



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ELEKTROMIGRACE TAVIDLOVÝCH ZBYTKŮ NA POVRCHU DPS

ELECTROMIGRATION OF FLUX RESIDUES ON PCB SURFACE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Tylich

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO 2016



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**  
Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Ondřej Tylich

**ID:** 146119

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Elektromigrace tavidlových zbytků na povrchu DPS

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku elektromigrace, tavidel a tavidlových zbytků.

Navrhněte metodu a proveďte měření povrchového izolačního odporu i ionizovatelných nečistot tavidlem kontaminovaného SIR obrazce na DPS před pájením, po pájení a po izotermálním ohřevu. Ionizovatelné nečistoty měřte konduktometrickou metodou a porovnejte dosažené výsledky.

Proveďte měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků i konformními povlaky zapouzdřených tavidlových zbytků doporučených materiálů. Zaměřte se na vliv teploty, vlhkosti a přiloženého napětí. Sledujte a dokumentujte elektromigraci.

Vyhodnoťte a diskutujte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 26.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**Konzultant diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D., 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**

Diplomová práce seznamuje s problematikou elektromigrace, tavidel a tavidlových zbytků. Obsahuje návrh metody měření povrchového izolačního odporu, informace o vybraných typech tavidel. Zaměřuje se na vliv teploty, vlhkosti a frekvence. Práce popisuje praktické měření rezistivity i ionizovatelných nečistot tavidlem kontaminovaného SIR obrazce na DPS. Je použita konduktometrická metoda a metoda měření SIR dle IPC-25-B a sledován vliv vlhkosti, teploty a přiloženého napětí na změnu povrchového izolačního odporu. V závěru jsou dosažené výsledky diskutovány.

## **Klíčová slova**

Elektromigrace, tavidlo, tavidlové zbytky, ionizovatelné nečistoty, konduktometrická metoda, dendrit.

## **Abstract**

Diploma thesis introduces the problems of electromigration, fluxes and flux residues. It includes a proposal for methods of measuring surface insulation resistance, information about selected types of fluxes and conformal coatings. It focuses on the influence of temperature, humidity. There are applied conductometric method and method of measuring SIR by IPC-25-B. The thesis describes the practical measurement of SIR and ionic contamination of PCB covered with flux and influence of RH, temperature and applied voltage is evaluated and discussed.

## **Key words**

Electromigration, flux, flux residues, ionic impurities, conductometric method, dendrite.

## **Bibliografická citace**

TYLICH, O. *ELEKTROMIGRACE TAVIDLOVÝCH ZBYTKŮ NA POVRCHU DPS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

## **Prohlášení autora o původnosti díla**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Elektromigrace tavidlových zbytků na povrchu DPS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 **§ 270 Zákona č. 40/2009 Sb., trestního zákoníku**.

V Brně dne 25. května 2016

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

## Obsah

1	Tavidla .....	1
1.1	Cobar 390 RX HT [12].....	3
1.2	IF 2005C [13] .....	4
2	Konformní povlaky.....	5
2.1	Bectron PL 1104 [10].....	6
2.2	Elpeguard SL 1301 ECO-FLZ [11].....	6
3	Pájecí pasty .....	7
4	Povrchové úpravy .....	8
5	Elektromigrace kovu.....	9
5.1	Síly ovlivňující pohyb iontů.....	10
5.2	Rozdělení elektromigrace.....	11
5.2.1	Elektrolytická elektromigrace .....	11
5.2.2	Suchá elektromigrace .....	15
5.2.3	Mechanismy defektů vznikajících elektromigrací.....	16
6	Metody měření vlivu ionizovatelných nečistot .....	17
6.1	Metoda měření povrchového izolačního odporu (SIR).....	17
6.2	Metody měření kontaminace DPS konduktometrickou metodou .....	19
6.2.1	Metoda ROSE (resistivity of solvent extract).....	19
6.2.2	SEC (Solvent Extract Conductivity).....	19
6.2.3	Ionograf .....	20
6.2.4	Omegametr .....	20
7	Praktická část.....	21
7.1	Příprava testovacích DPS .....	21
7.2	Návrh měřicí metody.....	22
7.3	Měření SIR před a po znečištění tavidly a po stárnutí .....	27
7.3.1	Průběh testování s tavidly COBAR 390 RX HT a IF 2005C .....	28
7.3.2	Naměřené výsledky .....	29
7.3.3	Vyhodnocení výsledků .....	30
7.4	Měření SIR s tavidlovými zbytky zapouzdřenými v konformním povlaku..	31
7.4.1	Průběh testování s konformním povlakem .....	31
7.4.2	Naměřené výsledky .....	31

7.4.3	Vyhodnocení výsledků .....	32
7.5	SIR desky znečištěné tavidlem které prošlo pájecím procesem.....	32
7.5.1	Průběh testování .....	33
7.5.2	Naměřené výsledky .....	33
7.5.3	Vyhodnocení výsledků .....	35
7.6	Vyhodnocení testů s tavidly .....	35
7.6.1	Vyhodnocení testů s tavidlem IF 2005C .....	35
7.6.2	Vyhodnocení testů s tavidlem COBAR RX HT.....	36
7.7	Měření ionizovatelných nečistot metodou ROSE .....	38
7.7.1	Výpočet množství tavidla na DPS .....	38
7.7.2	Průběh měření.....	39
7.7.3	Vyhodnocení výsledků .....	39
7.8	Měření ionizovatelných nečistot metodou SEC .....	40
7.8.1	Průběh měření.....	40
7.8.2	Dodatečné měření metodou ROSE.....	40
7.8.3	Vyhodnocení výsledků .....	41
7.9	Měření DPS pokryté olovnatou pájkou nanesenou vlnou .....	41
7.9.1	Průběh měření.....	41
7.9.2	Naměřené výsledky .....	41
7.9.3	Vyhodnocení výsledků .....	43
7.10	Měření DPS s nanesenou pájecí pastou typu SAC.....	43
7.10.1	Vyhodnocení výsledků .....	46
8	Závěr:.....	53

# Úvod

Veškerá elektronika se v dnešní době neustále zmenšuje a s tím se zmenšují izolační vzdálenosti mezi vodiči. Častým problémem v přítomnosti horších okolních podmínek může být vznik elektromigrace, která může kriticky snižovat spolehlivost elektrických zařízení, proto je potřeba sledovat nežádoucí vlivy elektromigrace a možnosti jejich vzniku.

Teoretická část seznamuje s problematikou elektromigrace, tavidel a tavidlových zbytků. Obsahuje informace o složení tavidel a informace o konkrétních tavidlech použitých v praktické části práce, dále pak obsahuje informace o konformních povlacích obecně a jsou zde uvedeny i konkrétní povlaky a jejich vlastnosti, které jsou v plánu pro další experimenty. Krátce jsou zmíněny pájecí pasty a popsány tři konkrétní pasty použité při testech. V práci jsou obsaženy informace o povrchových úpravách a jejich testování na elektromigraci a povrchový izolační odpor. Součástí práce jsou také kapitoly o elektromigraci a jejích druzích, vlivech a způsobech vzniku. V závěru teoretické části jsou rozebrány metody měření vlivu ionizovatelných nečistot. Podrobněji je zmíněna metoda měření povrchového izolačního odporu a dále pak různé metody měření ionizovatelných nečistot.

Praktická část je zaměřena na sestavení pracoviště, chystání vzorků pro měření a následně na samotné měření povrchového izolačního odporu, měření ionizovatelných nečistot konduktometrickými metodami ROSE a SEC a testování elektromigrace. V praktické části jsou popsány metody měření a uvedeny výsledné hodnoty s odkazy na přílohy.

Cílem diplomové práce je seznámit se s teorií elektromigrace, tavidel a tavidlových zbytků. Navrhnout metodu a provést měření povrchového izolačního odporu kontaminovaného SIR obrazce, měření konduktometrickou metodou a testy elektromigrace. Porovnání naměřených hodnot povrchového izolačního odporu, sledování elektromigrace a vyhodnocení výsledků.

# 1 Tavidla

Tavidla jsou látky sloužící ke zlepšení pájecího procesu. Při jejich zahřívání dochází k odstraňování oxidů, nečistot a napomáhá chránit odhalený povrch i následně formující se pájený spoj před oxidací během procesu pájení. Tavidlo reagující s oxidy způsobí zvětšení povrchového napětí a tím zvýšení smáčivosti. [19][13]

## Základní rozdělení tavidel dle nosiče

- RO – Rosin – tvořena přírodní pryskyřicí z jehličnatých stromů
- RE – Resin – tvořena ze syntetických látek, popřípadě kombinací s ROsin
- OR – Organic – organické kyseliny
- IN – Inorganic – nosiče na anorganické bázi

Samotné tavidlo může být složeno z kombinace nosičů a je značeno dle nosiče s největším obsahem. [19]

## Aktivátory

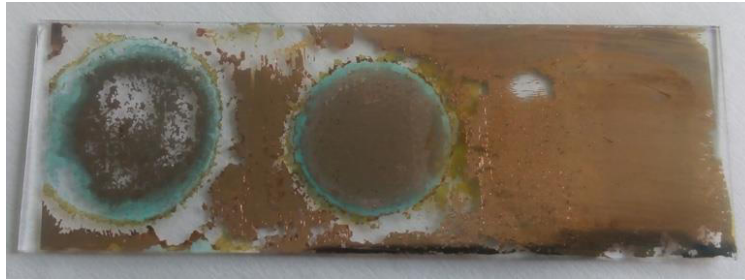
Aktivátory slouží jako činidla pro narušení a odstranění oxidů z povrchu pájeného spoje. Účelem je vytvořit nezoxidovaný, snadno smáčitelný povrch a tím usnadnit a zkvalitnit samotné pájení.[19][13]

Používají se různé druhy aktivátorů, některé agresivnější a některé méně agresivní. Mezi agresivnější patří např. kyselina chlorovodíková, kyselina fosforečná, soli minerálních kyselin s aminy. Agresivnější aktivátory usnadňují korozi, proto je potřeba jejich důkladné očištění, aby nezůstaly žádné jejich zbytky.[19][13]

Méně agresivnější aktivátory reagují s oxidy pouze při zvýšené teplotě. Typicky se používají sloučeniny kyseliny karboxylové dále pak mastné kyseliny jako kyselina olejová a kyselina stearová, dikarboxylové kyseliny nebo aminokyseliny. [19] [13]

Aktivátory se dělí převážně podle složení na aktivátory na organické bázi s nebo bez halogenidů a na aktivátory na anorganické bázi.[19] [13]

Úroveň aktivity zbytků tavidla se dělí do skupin L0, L1 pro nízkou aktivaci, M0 a M1 pro střední a H0 a H1 pro vysokou. Testování aktivity tavidlových zbytků se provádí pomocí testu na měděné zrcátko, viz Obr. 1. Na obrázku můžeme vidět test na měděné zrcátko s tavidlem skupiny L a H. Lze vidět téměř neporušené zrcátko u tavidla s nízkou aktivací a odstraněnou měď u tavidla s vysokou aktivací.



Obr. 1 Test na měděné zrcátko.

## Rozpouštědla

Přidávají se do tavidla za účelem usnadnění procesu nanášení. Vypaří se během přehřevu ještě před samotným pájením, pokud by nedošlo k úplnému odpaření, mohlo by dojít k odpařování během pájení a tím k rozstříkování pájky nebo pájecí pasty do okolí spoje. [19] [13]

Dělí se na rozpouštědla na organické a anorganické bázi, příp. i na organické bázi s větším, či menším podílem rozpouštědla na anorganické bázi. Organické jsou tvořeny alkoholy (VOC) a anorganické rozpouštědlo je voda (VOC free). [19] [13]

## Aditiva

Aditivy jsou myšleny látky upravující vlastnosti tavidla dle potřeby podle místa použití. Používají se např. rheologické modifikátory pro pájecí pasty, stabilizátory pěny pro tavidla používané při pájení vlnou a antishlukovací činidla také pro pájení vlnou, plastifikátory pro trubičkové pájky, barviva, tenzidy pro snížení povrchového napětí. [19] [13]

## Funkce tavidla

Hlavní funkcí tavidla je tedy odstranění oxidů a nečistot, urychlení smáčecího procesu, zlepšení přenosu tepla, ochrana před opětovnou oxidací během procesu pájení, čímž pomáhá k vytvoření spolehlivého pájeného spoje. [19] [13]

## Tavidlové zbytky

Při neúplném rozložení tavidla při procesu pájení desky plošných spojů zůstávají na povrchu tavidlové zbytky. Tyto zbytky mohou způsobit řadu vážných problémů. Mohou mít za následek zrychlenou korozi spojů, nebo mohou být dokonce vodivé. Tavidlové zbytky reagují s vlhkostí, popřípadě i s přiloženým napětím a mohou mít za následek elektromigraci. Je potřeba tyto zbytky odstranit vhodným rozpouštědlem, které je voleno dle doporučení výrobce tavidla. [19] [13]

Výjimku tvoří tavidla, která teoreticky není potřeba čistit, označují se jako No Clean tavidla, zbytky těchto tavidel nejsou moc agresivní, většinou jsou jen lehce korozivní

a zanechávají po sobě kovové soli ve formě bílých stop. V současné době se však často i tyto tavidla čistí z důvodů vzhledu, rizika elektromigrace za kondenzačních stavů, ale i změny povrchového izolačního odporu, frekvenčních charakteristik zejména u DPS s malými vzdálenostmi mezi vývody a velkou zástavbovou hustotou. [19] [13]

## Značení tavidel dle vlastností

Značení tavidla dle vlastností můžeme vidět na snímku s tabulkou, viz Obr. 2.

Table 1-1 Flux Identification System

Flux Composition	Flux/Flux Residue Activity Levels	% Halide <sup>1</sup> (by weight)	Flux Type <sup>2</sup>	Flux Designator
Rosin (RO)	Low	<0.05%	L0	ROL0
		<0.5%	L1	ROL1
	Moderate	<0.05%	M0	ROM0
		0.5-2.0%	M1	ROM1
	High	<0.05%	H0	ROH0
		>2.0%	H1	ROH1
Resin (RE)	Low	<0.05%	L0	REL0
		<0.5%	L1	REL1
	Moderate	<0.05%	M0	REM0
		0.5-2.0%	M1	REM1
	High	<0.05%	H0	REH0
		>2.0%	H1	REH1
Organic (OR)	Low	<0.05%	L0	ORL0
		<0.5%	L1	ORL1
	Moderate	<0.05%	M0	ORM0
		0.5-2.0%	M1	ORM1
	High	<0.05%	H0	ORH0
		>2.0%	H1	ORH1
Inorganic (IN)	Low	<0.05%	L0	INL0
		<0.5%	L1	INL1
	Moderate	<0.05%	M0	INM0
		0.5-2.0%	M1	INM1
	High	<0.05%	H0	INH0
		>2.0%	H1	INH1

Obr. 2 Snímek tabulky se značením tavidel. [28]

## Použitá tavidla v praktické části

### 1.1 Cobar 390 RX HT [12]

No-clean tavidlo vhodné pro bezolovnaté pájení. Při správné aplikaci je kompatibilní s konformními povlaky na bázi akrylátu, polyuretanu a silikonových pryskyřic. Tavidlo obsahuje rozpouštědla, je tedy třeba kontrolovat kompatibilitu nekovových částí, které s ním přijdou do styku. Rozpouštědlo má schopnost rozkládat kalafunu a syntetické pryskyřice. Použití kabelů a komponent z PVC a Vitonu by mělo být omezeno, aby nedošlo k jejich poškození. Materiály s dobrou odolností jsou polyethylen, polypropylen, nylon a teflon. [12]

### **Fyzikální a chemické vlastnosti**

Množství sušiny:	2,2 % +- 0,5 %
Hustota při 20 °C:	0,813 kg/dm <sup>3</sup> +- 0,5 %
Obsah vody:	5 %
Kyselost:	15,8 mg KOH/g +- 2,5 %
Výparná teplota:	12,4 °C
Barva:	bezbarvá

### **Aplikace tavidla**

Doporučená teplota pro aplikaci tavidla se pohybuje v rozmezí 18-25 °C. Pro aplikaci je možno použít různých metod, je potřeba zajistit dostatečné očištění všech částí, které přijdou do styku s tavidlem. Tavidlo Cobar 390 RX HT je bezbarvé a pokud by došlo ke kontaminaci z důvodu nedostatečně očištěných pracovních částí, projevilo by se zabarvením do žlutého odstínu. Samotnou aplikaci tavidla je možno provést sprejovým popřípadě pěnovým nanášením. Pro sprejové nanášení je považováno za úspěšné nanesení takové, kdy je na povrchu desky utvořen celistvý povlak tavidla bez odkapávání nadbytečného množství tavidla. [12]

## **1.2 IF 2005C [13]**

Interflux IF 2005C je low solid no-clean tavidlo, vyvinuté speciálně pro selektivní pájení olovnaté i bezolovnaté. Z řady IF 2005-X jde o tavidlo s největším procesním oknem. Lze ho použít i pro vlnové pájení, ale z řady IF 2005-X lze nalézt i vhodnější typy.

IF 2005C zajistí skvělou pájitelnost s bezolovnatými pájkami a prakticky na všech povrchových úpravách (NiAu, I-Sn, HAL, Cu-OSP). Je odolná vůči zvýšeným teplotám při předehřevu a dokonce i vůči delší době kontaktu při samotném pájení. Vzhledem k těmto vlastnostem je IF 2005C výbornou volbou pro selektivní pájení. [13]

### **Fyzikální a chemické vlastnosti**

Množství sušiny:	3,3 % +- 0,3 %
Hustota při 20 °C:	0,813 kg/dm <sup>3</sup> – 0,815 kg/dm <sup>3</sup>
Obsah vody:	3 – 4 %
Kyselost:	26 – 30 mg KOH.g <sup>-1</sup>
Výparná teplota:	15 °C

## **Aplikace tavidla IF 2005C**

Tavidlo IF 2005C je možno nanášet sprejově a pěnově.

U nanášení tavidla je nanesená plocha zpravidla větší než pájená plocha. Měla by být snaha nanést minimální potřebné množství, aby se zamezilo zbytečnému plýtvání a zamezilo se vzniku tavidlových zbytků v místech, kde tavidlo nebylo třeba. [13]

Sprejové nanášení je doporučeno provádět ve dvou směrech tak, aby bylo zaručeno spolehlivé nanesení a dostatečná vrstva na všech místech desky. Homogenní vrstva nanesení se vyhodnotí podobně jako pro tavidlo COBAR 390 RX TH, je třeba dosáhnout celistvé plochy tavidla bez odkapávání a s rovnoměrnou tloušťkou vrstvy. [13]

## **2 Konformní povlaky**

Konformní povlaky slouží k ochraně elektrických obvodů před nepříznivými podmínkami. Ovlivňují povrchový izolační odpor a zajišťují ochranu proti vlhkosti, vlivu chemikálií a prachu. Zvyšují mechanickou odolnost proti nárazům a omezují dendritické růsty na přijatelné meze. Jejich účelem je chránit obvod před projevy stárnutí materiálu, které by mohly mít za následek omezení funkčnosti nebo poruchu. Dendritický růst a tvorbu whiskerů konformní povlaky sice zcela nezastaví, ale značně jejich tvorbu omezí a zpomalí.

Konkrétní konformní povlak se volí dle potřeby. Mohou být např. silikonové pro krytí zařízení, které budou vystaveny vibracím nebo u nich budou některé pružnější části.

Nanášení se může provádět celoplošně, lokálně, manuálně nebo automaticky. Každý způsob má své opodstatnění v závislosti na potřebě krytí, spolehlivosti a produktivity. Pro zpracování malého počtu produktů bez potřeby přesné opakovatelnosti a vysoké kvality, lze použít ruční nanášení nátěrem, ponorem nebo postřikem. Kvalita a opakovatelnost provedení velmi silně závisí na operátorovi. [26]

# Konformní povlaky použité v praktické části

## 2.1 Bectron PL 1104 [10]

Bectron PL 1104 je transparentní konformní povlak na bázi akrylátu splňující poslední požadavky na ochranu elektrických obvodů s nízkou vytvrzovací teplotou. [10]

### Vlastnosti povlaku Bectron PL 1104

- Rychlé vytvrzování při pokojové teplotě, urychlující zvýšenou teplotou.
- Vysoký vnitřní odpor i ve vlhkém prostředí.
- Dobré dielektrické vlastnosti tenké vrstvy.
- Odolný vůči kontaminaci prachem a vysráženou vlhkostí.
- Vydrží vliv slabých kyselin a louhů.
- Dobrá přilnavost při tepelném cyklování.
- Teplotní odolnost do 130 °C.
- Snadná oprava.
- Možnost kontroly pod UV světlem.
- Samozhášecí vlastnosti dle UL 94 V0.

### Sušení

- Ofukováním vzduchem při 23 °C po dobu 90 minut a následně bez proudění vzduchu 25 minut.
- V peci při 80 °C s časem zhruba 15 minut, čas je ovlivněn prouděním vzduchu a ventilací pece.

