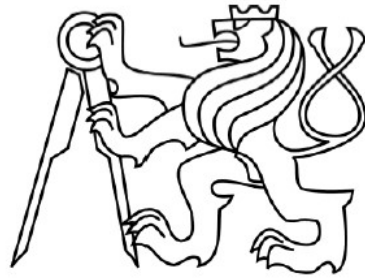


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pracoviště pro testování růstu dendritů
Workplace for testing of dendritic growth

Autor práce: Pavel Durst

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Studijní obor: Elektronika, energetika a management – Aplikovaná elektrotechnika

Akademický rok: 2016/2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Durst Jméno: Pavel Osobní číslo: 434732
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrotechnologie
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pracoviště pro testování růstu dendritů.

Název bakalářské práce anglicky:

Workplace for testing of dendritic growth

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s růstem dendritů a podmínkami, které tento růst zapříčiňují.
- 2) Připravte pracoviště pro testování růstu dendritů.
- 3) Růst dendritů na pracovišti experimentálně ověřte.
- 4) Výsledky experimentů vyhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1
[2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
[3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Dušek Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 17.02.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Pavel Durst

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost a trpělivost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Anotace:

Práce se bude věnovat seznámení s růstem dendritů a podmínkami, které tento růst zapříčiňují. Popisuje tvorbu experimentálního pracoviště pro testování růstu dendritů a experimentální ověření jeho funkčnosti.

Klíčová slova:

Elektrochemická migrace, růst dendritů, pájení, deska plošného spoje, tvorba experimentálního pracoviště

Abstract:

Theses introduces dendritic growth and conditions, which causes this growth. It describes creation of workplace for testing of dendritic growth and experimental verification of its functionality.

Key words:

Electrochemical migration, dendritic growth, soldering, print circuit board, creation of experimental workplace

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Pájení v elektronice	10
2.1	Pojmy.....	10
2.1.1	Smáčivost	10
2.1.2	Difuze	10
2.1.3	Tavidlo.....	11
2.1.4	Pájka	11
2.2	Typy pájení	11
2.2.1	Ruční pájení.....	11
2.2.2	Pájení přetavením	12
2.2.3	Pájení vlnou, ponorem.....	14
2.3	Tavidla	16
2.3.1	Požadavky na tavidlo.....	16
2.3.2	Typy tavidel.....	16
2.4	Chyby v pájení.....	18
2.4.1	Nesmáčivost	18
2.4.2	Odsmáčení	19
2.4.3	Prohnutí pouzdra	19
2.4.4	Trhliny	19
2.4.5	Kuličky pájky	20
2.4.6	Efekt náhrobního kamene.....	20
2.4.7	Dutiny	20
2.4.8	Whiskery.....	21
2.4.9	Dendrity	21
2.5	Povrchový izolační odpor.....	22

2.5.1	Měření	22
3.	Elektrochemická migrace	24
3.1	Fyzikální elektromigrace.....	24
3.2	Iontová elektromigrace.....	24
3.2.1	Vlhká elektromigrace.....	25
3.2.2	Mokrá elektromigrace	25
3.2.3	Vlivy.....	26
3.3	Vlhkost	27
3.3.1	Absolutní vlhkost vzduchu.....	27
3.3.2	Relativní vlhkost vzduchu.....	28
3.3.3	Metody měření relativní vlhkosti.....	28
3.3.4	Rosný bod	29
3.3.5	Měření rosného bodu	29
4.	Termoelektrické jevy	30
4.1	Seebeckův jev.....	30
4.1.1	Seebeckův jev u kovů	30
4.1.2	Seebeckův jev u polovodičů	31
4.2	Peltierův jev	32
5.	Experimentální část.....	33
5.1	Popis experimentálního pracoviště	33
5.2	Soupis použitých přístrojů.....	34
5.2.1	TEC1-12730.....	34
5.2.2	Accelero Xtreme IV	34
5.2.3	Zhaoxin RXN-3010D-II.....	35
5.2.4	Hameg HM7042-5	36
5.2.5	Greisinger GFTB 200.....	37
5.2.6	Lutron TM-914C.....	37

5.2.7	Mistral 260.....	38
5.2.8	HAWK DUO QC-5000	39
5.2.9	JBC DD 2A.....	39
5.2.10	Mettler Toledo AG 245	39
5.3	Příprava experimentu.....	40
5.3.1	Zajištění vhodných podmínek	40
5.3.2	Příprava vzorků	41
5.4	Experiment.....	42
5.4.1	Kondenzace vody	42
5.4.2	Růst dendritů	42
6.	Závěr.....	45
7.	Použitá literatura	46
8.	Seznam obrázků	49

1. Úvod

Dnešní doba je charakteristická snahou o automatizaci manuální práce. Velkou většinu prací tedy provádí elektrické stroje a přístroje. Pro výrobu těchto zařízení je nezbytné určitým způsobem pospojovat obvody, které je tvoří. Jedním z těchto způsobů může být pájení.

Existuje opravdu značné množství používaných metod a materiálů pro tento proces. Jako každý obor i pájení prochází neustálým vývojem. Největší změnou posledních let v této oblasti byl zřejmě zákaz používání neekologických olovnatých pájek a jejich nahrazení bezolovnatými. Bohužel je pájení s těmito pájkami v mnoha ohledech horší a kvalita spoje nižší.

Dalším problémem v oblasti pájení je neustálá miniaturizace součástek. Tím pro výrobce mohou nastat dosud nevídané a nepoznané problémy, jako je například důsledek elektrochemické migrace - růst dendritů. Protože je pro spotřebitele i výrobce hlavním faktorem kvalita spoje, snaží se růst dendritů omezit. V této práci budu psát o faktorech ovlivňující elektrochemickou migraci a popisovat tvorbu pracoviště pro testování růstu dendritů. V praktické části bude hlavním tématem experimentální ověření růstu dendritů na vzniklém pracovišti a následné vyhodnocení výsledků.

2. Pájení v elektronice

Pájení je jednou z metod používaných pro spojování elektrických obvodů. Tato oblast elektroniky je jednou z nejstarších a během jejího vývoje došlo ke vzniku mnoha metod a druhů pájení, jejichž výstupem jsou pájené spoje různé kvality. V této kapitole se kromě pájení jako takového budu věnovat problémům, které při pájení vznikají a jejich příčinám. Podle velikosti teplot používaných při pájení rozlišujeme pájení měkké a pájení tvrdé.

Tvrdé pájení slouží hlavně pro spojování mechanických konstrukčních částí při vysoké teplotě.

Měkké pájení využíváme například pro spojování elektrických obvodů. V sériové výrobě našlo uplatnění zejména strojní pájení, kvůli své možné reprodukovatelnosti. Během strojního pájení je totiž potlačen lidský faktor, díky čemuž jsou všechny spoje totožné. Ke kusové výrobě, případně k opravám, se zase hodí pájení ruční. V experimentální části budu používat jenom pájení měkké, v následující kapitole se tedy budu věnovat pouze této oblasti pájení. Pro lepší pochopení této problematiky si musíme ujasnit význam některých pojmů. [3]

2.1 Pojmy

2.1.1 Smáčivost

Protože se pájka během procesu musí roztavit, hodnotíme její chování jako chování kapaliny. Kapalina má tendenci formovat se do tvaru tělesa s co nejmenší plochou, protože udržet tento tvar vyžaduje nejmenší energii. Takovým tělesem je koule - kapalina na povrchu bude tvořit kapky.

Pojem smáčivost je schopnost povrchu této vlastnosti kapalin zabránit. Můžeme ji výrazně ovlivnit použitím vhodné kombinace materiálu (pájecí slitina, substrát, tavidlo) nebo teplotou. [4],[5]

2.1.2 Difuze

Dalším fyzikálním jevem probíhajícím v pájeném spoji je difuze. V pevném skupenství jsou atomy vázány v krystalové mřížce. Pokud zvýšíme jejich energii například zvýšením teploty, dojde k jejich uvolnění z mřížky a začnou se neuspořádaně pohybovat (pájka je v kapalném stavu). Pohyb má za následek i přesun atomů z jednoho

materiálu do materiálu druhého. Tento jev nazveme difuzí. Během pájecího procesu je difuze příčinou vzniku intermetalické vrstvy. [4],[5]

2.1.3 Tavidlo

Tavidlo slouží k odstranění nečistot a oxidů z pájecích plošek a zlepšení pájecích vlastností materiálů, například smáčivosti. V kapitole 2.3. se budu tomuto pojmu věnovat podrobněji.

2.1.4 Pájka

Pájka je slitina, pomocí které provádíme pevné spojování kovů. Základní složkou měkkých pájek je kov s nízkou teplotou tání. Příkladem takového kovu může být cín, olovo nebo zinek. Základní pájky jsou dvou nebo tříložkové, pro zvláštní účely se používají i složitější slitiny (ultrazvukové pájení).

Nejčastěji používány jsou slitiny různých kovů s cínem. Zejména oblíbenou byla slitina s olovem (Sn63Pb37) s teplotou tání 183.3°C. Používání této pájky bylo ovšem omezeno, kvůli jejímu negativnímu vlivu na životní prostředí. Bohužel spoje z bezolovnatých pájek nemají tak dobré vlastnosti a jsou zpravidla dražší. Z toho důvodu jsou olovnaté pájky povoleny v určitých oblastech jako například lékařský, letecký nebo kosmický průmysl. Podle typu pájení jsou pájky připravovány a aplikovány v různých formách. Pro ruční pájení je to drát s jádrem, tvořeným jednou nebo několika dutinkami, které obsahují tavidlo. Pro pájení přetavením se pájka aplikuje ve formě takzvaných pájecích past. Dalším typem je pájka ve formě tyčí, které přidáme do pájecí lázně. [3]

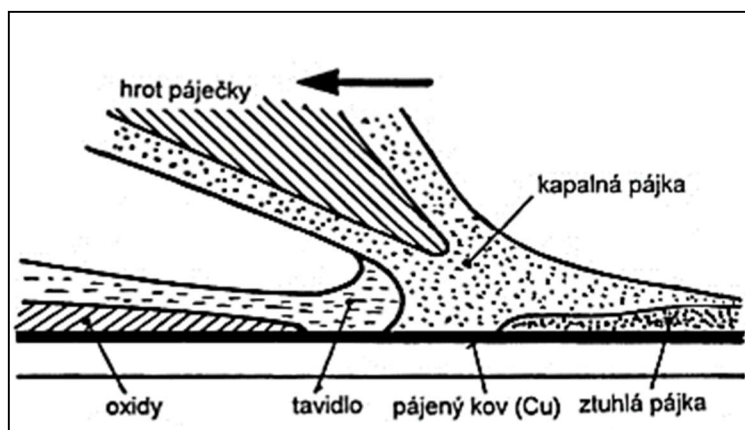
2.2 Typy pájení

Ve výrobě je používáno několik druhů pájení v závislosti na tom, co potřebujeme pájet. Je samozřejmé, že pro kusovou výrobu použijeme jiný postup, než pro sériovou a malé součástky budeme pájet jinou metodou než velké součástky. Třem nejpoužívanějším metodám pájení se budu věnovat v následující části.

