



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

ELEKTROCHEMICKÁ MIGRACE TAVIDLOVÝCH ZBYTKŮ A ZMĚNY POVRCHOVÉHO IZOLAČNÍHO ODPORU

ELECTROCHEMICAL MIGRATION OF FLUX RESIDUES AND SURFACE INSULATION RESISTANCE
CHANGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Hájka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý,

Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Jan Hájka

ID: 220866

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Elektrochemická migrace tavidlových zbytků a změny povrchového izolačního odporu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku elektrochemické migrace tavidlových zbytků. Zpracujte metodiku měření povrchového izolačního odporu tavidlových zbytků po pájení kapalnými VOC-free tavidly. Navrhněte přípravu vzorků a provedení měření. Stanovte reprodukovatelnost měření a diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá elektrochemickou migrací na deskách plošných spojů vyvolanou tavidlovými zbytky. V teoretické části práce je rozebrána teorie týkající se elektromigrace a jsou popsány mechanismy jednotlivých druhů. Dále je zpracována teorie tavidel se zaměřením na VOC-free tavidla Pacific 2009 mlf a Kester 979 T. V praktické části je popsána výroba testovacích DPS a sledována reprodukovatelnost výrobního procesu. Dále je navržena a metodika testování vlivu tavidlových zbytků na povrchový izolační odpor podle příslušné normy. Navržená metodika je použita na srovnání výše změněných tavidel a povrchových úprav.

Klíčová slova

Elektrochemická migrace, tavidlové zbytky, DPS, povrchový izolační odpor, VOC-free tavidla

Abstract

This thesis deals with electrochemical migration on printed circuit boards induced by flux residues. In the theoretical part of the thesis, the theory related to electromigration is discussed and the mechanisms of each type are described. The theory of fluxes is elaborated, focusing on the VOC-free fluxes Pacific 2009 mlf and Kester 979 T. In the practical part, the fabrication of test PCBs is described and the reproducibility of the fabrication process is observed. Furthermore, a methodology for testing the effect of flux residues on the surface insulation resistance according to the relevant standard is proposed. The proposed methodology is applied to compare the above mentioned fluxes and surface treatments.

Key words

Electrochemical migration, flux residue, PCB, surface insulation resistance, VOC-free fluxes

Bibliografická citace

HÁJKA, Jan. *Elektrochemická migrace tavidlových zbytků a změny povrchového izolačního odporu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160345>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Jan Hájka
VUT ID studenta: 220866
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2023/24

Téma závěrečné práce: Elektrochemická migrace tavidlových zbytků a změny povrchového izolačního odporu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému Ph.D. za účinnou odbornou pomoc, cenné rady a asistenci při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Tomáši Kostelníkovi za zapůjčení 3D tiskárny pro výrobu přípravků použitých při provedení praktické části práce.

V Brně dne: 22. května 2024

podpis autora

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
1. ÚVOD	11
2. ELEKTROCHEMICKÁ MIGRACE KOVŮ	12
2.1 VLHKÁ ELEKTROMIGRACE.....	13
2.1.1 <i>Vlhkost</i>	15
2.1.2 <i>Znečištění</i>	15
2.1.3 <i>Napětí a vzdálenost mezi vodiči</i>	16
2.1.4 <i>Teplota</i>	17
2.2 MOKRÁ ELEKTROMIGRACE.....	17
2.3 SUCHÁ ELEKTROMIGRACE	19
2.4 PREVENCE	20
3. TAVIDLA	21
3.1 FUNKCE	21
3.2 SLOŽENÍ TAVIDEL	21
3.3 POUŽITÁ TAVIDLA	22
3.4 PACIFIC 2009 MLF.....	23
3.4.1 <i>Fyzikální a chemické vlastnosti [10]</i>	23
3.4.2 <i>Nanášení</i>	23
3.4.3 <i>Čištění</i>	23
3.5 KESTER 979T	24
3.5.1 <i>Fyzikální a chemické vlastnosti [10]</i>	24
3.5.2 <i>Nanášení</i>	24
3.5.3 <i>Čištění</i>	24
4. TESTOVACÍ DPS	25
4.1 VÝROBA	25
4.2 NÁVRH	25
4.3 REPRODUKOVATELNOST VÝROBY	26
5. METODIKA MĚŘENÍ	28
5.1 ZNAČENÍ DESEK.....	28
5.2 KLIMATICKÁ KOMORA.....	29
5.3 SOUSTAVA PRO MĚŘENÍ ODPORU	31
5.3.1 <i>Megaohmmetr IM6</i>	31
5.3.2 <i>Stíněná krabice</i>	32
5.3.3 <i>Přepínací krabička a patice</i>	33
6. POVRCHOVÉ ÚPRAVY	36
6.1 VÝROBA	36
7. MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ	39

7.1	DESKY BEZ POVRCHOVÉ ÚPRAVY	39
7.1.1	<i>Očištěné desky</i>	39
7.1.2	<i>Aplikace a aktivace tavidla</i>	40
7.1.3	<i>První etapa stárnutí</i>	41
7.1.4	<i>Druhá etapa stárnutí</i>	43
7.2	DESKY S POVRCHOVOU ÚPRAVOU SAC305	44
7.2.1	<i>Očištěné desky</i>	44
7.2.2	<i>Aplikace a aktivace tavidla</i>	45
7.2.3	<i>První etapa stárnutí</i>	46
7.2.1	<i>Druhá etapa stárnutí</i>	48
7.3	DESKY S POVRCHOVOU ÚPRAVOU SN100C.....	50
7.3.1	<i>Očištěné desky</i>	50
7.3.2	<i>Aplikace a aktivace tavidla</i>	51
7.3.3	<i>První etapa stárnutí</i>	52
7.3.4	<i>Druhá etapa stárnutí</i>	54
8.	ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ.....	56
8.1	SROVNÁNÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV	57
8.2	SROVNÁNÍ TAVIDEL PACIFIC 2009 MLF A KESTER 979 T.....	58
8.2.1	<i>První etapa stárnutí</i>	59
8.2.2	<i>Druhá etapa stárnutí</i>	60
8.2.3	<i>Mechanismy způsobující pokles povrchového izolačního odporu</i>	60
8.3	POZOROVÁNÍ RŮSTU DENDRITŮ	61
8.3.1	<i>První etapa</i>	61
8.3.2	<i>Druhá etapa</i>	63
9.	ZÁVĚR.....	65
	LITERATURA.....	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Srovnání dendritů, kovových (vlevo) a sulfidů mědi (vpravo) [1], [2].....	12
Obrázek 2.2 Shluky koloidních částic stříbra v okolí anody (vpravo) [1]	14
Obrázek 2.3 Schéma principu migrace iontů a růstu dendritů. [1].....	14
Obrázek 2.4 Vznik prostředí vhodného pro elektromigraci vlivem tavidlových zbytků [6].....	16
Obrázek 2.5 Stříbrné dendrity (černá) na substrátu FR4 [1]	17
Obrázek 2.6 Měděné dendrity na FR4 desce s viditelnými bublinkami vodíku [1].....	18
Obrázek 2.7 Ukázka vodiče přerušeno vlivem suché migrace [3]	19
Obrázek 3.1 Ilustrace roztečení pájky po pájecí plošce za přítomnosti tavidla [9]	21
Obrázek 4.1 Testovací DPS	25
Obrázek 4.2 Negativní maska pro výrobu testovacích DPS	26
Obrázek 4.3 Snímek vodičů hřebínkového motivu pořízený mikroskopem.	27
Obrázek 5.1 Příklad značení desek	29
Obrázek 5.2 Plastový desikátor s úložným systémem na testovací DPS	30
Obrázek 5.3 Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v klimatické komoře	31
Obrázek 5.4 Megaohmmetr IM6.....	32
Obrázek 5.5 Stínící krabice.....	33
Obrázek 5.6 Patice ISA 98 pro připojení testovaných DPS	33
Obrázek 5.7 Přepínací krabička se sundaným víčkem	34
Obrázek 6.1 Obrazec A na desce 1 s povrchovou úpravou SAC305	37
Obrázek 6.2 Detail na povrchovou úpravu SAC305.....	38
Obrázek 7.1 Vybraný obrazec desky s tavidlem po průchodu přetavovací pecí.....	41
Obrázek 7.2 Pohled mikroskopem na desku 3	43
Obrázek 7.3 Pohled mikroskopem na desku 3	44
Obrázek 7.4 Příklad desky s povrchovou úpravou SAC305 pokrytou tavidlovými zbytky (deska 1, obrazec B)	46
Obrázek 7.5 Pohled mikroskopem na desku 2	48
Obrázek 7.6 Pohled mikroskopem na desku 2	49
Obrázek 7.7 Pohled mikroskopem na desku 3	50
Obrázek 7.8 pohled na desku 4, obrazec B po aktivaci tavidla Kester 979 T	52
Obrázek 7.9 Pohled pod mikroskopem na desku 2 obrazec B	54
Obrázek 7.10 Pohled pod mikroskopem na desku 2 obrazec B	55
Obrázek 8.1 Všechna naměřená data povrchových izolačních odporů.....	56
Obrázek 8.2 Srovnání povrchových uprav na vzorcích s tavidlem Pacific 2009 mlf	57
Obrázek 8.3 Srovnání povrchových uprav na vzorcích s tavidlem Kester 979 T	58
Obrázek 8.4 Srovnání tavidel a kontrolních vzorků.....	59
Obrázek 8.5 Obrazec A na desce s povrchovou úpravou SAC305 a tavidlem Kester 979 T.....	62
Obrázek 8.6 Dendrit na obrazci A na desce SN100C a Kester 979 T.....	63
Obrázek 8.7 Dendrit na obrazci B na desce SN100C a Pacific 2009 mlf	64
Obrázek 8.8 Dendrit na obrazci B na desce SN100C a Pacific 2009 mlf	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Klasifikace tavidel podle ČSN EN 29454-1 [7].....	22
Tabulka 3.2 Klasifikace tavidel podle ANSI J-STD-004 [8].....	22
Tabulka 4.1 Naměřené šířky na hřebíkovém motivu	26
Tabulka 6.1 Hmotnosti a tloušťky pájky na testovacích DPS.....	37
Tabulka 7.1 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách	39
Tabulka 7.2 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí	42
Tabulka 7.3 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí	43
Tabulka 7.4 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách	45
Tabulka 7.5 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí	47
Tabulka 7.6 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí	48
Tabulka 7.7 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách	51
Tabulka 7.8 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí	53
Tabulka 7.9 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí	55
Tabulka 8.1 pozorovaný počet dendritů na deskách	61
Tabulka 8.2 pozorovaný počet dendritů na deskách	63

1. ÚVOD

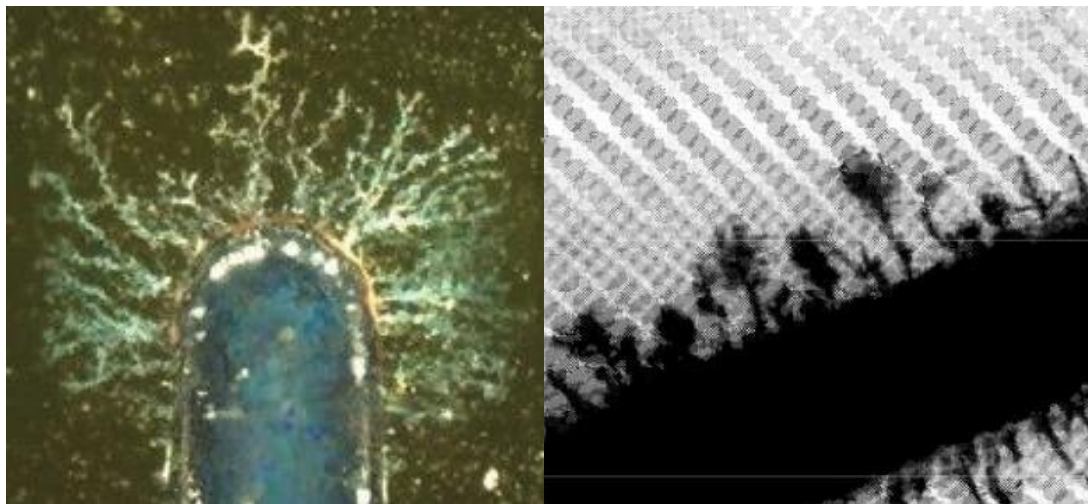
Dlouhodobým trendem v elektronice je miniaturizace, která se nevyhýbá ani deskám plošných spojů. Současné trendy jsou jak ztenčování signálových cest, tak izolačních mezer mezi nimi. To může být problematické z mnoha důvodů, mezi které patří také elektromigrace způsobená tavidlovými zbytky a výsledné snížení povrchového izolačního odporu na desce. Tato práce se tedy bude zabývat vlivem zbytků tavidel označovaných jako VOC-free.

V teoretické části tato práce rozebírá teorii a druhy elektromigrace, složení a vlastnosti tavidel a navrhuje metodiku následných zkoušek. Část praktická se pak zabývá výrobou testovacích desek, měřícím aparátem a nastavením klimatické komory, aby byly dodrženy parametry stanovené normou.

Na vržená metodika je následně aplikována při srovnávání dvou vybraných VOC-free no clean tavidel a dvou vybraných povrchových úprav. Je pozorován vliv těchto proměnných na povrchový izolační odpor na deskách a také na růst dendritických struktur nezi vodivými cestami testovacích obrazců.

2. ELEKTROCHEMICKÁ MIGRACE KOVŮ

Jako elektromigraci označujeme všechny pohyby kovových částic vlivem elektrického pole v nekovovém prostředí. O pohyb kovových částic se zajímáme právě proto, že jejich depozicí vznikají dendrity, které mohou způsobovat zkraty mezi vodivými cestami DPS. K růstu dendritů může docházet pouze tehdy, pokud je jak zdroj částic (např. vodivé cesty DPS, kovový inkoust), tak útvar vzniklý jejich depozicí (dendrit) kovového charakteru a jednalo se tedy o vodivý materiál. Tento jev je často zaměňován s růstem dendritů z produktů oxidace kovů. Například dendrity tvořené sulfidy mědi, které jsou na první pohled velice podobné, avšak nevodivé. Ke svému růstu nepotřebují přítomnost elektrického napětí a z hlediska povrchového izolačního odporu představují pouze zanedbatelné riziko v porovnání s dendrity kovovými, které jsou vodivé. [1], [2]



Obrázek 2.1 Srovnání dendritů, kovových (vlevo) a sulfidů mědi (vpravo) [1], [2]

Elektromigrace se projevuje hlavně za přítomnosti stejnosměrného napětí. V aplikacích se střídavým napětím její projevy postupně mizí s rostoucí frekvencí, již při frekvenci 50-60 Hz, tedy frekvenci typické pro elektrické spotřebiče jsou její projevy značně zmírněny. Ve vysokofrekvenčních aplikacích se pak neprojevuje takřka vůbec. [1], [2]

Podle teploty a proudové hustoty můžeme elektromigraci rozdělit na dvě hlavní kategorie. Elektrolytická, která probíhá za nižších teplot (do 100 °C) a malých proudových hustot (do 1 mA/m²). Její průběh je zcela závislý na přítomnosti vody (popřípadě jiné kapaliny), sloužící jako elektrolyt, ať už jako vzdušné vlhkosti, nebo kapek na povrchu DPS. Právě tímto druhem migrace se tato práce primárně zabývá. Suchá elektromigrace probíhá za vyšších teplot (od 150 °C) a při vysokých proudových hustotách (od 10 A/m²), ta ke svému průběhu nepotřebuje přítomnost elektrolytu. Jevy suché elektromigrace se projevují převážně v odvětví mikroelektroniky,

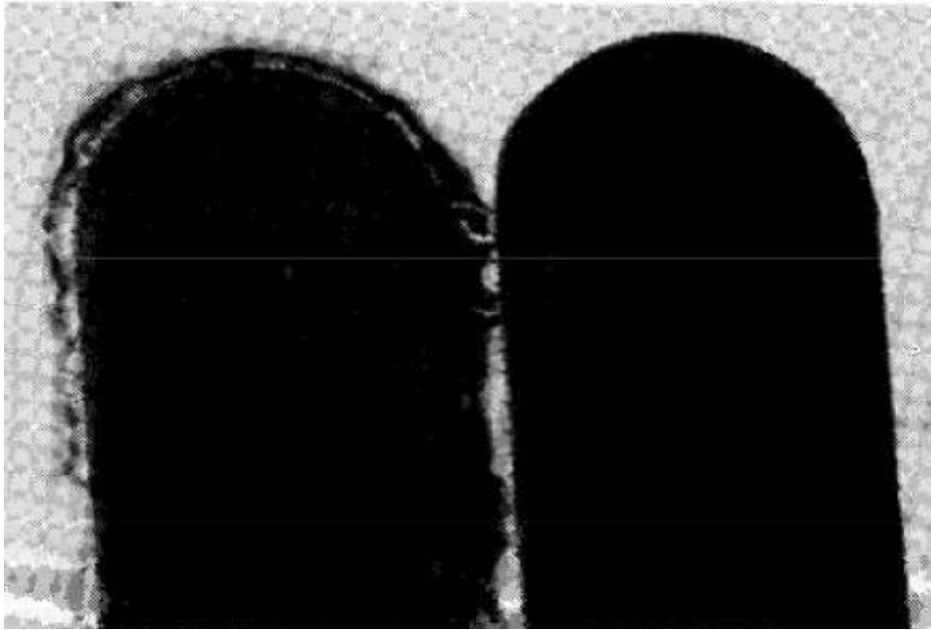
v tenkovrstvých aplikacích. Na desky plošných spojů nemá prakticky žádný vliv, a proto zde bude zmíněna pouze okrajově. Zmíněna je hlavně proto, aby nedošlo k nedorozumění v terminologii a bylo zdůrazněno, že suchá a elektrolytická elektromigrace jsou dva zásadně odlišné jevy, které se podobají pouze jménem. [1], [2]

Za běžných podmínek, myšleno teploty v blízkém okolí pokojové a běžné vzdušné vlhkosti do 60%, podléhá efektům elektrolytické migrace pouze stříbro a měď, ta však pouze ve velmi omezené míře a velice výjimečně také cín. V obou případech je však jev velmi pomalý a klimatické zkoušky odolnosti proti elektrolytické migraci se provádí za zvýšené teploty a vlhkosti). Prakticky všechny kovy jí však podlehnou, pokud se na jejich povrchu bude vyskytovat zkondenzovaná voda v podobě kapek. [1], [2]

Na základě toho se elektrolytická elektromigrace arbitrárně rozděluje na dva druhy, vlhkou a mokrou (pozor, neplést principiálně odlišným jevem suché elektromigrace). Jako vlhká elektromigrace se označuje elektromigrace za přítomnosti zvýšené vzdušné vlhkosti, která na povrchu kondenzací vytvoří tenkou okem neviditelnou vrstvu vody sloužící jako elektrolyt. Tato vrstva nutně nepokrývá celý povrch a může vytvářet pouze vodivé cestičky. Jako mokrou elektromigraci označujeme to, kdy již dochází ke kondenzaci viditelných kapek na celém povrchu zkoumaného objektu. Mokré elektromigraci podléhá mnohem větší množství kovů a její průběh je typicky mnohem rychlejší. [1], [2]

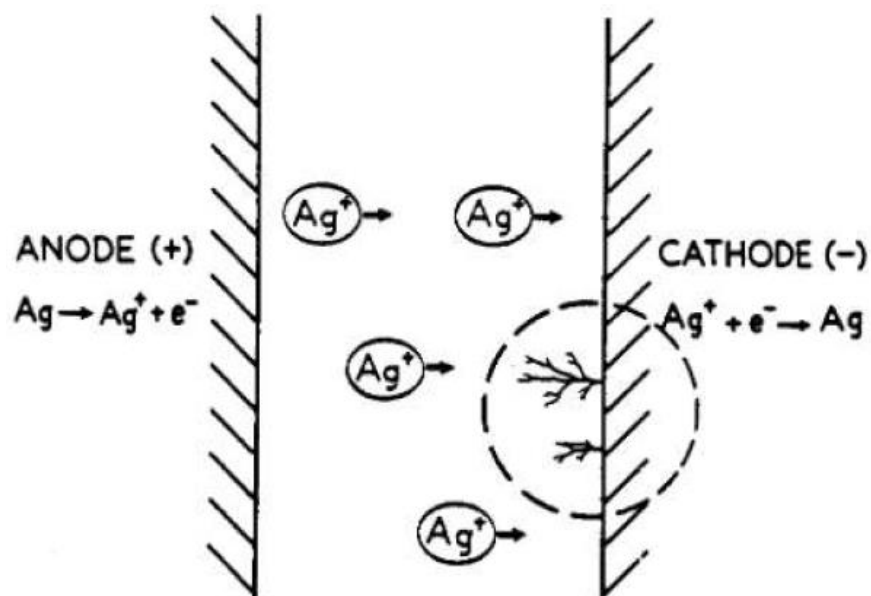
2.1 Vlhká elektromigrace

Jedná se o nejjednodušší formu elektromigrace. Ze stříbrného nebo měděného vodiče, na který je přiveden kladný potenciál (anoda), se díky oxidaci uvolňují kationty kovu. Ty se vlivem elektrického pole pohybují směrem k záporné katodě, kde se ukládají, podobně jak je tomu při galvanickém pokovování. Jak již bylo výše zmíněno, tento jev probíhá lokálně ve vodivých cestičkách tvořených tenkým vodním filmem, vytvořeným vzdušnou vlhkostí. Proto se na rozdíl od klasického galvanického pokovování ionty neukládají rovnoměrně a netvoří homogenní vrstvu. Kdyby tomu tak bylo, nepředstavovala by elektromigrace hrozbu pro elektroniku. [1]



Obrázek 2.2 Shluky koloidních částic stříbra v okolí anody (vpravo) [1]

V praxi se kovové ionty shlukují do koloidních částic v celém okolí vodiče na kladném potenciálu. Ty se projevují jako často okem viditelné znečištění okolo anody. Dalším jevem je právě ukládání iontů na katodě. V místech, kde již došlo k uložení částic, se zvyšuje pravděpodobnost další depozice. Ionty se tak ukládají do větvíčkové struktury zvané dendrity. [1]



Obrázek 2.3 Schéma principu migrace iontů a růstu dendritů. [1]

Na průběh vlhké elektromigrace má vliv mnoho faktorů, které mohou její průběh, jak zrychlit, tak zpomalit. Mezi tyto faktory patří vlhkost, znečištění povrchu, rozdíl potenciálu mezi sousedícími vodiči, vzdálenost sousedících vodičů a také teplota. [1]