## 2.2 Elpeguard SL 1301 ECO-FLZ [11]

Povlak zaručující výbornou ochranu proti korozi a elektromigraci pro desky plošných spojů na bázi modifikovaných polyuretanových pryskyřic. Poskytuje ochranu i při zvýšeném působení klimatických jevů, speciálně proti efektu kondenzátů. Je možno snadným způsobem provádět opravy na desce, stačí jen přepájet kontakt skrz povlak, který se odstraní vysokou teplotou pájky a po dokončení znovu nanést lak. [11]

### Vlastnosti povlaku Elpeguard SL 1301 ECO-FLZ

- Bez obsahu aromatických uhlovodíkových rozpouštědel jako je benzen, toluen, xylen.
- Velký vnitřní odpor.
- Možnost kontroly pod UV světlem.
- Vysoká pevnost povrchu po vytvrzení, ochrana před fyzickým poškozením.
- Dobrá stálost vlastností při stárnutí.

- Velmi dobrá odolnost proti korozi díky velmi dobré odolnosti na vysráženou vlhkost.
- Bez samozhášecí vlastnosti, neobsahuje halogenové retardanty hoření.
- Odolný na vliv různých směsí plynů dle DIN EN 60068-2-60.
- Snadná opravovatelnost.

### **Sušení/Vytvrzení**

Sušení může probíhat za pokojové teploty, horkým vzduchem nebo infračerveným ohřevem nebo jejich kombinací. Skládá se ze dvou kroků. Prvním krokem je samotné sušení, vypaření rozpouštědel a druhý krok je oxidační vytvrzení, kde dochází k adsorpci kyslíku z ovzduší. [11]

#### **1. Sušení**

- Úplné vysušení při 23 °C za dobu cca 45 minut.
- Vysušení do nelepivého stavu při 23 °C 80 minut.
- Vysušení do nelepivého stavu při 80 °C 15 minut.

#### **2. Oxidační vytvrzení**

Oxidační vytvrzení při pokojové teplotě zabere více času vzhledem k samotnému procesu adsorpcce kyslíku na povlaku. Je důležité ověřit dokončení vytvrzení, než je možné měřit elektrické vlastnosti samotného povlaku. [11]

Vytvrzení může být urychleno pecí s proudícím vzduchem, s ohledem na teplotní odolnost osazených součástek. Čas vytvrzování je závislý na proudění vzduchu, tvaru desky i tloušťce povlaku. [11]

## **3 Pájecí pasty**

Pájecí pasta je směs zrníček pájky, tavidla a reologických modifikátorů. Hlavní výhodou je přesně nanášené množství pájky i tavidla. Pasty se nanášejí sítotiskem, šablonovým tiskem popřípadě disperzně. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Pasty můžeme dělit dle velikosti kovových kuliček na typ 1-6. Všechny uvedené pasty jsou typu 3 s průměrem částic 45-25 µm.

V praktické části budou použity pasty SAC305 od různých výrobců, jmenovitě Kester, AIM a SMIC. Jednotlivé parametry past včetně složení jsou v Tabulka č. 1.

Pasty SAC od různých výrobců			
Výrobce	AIM	SMIC	Kester
Typ pasty	NC 257-2	M40	NXG1
Typ tavidla	RELO	ROL1	ROL1
Složení	Sn-96,5 Ag-3,0 Cu-0,5	Sn-1,0 Ag-0,7 Cu-Bi-In	Sn-96,5 Ag-3,0 Cu-0,5
Obsah pevných částic	88,5 %	88,5 %	88,0 %
Teplota tavení	218 °C	221 °C	219 °C
Velikost částic	45-25 μm	45-25 μm	45-25 μm
Viskozita	185 Pa*s	185 Pa*s	185 Pa*s

Tabulka č. 1 Souhrn vlastností past použitých v praktické části

## 4 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy slouží převážně k ochraně spoje před oxidací, zajišťují delší dobu skladovatelnosti a dobrou pájitelnost.

### Faktory ovlivňující volbu povrchové úpravy

- RoHs
- Použité komponenty
- Odolnost mechanická
- Odolnost chemická
- Odolnost tepelná
- Vliv prostředí
- Skladovatelnost
- Testovatelnost
- Chybovost
- Cena

### Sledované požadavky na povrchové úpravy

- Tloušťka vrstvy 0,1 – 0,5 μm.
- Kontaktovatelnost
- Co nejmenší teplotní stres substrátu.
- Rovinnost
- Skladovatelnost
- Spolehlivost
- Snadný proces nanášení.
- Vhodnost pro kontakty s malou izolační vzdáleností.

## Druhy povrchových úprav

- **HAL/Bezolovnatý HAL** - Metoda ponoření desky do pájky s následným zarovnáním přebytku pájky horkým vzduchem.
- **Imerzní cín/stříbro** – Chemické selektivní vylučování kovu na povrchu mědi v rovnoměrné tenké vrstvě, problémem je difuze mědi do velmi tenké vrstvy nanášeného kovu.
- **OSP** – Organické inhibitory mědi.
- **ENIG** – Vrstva složená z chemického niklu a imerzního zlata.

## Odolnost povrchových úprav na elektromigraci

Každá povrchová úprava má jiné vlastnosti, je složena z jiných materiálů a má tedy jinou odolnost na elektromigraci. Společnost Motorola provedla řadu testů povrchových úprav dle norem IPC-B-25 a IPC-TM-650. Publikovala výsledky v článku „Immersion silver investigation by Motorola“. Byl měřen povrchový izolační odpor a pozorována elektromigraci na několika vzorcích s povrchovými úpravami imerzního stříbra, ENIG a OSP. Testy byly uskutečněny různými způsoby, kromě běžného testu při zvýšené teplotě, vlhkosti a přiloženém napětí, byl proveden i test s nakápnutou deionizovanou vodou s následným pozorováním dendritického růstu. Vzorky prošly veškerými testy úspěšně a splnily požadavky na normy.[25]

Při testu nakápnutou vodou byla prokázána větší odolnost na dendritický růst u povrchových úprav OSP a ENIG oproti imerznímu stříbru, u kterého začal dendritický růst dříve. [25]

Při testování kontaktních plošek je požadován minimální prahový odpor 25 k $\Omega$ . Na začátku byly všechny vzorky daleko za hranicí požadovaného odporu. Zpočátku je odpor vzorku s úpravou ENIG o řád až dva nižší než odpor u úpravy imerzním stříbrem. Testování za teploty 85 °C a vlhkosti 85 % po dobu 96 hodin ukázalo, že úprava ENIG je beze změny, ale na imerzním stříbru se začala tvořit koroze. [25]

## 5 Elektromigrace kovu

Elektromigrace je přenos hybnosti elektronů vodiče pod vlivem elektrického pole na ionty tvořící propojovací mřížku materiálu. Elektromigrace může vznikat u všech vodičů, proto je potřeba počítat s možným vlivem elektrického proudu na elektromigraci iontů vodiče. [5][6]

Elektrony vedené kovovým vodičem interagují s poruchami mřížky vodiče a dochází k jejich rozptylu. Rozptyl elektronů vzniká, kdykoli je libovolný atom mimo své místo v krystalické mřížce. Interakcí elektronů s atomy mřížky dochází k jejich rozvibrovávání, a tím je produkováno teplo, následkem je růst odporu vodiče. S rostoucí teplotou vodiče se zvětšuje počet atomů rozptýlených ze svých poloh v krystalické mřížce, zvyšuje se počet vibrací a znovu roste teplota. [5][6]

Ke vzniku elektromigrace potřebujeme velký tok elektronů a jejich velký rozptyl. Elektromigrace nevzniká v polovodičích, pokud nejsou silně dopované, aby měly vodivost podobnou kovům. [5][6]

Elektromigrace způsobuje několik druhů defektů, nejzávažnější vliv mají u velmi tenkých vodivých cest. Nejznámější defekt je tzv. díra, vznikající po celé délce vodivé cesty a difuzní posun, u kterého může dojít až k úplnému odpojení kontaktu z důvodu přesunu části vodivé cesty na jiné místo. Obě chyby jsou silně závislé na mikrostruktuře vodivé cesty. Jejich vzniku můžeme částečně nebo úplně zabránit změnami v metalurgickém procesu. [6][5]

V souvislosti s elektromigrací existuje vzorec pro výpočet střední doby do poruchy (MTTF). [6][8]

$$MTTF = \frac{A}{J^N} * e^{\frac{E_a}{k*T}} \quad (1)$$

Kde parametry rovnice můžeme definovat jako:

- A – Konstanta závislá na průřezu
- J – Proudová hustota ( $A.m^{-2}$ )
- N – Násobící koeficient (většinou zvolen 2)
- $E_a$  – Aktivační energie elektromigrace ( $V.m^{-1}$ )
- k – Boltzmannova konstanta ( $1,38*10^{-23} JK^{-1}$ )
- T – Teplota (K)

## 5.1 Síly ovlivňující pohyb iontů

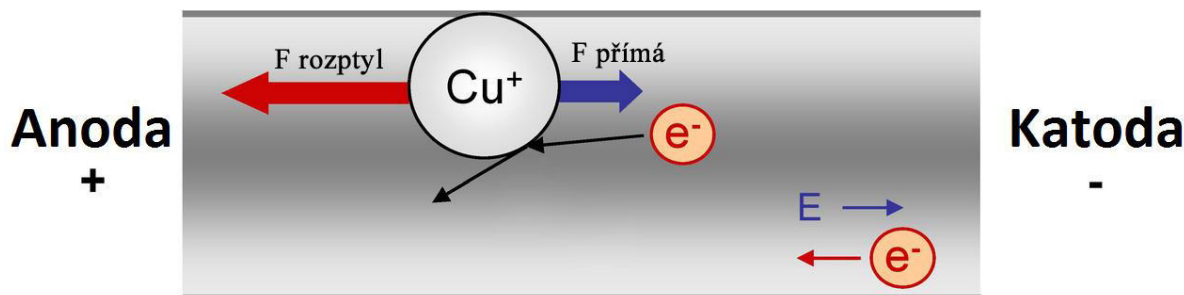
Na pohyb iontů působí síly viz Obr 3.

Přímá síla – přímé působení vnějšího elektrického pole na nabitě ionty kovu [5]

Síla rozptylu – rozptyl vodivých elektronů kovu

$$F_{total} = F_{přímá} + F_{rozptyl} = Z * e * E \quad (2)$$

- Z – efektivní valence
- e – elementární náboj (C)
- E – makroskopické elektrické pole ( $V.m^{-1}$ )



Obr 3. Obrázek sil ovlivňujících pohyb iontů. [29]

## 5.2 Rozdělení elektromigrace

### A) Elektrolytická (iontová)

Okolní teploty ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Nízké proudové hustoty ( $< 1\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )

1) Normální podmínky, žádná viditelná vlhkost ("Humid", vlhká nebo také stříbrná elektromigrace).

2) Viditelná vlhkost na vodiči ("Moisture" mokrá elektromigrace).

### B) Suchá elektromigrace (Přesun hybnosti elektronů)

Vysoké teploty ( $> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Vysoké proudové hustoty ( $> 10^4\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )

### 5.2.1 Elektrolytická elektromigrace

Tento typ elektromigrace je elektrochemický jev, který vzniká i za normálních pokojových podmínek, to znamená, pokud je okolní teplota a proudová hustota dostatečně nízká, aby mohla být na povrchu přítomná voda (opak suché elektromigrace). [5][14]

Průběh elektrolytické elektromigrace je rozdělen do tří kroků: rozpouštění (electrodissolution), transport iontů, depozice (electrodeposition). [14]

#### 1) Rozpouštění[14]

Mechanismus ionizace stříbra je popsán rovnicí 3. Voda z okolní vlhkosti pod aplikovaným elektrickým potenciálem je ionizována dle rovnice 4.



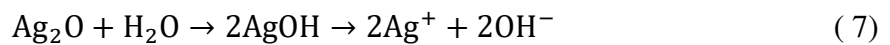
- 2) Vodíkový iont migruje ke katodě a redukuje se a uvolňuje se jako plynný vodík, během toho hydroxilový iont putuje směrem k anodě a reaguje s  $\text{Ag}^+$  putujícího od anody za vzniku koloidní srážky blízko anody a vzniku  $\text{AgOH}$ . [14]



- 3) Nestabilní  $\text{AgOH}$  se rozkládá na anodě a tvoří  $\text{Ag}_2\text{O}$  v okolí anody. [14]



- 4) Hydratace probíhá jako:



Vlastní mechanismus elektrolytické elektromigrace je závislý na vodě a má tendenci se vyskytovat vždy, když se na izolátoru, který odděluje vodiče (jak na DPS, flexibilních obvodech, CC (chip carrier) a integrovaných obvodech), vytvoří dostatečně velká povrchová vlhkost, aby umožnila elektrolytické (iontové) vedení proudu při aplikovaném elektrickém potenciálu. [5][14]

Elektrolytická elektromigrace je jev vyskytující se převážně u stejnosměrného proudu. Směr elektromigrace může být otočen obrácením polarity aplikovaného elektrického pole. Pokud je aplikován běžný střídavý proud (s frekvencí 60 Hz), dochází k mnohem menší elektromigraci a prakticky žádná elektromigrace není přítomna při vysokých frekvencích. [5]

I přesto, že elektromigrace se teoreticky týká spousty kovů, pouze stříbro a v omezené míře měď a cín podléhají jejím účinkům v nekondenzujícím, ale vlhkém prostředí. Ostatní potenciálně náchylné kovy potřebují viditelnou vrstvu vody (zkondenzované kapky), aby došlo k elektromigraci při běžné pokojové teplotě. Díky těmto dvěma rozdílným efektům lze elektrolytickou elektromigraci rozdělit na dvě podkategorie vzhledem k vlhkosti povrchu. Rozlišujeme stav s neviditelnou vrstvou vlhkosti na povrchu (tzv. „humid electromigration“ nebo stříbrná elektromigrace) a stav s viditelnou kondenzovanou vrstvou na povrchu (tzv. „wet electromigration“ nebo mokrá elektromigrace). [5]

Jedinečná schopnost stříbra tvorby elektromigrace jen při mírně zvýšené teplotě a bez přítomnosti kondenzované vody na krátké vzdálenosti byla v minulosti už mnohokrát zkoumána a bylo navrženo mnoho vysvětlení, z toho důvodu se uchytil i název stříbrná elektromigrace. [5]

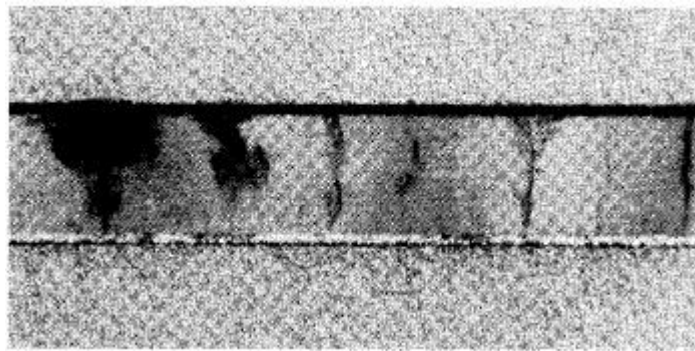
Další kategorií je tzv. „suchá elektromigrace“ např. stříbra přes sklo. Také se jedná o elektromigraci bez kondenzované vody, ale za zvýšené teploty (150 – 200 °C). Dochází při ní k růstu stříbrných dendritů, změnám elektrických potenciálů, izolačních vzdáleností a časy selhání jsou v podstatě stejné jako u normální stříbrné elektromigrace. Vede to

k závěru, že sklo, jako pevný elektrolyt, má v podstatě stejné vlastnosti jako izolant s neviditelnou vrstvou vlhkosti na povrchu. [5]

### **5.2.1.1 Vlhká elektromigrace (Humid electromigration)**

V nejjednodušším případě se začne tvořit oxid na stříbrném vodiči s kladnějším potenciálem (anoda). V oxidu vznikají kladně nabitě ionty, které pod vlivem elektrického pole putují po vlhkých místech v ploše izolantu nebo samotným izolantem směrem k zápornějšímu vodiči (katoda), na kterém se zachytí opět ve formě stříbra viz obr. 4. [5]

Pokud by se migrující ionty rozmístily rovnoměrně (jako při elektrolytickém pokovování), nedocházelo by k žádné změně elektrické funkčnosti obvodu, jelikož přenos kovových iontů při malých proudech by byl natolik malý, že by nedošlo k žádné významné změně velikosti mezer mezi kontakty nebo vodivými cestami. V praxi elektromigrační mechanismus vytváří dva samostatné, i když ne vždy odlišné účinky, které vedou k poškození elektrické funkčnosti obvodu. Jedná se o nárůst koloidních částic a dendritické přemostění. [5]



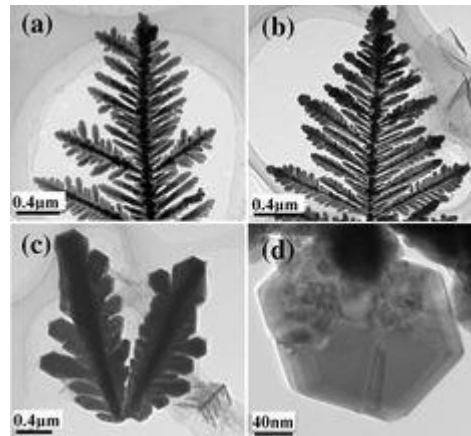
Obr. 4 Elektromigrace stříbra přes sklo. [5]

Koloidní částice stříbra (nebo mědi) se často objevují jako tmavé oblasti, tvořící se kolem kladnější elektrody. Nemusí být po celé ploše elektrody v kontaktu viz obr. 5. [5]



Obr. 5 Koloidní částice stříbra na PC desce. [5]

Dendritický růst je výsledkem skutečnosti, že ionty mají tendenci se ukládat ve formě jehliček a hrotů na katodě viz obr. 6. Jakmile vznikne zárodek hrotu, dojde k navýšení proudové hustoty ve špičce a k zvýšení pravděpodobnosti dalšího nárůstu. Výsledkem je zrychlený růst dendritu ve formě tenkých černých vláken stříbra od záporné katody ke kladné anodě. V průběhu růstu dendritu zpravidla dochází k větvení dendritu v definovaných krystalografických úhlech a tím ke vzniku typické dendritické struktury. [5]



Obr. 6 Snímek typické dendritické struktury. [18]

Ve chvíli, kdy dojde k prvotnímu přemostění dendritem nebo koloidními částicemi, nastane náhlý pokles odporu. Z počátku bude pokles odporu malý vzhledem k malé ploše přemostujícího dendritu. Narůstání dalších dendritů a jejich zesilování má za následek další rychlejší pokles odporu, dostatečný ke vzniku elektrického zkratu. [5]

### **Pracovní podmínky**

Primární pracovní parametry, které podporují vlhkou elektromigraci (humid electromigration), jsou různé. [5]

- 1) Relativní vlhkost
- 2) Znečištění povrchu
- 3) Rozdílné napětí mezi vodiči
- 4) Malá rozteč mezi vodiči
- 5) Zvýšená teplota

#### **5.2.1.2 Mokrý elektromigrace (*Wet electromigration*)**

Pokud se v mezerách mezi vodiči objeví vlhkost v podobě kapek vody, dojde k zesílení a zrychlení elektromigrace o několik řádů. Pro představu, při testování nárůstu dendritu při 45 °C s aplikovaným napětím 10 V na vodiče s mezerou 0,38 mm při vlhkosti 90 % došlo k přemostění dendritem zhruba po týdnu. Oproti tomu v přítomnosti kapky v mezeře mezi dvěma vodiči za pokojové teploty došlo ke vzniku zárodku dendritu do minuty a samotnému přemostění dendritem v řádu několika minut. [5]

Přemostění z katody k anodě za těchto podmínek může být pozorováno u mědi, zlata, cínu, niklu, olova, paladia, ale ne u kovů s ochranným oxidem jako chrom, hliník a wolfram. Vlhká elektromigrace se stala kvalitativním problémem u obvodů s integrovanými obvody, hybridními obvody a celkově obvody s malými mezerami mezi vodiči. U spousty zařízení dochází k chybám u pozlacených kontaktů vlivem přemostění blízkých kontaktů dendrity. Chyby bývají způsobeny zkondenzovanou vlhkostí nebo přítomností chloridů. [5]

### 5.2.2 Suchá elektromigrace

Další variantou elektromigrace je tzv. suchá elektromigrace. Jde o přesun hmoty vlivem velké proudové hustoty v suchém pevném prostředí. Elektromigrace zde vzniká především silou elektronů dopadajících na atomy kovu. Vzhledem k strukturálním nehomogenitám vodiče, jako jsou zrna na hraně vodiče, není atomový tok rovnoměrný a tím dochází k přesunu materiálu a hromadění na jiných místech. Přesunem materiálu vzniknou díry nebo dokonce i úplné rozpojení obvodu. Na druhou stranu akumulace materiálu má za následek vznik nahromaděných pahorků, které mohou způsobit zkrat nebo podněcovat korozi narušením ochranných materiálů. Může dojít dokonce k narušení ochranného oxidu. [5]