2.2.1 Ruční pájení

Ruční pájení je proces, při kterém pájí pracovník spoje manuálně. Vzhledem k přítomnému lidskému faktoru je z hlediska reprodukovatelnosti poměrně nespolehlivé. Pracovník nedokáže zahřát spoj pokaždé stejně ani aplikovat shodné množství pájky. Z

těchto důvodů je ruční pájení vhodné pouze pro kusovou výrobu nebo provádění oprav chybně zapájených spojů.



Obrázek 1. Tvorba ručně pájeného spoje [3]

Na Obrázku 1. je vidět proces tvorby ručně pájeného spoje. Důležité je udržovat tenkou vrstvu pájky na pájecím hrotu po celou dobu pájení – ta zajišťuje řádný přenos tepla do spoje. [3]

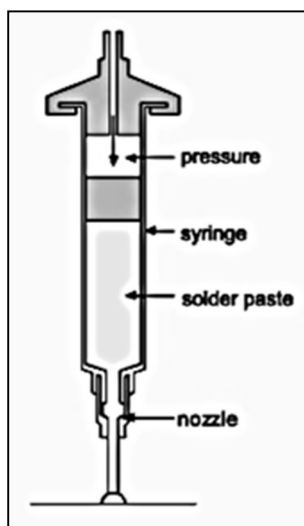
2.2.2 Pájení přetavením

Pájení přetavením je jedním z typů pájení používaným pro sériovou výrobu. Tímto způsobem je výhodné provádět povrchovou montáž SMD¹ součástek na desky plošných spojů.

Pájku v tomto případě tvoří pájecí pasta. Pastu tvoří tavidlo, drobné vodivé kuličky o průměru několika desítek μm a další příměsi. Podle obsahu jednotlivých složek získá pasta své charakteristické vlastnosti (viskozita, roztékavost, lepivost).

Pájecí pasta svou viskózní konzistencí umožňuje rovnoměrné nanášení na pájecí plošky různými způsoby. Těmito způsoby jsou: šablonový tisk, dávkovač a sítotisk. V sériové výrobě používáme šablonový tisk a sítotisk, kde je možné nanést pastu na mnoho pájecích plošek najednou a její množství je přesně definováno tloušťkou šablony. Pro kusovou výrobu se nám tvorba šablony nevyplatí, je tedy nutné použít dávkovač, který funguje na principu injekčního nanášení pasty. Na Obrázku 2. můžeme vidět náčrt tohoto typu nanášení. [3],[4],[7]

¹ SMD (surface mount device) – součástka pro povrchovou montáž (vývody nejsou skrz desku)



Obrázek 2. Dávkovač [7]

Osazení

Dalším krokem při pájení přetavením je osazení požadovaných součástek do nanesené pájecí pasty. V kusové výrobě tento proces probíhá na principu podtlaku v trysce osazovací hlavy, který součástku drží. Podle velikosti součástek volíme velikost a tvar trysky. V sériové výrobě používáme programovatelné osazovací automaty. Tyto automaty se orientují podle značek pro optické zaměření na DPS² a na požadované místa umísťují součástky. [7]

Zapájení

Posledním krokem při pájení přetavením je zahřátí pájecí pasty na předem definovanou teplotu stanovenou výrobcem pasty. Tím se pasta přetaví a spoj pájecí plošky a součástky je dokončen.

Proces rozdělujeme podle způsobu dodání tepla. Nejčastěji používané je pájení horkým vzduchem na principu cirkulace horkého plynu v peci. Tento způsob budu využívat pro přípravu vzorků na testování mého pracoviště. Další možností je ohřev pomocí infračerveného zářiče. Problémem v tomto případě ovšem může být nerovnoměrné prohřátí desky plošných spojů. Výhodou jsou naopak nižší náklady na provoz a kratší pájecí časy.

Nejlepším způsobem dodání tepla je pájení v parách. Při tomto postupu ponoříme pájenou desku plošných spojů do par inertní pájecí kapaliny. Výhodou je rovnoměrnost ohřevu způsobená kondenzací par v místech s nižší teplotou,

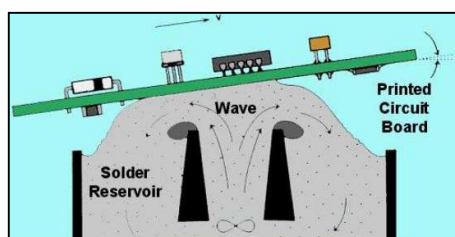
² DPS – deska plošného spoje

dále přesně definovaná teplota pájecí kapaliny a že pájení probíhá v inertní atmosféře (nedochází k oxidaci – páry vytlačí z pracovního prostoru kyslík). [7]

2.2.3 Pájení vlnou, ponorem

Pájení vlnou je pájecí proces, využívající se hlavně pro hromadné strojní pájení desek plošných spojů. Je vhodný především pro zapájení THT³ součástek. Pájení tedy probíhá na opačné straně desky než je umístěna součástka. Základní princip spočívá v nanesení pájecí slitiny na plošky pomocí vlny – roztavená pájecí slitina, která je hnána na povrch desky plošného spoje čerpadlem. Pro názornost uvádím Obrázek 3.. Plochy, které nejsou určeny k zapájení jsou pokryty nepájivou ochrannou maskou.

Proces začíná odstraněním oxidů z povrchu pájecích plošek a zlepšení pájecích podmínek pomocí nanesení rovnoměrného množství tavidla. Dále následuje předehřev desky, který aktivuje tavidlo a sníží teplotní rozdíl mezi deskou a vlnou. Přesná teplota předehřevu závisí na použitém tavidle. Takto připravenou desku už můžeme pájet jedním ze tří druhů vln. [7],[8]



Obrázek 3. Pájení vlnou [7]

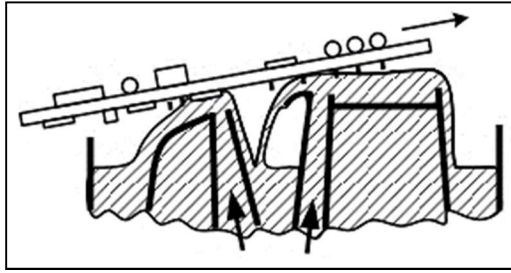
Jednoduchá vlna

Princip jednoduché vlny je popsán a vyobrazen na Obrázku 3.. Tímto typem vlny je možné bez problému pájet THT součástky i u hustě osazených desek. Pokud chceme pájet SMD, musíme součástky na DPS nejprve přilepit a míra integrace nesmí být tak vysoká. [8]

Dvojitá vlna

Jak už název napovídá, tato vlna se skládá ze dvou dílčích vln. První v pořadí se nazývá turbulentní. Jejím úkolem je dokonale očistit a prohřát spojované povrchy. Po ní následuje vlna laminární, která vytvoří samotné spoje. Poslední fází může být odstranění přebytečné pájky „horkým nožem“, což je tenký proud horkého vzduchu. Tato vlna je vhodná pro pájení SMD i THT součástek. [9]

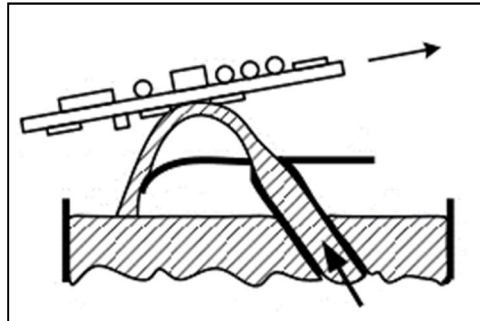
³ THT (Trough-hole technology) – součástka má vývody vyvedeny skrz desku



Obrázek 4. Dvojitá vlna[7]

Dutá vlna

Dutá vlna je aplikována proti směru pohybu pájené desky. Díky tomuto faktu je méně náchylná na tvorbu zkratů a tepelné namáhání součástek. Vlna je totiž v kontaktu se součástkou podstatně kratší dobu, než v předchozích případech.



Obrázek 5. Dutá vlna

Existují i další typy vln, jako například omega vlna, která je pro lepší vlastnosti spojů rozkmitávána, ale pro přiblížení jsem uvedl pouze základní typy vln.

2.3 Tavidla

Tavidla používáme během pájení kvůli zlepšení podmínek při pájecím procesu. Jejich přítomnost odstraňuje dosud vzniklé oxidy a nečistoty, zamezuje další oxidaci pájených povrchů a usnadňuje pájení zlepšením smáčivosti. Přestože je tavidlo pro pájení nezbytné, vlivem jeho používání vzniká množství vad. Jednou z těchto vad je snížení povrchového odporu díky rozpouštění tavidlových zbytků na DPS a následná elektrochemická migrace. Problematika tavidel je tedy úzce spjata s mojí prací.[1]

2.3.1 Požadavky na tavidlo

Pro ideální průběh pájení musí mít tavidlo vzhledem k pájce určité vlastnosti:

- Dobré smáčení povrchů pájených ploch a pájky
- Reakční teplotu tavidla o 50 až 150°C nižší než teplotu tavení pájky
- Minimální viskozitu v oblasti pracovní teploty pájky
- Menší hustotu než hustotu kapalné pájky
- Chemickou stálost
- Nesmí reagovat s pájenými materiály po ukončení pájení
- Nesmí být zdraví škodlivé

Tyto body jsou určující pro výběr vhodného tavidla k pájecí slitině.[7]

2.3.2 Typy tavidel

Přehled typů tavidel můžeme vidět v následující tabulce:

Tabulka 1. Tavidla pro měkké pájení [6]

Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivátor	Forma
Pryskyřičná	Kalafuna	Bez aktivátoru	Roztok
	Umělá pryskyřice	Halogenový aktivátor	
Organická	Vodou rozpustná	Nehalogenový aktivátor	
	Vodou nerozpustná		
Anorganická	Soli	S chloridem amonným	Pevná látka
		Bez chloridu amonného	
	Kyseliny	Kyselina fosforečná	Pasta
		Jiná kyselina	
Zásady	Aminy nebo čpavek		

Kalafunová tavidla

Základní látkou, tvořící kalafunová tavidla je přírodní pryskyřice. Její aplikace probíhá v rozpuštěné formě pomocí organických rozpouštědel (etylalkohol, xylen). Protože je pryskyřice samotná málo aktivní, musíme do tavidel přidávat různé aktivátory.