2.1.1 Vlhkost

K tomu, aby mohla elektromigrace vůbec proběhnout, musí existovat elektrolytická cesta, jejíž vodivost je relativně vysoká oproti suchému povrchu. Zároveň však není nutné, aby byly tyto cesty trvalé, pokud povrch vyschne, migrace se zastaví, po jeho opětovném navlhnutí se však proces znovu obnoví. [1]

V případě navlhavých substrátů jako jsou vyrobeny z tvrzeného papíru je běžné, že se kovové částice dostanou do samotného substrátu a zhorší tak jeho mezivrstevové izolační vlastnosti. V méně navlhavých substrátech jako jsou kombinace skelné tkaniny a epoxidových pryskyřic, jako je například FR4, dochází k migraci pouze v tenké neviditelné vrstvě kapaliny na povrchu. Tloušťka této vrstvy je závislá na vzdušné vlhkosti a s jejím růstem roste také rychlost elektromigrace. Dalším faktorem je hydrofobnost materiálu, kdy na materiály jako sklo nebo alumina se vodivá vrstva vytvoří jednodušeji než na hydrofobních materiálech, jako je třeba polyester. [1]

Toto je způsobeno polární vazbou atomů a molekul v materiálu. Na substrátech z materiálu FR4 se to projevuje tak, že v místech, kde se skelná tkanina nachází v nižších hloubkách pod povrchem a je tedy hůře izolovaná epoxidem, tvoří tlustší vrstva vody. Lze tedy pozorovat, že migrace v těchto místech probíhá více a kopíruje směr vláken skelné tkaniny. Tato migrace však stále probíhá na povrchu DPS, na rozdíl od jevu CAF (Conductive Anodic Filament) kdy dochází k depozici kovových částic pod povrchem podél skleněných vláken. [1]

Dále pak migraci ovlivňují kapilární jevy. V tomto případě to znamená, že pokud je povrch nějak poškozen, například poškrábán, v těchto škrábancích se voda drží snáze a urychluje tak migraci skrz škrábance. [1]

2.1.2 Znečištění

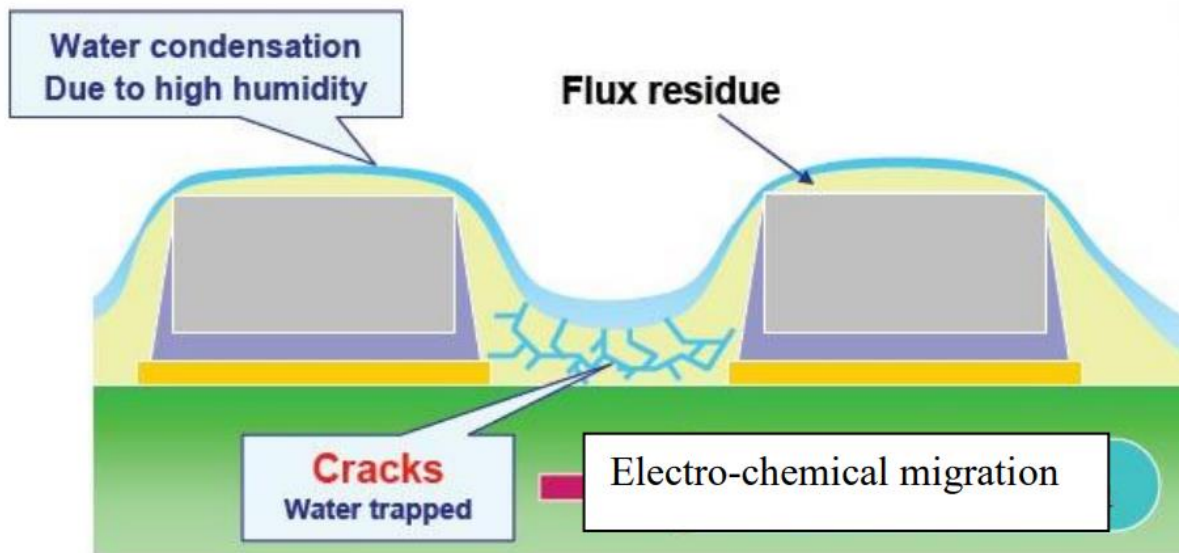
Znečištění může mít různý původ a důsledky na průběh migrace. Nejjednodušší rozdělení je na znečištění materiálové a vnější. Stejně tak může migraci buďto podporovat, nebo zpomalovat. Ve všech případech je však ideální desky důkladně umýt a snížit tak množství nečistot na jejich povrchu. [1]

Za materiálové znečištění se považují zbytky z výrobních operací, jako je chemické či galvanické pokovování, nebo naopak leptání. Zbytky z leptacích operací napomáhají v oxidaci povrchu vodivých cest a migraci tak podporují. Naopak třeba zbytky po leptání stříbra za pomoci kyanidů, dokážou migraci zpomalovat. Zdrojem nečistot však může být samotný základový materiál. V případě materiálu FR4 se z něj mohou časem vylučovat aditiva, která jsou určena ke zpomalení hoření. Vyloučena na povrchu však působí jako nečistoty podporující migraci. Stejně tak se mohou chovat

změkčovadla z ohebných substrátů. [1]

Mezi vnější znečištění se řadí prachové částice ve vzduchu, mastnota ze špatného zacházení s deskou během přepravy či inspekce, částice uvolněné z obalových materiálů, nebo kovové částice uvolněné z konektorů během používání. Zároveň zde patří také tavidlové zbytky, hlavní téma této práce. Toto znečištění ve všech případech migraci podporuje. [1]

Většina výše zmíněných nečistot je hygroskopická a napomáhá tak vzniku vodního filmu, nutného pro průběh migrace. Takto se chovají také tavidlové zbytky, které také napomáhají kondenzaci vody. Tím, že tavidlové zbytky jsou tvořeny ionty, zvyšují vodivost tohoto filmu a zároveň napomáhají oxidaci na povrchu vodivé cesty, čímž usnadňují uvolňování kovových iontů. [1]



Obrázek 2.4 Vznik prostředí vhodného pro elektromigraci vlivem tavidlových zbytků [6]

2.1.3 Napětí a vzdálenost mezi vodiči

Veškeré experimenty ukazují na to, že zvyšování napětí mezi vodivými cestami zvyšuje míru migrace i její rychlost. Zvětšování mezer mezi vodiči má přesně opačný efekt. Vliv napětí a vzdálenosti mezi vodiči na migraci vyplývá z rychlosti pohybu iontů v roztoku. [1]

$$v_+ = \mu_+ \vec{E}$$

Kde v_+ je rychlost pohybu iontu, μ_+ je pohyblivost iontu v roztoku a E je intenzita elektrického pole. Je tedy zřejmé, že s rostoucím napětím a zkracující se vzdáleností mezi vodiči roste intenzita pole a s ní i rychlost pohybu kationtů kovu. [1]

Další jev, který se uplatní, je elektroosmóza. Tento děj probíhá ve vodou zaplněných škvírách a škrábancích za přítomnosti elektrického napětí. Vzhledem

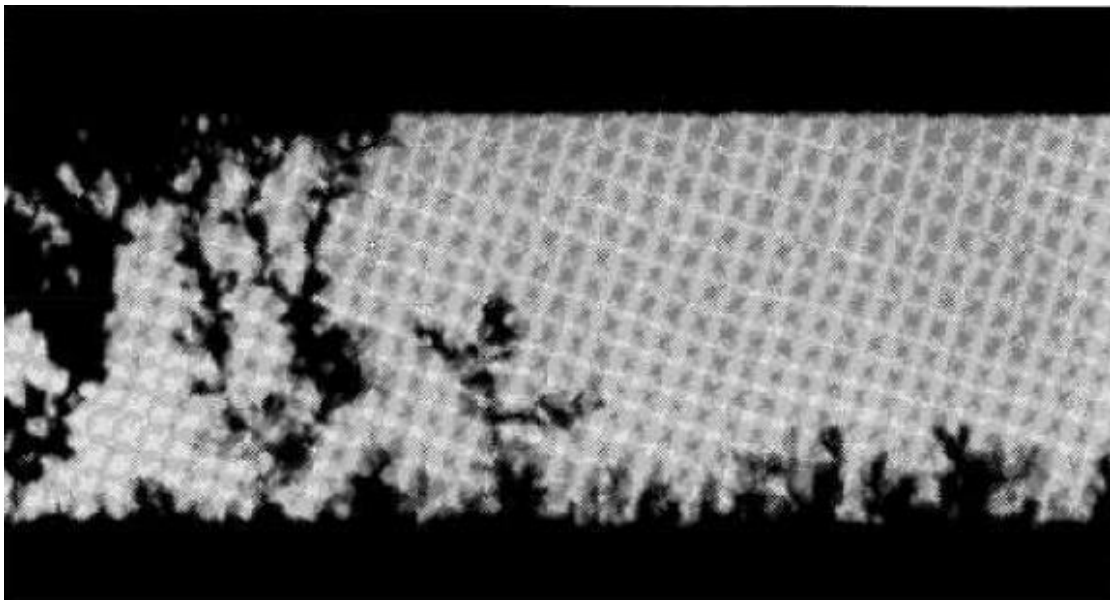
k tomu, že permitivita vody je mnohem vyšší než typického substrátu, nabývá voda kladný náboj a vzniká tok směrem ke katodě, který s sebou nese kladné ionty kovu. [1]

2.1.4 Teplota

Z výše uvedených principů vyplývá, že zvýšení teploty vždy povede ke zvýšení migrace. Zvyšování teploty napomáhá všem mechanismům elektromigrace. Zjednodušuje uvolňování iontů urychlením oxidace povrchu vodivé cesty a zvyšuje rychlost, s jakou se tyto ionty dokážou v elektrolytu pohybovat. [1]

2.2 Mokrý elektromigrace

Jak již bylo zmíněno výše, o mokrou elektromigraci se jedná v případě, že se mezi vodiči nachází viditelná vrstva vody nebo zkondenzovaných vodních par. Platí pro ni identické mechanismy jako pro migraci vlhkou, které jsou popsány výše. Všechny tyto mechanismy jsou však amplifikovány a migrace tak probíhá řádově rychleji, a to i při připojení menšího napětí. U vlhké elektromigrace se růst dendritů projevuje v řádu dnů až týdnů, u mokré se však projevuje již po minutách. Zároveň ji také podléhá mnohem více kovů, kromě stříbra a částečně mědi se projevuje i u zlata, niklu, paladia, a dokonce i u pájecích slitin. Pro spolehlivost elektroniky tak představuje vážnou hrozbu. [1]

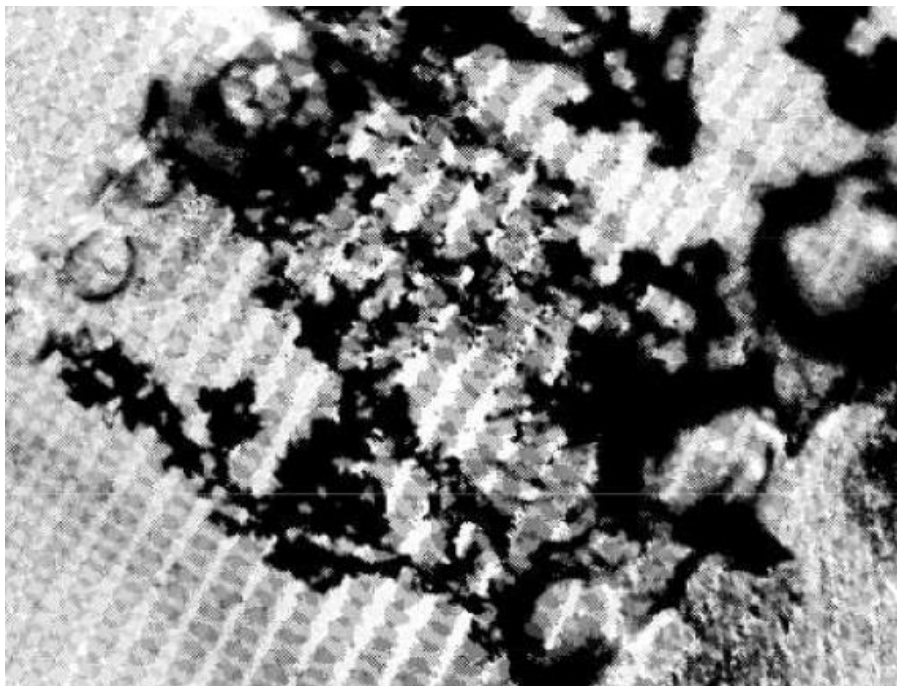


Obrázek 2.5 Stříbrné dendrity (černá) na substrátu FR4 [1]

Na obrázku 2.4 můžeme pozorovat stříbrné dendrity, které vnikly mezi vodivými cestami na desce ze základního materiálu FR4. Mezera mezi vodivými cestami je 0,76 mm, což je na testování elektromigrace poměrně velká vzdálenost. Test proběhl na očištěné desce za přítomnosti deionizované vody, vodivost elektrolytu tak byla velmi

nížká. I přesto během několika minut od připojení napětí pěti voltů vyrostly dendrity, které cesty zkratovaly. [1]

Při mokré elektromigraci za vyššího napětí se také začínají objevovat bublinky plynu v okolí katody. To ukazuje, že probíhá elektrolyza vody a vnikající plyn je vodík. To má za důsledek dva jevy, které dále podporují průběh migrace. Zprvé elektrolyza tvoří ionty, které dále zvyšují rychlost migrace. Zadruhé pohyb bublinek také víří elektrolyt, což opět napomáhá rychlejší migraci, díky transportu iontů kovu. [1]



Obrázek 2.6 Měděné dendrity na FR4 desce s viditelnými bublinkami vodíku [1]

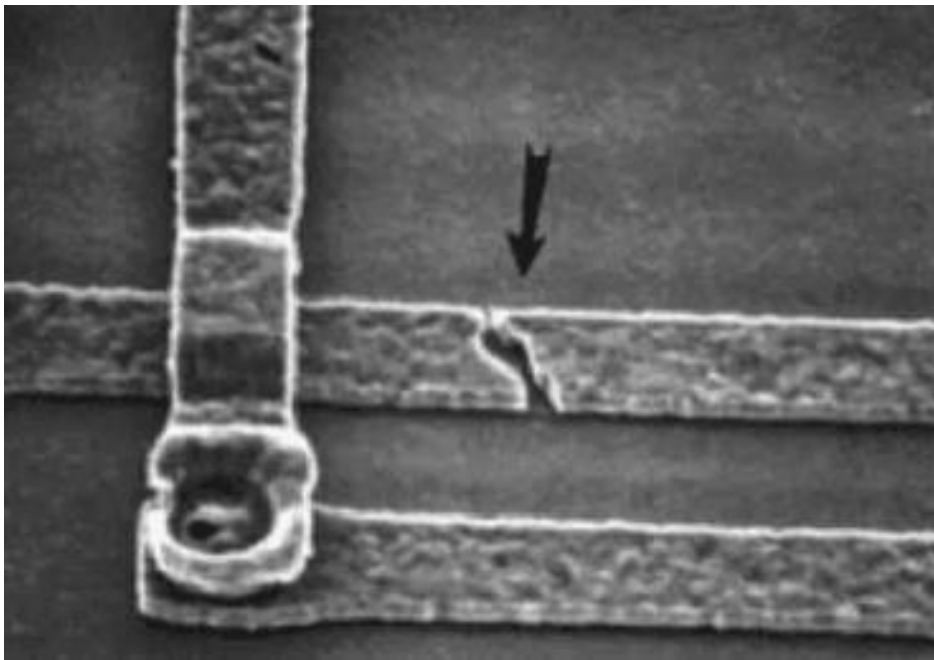
V praxi je mokrá migrace problematická především u integrovaných obvodů. Pokud nejsou hermeticky uzavřeny, mohou v nich vlivem měnící se teploty kondenzovat vodní páry. Vnitřní části integrovaných obvodů sice bývají typicky pozlacené, avšak ani zlato není imunní vůči mokré elektromigraci. V integrovaných obvodech tak rostou dendrity a vzhledem k velmi malé vzdálenosti vodivých cest snadno způsobí zkraty. Efekt je o to horší, pokud zůstaly uvnitř pouzdra integrovaného obvodu zbytky z výroby na bázi chloridů nebo jiných halogenidů. [1]

Co se faktorů ovlivňujících proběh mokré migrace týče, jsou prakticky stejné jako u migrace vlhké, které jsou popsány výše. Jediným rozdílem je vzdušná vlhkost, protože se tento jev odehrává ve vodním prostředí a vzdušná vlhkost na něj tak již nemá vliv. [1]

2.3 Suchá elektromigrace

Jako elektromigrace se označuje i tento jev, přestože je principiálně naprosto odlišný a odehrává se uvnitř krystalické struktury pevných látek. Elektrický proud je vlastně pohyb elektronů skrz krystalickou mřížku kovu. Nárazy elektronu do atomů v této mřížce jsou zcela běžné, způsobují ohřev kovu a zpomalují pohyb elektronů, což se projevuje jako elektrický odpor. [1], [3]

V některých případech, hlavně při vyšší teplotě a vysokých proudových hustotách, může dojít k tomu, že elektron při srážce předá atomu dostatek energie na to, aby byl z mřížky odstřelen. To má za následek dvě věci, zaprvé absence atomu v mřížce zvyšuje elektrický odpor, což vede ke zvýšení proudové hustoty a zvyšuje se pravděpodobnost, že se bude jev opakovat. Tento proces má tedy pozitivní zpětnou vazbu a časem může dojít i k přerušení vodivé cesty. Zadruhé atomy, které byly z mřížky vymrštěny ven, se shlukují na povrchu, což má za následek růst dendritů, které narušují izolaci vodivé vrstvy a mohou naopak způsobit zkratky s okolními cestami, nebo způsobit korozi. [1], [3]



Obrázek 2.7 Ukázka vodiče přerušeno vlivem suché migrace [3]

Suchá elektromigrace je problematická především v případech, kde jsou použity velmi tenké vodivé cesty, typicky se projevuje na vodivých cestách na křemíkových čipech a jiných polovodičových součástkách. Vodivé cesty na deskách plošných spojů jsou většinou dost široké na to, aby k suché elektromigraci nedocházelo nebo byla alespoň zanedbatelná. Proto se jí tato práce nadále nebude věnovat. [1]

2.4 Prevence

Problémy způsobované jak vlhkou, tak mokrou elektromigrací, jsou při životním cyklu desek plošných spojů čím dále více závažné. Snižující se vzdálenost mezi vodiči a rostoucí hustota zástavby znamená, že i menší dendrity mohou způsobit zkraty a zároveň se více uplatňují kapilární jevy zvyšující povrchovou vlhkost. Základem prevence je tak důkladné čištění povrchu od iontových nečistot, které pohánějí migrační procesy. Zároveň se jako efektivní metoda ukazuje použití hydrofobních povlaků, které snižují povrchovou vlhkost na desce. Další možností, především pro stříbro, je použití látek, které působí jako inhibitory koroze a omezují vylučování kovu do roztoku. [1]

3. TAVIDLA

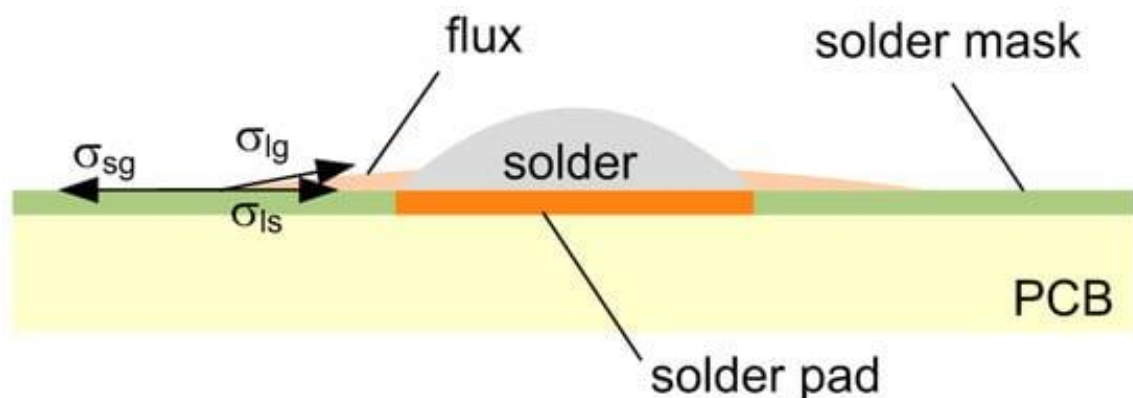
Obecně se jedná o látky, které při ohřátí podporují a zrychlují smáčení pájených povrchů pájkou. Funkce tavidla se dají rozdělit na chemické, fyzikální a tepelné. [4], [5]

3.1 Funkce

Složky tavidla chemicky reagují s pájeným povrchem, který je typicky pokryt tenkou vrstvou oxidů komplikující pájení. Oxidy rozpouští a přeměňují na kovové soli a zanechávají tak pod sebou čistý povrch připravený na pájení. [4], [5]

Jako fyzikální funkci označujeme schopnost zahřátého a tím pádem tekutého tavidla odstranit reakční produkty z oblasti pájeného spoje, který tím pádem není kontaminován zbytky chemických reakcí oxidů s tavidly. Dále také tavidlo zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu a snižuje povrchové napětí tekuté pájky, čímž zlepšuje její roztečení po povrchu a smáčecí úhel. [4], [5]

Dále také zlepšuje přenos tepla mezi pájeným spojem a zdrojem tepla. V případě, že se jedná o aplikaci tavidla v pájecí pastě, pak také slouží jako pojivo mezi mikroskopickými kuličkami pájky. Určuje reologické vlastnosti pájecí pasty a zajišťuje tixotropnost (vlastnost pasty způsobující, že se sníží viskozita pasty, když je pod tlakem během tisku). [4], [5]



Obrázek 3.1 Ilustrace roztečení pájky po pájecí plošce za přítomnosti tavidla [9]

3.2 Složení tavidel

Tavidla se skládají ze čtyř základních složek: tavidlový nosič, aktivátor, aditiva a rozpouštědla. V elektrotechnice se typicky používají nosiče na bázi přírodních pryskyřic (kalafuny), nebo na bázi organických kyselin. Další možností jsou anorganické látky jako například borax. Ty se však používají pro pájení tvrdé a pro tuto práci nejsou relevantní. [4], [5]

Aktivátory jsou látky, jejichž úkolem je podporovat chemické reakce tavidla s oxidy na pájeném povrchu. Může se jednat o organické kyseliny, aminy nebo organické halidy, tedy organické sloučeniny obsahující anionty halogenů. Dále mohou tavidla obsahovat různá aditiva, která mění jejich vlastnosti.