Vznik děr nebo nárůst hrbolků může být také spojen s rozdílem teplot na různých metalizovaných částech. Růst hrbolků je spojen s místy s menší teplotou než je průměr. [5]

V literatuře je často uváděn vznik elektromigrace a s tím spojených chyb na bázi hliníku přes tenký film křemičitého oxidu, avšak může dojít k elektromigraci přes různé druhy materiálů. Např. hliník přes titan-wolframovou difuzní bariéru, kde za vhodných podmínek může dojít ke zkratování obvodu. U cínu může dojít k elektromigraci poměrně snadno, pokud dojde ke zvýšení proudové hustoty na takovou úroveň, že se teplota v místě migrace přiblíží k teplotě bodu tání. [5]

Mechanismus suché elektromigrace a její pracovní podmínky jsou odlišné od podmínek pro elektrolytickou elektromigraci. Vznik suché elektromigrace je podmíněn suchým prostředím s teplotou nad 150 °C a především proudovou hustotou nejméně  $10^4 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Prostředí vhodné pro suchou elektromigraci se objevuje u integrovaných obvodů a tenkovrstvých obvodů, následkem je často chyba na makroskopické úrovni, kdy může dojít k vyřazení klidně celé desky. Na druhou stranu, takovéto podmínky úplně eliminují přítomnost vlhkosti a tím zabrání vzniku elektrolytické elektromigrace, která může způsobit problémy snáze a rychleji. [5]

### 5.2.3 Mechanismy defektů vznikajících elektromigrací

Mechanismy vzniku defektů můžeme rozdělit na difúzní, teplotní a vyrovnání koncentrace atomů. [6]

#### 5.2.3.1 *Difúzní mechanismus*

Uvnitř struktury vodiče nedochází skoro k žádným přesunům hybnosti vodivostních elektronů na ionty vodiče. Oproti tomu na povrchu a na hranách materiálů je přesun hybnosti na ionty vodiče mnohem častější a intenzivnější díky slabšímu uchycení iontů v krystalické mřížce. Ve chvíli, kdy procházející proud dosáhne dostatečné síly, začnou se vlivem přesunu hybnosti uvolňovat ionty z povrchu vodiče. Uvolněné ionty se posunují po povrchu vodiče ve směru proudění elektronů, směr posunu iontů je částečně ovlivněn povrchovou strukturou mřížky. [6][8]

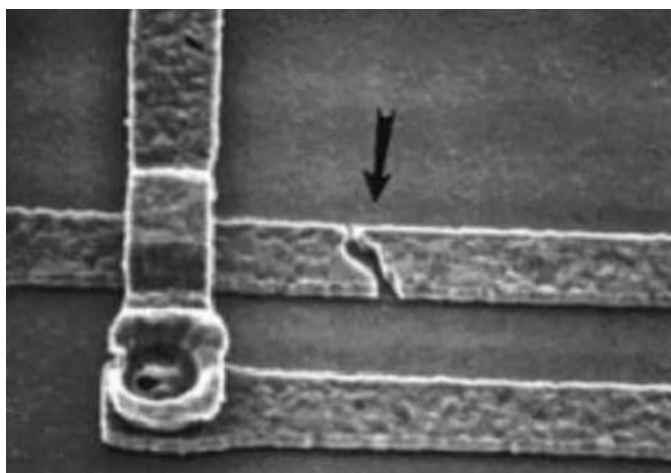
#### 5.2.3.2 *Teplotní mechanismus*

V ideálním vodiči, kde jsou atomy řazeny dokonale v krystalické mřížce, nedochází ke kolizím průchozích elektronů a tedy ani k elektromigraci. V reálném vodiči dochází k interakci procházejících elektronů s atomy v místech poruch krystalické mřížky a s atomy náhodně rozvibrovanými vlivem teploty. Běžně není energie kolidujících elektronů natolik silná, aby způsobila uvolnění atomů z mřížky. Ve vývoji elektroniky je směřováno k výrobě čipů a zapojení s co nejmenšími cestami. Ve chvíli, kdy je vodič dostatečně tenký a procházející proud dostatečně velký, začínají být kolize průchozích elektronů natolik časté, že dochází k uvolňování atomů z krystalické mřížky. Nárůstem kolizí dochází ke zvětšování elektrického odporu vodiče a tím k nárůstu teploty. Vzniká kladná zpětná vazba, kdy vlivem rostoucí teploty dochází ke zvětšení vibrací, nárůstu elektrického odporu a znovu roste teplota. Vlivem teploty může dojít až k úplnému přerušení vodivé cesty, viz Obr. 7. [6][8]

Teplotní vliv se neprojevuje v polovodičích, ale u polovodičových součástek v místě jejich kovových kontaktů.

#### 5.2.3.3 *Vyrovnání koncentrace atomů*

Po zastavení průtoku proudu vodičem začíná docházet k částečnému vyrovnávání koncentrace atomů vodiče. Vlivem koncentračního spádu a nerovnoměrného rozložení teploty dochází k návratu části přesunutých atomů zpět směrem k původním pozicím na energeticky výhodná místa. [6][8]



Obr. 7 Přerušená cesta vlivem zvýšené teploty a odmigrování hliníkové cesty. [27]

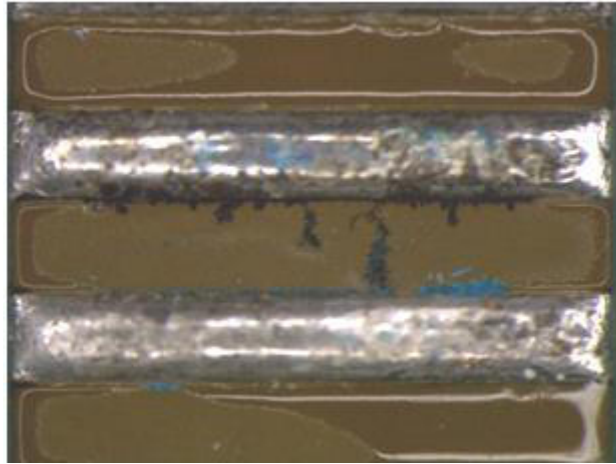
## 6 Metody měření vlivu ionizovatelných nečistot

### 6.1 Metoda měření povrchového izolačního odporu (SIR)

Povrchový odpor je definován jako poměr napětí mezi dvěma elektrodami a proudů protékajícímu mezi nimi. Měření proudu lze provádět přímo nebo přes nabíjený kondenzátor a měření vybíjecího proudu kondenzátoru. Měrný povrchový odpor je vztažen na  $\text{cm}^2$  plochy zkoušeného materiálu. Problematické je rozlišení proudu povrchového a vnitřního během testování. Vnitřní proud je ale tak malý, že se zanedbává, uvažuje se tedy jen povrchová vodivost. [15][16]

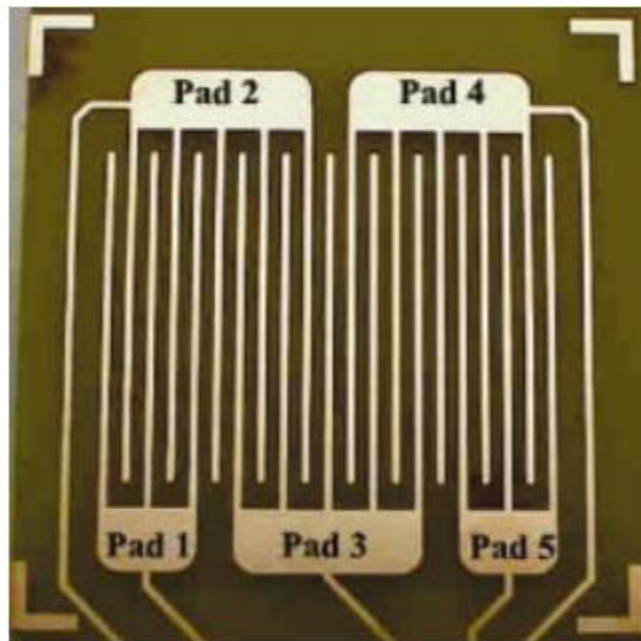
Měření povrchového izolačního odporu (SIR), také běžně označované jako teplotně vlhkostní testování (THB), se používá k vyhodnocení odolnosti výrobku nebo samotného procesu na vznik svodových proudů a elektrických zkratů vznikajících dendritickým růstem. Testování SIR se obvykle provádí za zvýšené teploty, vlhkosti a přiloženého napětí, jako je  $85\text{ }^\circ\text{C} / 85\% \text{ RH}$  a  $48\text{ V}$  nebo  $40\text{ }^\circ\text{C} / 90\%$  s periodickým odečítáním izolačního odporu. Během testování SIR dochází k dendritickému růstu, spolu s nárůstem korozivních produktů na bázi mědi, viz Obr. 8. [15][16]

Dle novější aktualizované normy J-STD-004B je lepší volit teplotu  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , vlhkost  $90\%$  a napětí  $10\text{ V}$ . Takto provedené měření je citlivější, protože nižší teplota rozkládá tavidlo pomaleji. Vyšší vlhkost způsobí větší absorpci a tím se stává tavidlo polárnějším. Oproti starší metodě je sníženo napětí z důvodu častého zničení vzniklého dendritu dříve, než bylo možné ho vůbec detekovat. Samovolné ničení dendritů je tedy pomalejší a vzorek by měl být měřen zhruba každých 20 minut a díky tomu je velká pravděpodobnost zachycení rostoucích dendritů. [28]



Obr. 8 Dendritický růst po elektromigraci mědi [20]

Pro měření povrchového izolačního odporu se používá různých vzorů dle norem IPC-A-25A, IPC-A-50, IPC-B-50, IPC-B-25A a další, viz Obr. 9 [20]



Obr. 9 Testovací obrazec dle IPC-B-25A [20]

## 6.2 Metody měření kontaminace DPS konduktometrickou metodou

Konduktometrická metoda mohou být rozděleny např. na ROSE a SEC dále jsou pak používány speciální přístroje.

### 6.2.1 Metoda ROSE (Resistivity Of Solvent Extract)

Jedná se o metodu, v které se zjistí množství nečistot a ty se pak přidají do definovaného množství roztoku izopropanolu a deionizované vody v poměru 3:1. Pozorována je změna vodivosti, přičemž počáteční hodnota vodivosti roztoku musí být maximálně  $0,05 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Z naměřené hodnoty vodivosti lze vypočítat průměrnou kontaminaci na plochu desky dle následujícího vzorce. [17]

$$Z_{PS} = (\gamma_1 - \gamma_0) * \frac{V}{S * k_{24}} \quad (8)$$

$Z_{PS}$	– kontaminace DPS ( $\mu\text{gNaClcm}^{-2}$ )
$\lambda_0$	– vodivost počáteční ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$\lambda_1$	– vodivost konečná ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )
V	– objem (ml)
S	– plocha DPS ( $\text{cm}^2$ )
$k_{24}$	– směrnice vodivosti při $24^\circ\text{C}$

### 6.2.2 SEC (Solvent Extract Conductivity)

Konduktometrická metoda využívající roztoku izopropanolu a deionizované vody k odstranění rozpustitelných nečistot z měřeného vzorku DPS. Změna konduktivity roztoku poskytuje informaci o průměrném znečištění ionizovatelnými nečistotami na plochu vzorku, viz rovnice č. 8. Měření může být prováděno s velkou přesností, kdy se nechá vzorek omývat při teplotě  $80^\circ\text{C}$  po dobu jedné hodiny, čímž se citlivost měření několikanásobně zvýší. [17]

Konduktometrická metoda neposkytuje informaci o rozložení nečistot nebo o neionizovatelných nečistotách a výsledek může být závislý na hustotě osazení DPS. Při velké hustotě osazení součástkami SMD může dojít k nedokonalému omytí nečistot z prostoru pod součástkami. [17]

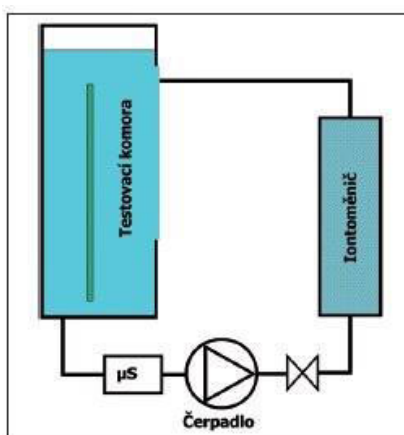
Pro zjišťování přesnějších informací o rozložení nečistot na ploše DPS a jejich vlivu na konkrétní místa se upřednostňuje SIR měření. [17]

Použití:

- Testování čistoty dle IPC, MIL-spec. a dalších norem
- Řízení procesu čištění linek
- Cenově výhodná metoda pro hodnocení čistících procesů

### 6.2.3 Ionograf

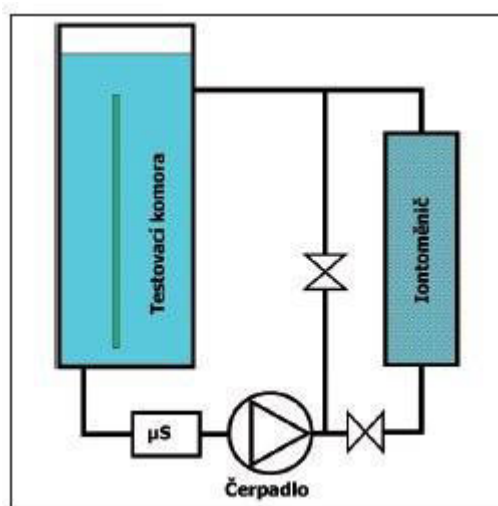
Dynamická měřicí metoda - Testovací roztok je kontinuálně regenerován. Měří se změna vodivosti a z výsledného integrálu se vyhodnocuje kontaminace v přepočtu na ekvivalent solnosti. Ionografická měření se provádějí buď za studena, nebo při zvýšené teplotě pro větší citlivost. [26]



Obr. 10 Schéma ionografu [26]

### 6.2.4 Omegametr

Statická metoda, při níž se roztok DI vody a izopropanolu připraví v přístroji cirkulací přes speciální vysoce výkonné iontoměniče (hodnota cca 20 M $\Omega$ .cm). Po dosažení požadované hodnoty se iontoměničové kolony oddělí z okruhu a roztok se vystaví působení vzorku. Hodnota vodivosti postupně narůstá až do ustálení. Kalibrace je pomocí NaCl, výsledky v ekvivalentech  $\mu$ g NaCl/plochu. [26]



Obr. 11 Schéma omegametru [26]

## 7 Praktická část

V praktické části diplomové práce budu realizovat testování DPS na povrchový izolační odpor, měřit ionizovatelné nečistoty konduktometrickou metodou a testovat elektromigraci. Pro jednotlivé testy využiji metod popsanych v šesté kapitole, zařízení k měření jsou popsány v následujících kapitolách.

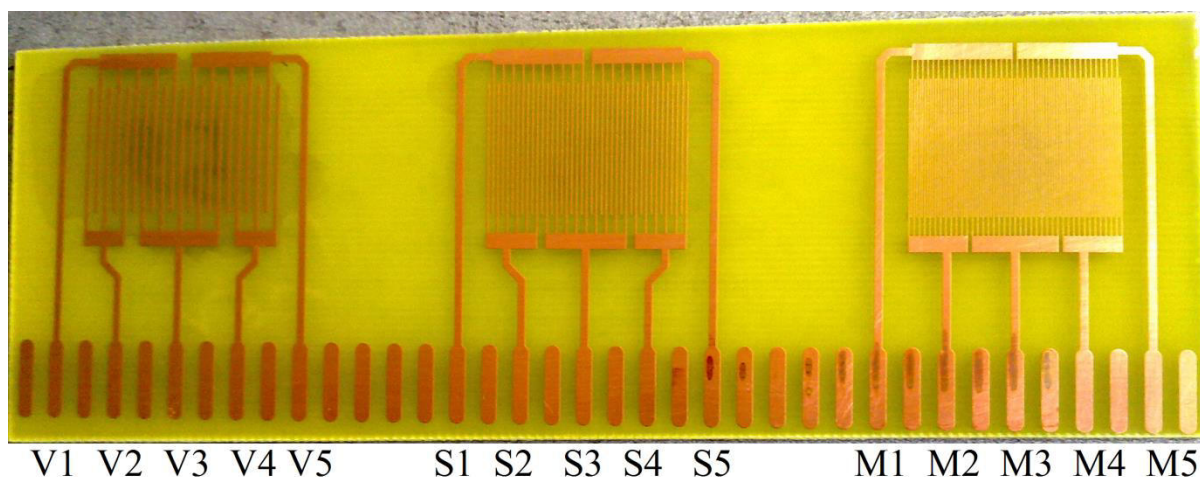
### Definované cíle

- Seznámení se s problematikou tavidel, konformních povlaků a měření povrchového izolačního odporu, výběr testovaných vzorků.
- Navrhnutí měřící metody, sestavení potřebného příslušenství a sestavení pracoviště.
- Změření povrchového izolačního odporu před a po znečištění tavidlem.
- Změření ionizovatelných nečistot.
- Měření ionizovatelných nečistot zapouzdřených v konformním povlaku.
- Změření povrchového izolačního odporu po elektromigraci.
- Vyhodnocení výsledků každého měření.

### 7.1 Příprava testovacích DPS

Jako testovací DPS byly vybrány již dříve vyrobené DPS s motivem, viz Obr. 12 dle IPC-B-25A na standardním materiálu FR4. Vzhledem k dřívějšímu používání DPS bylo třeba je důkladně očistit. Čištění proběhlo pomocí jemného kartáče a pečlivě byly odstraněny veškeré zbytky a nečistoty. Následně byly DPS omyty deionizovanou vodou a sušeny v peci po dobu 10 minut při 60 °C.

Nakonec byly testovací DPS po dvou zabaleny motivem k sobě do čistého papíru. Takto nachystané DPS budou použity pro další měření.



Obr. 12 Snímek testovací desky s označením jednotlivých segmentů

Pro jednotlivé segmenty testovací DPS jsem si určitě očíslování, dle kterého se mohou lépe orientovat v naměřených hodnotách, viz Obr. 12. Zvolil jsem písmena dle velikosti

izolačních mezer jako V (větší) pro motiv s mezerami 0,75 mm, S (střední) s velikostí mezer 0,38 mm a M (malá) pro motiv s velikostí mezer 0,22 mm a číslování dle obrázku 12. Pomocí tohoto číslování a shodného označení drátů na připojovací patici jsem dosáhl větší přehlednosti a rychlosti během samotného přepojování a měření potřebných kombinací.

## 7.2 Návrh měřicí metody

### Megohmmeter IM6

Pro měření povrchového izolačního odporu jsem zvolil zařízení Megohmmeter IM 6 od společnosti RE Instruments. Jde o zařízení s rozsahem měření až  $10^9 \text{ M}\Omega$  a interním zdrojem testovacího napětí do napětí 999 V se stabilitou lepší než  $10^{-7} \text{ V}$ . Jde o přesné zařízení vhodné pro stejnosměrné měření odporu do  $10^9 \text{ M}\Omega$ , měření proudu od 1 mA až do 1 pA, měření velkých kondenzátorů s nízkými svodovými proudy, měření v kontaminovaném prostředí pomocí možného dálkového ovládání. [22]



Obr. 13 Megohmmeter IM6 [22]

Vzhledem k velké citlivosti přístroje na elektrostatický šum z okolí je vhodné veškerou připojenou měřicí aparaturu kvalitně stínit, aby se zamezilo nechtěným výchytkám. Za tímto účelem byly vyměněny všechny kabely za jednožilové stíněné koaxiální kabely a všechny stínění byly uzemněny k zemi přístroje.

### Klimatická komora Friocell

Klimatické komory Friocell od společnosti BMT zajišťují vysoký technický standard a umožňují časově a prostorově přesné temperování vzorků. Unikátní chladicí systém nabízí přesnou a úspornou simulaci vybraných přírodních dějů a redukuje odpařování vzorků. [21]

## Parametry komor řady Friocell

- Vnitřní objem: 22, 55, 111, 222, 404, 707, 1212 litrů
- Teplotní rozsah: od 0,0 °C do 99,9 °C
- Chladicí médium: R 134a bez CFC (mimo objem 22 litrů)
- Peltiér efekt: FC 22
- Vnitřní skleněné dveře
- Vnitřní komora: nerezová ocel DIN 1.4301 (AISI 304)



Obr. 14 Klimatická komora Friocell

## Analytické váhy OHAUS Pioneer

Vzorky bude potřeba během testování vážít, k tomu poslouží váhy Ohaus Pioneer. Váhy jsou určeny pro základní měření v laboratorních, průmyslových a vzdělávacích aplikacích. Váhy jsou vybaveny vnitřní kalibrací, což usnadňuje jejich provoz. [23]

## Parametry vah Ohaus Pioneer

- Maximální měřitelná hmotnost: 210 g
- Rozlišení: 0,1 mg
- Pracovní podmínky: 10 °C – 40 °C při 10 % - 80 % relativní vlhkosti
- Provozní módy: vážení, počítání kusů, procentuální vážení
- Ustálení hodnoty do 3 s.