Aktivátorem mohou být:

- Organické kyseliny (kyselina adipová, salicylová, jantarová)
- Organické aminhydrochloridy

Podle množství aktivátoru rozdělujeme tavidla na:

- R (Rosin) – neaktivované
- RMA (Rosin Mildly Activated) – středně aktivované
- RA (Rosin Activated) – silně aktivované [6]

Vodou rozpustná tavidla

Čištění kalafunových tavidel vyžaduje směsi alkoholů a vody. Pro určité druhy desek ovšem alkohol použít nemůžeme a musíme vymyslet jiné řešení. Právě z tohoto důvodu byla vyvinuta tavidla, jež je možné rozpustit vodou. Po pájení zůstávají tekutá a po omytí vodou mohou v nepřístupných místech zůstat jejich zbytky. Tyto zbytky následně migrují do okolních materiálů a způsobují korozi. Z tohoto důvodu je jejich používání poměrně problematické. [6]

Tavidla s nízkým obsahem sušiny

Při pájení se snažíme co nejvíce redukovat zbylé množství tavidla, které by mohlo způsobovat problémy. Díky tomuto faktu vznikla tavidla, jenž mají obsah sušiny od 2 do 6 hmotnostních procent. To zaručí, že bude nanášeno pouze potřebné množství tavidla, které po pájení beze zbytku zreaguje. U méně náročné elektroniky tedy odpadá čistící proces, což výrazně zlevňuje výrobu. Nevýhodou je nutnost odpařit větší množství rozpouštědla a následný vznik páry, která se musí odsávat. U náročnějších zařízení je čistící proces nutností, protože tavidla s nízkým obsahem sušiny jsou silně aktivovaná. [6]

Plynné tavidlo

Plynné tavidlo je tvořeno směsí dusíku a vodíku. Podíl vodíku tvoří přibližně 3% až 8%. Během zvyšování teploty se oxidy částečně rozpouštějí již v dusíku a zbytek oxidů následně redukuje ve vodíku. [6]

Pokud dokážeme odstranit oxidy z pájecích plošek jiným způsobem, tavidlo nemusíme použít. Mezi používané způsoby patří plasma a ultrazvuk. [6]

Plasma

Deska prochází komorou a plasma v kombinaci se sníženým tlakem reaktivně odstraňuje oxidy z povrchů. Po tomto procesu následuje pájení vlnou, které probíhá v inertní atmosféře dusíku. [6]

Ultrazvuk

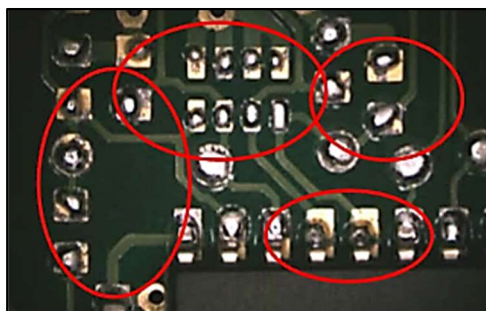
Jiným typem odstranění oxidů bez tavidla je ultrazvuk. Ten se používá u pájení vlnou. Ultrazvukové vibrace zajišťuje systém sonotrod a pájení opět probíhá v inertní atmosféře dusíku. [6]

2.4 Chyby v pájení

Během pájení mohou vznikat různé chyby, které jsou příčinou vzniku nekvalitních pájených spojů. Takto vzniklé nekvalitní spoje jsou nespolehlivé a mohou vést ke špatné funkci zařízení či dokonce ohrožení obsluhy zařízení. V následující kapitole některé tyto problémy přiblížím.

2.4.1 Nesmáčivost

Jak už název napovídá, nesmáčivost vzniká v případě, kdy pájka nedokáže rovnoměrně pokrýt celou pájecí plošku a vlivem povrchového napětí vytvoří kapky. Příčinou může být tavidlo, které není dostatečně aktivované a s tím související oxidace pájecích plošek, nedostatečné prohřátí spoje nebo nedostatečné množství použité pájky. Na Obrázku 6. můžeme tento jev názorně vidět. [12]



Obrázek 6. Nesmáčivost DPS [12]

2.4.2 Odsmáčení

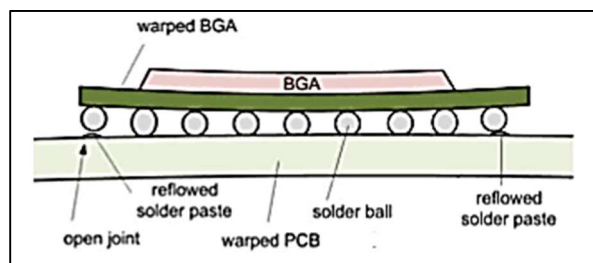
Odsmáčení je v podstatě nerovnoměrné rozložení pájky na pájecí plošce. Vzniká při přílišném zahřívání spoje v důsledku vzniku intermetalických vrstev, které mění složení pájecí slitiny. Slitina dále mění své vlastnosti (smáčivost) a díky tomu „ustoupí“ zpět. [12]



Obrázek 7. Odsmáčení DPS [12]

2.4.3 Prohnutí pouzdra

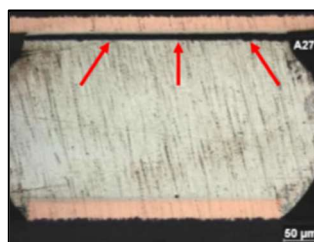
V případě, že koeficient teplotní roztažnosti pájené součástky a DPS je rozdílný, může při ohřevu/chlazení dojít k prohnutí pouzdra součástky (Warpage effect). Při této chybě vzniká díky rozdílnému koeficientu pnutí, které má za následek deformaci, jak je vidět na Obrázku 8.. [12]



Obrázek 8. Prohnutí pouzdra [12]

2.4.4 Trhliny

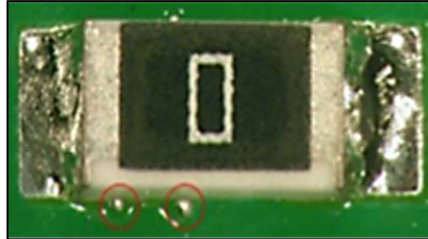
Tepelné a mechanické namáhání pájených částí může vést k trhlinám v nejslabších místech spoje. Jejich lokace je závislá na mnoha faktorech (použitý materiál, typ pájení). Na Obrázku 9. můžeme vidět podélnou trhlinu vzniklou při pájení BGA pouzdra. [12]



Obrázek 9. Podélná trhlina [12]

2.4.5 Kuličky pájky

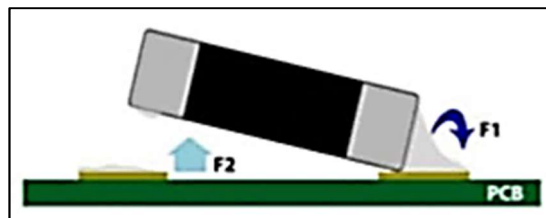
Tato chyba vzniká při nesprávném nanesení pájecí pasty na pájecí plošky. Pasty může být přílišné množství, případně je nanesena mimo pájecí plošky. Po přetavení takto chybně připravené desky vzniknou kuličky (viz. Obrázek 10.). Tyto kuličky jsou potenciálním rizikem pro tvorbu zkratů. [12]



Obrázek 10. Kuličky pájky [12]

2.4.6 Efekt náhrobního kamene

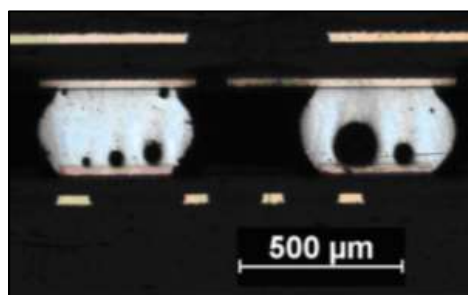
Efekt náhrobního kamene vzniká zejména u malých SMD součástek vlivem nestejných sil, které na součástku z obou stran působí v průběhu procesu pájení. Tento fakt má za následek zvednutí jedné strany součástky. Rozdílné velikosti sil mohou být způsobeny nesprávným množstvím nanesené pájecí pasty, rozdílnou velikostí pájecích plošek, rozdílnou smáčivostí pájecí pasty nebo nestejným časem, po který byla pasta přetavována. [12]



Obrázek 11. Efekt náhrobního kamene[12]

2.4.7 Dutiny

Dutiny (voidy) vznikají v pájených spojích díky různým vlivům. Protože existuje značné množství jejich typů, nelze obecně říci, co jejich výskyt způsobuje. Uvedu alespoň příklad vzniku největších – makrovoidů. Během přetavování pájecí pasty dochází k aktivaci a vypařování v ní obsaženého tavidla ve formě plynů. Tyto plyny mohou v pájecí slitině vytvářet bubliny, které zůstanou uvnitř a vytvoří právě makrovoid (Obrázek 12.). [12]



Obrázek 12. Makrovoidy[12]

2.4.8 Whiskery

Whiskery jsou elektricky vodivé krystaly, které rostou na povrchu některých kovů. Jejich výskyt ohrožuje správné fungování přístroje, protože svým růstem mohou propojit vodivé cesty a vytvořit zkrat. Jejich vznik je ovlivněn několika faktory – tlakovým namáháním spoje, krystalickou strukturou pájecí slitiny, přítomností intermetalické sloučeniny, teplotou a vlhkostí. Velikost whiskerů se pohybuje od 1 μm do 10 μm . V extrémních případech mohou ovšem dorůst do velikosti až 1 cm. Takový případ je dobře vidět na Obrázku 13.. Vzhledem k jejich velkému potenciálu ohrožovat správnou funkci přístroje nejsou materiály náchylné na tvorbu whiskerů používány pro výrobu přístrojů, které mohou ohrozit lidský život. [12]



Obrázek 13. Whisker [12]

2.4.9 Dendrity

Růst dendritů je způsoben elektrochemickou migrací, která vzniká za určitých podmínek mezi místy s rozdílným elektrickým potenciálem na desce plošných spojů. Proces začíná snížením povrchového odporu, což umožní přesun iontů z jednoho elektrického potenciálu na druhý. Jeho příčinou může být kombinace tavidlových zbytků a zkondenzované vlhkosti na DPS. Migrující ionty vytvářejí na desce stromovité⁴ struktury (Obrázek 14.). Pro výrobu je jejich růst nežádoucí, protože jsou

⁴ Slovo dendrit pochází z řeckého dendron – strom

příčinou neočekávaných úbytků napětí, případně zkratů. Elektrochemické migraci a faktorům, které ji ovlivňují, se budu podrobněji věnovat v následující kapitole. [1]



Obrázek 14. Růst dendritu⁵

2.5 Povrchový izolační odpor

Povrchový izolační odpor (SIR⁶) je definován jako poměr napětí mezi dvěma místy na DPS a proudu, protékajícím mezi nimi. Testování SIR se provádí s cílem odhalit tendence plošných spojů k nebezpečným destruktivním mechanismům, například elektrochemické migraci.

Nejvýraznějším faktorem, který SIR ovlivňuje, je zachycená voda na povrchu izolačního materiálu, v našem případě na DPS. I tenký film vody stačí k výraznému snížení povrchového odporu. Problémem je ale i reakce vody s nečistotami. Příkladem může být zbytek tavidla, jež je rozpouštěn zkondenzovanou vodou a snižuje povrchový odpor ještě výrazněji.