Poslední klíčovou složkou jsou rozpouštědla, ta jsou na organické bázi a označují se jako VOC (volatile organic compound), tedy těkavá organická látka, typicky se jedná o alkoholy. Další možností je rozpouštědlo na bázi vody a tyto tavidla se označují jako VOC FREE. [4], [5]

Tabulka 3.1 Klasifikace tavidel podle ČSN EN 29454-1 [7]

Typ tavidla	Základní složka	Aktivátor	Forma
pryskyřice	1. přírodní	1. bez aktivátorů	A tekuté
	2. syntetická	2. halogenidy	B tuhé
		3. bez halogenidů	C pasta
Organické	1.rozpustné ve vodě	1. bez aktivátorů	A tekuté
	2.nerozpustné ve vodě	2. halogenidy	B tuhé
		3. bez halogenidů	C pasta
Anorganické	1.soli	1. NH ₄ Cl	A tekuté
	2.kyseliny	2. bez NH ₄ Cl	B tuhé
	3.zásady	3. aminy/amoniak	C pasta

Tabulka 3.2 Klasifikace tavidel podle ANSI J-STD-004 [8]

Typ tavidla	Zkratka	Úroveň aktivace (% halidů)					
		L0	L1	M0	M1	H0	H1
Přírodní pryskyřice	RO						
Syntetická pryskyřice	RE						
Organické kyseliny	OR						
Anorganické kyseliny	IN	0	0	0,5-2	0,5-2	2+	2+

3.3 Použitá tavidla

Pro pokusy byla vybrána 2 tavidla, Pacific 2009 mlf a Kester 979T. Obě tavidla jsou si složením velmi podobná a spadají do kategorie VOC-free, no clean a ROL0. Přesněji jsou jejich parametry uvedeny níže,

3.4 Pacific 2009 MLF

3.4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti [10]

Obsah sušiny	3,6 % ± 0,2
Hustota při 25 °C	1 g/cm ³ ± 0,1
Kyselost	25 mg KOH/g ± 2
Rozpouštědlo	Voda
Zápach	Sladký
Obsah halidů	0
Klasifikace	ROLO

3.4.2 Nanášení

Výrobce přesně neudává, jakou metodou by mělo být tavidlo nanášeno. Pro tekutá tavidla je však typické nanášení sprejem, ponořením nebo pěnou. Množství naneseného tavidla by se mělo v rozmezí 60 a 140 µg sušiny na cm², aby splňovalo požadavky kategorie no clean. Před pájecím procesem je klíčové nechat tavidlo uschnout, aby se z povrchu pájené desky vypařila voda sloužící jako rozpouštědlo, která by následně narušovala pájecí proces. [10]

3.4.3 Čištění

Výrobce toto tavidlo klasifikuje jako no clean a pro většinu aplikací by nemělo být nutné jej po pájení z desky omývat. Vlastnostem tavidlových zbytků ani způsobu, jak jich v případě nutnosti zbavit se nevyjadřuje. [10]

3.5 Kester 979T

3.5.1 Fyzikální a chemické vlastnosti [10]

Obsah sušiny	4,5 %
Hustota při 25 °C	1,020 g/cm ³ ± 0,1
Kyselost	40 mg KOH/g ± 3
Rozpouštědlo	Voda
Zápach	Žádný
Obsah halidů	0
Klasifikace	ROLO

3.5.2 Nanášení

Podle instrukcí výrobce by mělo být nanášeno sprejem, ponořením nebo pěnou. Množství naneseného tavidla by měl odpovídat rozmezí 120 až 240 µg sušiny na cm², aby splňovalo požadavky kategorie no clean. Před pájecím procesem je klíčové nechat tavidlo uschnout, aby se z povrchu pájené desky vypařila voda sloužící jako rozpouštědlo, která by následně narušovala pájecí proces. [11]

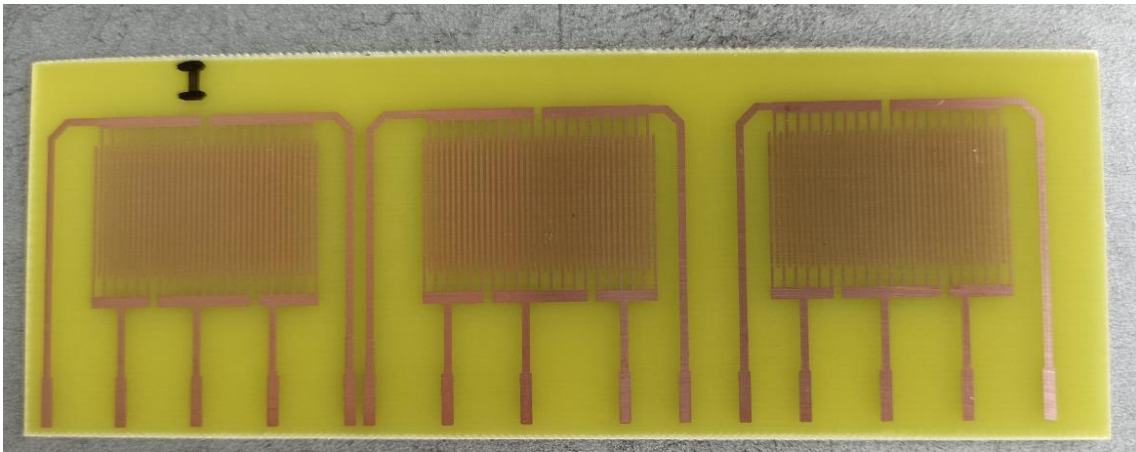
3.5.3 Čištění

Výrobce toto tavidlo klasifikuje jako no clean a pro většinu aplikací by nemělo být nutné jej po pájení z desky omývat. Tavidlové zbytky jsou podle tvrzení výrobce nevodivé a nekorozivní. Pokud by bylo potřeba se tavidlových zbytků zbavovat, měla by k omytí být použita demineralizovaná voda o teplotě 43 až 54 °C s přidáním saponátů. [11]

4. TESTOVACÍ DPS

4.1 Výroba

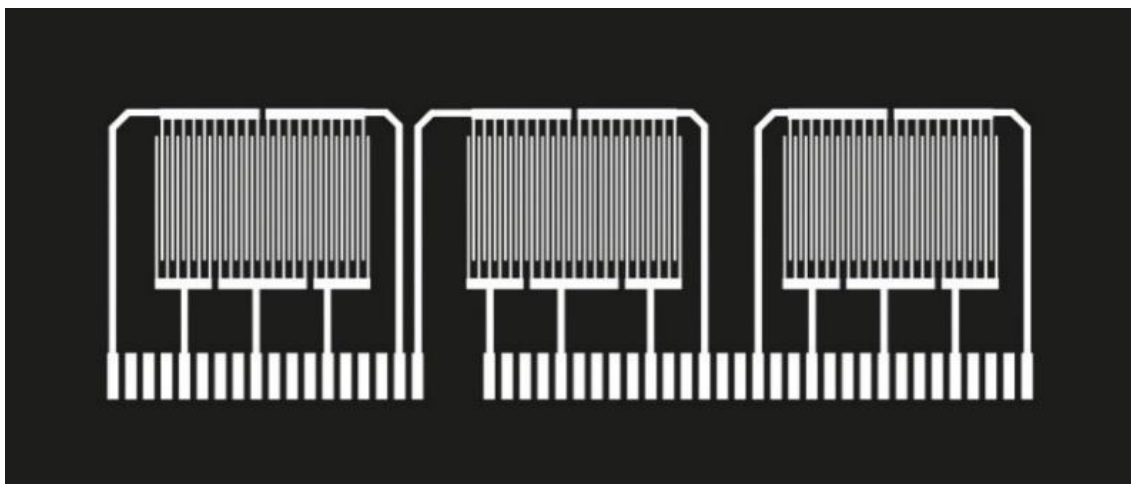
Testovací DPS byly vyrobeny subtraktivní metodou ze základového materiálu FR4 plátovaného 18 μm mědi. Na okartáčované a očištěné desky byl nalaminován negativní fotorezist, který byl následně exponován po dobu 16 vteřin přes negativní masku. Následně byl fotorezist vyvolán v roztoku uhličitanu sodného a byla odleptána měď roztokem kyseliny chlorovodíkové, peroxidu vodíku a vody. Nakonec byl stripován fotorezist v roztoku hydroxidu sodného, proběhl důkladný oplach proudem tekoucí vody a následný oplach demineralizovanou vodou.



Obrázek 4.1 Testovací DPS

4.2 Návrh

Deska byla navržena v softwaru Autodesk Eagle, v souladu s normami IPC-B-24 a IPC-TM-650 2.6.3.6.. Na desce jsou tři testovací hřebínky, z každého z nich je vyvedeno pět vodičů, tři ze spodní strany a dva ze strany horní. Výsledně je tak možné měřit povrchový izolační odpor mezi šesti vodivými cestami hřebínku. Vývody testovací DPS byly navrženy tak, aby bylo možné desku připojit do konektoru ISA98. Vzdálenost mezi jednotlivými vodiči stejně jako tloušťka těchto vodičů byla nastavena na 0,38 mm (0,015 inch). [11], [12]



Obrázek 4.2 Negativní maska pro výrobu testovacích DPS

4.3 Reprodukovatelnost výroby

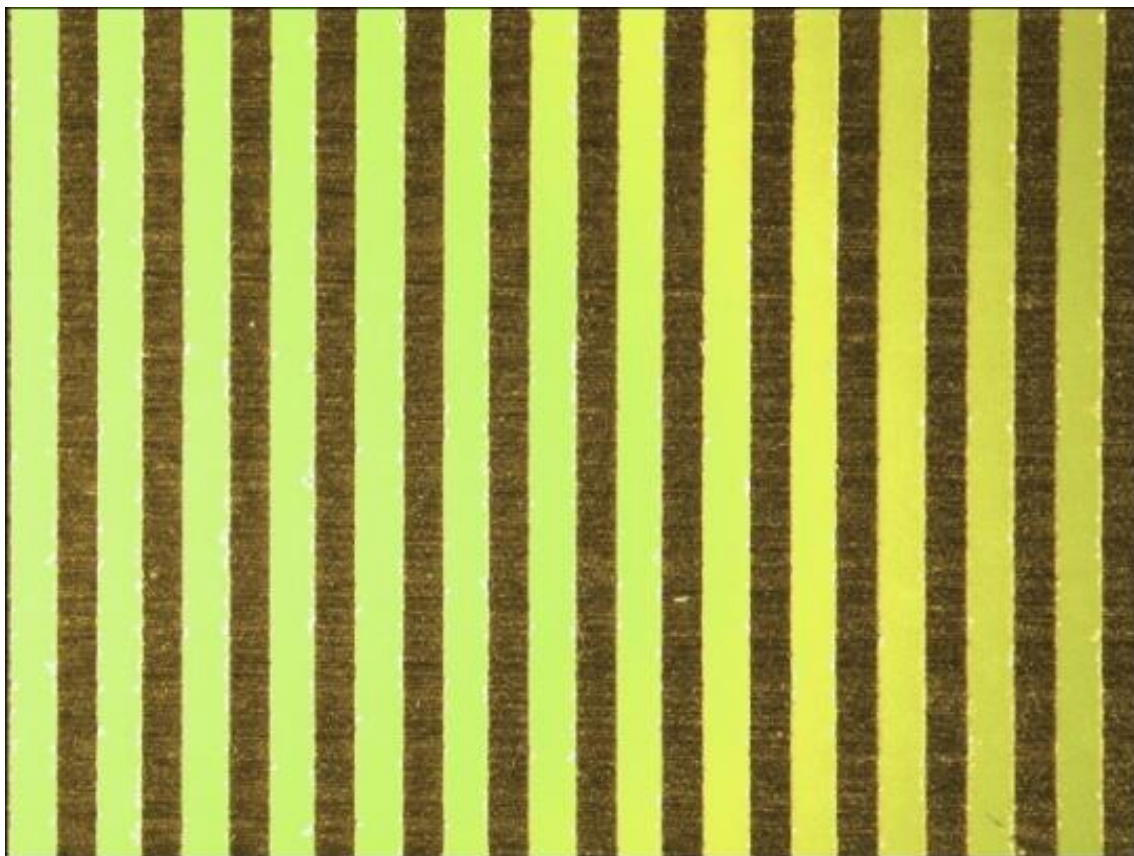
Vyrobené desky byly prohlédnuty pod mikroskopem, na každé desce byla vyfocena náhodná oblast pro měření šířky vodivých cest a izolačních mezer hřebíkových motivů. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky 4.1.

Tabulka 4.1 Naměřené šířky na hřebíkovém motivu

Deska	Motiv	vodivé cesty [μm]				průměr [μm]	mezery [μm]				průměr [μm]
1	1	377	369	362	369	369,25	400	385	393	377	388,75
	2	370	370	376	376	373	394	380	400	400	393,5
	3	380	374	368	374	374	386	404	386	380	389
2	1	380	380	380	386	381,5	380	363	386	380	377,25
	2	379	367	385	380	377,75	379	379	385	379	380,5
	3	372	384	378	384	379,5	400	372	373	378	380,75
3	1	375	369	370	375	372,25	404	375	393	380	388
	2	366	367	367	367	366,75	375	400	396	390	390,25
	3	380	368	374	386	377	398	380	374	380	383
4	1	377	372	372	372	373,25	401	384	389	372	386,5
	2	368	376	365	370	369,75	400	376	406	382	391
	3	370	369	375	382	374	382	388	370	405	386,25

Průměrná šířka vodivé cesty byla změřena na 374 μm a izolační mezery na 386 μm . Odchylka průměrných hodnot od požadovaných 380 μm je tedy v obou případech 1,6 %. Maximální šířka vodivé cesty byla naměřena na 386 μm a minimální pak na 362 μm , respektive 406 μm a 363 μm pro mezery. Největší odchylka od průměru je tedy u největší mezery, a to 6,01 %.

Výrobní proces pro testovací DPS je tedy dostatečně přesný a reprodukovatelný pro účely této práce.



Obrázek 4.3 Snímek vodičů hřebínkového motivu pořízený mikroskopem.

5. METODIKA MĚŘENÍ

Navrhovaný postup metody měření vlivu tavidlových zbytků na povrchový izolační odpor vychází z postupu popsaneho v normě IPC-TM-650 2.6.3.6.. Pro měření povrchového odporu norma ukládá měřicí napětí 100 ± 2 V a přesnost megaohmmetru 5 %. Postup měření byl následující:

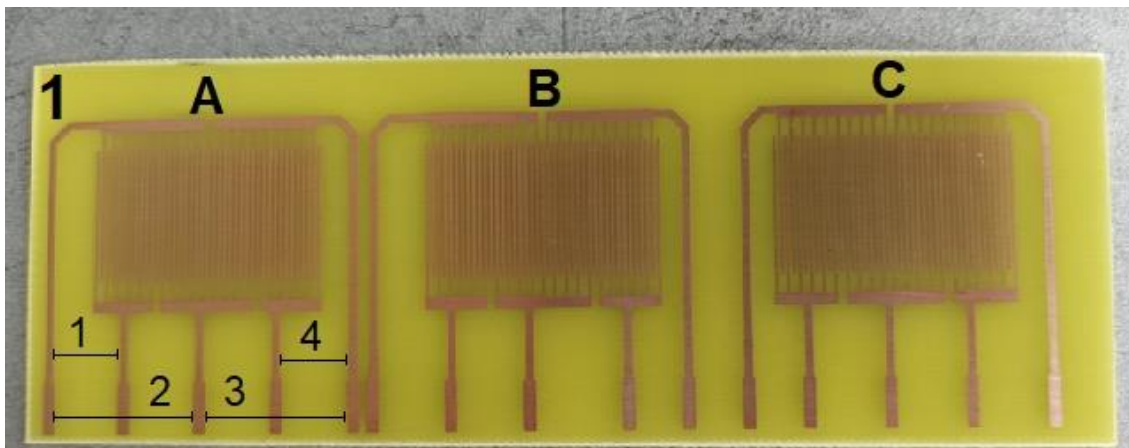
1. Na očištěné testovacích DPS je změřen povrchový izolační odpor.
2. Na povrch desky je aplikováno tavidlo v množství, které doporučuje výrobce
3. Na desky aplikované tavidlo je aktivováno. Buďto přímo v přetavovací peci, nebo jiným obdobným způsobem.
4. Na deskách je změřen povrchový izolační odpor a je provedena optická kontrola
5. Desky jsou umístěny do klimatické komory, uvnitř které je teplota 35 °C a relativní vlhkost 90 % (podle normy teplota $35 \pm 1,5$ °C a vlhkost alespoň 85 %), kde stárnou po dobu 24 hodin. Po aklimatizaci desek na pokojovou teplotu probíhá optická kontrola a další měření povrchového odporu.
6. Desky jsou umístěny zpět do klimatické komory, tentokrát s připojeným stejnosměrným napětím 30 V (v opačném směru, než bylo připojeno napětí měřicí). Po 72 hodinách stárnutí a aklimatizaci na pokojovou teplotu probíhá finální optická kontrola a měření odporu.

Experiment bude srovnávat dvě již výše zmíněná tavidla VOC-free tavidla Keser 979T a Pacific 2009 mlf. Dále bude zkoumán vliv přítomnosti pájeného spoje na elektro migraci. To bude simulováno povrchovou úpravou měřených desek pájkami SAC305 a SN100C. Celkově tedy bude testováno 6 desek bez povrchové úpravy, 2 čisté a po dvou s každým tavidlem. 4 pokryté slitinou SAC305 opět po dvou s každým tavidlem a 4 pokryté slitinou SN100C opět po dvou s každým tavidlem. Celkově tedy bude v každé etapě experimentu změřeno 168 odporů.

V průběhu stárnutí desek v klimatické komoře se očekávalo snižování povrchového izolačního odporu a finální optická kontrola by měla odhalit růst dendritické struktury na testovacích obrazcích. [12], [13]

5.1 Značení desek

Pro přehlednost a jednoduchou orientaci bylo potřeba vytvořit systém značení jednotlivých desek, obrazců na nich a možných kombinací měření na obrazci. Desky byly vždy testovány po čtyřech, tedy byly číslovány 1 až 4. Na každé desce se nacházejí 3 hřebíkové obrazce, označeny zleva do prava A, B a C. Na každém z těchto obrazců je možné kombinačně změřit 4 odpory značeny opět zleva do prava od 1 do 4. Názorně je ukázáno na obrázku 6.1.

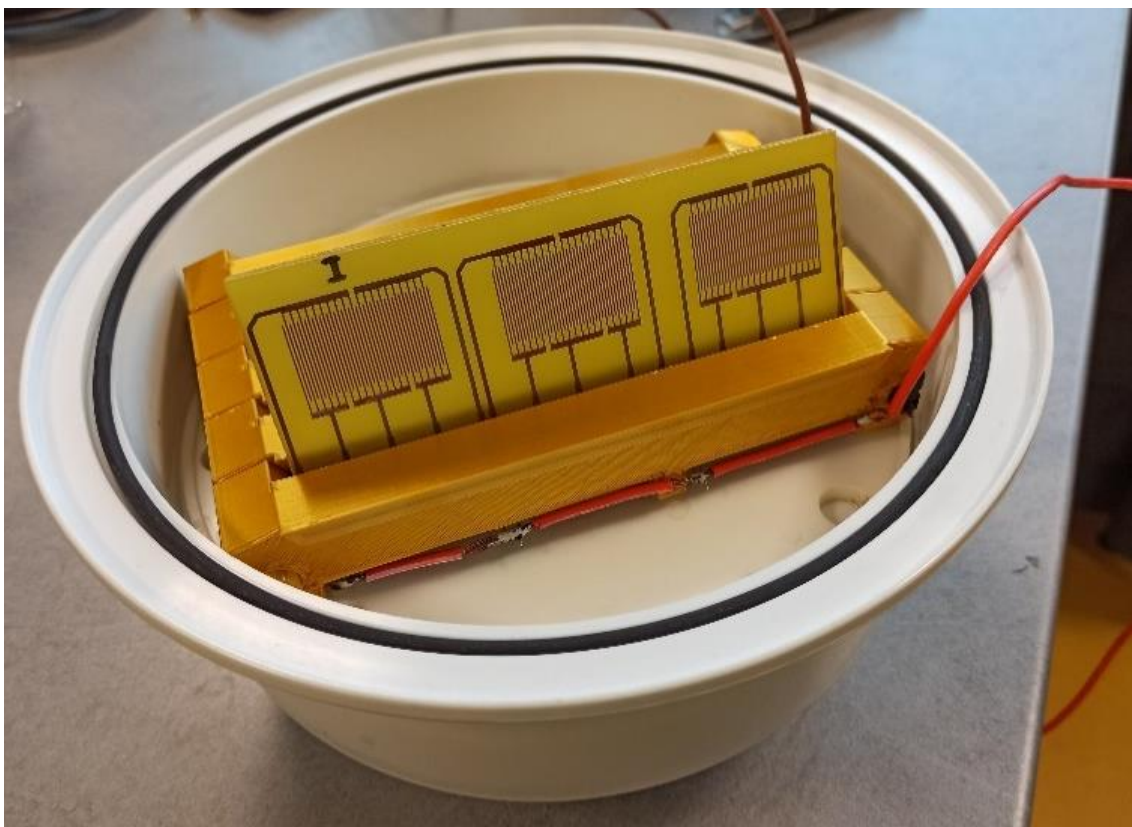


Obrázek 5.1 Příklad značení desek

5.2 Klimatická komora

Pro docílení požadované teploty byla použita kombinace klimatické komory Friocel a plastového desikátoru částečně naplněného demineralizovanou vodou. Podle normy byla teplota v komoře nastavena na 35 °C a desikátor byl co možná nejvíce utěsněn.