Obr. 15 Analytické váhy Ohaus Pioneer [23]

### **Stabilizovaný zdroj BK 127**

Pro testování elektromigrací je potřeba připojit testovací DPS k zdroji stejnosměrného napětí. Jako zdroj bude použit stabilizovaný zdroj BK 127. Jedná se o univerzální síťový zdroj, s plynule nastavitelným napětím v rozsahu 0 – 20 V s možností odběru proudu do 1 A a s plynule nastavitelnou ochranou proti přetížení omezující výstupní proud na předem nastavitelnou hodnotu. [24]

#### **Parametry stabilizovaného zdroje BK 127**

- Stabilita výstupního napětí při změně napětí sítě  $\pm 10\%$ : lepší než  $\pm 15\%$
- Zvlnění a šum výstupního napětí:  $< 10\text{ mV}$
- Provozní relativní vlhkost: 40 - 80 %
- Pracovní teplota okolí:  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 16 Stabilizovaný zdroj BK 127

## Multi metr 9420

Pro měření ionizovatelných nečistot konduktometrickou metodou bude použito zařízení Multi 9420. Jedná se o kompaktní, digitální měřicí přístroj, který slouží k měření pH, konduktivity, redoxního potenciálu a rozpuštěného kyslíku.

### Funkce Multi 9420:

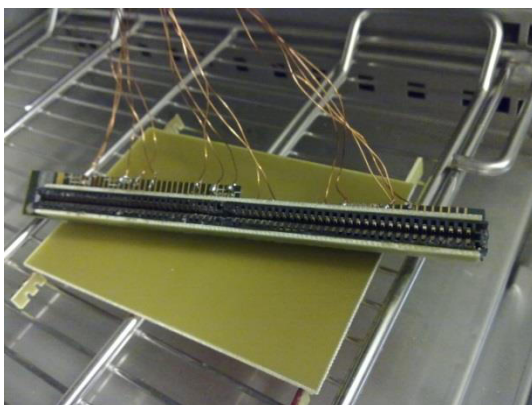
- Automatická kontrola stability
- Automatické rozpoznání snímače
- Plynulá regulace měření
- Čidlo kontroly kvality



Obr. 17 Snímek měřiče Multi 9420

## Patice vyrobená z komponent starého PC

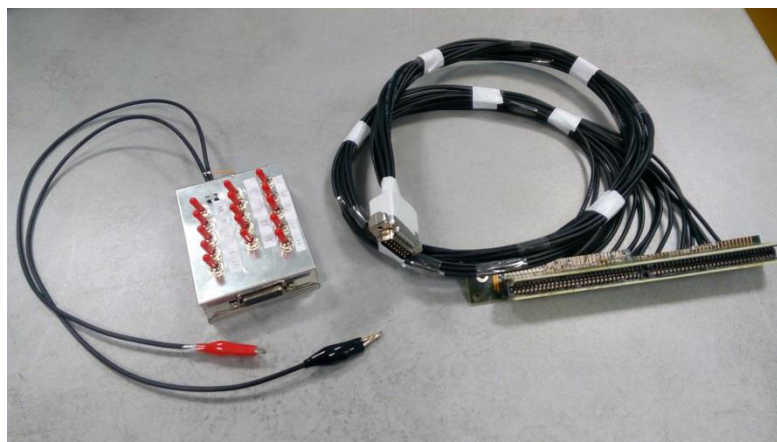
Za účelem snadného a hlavně spolehlivého připojení všech patnácti kontaktů jsem vyrobil ze starých slotů ze základní desky PC patici, do které je možno testovací DPS připojit. Na jednotlivé kontakty jsem připájel koaxiální kabely, na které jsem umístil konektor pro připojení k vyrobenému aparátu.



Obr. 18 Snímek vyrobené patice na testovací DPS

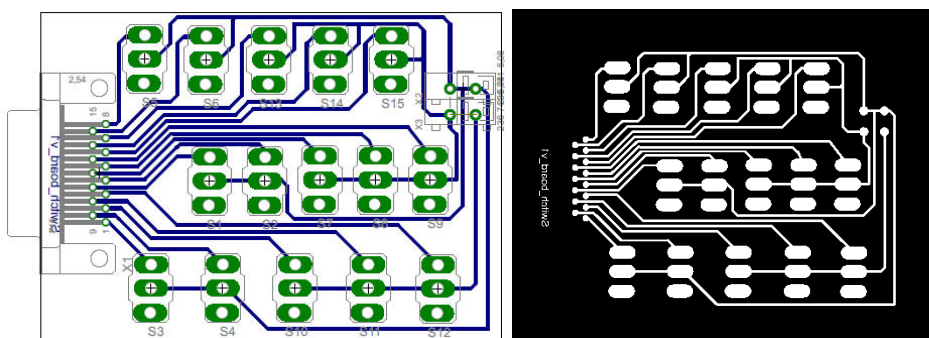
## Stíněná přepínací krabička

Za účelem snadnějšího, spolehlivého a hlavně reprodukovatelného přepínání, a tím i kvalitnějšího měření různých kombinací pinů na testovacích deskách, jsem vyrobil přepínací krabičku s páčkovými vypínači, vybranými tak, aby měly co největší odpor při vypnutém stavu.



Obr. 19 Snímek stíněné krabičky s propojovacími kabely a patičí

DPS přepínacího přípravku byla navržena v programu Eagle a vyrobena za použití základního materiálu FR4 jednostranně plátovaného mědí.



Obr. 20 Návrh DPS přepínací krabičky

Vyrobená a osazená deska byla umístěna do stínící pocínované krabičky pro zajištění zamezení šumu.

## Sestavené pracoviště

Celé pracoviště je sestaveno z klimatické komory, Megohmmeteru, stabilizovaného zdroje, měřiče Multi 9420, patice vyrobené z komponent ze staré základní desky a stíněné přepínací krabičky. Propojení patice a přepínacího přípravku je zajištěno stíněnými koaxiálními kabely, stejně jako kabely na propojení přepínací krabičky a Megohmmetru.

Složení sestavy se obměňuje dle potřeby aktuálního měření.

Z důvodu ovlivnění měřených hodnot SIR aparaturou jsem zahrnul odpor jednotlivých přepnutých kombinací do přepočtu SIR. Před nebo po každém měření SIR jsem změřil odpor jednotlivých kombinací aparatury naprázdno a hodnoty odporu jsem využil pro přepočet naměřeného odporu dle rovnice 9. Uvažoval jsem aparaturu jako jeden odpor a do patice připojenou testovací DPS jako odpor druhý a z jejich paralelní kombinace jsem vyjádřil odpor samostatné testovací DPS.

$$R_{DPS} = \frac{R_{m\check{e}r} * R_0}{R_{m\check{e}r} - R_0} \quad (9)$$

$R_{DPS}$  – Přepočtený odpor hřebínkového motivu.

$R_{m\check{e}r}$  – Měřený odpor paralelní kombinace desky a aparatury.

$R_0$  – Odpor aparatury naprázdno.

### 7.3 Měření SIR před a po znečištění tavidly a po stárnutí

Pro měření povrchového izolačního odporu je megohmmeter a vyrobená aparatura složená ze svazku koaxiálních kabelů a přepínací krabičky viz Obr. 21. Samotné měření spočívá v umístění testovací DPS do patice a sepnutí požadované kombinace spínačů na krabičce s následným odečtením hodnoty z Megohmmeteru.

Dle normy IPC-TM-650 a vzhledem k faktorům, které mohou zapříčinit nepřesnosti jako je nestejně nanesené množství tavidla, elektromagnetický šum z okolí a další, bylo měření pro každé tavidlo prováděno na třech vzorcích DPS a vypočtena průměrná hodnota.

Pro měření SIR byly vybrány dva vzorky tavidel, Cobar 390 RX HT a IF 2005C. Jde o no-clean tavidla, po kterých zůstávají tavidlové zbytky na povrchu DPS a tyto zbytky mohou ovlivňovat vlastnosti desky.



Obr. 21 Snímek pracoviště při měření povrchového izolačního odporu

### 7.3.1 Průběh testování s tavidly COBAR 390 RX HT a IF 2005C

Měření probíhalo u každého testování celkem na šesti deskách, tři vzorky DPS pro každé tavidlo před a po znečištění. Do tabulek viz příloha č. 1 byly zaznamenány veškeré naměřené hodnoty a dále pak do Tabulka č. 2 zaznamenány průměrné hodnoty SIR jednotlivých obrazců testovací DPS.

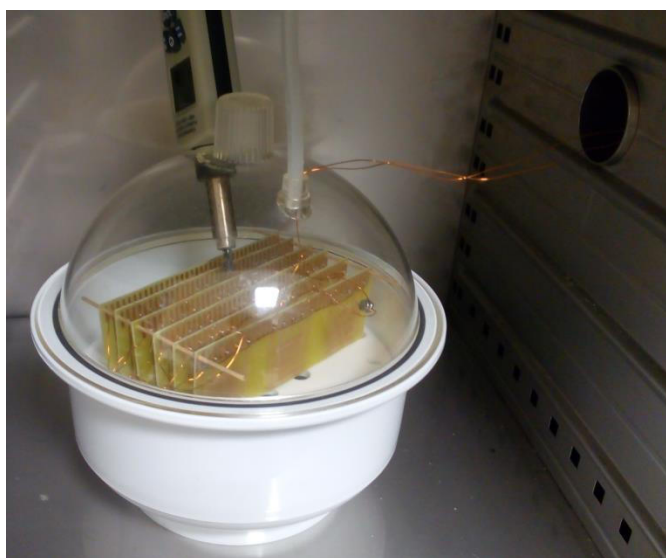
#### Měření čisté DPS

Před samotným měřením SIR byla deska důkladně očištěna a vysušena, aby mohla být zvážena pomocí analytických vah pro pozdější výpočet naneseného množství tavidla. Měření na čisté DPS proběhlo za pokojové teploty postupným přepínáním kontaktů přepínací krabičkou na Megohmmeter a zaznamenáním hodnot do tabulky viz příloha 1.

#### Měření znečištěné DPS

Měření znečištěné DPS je složeno z několika kroků. V první řadě je potřeba na desce ochránit připojovací kontakty od vlivu tavidla, aby se později neznečistily připojovací kontakty a zároveň tak neovlivnila kvalita připojení desky k patici. Za tímto účelem posloužil proužek kaptonové pásky široký 9 mm. Kaptonová páska má velmi vhodné vlastnosti pro využití v elektrotechnice, vydrží vysoké teploty a nezanechává adhezivní zbytky po odstranění.

Po nalepení kaptonové pásky na kontakty testovací DPS byla pomocí spreje nanесena vrstva tavidla. Testovací DPS jsem umístil do klimatické komory na vysušení při teplotě 35 °C po dobu cca 10 minut. Po zasušení byla DPS znovu zvážena pro získání hmotnosti desky spolu se sušinou tavidla a nakonec nakontaktována spolu s ostatními deskami v sérii a vložena do exsikátoru na stárnutí. Stárnutí probíhalo dle normy IPC-TM-650 při teplotě 40 °C a relativní vlhkosti 95 % a přiloženém napětí 10 V po dobu jednoho týdne.



Obr. 22 Snímek testovacích DPS umístěných v exsikátoru v klimatické komoře.

## Měření stárnuté DPS

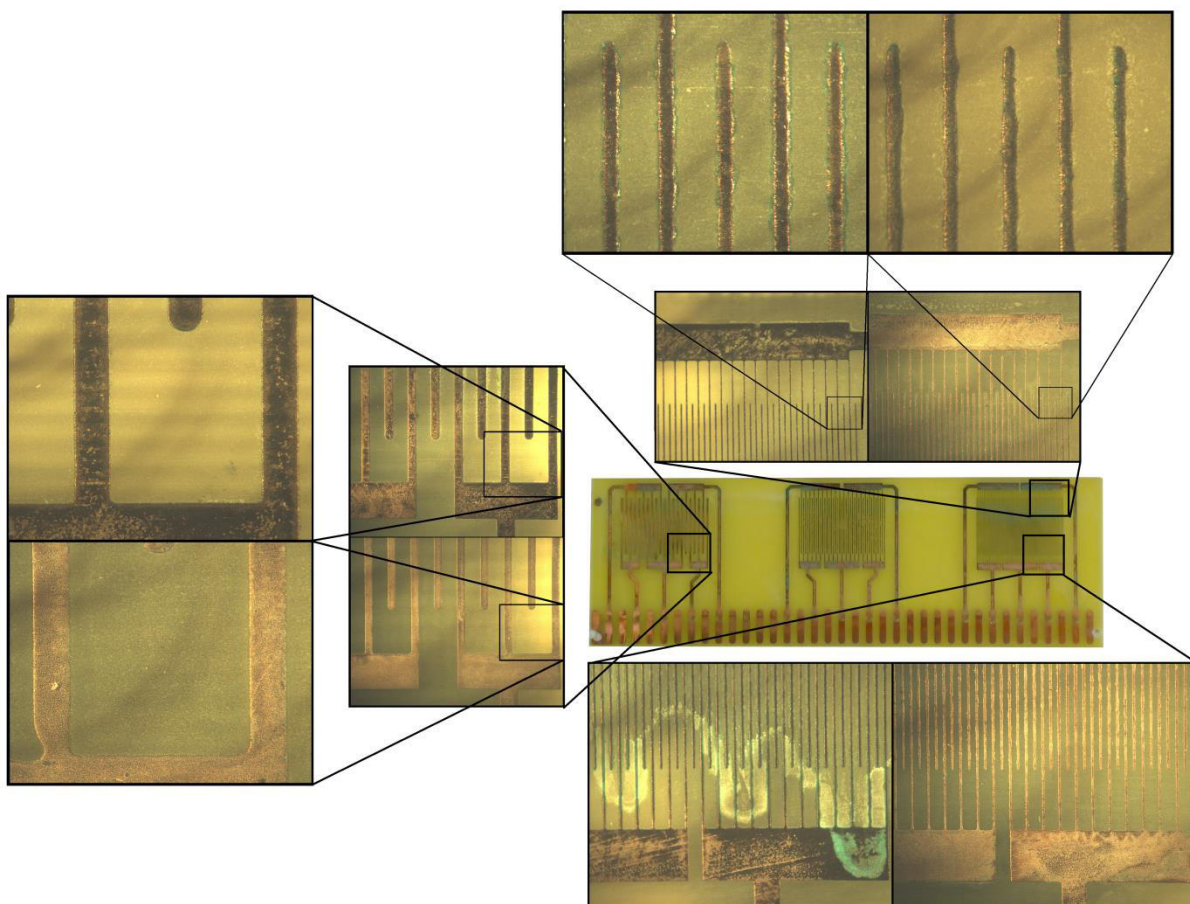
Testovací DPS byly po týdnu vytaženy z exsikátoru a postupně změřeny, hodnoty SIR jsou uvedeny v Příloze 1. Vypočetl jsem průměrný odpor pro jednotlivé motivy a zanesl do tabulky.

### 7.3.2 Naměřené výsledky

V Tabulka č. 2 jsou uvedeny průměrné naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu pro tavidlo COBAR 390 RX HT a IF 2005C v závislosti na motivech s různou velikostí izolačních mezer pro desky čisté, znečištěné tavidlem a stárnuté.

Izolační mezera	COBAR 390 RX HT			IF 2005C		
	Průměrný odpor			Průměrný odpor		
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
	Čistá	Znečištěná	Stárnutá	Čistá	Znečištěná	Stárnutá
Velká	2.55E+13	4.09E+11	1.66E+13	5.33E+13	4.02E+10	1.98E+13
Střední	9.43E+12	1.19E+10	4.51E+12	4.17E+13	1.58E+10	8.87E+12
Malá	8.28E+12	1.69E+10	8.15E+12	3.42E+13	6.38E+10	2.90E+13

Tabulka č. 2 průměrné naměřené hodnoty SIR čistých a znečištěných testovacích DPS



Obr. 23 Snímky testovaných DPS s tavidlem IF 2005C a Cobar RX HT 390.

### 7.3.3 Vyhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot povrchového izolačního odporu, viz tabulka č. 2, je vidět snižování hodnot okamžitě po znečištění tavidlem u všech obrazců testovacích DPS, zatímco po stárnutí se SIR desek zvýšil na původní hodnoty, místy dokonce vzrostl. Růst SIR přisuzuji vzniku polovodivých měděných oxidů, pravděpodobně oxid měďnatý, na povrchu testovacích obrazců DPS, které zafungovaly jako částečná izolace. Zaoxidované hřebínky jsem zkoušel proměřit multimetrem a ověřil jsem si fakt, že nejsou vodivé, pokud nedojde k mechanickému poškození svrchní vrstvy oxidů. Bližší pohled na snímky je na snímcích viz obr. 23.

## 7.4 Měření SIR s tavidlovými zbytky zapouzdřenými v konformním povlaku

### 7.4.1 Průběh testování s konformním povlakem

Příprava testovacích DPS probíhala jako u prvního měření, viz kapitola 7.3.1, očištěné a vysušené desky jsem zvažil. Následně jsem kaptonovou páskou zakryl kontaktní plošky a nástřikem nanasl tavidlo. Desku jsem umístil do klimatické komory na zasušení při teplotě 40 °C a po zasušení jsem desku opět zvažil, v poslední řadě jsem nanasl lak. Lak lze nanášet různými způsoby, vybral jsem z technického listu variantu ponoru. Nalakované desky jsem nechal vysušit dle údajů v technickém listu při 80 °C po dobu zhruba půl hodiny. Nakonec jsem hotové zalakované desky zvažil, proměřil, nakontaktoval a umístil do klimatické komory na stárnutí po dobu jednoho týdne při teplotě 40 °C, relativní vlhkosti 95 % a přiloženém napětí 10 V.

### 7.4.2 Naměřené výsledky

Z naměřených hmotností jsem určil množství laku naneseného na jednotlivých deskách, viz Tabulka č. 3. Rozdíl v množství naneseného laku je způsoben rozdílnou hustotou laků.

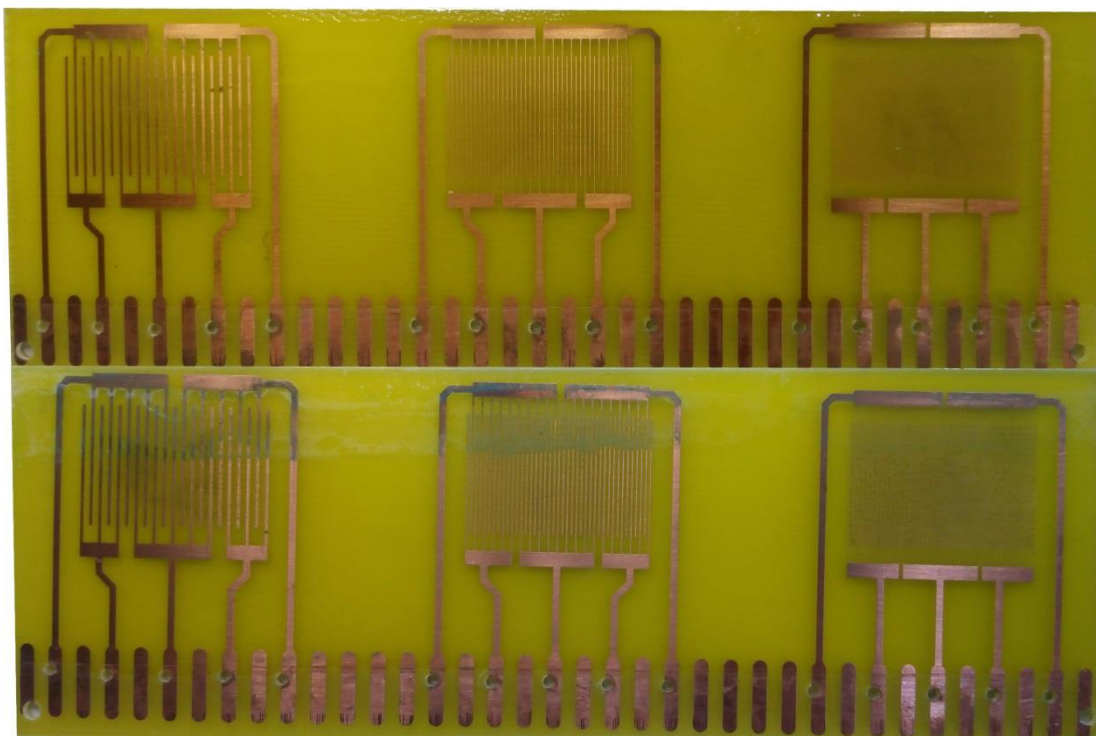
Tavidlo	IF 2005C			COBAR 390 RX HT		
Lak	Elpeguard			Bectron		
Deska č.	7	8	9	10	11	12
m (mg)	198	185.9	203.1	64.1	72.5	62.7

Tabulka č. 3 množství sušiny laku na testovacích DPS

Po stárnutí 168 hodin jsem desky vyjmul z komory a proměřil. Průměrné naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka č. 4.