Další vlastností ovlivňující SIR je schopnost látky vázat/odpuzovat vodu a čistota materiálu. S čistotou úzce souvisí drsnost povrchu - pokud povrch není hladký, nečistoty se usazují snadněji a snižují povrchový odpor. [1],[10]

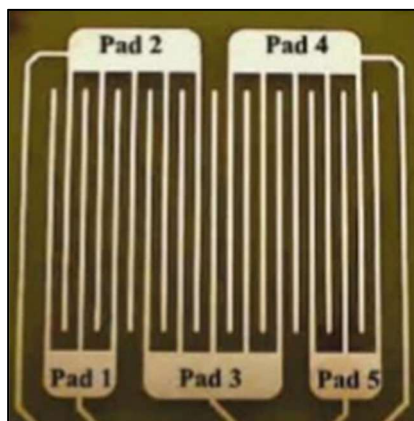
2.5.1 Měření

Proces slouží k vyhodnocení náchylnosti výrobku na vznik svodových proudů a na elektrochemickou migraci. Probíhá za zvýšené teploty, vlhkosti a přiloženého napětí. Hodnoty jednotlivých veličin jsou definovány normami. Příkladem může být teplota 40 °C, relativní vlhkost 90 % a napětí 10 V podle normy J-STD-004B. Důvodem nižších hodnot je snaha o zachycení změny povrchového odporu v momentu, kdy

⁵ Obrázek autor

⁶ SIR – Surface insulation resistance

dendrit roste. Na Obrázku 15. můžeme vidět vzor DPS pro testování povrchového izolačního odporu dle normy.[1]



Obrázek 15. Testovací DPS dle normy IPC-B-25A [1]

3. Elektrochemická migrace

Vývoj v oblasti elektroniky je charakterizován neustálou miniaturizací, zvyšující se hustotou součástek a škálou vyráběných přístrojů a s tím spojenou sníženou kvalitou výrobního postupu. Následkem těchto faktů jsou častější chyby, které při pájení vznikají. V této kapitole se budu věnovat jedné z nich, totiž elektrochemické migraci.

Elektrochemická migrace je proces, při kterém elektrony putují z jednoho místa do druhého vlivem působení vnějšího elektrického pole. Počet takto migrujících elektronů je přitom závislý na mnoha faktorech, jako je například přítomnost molekul vody, velikost elektrického napětí mezi oběma místy a pracovní teplota. Migraci dělíme na fyzikální (suchou) a elektrochemickou (iontovou). V této práci se budu soustředit spíše na iontovou. [1]

3.1 Fyzikální elektromigrace

Fyzikální (suchá) elektromigrace nastává u teplot vyšších než 150 °C a proudové hustoty vyšší než 10⁴ A.cm⁻². Vysoká hodnota proudové hustoty umožňuje díky velké hybnosti elektronů dopadajících na atomy kovu přesun hmoty v suchém pevném prostředí. Protože struktura vodiče není nikdy dokonale homogenní, dochází k nestejněměrné migraci, což má za následek hromadění materiálu. V místech, odkud atomy migrují, může dojít k rozpojení obvodu. V místech, kde se naopak hromadí, může dojít k nežádoucím zkratům. [1]

3.2 Iontová elektromigrace

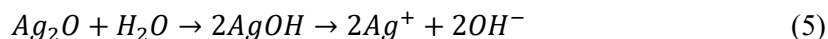
Na rozdíl od fyzikální elektromigrace není pro růst potřeba tak vysoká teplota (< 100°C) ani proudová hustota (< 1 mA.cm⁻²). Podmínky musí dosahovat takových hodnot, aby na povrchu DPS mohla být přítomná voda. V následujícím odstavci popíši proces elektrochemické migraci stříbra.

Během rozpouštění látka ionizuje díky elektrickému potenciálu. Následně dochází k migraci vodíkových kationtů směrem ke katodě a hydroxilových aniontů k anodě. [1]



Vodík je u katody uvolňován ve formě plynu a hydroxil u anody dále reaguje s kationtem stříbra, putujícího od anody. Touto reakcí vzniká hydroxid stříbrný, ten se

rozkládá na oxid stříbrný a oxid dále reaguje s přítomnou vodou. Reakcí s vodou vznikne kation stříbra a hydroxilový anion. [1]



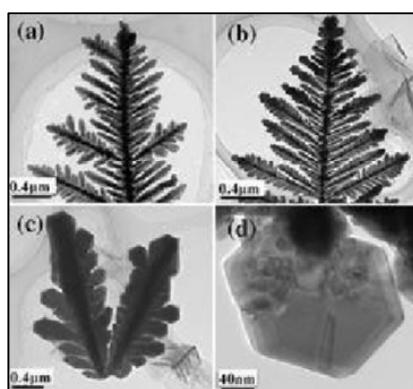
Výsledkem těchto procesů je přesun (migrace) částic stříbra.

Elektromigrace se vyskytuje převážně při připojení stejnosměrného proudu. Co se týká proudu střídavého, zde pravděpodobnost migrace klesá se zvyšující se frekvencí. Tuto skutečnost můžeme připisovat nedostatečnému množství času potřebnému k výše uvedeným procesům. Podle množství přítomné vlhkosti rozdělujeme elektromigraci na vlhkou a mokrou. [1]

3.2.1 Vlhká elektromigrace

Vlhká elektromigrace probíhá na povrchu, na kterém je přítomna vlhkost, ale neprobíhá kondenzace vody v podobě kapek nebo tenkého filmu. Proces začíná vznikem oxidu na anodě vodiče. V tomto oxidu vznikají kladné ionty, které vlivem působení elektrického pole putují směrem ke katodě, kde se znovu ukládá ve formě stříbra. Vlhká elektromigrace může probíhat pouze u mědi a stříbra.

Důležitým aspektem je tendence iontů ukládat se ve formě hrotů na katodě. Tento fakt způsobí, že vzroste proudová hustota a tím i pravděpodobnost transportu. Důsledkem je pak nejrychlejší růst na hrotech, což způsobuje větvení v definovaných krystalografických úhlech a tím vznik typické dendritické struktury. [1]



Obrázek 16. Typická dendritická struktura [1]

3.2.2 Mokrú elektromigrace

Jak už název napovídá, mokrá elektromigrace probíhá tehdy, když je na DPS z kondenzovaná viditelná vlhkost. Důsledkem toho všechny procesy o několik řádů

zrychlí. Proces může probíhat u mědi, zlata, cínu, niklu, olova, paladia a naopak nemůže probíhat u kovů s ochranným oxidem jako jsou chrom, hliník a wolfram.

Mokrý elektromigrace je problémem kvality desek plošných spojů, protože dendrity mohou propojit dva blízké vodiče s opačnou polaritou a způsobit přemostění. Hlavním úkolem mé bakalářské práce je nechat zkondenzovat dostatečné množství vlhkosti a ověřit právě tento typ migrace. [1]

3.2.3 Vlivy

Elektrochemickou migraci ovlivňují různé faktory. Příkladem může být teplota, napětí, materiál vodiče, vzdálenost mezi vodiči, znečištění a vlhkost. V následující části popíši tyto vlivy podrobněji. [13]

Teplota

Teplota potřebná pro průběh iontové elektrochemické migrace leží v rozmezí 0°C až 100 °C. Mimo tento interval (nad 150°C) může probíhat fyzikální (suchá) elektromigrace. Studie této problematiky prokázaly, že míra šíření dendritů je přímo úměrně závislá na teplotě.

Teplota byla spojena s elektrochemickou migrací prostřednictvím chemické reakční rychlosti, která je definována Arrheniuvou rovnicí:

$$t = A \cdot e^{\left(\frac{\Delta H}{k \cdot T}\right)} \quad (6)$$

Kde t – čas propojení [s], A – konstanta (zahrnuje vzdálenost, použité napětí a další konstantu), ΔH – aktivační energie [eV], k – Boltzmannova konstanta⁷ [eV/K] a T – použitá teplota [K]. [13]

Vzdálenost

Se snižující se vzdáleností vodičů s opačným potenciálem se snižuje SIR, zvyšuje se pravděpodobnost elektrochemické migrace, případně čas propojení obou vodičů dendritem. Kromě toho je následkem menší rozteče pravděpodobnější ukládání zbytků tavidel na DPS a zároveň se zhoršují podmínky pro jejich čištění. [13]

Materiál vodiče

Jak jsem již uváděl dříve, náchylné na elektrochemickou migraci jsou zejména kovy jako stříbro a měď. Náchylné na mokrou elektromigraci je ovšem i větší množství výše uvedených kovů. Proto se na desky plošných spojů aplikují různé povrchové

⁷ 8.67·10⁻⁵ eV/K

úpravy. Příkladem takových povrchových úprav může být OSP⁸, což je chemická metoda nanášení organických inhibitorů na odhalený měděný povrch DPS. Tím vzniká organicko-metalická vrstva, jež potlačuje růst dendritů. Další povrchovou úpravou, o které se dále budu zmiňovat, je HAL⁹. Jedná se o nanesení roztavené cínové pájky a následné vyrovnání povrchu horkovzdušným vzduchem. [14],[25]

Relativní vlhkost

Pro iontovou elektromigraci je nezbytná přítomná vlhkost. V případě kondenzace vody v podobě viditelné vrstvy na DPS se jedná o mokrou elektromigraci, jinak se jedná o vlhkou. Čím vyšší je relativní vlhkost, tím vyšší je pravděpodobnost elektrochemické migrace. Předmětem této bakalářské práce je tvorba pracoviště, které zajistí vhodné podmínky pro růst dendritů. Základem je zchlazení povrchu a následná kondenzace vody na DPS. Protože tento faktor je pro mou práci stěžejní, budu věnovat problematice kondenzace vzdušné vlhkosti celou následující kapitolu.

3.3 Vlhkost

Vlhkost je veličina, udávající množství vodní páry obsažené v objemu suchého vzduchu. Pro její vyjádření užíváme veličiny, jako je absolutní vlhkost vzduchu, relativní vlhkost vzduchu nebo rosný bod.