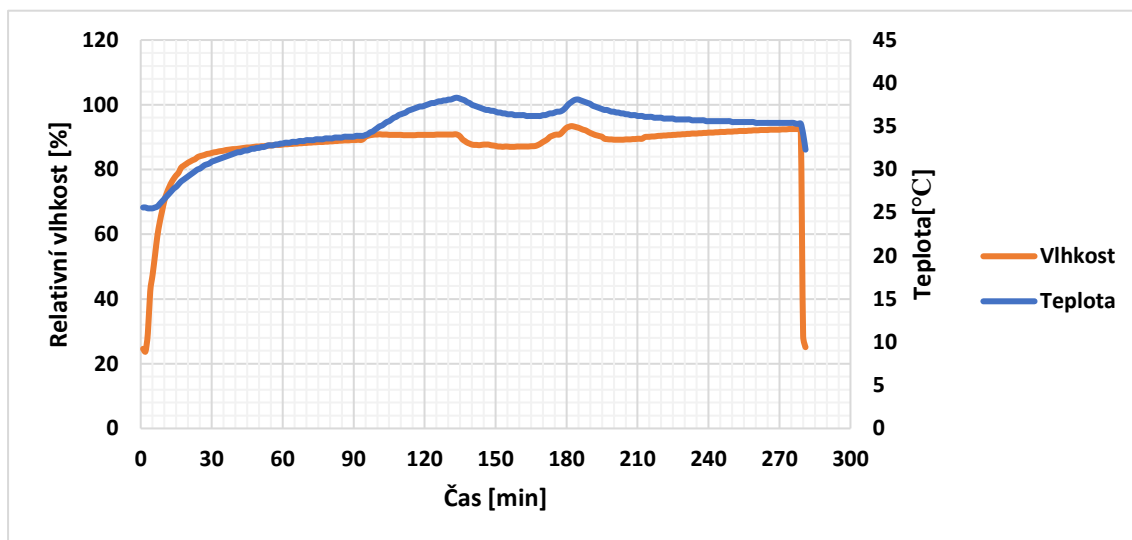
Aby bylo možné do desikátoru testovací DPS umístit, byl v 3D modeleru Solid Works navržen modulární úložný systém. Skládá se z plastových částí vytištěných na 3D tiskárně z materiálu PLA. Mezi tyto plastové (žluté) díly jsou vmezeřeny konektory ISA 98, které drží samotné testovací DPS. Vývody konektorů jsou zapájeny propojovacími vodiči s dvěma kabely, které vedou ven z desikátoru. Soustava vodičů je zapájena tak, aby bylo možné na testovací obrazce připojit elektrické napětí během stárnutí v klimatické komoře.



Obrázek 5.2 Plastový desikátor s úložným systémem na testovací DPS

Během návrhu tohoto systému vyvstala obava o to, že by materiál použitý pro výrobu dílů (PLA – polylactic acid) mohl uvolňovat těžké látky kvůli zvýšené teplotě, tím zvýšit vodivost na povrchu testovaných DPS a tím test narušit. Proto byl proveden experiment, kdy byl jeden z plastových dílů umístěn do nádoby s demineralizovanou vodou. Ten byl po dobu 96 hodin (ekvivalent doby testu) zahřát na teplotu 40 °C. Před i po tomto experimentu byla změřena vodivost demineralizované vody v nádobě a nebyla pozorována žádná změna. Bylo tedy ověřeno, že požití materiálu PLA nebude mít negativní vliv na průběh zkoušek.

Dále bylo provedeno měření teploty a vlhkosti pomocí datalogeru Voltcraft DL-181THP. Naměřený průběh je vykreslen na obrázku 5.3. Průměrná teplota od překročení 33,5 °C do ukončení měření byla 36,1 °C. Průměrná relativní vlhkost ve stejném časovém intervalu byla 90,2 %. Tyto hodnoty jsou v souladu s normou.



Obrázek 5.3 Graf průběhu teploty a relativní vlhkosti v klimatické komoře

5.3 Soustava pro měření odporu

5.3.1 Megaohmmetr IM6

Pro měření povrchového izolačního odporu byl zvolen megaohmmetr IM6 vyroben společností RE Instruments. Měřicí přístroj dokáže měřit odpor v rozsahu 10^7 až $10^{15} \Omega$. Je vybaven vlastním zdrojem napětí schopným poskytnout měřicí napětí až 999 V. [14]

Jedná se o velmi přesné měřicí zařízení, které je velmi náchylné na elektromagnetické rušení a přítomnost staticky nabitých těles. Proto byly při veškerých měřeních použity stíněné koaxiální kabely, jejichž stínění bylo připojeno k zemi měřicího přístroje. Stůl, na kterém měření probíhalo, byl vybaven antistatickou podložkou, která byla rovněž uzemněna. Stejně tak bylo potřeba uzemnit také obsluhu měřicího přístroje.

Základní měřicí soustava byla velmi jednoduchá. Na měřicí svorky byly připojeny dva koaxiální kabely, na jejichž koncích byly umístěny krokosvorky, které sloužily k připojení vývodů na testovaných DPS. Stínění těchto kabelů bylo svedeno a spájeno dohromady a následně připojeno k zemi megaohmmetru. Takto sestavená měřicí soustava umožňovala velmi přesné měření až do $10^{13} \Omega$, při měření vyšších odporů se již začal projevovat vliv okolního elektromagnetického rušení. Při měření odporů vyšších se ručička měřicího přístroje nikdy úplně neustálila a oscilovala okolo nějaké hodnoty, proto naměřené jsou hodnoty odporu vyšší než $10^{13} \Omega$ odečítány vždy jen jako celé jednotky např. ($2 \cdot 10^{13} \Omega$, nebo $6 \cdot 10^{13} \Omega$) a nikdy s desetinnými čísly např. ($2,5 \cdot 10^{13} \Omega$, nebo $6,5 \cdot 10^{13} \Omega$).

Měření tímto způsobem je však relativně zdlouhavé, jednak proto, že je potřeba ručně přepojovat krokosvorky, a také proto, že ustálení měřicího přístroje vždy trvá okolo 30 vteřin.

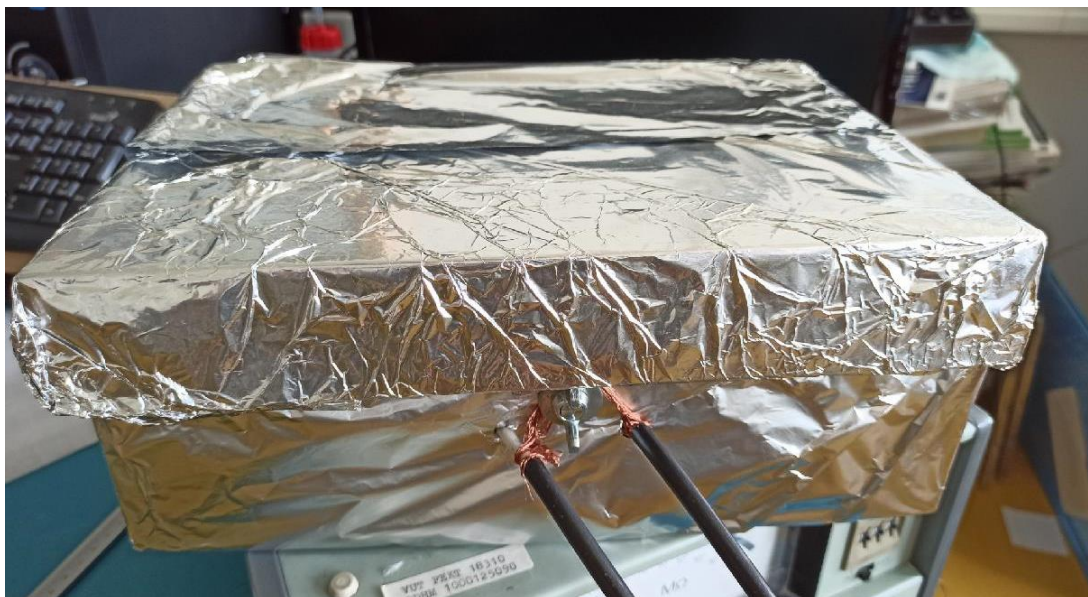


Obrázek 5.4 Megaohmmetr IM6

5.3.2 Stíněná krabice

Jak je výše zmíněno, měření bylo do značné míry komplikováno elektromagnetickým rušením, které jej znepřesňovalo. Nejjednodušší způsob, jak se pokusit rušení potlačit, bylo vyrobit stíněnou krabici. Kartonová krabice byla jak z venku, tak zevnitř pokryta potravinářskou hliníkovou fólií. Tato folie má dvě strany, lesklou, která je čistá, a matnou, která je pokryta oxidy. Při pokrývání krabice folií byl kladen důraz na to, aby se v místech, kde se vrstvy folie dotýkají, vždy dotýkaly stranou lesklou, pro lepší elektrický spoj.

Do této krabice byly zhotoveny dva otvory na měřicí vodiče a třetí otvor na kovový šroub, který pevně propojil hliníkovou folii z obou stran krabice ke stínění měřících koaxiálních kabelů. I přestože toto řešení není dokonalé, toto stínění bylo dostatečné k tomu, aby posunulo měřenou hodnotu odporu, při které se objevuje rozkmit ručičky megaohmmetru o řád výše. Maximální hodnota, kterou je měřicí soustava schopna měřit, je s touto krabičkou již $6 \cdot 10^{14} \Omega$, což je pro účely této práce dostačující.

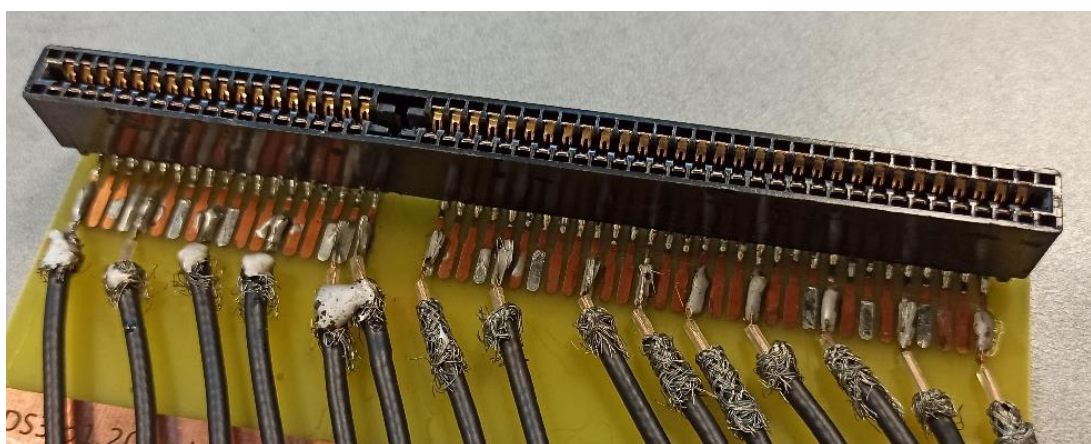


Obrázek 5.5 Stínící krabice

5.3.3 Přepínací krabička a patice

Pro zefektivnění měření byl navržen systém kombinující patici s konektorem ISA 98, do kterého je možné vložit testované DPS, a přepínací krabičku, která by umožnila zrychlit měření.

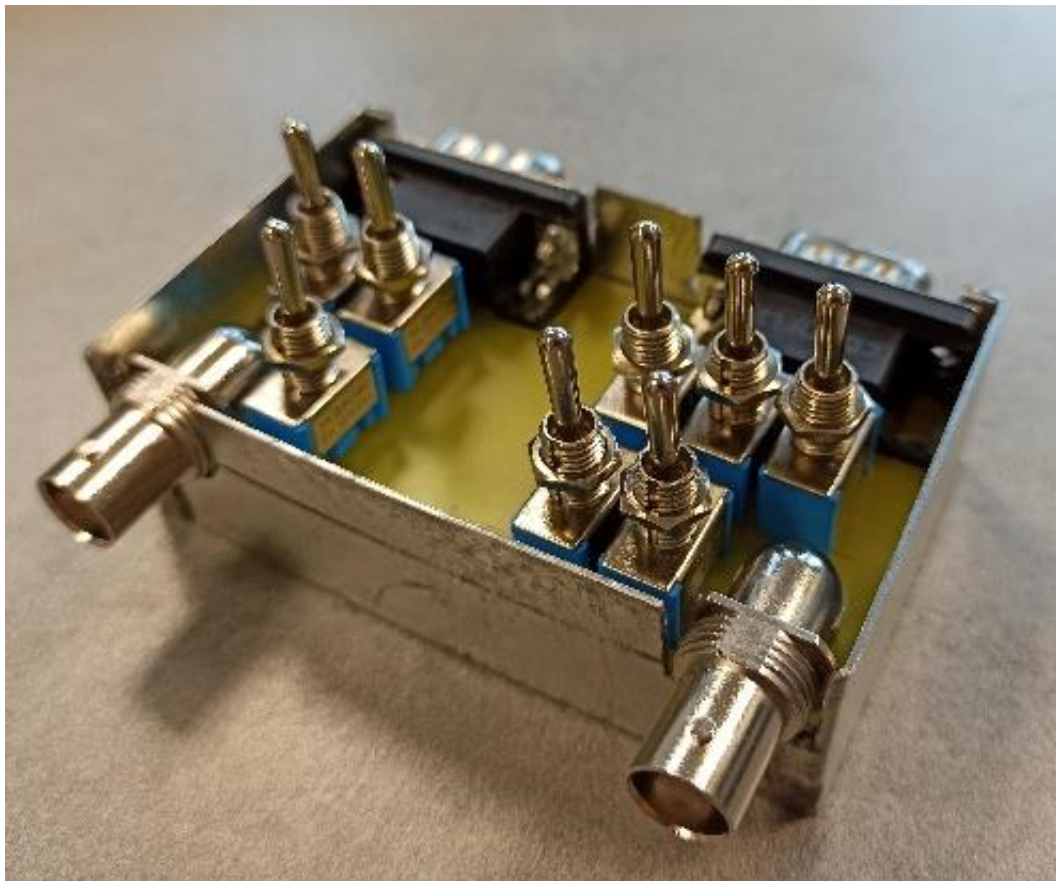
Konektor ISA 98 získaný ze staré základové desky byl připájen na DPS, na které vyvádí piny konektoru na pájecí plošky. Na tyto plošky jsou připájeny koaxiální kabely, které vedou do přepínací krabičky.



Obrázek 5.6 Patice ISA 98 pro připojení testovaných DPS

Přepínací krabička, jejíž účelem je zrychlit přepínání mezi jednotlivými testovacími deskami, je zobrazena na obrázku 5.7. Jak můžeme vidět, krabička je rozdělena na dvě větve, kladnou a zápornou. Tyto větve jsou úmyslně navrženy tak, aby mezi nimi byl co možná největší prostor a tím i povrchový izolační odpor. Z jedné

strany se nacházejí vstupní 9ti pinové D-SUB konektory, do kterých jsou přivedeny koaxiální kabely z výše zmíněné patice. Na výstupu jsou umístěny BNC konektory, které jsou připojeny k megaohmmetru také koaxiálními kabely. To, který vstupní koaxiální kabel je zrovna připojen na k měřicímu přístroji, určují on-off-on přepínače, které propojují vstupní D-SUBy s výstupními BNC konektory. To, který testovací obrazec je zrovna měřen, je dáno kombinací sepnutých přepínačů v kladné a záporné větvi.



Obrázek 5.7 Přepínací krabička se sundaným víčkem

Při návrhu přepínací krabičky bylo dbáno na to, aby byla co možná nejlépe odstíněna a nezanášela tak do měření další chyby. Proto je deska s komponenty umístěna v ocelové krabičce sloužící jako stínění. Ze stejného důvodu byly použity BNC konektory, aby byla krabička připojena ke stínění výstupních koaxiálních kabelů, které je uzemněné.

Toto řešení má však zásadní problém. Aby bylo stínění funkční, je potřeba krabičku zavřít. V takovém případě budou kovové části přepínačů elektricky spojeny s víčkem krabičky a tím pádem uzemněné. Problém je v tom, že zem megaohmmetru je spojena se zápornou měřicí svorkou odporem několika $M\Omega$. V důsledku toho, když

připojíme krabičku do megaohmmetru, naměříme svod mezi vstupními piny přepínače a jejich kovovou horní částí, která je uzemněna. Tento odpor se liší mezi jednotlivými přepínači, ale řádově vychází $10^{12} \Omega$. To je řádově níže, než jaký odpor potřebujeme při testech měřit. Z tohoto důvodu nebyl přepínací mechanismus v níže popsaném experimentu použit a místo něj byla použita základní metoda ručního přepojování krokosvorek. Tento problém by vyřešilo použití přepínačů s nižším svodem, takové je ovšem velmi obtížné najít, protože tento parametr výrobce typicky neudává.

6. POVRCHOVÉ ÚPRAVY

Jak je již zmíněno výše, tato diplomová práce srovnává čistou měď bez povrchových úprav s povrchovými úpravami tvořených z pájecích slitin SAC305 a SN100C. Smyslem povrchových úprav z těchto slitin je simulovat přítomnost pájeného spoje na DPS. Tyto dvě slitiny byly vybrány proto, že obsahují vysoký podíl cínu (96,5 % respektive 99 %). Z předchozích experimentů vyplynulo, že navržená testovací metoda podle normy IPC-TM-650 2.6.3.6. nepůsobuje v rámci svého základního trvání růst dendritických struktur mezi vodivými cestami. Z teorie vyplývá, že jediný kov, který elektromigraci podléhá více než měď, je cín, který je hlavní složkou obou zvolených slitin. Při použití jiných povrchových úprav je nepravděpodobné, že by k růstu dendritů došlo a nebylo by tedy možné pozorovat vliv tavidlových zbytků na elektromigraci.

6.1 Výroba

Pro nanášení pájecích slitin bylo zvoleno nanášení ruční, byla použita pájecí stanice a jako její pájecí hrot byla zvolen pájecí hrot typu „minivlna“ od firmy PACE typ 1121-0490. Výhodou tohoto hrotu je, že umožňuje dávkování pájecí slitiny a dokáže pokrýt požadovaný povrch relativně rychle. Postup nanášení je následující.

Výduť pájecího hrotu byly naplněna slitinou, na povrch testovacího obrazce na DPS bylo nanášeno pastovité tavidlo Kester TSF-6592 a následně byl pájecím hrotem povrch pokryt souvislou vrstvou pájky. Z předchozích experimentů vyplynulo, že nejlepší rovnoměrnosti pokrytí se dosáhne tak, že směr pájení bude odpovídat směru hřebínků na obrazcích. Hmotnost deponovaná na jednotlivé obrazce byly zvážena na OHAUS PIONEER a zapsána do tabulky 6.1. Z této hmotnosti, povrchu mědi na obrazci ($272,62 \text{ mm}^2$) a hustoty pájky bylo následně možné vypočítat tloušťku vytvořené vrstvy.



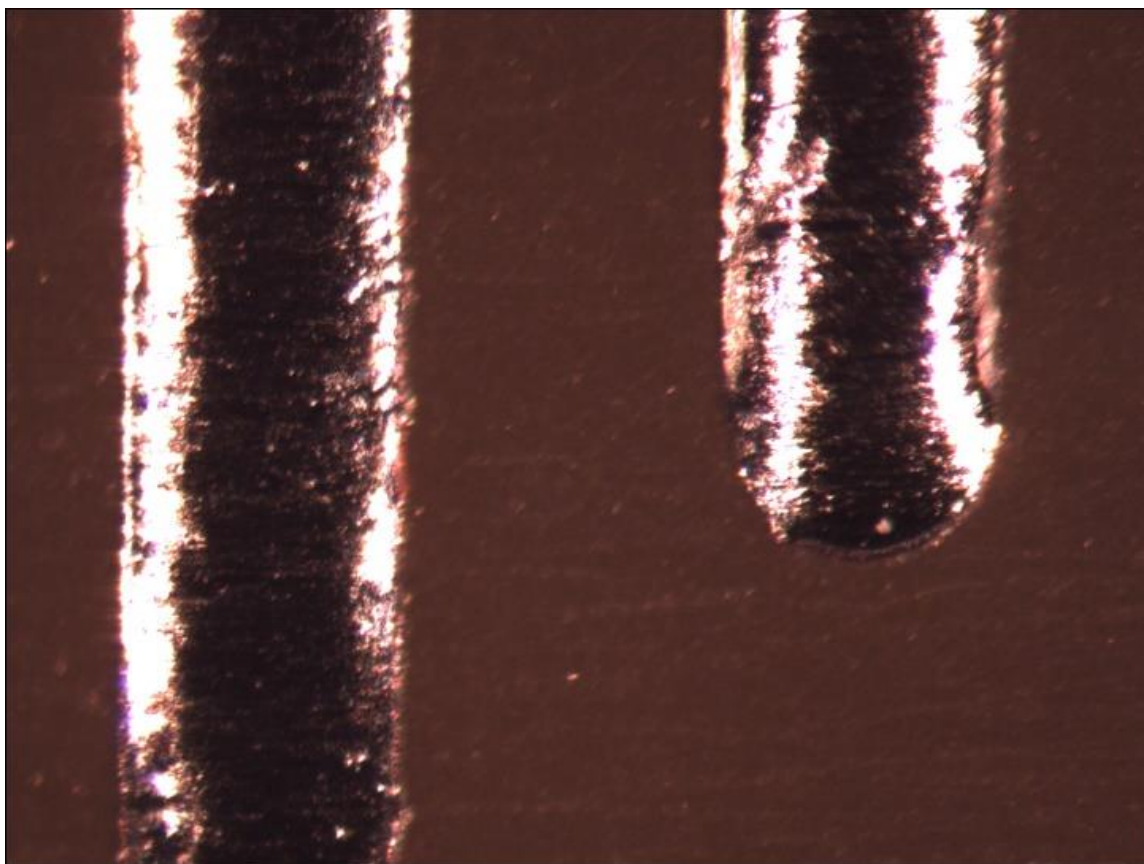
Obrázek 6.1 Obrazec A na desce 1 s povrchovou úpravou SAC305

V této tabulce jsou žlutě vyznačeny obrazce, kde byla pájka chybně nanášena i mimo testovací hřebíkové vzory, a to na jejich spojovací cesty. Proto v těchto případech není spočítána tloušťka vrstvy, protože by nebyla vypovídající. Příklad této chyby můžeme vidět na obrázku 6.1.

Následná optická kontrola pod mikroskopem ukázala, že i přestože množství pájky je v rámci různých desek konzistentní, její homogenita ne. Proto byly desky očištěny od tavidlových zbytků, opět bylo nanášeno pastovité tavidlo a desky prošly přetavovací pecí, aby se pájka ještě jednou přetavila a její množství se vyrovnalo v rámci pokrytí jednotlivých cest. Detailní pohled pod mikroskopem na jednu z pokovených cest můžeme vidět na obrázku 6.2.

