pozorování vzorků světelným mikroskopem, dalším krokem bylo pozorování vzorků v environmentálním SEM a poslední fází bylo vyhodnocení získaných údajů a konzultace výsledků.

4.1 Příprava vzorků

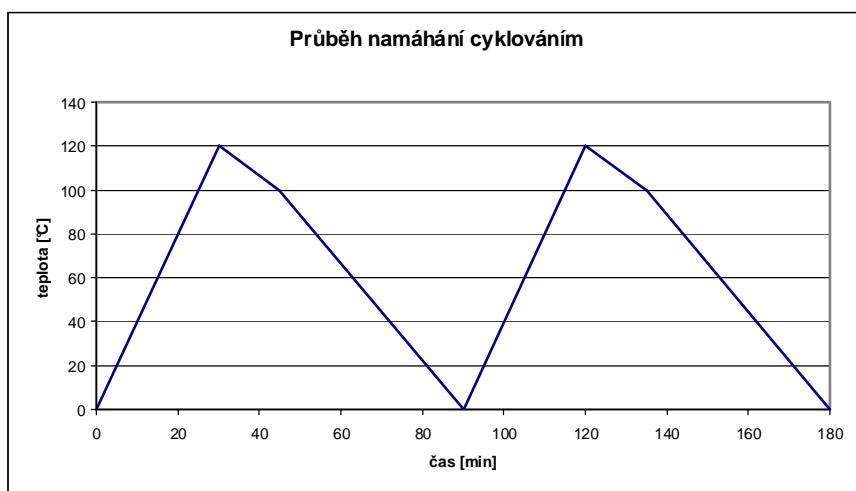
Popis vybraných vzorků je uveden v Tab. 2 [15]. Příklad výbrusu se základním popisem viz. Obr. 20.

Tab. 2: Specifika vybraných vzorků

číslo	specifika
A1	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
A2	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
A3	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
A4	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
A5	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
A6	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , cyklováno *
B1	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, před stárnutím **
B2	tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, po stárnutí **
C1	tloušťka fólie: 35 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, před stárnutím **
C2	tloušťka fólie: 35 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, po stárnutí **
D1	tloušťka fólie: 70 μm , pájka Sn63Pb37, pájeno vlnou, před stárnutím **
D2	tloušťka fólie: 70 μm , pájka Sn63Pb37, pájeno vlnou, po stárnutí **

* ... namáháno cyklováním:

- počet cyklů: 6000
- 1 cyklus – 45 minut, min. teplota: -20°C ; max. teplota: 120°C .



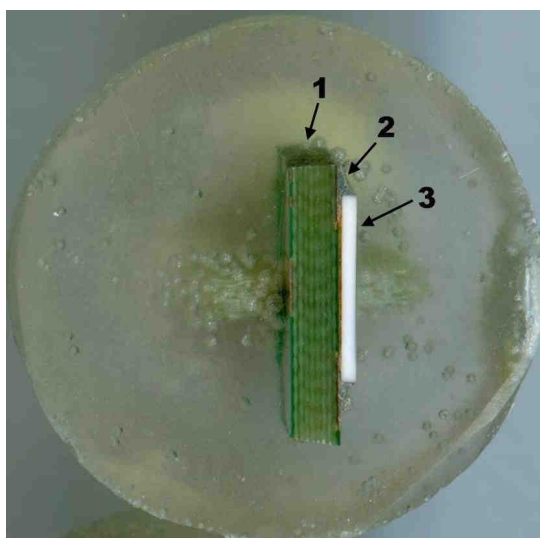
Obr. 19: Průběh cyklů vzorků A1, A2, A3, A4, A5, A6

** ... namáháno stárnutím – vzorek vystaven teplotě 150°C po dobu 14 dnů.

4.1.1 Výroba výbrusů

Vzorky byly připraveny dle následujícího postupu:

1. Výběr konkrétní části desky plošných spojů.
2. Výřez dané části.
3. Zalití do metakrylátové licí pryskyřice.
4. Tuhnutí pryskyřice.
5. Vybrušování pomocí brusného papíru.
6. Jemné vybrušování pomocí diamantové pasty (použití hrubost 6 a 3 μm).



Obr. 20: Příklad hotového výbrusu; 1 – DPS (FR4), 2 – pájený spoj, 3 – keramické pouzdro

4.2 Pozorování světelným mikroskopem

V dalším kroku byly vzorky pozorovány světelným mikroskopem (Olympus SZ61, max. zvětšení 90; vestavěná kamera: model U1-1400-C; SW: Quick PHOTO Industrial 2.2) na pracovišti UETE FEKT VUT v Brně.

V této fázi byly vyfoceny (při zvětšení 60) zkoumané oblasti spojů desek a keramických pouzder. Při tomto zvětšení byly u některých vzorků pozorovány defekty (viz. kap. 4.4.2).

4.3 Pozorování environmentálním SEM

Pro realizaci této fáze bylo využito environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu Tescan AQUASEM v laboratoři Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. (Akademie věd České republiky, Královopolská 147, 612 64 Brno, Česká republika).

4.3.1 Parametry a nastavení mikroskopu pro pozorování

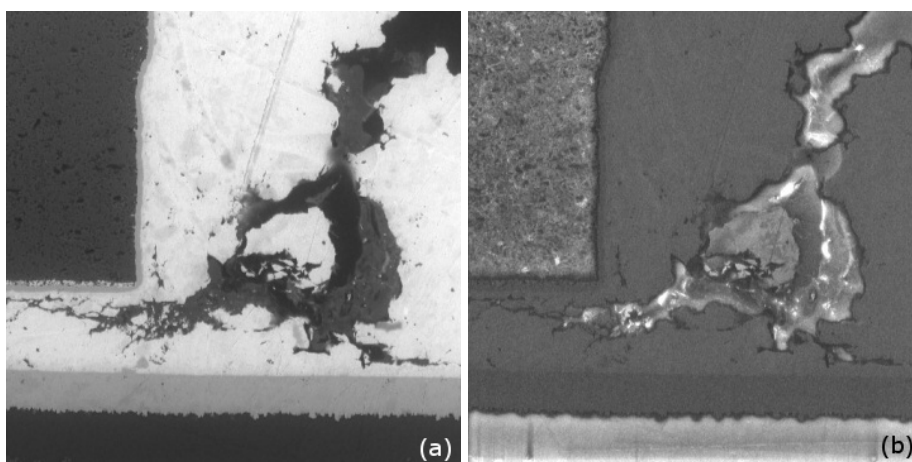
- Urychlovací napětí: 20 kV
- Tlak v komoře vzorku: 400 Pa.
- Plyn v komoře vzorku: vodní pára.
- Proud PE: 100 pA.

- Vzdálenost vzorku od detektoru: 3 mm.
- Pozorováno za pokojové teploty.
- Povrch vzorku před pozorováním čištěn v destilované vodě.
- Zesílení a jas použitých detektorů v průběhu experimentu neměněny.

4.3.2 Použité detektory

Pro experiment byl použit kombinovaný segmentový ionizační detektor se scintilačním detektorem BSE, který za běhu experimentu umožňuje volit mezi detekcí převážně SE segmentovým ionizačním detektorem nebo detekcí pouze BSE scintilačním detektorem.