3.3.1 Absolutní vlhkost vzduchu

Vyjadřuje hmotnost m vodní páry obsaženou v objemu V suchého vzduchu. Výpočet je zjevný z definice:

$$\Phi = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Absolutní vlhkost vzduchu bývá nejčastěji vyjádřena v jednotce g/m^3 . [11]

⁸ OSP (Organic solder preservatives) – povrchová úprava pomocí organické vrstvy

⁹ HAL (Hot air leveling) – povrchová úprava pomocí roztaveného cínu

3.3.2 Relativní vlhkost vzduchu

Vyjadřuje okamžitou absolutní vlhkost vzduchu vztaženou na množství vody, které by obsahoval vzduch při jeho plném nasycení vodní párou. Výpočet lze provést následujícími způsoby:

$$\varphi = \frac{m}{M} \cdot 100 = \frac{\Phi}{\Phi_n} \cdot 100 \quad (8)$$

kde M [g] a Φ_n [g/m³] jsou hodnoty vzduchu plně nasyceného vodní párou o stejném objemu. Z výpočtu je vidět, že se jedná o poměrnou jednotku vyjádřenou v procentech. [11]

3.3.3 Metody měření relativní vlhkosti

Psychrometrická metoda

Měření relativní vlhkosti bývá nejčastěji prováděno psychrometrickou metodou. Jejím základem jsou dva teploměry. Čidlo jednoho z teploměrů je vlhčeno, druhé měří teplotu vzduchu. Mokrý teploměr tedy udává takovou teplotu, jaká by byla při 100 % relativní vlhkosti. Během tohoto procesu dochází k nárůstu rozdílů teplot obou teploměrů – tzv. psychrometrické diferenci. V závislosti na této hodnotě stanovíme pomocí tabulek hodnotu relativní vlhkosti. Tabulky jsou odvozeny na základě psychrometrické rovnice:

$$p' = p''_m - A \cdot p \cdot (t - t_m) \quad (9)$$

kde A – psychrometrická konstanta [K⁻¹], p''_m – parciální tlak syté vodní páry při teplotě mokrého teploměru [Pa], p' – parciální tlak vodní páry při teplotě suchého teploměru [Pa], p – barometrický tlak (tlak směsi) [Pa], t – teplota suchého teploměru [°C], t_m – teplota mokrého teploměru [°C].

Výhodou psychrometrické metody je nízká cena a nepotřeba kalibrace – funguje na principu fyzikálních zákonů. Nevýhodou je závislost přesnosti na vnějších podmínkách (teplota vzduchu, relativní vlhkost, tvar a rozměr vlhčeného teploměru). Při teplotách nad 0 °C je ovšem přesnost dostačující. [11],[15]

Rovnovážné elektrolytické metody

Jsou založeny na rovnováze mezi hygroskopickou látkou a vodou obsaženou ve vzduchu. Pro určité chemické látky (iontové soli) známe teplotu rovnováhy mezi tlakem vodní páry nad nasyceným roztokem a tlakem páry v okolním prostředí. Pokud je okolní relativní vlhkost nízká, z roztoku se začne odpařovat voda; pokud je vysoká,

roztok vodu absorbuje. Tyto pochody jsou spjaty se změnou parametrů roztoku, zejména elektrické vodivosti. Na základě této změny jsme schopni určit množství vody ve vzduchu.

Příkladem může být sorpční metoda. Vlhkost mění různé parametry roztoku, senzor určí, o kolik se parametr změnil a následně podle rozdílu dopočítá množství vodní páry obsažené ve vzduchu. Podle typu senzoru pak mluvíme o dilatačních, kapacitních nebo odporových vlhkoměrech. [11]

3.3.4 Rosný bod

Množství vody, které může být obsaženo ve vzduchu, je omezené. Toto omezení úzce souvisí s momentální teplotou. Rosný bod je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami. Pokud v určitém místě dosáhneme nižší teploty než teploty rosného bodu, vlhkost zde začne kondenzovat. V praktické části se pokusím přesně takového jevu docílit podchlazením desky plošného spoje.

3.3.5 Měření rosného bodu

Přímé měření teploty rosného bodu je založeno na odměření teploty ve chvíli dynamické rovnováhy mezi množstvím vypařované vody z povrchu a množstvím zkondenzované vodní páry ze vzduchu. V místě této rovnováhy bude relativní vlhkost 100 % a teplota rovná teplotě rosného bodu. Výhodou této metody je dostatečná přesnost při měření za nízkých teplot a malých relativních vlhkostí.

Teplotu rosného bodu je také možné dopočítat z aktuální teploty a relativní vlhkosti. [11]

4. Termoelektrické jevy

Jak už název bakalářské práce napovídá, budu tvořit pracoviště pro demonstraci elektrochemické migrace. Součástí tohoto pracoviště bude i chladicí prvek – Peltierův článek, který využívá pro svou funkci Peltierova jevu. V následující kapitole se pokusím přiblížit, na základě jakých principů článek funguje. Abychom porozuměli Peltierovu jevu, musíme nejprve pochopit jev Seebeckův.

4.1 Seebeckův jev

Pod pojmem Seebeckův jev rozumíme vznik termoelektrického napětí v obvodu tvořeném dvěma různými kovy, mezi kterými existuje teplotní rozdíl. Vznik Seebeckova jevu je způsoben kontaktním potenciálem mezi kovy z důvodů posuvu Fermiho hladiny a při zahřívání jedné strany termočlánku. Další skutečností, která jev zapříčiňuje, je přesun nosičů náboje difuzí na základě teplotního rozdílu. [2]

4.1.1 Seebeckův jev u kovů

Pro následující vysvětlení musíme definovat pojem výstupní práce kovu. Jedná se o energii potřebnou k uvolnění elektronu z vazby v kovu. Pokud spojíme dva kovy s rozdílnou výstupní prací (např. pájením/svářením), dochází k přestupu elektronů z kovu s nižší výstupní prací do kovu s vyšší výstupní prací. Tím dojde k vytvoření elektrického pole, které působí proti směru přesouvajících se elektronů. Výsledkem těchto pochodů je rovnovážný stav, který je definován rovnicí:

$$qU = A_A - A_B \quad (10)$$

kde q – elementární náboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), U – kontaktní napětí [V], A_A, A_B – výstupní práce kovů [eV].

Velikost termoelektrického napětí v uzavřeném obvodu lze vyjádřit vztahem:

$$U_T = (T_1 - T_2) \cdot \frac{k}{q} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (11)$$

kde $T_{1,2}$ – teploty jednotlivých spojů (referenční a měřená) [K], k – Boltzmannova konstanta [eV/K], q – elementární náboj [C], $n_{A,B}$ – koncentrace vodivostních elektronů v jednotlivých kovech [m^{-3}].

V literatuře je také možné narazit na vztah:

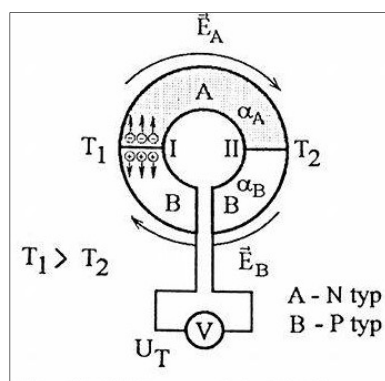
$$U_T = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (12)$$

kde α – termoelektrický součinitel dvou konkrétních materiálů – substituce výše uvedených vztahů [V/K].

Seebeckův jev se používá zejména pro měření teploty, výrobě elektrické energie v tepelných generátorech nebo měření proudu tepelnými ampérmetry. [2]

4.1.2 Seebeckův jev u polovodičů

V minulé kapitole jsme si objasnili Seebeckův jev u vodičů. Nyní se zaměříme na Seebeckův jev u polovodičů, k jehož vysvětlení nám poslouží následující obrázek:



Obrázek 17. Termoelektrický jev [2]

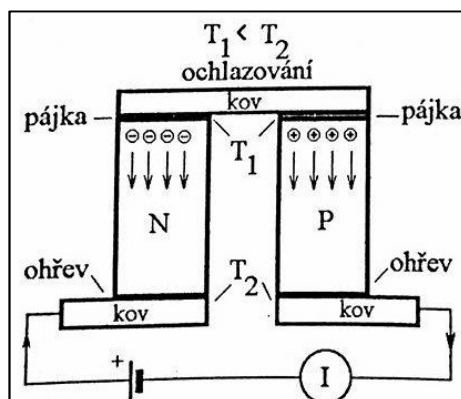
Koncentrace nosičů v polovodiči je exponenciálně závislá na teplotě. Z obrázku vyplývá, že v místě s teplotou T_1 bude generována vyšší koncentrace volných nosičů než v místě s teplotou T_2 . Důsledkem tohoto rozdílu bude probíhat difuze, díky které se bude ohřátý konec polovodiče typu N nabíjet kladně. U polovodiče typu P je situace analogická, zde ovšem difundují kladné nosiče náboje a tudíž se jeho ohřátá část nabíjí záporně. Situace je v Obrázku 17. popsána vektory intenzity elektrického pole A,B. Termoelektrické napětí U_T můžeme stanovit z následující rovnice:

$$U_T = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_1 - T_2) \quad (13)$$

kde $\alpha_{A,B}$ – termoelektrické součinitele materiálu A a B. Pro polovodičové materiály dosahují hodnot 10^{-4} až 10^{-2} V/K – jsou o několik řádů vyšší než u kovových materiálů.[2]

4.2 Peltierův jev

Tento jev je opačným k jevu Seebeckovu, při němž spoj generuje (případně absorbuje) teplo na základě přítomnosti elektrického proudu, který spojem protéká.



Obrázek 18. Peltierův jev [2]

Na Obrázku 18. je vidět praktická realizace Peltierova jevu. Obvod je připojen na elektrický potenciál, který polovodiči typu N přitahuje elektrony a v polovodiči typu P díry. Na základě závislosti koncentrace volných nosičů náboje vzniká rozdíl teplot. Generované množství tepla můžeme spočítat pomocí vztahu:

$$Q = \pi \cdot I \cdot t \quad (14)$$

kde π – Peltierův koeficient [V], I – proud protékající kontaktem [A] a t – čas po který proud protéká [s]. Peltierův koeficient je roven:

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (15)$$

kde α – termoelektrický součinitel materiálu a T – teplota [K]. [2]

5. Experimentální část

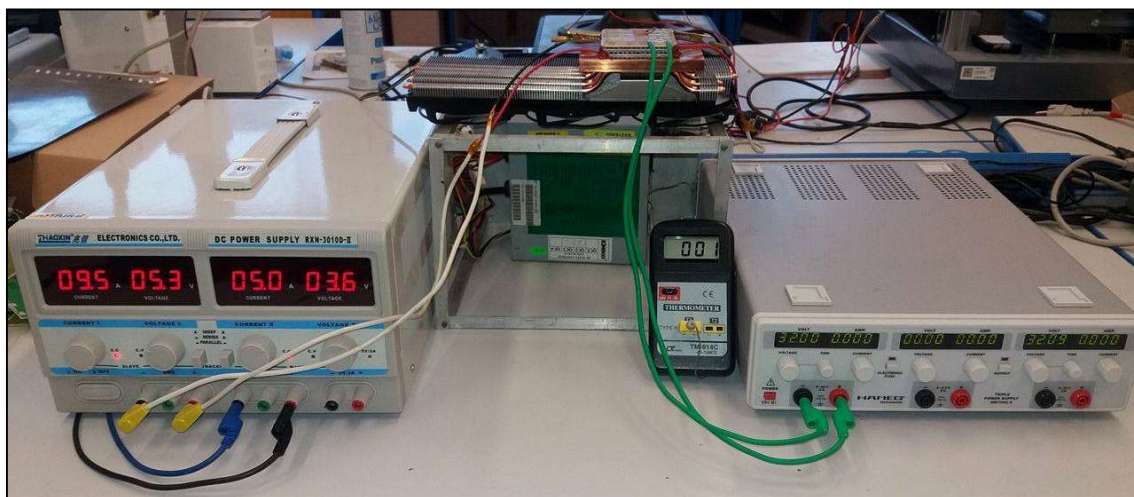
Základem pracoviště pro testování elektrochemické migrace, které jsem vytvořil, je zajištění kondenzace vlhkosti na DPS. K realizaci mého předpokladu jsem tedy potřeboval podchladiť DPS pod teplotu rosného bodu.