Tabulka 6.1 Hmotnosti a tloušťky pájky na testovacích DPS

Deska	Obrazec	Hmotnost [mg]	Tloušťka vrstvy [um]	Deska	Obrazec	Hmotnost [mg]	tloušťka vrstvy [um]
SAC 305 (1)	a	57	xxx	SN100C (1)	a	45	xxx
	b	34	15,9		b	48	xxx
	c	39	18,2		c	38	18,8
SAC 305 (2)	a	38	17,8	SN100C (2)	a	39	19,3
	b	36	16,8		b	35	17,3
	c	40	18,7		c	34	16,8
SAC 305 (3)	a	30	14,0	SN100C (3)	a	37	18,3
	b	38	17,8		b	35	17,3
	c	48	xxx		c	39	19,3
SAC 305 (4)	a	39	18,2	SN100C (4)	a	34	16,8
	b	35	16,4		b	38	18,8
	c	41	19,2		c	39	19,3



Obrázek 6.2 Detail na povrchovou úpravu SAC305

7. MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ

Jak je již popisu experimentu zmíněno, celkově je testováno 14 desek. Z kapacitních důvodů mnou vyrobené klimatické komory není bohužel možné provést test na všech deskách zároveň. Maximální možné množství desek testovaných najednou je 4, proto je tato kapitola rozdělena na 3 části, a to podle povrchové úpravy.

7.1 Desky bez povrchové úpravy

7.1.1 Očištěné desky

Všechny čtyři testovací DPS byly očištěny pomocí bezvlákné textilie a izopropylalkoholu, následně byly opláchnuty v demineralizované vodě, a nakonec vysušeny v sušárně. Tento proces by měl zajistit to, že se na povrchu desek bude vyskytovat jen minimální množství iontů. Na takto očištěných deskách byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulky 8.1. Číslice označují jednotlivé DPS, na každé této desce se nacházejí tři obrazce označené písmeny a, b, c. Každý z těchto obrazců se navíc skládá ze čtyř jednotek, na kterých je měřen odpor, čísla zapsaná v tabulce jsou hodnoty odporu na jednotlivých jednotkách obrazců. Dále je vypočítán aritmetický průměr odporů na jednotlivých deskách a dále aritmetický průměr dvojic desek, na které bude následně aplikováno stejné tavidlo.

Tabulka 7.1 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]							
Obrazec	Hřebínek/deska	I	II	1	2	3	4
A	1	42	32	42	38	36	40
	2	36	36	36	42	38	38
	3	38	48	38	38	50	36
	4	44	46	50	55	36	55
B	1	36	36	46	36	32	32
	2	38	38	40	38	42	34
	3	50	55	38	50	46	48
	4	36	36	42	36	40	42
C	1	32	42	34	42	42	46
	2	34	34	60	44	32	42
	3	48	65	32	34	36	34
	4	48	22	46	60	46	28
Průměr desky		40,2	40,8	42,0	42,8	39,7	39,6
Průměr		40,5		42,4		39,6	

Tabulky se všemi naměřenými daty se nacházejí v příloze. Pro srovnání a jako kontrolní vzorek byly použita data naměřená v rámci semestrálního projektu, který předcházel této práci. Desky z tohoto měření jsou označeny římskými čísly I a II. Jedná se o desky bez povrchové úpravy, na které nebylo použito žádné tavidlo.

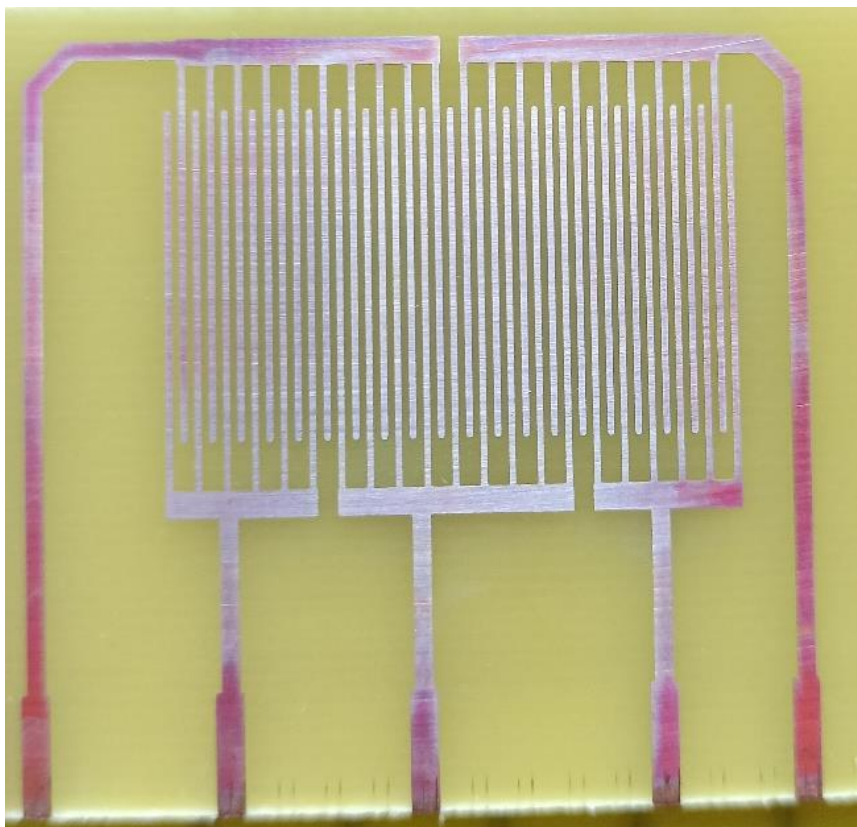
Z tabulky 8.1 vyplývá, že povrchový izolační odpor na očištěných deskách se pohybuje okolo $40 \cdot 10^{13} \Omega$. Podíváme-li se na naměřené povrchové izolační odpory, můžeme vidět, že jejich rozptyl je značný s rozdílem mezi nejnižším a nejvyšším odporem naměřeném na hřebíncích (22 resp. $65 \cdot 10^{13} \Omega$) $16,7 \%$. To lze očekávat vzhledem k tomu, že je celý proces prováděn ručně a nelze tak zajistit dokonalou reprodukovatelnost. Podíváme-li se ovšem na průměrné hodnoty naměřené na celých deskách, tak rozdíl mezi extrémy již není tak velký, konkrétně pouze 6% . I přestože desky nejsou očištěny dokonale rovnoměrně, tento rozptyl by neměl představovat problém vzhledem k tomu, že ze zkušeností z předchozích měření je po nanesení tavidla a pájení očekáván pokles povrchového izolačního odporu řádově $10x$.

7.1.2 Aplikace a aktivace tavidla

Na takto očištěné desky bylo nanášeno tavidlo. Jak je výše zmíněno, desky I a II zůstaly čisté bez tavidla, na desky 1 a 2 bylo nanášeno tavidlo Pacific 2009 mlf a na desky 3 a 4 tavidlo Kester 979 T. Výrobci neudávají doporučené množství tavidla přesně, ale jako rozptyl. Množství aplikovaného tavidla bylo zvoleno $4 \mu\text{l}$ na obrazec, toto množství splňuje rozsahy stanovené výrobcem. Tavidlo bylo odměřeno a aplikováno pomocí mikropipety.

Mikropipetou byl vždy vykonán plynulý pohyb zleva doprava skrz obrazec přes jeho vodivé cesty a postupně bylo tavidlo vypouštěno. Tavidlo se na vysušeném očištěném povrchu velmi dobře roztékalo a pokrylo celý obrazec. Bylo usouzeno, že snaha tavidlo po nanesení dále roztírat by pravděpodobně vedlo spíše ke kontaminaci než ke zvýšení homogenity nanesení.

Dále bylo potřeba simulovat pájecí proces, tak aby se tavidlo aktivovalo, zreagovalo a vznikly tavidlové zbytky. Toho bylo docíleno v přetavovací peci DIMA, nastavené na teplotní profil pro bezolovnaté pájení, konkrétně optimalizovaný pro pájecí slitinu SAC305. Maximální teplota tohoto pájecího profilu je $235 \text{ }^\circ\text{C}$, což by mělo být dostatečné pro kompletní aktivaci tavidla. Tímto procesem prošly pouze desky 1 až 4, které byly pokryty tavidlem. Desky I a II bez tavidla přetavovací pecí neprošly.



Obrázek 7.1 Vybraný obrazec desky s tavidlem po průchodu přetavovací pecí

Na obrázku 7.1 je vyfocen obrazec jedné z desek s tavidlem po průchodu pecí. Z vizuálního hlediska nebyl v této části pozorován žádný rozdíl mezi tavidly Pacific a Kester. Na fotce je jasně patrný rozdíl mezi místy, kde bylo nanášeno tavidlo a kde ne. Hřebíkový vzor, kde bylo tavidlo nanášeno, nepodlehlo oxidaci a je pokryt tavidlovými zbytky (na fotce lesklá bílá část). Oproti tomu přívodní cesty k obrazci, které nebyly pokryty tavidlem, jsou po průchodu pecí pokryty červenými oxidy mědi.

Na deskách 1 až 4 byl změřen povrchový izolační odpor. Tento odpor byl tak vysoký, že jej použitý megaohmmetr nedokázal změřit, tedy vyšší než $40 \cdot 10^{13} \Omega$. To se dá vysvětlit tím, že při průchodu pecí došlo k vysušení povrchu. Tavidlové zbytky obou tavidel jsou podle výrobců také nevodivé a k povrchovou vodivost také nezvyšují.

7.1.3 První etapa stárnutí

V této etapě byly všechny desky umístěny do klimatické komory na dobu 24 hodin. Teplota v komoře byla 35 °C a vzdušná vlhkost 90 %. Po 24 hodinách byly desky vytaheny, po aklimatizaci byly podrobeny optické kontrole pod mikroskopem a byl jim změřen povrchový izolační odpor. Naměřený odpor je zapsán v tabulce 7.2. Naměřená data jsou opět doplněna o vzorky bez tavidla.

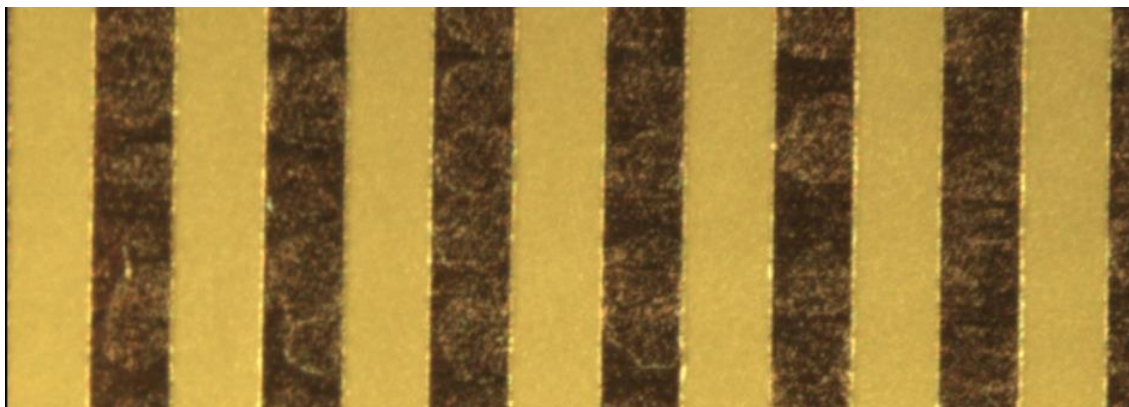
Tabulka 7.2 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]							
Tavidlo		žádné		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	I	II	1	2	3	4
A	1	1	1	4,8	5	2,8	2,2
	2	2	1	5,5	3,6	3,2	2,8
	3	1,5	2	2,4	3,2	2,2	3
	4	1,5	0,9	7,5	4,4	2,6	2,2
B	1	1	1	3,2	3,6	3,4	2,4
	2	0,9	0,8	3,6	3,8	1,9	2,6
	3	1,3	0,9	5,5	4,4	3	4
	4	0,8	1	2,2	4	2,4	3,2
C	1	1	0,9	5	3,8	2,4	2,8
	2	2	0,8	3,6	4	2,6	2,6
	3	1,5	2	5	3,6	2,8	2,8
	4	0,8	1,5	4,2	2,5	3	2,8
Průměr desky		1,3	1,2	4,4	3,8	2,7	2,8
Průměr		1,2		4,1		2,7	

Podle očekávání došlo ke značnému poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně 97 % u kontrolních desek, o 90 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 93 % u tavidla Kester 979 T. Opět se vyskytuje veliký rozptyl mezi jednotlivými odpory s rozdílem mezi minimy a maximy na jednotlivých deskách. Průměrné hodnoty na deskách se stejným tavidlem se však téměř shodují.

Z vizuálního hlediska na deskách nedošlo k žádným změnám. Vzhledem k tomu, že tato část stárnutí v klimatické komoře je bez přítomnosti napětí, nelze předpokládat růst dendritických struktur.

Na obrázku 7.2 je vyfocena deska s tavidlem Kester 979 T. Jak můžeme vidět, opravdu nedošlo k žádnému růstu dendritických struktur. Tavidlové zbytky obou tavidel vypadají identicky. Při pohledu na tento obrázku lze pozorovat tavidlové zbytky v podobě skvrn, podobných zaschlým kapičkám.



Obrázek 7.2 Pohled mikroskopem na desku 3

7.1.4 Druhá etapa stárnutí

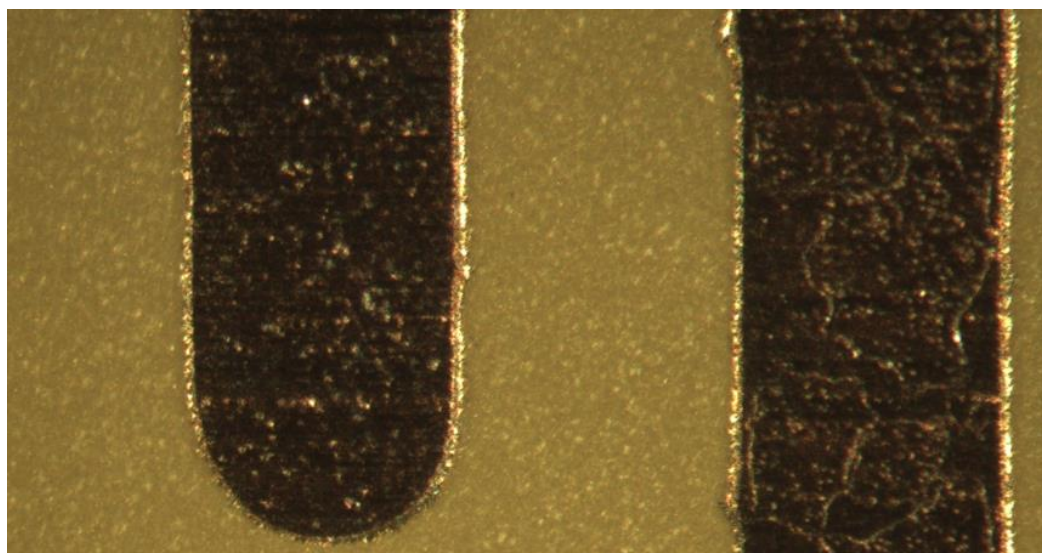
Testované DPS byly vráceny do klimatické komory, kdy byly opět vystaveny zvýšené teplotě a vlhkosti, navíc s připojeným napětím 30 V. Stárnutí v této etapě trvalo 72 h. Po uplynutí této doby byly desky opět aklimatizovány na pokojovou teplotu a byla provedena optická kontrola a měření povrchového izolačního odporu. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 7.3. Naměřená data jsou opět doplněna o vzorky bez tavidla.

Podle očekávání došlo k dalšímu poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně o dalších 25 % u kontrolních desek, o 70 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 67 % u tavidla Kester 979 T.

Tabulka 7.3 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]							
Tavidlo		žádné		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	I	II	1	2	3	4
A	1	0,8	0,8	1,2	2	0,65	1
	2	1,5	1	1	1,2	0,8	0,85
	3	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9	0,75
	4	0,03	0,7	0,95	1,4	0,85	1
B	1	0,6	1	1,1	1	1	0,9
	2	1	1	1,2	1,1	0,7	0,8
	3	0,8	0,6	0,9	1	0,85	1,2
	4	0,6	0,8	0,85	1,4	0,75	0,85
C	1	0,9	0,7	1,2	1,6	0,8	0,95
	2	1,5	0,6	1,4	1,4	0,9	0,75
	3	1	1,5	1,3	1,2	0,95	0,9
	4	0,7	0,9	1	1	0,85	1
Průměr desky		0,8	0,9	1,1	1,3	0,8	0,9
Průměr		0,9		1,2		0,9	

Optická kontrola pod mikroskopem neodhalila žádný růst dendritických struktur, i přestože bylo k deskám v průběhu stárnutí připojeno napětí 30 V. Co se tavidlových zbytků týče, hlavní rozdíl je, že dříve jasně viditelné stvrny (obrázek 7.2) jsou nyní mnohem méně výrazné (obrázek 7.3). Snížení jejich výraznosti se dá nejpravděpodobněji vysvětlit tak, že ve vlhkém a teplém prostředí klimatické komory došlo k jejich rozpuštění a rozprostření po povrchu desky.



Obrázek 7.3 Pohled mikroskopem na desku 3

7.2 Desky s povrchovou úpravou SAC305

7.2.1 Očištěné desky

Všechny čtyři testovací DPS bylo opět potřeba očistit. Kvůli tomu, že desky již prošly pájecím procesem, a to s agresivním tavidlem, bylo třeba provést mnohem důkladnější čištění než v případě desek bez povrchových úprav. Desky byly nejprve základně očištěny pomocí přípravku FLUX REMOVER firmy DCT, následně byly čištěny kartáčem v roztoku teplé vody a saponátu, pak opláchnuty čistou teplou vodou. Takto předčištěné desky byly následně očištěny pomocí bezvlákné textilie a izopropylalkoholu, následně byly opláchnuty v demineralizované vodě a nakonec vysušeny v sušárně. Tento proces by měl zajistit to, že se na povrchu desek bude vyskytovat jen minimální množství iontů. Na takto očištěných deskách byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulky 7.4.

Tabulka 7.4 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	55	30	34	44
	2	32	48	35	30
	3	50	38	50	36
	4	44	36	28	62
B	1	18	40	55	38
	2	75	32	48	38
	3	42	20	44	48
	4	46	32	22	38
C	1	65	46	36	24
	2	48	55	38	46
	3	36	30	36	32
	4	32	34	34	42
Průměr desky		45,3	36,8	38,3	39,8
Průměr		41,0		39,1	

Z tabulky 7.4 vyplývá, že povrchový izolační odpor na očištěných deskách se pohybuje opět okolo $40 \cdot 10^{13} \Omega$. Budeme-li brát v potaz pouze aritmetické průměry na jednotlivých obrazcích, jsou naměřené hodnoty relativně konzistentní. Rozdílem mezi nejnižším a nejvyšším odporem naměřeném na obrazech (22 resp. $75 \cdot 10^{13} \Omega$) je 70,6 %. To lze očekávat vzhledem k tomu, že je celý proces prováděn ručně a nelze tak zajistit dokonalou reprodukovatelnost. Podíváme-li se ovšem na průměrné hodnoty naměřené na celých deskách, tak rozdíl mezi extrémy již není tak velký, konkrétně pouze 4,6 %. Naměřené hodnoty jsou prakticky identické jako v případě desek bez povrchové úpravy a v případě celkových průměrů ještě lepší. Z toho lze usoudit, že byly očištěny dostatečně.

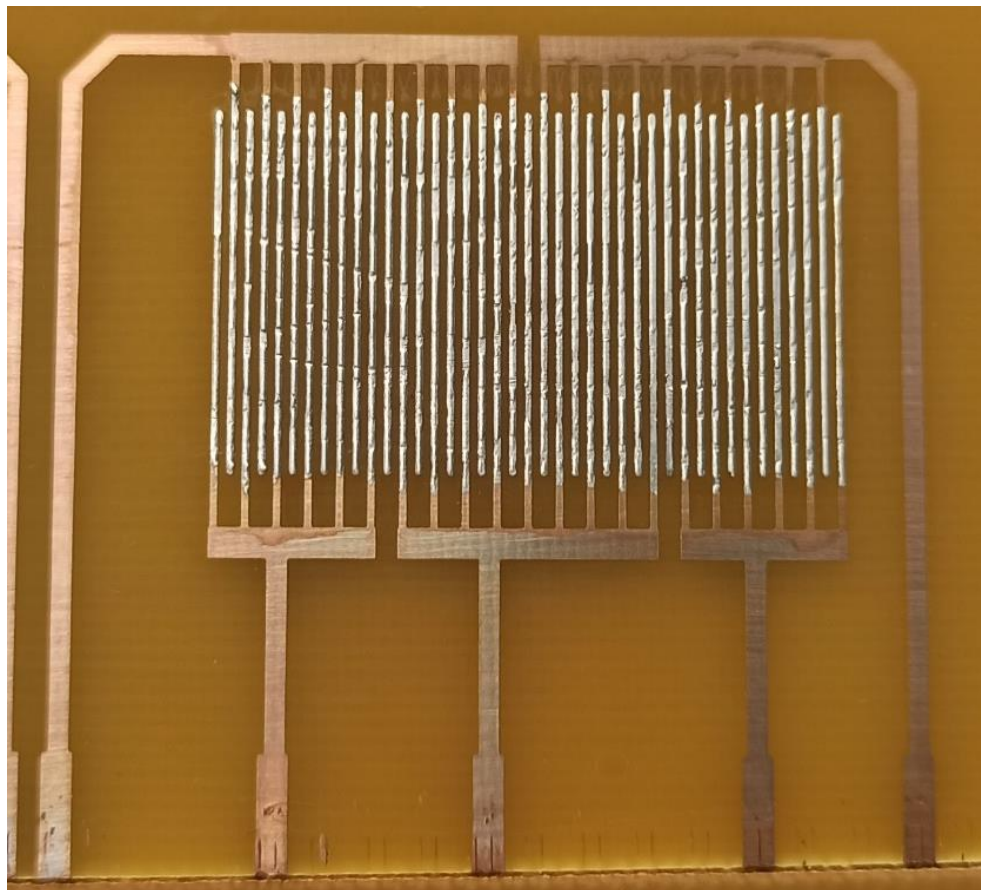
7.2.2 Aplikace a aktivace tavidla

Aplikace tavidla proběhla identicky jako u desek bez povrchové úpravy. Rozdíl byl ovšem v aktivaci tavidla. Ta nemohla proběhnout v přetavovací peci za použití teplotního profilu pro bezolovnaté slitiny, protože by došlo k dalšímu přetavení. Testovaná VOC-free tavidla jsou mnohem méně agresivní než tavidla používaná na tvorbu povrchových úprav pájecími slitinami a pokud by došlo k dalšímu přetavení s testovanými tavidly, hrozilo by poškození homogenity povrchové úpravy.