Segmentový ionizační detektor je tvořen několika elektrodami tenkých vodivých vrstev nenesených na scintilátoru. Scintilační detektor s fotonásobičem pro detekci BSE obsahuje scintilátor YAG:Ce³⁺. Detektor obsahuje otvor, který slouží k vyvedení PE do komory vzorku a také jako clona omezující proudění plynu z komory vzorku do komory diferenciálního čerpání. Detektor je umístěn nad vzorkem. Na Obr. 21 je uvedeno srovnání snímků získaných ze zmíněných detektorů.



Obr. 21 a, b: Srovnání snímků získaných pomocí scintilačního detektoru pro detekci BSE (a) a segmentového ionizačního detektoru (převážně SE) (b), šířka obr. 400 μm

Při detekci segmentovým ionizačním detektorem z důvodu vysokého koeficientu emise SE v elektricky nevodivých oblastech vzorku vyvolaném jejich nabíjením po dopadu PE docházelo k relativnímu potlačení pozorovaných detailů na vodivých spojích, a proto tento

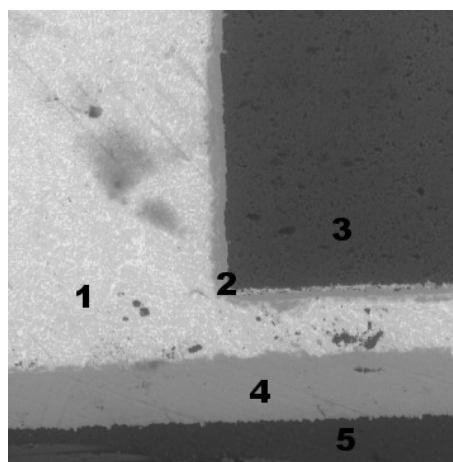
detektor nebyl dále k analýze využit. Pozn.: za zvolených parametrů experimentu se nabíjení elektricky nevodivých částí vzorku projevovalo v obraze získaném segmentovým ionizačním detektorem pouze silným zvýšením koeficientu emise SE (přesvícením těchto oblastí), nikoli deformací obrazu či výboji. Scintilační detektor BSE poskytuje obraz vzorku s vysokým materiálovým kontrastem bez registrace výše popsaného jevu, a proto byl tento detektor dále použit k analýze.

4.4 Sledování kvality spojů

Během pozorování byl nasnímán celý povrch spoje daného vzorku. V práci jsou přiloženy pouze vybrané oblasti povrchu vzorků, typické pro nejčastěji vyhodnocované vlastnosti.

4.4.1 Popis pozorovaných spojů

Obr. 22 udává popis základních částí pozorovaných spojů.

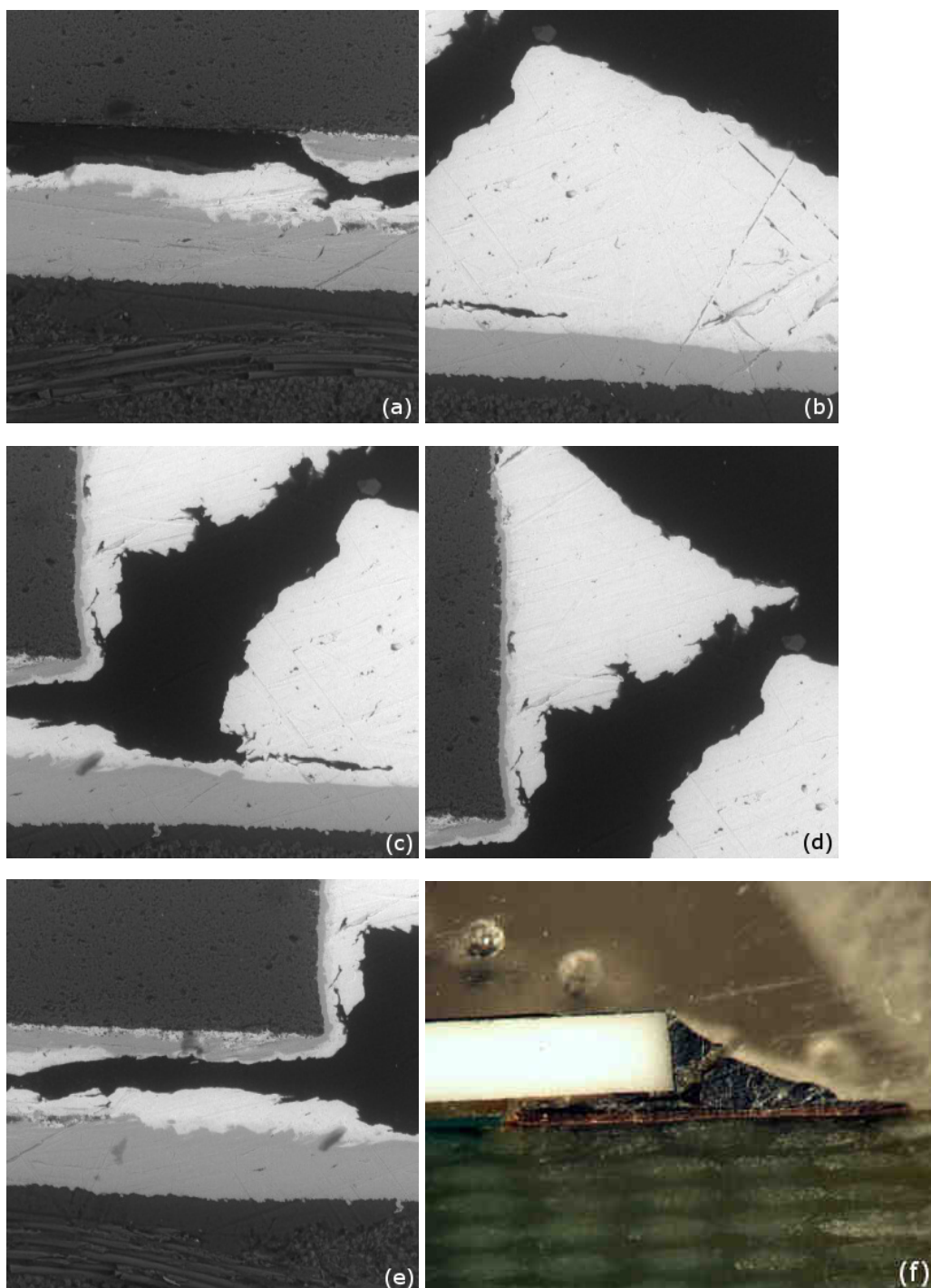


Obr. 22: Popis vzorku; 1 – pájka, 2 - pokovení vývodu pouzdra (součástky), 3 - keramické pouzdro (součástka), 4 - měděná fólie, 5 – FR4