5.1 Popis experimentálního pracoviště

Pro dosažení stanoveného cíle jsem použil dva Peltierovy články TEC1-12730. Protože pomocí Peltierova jevu pouze separujeme teplo a chlad, musel jsem zrealizovat účinný systém pro odvod tepla z jeho teplé strany.

Nejprve jsem použil pasivní chladič výkonových součástek, který ovšem nebyl dostatečně účinný a vlivem toho se po chvíli začala chladná strana horního¹⁰ Peltierova článku ohřívat. Byl jsem tedy nucen najít účinnější způsob chlazení. Vybral jsem chladič Accelero Xtreme IV s aktivním i pasivním chlazením. Pro jeho napájení používám počítačový zdroj EMKO JS-200 (0.12 A/12V). Chladič je postaven na konstrukci, která vytváří prostor pro odvádění vzduchu.

Napájení obou Peltierových článků je zajištěno dvoukanálovým zdrojem Zhaoxin RXN-3010D-II. Při vhodně nastavených hodnotách napájení článků je udržována teplota v intervalu okolo 0 °C. V části 5.3 se této problematice budu věnovat podrobněji.



Obrázek 19. Experimentální pracoviště

¹⁰ Články jsou posazené na sobě a spodní článek podporuje chlazení ohřáté strany horního.

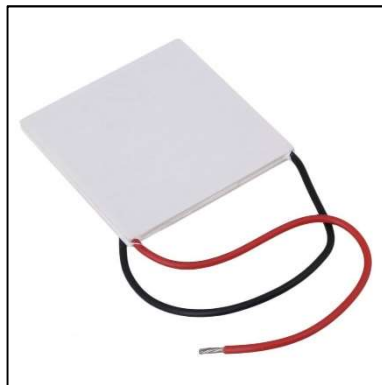
5.2 Soupis použitých přístrojů

5.2.1 TEC1-12730

TEC1-12730 je Peltierův článek. Při jeho vybírání pro mne byla hlavním faktorem velikost jeho plochy. Zvolil jsem největší volně dostupný na trhu s dostatečnými rozměry. Dle jeho velikosti jsme s kolegou vypracovali podklady pro výrobu vzorků DPS. Protože je tento článek na běžném trhu nejvýkonnějším, musel jsem zajistit dostatečný odvod tepla. Článek je k chladiči připevněn pomocí teplovodivého tmelu.

Parametry

- Rozměry: 62x62x3,9¹¹ mm
- Hmotnost: 90 g
- Maximální I: 30 A
- Maximální U: 16.2 V
- Maximální výkon: 267 W [17]



Obrázek 20. TEC1-12730 [16]

5.2.2 Accelero Xtreme IV

Po neúspěšném pokusu s chladičem výkonových součástek, o kterém jsem psal dříve jsem se rozhodl nadimenzovat chladičí výkon pomocí chladiče grafických karet Accelero Xtreme IV. Jeho výhodou pro mou práci je poměrně malá výška – experimentální pracoviště se vejde pod binokulární lupu a růst dendritů můžeme pozorovat a dokumentovat na počítači. Problém pro mne představovala nedostatečně velká styčná plocha chladiče. Rozhodl jsem se tedy připevnit ke styčné ploše chladiče měděnou desku pomocí zapuštěných šroubů. Mezi články a deskou je tepelně vodivá

¹¹ Šířka x délka x výška

pasta Arctic MX-4. Deska je dostatečně masivní, aby zajistila odvod veškerého tepla do chladiče.

Parametry

- Rozměry: 288x104x54 mm
- Hmotnost: 653 g
- Aktivní chlazení: 3x ventilátor 92 mm
- Rychlost otáček: 900 – 2000 ot./min (řízeno PWM¹²)
- Pasivní chlazení: 5x tepelná trubice + radiátor
- Maximální chladicí kapacita: 300 W [18]



Obrázek 21. Accelero Xtreme IV [18]

5.2.3 Zhaoxin RXN-3010D-II

Pro napájení obou Peltierových článků používám transformátorový lineární regulovatelný zdroj Zhaoxin RXN-3010D-II. Zdroj umí pracovat v režimech cc – konstantní proud a cv – konstantní napětí. Je vybaven ochranou proti přepětí a zkratu. Konstrukce umožňuje sériové nebo paralelní propojení dvou kanálů pro získání vyššího výkonu.

Spodní článek je napájen 9.5 A/5.3 V pro dostatečně rychlý odvod tepla z horního článku. Horní článek napájíme 5 A/3.6 V.

Parametry

- Výstupní proud: 2x 10 A, 1x 3 A
- Výstupní napětí: 2x 30 V, 1x 5 V
- Rozlišení: 100 mV/mA
- Přesnost měření napětí: $\pm 1 \%$ měřené hodnoty
- Přesnost měření proudu: $\pm 2 \%$ měřené hodnoty

¹² PWM = Pulse Width Modulation = Pulsní šířková modulace

- Napájecí napětí: 230 V/50 Hz
- Hmotnost: 13.9 kg [19]



Obrázek 22. Zhaoxin RXN-3010D-II [19]

5.2.4 Hameg HM7042-5

Hameg HM7042-5 je tříkanálový laboratorní zdroj, který využívám pro napájení DPS během samotného testování. Byl jsem nucen ho použít, protože třetí kanál zdroje Zhaoxin neposkytne dostatečně velké hodnoty napájení (32 V DC).

Parametry

- Výstupní proud: 2x 2 A, 1x 5 A
- Výstupní napětí: 2x 32 V, 1x 5.5 V
- Rozlišení: 10 mV/1 mA
- Přesnost měření napětí: ± 3 digity
- Přesnost měření proudu: ± 4 digity¹³ pro 2 A/ ± 1 digit pro 5 A
- Napájecí napětí: 230 V/50 Hz
- Hmotnost: 7.4 kg [20]



Obrázek 23. Hameg HM7042-5 [20]

¹³ Počet digitů – počet čísel zobrazitelných na x-místné digitální stupnici (u 4-místného displeje s rozsahem 5 V je počet digitů na tento rozsah 5000)

5.2.5 Greisinger GFTB 200

Greisinger GFTB 200 je teploměr, vlhkoměr a tlakoměr, který používám pro zjišťování laboratorních podmínek během svých experimentů. Dále disponuje funkcí přímého výpočtu teploty rosného bodu, která je pro mne zásadní, protože se snažím podchladiť DPS právě pod tuto hodnotu.

Parametry

- Rozsah měření teploty: -25 °C až $+70\text{ °C}$
- Přesnost měření teploty: $\pm 0.5\%$ měřené hodnoty ± 1 digit
- Rozsah měření vlhkosti: 0% až 100%
- Přesnost měřené hodnoty: $\pm 2.5\%$ měřené hodnoty ± 1 digit
- Rozměry: $67 \times 106 \times 30\text{ mm}$
- Napájení: 9 V baterie [21]



Obrázek 24. Greisinger GFTB 200 [21]

5.2.6 Lutron TM-914C

Lutron je dvoukanálový teploměr, který v kombinaci s teplotní sondou typu K¹⁴ sloužil pro zjištění teploty samotné DPS při kondenzaci vody. Díky němu jsem si dokázal zjistit potřebné hodnoty, které nastavím na zdroji pro napájení Peltierových článků.

Parametry

- Rozsah měření teploty: -40 °C až 1200 °C

¹⁴ Teplotní sonda používá styk kovů NiCr a NiAl

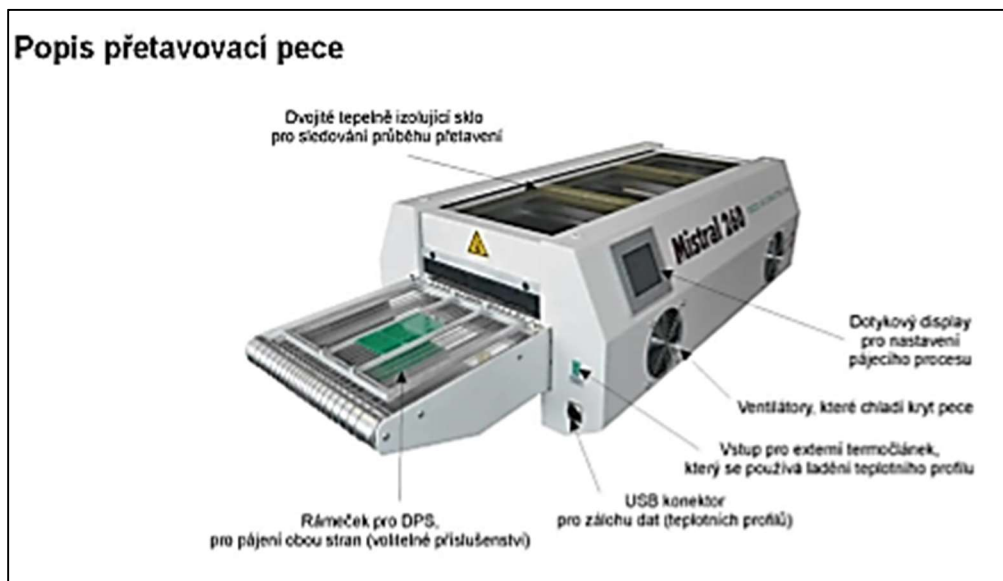
- Přesnost měření teploty: $\pm 1 \%$ měřené hodnoty ± 1 digit¹⁵
- Rozměry: 73 x 108 x 23 mm [22]



Obrázek 25. Lutron TM-914C [22]

5.2.7 Mistral 260

Mistral 260 je horkovzdušná pec. Disponuje dotykovým displejem, na kterém můžeme nastavit teplotu všech tří zón přetavení a rychlost dopravníku. Ve svém experimentu jsem ji použil pro přetavení pájecí slitiny nanesené na DPS. [4]



Obrázek 26. Mistral 260 [4]

¹⁵ Specifikace platí pro námi měřený rozsah 0 °C až 750 °C.