Tavidlo	COBAR 390 RX HT		IF 2005C	
Lak	Bectron		Elpeguard	
Izolační mezera	Průměrný odpor [ $\Omega$ ]		Průměrný odpor [ $\Omega$ ]	
	Čistá	stárnutá	Čistá	stárnutá
Velká	6.22E+12	1.50E+13	1.30E+13	2.92E+13
Střední	6.01E+12	7.56E+13	8.46E+12	1.78E+13
Malá	6.77E+12	9.31E+12	2.1E+13	1.53E+13

Tabulka č. 4 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR



Obr. 24 Snímky lakovaných testovacích DPS (nahore tavidlo Cobar, dole IF).

### 7.4.3 Vyhodnocení výsledků

Rozdíl v množství naneseného laku spolu s tavidlovými zbytky má vliv na rozsah oxidace. V průměru se hodnoty SIR zvýšily u motivů s většími izolačními vzdálenostmi, ale u nejmenšího motivu a tavidla IF 2005C došlo k snížení odporu. Snížení SIR odůvodňují především větší kyselostí tavidla IF 2005C, kde i přes výrazně větší množství laku naneseného na DPS došlo k jeho narušení a oxidaci mědi viz obr. 24. Usuzují, že při nanášení laku došlo k částečnému omytí tavidlových zbytků a k jejich přimíchání do naneseného laku. Přimícháním mohlo tavidlo vytvořit ve tvrdnoucím laku poruchy struktury a umožnit tak pozdější oxidaci. Tavidlo Cobar s lakem Bectron dopadlo lépe, ve všech průměrech došlo k zvýšení povrchového izolačního odporu a s tím související menší nárůst měděných oxidů.

### 7.5 SIR desky znečištěné tavidlem, které prošlo pájecím procesem

Další variantou testování SIR bylo testování DPS znečištěné tavidlem a prošlé přetavovací pecí s nastaveným teplotním profilem. Tavidlo prošlé pájecím procesem se působením tepelné energie částečně rozloží a působením vzdušného kyslíku částečně oxiduje, desky by tak měly stárnutím trpět méně na nepříznivé vlivy jako je vlhkost a zvýšená teplota.

### 7.5.1 Průběh testování

Příprava testovacích DPS probíhala stejně jako v prvním měření, viz kapitola 7.3.1 s rozdílem vynechaného vážení. Desky byly důkladně očištěny, následně jsem na desky nanasl tavidlo a nechal je projít přetavovací pecí DIMA SMR0 s nastaveným teplotním profilem. Jednotlivé zóny byly nastaveny na teploty 270 – 280 – 390 °C s rychlostí posunu pecí na  $1,9 \text{ mms}^{-1}$ , celková doba průchodu pecí trvá přibližně pět minut.

Po projití desek pecí jsem postupně změřil SIR každé desky, následně jsem je nakontaktoval a vložil do exsikátoru. Jakmile byly všechny desky nachystány, umístil jsem exsikátor do klimatické komory, připojil napětí dle normy a vše jsem nechal stárnout po dobu 168 hodin.

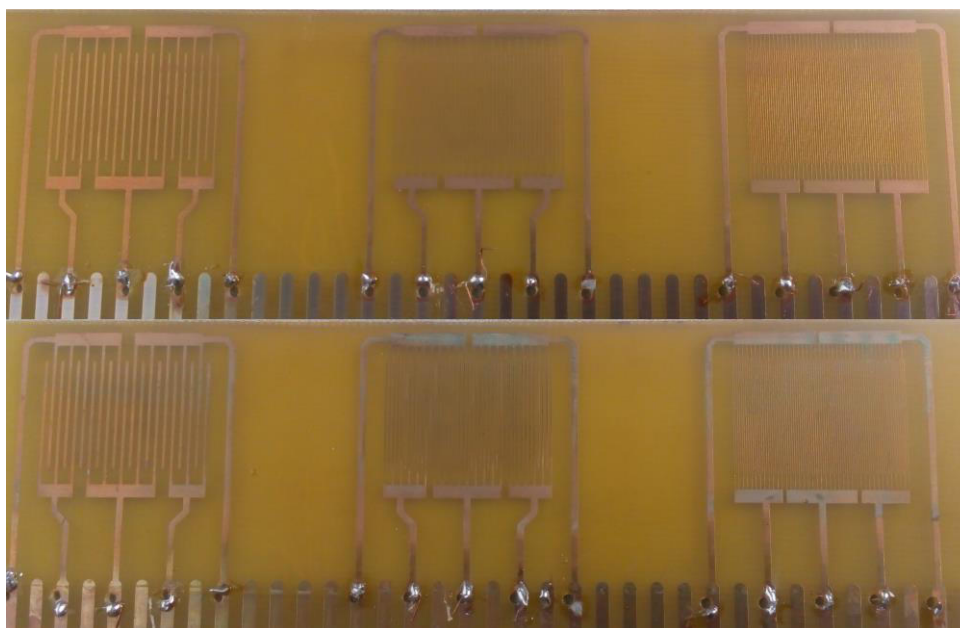
### 7.5.2 Naměřené výsledky

Po týdnu jsem desky proměřil a naměřené hodnoty uvedl do Přílohy 3.

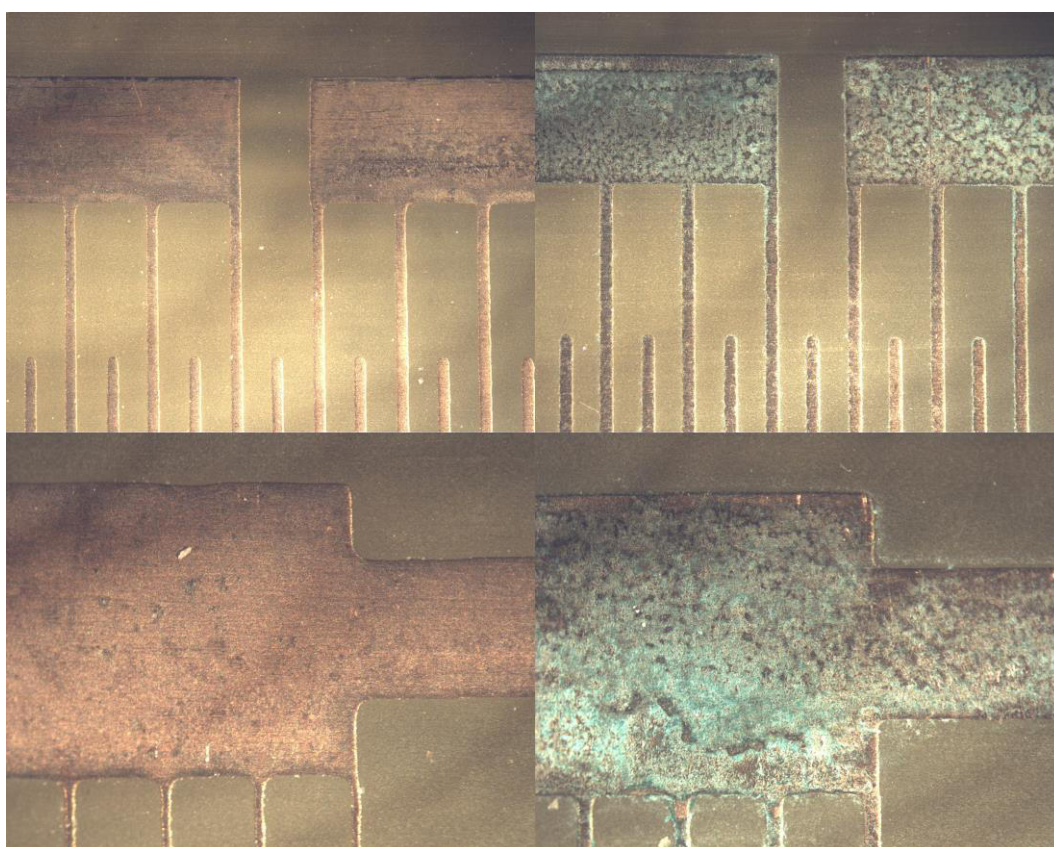
V Tabulka č. 5 jsou uvedeny hodnoty průměrných naměřených povrchových izolačních odporů.

Izolační mezera	COBAR 390 RX HT		IF 2005C	
	Průměrný odpor		Průměrný odpor	
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
	Čistá	Stárnutá	Čistá	Stárnutá
Velká	5.26E+14	4.59E+14	4.25E+14	1.73E+14
Střední	2.34E+14	3.57E+13	6.66E+13	1.85E+13
Malá	1.48E+14	1.11E+13	5.25E+13	7.30E+12

Tabulka č. 5 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR.



Obr. 25 Snímky stárnutých testovacích desek prošlých přetavovací pecí s tavidly (nahore Cobar 390 RX HT, dole IF 2005C).



Obr. 26 Snímky stárnutých desek s tavidly po procesu pájení (vlevo COBAR RX HT 390, vpravo IF 2005C).

### 7.5.3 Vyhodnocení výsledků

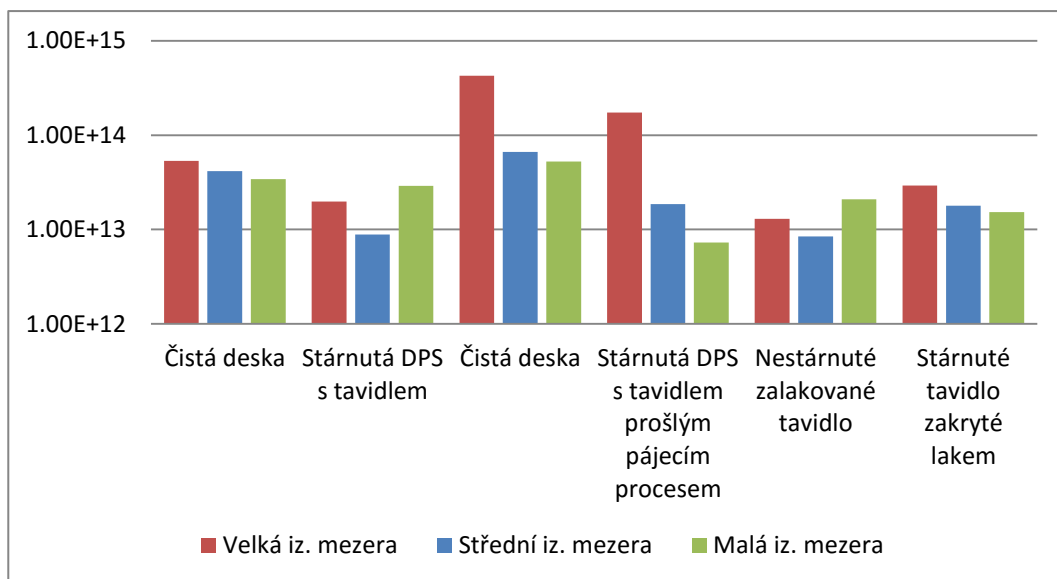
Z hodnot naměřeného SIR a vypočtených průměrů SIR jde vidět pokles průměrných hodnot SIR u obou tavidel a na všech motivech. Oxidace na testovacích deskách vypadá mnohem méně rozvinutě než při jiných testech, opět lze vidět rozdíl v oxidaci desek s tavidlem IF 2005C a tavidlem COBAR, kdy desky s tavidlem IF 2005C jsou oxidované znatelně více viz obr. 26 a obr. 25.

## 7.6 Vyhodnocení testů s tavidly

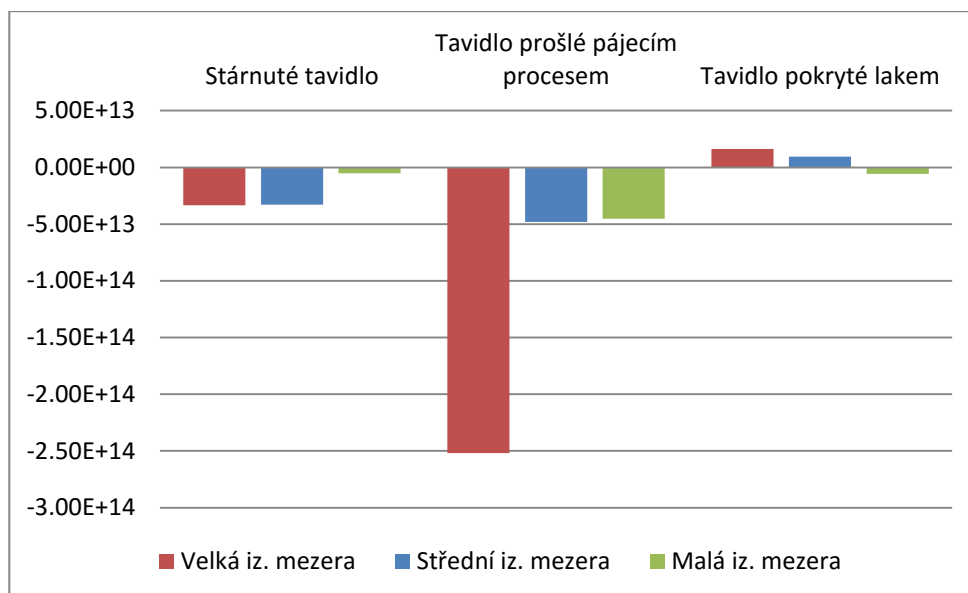
### 7.6.1 Vyhodnocení testů s tavidlem IF 2005C

Výsledky všech tří testů jsem zanesl do grafů a uvedl v této kapitole. Na grafech měření s tavidlem IF 2005C lze vidět snižování povrchového izolačního odporu, jak u stárnutých desek s tavidlem, tak u stárnutých desek s tavidlem, které prošlo pájecím procesem. V grafu č. 2 je vidět samotný rozdíl povrchového izolačního odporu před stárnutím a po stárnutí u jednotlivých testů. Můžeme vidět větší průměrné snížení u testu s tavidlem, které prošlo pájecím procesem. Větší snížení SIR u tavidla prošlého pájecím procesem si vysvětlují aktivací aktivátorů v tavidle, aktivátory mají za účel odstranění oxidů a zlepšení procesu pájení. Slabší aktivátory obsažené v tavidle začínají fungovat až při zvýšené teplotě. Zatímco u tavidla, které neprošlo pájecím procesem, vzniklo množství nevodivých oxidů, které zafungovaly spíše jako izolace, u tavidla prošlého přetavovací pecí, došlo k rozložení množství aktivátorů a díky tomu později během stárnutí k mírnější oxidaci, viz fotky z mikroskopu. Větší změna SIR v testu s tavidlem prošlým pájecím procesem je zřejmě způsobena menší oxidací povrchu mědi a dlouhodobým působením vlhkosti na povrch základního materiálu.

Tavidlové zbytky tavidla IF 2005C pokryté konformním povlakem Elpeguard dle výsledků v grafech nemusí působit velké problémy, pokud jsou izolační vzdálenosti mezi vodiči dost velké. Při pohledu na snímek stárnuté zalakované desky s tavidlem IF 2005C lze vidět značná tvorba oxidů i pod konformním povlakem, i přesto se na obou větších motivech SIR zvýšil, izolační mezery mezi vodiči jsou dostatečně velké, aby nedošlo k snížení SIR. U motivu s nejmenší izolační mezerou došlo ke snížení povrchového izolačního odporu vlivem stárnutí. Vzhledem k faktu, že oxidy vznikaly na všech motivech, jsem dospěl k závěru, že při nanášení konformního povlaku došlo k částečnému omytí a smísení tavidlových zbytků s povlakem a při následném stárnutí umožnilo vmíchané tavidlo oxidaci i přes vrstvu laku. Což se projevilo u nedostatečně velké izolační vzdálenosti poklesem SIR.



Graf č. 1 hodnot SIR testů s tavidlem IF 2005C



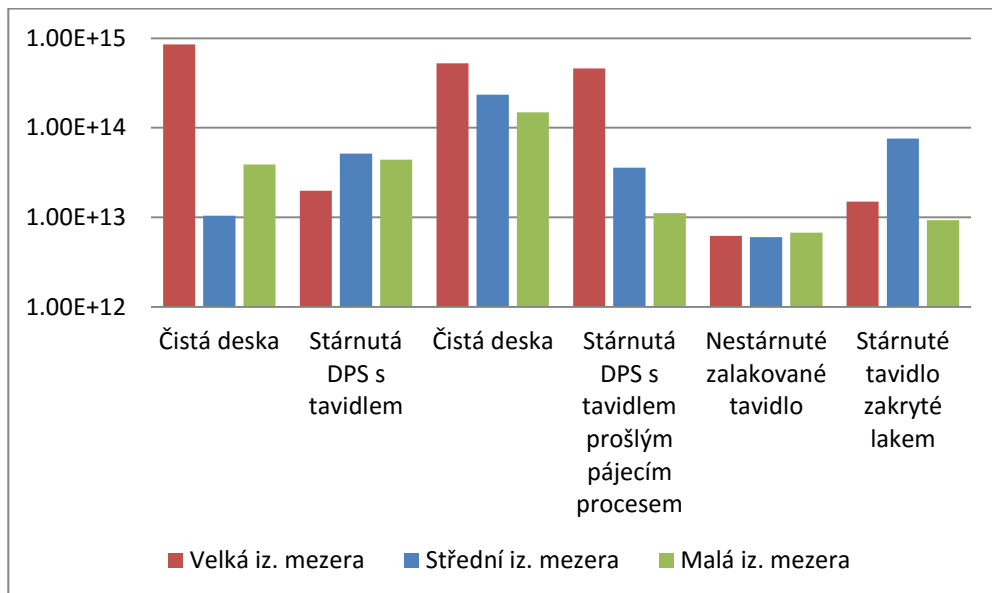
Graf č. 2 změny SIR po testech s tavidlem IF 2005C

## 7.6.2 Vyhodnocení testů s tavidlem COBAR RX HT

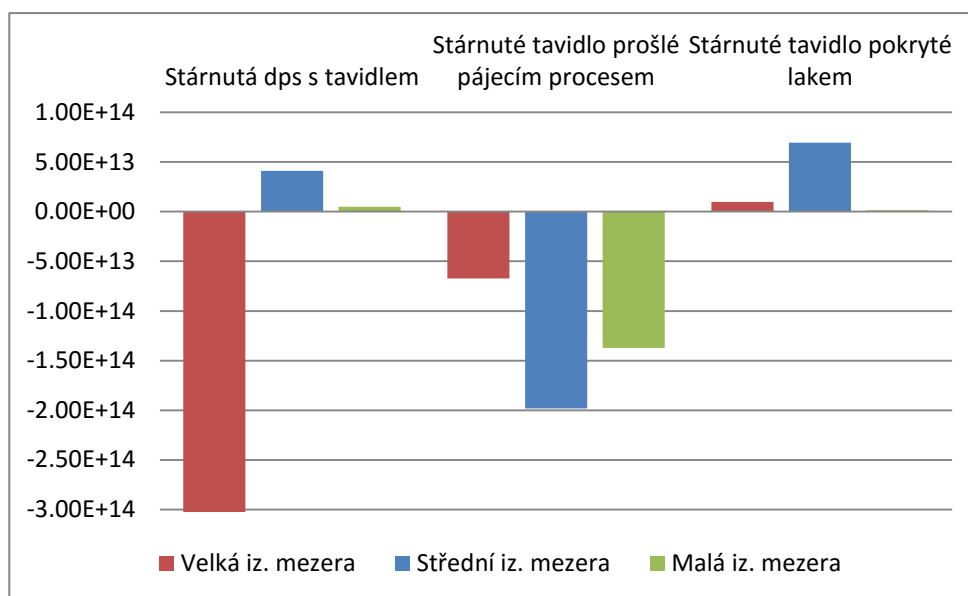
Stejně jako u tavidla IF 2005C jsem výsledky všech tří testů zanesl do grafů, viz grafy č. 3 a 4. Na grafech měření s tavidlem COBAR RX HT lze vidět zvýšení povrchového izolačního odporu, jak u stárnutých desek s tavidlem, tak u stárnutých desek s tavidlem, které prošlo pájecím procesem. V grafu č. 4 je vidět samotný rozdíl povrchového izolačního odporu před stárnutím a po stárnutí u jednotlivých testů. Můžeme vidět větší průměrné snížení u testu s tavidlem, které prošlo pájecím procesem u dvou menších izolačních vzdáleností, zatímco u největší izolační vzdálenosti došlo k větší změně u tavidla, které pecí neprošlo. Větší snížení SIR u prvního testu tavidla COBAR RX HT na motivu s velkou izolační mezerou zapříčinily pravděpodobně nečistoty spolu s vlhkostí.

Větší snížení SIR u tavidla prošlého pájecím procesem si vysvětlují aktivací aktivátorů v tavidle, aktivátory mají za účel odstranění oxidů a zlepšení procesu pájení. Slabší aktivátory obsažené v tavidle začínají fungovat až při zvýšené teplotě. Zatím co u tavidla, které neprošlo pájecím procesem, vzniklo množství nevodivých oxidů, které zafungovaly spíše jako izolace, u tavidla prošlého přetavovací pecí, došlo k odpaření množství aktivátorů a díky tomu později během stárnutí k mírnější oxidaci, viz fotky z mikroskopu. Větší změna SIR v testu s tavidlem prošlým pájecím procesem je dle mě způsobena menší oxidací povrchu mědi a dlouhodobým působením vlhkosti na povrch základního materiálu.