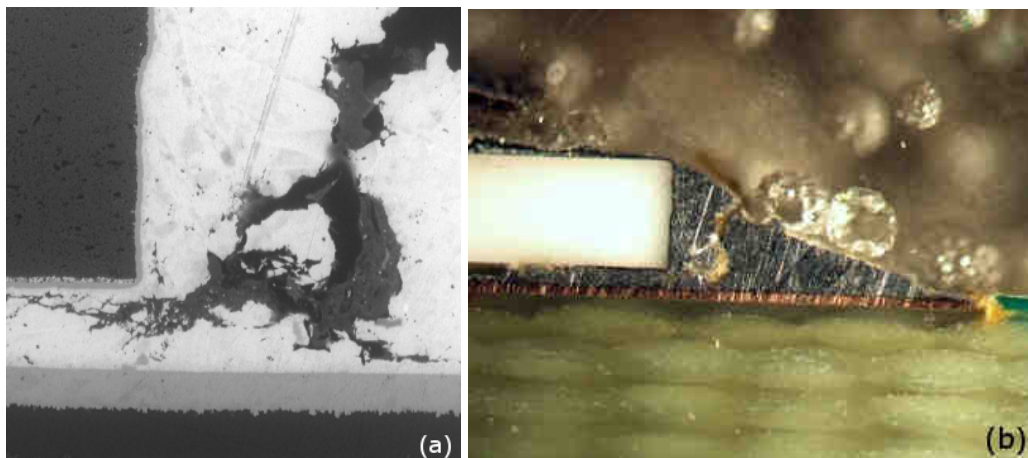
4.4.2 Spoje po namáhání cyklováním při pájení přetavením

Praskliny vzniklé po cyklování vzorků můžeme rozdělit na ty, které lze pozorovat již pouhým okem (Obr. 23), na ty které jsou patrné pod světelným mikroskopem (Obr. 24, Obr. 25, Obr. 26) a na ty, které lze odhalit až pozorováním pomocí environmentálního SEM

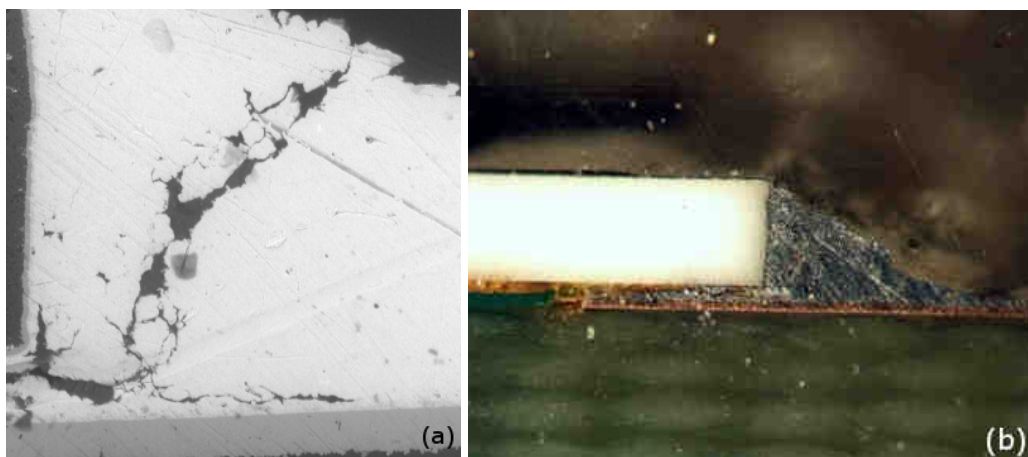
(Obr. 27, Obr. 28). Výsledky všech pozorovaných vzorků (vzorek A1, A2, A3, A4, A5, A6) ukazují, že proces namáhání cyklováním zcela degradoval kvalitu pájených spojů.



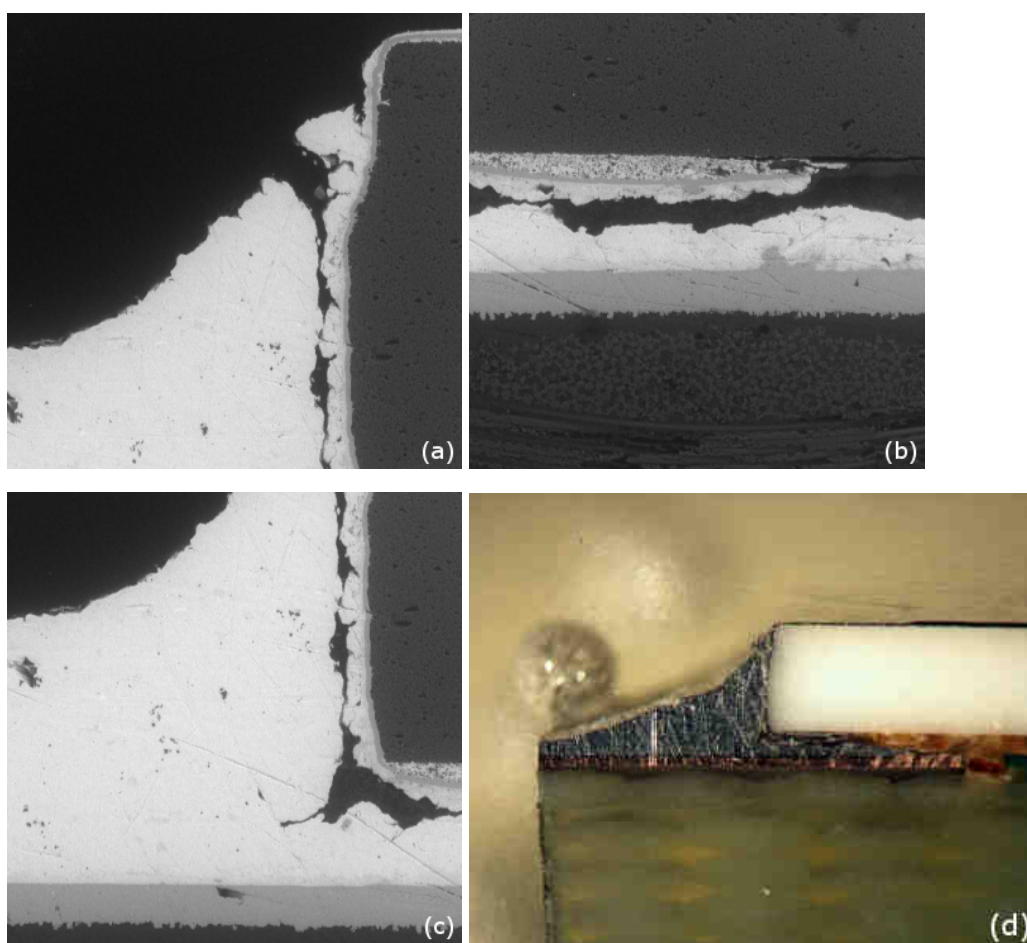
Obr. 23 a, b, c, d, e, f: Vzorek A6 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a) ÷ (e): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (f): snímek z LM - šířka snímku 4,2 mm;



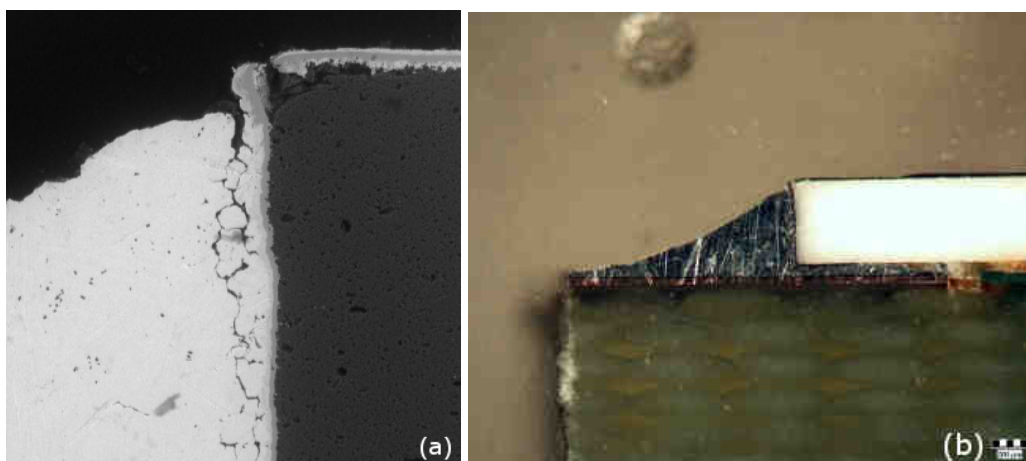
Obr. 24 a, b: Vzorek A3 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a): místo vzorku získané environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (b): snímek z LM – šířka snímku 4,2 mm