5.2.8 HAWK DUO QC-5000

HAWK DUO QC-5000 je binokulární lupa od firmy Vision Engineering. Je dodávána společně se softwarem, který umožňuje zvětšený obraz pozorovat přímo na monitoru počítače. Disponuje desetinásobným až tisícinásobným zvětšením, které realizujeme pomocí vyměnitelných čoček. [23]



Obrázek 27. HAWK DUO QC-5000 [23]

5.2.9 JBC DD 2A

JBC DD 2A je páječka, kterou jsem používal pro připájení drátů na desku plošných spojů. Teplotu pájení můžeme nastavit od 90 °C až do 450 °C.



Obrázek 28. JBC DD 2A

5.2.10 Mettler Toledo AG 245

Tyto vysoce přesné váhy jsem použil pro zjištění množství vody, které zkondenzuje na DPS během určitého časového intervalu při konstantním napájení Peltierových článků. Dále jsem byl schopný dopočítat tloušťku vrstvy zkondenzované vody.



Obrázek 29. Mettler Toledo AG 245 [26]

5.3 Příprava experimentu

5.3.1 Zajištění vhodných podmínek

Jak jsem uváděl dříve, experimentální pracoviště funguje na principu snížení povrchového odporu, díky vrstvě zkondenzované vody na povrchu DPS. V závislosti na tloušťce této vrstvy se zvyšuje pravděpodobnost elektrochemické migrace. Mým úkolem bylo zjistit tloušťku vrstvy, při které již dochází k migraci.

Základní myšlenkou bylo změřit hmotnost zkondenzované vody na vysoce přesných vahách v závislosti na době, po kterou je DPS podchlazována. Pro tento účel jsem předpokládal, že vrstva vody bude po celém povrchu DPS stejná. Zjištění tloušťky vrstvy jsem provedl přepočtem:

$$V = m \cdot 10^{-6} \quad (16)$$

$$X = \frac{V}{0,62^2} \cdot 10^5 \quad (17)$$

kde m – hmotnost zkondenzované vody [mg], X – tloušťka vrstvy [μm] a V^{16} – objem [dm^3].

Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v níže uvedené tabulce. Spodní Peltierův článek byl napájen 9.5 A/5.3 V, horní 5 A/3.5 V. Tyto hodnoty jsem zvolil, abych zamezil přílišnému tepelnému namáhání DPS.

Tabulka 2. Výpočet tloušťky vrstvy zkondenzované vody

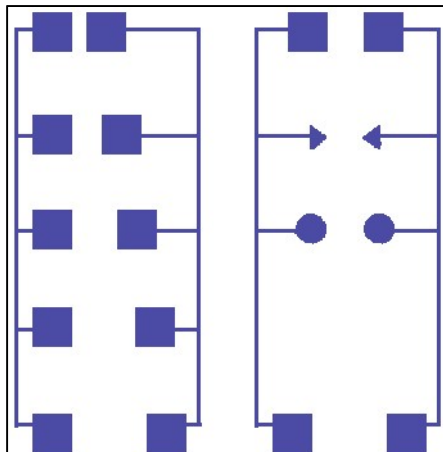
Čas [min]	m [mg]	V [dm^3]	X [μm]
5	42,6	4,26E-05	11,1
6	47,4	4,74E-05	12,3
7	50,0	5,00E-05	13,0
8	54,2	5,42E-05	14,1
9	84,8	8,48E-05	22,1

V tabulce jsou názorně vidět hodnoty tloušťky jednotlivých vrstev. Pozitivních výsledků jsem se dobral až po době kondenzace 9 minut. Pro další experimenty jsem tedy volil tento čas. Během práce v laboratoři jsme pomocí Greisingeru GFTB 200 naměřili teplotu 26.2 °C, relativní vlhkost 28.7 %, a teplotu rosného bodu 6.5 °C. Teplota desky kolísala kolem 0 °C.

¹⁶ 1 kg vody \approx 1 l \approx 1 dm^3

5.3.2 Příprava vzorků

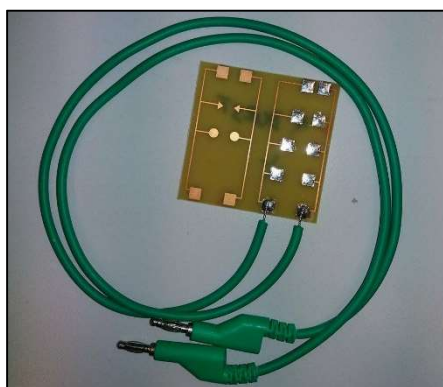
Po sestavení pracoviště pro pěstování dendritů jsem si musel připravit vzorky DPS, na kterých se pokusím dendrity vypěstovat. Použil jsem vzorky, které jsme s kolegou navrhli v rámci individuálního projektu v programu Eagle.



Obrázek 30. Návrh DPS

Pro zlepšení vhodných podmínek pro elektrochemickou migraci jsem šablonovým tiskem nanesl pájecí pastu SAC305. Pasta se skládá z 96.5 % cínu, 3 % stříbra a 0.5 % mědi. Toto složení by mělo podle mých teoretických předpokladů zvýšit pravděpodobnost elektrochemické migrace a s ní spojeného růstu dendritů. Následně jsem nanesenou pastu nechal přetavit v horkovzdušné peci.

Na základě prvních experimentů jsem použil DPS s povrchovou úpravou OSP, které se jeví jako neaktivnější. Na takto připravenou DPS bylo nutné připájet vodiče, bez kterých by nebylo možné připojit na DPS rozdílné potenciály.



Obrázek 31. Připravená DPS

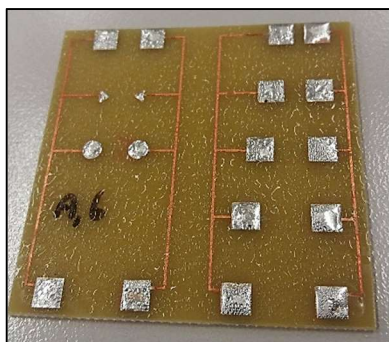
5.4 Experiment

5.4.1 Kondenzace vody

Připravené DPS jsem upevnil na horní Peltierův článek pomocí krokosvorek a zapnul počítačový zdroj, který napájí chladič. Následně jsem nastavil hodnoty zdroje Zhaoxin RXN-3010D-II následujícím způsobem:

- Spodní Peltierův článek: 9.5 A/5.3 V
- Horní Peltierův článek: 5 A/3.5 V

Důvod použití právě těchto hodnot jsem uvedl v předchozí kapitole. Po uplynutí 9 minut jsem zdroj vypnul. Protože se vlivem vypnutí zdroje přestane odvádět teplo, DPS po relativně krátké době dosáhne vhodnější teploty pro elektrochemickou migraci, než dosavadních 0 °C. Na Obrázku 32. můžeme vidět zkondenzovanou vodu na DPS.



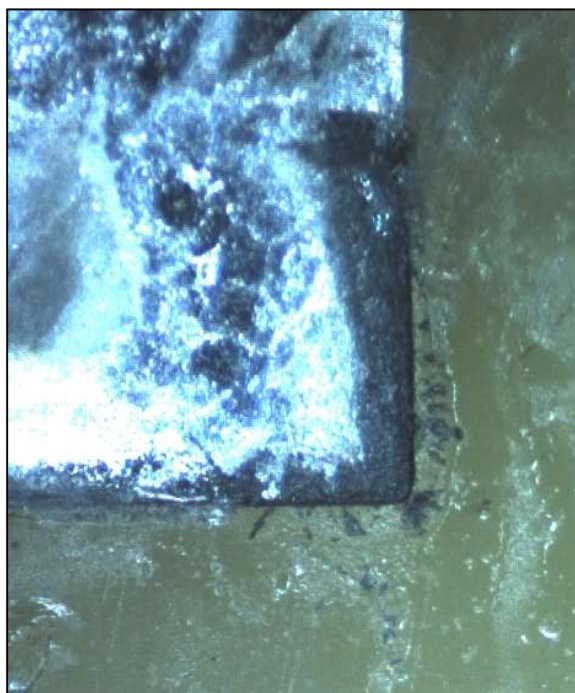
Obrázek 32. Kondenzace vody na DPS

DPS se nenachází přímo na pracovišti a je focena pod úhlem, z důvodu lepší viditelnosti vlhkosti.

5.4.2 Růst dendritů

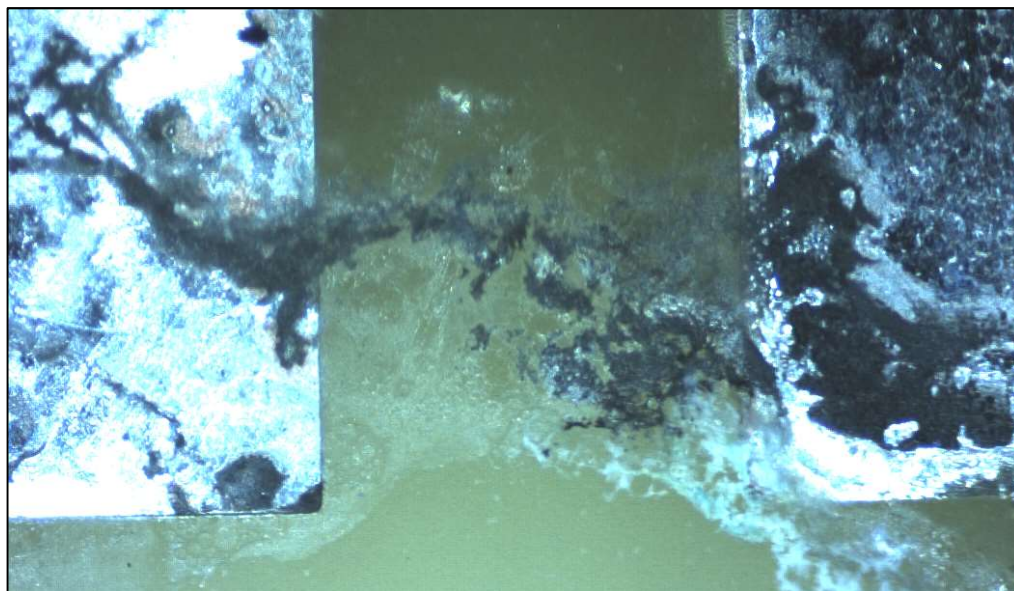
Po zkondenzování vody na DPS už chybí pouze připojit rozdílné elektrické potenciály. Po vypnutí napájení Peltierových článků jsem tedy připojil DPS na stejnosměrný zdroj Hameg HM7042-5 a pomocí připájených vodičů ji napájel 32 V. Vše jsem pozoroval pomocí binokulární lupy HAWK DUO QC-5000 na monitoru počítače.

První dendrity jsem vypěstoval při zjišťování nejaktivnější povrchové úpravy. Na Obrázku 33. můžeme vidět růst dendritů na povrchové úpravě HAL. Je patrné, že dendrity nepropojily místa s opačnými elektrickými potenciály, taková migrace ovšem může způsobovat nežádoucí úbytky napětí, případně pokračovat dále, až do přemostění. Dobře vidět jsou i charakteristické stromečkovité struktury.