Aktivace tedy proběhla v sušárně, kde byly desky s naneseným tavidlem vystaveny $200 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 5 minut, tato doba a teplota by měly být více než dostatečné ke kompletní aktivaci tavidla.

Měření po aktivaci tavidla vykázalo stejné výsledky jako v případě desek bez

povrchové úpravy. Ve všech případech byl odpor vyšší než rozsah megaohmmetru, tedy vyšší než $100 \cdot 10^{13} \Omega$. Tento výsledek ukazuje, že opravdu došlo alespoň k obdobné aktivaci tavidel jako při průchodu přetavovací pecí.



Obrázek 7.4 Příklad desky s povrchovou úpravou SAC305 pokrytou tavidlovými zbytky (deska 1, obrazec B)

Jak můžeme vidět na obrázku 8.4, přítomnost tavidlových zbytků se projevila tak, že došlo ke ztrátě lesku povrchové úpravy. Na částech desky bez povrchové úpravy je opět jasně vidět, v jakých místech byl obrazec pokryt tavidlem. V této fázi experimentu nebyl mezi tavidly pozorován žádný rozdíl.

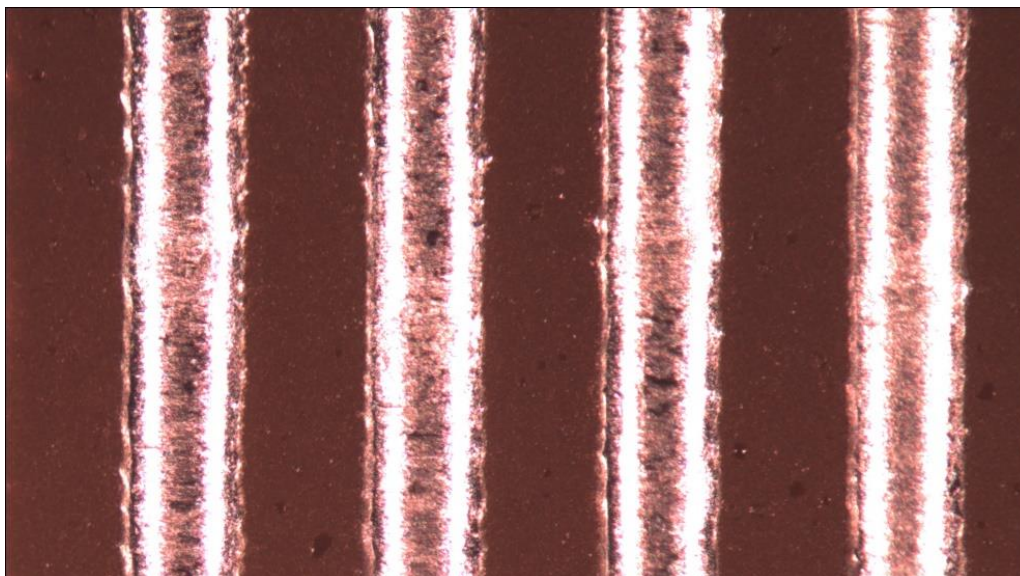
7.2.3 První etapa stárnutí

V této etapě byly všechny desky umístěny do klimatické komory na dobu 24 hodin. Teplota v komoře byla $35 \text{ }^\circ\text{C}$ a vzdušná vlhkost 90 %. Po 24 hodinách byly desky vytaženy a po aklimatizaci byly podrobeny optické kontrole pod mikroskopem a byl jim změřen povrchový izolační odpor. Naměřený odpor je zapsán v tabulce 7.5.

Tabulka 7.5 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Tavidlo		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	5	2,4	1,9	3
	2	3,6	6	5	1,5
	3	3,2	5	2,8	2,8
	4	2,6	5	3,2	3,6
B	1	4	4	1,5	2,6
	2	6	4,2	4	2
	3	4,8	5	4,5	4,5
	4	3,6	6	2,4	2,4
C	1	2,8	3,8	2,4	3,4
	2	4,4	5	3,6	2
	3	4	4,4	3,6	2,4
	4	2,4	3,2	2,2	3,2
Průměr desky		3,9	4,5	3,1	2,8
Průměr		4,2		2,9	

Podle očekávání došlo ke značnému poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně o 89,8 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 92,6 % u tavidla Kester 979 T. Pohled pod mikroskopem neukázal nic kromě bližšího pohledu na tavidlové zbytky. Ty je však velmi obtížné pozorovat, a to kvůli velkému lesku povrchové úpravy, která komplikuje vhodné nasvětlení desky. Také v tomto případě vypadaly tavidlové zbytky obou tavidel identicky. Příklad můžeme vidět na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5 Pohled mikroskopem na desku 2

7.2.1 Druhá etapa stárnutí

Testované DPS byly vráceny do klimatické komory, kde byly opět vystaveny zvýšené teplotě a vlhkosti, navíc s připojeným napětím 30 V. Stárnutí v této etapě trvalo 72 h. Po uplynutí této doby byly desky opět aklimatizovány na pokojovou teplotu a byla provedena optická kontrola a měření povrchového izolačního odporu. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 7.6.

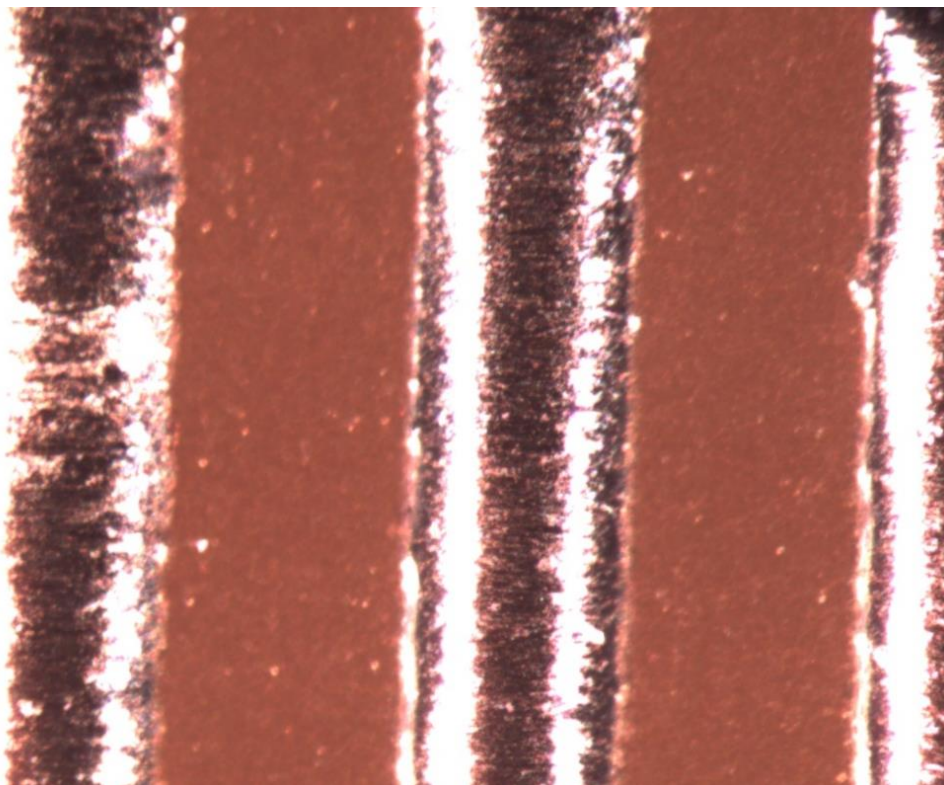
Tabulka 7.6 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Tavidlo		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	1,4	1	0,9	0,7
	2	1,1	1,2	0,65	0,75
	3	0,9	0,95	0,6	1
	4	0,95	1,6	0,55	0,8
B	1	0,9	0,85	0,9	0,65
	2	0,85	1,1	0,7	0,75
	3	1	1,4	0,95	1
	4	1,3	1	0,8	0,85
C	1	1,2	1,4	0,7	0,55
	2	1,3	1,3	0,75	0,7
	3	1,4	0,65	0,65	0,9
	4	0,85	0,8	0,45	0,85
Průměr desky		1,1	1,1	0,7	0,8
Průměr		1,1		0,75	

Podle očekávání došlo k dalšímu poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně o 73,8 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 72,4 % u tavidla Kester 979 T. Vzhledem k tomu, že v této etapě bylo k deskám připojeno napětí, dalo by se očekávat, že by mohlo dojít k růstu dendritických struktur. Optická kontrola pod mikroskopem to však neprokázala ani u jednoho z tavidel. Jak můžeme vidět na obrázcích 7.6 a 7.7.



Obrázek 7.6 Pohled mikroskopem na desku 2



Obrázek 7.7 Pohled mikroskopem na desku 3

7.3 Desky s povrchovou úpravou SN100C

7.3.1 Očištěné desky

Postup je identický jako v případě desek s povrchovou úpravou SAC305. Všechny čtyři testovací DPS bylo opět potřeba očistit. Kvůli tomu, že desky již prošly pájecím procesem, a to s agresivním tavidlem, bylo třeba provést mnohem důkladnější čištění než v případě desek bez povrchových úprav. Desky byly nejprve očištěny pomocí přípravku FLUX REMOVER firmy DCT, následně byly čištěny kartáčem v roztoku teplé vody a saponátu, pak opláchnuty čistou teplou vodou. Takto předčištěné desky byly následně očištěny pomocí bezvlákné textilie a izopropylalkoholu, následně byly opláchnuty v demineralizované vodě a nakonec vysušeny v sušárně. Tento proces by měl zajistit to, že se na povrchu desek bude vyskytovat jen minimální množství iontů. Na takto očištěných deskách byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou zapsány do tabulky 7.7.

Tabulka 7.7 Povrchový izolační odpor naměřený na očištěných deskách

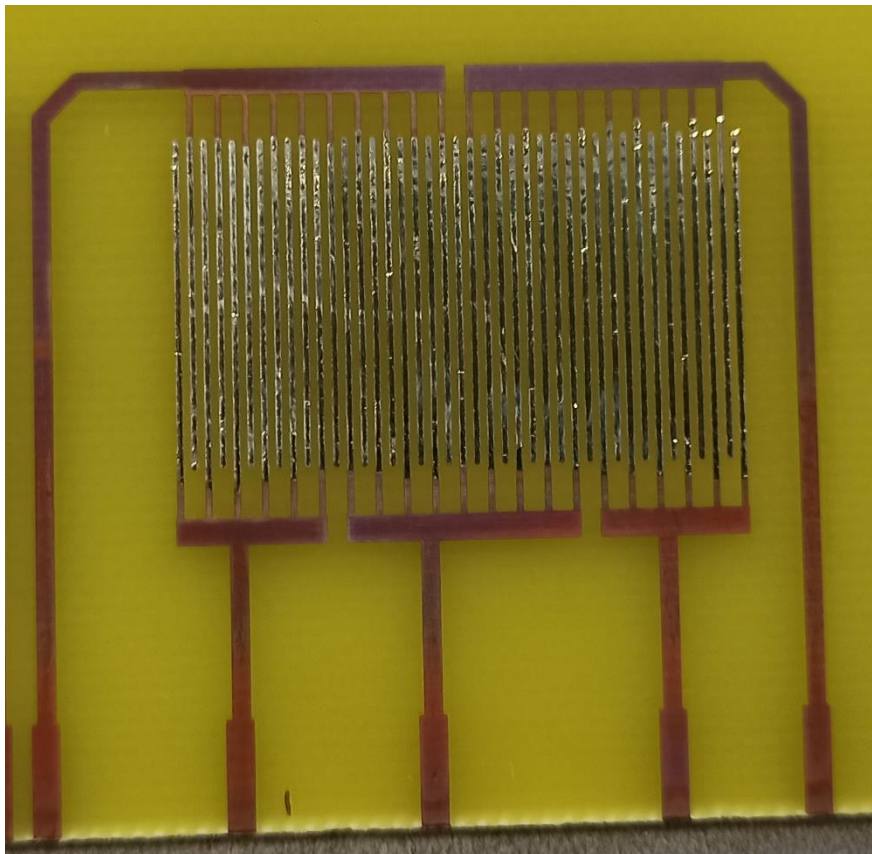
Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	42	55	38	55
	2	32	48	32	34
	3	55	36	48	48
	4	44	28	42	32
B	1	42	42	65	60
	2	34	36	55	46
	3	65	38	46	30
	4	18	42	42	28
C	1	32	24	32	44
	2	36	44	36	36
	3	48	36	40	38
	4	48	48	50	46
Průměr desky		41,3	39,8	43,8	41,4
Průměr		40,5		42,6	

Z tabulky 8.4 vyplývá, že povrchový izolační odpor na očištěných deskách se pohybuje opět okolo $40 \cdot 10^{13} \Omega$. Srovnáme-li naměřené hodnoty odporu, je již na první pohled patrný značný rozptyl v datech. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou odporu (18 a $65 \cdot 10^{13} \Omega$) je 72,4 %. To lze očekávat vzhledem k tomu, že je celý proces prováděn ručně a nelze tak zajistit dokonalou reprodukovatelnost. Podíváme-li se ovšem na průměrné hodnoty naměřené na celých deskách, rozdíl mezi extrémy již není tak velký, konkrétně pouze 9,1 %. Naměřené hodnoty jsou prakticky identické jako v případě desek bez povrchové úpravy a s povrchovou úpravou SAC305. Z toho lze usoudit, že byly očištěny dostatečně.

7.3.2 Aplikace a aktivace tavidla

Celý proces proběhl identicky jako v případě desek pokrytých povrchovou úpravou SAC305. Aktivace tedy proběhla v sušárně, kde byly desky s naneseným tavidlem vystaveny $200 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 5 minut, tato doba a teplota by měly být více než dostatečné ke kompletní aktivaci tavidla.

Měření po aktivaci tavidla vykázalo stejné výsledky jako v předchozích případech. Ve všech případech byl odpor vyšší než rozsah megaohmmetru, tedy vyšší než $100 \cdot 10^{13} \Omega$. Tento výsledek ukazuje, že opravdu došlo alespoň k obdobné aktivaci tavidel jako při průchodu přetavovací pecí.



Obrázek 7.8 pohled na desku 4, obrazec B po aktivaci tavidla Kester 979 T

Na obrázku 7.8 můžeme pozorovat desku po aktivaci tavidla Kester 979 T. Na povrchové úpravě se tavidlové zbytky opět projevily snížením lesklosti povrchu stejně jako tomu bylo v případě desek se slitinou SAC305. Na měděných cestách můžeme opět pozorovat matný tmavě červený zoxidovaný povrch v místech, kde tavidlo aplikováno nebylo. V místech, kde tavidlo aplikováno bylo, byla koroze opět omezena a tyto části desky jsou světlejší a méně matné.

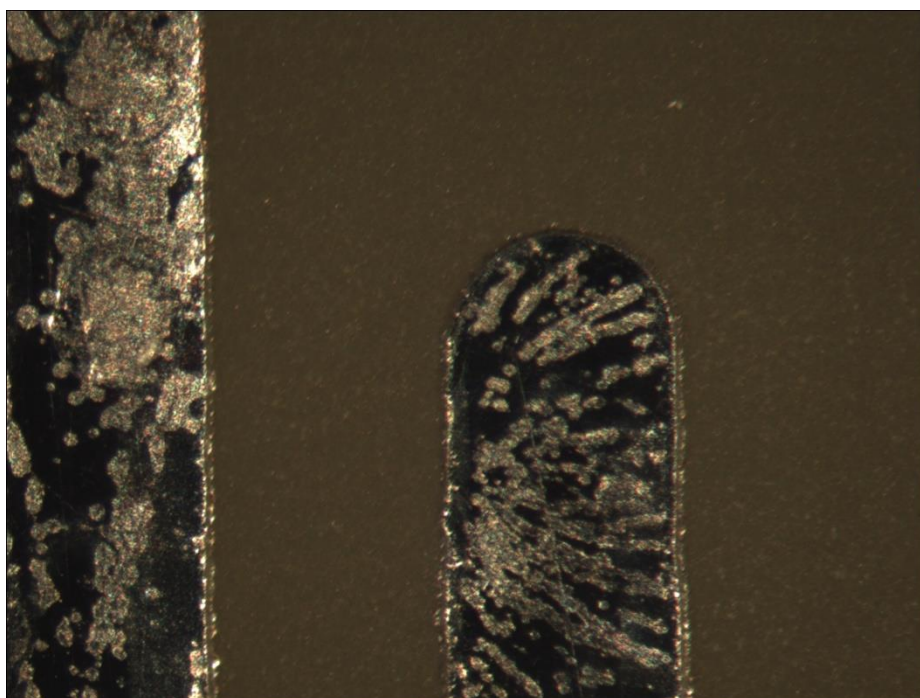
7.3.3 První etapa stárnutí

V této etapě byly všechny desky umístěny do klimatické komory na dobu 24 hodin. Teplota v komoře byla $35 \text{ }^\circ\text{C}$ a vzdušná vlhkost 90 %. Po 24 hodinách byly desky vytaženy a po aklimatizaci byly podrobeny optické kontrole pod mikroskopem a byl jim změřen povrchový izolační odpor. Naměřený odpor je zapsán v tabulce 7.8.

Tabulka 7.8 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po první etapě stárnutí

Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Tavidlo		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	4,6	6	2,8	2,4
	2	4,4	2,8	3,2	3,4
	3	5	3	3,6	3,2
	4	3,2	4,2	2,4	2,8
B	1	2	5	3,2	3
	2	3,6	2,4	2,4	1,8
	3	4,2	4,2	3,4	5
	4	6	4,8	2,6	4,2
C	1	4,8	3,6	1,5	4,2
	2	4,6	3,2	3	2,8
	3	2,6	4,6	2,8	2,6
	4	3,6	5	3,4	3
Průměr desky		4,1	4,1	2,9	3,2
Průměr		4,1		3,0	

Podle očekávání došlo ke značnému poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně o 89,9 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 92,9 % u tavidla Kester 979 T. Pohled pod mikroskopem ukázal bližší pohled na tavidlové zbytky. Lesk povrchové úpravy SN100C je oproti SAC305 nižší, je tedy jednodušší tavidlové zbytky pozorovat. Zbytky obou tavidel vypadaly opět identicky a jejich typický vzhled můžeme pozorovat na obrázku 7.9. Na levé straně můžeme vidět skvrny tavidlových zbytků připomínajících skvrny na deskách bez povrchové úpravy (obrázek 7.2). Kromě těchto skvrn připomínajících zaschlé kapičky se místy objevily také svrny ve tvaru řas, což můžeme pozorovat na straně pravé. To vypovídá o tom, že se tavidlo po povrchu s pájkou SN100C místy roztékalo jiným způsobem než po čisté mědi desek bez povrchové úpravy. To se dá očekávat vzhledem k tomu, že povrch byl v tomto případě méně rovinný a homogenní.



Obrázek 7.9 Pohled pod mikroskopem na desku 2 obrazec B

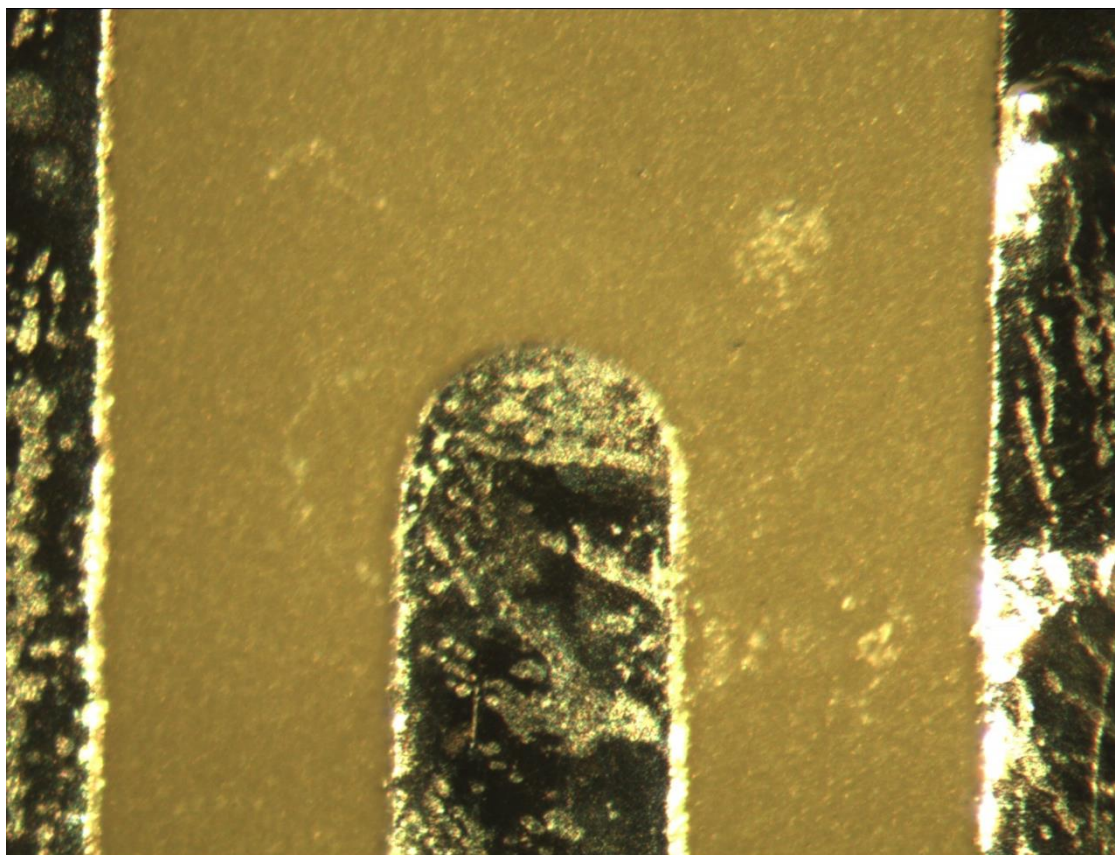
7.3.4 Druhá etapa stárnutí

Testované DPS byly vráceny do klimatické komory, kdy byly opět vystaveny zvýšené teplotě a vlhkosti, navíc s připojeným napětím 30 V. Stárnutí v této etapě trvalo 72 h. Po uplynutí této doby byly desky opět aklimatizovány na pokojovou teplotu a byla provedena optická kontrola a měření povrchového izolačního odporu. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 7.9.