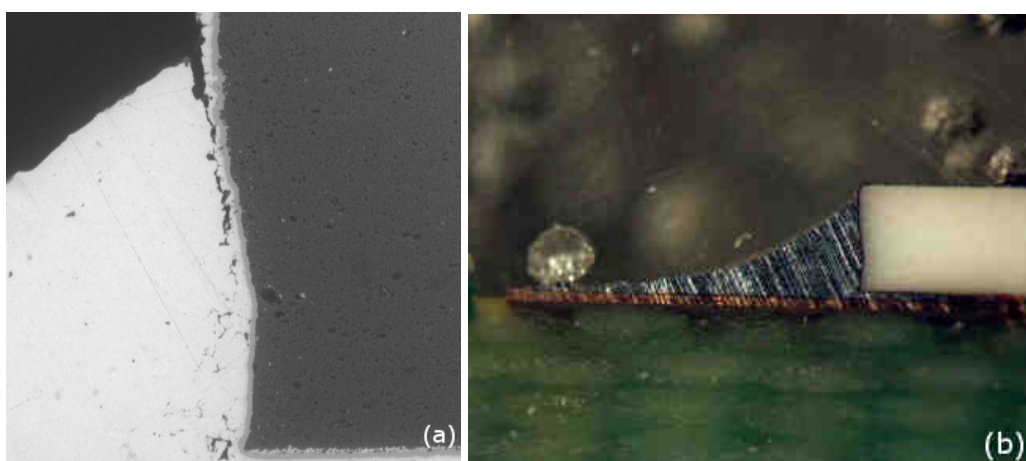
Obr. 25 a, b: Vzorek A4 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a): místo vzorku získané environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (b): snímek z LM – šířka snímku 4,2 mm



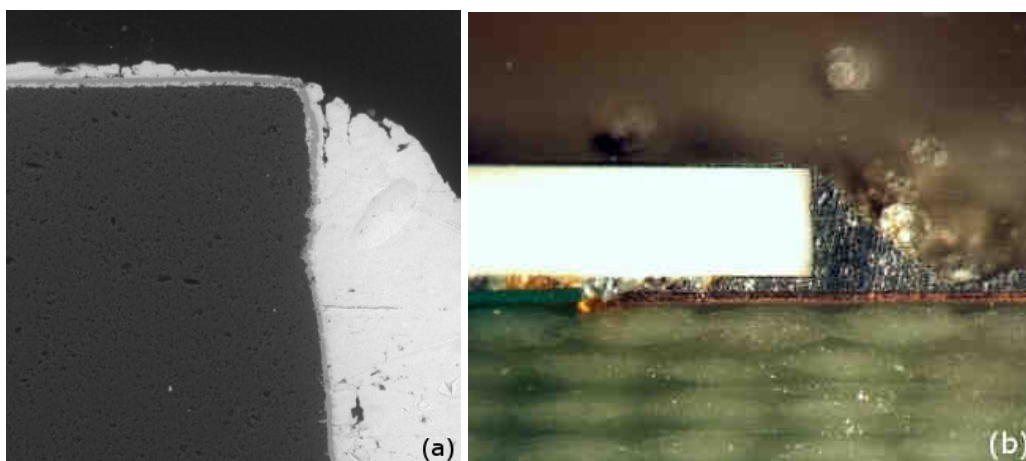
Obr. 26 a, b, c, d: Vzorek A5 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a) ÷ (c): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (f): snímek z LM - šířka snímku 4,2 mm;



Obr. 27 a, b: Vzorek A6 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a): místo vzorku získané environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (b): snímek z LM – šířka snímku 3,5 mm



Obr. 28 a, b: Vzorek A1 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a): místo vzorku získané environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (b): snímek z LM – šířka snímku 4,2 mm

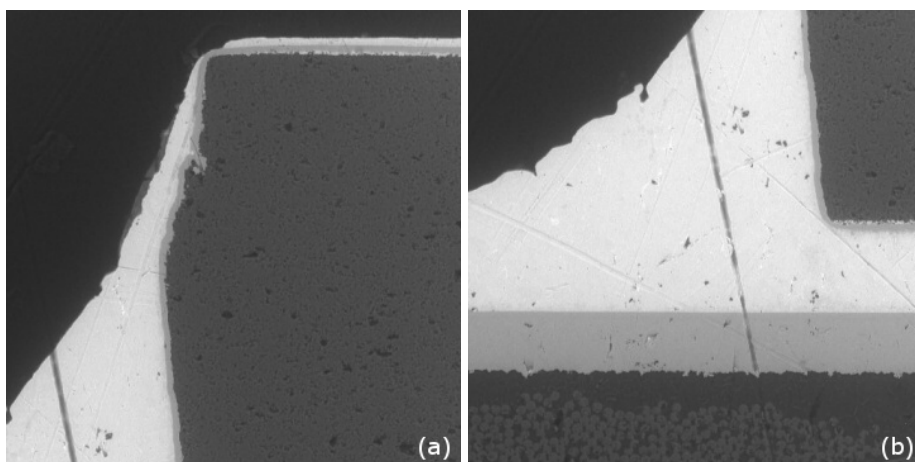


Obr. 29 a, b: Vzorek A2 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, tloušťka šablony: 150 μm , namáháno cyklováním); (a): místo vzorku získané environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm , (b): snímek z LM – šířka snímku 4,2 mm

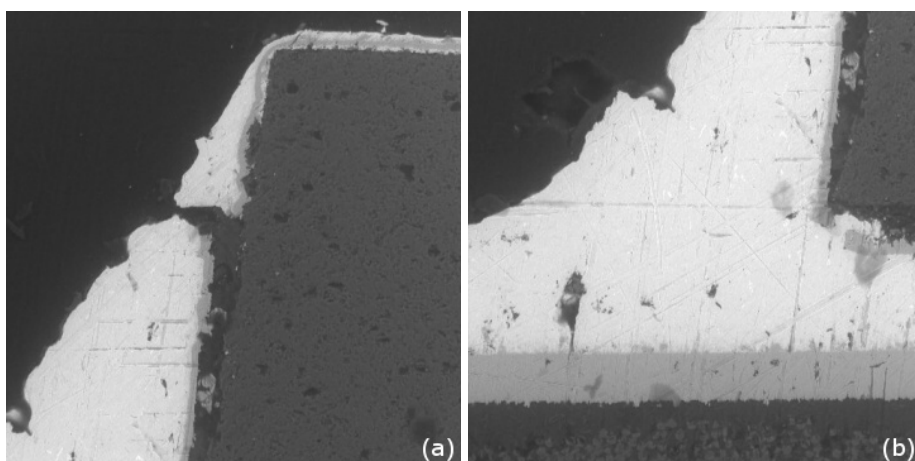
4.4.3 Spoje po namáhání stárnutím při pájení přetavením

Tloušťka měděné fólie - 70 μ m

Proces stárnutí se na porovnávaných vzorcích projevil jasnou degradací spoje (Obr. 31). V tomto případě došlo však k odtržení pokovení vývodu keramického pouzdra (součástky) od celé levé části. To lze přisuzovat mimo jiné také rozdílnému koeficientu roztažnosti materiálu FR4 a keramického pouzdra [16].