Obrázek 33. Růst dendritu na DPS s povrchovou úpravou HAL

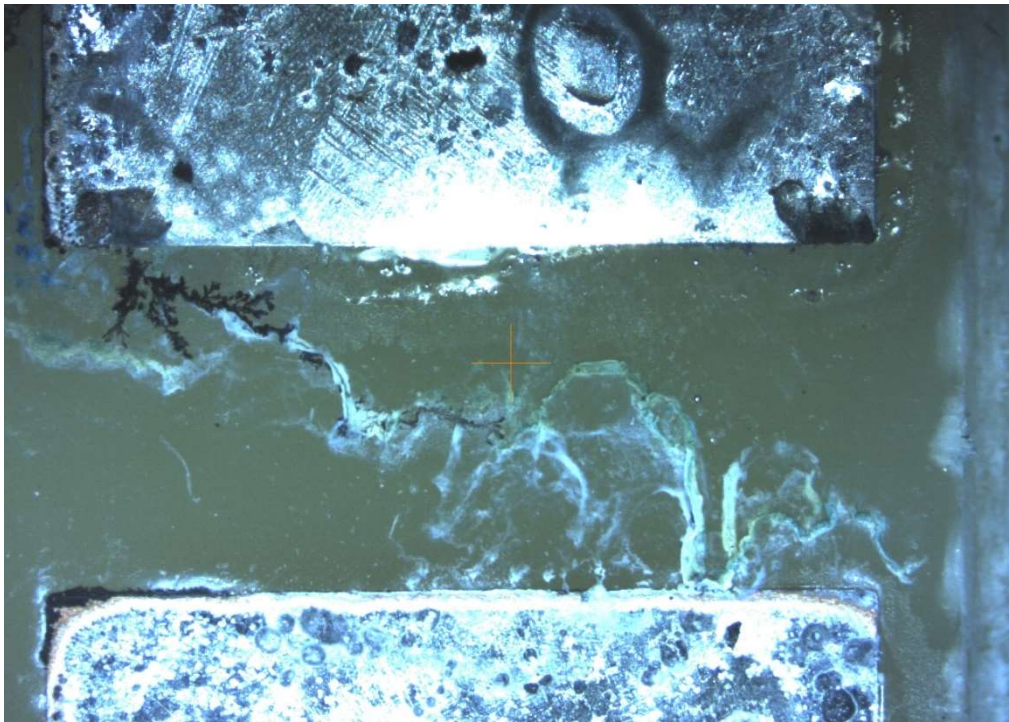
Další povrchovou úpravou, kterou jsem vyzkoušel byla OSP. Setkal jsem se s velmi pozitivními výsledky. Na Obrázku 34. můžeme vidět kompletně propojené vodiče s rozdílnými elektrickými potenciály. Protože migrace je již v pokročilém stádiu, charakteristické stromečkovité struktury už nejsou tak patrné.



Obrázek 34. Růst dendritu na DPS s povrchovou úpravou OSP

Protože mým cílem bylo experimentálně ověřit růst dendritů na sestaveném pracovišti, měl jsem v tuto chvíli prakticky hotovo. V experimentech jsem ovšem dále pokračoval s cílem vypěstovat dendrit s typickou stromečkovitou strukturou, který propojí místa s opačným potenciálem. Protože tyto místa se mi podařilo propojit pouze

na OSP, pokračoval jsem v testování takto ošetřených desek. Výsledkem mého snažení byl dendrit, který se nachází na Obrázku 35.



Obrázek 35. Stromečkovitá struktura dendritu na DPS s povrchovou úpravou OSP

Můj původní záměr přemostit pájecí plošky se neseťkal s úspěchem, typická dendritická struktura je zde ovšem vidět dokonale.

6. Závěr

V bakalářské práci je řešena problematika elektrochemické migrace a jejího důsledku – růstu dendritů. Cílem bylo seznámit čtenáře s podmínkami, které tento růst zapříčiňují, připravit pracoviště pro testování růstu dendritů a experimentálně ověřit jeho funkčnost.

V teoretické části se nejprve věnuji oblasti, která růst dendritů způsobuje – pájení. Zvláštní pozornost věnuji tavidlům, protože předpokládám, že tavidlové zbytky na deskách plošných spojů jsou schopné iniciovat elektrochemickou migraci. Dále se věnuji samotné elektrochemické migraci, vlhkosti a termoelektrickým jevům.

Praktická část obsahuje popis sestaveného měřicího pracoviště a technickou specifikaci všech použitých přístrojů. Při jeho konstrukci jsem využil celé řady poznatků z teoretické části. Příkladem mohou být informace o povrchovém odporu, vlhkosti nebo o rosném bodu. Pro testování jsem vybral pájecí pastu SAC305, která podle teoretických předpokladů dobře migruje. Tento předpoklad se potvrdil a díky tomu jsem byl schopen ověřit správnou funkci experimentálního pracoviště, zdokumentovat růst dendritů a vyhodnotit výsledky.

Poznatky z této bakalářské práce mohou být využity při dalším zkoumání elektrochemické migrace a vzniklé pracoviště může posloužit jako ukázka růstu dendritů v předmětu Svařování a pájení. Vypěstování dendritu na mém pracovišti zabere totiž přibližně 20 minut. Dle mého názoru by pro studenty bylo velice přínosné, kdyby mohli vidět dendrity růst na vlastní oči.

Myslím, že by bylo vhodné ve zkoumání elektrochemické migrace pokračovat. Se zvyšující se integrací vyráběné elektroniky a používáním bezolovnatých pájek bude tento problém stále aktuálnější.

7. Použitá literatura

- [1] TYLICH, Ondřej. *Elektromigrace tavivlových zbytků na povrchu DPS*. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [2] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03191-8.
- [3] KOBLÍŽEK, Vilém. *Měkké pájení v elektronice* [online]. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: http://martin2.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [4] NOVÁK, Ondřej. *Pájené spoje, růst dendritů*. Praha, 2016. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [5] Pájení kovů: Informace o uplatnění konstrukcí a navázaných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství. *Konstrukce* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/pajeni-kovu/>
- [6] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [7] DUŠEK, Karel. Pájení Úvod 1 [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/53549/mod_resource/content/1/pajeni_uvo_d1.pdf
- [8] ZRUBECKÝ, Filip. *Pájecí slitiny v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Martin Hirman.
- [9] MACH, Pavel. Pájení [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/P%C3%A1jen%C3%AD.pdf
- [10] PULEC, Jiří. *Analýza vlivu pouzdření na izolační vlastnosti*. Brno, 2009. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.

- [11] Měření relativní vlhkosti [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/TVVM6.pdf>
- [12] DUŠEK, Karel. Soldering and Solder Joints in Electronics. Praha, 2016. Habilitační práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie.
- [13] BUMILLER, Elissa a Craig HILLMAN. Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://www.dfrsolutions.com/uploads/white-papers/Time-to-Failure_Metallic_Migration.pdf
- [14] LAČNÝ, Radek. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Brno, 2010. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [15] Měření vlhkosti [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A5M38SZS/Vlhkomery3.pdf>
- [16] TEC1-12730 253W Thermoelectric Peltier Cooler Cooling [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/BQLZR-TEC1-12730-Thermoelectric-Peltier-Cooling/dp/B00EQ1X5EC>
- [17] Peltierův článek TEC1-12730 [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/peltieruv-clanek-tec1-12730>
- [18] ARCTIC Accelero Xtreme IV [online]. [cit. 2017-05-10] Dostupné z: <https://www.mironet.cz/arctic-accelero-xtreme-iv-tdp-300w-3x-92-mm-fluid-dynamic-bearing-04-sone-2000-rpm-nvidia-amd+dp257622/#popis>
- [19] Dvojité laboratorní zdroj RXN-3010D-II [online] [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/laboratorni-zdroje/linearni-transformatorove/dvojity-laboratorni-zdroj-rxn-3010d-ii-2x30v-10a-60v-10a-30v-20a.html>
- [20] Hameg HM7042-5 [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: www.farnell.comdatasheets318528.pdf
- [21] Greisinger GFTB 200 [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://www.rapidonline.com/pdf/649961_an_en_01.pdf

- [22] Lutron TM-914C [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.siliconinstrument.com.sg/pdf/Lutron/TM-914.pdf>
- [23] Non-contact measuring systems [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.optimaxonline.com/pdf/Optimax%20Hawk%20Family%20Brochure.pdf>
- [24] DD 2 Tools Control Unit [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://www.jbctools.com/pdf/DD_2A_MANUAL.pdf
- [25] Povrchové úpravy [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.lamirel.cz/povrchove-upravy/>
- [26] Mettler Toledo AG 245 Analytical Balance [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.marshallscientific.com/Mettler-Toledo-AG-245-Analytical-Balance-p/me-ag245.htm>

8. Seznam obrázků

Obrázek 1. Tvorba ručně pájeného spoje [3].....	12
Obrázek 2. Tlakové nanášení pájecí pasty [7].....	13
Obrázek 3. Pájení vlnou [7].....	14
Obrázek 4. Dvojitá vlna[7].....	15
Obrázek 5. Dutá vlna.....	15
Obrázek 6. Nesmáčivost DPS [12].....	18
Obrázek 7. Odsmačení DPS [12].....	19
Obrázek 8. Prohnutí pouzdra [12].....	19
Obrázek 9. Podélná trhлина (crack) [12].....	19
Obrázek 10. Kuličky pájky (beadings) [12].....	20
Obrázek 11. Efekt náhrobního kamene[12].....	20
Obrázek 12. Makrovoidy[12].....	21
Obrázek 13. Whisker [12].....	21
Obrázek 14. Růst dendritů.....	22
Obrázek 15. Testovací DPS dle normy IPC-B-25A [1].....	23
Obrázek 16. Typická dendritická struktura [1].....	25
Obrázek 17. Termoelektrický jev [2].....	31
Obrázek 18. Peltierův jev [2].....	32
Obrázek 19. Experimentální pracoviště.....	33
Obrázek 20. TEC1-12730 [16].....	34
Obrázek 21. Accelero Xtreme IV [18].....	35
Obrázek 22. Zhaoxin RXN-3010D-II [19].....	36
Obrázek 23. Hameg HM7042-5 [20].....	36
Obrázek 24. Greisinger GFTB 200 [21].....	37
Obrázek 25. Lutron TM-914C [22].....	38
Obrázek 26. Mistral 260 [4].....	38
Obrázek 27. HAWK DUO QC-5000 [23].....	39
Obrázek 28. JBC DD 2A.....	39
Obrázek 29. Návrh DPS.....	41
Obrázek 30. Připravená DPS.....	41
Obrázek 31. Kondenzace vody na DPS.....	42
Obrázek 32. Růst dendritů na DPS s povrchovou úpravou HAL.....	43
Obrázek 33. Růst dendritů na DPS s povrchovou úpravou OSP.....	43