Tavidlové zbytky tavidla COBAR 390 RX HT pokryté konformním povlakem Bectron byly spolehlivě zapouzdřeny a výsledný SIR se zvýšil. I při optické kontrole lze vidět mnohem menší narušení povlaku tavidlovými zbytky oproti tavidlu IF 2005C, a to i přestože je množství naneseného laku třikrát menší, než množství laku Elpeguard použitého pro tavidlo IF 2005C.



Graf č. 3 hodnot SIR testů s tavidlem COBAR 390 RX HT



Graf č. 4 změny SIR po testech s tavidlem COBAR 390 RX HT

## 7.7 Měření ionizovatelných nečistot metodou ROSE

Abych mohl uskutečnit měření nečistot konduktometrickými metodami, potřebuji znát množství naneseného tavidla na testovacích deskách. Pomocí rozdílu obou hmotností DPS před a po znečištění zjistím množství sušiny na desce. Známost hodnotu sušiny využiji v rovnici 10 pro výpočet objemu tavidla na ploše testovací DPS.

### 7.7.1 Výpočet množství tavidla na DPS

Pro výpočet objemu naneseného tavidla byl příhodně využit parametr množství sušiny na objem tavidla z datasheetu jednotlivých tavidel a známá hmotnost sušiny na DPS. Mimo jiné bylo potřeba také znát plochu, na kterou je tavidlo nanášeno. Bral jsem v úvahu přední stranu s odečtenou plochou kaptonové pásky a přičetl jsem i plochu hran, na kterou se s velkou pravděpodobností také dostalo tavidlo. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vypočtených objemů pro jednotlivé testované DPS a tavidla.

Tavidlo	IF 2005C			COBAR 390 RX HT		
Vzorek č.	1	2	3	4	5	6
Objem na cm <sup>2</sup>	8,51 μl	7,98 μl	7,90 μl	9,03 μl	9,46 μl	8,59 μl

Tabulka č. 6 vypočtených objemů tavidla na testovaných DPS

## Příklad výpočtu pro čtvrtou testovací DPS tavidla COBAR 390 RX HT

Objem tavidla na  $\text{cm}^2$  desky  $V_S$ :

$$V_S = \frac{\frac{1 \text{ kg}}{\rho}}{22 \text{ g}} * \frac{m_2 - m_1}{S} = \frac{1}{0,813} \frac{22088,6 - 22078,2}{(5 * 15 + 0,15 * 5 + 0,15 * 15) - (0,9 * 15)} = 9,03 \mu\text{l}/\text{cm}^2 \quad (10)$$

### 7.7.2 Průběh měření

Samotným měřením zjistím vodivost kapaliny v  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a aktuální teplotu kapaliny.

Měření probíhá dle laboratorního návodu v souladu s normou IPC-TM-650. Nejprve jsem odlil přibližné potřebné množství roztoku do připravené nádoby a sondou změřil čistý roztok tvořený z 25 % deionizovanou vodou a z 75 % izopropylalkoholem. Vodivost čistého roztoku by měla být maximálně  $0,05 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Po ověření čistoty roztoku jsem pomocí mikropipety odměřil předem vypočtené množství tavidla, které simuluje znečištění na plochu  $1 \text{ cm}^2$ . Odměřené množství tavidla jsem přidal do čistého roztoku a pečlivě promíchal. Následně jsem změřil vodivost, zaznamenal teplotu a v odměrném válci odečetl množství roztoku. Experimentálně jsem prokázal, že hodnota vodivosti s teplotou roste maximálně o 10 % při zvedání teploty do  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Všechny hodnoty jsem zapsal do Tabulka č. 7 a pomocí vzorce vypočetl kontaminaci  $\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$ .

$$Z_{ps} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_0) * V}{S * k_g} \quad (11)$$

tavidlo	č. DPS	Objem tavidla	poč. vodivost	$\vartheta$	Objem roztoku	vodivost	kontaminace
		$\mu\text{l}$	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	$^\circ\text{C}$	ml	$\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$	$\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$
IF 2005C	1	8.51E-03	0.05	21.4	25	0.25	0.16
IF 2005C	2	7.98E-03	0.05	21.3	25	0.24	0.15
IF 2005C	3	7.90E-03	0.05	21.3	25	0.26	0.17
Cobar	4	9.03E-03	0.05	21.1	25	0.22	0.13
Cobar	5	9.46E-03	0.05	21.3	25	0.24	0.15
Cobar	6	8.59E-03	0.05	21.4	25	0.26	0.17

Tabulka č. 7 naměřených a vypočtených hodnot pro měření konduktometrickou metodou

### 7.7.3 Vyhodnocení výsledků

Při měření ionizovatelných nečistot jsem nasimuloval znečištění desky před procesem pájení. V tabulce č. 6 jsou vidět hodnoty vypočteného množství tavidla na jednotlivých deskách DPS. Dále pak v tabulce č. 7 jsou umístěny naměřené a vypočtené hodnoty vodivosti a kontaminace v ekvivalentech  $\mu\text{gNaCl}/\text{cm}^2$ .

## 7.8 Měření ionizovatelných nečistot metodou SEC

Pro srovnání jsem se rozhodl provést dle normy IPC-TM-650-2.3.25.1 test na ionizovatelné nečistoty výluhem.

### 7.8.1 Průběh měření

Měřena je znečištěná deska umístěná do definovaného množství roztoku izopropanolu a deionizované vody v poměru 3:1. Roztok je nejprve měřen čistý při pokojové teplotě, měl by mít počáteční vodivost menší nebo rovnou 0,05  $\mu\text{S}$ . Roztok je umístěn do nového důkladně propláchnutého ESD sáčku viz obr. 27 z materiálu PET, odolného na teplotu. Do sáčku s roztokem je umístěna znečištěná deska. Důkladně zavřený sáček je umístěn ve vodní lázni ohřáté na 80 °C a celá lázeň se umístí do pece na dobu jedné hodiny. Po jedné hodině je sáček přemístěn do vodní lázně s pokojovou teplotou a po ustálení teploty je změřena konduktivita. Z naměřené konduktivity a známého objemu roztoku je dopočítána kontaminace vyjádřena v ekvivalentech chloridu sodného na centimetr čtverečný.

První provedené měření vyšlo velmi nepřesně, téměř dvojnásobně než jsem odhadoval a usoudil jsem, že byla deska před jejím znečištěním nedostatečně očištěna. Měření jsem proto opakoval, dokud jsem nedosáhl dostatečné počáteční čistoty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce. Výpočet kontaminace je proveden dle rovnice č. 11.

### 7.8.2 Dodatečné měření metodou ROSE

Dále jsem musel provést dodatečné měření metodou ROSE s hodnotami z předchozího měření, a to vzhledem k faktu, že výluhem měřené nečistoty byly z celé plochy znečištěné tavidlem, zatímco v předchozím měření jsem měřil nečistoty s množstvím tavidla pouze na ploše 1  $\text{cm}^2$ . Pro možné porovnání výsledků jsem provedl měření ve stejném objemu roztoku jako u měření výluhu a množství tavidla jsem zvolil z průměrných hodnot naneseného konkrétního tavidla z předchozích testů.

Metoda	$\vartheta$	Počáteční vodivost	Konečná vodivost	Objem roztoku	Vypočtená kontaminace
-	°C	$\mu\text{Scm}^{-1}$	$\mu\text{Scm}^{-1}$	ml	$\mu\text{gNaClcm}^{-2}$
ROSE	21.1	0.05	0.31	490	3.512755
SEC	21.4	0.05	0.38	490	4.458497

Tabulka č. 8 naměřených hodnot metody ROSE a SEC



Obr. 27 Snímek ESD sáčku použitého pro měření výluhem.

### 7.8.3 Vyhodnocení výsledků

Z výsledků měření ionizovatelných nečistot výluhem vyplývá podobnost výsledků metody s metodou ROSE. Drobný rozdíl v kontaminaci je pravděpodobně způsoben částečným vymytím a degradací složek z epoxidu při zvýšené teplotě. Pokud se bude brát v potaz možnost částečného ovlivnění samotným základním materiálem, tak můžeme vzhledem k podobnosti výsledků použít obě metody a vzájemně je porovnávat s tou výhodou, že metoda ROSE nepotřebuje na rozdíl od SEC, fyzicky očistit desku a není potřeba ji odejímat z procesu, kde je jinak používána.

## 7.9 Měření DPS pokryté olovnatou pájkou nanesenou vlnou

Jako další test byly stárnuty testovací desky, které prošly olovnatou pájecí vlnou.

### 7.9.1 Průběh měření

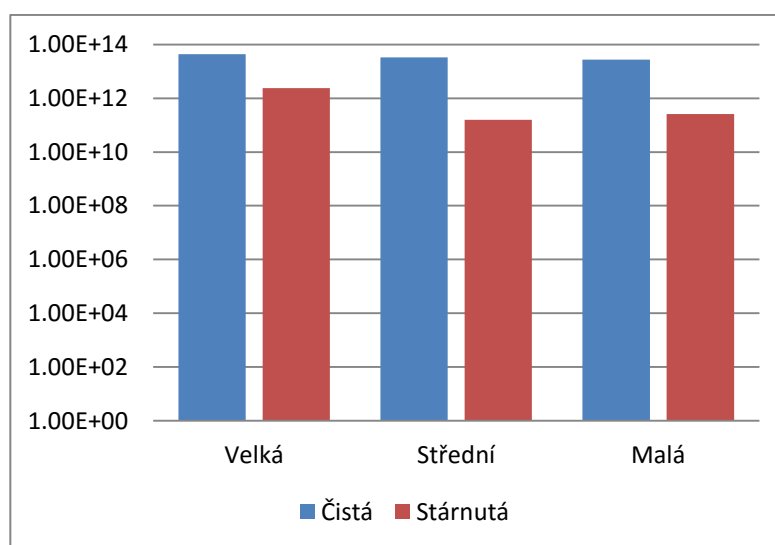
Desky s nanesenou olovnatou pájkou jsem důkladně očistil, vysušil a proměřil. Nakonec jsem desky připájel k vodičům napojeným na zdroj napětí a umístil do komory na stárnutí při nastavené teplotě 40 °C, relativní vlhkosti 95 % a přiloženém napětí 10 V po dobu 168 hodin.

### 7.9.2 Naměřené výsledky

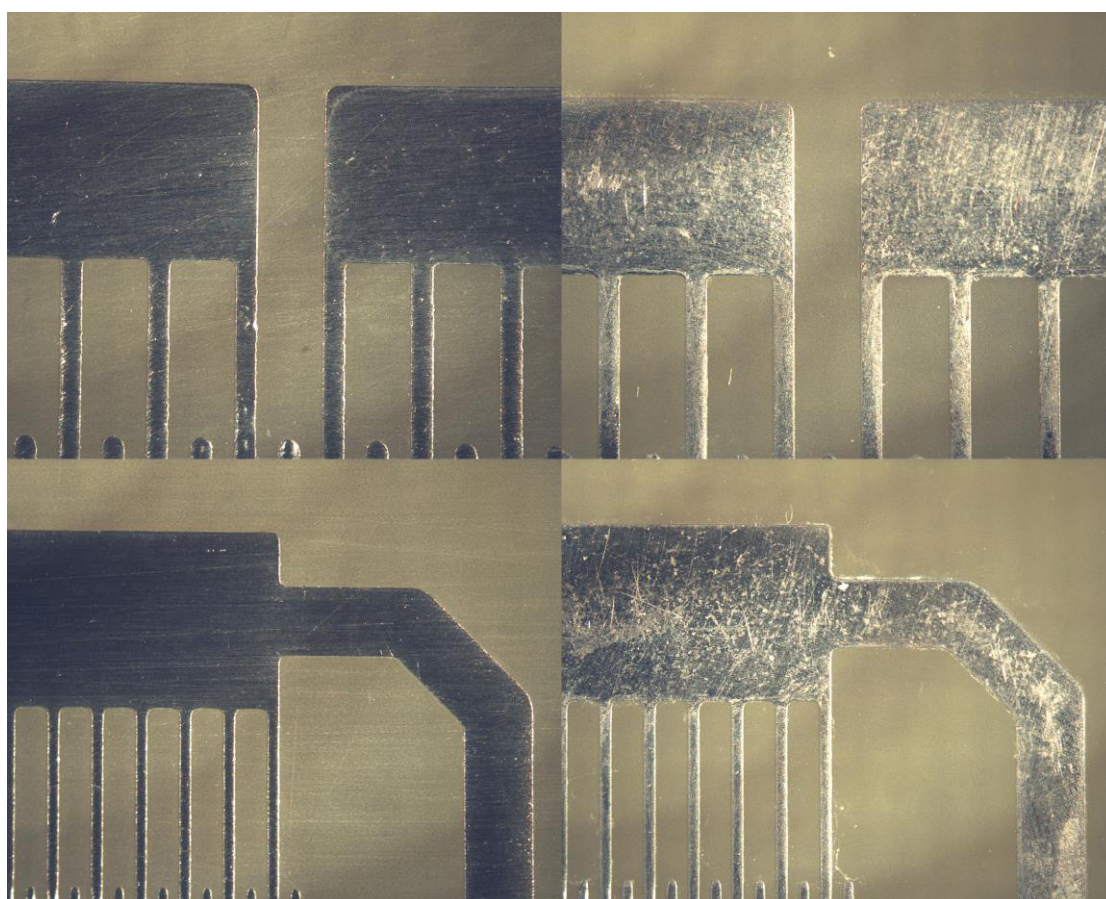
Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v příloze č. 4 a vypočtené průměrné hodnoty SIR jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Deska pokrytá olovnatou pájkou		
Izolační mezera	Průměrný odpor	
	$\Omega$	$\Omega$
	Čistá	Stárnutá
Velká	4.38E+13	2.38E+12
Střední	3.34E+13	1.56E+11
Malá	2.72E+13	2.57E+11

Tabulka č. 9 průměrných hodnot SIR testu s olovnatou pájkou



Graf č. 5 hodnoty SIR desek s olovnatou pájecí pastou nanesenou vlnou



Obr. 28 Snímky desek pokrytých olovnatou pájkou. (vlevo čisté, vpravo stárnuté)

### 7.9.3 Vyhodnocení výsledků

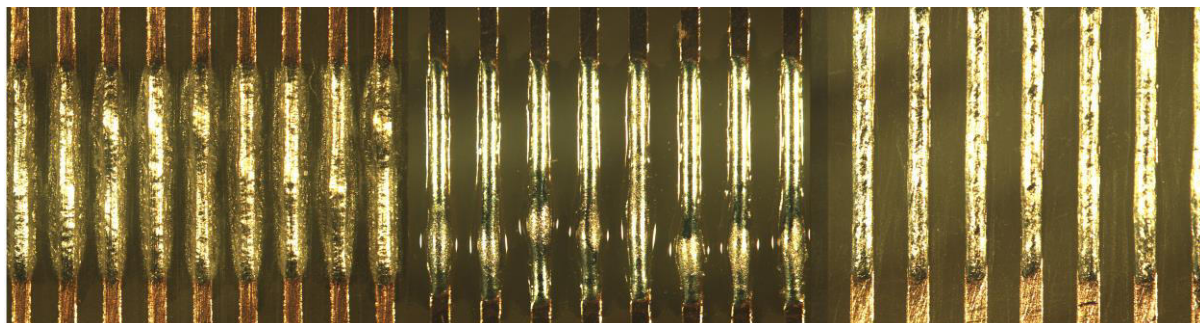
Z naměřených hodnot můžeme vidět snížení SIR vlivem stárnutí. Na snímku z mikroskopu je vidět oxidace povrchu, viz obr 28. Změna SIR nastala pravděpodobně vlivem vlhkosti, která dlouhodobě působila na vzorky.

### 7.10 Měření DPS s nanesenou pájecí pastou typu SAC

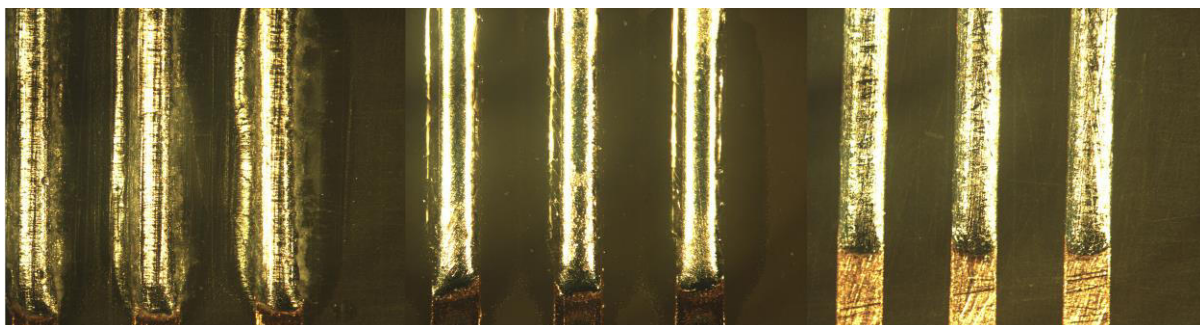
Pro vznik elektromigrace je nejvhodnější materiál stříbro. Z toho důvodu jsem provedl měření SIR a testu na elektromigraci na testovacích DPS pokovených SAC pastami od různých dodavatelů. Z několika, v laboratoři dostupných past, jsem vybral tři s největším obsahem stříbra.

Použité pasty jsou od výrobců Kester, AIM a SMIC. Jedná se o bezolovnaté pasty složením řadící se k SAC305 pájecím pastám. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3 pájecí pasty.

Vzhledem k velikosti izolačních vzdáleností nejmenšího motivu testovacích DPS, jsou pokoveny jen první dva motivy. Pro pokovení nejmenšího motivu by musela být uskutečněna jiná metoda, aby nedošlo ke slítí pájky. Desky pokovené pomocí pájecí pasty mají na povrchu velké množství tavidlových zbytků, viz obr. 29 a obr. 30, snímky uprostřed a nalevo. Desky byly nakontaktovány a podrobeny stárnutí dle IPC-TM-650. Průměry naměřených hodnot pro jednotlivé druhy pájecích past jsou uvedeny v tabulce č. 8.



Obr. 29 Snímky testovacích DPS zleva, stárnuté, nestárnuté, zbavené tavidel.



Obr. 30 Snímky testovacích DPS zleva, stárnuté, nestárnuté, zbavené tavidel.

Izolační mezera	Senju M40		AIM		Kester	
	Průměrný odpor		Průměrný odpor		Průměrný odpor	
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
	Čistá	Stárnutá	Čistá	Stárnutá	Čistá	Stárnutá
Velká	4.93E+13	4.69E+13	2.15E+14	5.4E+13	1.63E+14	3.97E+13
Střední	1.50E+14	9.4E+13	1.02E+14	3.95E+12	3.59E+13	9.99E+12

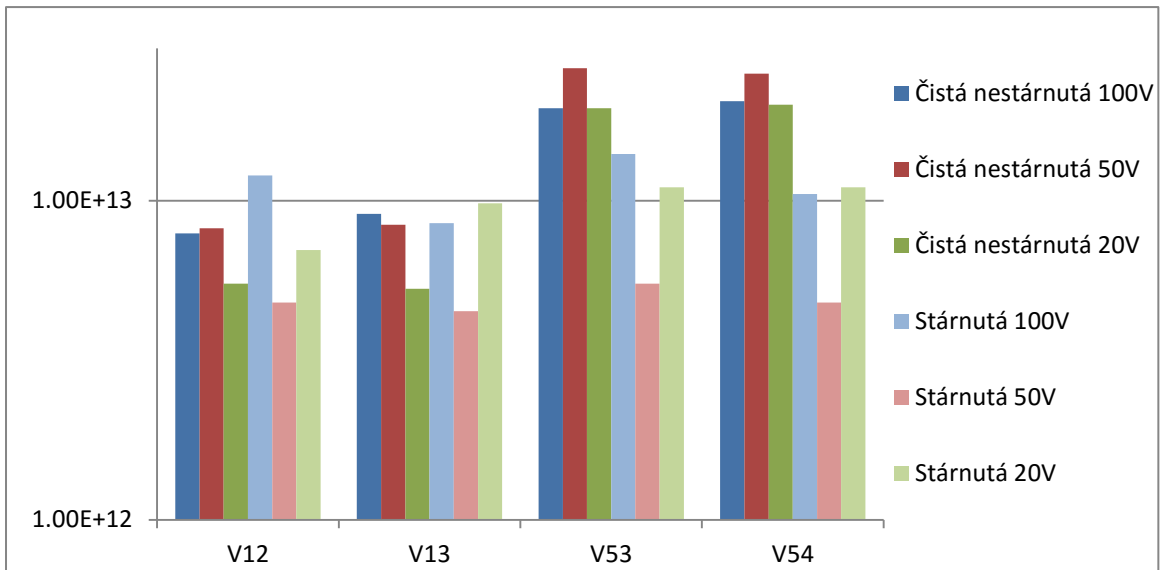
Tabulka č. 10 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR desek s pastou.