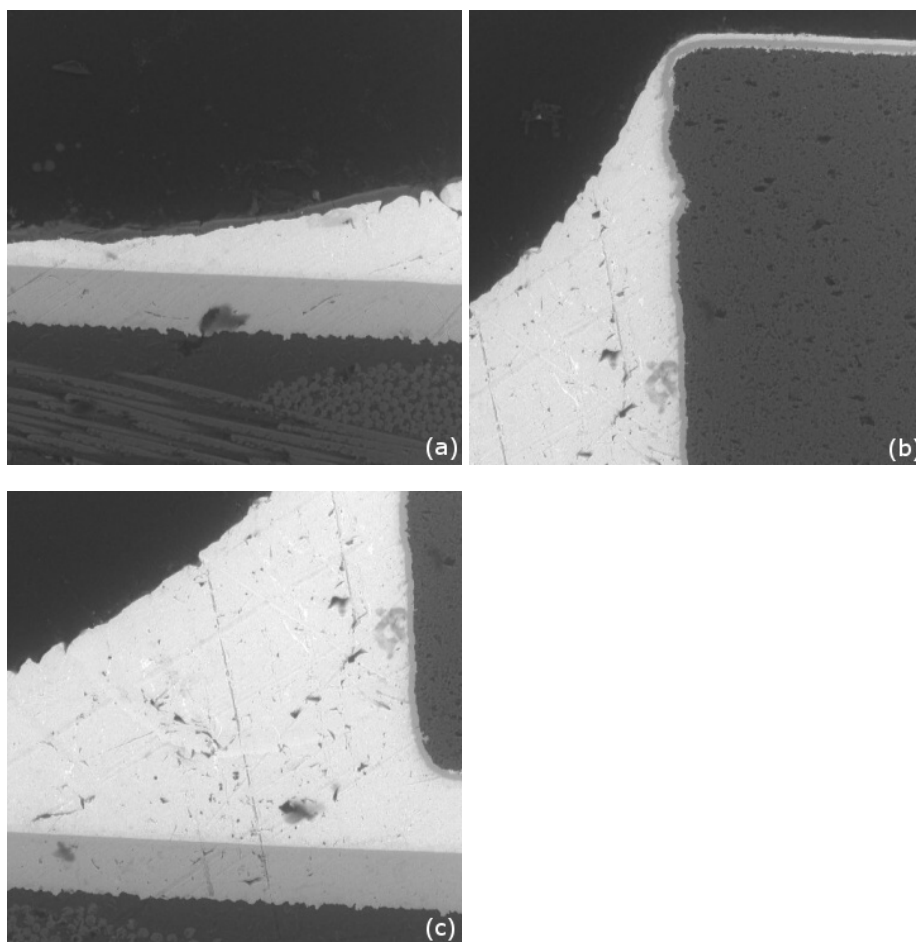
Obr. 30 a, b: Vzorek B1 (tloušťka fólie: 70 μ m, pájka SAC 305, pájeno přetavením, před stárnutím);
(a), (b): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μ m



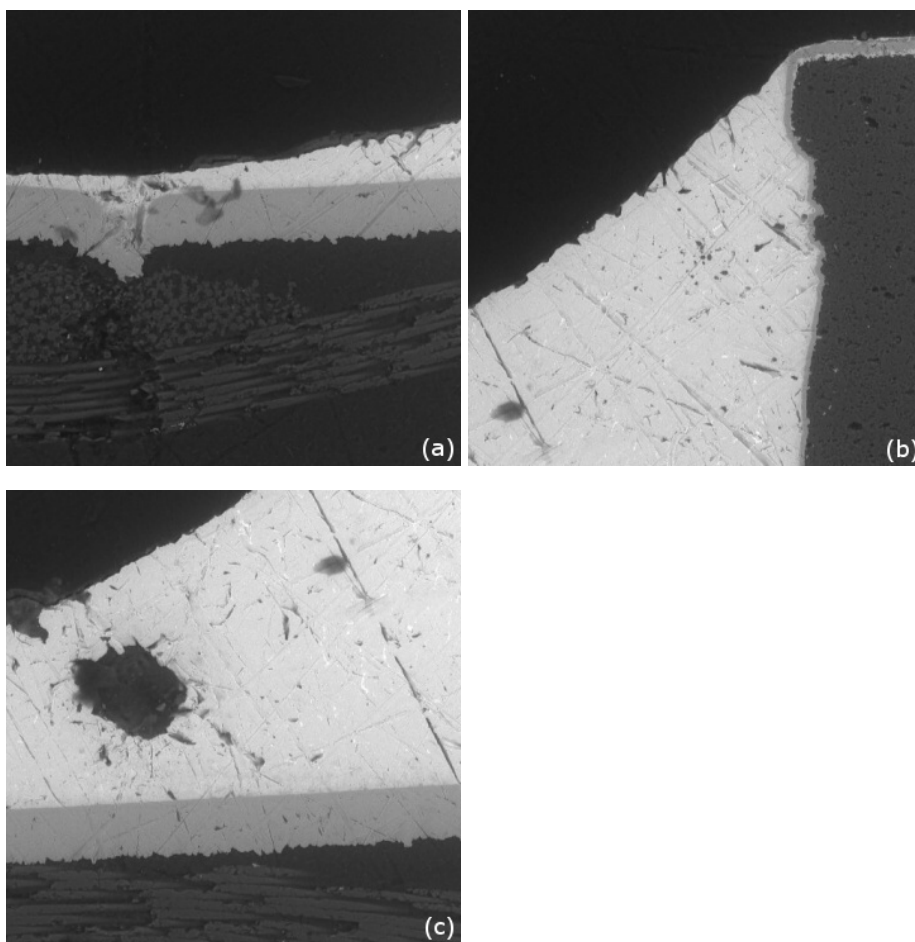
Obr. 31 a, b: Vzorek B2 (tloušťka fólie: 70 μ m, pájka SAC 305, pájeno přetavením, po stárnutí);
(a), (b): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μ m

Tloušťka měděné fólie - 35 μ m

Na Obr. 33 je vidět vnitřní dutina, vzniklá zřejmě již v době nanášení pájky. Lze předpokládat negativní vliv této vady na elektrické vlastnosti spoje. Na stejném obrázku je také patrný „propad“ měděné fólie a pájky.