Podle očekávání došlo k dalšímu poklesu povrchového izolačního odporu, a to konkrétně o 73,2 % u desek s tavidlem Pacific 2009 mlf a o 70 % u tavidla Kester 979 T. Vzhledem k tomu, že v této etapě bylo k deskám připojeno napětí, dal by se očekávat růst dendritických struktur. Optická kontrola pod mikroskopem to však neprokázala ani u jednoho z tavidel. Jak můžeme vidět na obrázcích 7.10, na povrchu desky je však stále možné pozorovat skvrny tavidlových zbytků.

Tabulka 7.9 Povrchový izolační odpor naměřený na deskách po druhé etapě stárnutí

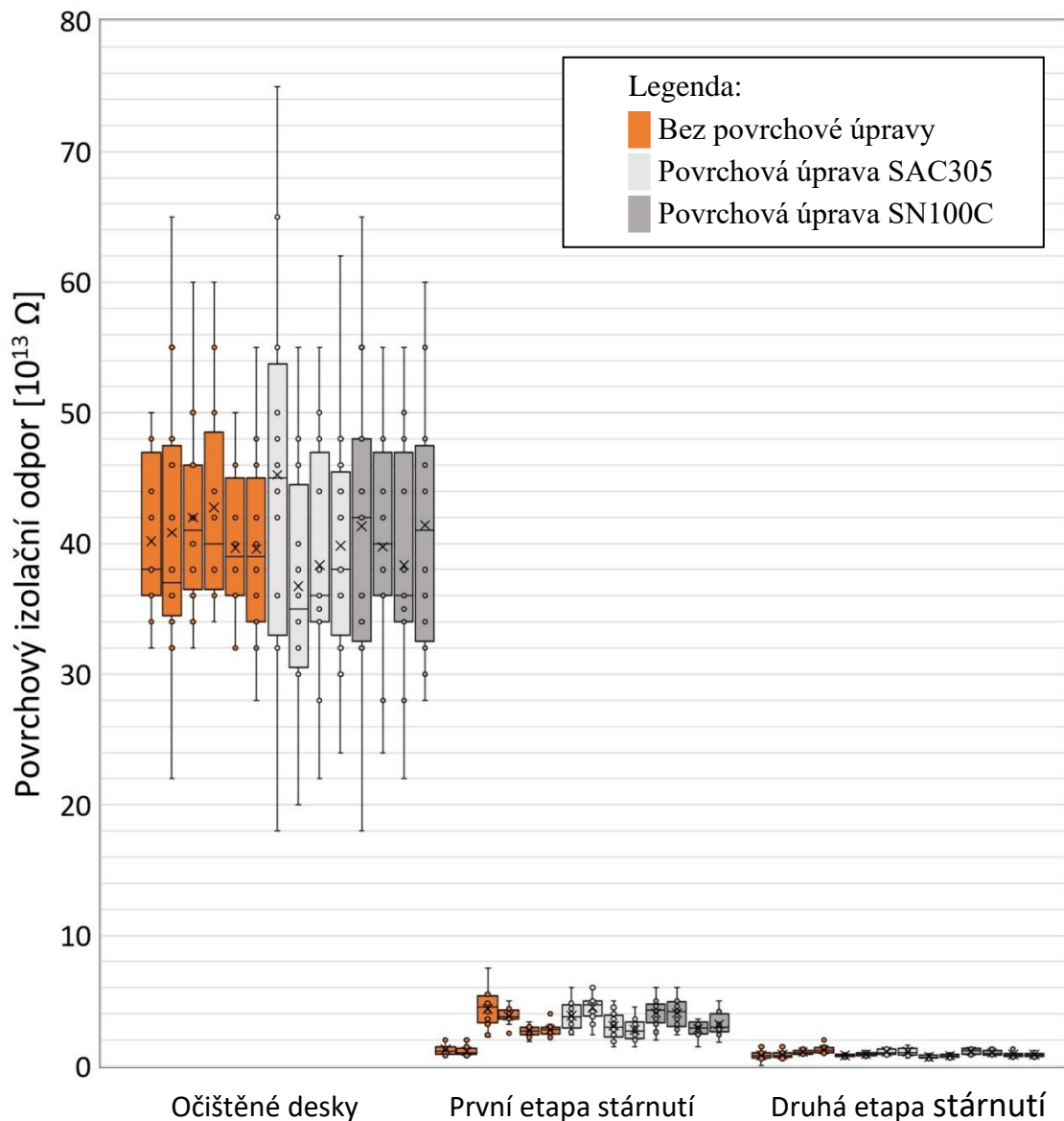
Povrchový izolační odpor [$10^{13} \Omega$]					
Tavidlo		Pacific 2009 mlf		Kester 979 T	
Obrazec	Hřebínek/deska	1	2	3	4
A	1	1,2	1,3	0,65	0,65
	2	1,4	1,1	0,9	0,75
	3	0,8	0,9	0,8	1
	4	0,95	0,95	0,75	0,85
B	1	0,85	0,85	1	0,9
	2	1,4	1,4	0,7	0,7
	3	1,2	1,1	0,85	0,95
	4	1,3	0,8	0,9	0,8
C	1	0,9	1,2	1,3	0,95
	2	0,95	0,95	0,85	0,7
	3	1,3	1	0,9	0,95
	4	1,4	0,85	1	1,2
Průměr desky		1,1	1,0	0,9	0,9
Průměr		1,1		0,9	



Obrázek 7.10 Pohled pod mikroskopem na desku 2 obrazec B

8. ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

Naměřená data, která jsou zobrazena a komentována výše, vykazují velký rozptyl. Srovnávat vliv tavidel a povrchových úprav pouze z průměrů by tedy nemuselo být dostatečné. Pro lepší přehlednost byla tedy všechna naměřená data vložena do krabicového grafu na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 Všechna naměřená data povrchových izolačních odporů

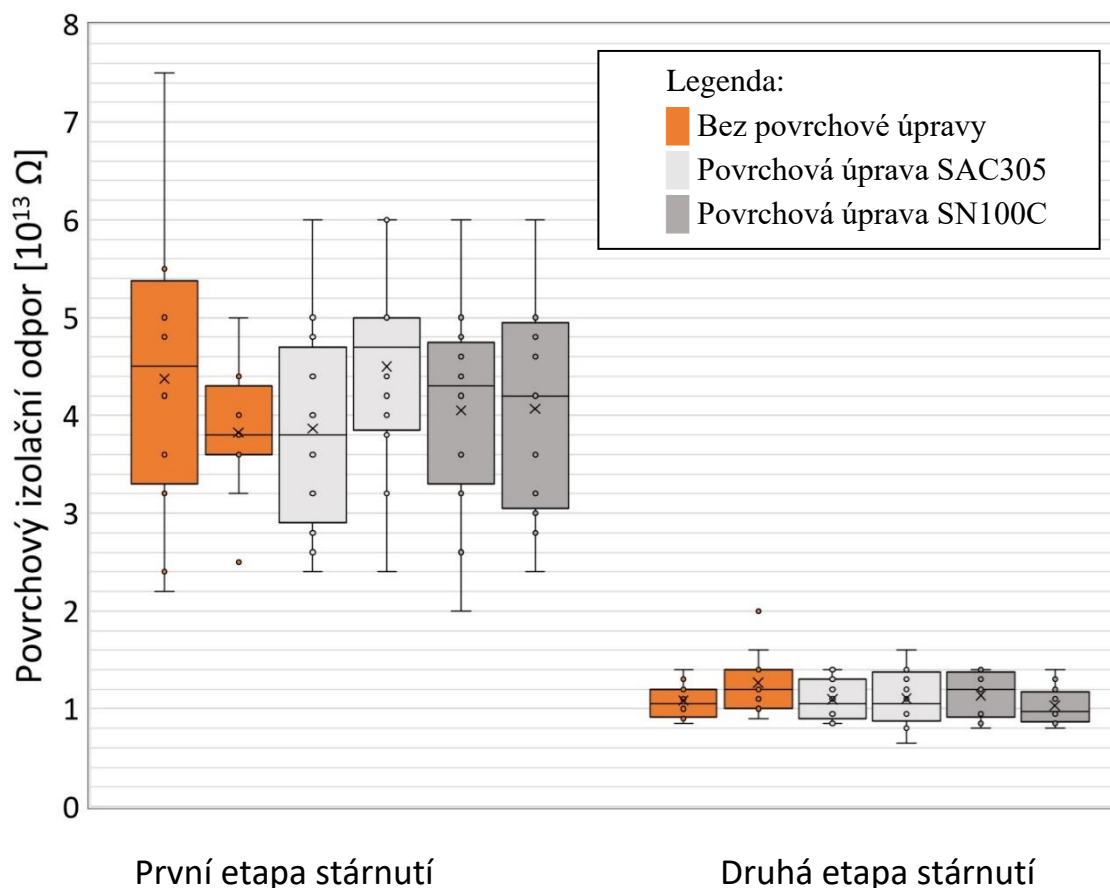
Jednotlivé desky jsou v grafu barevně odlišeny podle povrchové úpravy, oranžový pro desky bez povrchové úpravy, světle šedá pro SAC305 a tmavší šedá pro SN100C. Desky dále seřazeny podle použitého tavidla. Bráno zleva doprava jsou první dvě

desky bez tavidla, druhé dvě s tavidlem Pacific 2009 mlf a poslední dvě s tavidlem Kester 979 T. Analogicky je tomu u desek s povrchovou úpravou s tím rozdílem, že pro povrchové úpravy nebyly vyrobeny kontrolní vzorky bez tavidla.

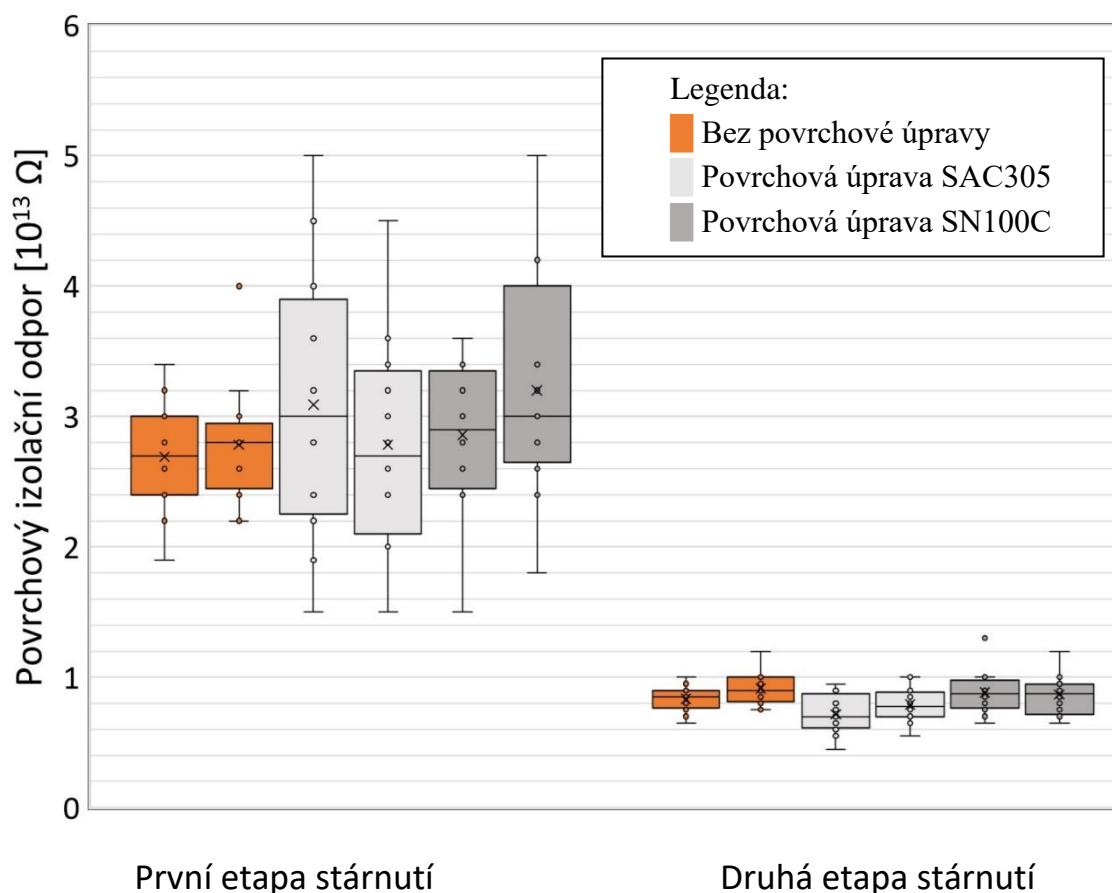
Z grafu vyplývá, že povrchový izolační odpor na očištěných deskách je i přes značný rozptyl prakticky identicky. Průměr mezi všemi deskami v očištěném stavu je $40,8 \cdot 10^{13} \Omega$. Tato hodnota bude považována za výchozí stav a pokles povrchového izolačního odporu budu srovnáván proti ní. Graf také ukazuje pokles odporu již při první etapě stárnutí v klimatické komoře. Tento odpor je o tolik menší, že z tohoto grafu lze jen těžko srovnávat vliv tavidel a povrchových úprav.

8.1 Srovnání povrchových úprav

Pro srovnání povrchových úprav a zjištění jejich vlivu na povrchový izolační odpor byly vytvořeny dva grafy. V těchto grafech jsou zobrazeny naměřené hodnoty z desek, mezi nimiž byla jediným rozdílem povrchová úprava. Na prvním grafu na obrázku 8.2 jsou zobrazena data neměřená s tavidlem Pacific 2009 mlf, na druhém grafu na obrázku 8.3 jsou desky s tavidlem Kester 979 T.



Obrázek 8.2 Srovnání povrchových úprav na vzorcích s tavidlem Pacific 2009 mlf

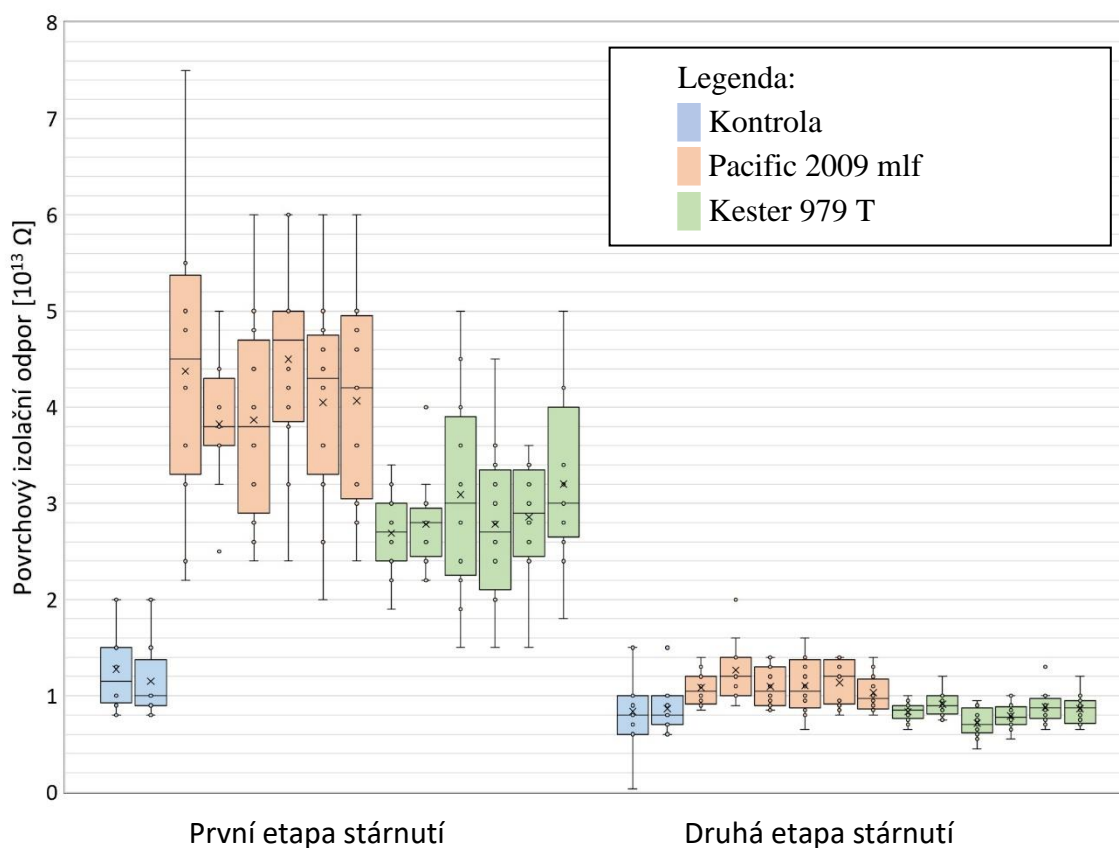


Obrázek 8.3 Srovnání povrchových úprav na vzorcích s tavidlem Kester 979 T

Z grafů na obrázcích 8.2 a 8.3 nelze vyčíst žádný vliv povrchové úpravy. Naměřené hodnoty se sice neshodují přesně, ovšem když budeme srovnávat také rozptyly mezi povrchovými úpravami a mědí, tak se tyto rozptyly z většiny překrývají. To šlo očekávat při srovnání slitin SAC305 a SN100C, protože jsou si složením velmi podobné s majoritním prvkem cínem. Avšak měření neprokázalo rozdíl ani mezi měděnými deskami a deskami pokrytých pájecí slitinou. Pro srovnání vlivu tavidla na povrchový izolační odpor v další části nebude na povrchové úpravy brán zřetel.

8.2 Srovnání tavidel Pacific 2009 mlf a Kester 979 T

Jak je napsáno výše, nebyl prokázán vliv povrchové úpravy na povrchový izolační odpor. Ve srovnání tavidel je tedy povrchová úprava ignorována a srovnávají se pouze jednotlivá tavidla Pacific 2009 mlf a Kester 979 T, jak proti sobě, tak proti kontrolnímu vzorku bez tavidla.



Obrázek 8.4 Srovnání tavidel a kontrolních vzorků

Obě etapy stárnutí a barevně odlišenými tavidly můžeme vidět na grafu na obrázku 8.4. Kontrolní vzorky jsou označeny modře, tavidlo Pacific 2009 mlf je označeno oranžově a tavidlo Kester 979 T je označeno zeleně.

8.2.1 První etapa stárnutí

Hned v první etapě stárnutí (24 h) si můžeme povšimnout toho, že kontrolní vzorky bez tavidla vykazují mnohem menší povrchový izolační odpor než vzorky s oběma tavidly.

Toto se dá vyložit jediným způsobem, a to tak, že přítomnost tavidlových zbytků na povrchu desek zvyšuje povrchový izolační odpor. Toto by bylo velmi překvapivé u většiny tavidel. Ovšem v tomto experimentu použitá tavidla jsou výrobci označena jako no clean, čímž výrobce deklaruje, že jejich tavidlové zbytky by neměly kompromitovat povrch desek a nemělo by být třeba je čistit.

Srovnáme-li mezi sebou obě tavidla, je jasně vidět, že tavidlo Pacific 2009 mlf obstálo v testu lépe než tavidlo Kester 979 T, u kterého byl naměřen nižší odpor na povrchu desek. Tento rozdíl lze vysvětlit složením tavidel, konkrétně kyselostí. Jak je již zmíněno výše, Pacific 2009 mlf má nižší kyselost (25 mg KOH/g) oproti vyšší kyselosti tavidla Kester 979 T (40 mg KOH/g). U tavidla s vyšší kyselostí se dá počítat

s vyšší iontovou aktivitou tavidlových zbytků, a tím pádem také s nižším povrchovým izolačním odporem.

8.2.2 Druhá etapa stárnutí

Po druhé etapě stárnutí (72 h) se rozdíl mezi tavidly a kontrolním vzorkem zmenšil. Stále lze pozorovat stejné trendy jako v předchozí etapě, nejmenší povrchový izolační odpor má stále kontrolní vzorek, následován vzorky s tavidlem Kester 979T a nakonec vzorky s tavidlem Pacific 2009 mlf s nejvyšším odporem.

U kontrolního vzorku byl mezietapový pokles nejmenší. Po první etapě se pohyboval těsně nad $1 \cdot 10^{13} \Omega$, nyní po etapě druhé se odpor posunul těsně pod $1 \cdot 10^{13} \Omega$. K této hodnotě se však přiblížily také vzorky s oběma tavidly, konkrétně tavidlo Pacific 2009 mlf je těsně nad $1 \cdot 10^{13} \Omega$ a u tavidla Pacific 979 T těsně pod $1 \cdot 10^{13} \Omega$.

8.2.3 Mechanismy způsobující pokles povrchového izolačního odporu

Výše zmíněné změny povrchového izolačního odporu se dají vysvětlit třemi mechanismy.

Prvním mechanismem je navlhání povrchu desek. Jak je vysvětleno v teoretické části, zvyšování vlhkosti na povrchu desek vede ke zvýšení pohyblivosti iontů a tím také k poklesu povrchového izolačního odporu. Desky kontrolní bez tavidlových zbytků během první etapy (24 h) navlhly více než vzorky s tavidlovými zbytky. Z toho lze usuzovat, že tavidlové zbytky no clean tavidel navlhání omezují. Tento mechanismus je určitě zodpovědný za pokles odporu v první etapě stárnutí. Další velký pokles u vzorků s tavidlovými zbytky se dá tímto mechanismem rovněž vysvětlit. Vzhledem k delší době trvání druhé etapy (72 hodin) došlo také k většímu navlhnutí a schopnost tavidlových zbytků navlhání omezit se časem při zvýšené teplotě a vzdušné vlhkosti snížila.

Druhým mechanismem je ionizace tavidlových zbytků elektrickým polem. V druhé etapě stárnutí bylo na vzorky připojeno napětí 30 V. Vezmeme-li v úvahu šířku izolační mezery 380 μm , nachází se mezi sousedními vodivými cestami elektrické pole o intenzitě 790 V/cm. Toto elektrické pole by mohlo napomáhat rozkladu tavidlových zbytků, nebo jejich reakci s kovy tvořícími vodivé cesty. Toto by také vysvětlilo, proč během druhé etapy došlo u kontrolních vzorků jen k minimálnímu poklesu. Pokud je povrch očištěn a nenacházejí se na něm nečistoty, elektrické pole nemůže nic ionizovat.

Posledním mechanismem je náhodné zněčištění během měření odporů a optických inspekcí. Nelze vyloučit, že během manipulace desek došlo k jejich kontaminaci. Tento mechanismus je samozřejmě nežádoucí. V průběhu experimentu bylo dbáno a opatrnou manipulací, mírnou kontaminací povrchu však nelze vyloučit.