Vzhledem k velkému množství tavidla došlo prakticky k zakonzervování pokovených částí DPS, viz Tabulka č. 10. Pro pozorování vlivu zhoršených klimatických podmínek jsem testovací desky očistil od tavidla pomocí roztoku PROTON a provedl stárnutí.

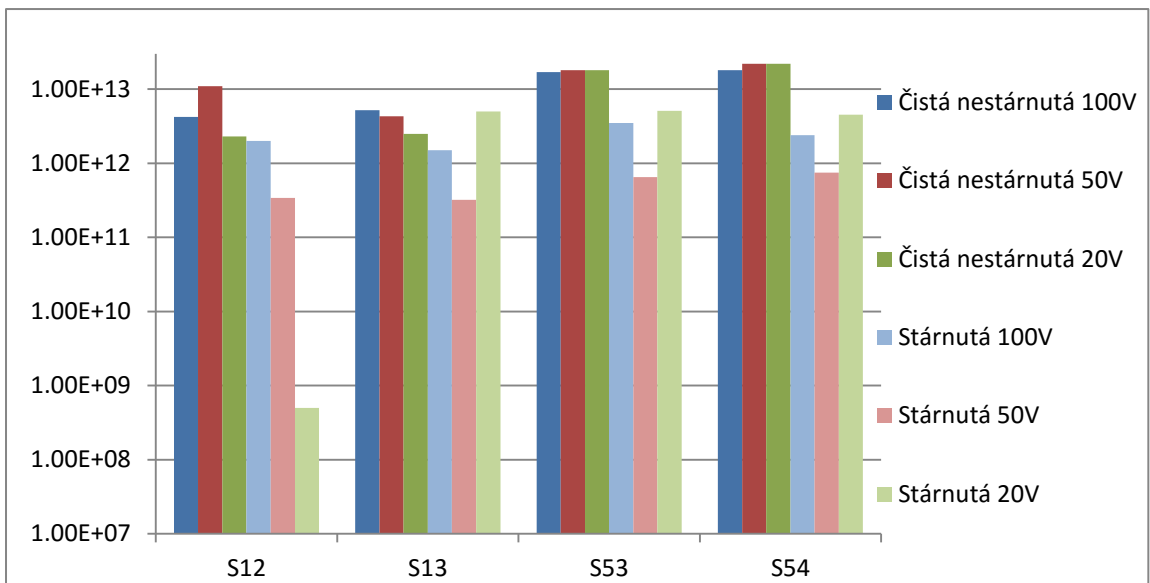
Po spouště měření jsem vypočítával malé změny SIR a minimální možnost vzniku elektromigrace u nastavených podmínek dle norem. Rozhodl jsem se proto o větší zátěž testovací DPS a pokusil jsem se o zrychlenější testy na elektromigraci. Využil jsem zdrojů BK 127, Agilent N5751A a Matrix MPS-3005L-3. Vybral jsem tři různá napájecí napětí, 20 V, 50 V a 100 V. Relativní vlhkost jsem ponechal 95 % a teplotu 40 °C. Pro měření jsem použil tři testovací DPS s SAC pastou s největším množstvím stříbra, která byla k dispozici. Po týdnu stárnutí jsem testovací DPS vyjmul, proměřil a nafotil. Dodatečně byla provedena 3D analýza a prvková analýza spolu se snímky z elektronového mikroskopu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 11.

		$R_{V12} (\Omega)$	$R_{V13} (\Omega)$	$R_{V53} (\Omega)$	$R_{V54} (\Omega)$	$R_{S12} (\Omega)$	$R_{S13} (\Omega)$	$R_{S54} (\Omega)$	$R_{S54} (\Omega)$
Čistá nestárnutá		7.90E+12	9.10E+12	1.95E+13	2.05E+13	4.20E+12	5.20E+12	1.70E+13	1.80E+13
		8.20E+12	8.40E+12	2.60E+13	2.50E+13	1.10E+13	4.30E+12	1.80E+13	2.20E+13
		5.50E+12	5.30E+12	1.95E+13	2.00E+13	2.30E+12	2.50E+12	1.80E+13	2.20E+13
Stárnutá	100V	1.20E+13	8.50E+12	1.40E+13	1.05E+13	2.00E+12	1.50E+12	3.50E+12	2.40E+12
	20V	7.00E+12	9.80E+12	1.10E+13	1.10E+13	5.00E+08	5.00E+12	5.10E+12	4.50E+12
	50V	4.80E+12	4.50E+12	5.50E+12	4.80E+12	3.40E+11	3.20E+11	6.50E+11	7.50E+11

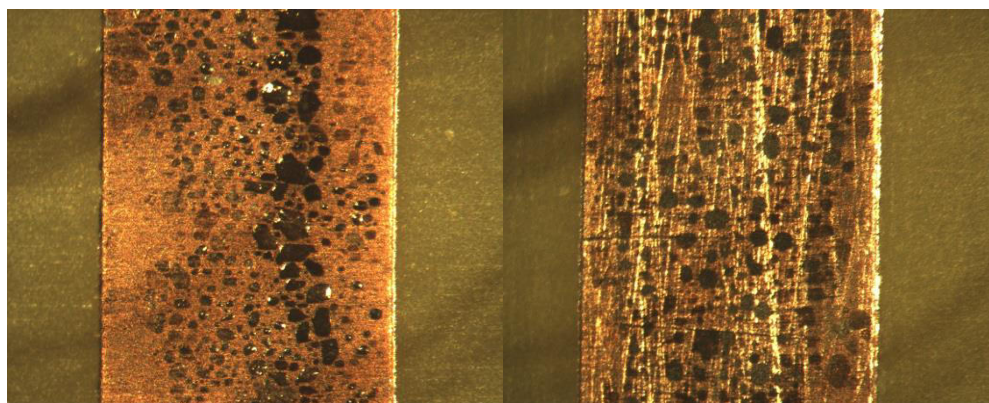
Tabulka č. 11 naměřené hodnoty jednotlivých motivů při různých napětích.



Graf č. 6 testu SIR motivu s velkými izolačními mezerami pro různá napětí



Graf č. 7 testu SIR motivu se středními izolačními mezerami pro různá napětí



Obr. 31 Snímky oxidovaných plošek na testovací DPS.

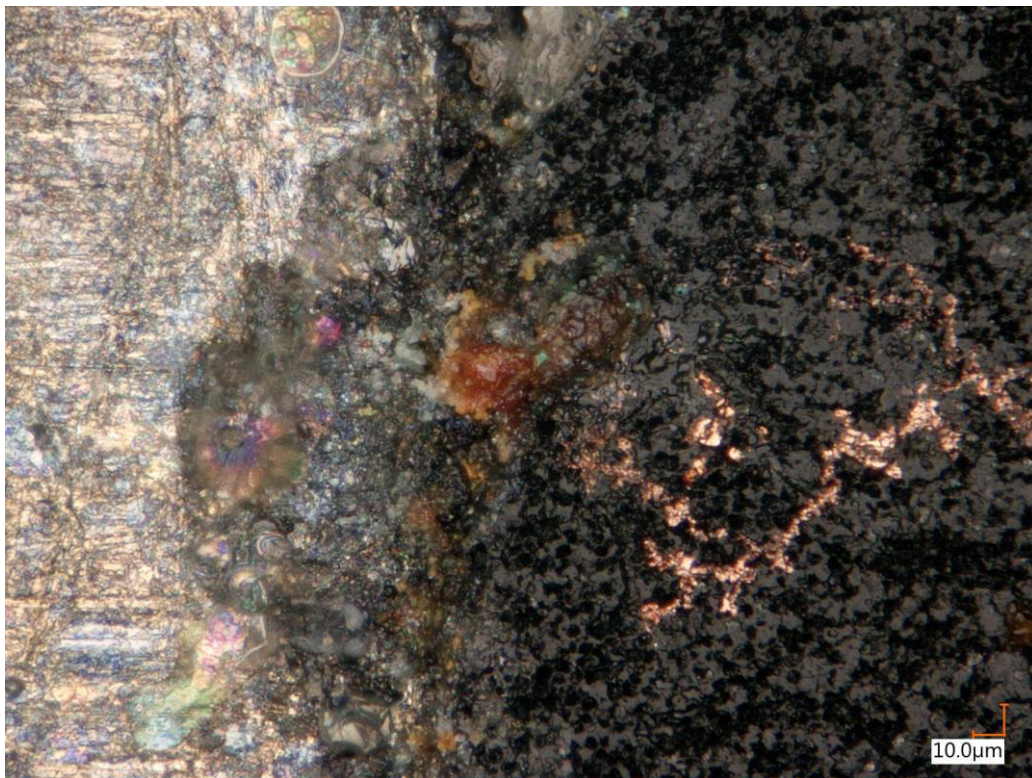
### 7.10.1 Vyhodnocení výsledků

Prvotní stárnutí nemělo na samotné kovové hřebínky prakticky žádný vliv, vzhledem k množství tavidla na povrchu. Tavidlo zakonzervovalo kovové plošky a během testu docházelo pouze k degradaci tavidla bez viditelného vlivu na samotné kovové hřebínky. Po stárnutí stejných desek po důkladném očištění tavidla a při přiloženém napětí 20, 50 a 100 V došlo k nevýrazným změnám na většině testovacích kombinací hřebíků. U jednoho měřeného motivu se vyskytl velký pokles SIR, oproti ostatním o čtyři řády. Po prozkoumání povrchu testovaných DPS mikroskopem, jsem našel dendrit na desce, na kterou bylo přiloženo napětí 20 V, viz Obr 32 – Obr. 36. Vzniklý dendrit je složen pouze z mědi, vzhledem k přítomnosti SAC pájky jsem předpokládal vznik stříbrného dendritu. V SAC pájce je obsah stříbra pravděpodobně tak malý, že nestačilo pro vznik dendritu stříbrného, ale myslím si, že mělo podíl na vzniku dendritu měděného. Vzhledem k tomu, že na desce s SAC pájkou ke vzniku dendritu došlo, ale na ostatních deskách se žádný nevyskytl, ani na desce s olovnatou pájkou, soudím že stříbro zafungovalo jako katalyzátor. Vzhledem k náchylnosti stříbra k elektromigraci pomohlo k prvotnímu vzniku dendritu a se zvýšenou proudovou hustotou začala později migrovat i měď. Měď, která je u plošek s SAC pájkou po krajích místy odhalena vlivem horší smáčivosti SAC pájky, se tak mohla účastnit elektromigrace. Zatímco u olovnaté pájky, která má velmi dobrou smáčivost, je měď prakticky všude zakrytá pájkou, nedošlo k žádným náznakům elektromigrace. Provedl jsem pozorování optickým i elektronovým mikroskopem a provedl prvkovou analýzu pro přesné určení rozmístění materiálu na DPS viz Obr. 37 – Obr. 38. Na Obr. 32 jde vidět snímek celého dendritu a přesun mědi od anody ke katodě, na snímku přesun z levé strany na stranu pravou. Na anodě vlevo došlo k narušování struktury celé plošky, zatímco na katodě je zachován původní stav zapájené plošky s viditelným nárůstem mědi v krajních místech. Na Obr. 36 jsou vidět výsledky z 3D analýzy. Z měření profilu řezu je vidět výška mědi 0,27  $\mu\text{m}$ , s tím že v okolí jsou vidět různá místa na základním materiálu s extrémy nad i pod výškou měděného dendritu. Z 3D analýzy je vidět pórovitost základního materiálu FR4 a tenkost dendritu, kdy je místy nižší než nerovnosti základního materiálu. Rozdíl ve stavu anody a katody lze lépe vidět na Obr. 37 z elektronového mikroskopu. Složení dendritu a jeho okolí je vidět na snímcích z prvkové analýzy, viz Obr. 40.

**Snímky dendritu z optického mikroskopu VHX – 5000 firmy Keyence.**



Obr 32 Snímek dendritu na testovací DPS.



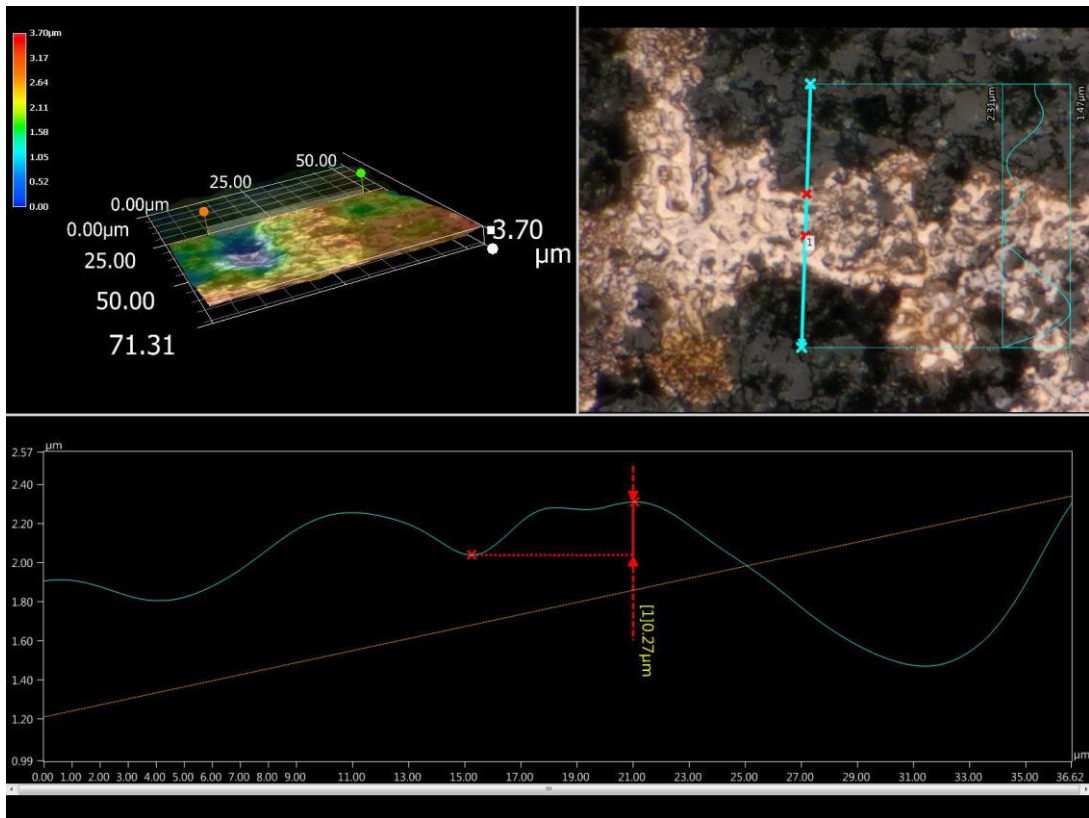
Obr 33 Snímek dendritu na straně katody.



Obr 34 Snímek dendritu na straně anody.

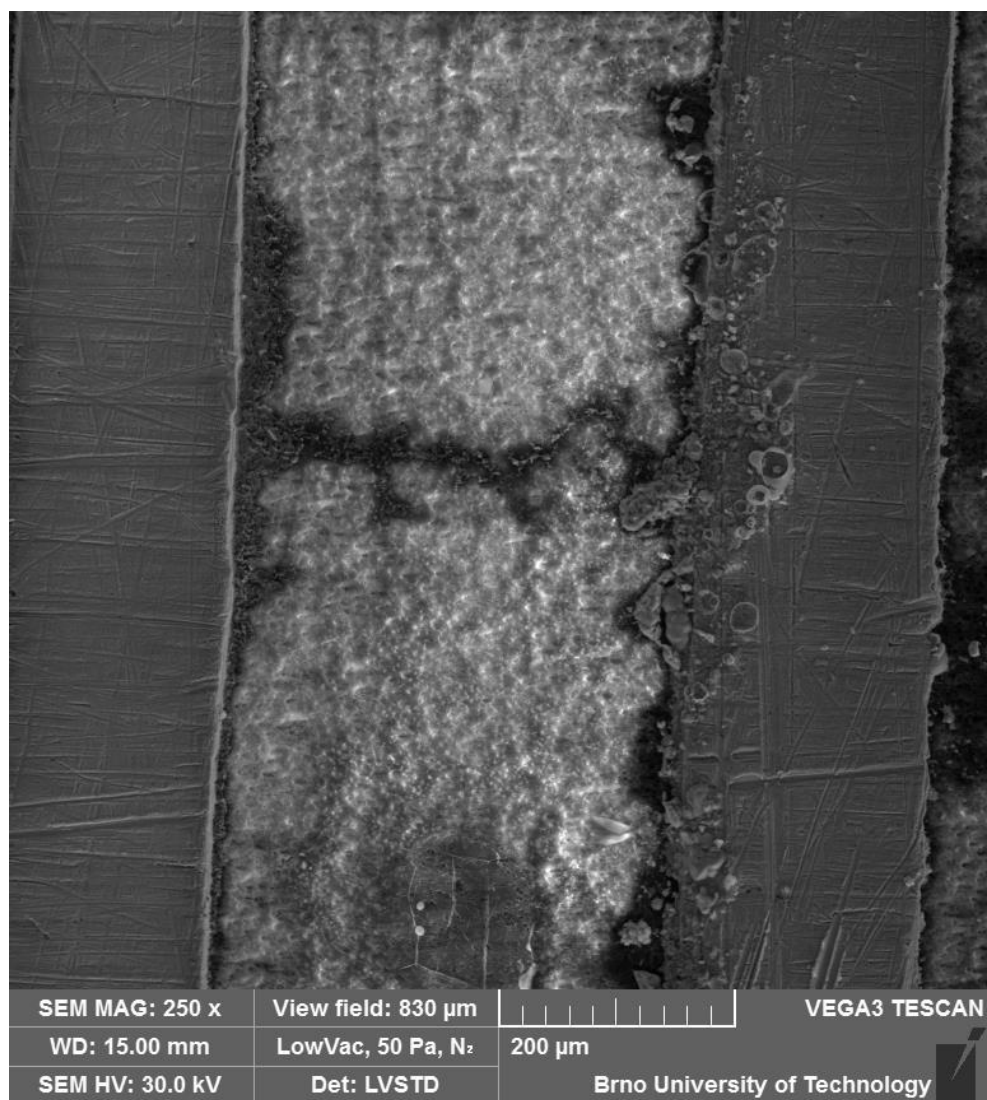


Obr 35 Snímek středu dendritu.



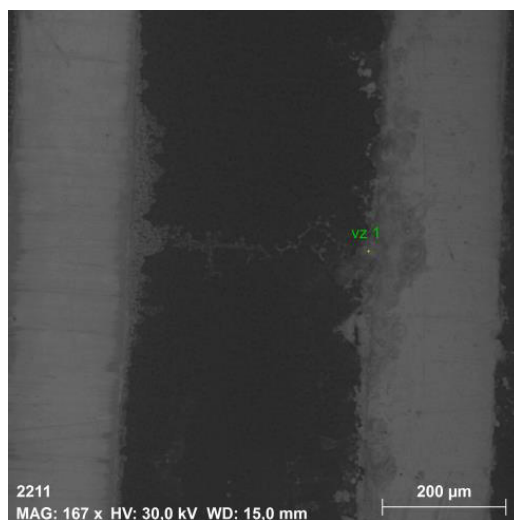
Obr 36 Snímek 3D analýzy dendritu.

**Snímky z elektronového mikroskopu Vega 3 XMU firmy Tescan.**

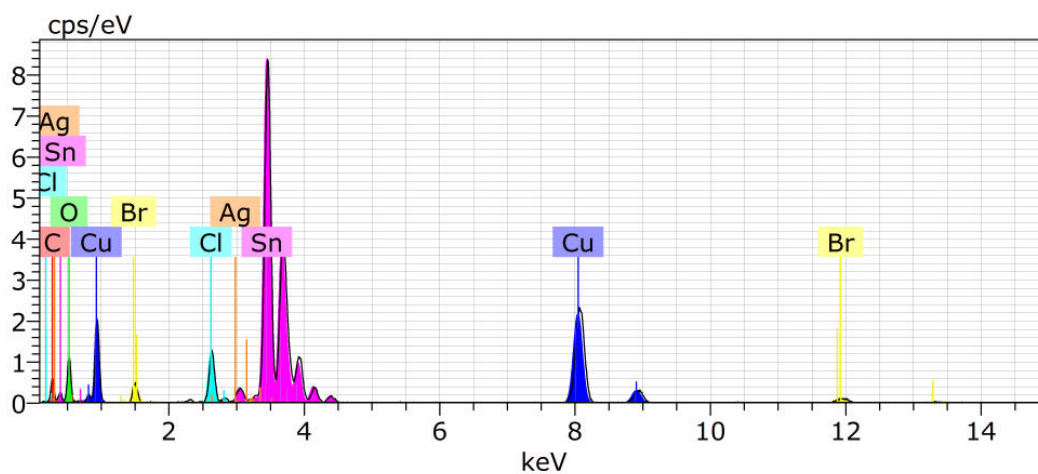


Obr. 37 Snímek dendritu na testovací DPS z elektronového mikroskopu.