Obr. 32 a, b, c: Vzorek C1 (tloušťka fólie: 35 μ m, pájka SAC 305, pájeno přetavením, před stárnutím);
(a)÷(c): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μ m

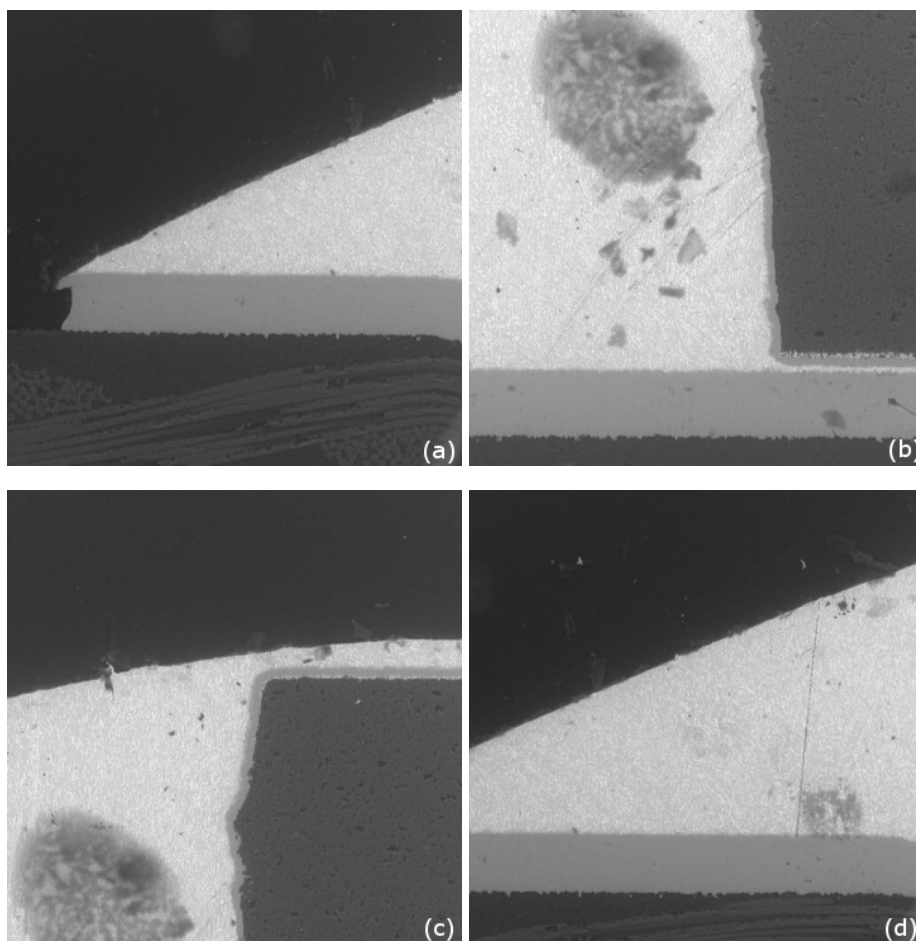


Obr. 33 a, b, c: Vzorek C2 (tloušťka fólie: 35 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, po stárnutí);
(a)-(c): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm

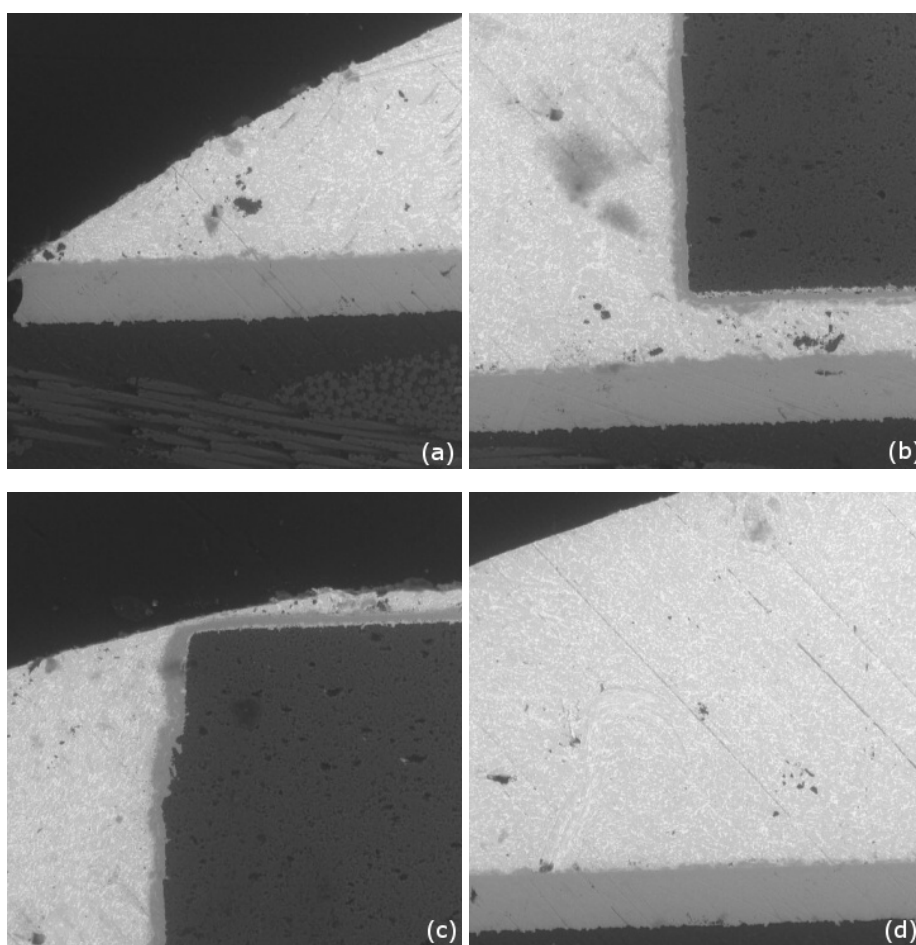
Vliv tloušťky měděné fólie na kvalitu pozorovaného spoje lze považovat za zanedbatelný [15].

4.4.4 Spoje po namáhání stárnutím při pájení vlnou

Na Obr. 34 je patrný tmavá skvrna, jedná se však o nečistotu vzniklou přípravou během pozorování vzorku. Spoje vzorků D1 (Obr. 34) a D2 (Obr. 35) byly pájeny vlnou pájkou Sn63Pb37. Je zřejmé, že proces stárnutí se na kvalitě spojů projevil nepatrně.



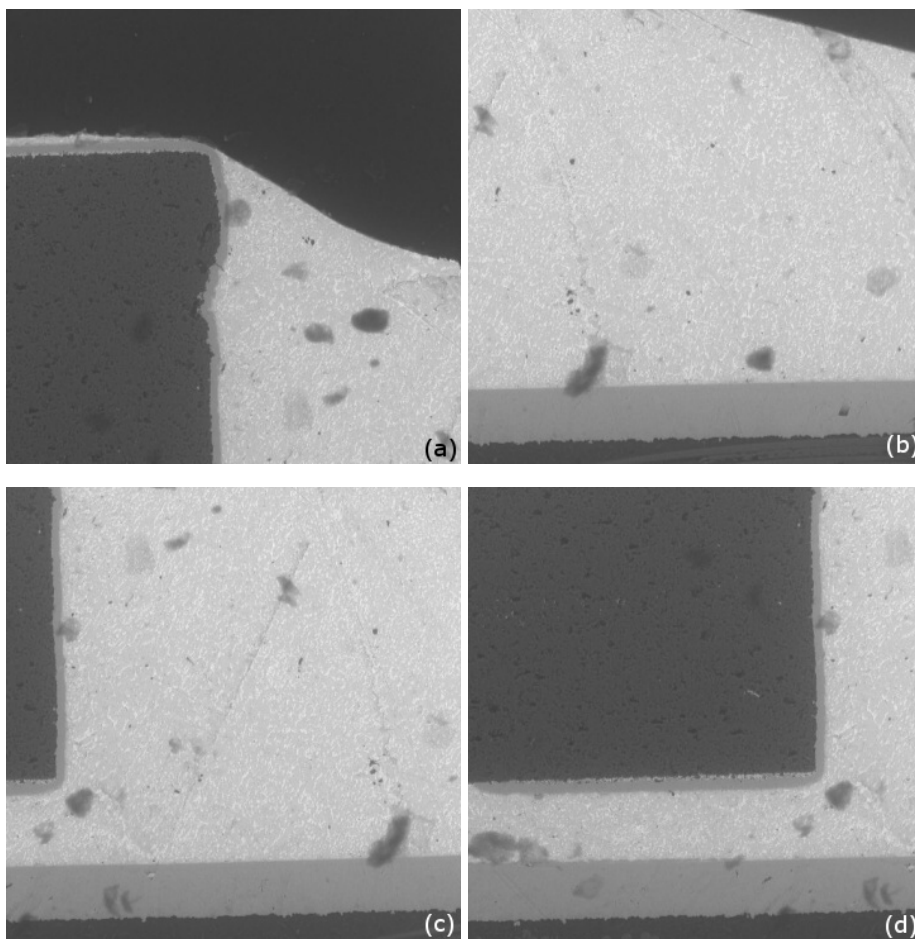
Obr. 34 a, b, c, d: Vzorek D1 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka Sn63Pb37, pájeno vlnou, před stárnutím);
(a)-(d): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm



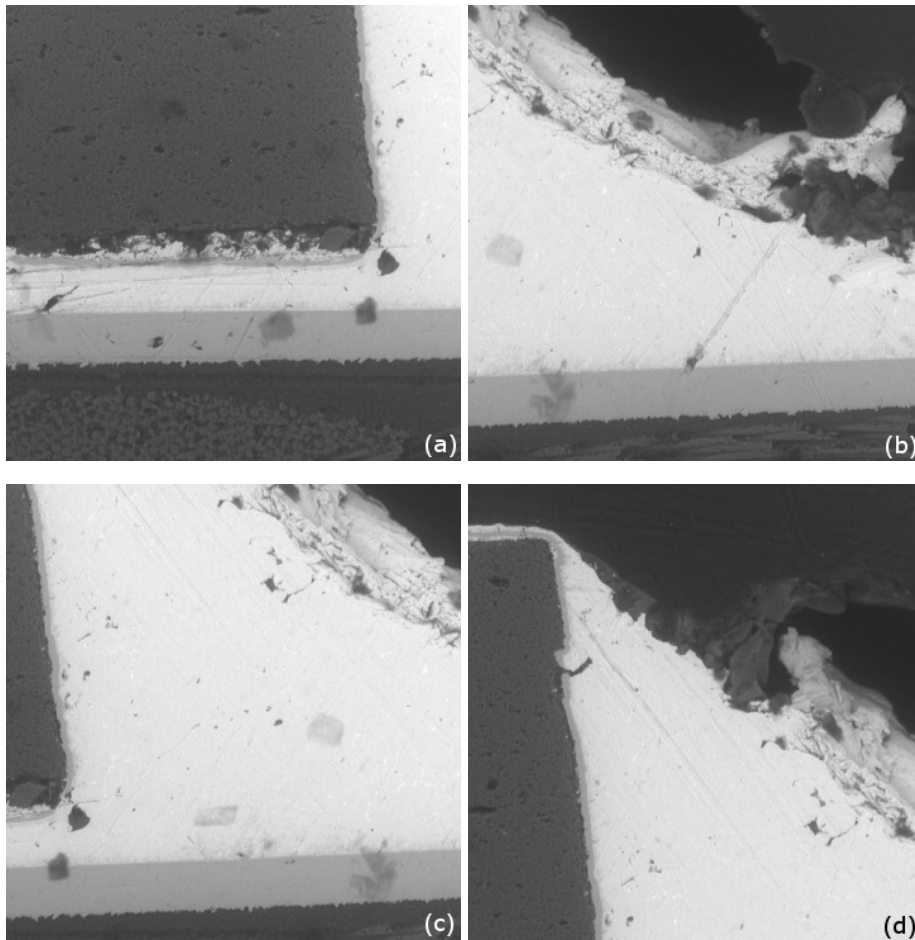
Obr. 35 a, b, c, d: Vzorek D2 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka Sn63Pb37, pájeno vlnou, po stárnutí);
(a)-(d): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm

4.4.5 Spoje po namáhání stárnutím při pájení přetavením vs. vlnou

Vzorky D2 (Obr. 36) a B2 (Obr. 37) byly vystaveny stejnému procesu stárnutí. Z porovnání snímků je ale patrné, že spoje pájené vlnou (pájka Sn63Pb37) jsou odolnější než spoje pájené přetavením (pájka SAC 305). Toto lze však konstatovat jen pro naše vzorky a pro daný typ procesu stárnutí. Za nejzávažnější vadu u vzorku pájeného přetavením (Obr. 37) lze považovat odtržení keramického pouzdra od jeho pokovení. Na Obr. 36 jsou patrné tmavé skvrny, jedná se však o nečistoty vzniklé přípravou během pozorování vzorku.



Obr. 36 a, b, c, d: Vzorek D2 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka Sn63Pb37, pájeno vlnou, po stárnutí);
(a)-(d): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm



Obr. 37 a, b, c, d: Vzorek B2 (tloušťka fólie: 70 μm , pájka SAC 305, pájeno přetavením, po stárnutí);
(a)-(d): různá místa vzorku získaná environmentálním SEM - šířka snímku 400 μm

4.5 Shrnutí

Při sledování vlivu procesu namáhání cyklováním (6000 cyklů, teplota od -20°C do 120°C), patrném na Obr. 23 až Obr. 29 bylo zjištěno, že míra degradace spojů přesáhla tolerovatelnou mez. Některé poruchy byly pozorovatelné pouhým okem, avšak pro objektivní diagnostiku poruch pájených spojů je třeba použít např. světelný mikroskop nebo environmentální SEM. Některé defekty byly odhaleny až pomocí environmentálního SEM (Obr. 28, Obr. 29), proto se tento nástroj ukázal jako vhodnější. Na základě porovnání všech snímků lze říci, že procentuální počet závad přesáhnul 90%.

Dále byl sledován vliv procesu stárnutí (150°C po dobu 14 dnů) na následující vzorky. Dvojice vzorků B1 a B2 a dvojice C1 a C2 byly pájeny přetavením (pájka SAC 305) a lišily se tloušťkou měděné fólie. Vzorky D1 a D2 byly pájeny vlnou (pájka Sn63Pb37). Po vyhodnocení snímků (Obr. 30 až Obr. 37) lze konstatovat, že proces stárnutí se projevil více negativně při pájení přetavením pájkou SAC 305 než při pájení vlnou pájkou Sn63Pb37. Dle předpokladu [15], u vzorků B1, B2, C1 a C2 lze vliv tloušťky měděné fólie na kvalitu pozorovaného spoje považovat za minimální.

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo:

- seznámit se s problematikou detekce signálních elektronů v SEM a environmentální SEM a prvkové analýzy v SEM,
- sledovat a vyhodnotit strukturu spojů mezi pájkou a deskami plošných spojů, které byly namáhány různými způsoby stárnutí.