8.3 Pozorování růstu dendritů

Hlavním důvodem, proč se sleduje povrchový izolační odpor na deskách plošných spojů, je právě riziko růstu dendritických struktur mezi vodivými cestami na rozdílných potenciálech. Během základní doby mnou navrženého experimentu podle normy IPC-TM-650 2.6.3.6. však žádný růst dendritů nenastal, a to ani v náznaku či zárodcích, ani u kontrolních vzorků a ani u vzorků s no clean tavidly. Jak již bylo stanoveno výše v analýze změn povrchových izolačních odporů, i po skončení experimentu povrchový izolační odpor desek s tavidlovými zbytky neklesl pod odpor vzorků kontrolních. Při takto vysokém povrchovém izolačním odporu není základní doba stárnutí s připojeným napětím 72 hodin dostatečná.

Pro dostatečně důkladné srovnání slitin a tavidel by však bylo žádoucí, aby byl růst dendritů vyvolán. Proto byl původní test prodloužen. Byly vybrány desky, tak aby co nejlépe reprezentovaly celý vzorek se všemi kombinacemi povrchových úprav a tavidel. Vzhledem ke kapacitě klimatické komory mohly být dále vystaveny stárnutí jen 4 desky. Bylo rozhodnuto, že budou použity dvojice desek s povrchovou úpravou SAC305 a SN100C. Každá deska z dvojice byla pokryta tavidlovými zbytky jiného ze dvou tavidel.

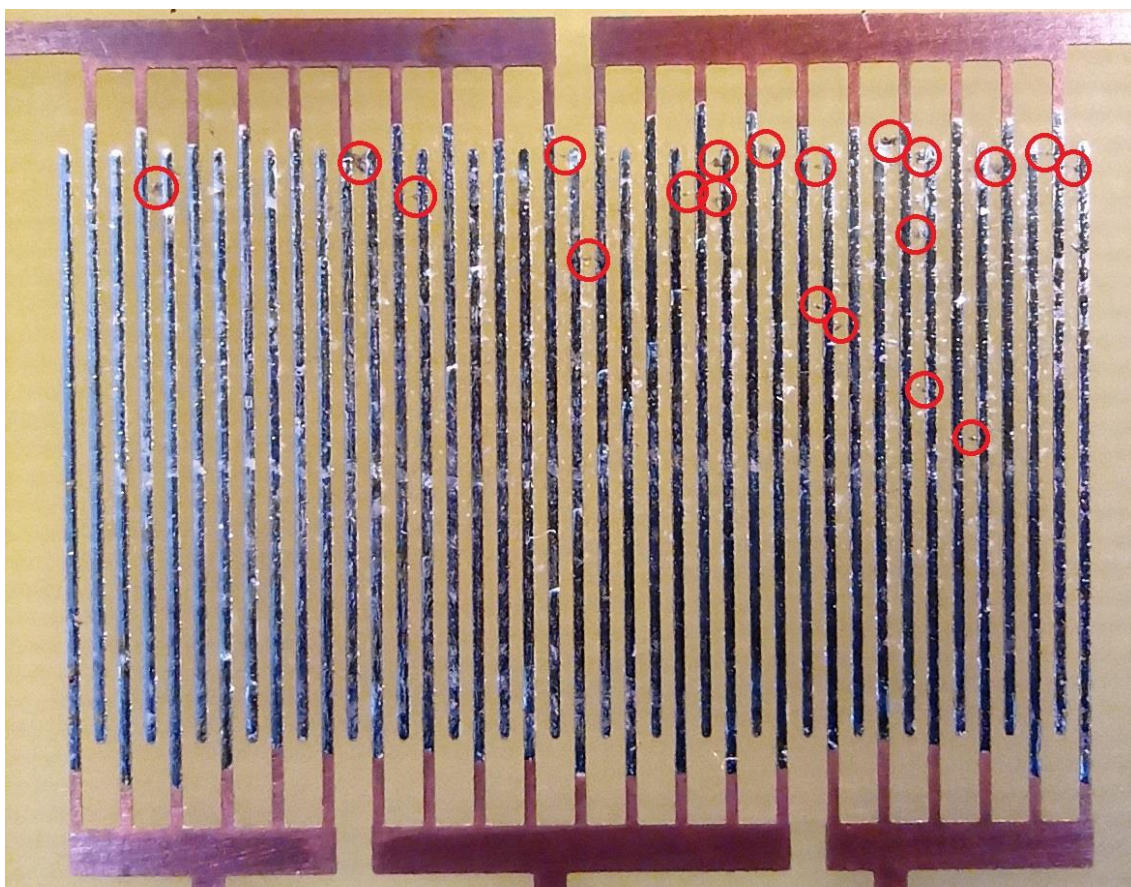
8.3.1 První etapa

Vybrané desky byly vráceny zpět do klimatické komory za identických podmínek jako v druhé etapě původního experimentu, tedy 40 °C, relativní vzdušná vlhkost 90 % a napětí 30 V. Rozdílem byla doba stárnutí, která byla 96 hodin (celková doba původního experimentu). Po 96 hodinách byly desky podrobeny optické kontrole pod mikroskopem. Byly spočítány vzniklé dendrity a jejich počet byl zapsán do tabulky 8.1.

Tabulka 8.1 pozorovaný počet dendritů na deskách

Povrchová úprava	SAC305			SN100C		
	A	B	C	A	B	C
Tavidlo/obrazec						
Pacific 2009 mlf	0	0	0	0	0	0
Kester 979 T	0	0	0	20	0	0

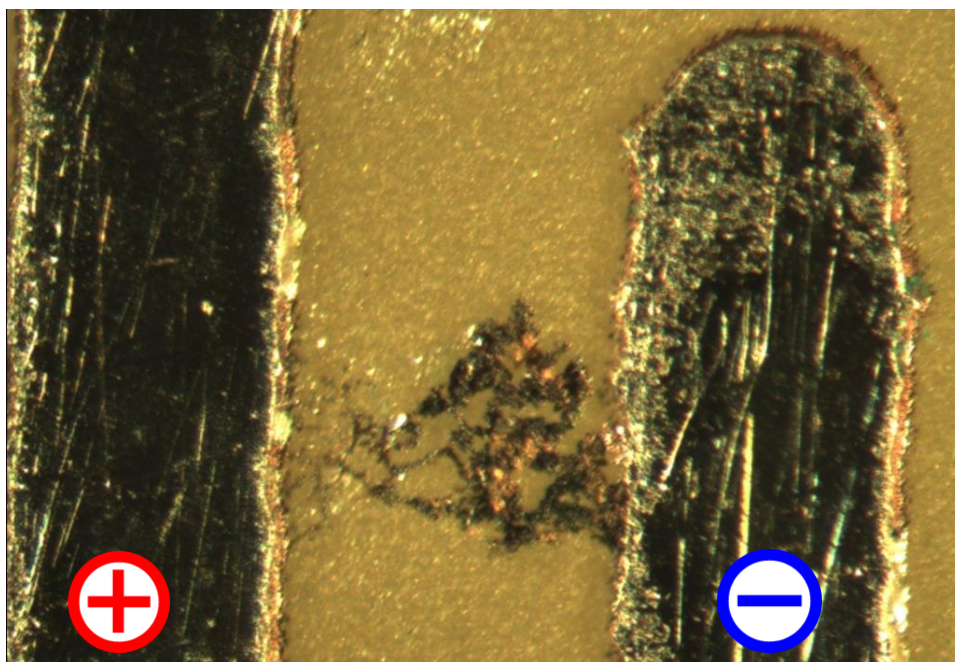
Překvapivě došlo k růstu dendritů pouze na jednom obrazci, konkrétně na obrazci A desky s tavidlem Kester 979 T a povrchovou úpravou SAC305. Fotografie tohoto obrazce s červěně zakroužkovanými dendrity můžeme vidět na obrázku 8.5



Obrázek 8.5 Obrazec A na desce s povrchovou úpravou SAC305 a tavidlem Kester 979 T

Vzhledem k tomu, že se dendrity objevily jen na jednom z 12 obrazců a nejsou na něm rovnoměrně rozmístěny, je pravděpodobné, že se jedná o důsledek kontaminace během manipulace při vracení desky do klimatické komory. Toto tvrzení však nelze potvrdit měřením povrchového izolačního odporu, protože se alespoň jeden dendrit nachází v každé měřitelné kombinaci a povrchový odpor tedy nelze změřit.

Bližší pohled na jeden z dendritů můžeme vidět na obrázku 8.6. Na obrázku je patrné, že dendrit roste z cesty na záporném potenciálu (katody) směrem k cestě na potenciálu kladném (anodě). Podle barvy dendritu lze soudit, že je tvořen jak mědí (oranžové části) z vodivé cesty, tak cínem (lesklé stříbrné části) z povrchové úpravy. Dendrit se zdá z velké části černý, to je však způsobeno úhlem nasvětlení pod mikroskopem. Části dendritu které se jeví šedé byly identifikovány jako cín, protože barevně odpovídají povrchové úpravě na vodivé cestě.



Obrázek 8.6 Dendrit na obrazci A na desce SN100C a Kester 979 T

8.3.2 Druhá etapa

Z důvodu možné kontaminace byla tato deska z dalšího testování odebrána. Zbylé tři byly vráceny do klimatické komory a stárnutí se opakovalo. Po dalších 96 hodinách byly desky opět podrobeny optické kontrole a byly spočítány vzniklé dendrity. Jejich počet byl zapsán do tabulky 8.2.

Tabulka 8.2 pozorovaný počet dendritů na deskách

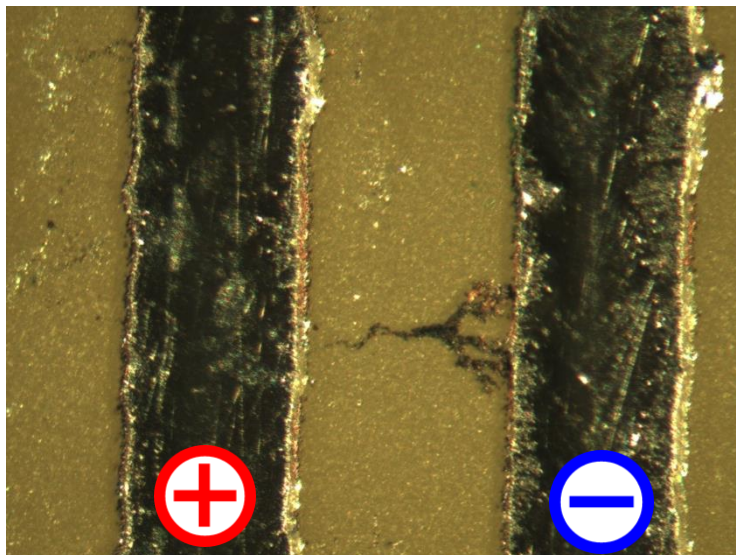
Povrchová úprava	SAC305			SN100C		
	a	b	c	a	b	c
Tavidlo/obrazec	a	b	c	a	b	c
Pacific 2009 mlf	3	0	3	2	3	1
Kester 979 T	5	6	1	x	x	x

V tomto případě na jednotlivých obrazcích byl počet vzniklých dendritů v nízkých jednotkách. Ve všech případech byly dendrity náhodně rozmístěny po obrazci a je tedy nepravděpodobné, že jejich růst byl způsoben lokální kontaminací, jak tomu bylo u výše zmíněné desky.

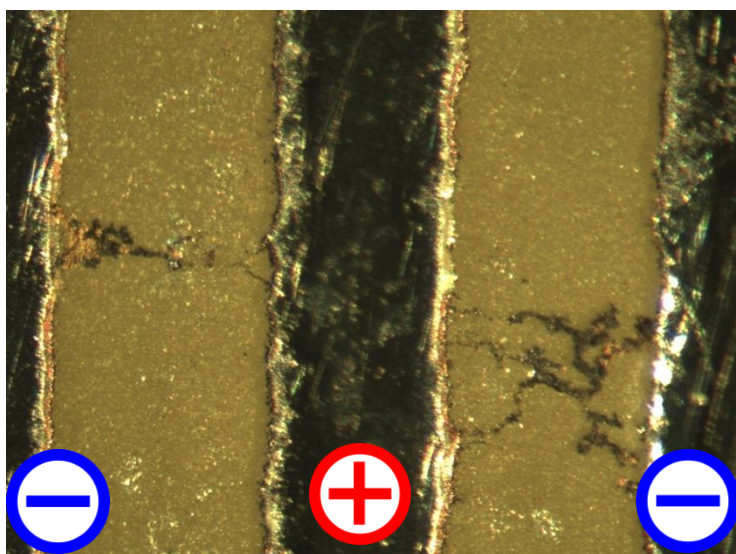
Růst dendritů byl na obou povrchových úpravách i tavidlech srovnatelný, to odpovídá výsledkům měření povrchového izolačního odporu. Ani pozorování růstu dendritů neodhalilo prokazatelný rozdíl mezi tavidly a ani mezi povrchovými úpravami.

Dva případy dendritů vzniklých v této etapě jsou zobrazeny na obrázcích 8.7 a 8.8. Na obrázku 8.7 a v levé části obrázku 8.8 jsou dendrity v první fázi růstu, tyto dendrity zatím nepřerostly skrz celou izolační mezeru a ještě nedošlo ke zkratu. V pravé

části obrázku 8.8, můžeme pozorovat dendrit rozvětvený. Z obrázku je patrné, že již několikrát přerostl skrz celou izolační mezeru a došlo ke zkratu. Zkratový proud dendritem způsobil přepálení nejtenčí části dendritu a jeho rozvětvení od místa kde k přepálení došlo.



Obrázek 8.8 Dendrit na obrazci B na desce SN100C a Pacific 2009 mlf



Obrázek 8.7 Dendrit na obrazci B na desce SN100C a Pacific 2009 mlf

I přesto, že tento test nepřinesl žádná hodnotná data o testovaných tavidlech a povrchových úpravách, byl užitečný pro stanovení rámce testování růstu dendritů po aplikaci no clean tavidel. Základní doba (24 h + 72 h) pro testování elektromigrace stanovena normou IPC-TM-650 2.6.3.6. je pro testování růstu dendritů nedostatečná a čas stárnutí bylo potřeba ztrojnásobit, než k růstu dendritů spolehlivě dojde.

9. ZÁVĚR

V teoretické části byla shrnuta problematika elektromigrace se zaměřením na elektromigraci elektrolytickou. Byly rozebrány její principy, mechanismy a vliv různých podmínek na její průběh. Dále byly popsány vlastnosti, složení a použití tavidel. Konkrétně pak byly zpracovány vlastnosti tavidel Pacific 2009 mlf a Kester 979 T.

Byla navržena metodika měření vlivu elektromigrace tavidlových zbytků na povrchový odpor desek plošných spojů. Metodika byla navržena podle normy IPC-TM-650 2.6.3.6. zabývající se touto problematikou.

V praktické části byly vyrobeny čtyři testovací desky také odpovídající normě IPC-TM-650 2.6.3.6. pro měření v další části této práce. Na vyrobených deskách byly měřeny rozměry vodivých cest a izolačních mezer. Ty se průměrně odchylovaly od požadovaných 0,38 mm o pouhých 1,6 %. Maximální naměřená odchylka byla na nejširší mezeře a to 6 %. Během konzultací s vedoucím práce bylo stanoveno, že přijatelná odchylka je do 10 %, což výrobní proces splňuje. Proces je tedy pro účely této práce dostatečně přesný a reprodukovatelný.

Byl sestaven měřící aparát sestávající z megaohmetru, stínící krabice, koaxiálních kabelů a krokosvork. Při použití stínící krabice je možné využít celého rozsahu megaohmetru tedy $10^{14} \Omega$. Měření obrazce je však potřeba přepojovat ručně a tento proces je zdlouhavý.

Proběhl pokus o konstrukci vylepšení měřící soustavy, která měla za úkol urychlit měření. Byla zkonstruována patice pro uchycení testovacích desek a stíněná přepínací krabička pro rychlejší přepínání měřených obrazců na desce. Bohužel tento pokus skončil neúspěšně, a to z důvodu svodu na použitých přepínačích. Svod těchto přepínačů je řádově $10^{12} \Omega$, což je zhruba 10x méně než odpory, které je potřeba měřit. V současné době tedy nelze přepínací krabičku použít, protože se nepodařilo nalézt přepínače s potřebnými izolačními vlastnostmi.

Metodika, která byla navržena podle normy IPC-TM-650 2.6.3.6., byla alikována na 14 testovacích desek. 6 desek bez povrchové úpravy, 4 s povrchovou úpravou tvořenou pájecí slitinou SAC305 a 4 s povrchovou úpravou tvořenou pájecí slitinou SN100C. 2 desky bez povrchové úpravy byly ponechány bez tavidla jako kontrola. Ze zbylých čtveřic desek bylo vždy na dvě aplikováno tavidlo Pacific 2009 mlf a na zbylé dvě tavidlo Kester 979 T. Tato kombinace povrchových úprav a tavidel by měla umožnit srovnání jejich vlivu jak na povrchový izolační odpor, tak na růst dendritických struktur.

Měření povrchového izolačního odporu neprokázalo, že by na něj měly použité povrchové úpravy jakýkoliv vliv. Ve všech případech, kdy byly podmínky až na povrchovou úpravu identické, byly identické také naměřené hodnoty povrchového izolačního odporu.

Vliv tavidlových zbytků na povrchový izolační odpor již pozorován byl. Přítomnost tavidlových zbytků obou tavidel měla jasně pozorovatelný vliv a alespoň po první etapě stárnutí zvyšovala povrchový izolační odpor oproti kontrolním vzorkům. Po druhé etapě stárnutí s přítomností elektrického napětí již naměřené hodnoty u obou tavidel klesly velmi blízko k hodnotám kontrolních vzorků. Z toho lze usoudit že tavidlové zbytky použitých tavidel zpomalují navlhání povrchu DPS. Teprve kombinace delší doby v klimatické komoře se zvýšenou teplotou, vzdušnou vlhkostí a připojeným elektrickým napětím, způsobí stejný pokles povrchového izolačního odporu jako u vzorků bez tavidlových zbytků.

Drobný rozdíl byl zjištěn také mezi tavidly. V průběhu měření vykazovaly vzorky s tavidlem Pacific 2009 mlf vyšší povrchový izolační odpor než vzorky s tavidlem Kester 979 T. To lze vysvětlit tím, že tavidlo Kester 979 T obsahuje oproti tavidlu Pacific 2009 mlf více sušiny, má větší kyselost a celkově ho lze považovat za lehce agresivnější. To by vysvětlovalo vyšší vodivost tavidlových zbytků tohoto agresivnějšího tavidla.

Během základní doby experimentu vycházejícího z normy IPC-TM-650 2.6.3.6. nebyl pozorován žádný růst dendritických struktur mezi vodivými cestami testovacích desek.

Byly tedy vybrány 4 desky, tak aby byly pokryty všechny 4 kombinace obou povrchových úprav a obou tavidel. Vybrané desky byly vystaveny dalším stárnutím v klimatické komoře s připojeným elektrickým napětím. Ani po první etapě (96 hodinách) nedošlo k růstu dendritů na testovaných deskách, s výjimkou jednoho obrazce na kterém se dendrity objevily ve velkém množství. Vzhledem k jejich velkému počtu a nerovnoměrnému rozprostření po obrazci bylo usouzeno že se nejpravděpodobněji jedná o důsledek znečištění.

K rovnoměrnému růstu dendritů došlo až po druhé etapě (dalších 96 hodinách) stárnutí. Tyto dendrity se vyskytovaly rovnoměrně ve všech obrazcích všech 3 testovaných desek v počtu nízkých jednotek na obrazec. Ani v tomto experimentu tak nebyl pozorován rozdíl vlivu tavidel ani povrchových úprav.

I přesto, že prodloužení stárnutí nepřineslo informace o rozdílu mezi tavidly ani mezi povrchovými úpravami, jasně ukazuje že základní doba testu podle normy IPC-TM-650 2.6.3.6. je nedostatečná pro testování tavidel typu no clean. Pokud je při testu kladen důraz na sledování růstu dendritů, je dobu stanovenou normou třeba prodloužit 3x než k růstu dendritů u těchto tavidel dojde.

LITERATURA

- [1] KRUMBEIN, S.J. Metallic electromigration phenomena. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1988, 1988(11), 14.
Dostupné z: doi:10.1109/33.2957
- [2] ElektroMigrace v elektronice – Terminologie. DPS Elektronika od A do Z [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:42463/elektromigrace-v-elektronice-terminologie>
- [3] Modrá Twibright Ronja: jaké přetaktování vydrží LED?. ROOT.CZ [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/modra-twibright-ronja-jake-pretaktovani-vydrzi-led/>
- [4] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M., Montážní a propojovací technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Brno, 2015, 272s
- [5] HUMPTON, Giles a David M. JACOBSON. *Principles of Soldering*. 1. Ohio: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-792-6.
- [6] Improved Flux Reliability of Lead-Free Solder Alloy Solder Paste Formulated with Rosin and Anti-crack Resin for Automotive and Other High Reliability Applications [online]. 13 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.circuitinsight.com/pdf/improved_flux_reliability_lead_free_solder_alloy_ipc.pdf
- [7] ČSN EN ISO 9454-1: Tavidla pro měkké pájení – Klasifikace a požadavky. 1. 2018.
- [8] IPC J-STD-004B: Requirements for Soldering Fluxes. B. 2008.
- [9] Influence of Flux and Related Factors on Intermetallic Layer Growth within SAC305 Solder Joints [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/24/7909>
- [10] VOC free soldering flux PacIFic 2009MLF [online]. [cit. 2023-12-18]. Dostupné z: <https://interelectronic.hu/uploads/files/pacificmlf.pdf>
- [11] 979 Soldering Flux. Online. Dostupné z: https://www.kester.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/API/Entries/Download?Command=Core_Download&EntryId=48646&language=en-US&PortalId=0&TabId=96. [cit. 2024-05-06].
- [12] IPC-B-24: Surface Insulation Resistance Measurements: A Review of the Various SIR Parameters. 1996.
- [13] IPC-TM-650: TEST METHODS MANUAL. 2004.
- [14] IM6 Megaohmmeter [online]. [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: [http://bee.mif.pg.gda.pl/ciasteczkowypotwor/RE%20Radiometer%20Copenhagen/IM6%20Megohmmeter%20\(Manual\).pdf](http://bee.mif.pg.gda.pl/ciasteczkowypotwor/RE%20Radiometer%20Copenhagen/IM6%20Megohmmeter%20(Manual).pdf)