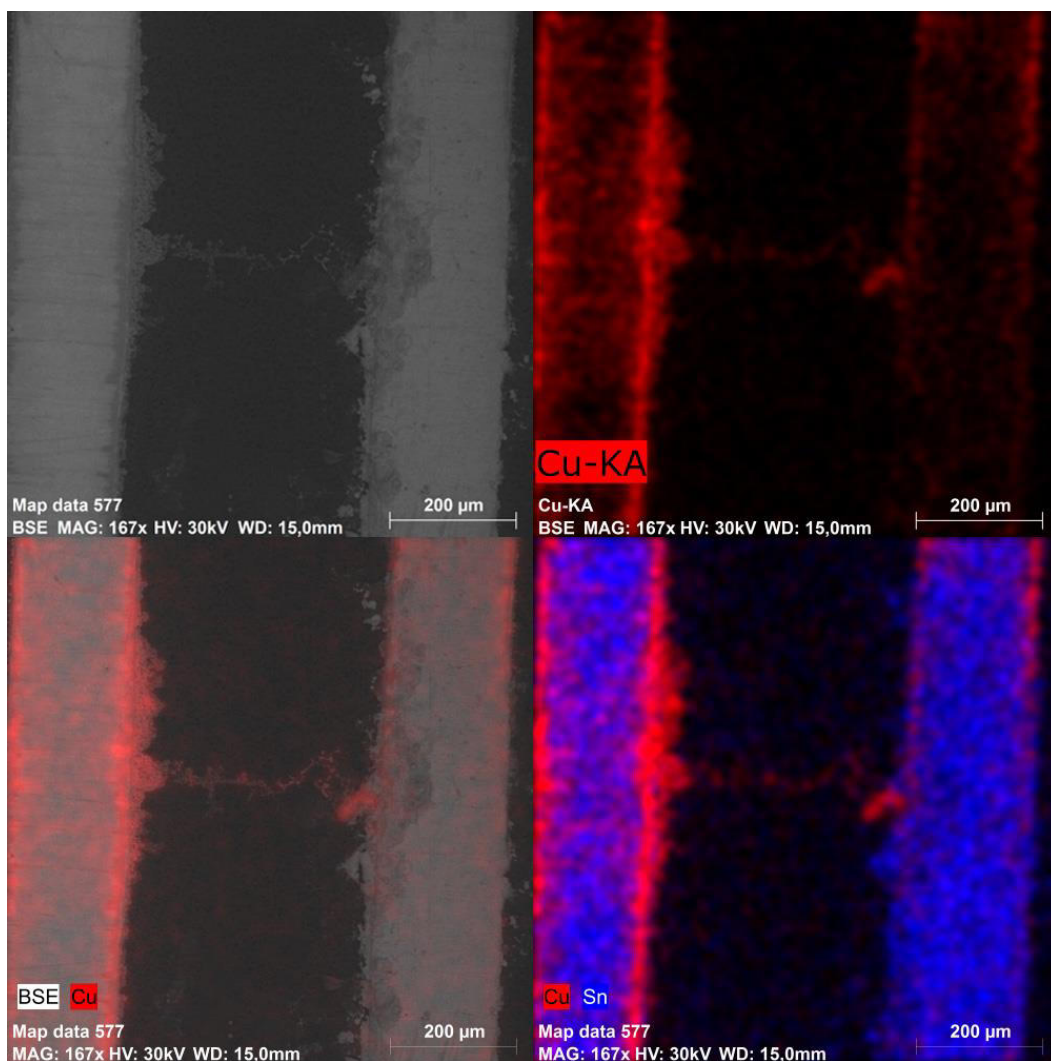
## Snímky prvkové analýzy.



Obr 38 Snímek s označením plochy pro vyhodnocení prvkové analýzy.



Obr 39 Snímek grafu prvkové analýzy testované DPS



Obr 40 Snímky prvkové analýzy dendritu na testovací DPS. (červeně měď, modře cín)

## 8 Závěr:

V diplomové práci byla řešena problematika tavidlových zbytků a následné elektromigrace, která během používání elektronických zařízení, často za kondenzačních stavů, vede k různým defektům. Vzniklé defekty mohou být těžko odhalitelné, vznikající zdánlivě po náhodné době, dle vlivu prostředí a k tomu kritické pro spolehlivost elektronického zařízení.

V teoretické části je popsána problematika elektromigrace, tavidel, tavidlových zbytků, konformních povlaků a krátce pájecích past. Blíže jsou uvedeny tavidla IF 2005C, Cobar 390 RX HT a povlaky Bectron PL 1104 a Elpeguard SL 1301 ESCO-FLZ a SAC pasty od výrobců Kester, SMIC a AIM.

Praktická část byla zaměřena na realizaci měřicího přípravku, následné zpracování metodiky měření a provedení měření za podmínek, která mohou nastat ve výrobě, či během používání elektronického zařízení. Byla provedena série měření povrchového izolačního odporu (SIR) na deskách s hřebínkovým motivem. Byly měřeny desky znečištěné tavidlem, které neprošly tepelným procesem dále pak tavidlem znečištěné desky, které prošly pájecím procesem a desky znečištěné tavidlem a zalakované. Dále pak byly provedeny testy desek s nanesenými SAC pastami a desek prošlých pájecí vlnou s olovnatou pájkou. Zároveň byly všechny desky podrobeny testům na elektromigraci. Testy na elektromigraci a SIR probíhaly dle normy IPC-TM-650, aby byl simulován reálný stav v provozu. Desky byly vloženy do klimatické komory na dobu 168 hodin s nastavenou relativní vlhkostí 95 %, teplotou 40 °C a přiloženým napětím 10 V. Každý test byl dle normy IPC-TM-650 proveden na minimálně třech deskách pro každé tavidlo, aby mohly být výsledky zprůměrovány. Dále byly provedeny konduktometrická měření ionizovatelných nečistot metodami ROSE a SEC.

Jako první měření v praktické části jsem provedl měření povrchového izolačního odporu desek s tavidly COBAR 390 RX HT a IF 2005C. Testoval jsem desky pro různé situace, které mohou ve výrobě a následném používání elektronického zařízení nastat. Jako první jsem testoval vliv tavidlových zbytků, které se při procesu nanášení dostanou na druhou stranu desky a nemusí projít úplným pájecím procesem, sledoval jsem změnu SIR a vliv na elektromigraci. Druhá série testů byla provedena s tavidlovými zbytky, které zůstanou na straně desky otočené směrem ke zdroji ohřevu, tedy tavidlo prošle pájecím procesem. Třetí test SIR s tavidly byl pro situaci, kdy zůstanou na desce tavidlové zbytky a deska je zalakována konformním povlakem. Výsledky jednotlivých měření jsou diskutovány u každého měření zvlášť a nakonec ještě souhrnně za poslední kapitolou testů SIR s tavidly.

V další části praktických měření jsem využil hodnoty získané v prvních testech a provedl jsem konduktometrické testy metodami ROSE a SEC. Výsledky jsem zanesl do tabulek a jednotlivá měření porovnal.

Jedno z posledních měření jsem provedl na deskách pokrytých olovnatou pájkou pomocí pájecí vlny. Desky byly stárnuty stejně jako v prvních testech a po 168 hodinách byla pozorována změna SIR a povrchu. Došlo k viditelné oxidaci, ale k tvorbě samotných dendritů nedošlo.

Poslední měření bylo testování desek s nanesenou SAC pastou od různých výrobců. Testování proběhlo nejprve při stejných klimatických podmínkách jako první testy. Na ploškách s pastou zůstalo po zapájení velké množství tavidla. Po 168 hodinách stárnutí se ukázalo, že velké množství tavidla prakticky uzavřelo bezolovnatou SAC pájku od vlivu prostředí, pouze samotné tavidlo znatelně zestárla a popraskalo.

Za účelem zvýšení pravděpodobnosti vzniku dendritu při elektromigraci jsem pozměnil metodu testování, vybral jsem tři desky s pájkou s největším množstvím stříbra a připojil na ně různá větší napětí. Při vyhodnocování testu jsem našel dendrit na středním motivu desky s napětím 20 V. Dosažené výsledky jsou dále diskutovány na konci kapitoly 7.10.

Elektromigrace byla, je a bude čím dál tím větším problémem zmenšující se elektroniky. S neustálým zmenšováním elektroniky narůstají proudové hustoty a s nimi i rizika vzniku elektromigrace. Vliv elektromigrace na spolehlivost elektronických zařízení používaných v nepříznivých klimatických podmínkách je zásadní. Myslím si, že by bylo vhodné v tomto směru zkoumání pokračovat. Především v testování bezolovnatých pájek, které jsou v dnešní době používané čím dál více a v testování vlivu ztížených environmentálních podmínek, jelikož zvýšená teplota a vlhkost patří mezi nejčastější a poměrně špatně kontrolovatelné vlivy u všech elektronických zařízení, které jsou běžně používány v jiném než laboratorním prostředí.

## Bibliografie

- [1] *Foresite, Flux Residues*; 1982 Kokomo, [www.foresiteinc.com/resources/what-is-a-flux-residue](http://www.foresiteinc.com/resources/what-is-a-flux-residue), [cit. Listopad 2015]
- [2] TERRY MUNSON, *The Failure of a Circuit: Reliability Effects of Process Residues*; 1982 Kokomo, 7 stran, [cit. Listopad 2015]
- [3] *Elektromigration*, Middle East Technical University. 2005 [www.csl.mete.metu.edu.tr/Electromigration/emig.htm](http://www.csl.mete.metu.edu.tr/Electromigration/emig.htm), 8 stran [cit. Listopad 2015]
- [4] JENS LIENG, *Electromigration and Its Impact on Physical Design in Future Technologies*, Dresden University of Technology, [www.ifte.de/mitarbeiter/lienig/ISPD\\_2013\\_p33\\_40.pdf](http://www.ifte.de/mitarbeiter/lienig/ISPD_2013_p33_40.pdf), 8 stran [cit. Listopad 2015]
- [5] SIMEON J. KRUMBEIN, *Metallic electromigration phenomena*, [www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/p313-89.pdf](http://www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/p313-89.pdf), 16 stran [cit. Listopad 2015]
- [6] BRADLEY GEDEN, *Understand and Avoid Electromigration(EM) & IR-drop in Custom IP Blocks*, Synopsys, [www.synopsys.com/Tools/Verification/CapsuleModule/CustomSim-RA-wp.pdf](http://www.synopsys.com/Tools/Verification/CapsuleModule/CustomSim-RA-wp.pdf), 6 stran [cit. Listopad 2015]
- [7] IPC-TM-650 *TEST METHODS MANUAL*, <https://www.ipc.org/test-methods.aspx>, 5 stran, [cit. Listopad 2015]
- [8] *Failure Mechanism of Semiconductor Devices*, Panasonic Semiconductor 2009, 60 stran [cit. Listopad 2015]
- [9] Surface Insulation Resistance, Electronic Product Design and Test, [www.epdtonthenet.net/article/8607/Surface-Insulation-Resistance.aspx](http://www.epdtonthenet.net/article/8607/Surface-Insulation-Resistance.aspx), [cit. Listopad 2015]
- [10] Bectron\_PL\_1104 datasheet, Elantas Electrical Insulation, [www.wernerwirth.de/fileadmin/content/bilder/protect/conformal\\_coating/verbrauchsmaterial/Bectron\\_PL\\_1104.pdf](http://www.wernerwirth.de/fileadmin/content/bilder/protect/conformal_coating/verbrauchsmaterial/Bectron_PL_1104.pdf), 3 strany, [cit. Listopad 2015]
- [11] Lackwerke Peters, Elpeguard SL 1301 ECO-FLZ technical report, <http://files.interconti.cz/200000322-3efac3ff96/tl-sl%201301%20eco-flz-%C5%99ada-aj.pdf>, 9 stran, [cit. Listopad 2015],
- [12] Balver Zinn, Cobar Flux 390 RX HT, Josef Jost GmbH & Co. KG, <http://www.balverzinn.com/flux-390-rx-ht.html>, 11 stran, [cit. Listopad 2015]
- [13] Interflux Electronics, IF 2005C datasheet, <http://www.interflux.com/cs/node/1077>, 4 strany, [cit. Listopad 2015]
- [14] KIM VU, *Silver Migration – The Mechanism and Effects on Thick-Film Conductors*, Material Science Engineering 234 – Spring 2003, College of Engineering – Chemical and Material Science Engineering Department San Jose State University, 21 stran. [cit. Listopad 2015]
- [15] *Surface Insulation Resistance (SIR) measurement 25 Mar 2010*, National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington, Middlesex, [www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/materials-areas/electronics-interconnection/surface-insulation-resistance-measurement](http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/materials-areas/electronics-interconnection/surface-insulation-resistance-measurement) [cit. Listopad 2015]
- [16] IPC, Association Connectin Electronics Industries, Bannockburn, [www.ipc.org/TM/2-6-3-7.pdf](http://www.ipc.org/TM/2-6-3-7.pdf), 4 strany, [cit. Listopad 2015]
- [17] *Solvent Extract Conductivity (SEC) / Ionic Extraction Testing 25 Mar 2010*, National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington, Middlesex, <http://www.npl.co.uk/science-technology/advanced-materials/materials-areas/electronics-interconnection/solvent-extract-conductivity> [cit. Listopad 2015]
- [18] Snímek dendritu <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/236x/79/7c/38/797c38f5a61cd79977327ad92c56c6b8.jpg> [cit. Listopad 2015]
- [19] DAVID M. JACOBS, GILES HUMPSTON, *Principles of Soldering*, The material information Society, Material Parks Ohio, april 2004. <https://books.google.cz/books?id=cQ6khQScBF4C&pg=PA116&dq=solder+flux+rosin&hl=cs#v=onepage&q=solder%20flux%20rosin&f=false>, 245 stran. [cit. Listopad 2015]

- [20] IPC, Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn, <https://www.ipc.org/TM/2-6-3-6.pdf>, 3 strany, [cit. Listopad 2015]
- [21] BMT MMM Group, Friocell 11 <http://www.bmt.cz/friocell-111---komfort-54?cat=111> [cit. Prosinec 2015]
- [22] Helmut Singer Elektronik, IM6 Megohmmeter, <http://www.test-set.com/pdf/radiim6.pdf>, 4 strany [cit. Prosinec 2015]
- [23] Ohaus Pioneer manual, <http://mec.ohaus.com/mec/en/home/products/product-families/PA-EU.aspx>, 4 strany [cit. Prosinec 2015]
- [24] Manuál zdroje BK 127, Tesla ELTOS, závod Brno, <http://wrack.ped.muni.cz/datasheet/soubory/BK127.pdf> [cit. Prosinec 2015]
- [25] Srinivas Chada, Edwin Bradley, *INVESTIGATION OF IMMERSION SILVER PCB FINISHES FOR PORTABLE PRODUCT APPLICATIONS*, APTC Motorola, Inc. 8000 W. Sunrise Blvd, <https://pcbtrain.co.uk/cp/uploaded/immersion%20silver-%20investigation%20by%20motorola.pdf>, 8 stran, [cit. Prosinec 2015]
- [26] ING. VLADIMÍR SÍTKO, *Jak čisté je čisté a jak čistého dosáhnout*, PBT Rožnov p. R., <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:10035/jak-ciste-je-ciste-a-jak-cisteho-dosahnout-> [cit. Prosinec 2015]
- [27] Sverre Sjøthun, Semiconductor Electromigration In-Depth, July 24, 2001, [www.dwpg.com/content.php?contid=2&artid=68](http://www.dwpg.com/content.php?contid=2&artid=68), [cit. Prosinec 2015]
- [28] *Requirements for Soldering Fluxes* IPC J-STD-004B, <http://www.ipc.org/TOC/IPC-J-STD-004B.pdf>, 4 strany [cit. Prosinec 2015]
- [29] *Electromigration*, Wikipedia, online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electromigration#/media/File:Electromigration.png> [cit. Květen 2016]

## Seznam obrázků

Obr. 1 Test na měděné zrcátko. ....	2
Obr. 2 Snímek tabulky se značením tavidel. [28] .....	3
Obr. 3. Obrázek sil ovlivňujících pohyb iontů. [29].....	11
Obr. 4 Elektromigrace stříbra přes sklo. [5] .....	13
Obr. 5 Koloidní částice stříbra na PC desce. [5] .....	13
Obr. 6 Snímek typické dendritické struktury. [18].....	14
Obr. 7 Přerušená cesta vlivem zvýšené teploty a odmigrování hliníkové cesty. [27]....	17
Obr. 8 Dendritický růst po elektromigraci mědi [20].....	18
Obr. 9 Testovací obrazec dle IPC-B-25A [20].....	18
Obr. 10 Schéma ionografu [26] .....	20
Obr. 11 Schéma omegametru [26].....	20
Obr. 12 Snímek testovací desky s označením jednotlivých segmentů.....	21
Obr. 13 Megohmmeter IM6 [22].....	22
Obr. 14 Klimatická komora Friocell .....	23
Obr. 15 Analytické váhy Ohaus Pioneer [23] .....	24
Obr. 16 Stabilizovaný zdroj BK 127 .....	24
Obr. 17 Snímek měřiče Multi 9420 .....	25
Obr. 18 Snímek vyrobené patice na testovací DPS .....	25
Obr. 19 Snímek stíněné krabičky s propojovacími kabely a paticí .....	26
Obr. 20 Návrh DPS přepínací krabičky.....	26
Obr. 21 Snímek pracoviště při měření povrchového izolačního odporu.....	27
Obr. 22 Snímek testovacích DPS umístěných v exsikátoru v klimatické komoře. ....	28
Obr. 23 Snímky testovaných DPS s tavidlem IF 2005C a Cobar RX HT 390.....	30
Obr. 24 Snímky lakovaných testovacích DPS (nahore tavidlo Cobar, dole IF). ....	32
Obr. 25 Snímky stárnutých testovacích desek prošlých přetavovací pecí s tavidly (nahore Cobar 390 RX HT, dole IF 2005C). ....	34
Obr. 26 Snímky stárnutých desek s tavidly po procesu pájení (vlevo COBAR RX HT 390, vpravo IF 2005C). ....	34
Obr. 27 Snímek ESD sáčku použitého pro měření výluhem.....	41
Obr. 28 Snímky desek pokrytých olovnatou pájkou. (vlevo čisté, vpravo stárnuté).....	42
Obr. 29 Snímky testovacích DPS zleva, stárnuté, nestárnuté, zbavené tavidel.....	43
Obr. 30 Snímky testovacích DPS zleva, stárnuté, nestárnuté, zbavené tavidel.....	43
Obr. 31 Snímky oxidovaných plošek na testovací DPS. ....	46
Obr. 32 Snímek dendritu na testovací DPS. ....	47
Obr. 33 Snímek dendritu na straně katody. ....	47
Obr. 34 Snímek dendritu na straně anody. ....	48
Obr. 35 Snímek středu dendritu.....	48
Obr. 36 Snímek 3D analýzy dendritu. ....	49

Obr. 37 Snímek dendritu na testovací DPS z elektronového mikroskopu. ....	50
Obr 38 Snímek s označením plochy pro vyhodnocení prvkové analýzy. ....	51
Obr 39 Snímek grafu prvkové analýzy testované DPS .....	51
Obr 40 Snímky prvkové analýzy dendritu na testovací DPS. (červeně měď, modře cín) .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Souhrn vlastností past použitých v praktické části .....	8
Tabulka č. 2 průměrné naměřené hodnoty SIR čistých a znečištěných testovacích DPS .....	29
Tabulka č. 3 množství sušiny laku na testovacích DPS .....	31
Tabulka č. 4 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR.....	31
Tabulka č. 5 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR.....	33
Tabulka č. 6 vypočtených objemů tavidla na testovaných DPS.....	38
Tabulka č. 7 naměřených a vypočtených hodnot pro měření konduktometrickou metodou.....	39
Tabulka č. 8 naměřených hodnot metody ROSE a SEC .....	40
Tabulka č. 9 průměrných hodnot SIR testu s olovnatou pájkou.....	41
Tabulka č. 10 vypočtené průměrné hodnoty naměřeného SIR desek s pastou. ....	44
Tabulka č. 11 naměřené hodnoty jednotlivých motivů při různých napětích. ....	44

## Seznam zkratk

SIR	– Surface Insulation Resistance, povrchový izolační odpor
DPS	– Deska Plošných Spojů
CC	– Chip Carrier
HAL	– Hot Air Leveling
ENIG	– Electroless Nickel/Immersion Gold
OSP	– Organic Solderability Preservatives
THB	– Temperature Humidity Bias
ROSE	– Resistivity Of Solvent Extract
SAC	– Sn-Ag-Cu pájecí slitina
SEC	– Solvent Extract Conductivity
MTTF	– Mean Time To Failure, střední doba do poruchy

## Seznam příloh

Příloha 1 – tabulky hodnot z měření SIR čistých a znečištěných DPS
Příloha 2 – tabulky hodnot z testu elektromigrace
Příloha 3 – tabulky hodnot z měření tavidla prošlého pecí
Příloha 4 – tabulky hodnot z měření desky pokryté olovnatou pájkou, pájecí vlnou
Příloha 5 – tabulky hodnot z měření desek s SAC pájkou