Teoretická část diplomové práce se zabývá popisem základních principů činnosti rastrovacího elektronového mikroskopu a environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Obsahuje také úvod do problematiky detekce signálních elektronů a RTG záření v uvedených mikroskopech.

Experimentální část je zaměřena na sledování projevů namáhání cyklováním a stárnutím na struktury spojů mezi pájkou a deskami plošných spojů. Pro uvedené pozorování byl zvolen scintilační detektor zpětně odražených elektronů, který poskytuje obraz s vysokým materiálovým kontrastem. Segmentový ionizační detektor nebyl pro pozorování využit, protože v důsledku vysokého koeficientu emise sekundárních elektronů v elektricky nevodivých oblastech vzorku vyvolaného nabíjením těchto oblastí při dopadu primárních elektronů docházelo k potlačení pozorovaných detailů ve snímku. Prvkovou analýzu nebylo možné vykonat, neboť detektor RTG záření nebyl v průběhu experimentů k dispozici.

Na základě experimentu bylo zjištěno, že proces namáhání cyklováním (6000 cyklů, teplota od -20°C do 120°C), prováděným ve výzkumu probíhajícím na Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT v Brně, má na spoje pájené přetavením pájkou SAC 305 silně negativní až destruktivní vliv.

Dále bylo zjištěno, že proces stárnutí (150°C po dobu 14 dnů), prováděný v témže výzkumu, se projevil více negativně při pájení přetavením pájkou SAC 305 než při pájení vlnou pájkou Sn63Pb37.

Práce dále porovnává metody diagnostiky zmíněných poruch pomocí výbrusů vybraných částí desky plošných spojů s využitím vizuální kontroly, světelného mikroskopu a environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu. Jako nejvhodnější bylo

stanoveno pozorování pomocí environmentálního SEM, kde bylo možné detekovat poruchy, které použitý světelný mikroskop nebyl schopen rozlišit, a přitom mohou mít zásadní dopad na spolehlivost pájených spojů. Byť je tato metoda diagnostiky pomocí výbrusů pro desku plošných spojů destruktivní, využití měření elektrických veličin, které může být provedeno nedestruktivně, by nemuselo odhalit výše uváděně poruchy spojů, které mají negativní vliv na správnou funkci desky plošných spojů a snižují její životnost.

Výsledky experimentu přinesly nové poznatky v diagnostice kvality desek plošných spojů a výsledky práce jsou využity ve výzkumu kvality desek plošných spojů po namáhání.

6. Použitá literatura a zdroje

- [1] REIMER, L.: *Scanning electron microscopy*. Berlin: Springer Verlag, 1985, 457 stran. ISBN 3-387-13530-8.
- [2] počítačový server [on-line] *Institute of Parasitology*, dostupné na internetu: < www.paru.cas.cz >, stav k 8. 2. 2008.
- [3] počítačový server [on-line] *Katedry textilních materiálů*, dostupné na internetu: < www.ft.vslib.cz/depart/ktm/ >, stav k 8. 1. 2008.
- [4] HULÍNSKÝ, V. a JUREK, K.: *Zkoumání látek elektronovým paprskem*. Praha: SNTL, 1982. 401 stran.
- [5] MORGAN, S. W., PHILLIPS, M. R.: *Gaseous scintillation detection and amplification in variable pressure scanning electron microscopy*. J. Appl. Phys. (Journal Society of Applied Physics), Vol. 100, 2007.
- [6] JIRÁK, J.; FRANK, L.; REK, A.; ROZSÍVALOVÁ, Z.: *Speciální diagnostika*. Skriptum VUT Brno.
- [7] počítačový server [on-line] *Eldin*, dostupné na internetu: < www.edlin.cz/fei/fei.htm >, stav k 8. 4. 2008.
- [8] STOKES, D.J.: *Recent advances in elektron imaging, image interpretation and applications: enviromental scanning elektron microscopy*. University of Cambridge, UK, 2003.
- [9] MIKA, F.; FRANK, L.: *Kvantifikace hustoty rozložení dopantu v polovodiči s pomocí REM*. dostupné na internetu: < <http://www.microscopy.cz/downloads/Mikrosko1.pdf> >, stav k 2. 5. 2008.
- [10] počítačový server [on-line] *Ústavu jaderné fyziky AV ČR*, dostupné na internetu: < <http://neutron.ujf.cas.cz/> >, stav k 8. 2. 2008.
- [11] AUTRATA, R., JIRÁK, J.: *Metody analýzy povrchů – iontové, sondové a speciální metody, část Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie*. Praha: Academia, 2002. s. 458-484. ISBN 80-200-0594-3.
- [12] SEILER, H.: *Secondary electron emission in the scanning electron microscope*. J. Appl. Phys. (Journal of Applied Physics), Vol. 54, No. 11, 1983.
- [13] počítačový server [on-line] *Kameny.valka*, dostupné na internetu: < <http://kameny.valka.cz> >, stav k 8. 2. 2008.
- [14] počítačový server [on-line] *www.olympus.co.uk*, dostupné na internetu: < http://www.olympus.co.uk/microscopy/26_LEXT.htm >, stav k 8. 5. 2008.
- [15] Konzultace s Ing. Petrem Stejskalem v období mezi 3.4.2008 až 21.5.2008.

- [16] ŠANDERA, J.: *Průběh řešení a dosažené výsledky v oblasti návrhu a měření spolehlivosti mikroelektronických 3D struktur*. [on-line], dostupné na internetu: < <http://www.smtplus.cz/Coresime/3dstruk.pdf> >, stav k 20. 5. 2008.
- [17] *LaB6-CeB6_Applications_Guide*. [on-line], dostupné na internetu: < http://www.fei.com/uploadedFiles/Documents/Components/LaB6-CeB6_Applications_Guide.pdf >, stav k 21. 5. 2008.

7. Seznam použitých zkratek a symbolů

A/D	Analog/Digital
BSE	zpětně odražené elektrony
DPS	deska plošných spojů
EDS	energievě disperzní spektroskopie
FR4	základní materiál DPS
IR	infračervené záření
K_{α}, K_{β}	označení čar sérií spektra charakteristického RTG záření
$L_{\alpha}, L_{\beta 1}, L_{\beta 2}, L_{\gamma}$	označení čar sérií spektra charakteristického RTG záření
LM	světelný mikroskop
PE	primární elektrony
REM	rastrovací elektronová mikroskopie
RTG	rentgenové záření
SE	sekundární elektrony
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
SM	světelný mikroskop
SPM	rastrovací mikrosondy
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
UV	ultrafialové záření
WDS	vlnově disperzní spektroskopie
d	průměr elektronového svazku [m]
E	energie [eV]
E_{K1}, E_{K2}	kritické energie [eV]
E_P	energie PE [eV]
I	proud [A]
N	četnost RTG kvant
$N(E)$	energetické rozložení signálních elektronů
p	tlak [Pa]
T	teplota [°C]

t	čas [s]
U	napětí [V]
Z	protonové (atomové) číslo [-]
δ	koeficient emise SE [-]
η	koeficient emise BSE [-]
λ	vlnová délka [m]
σ	celkový koeficient emise signálních elektronů [-]
\varnothing	úhel dopadu PE [°]

8. Seznam příloh

A. SOUBORY VŠECH SNÍMKŮ V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ

Příloha A

Soubory všech snímků pořízených v rámci experimentu jsou přiloženy na datovém nosiči umístěném na konci diplomové práce.