

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

Pájené spoje, růst dendritů

Soldering and dendritic growth

Autor práce: Bc. Ondřej Novák

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

Studijní obor: Technologické systémy

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Ondřej Novák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Pájené spoje, růst dendritů**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši týkající se pájených spojů, jejich poruch a příčin se zaměřením na růst dendritů.
2. Pokuste se experimentálně dendrity vypěstovat na předem připravených vzorcích s různou povrchovou úpravou pájecích plošek.
3. Výsledky experimentu vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley, ISBN:9780470971826
- [2] Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology, ISBN: 9780824748708
- [3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 3. 2016

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho rady, pomoc a odborné vedení.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Pájené spoje, růst dendritů vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Ondřej Novák

Anotace:

Diplomová práce se zabývá elektrochemickou migrací a s tím souvisejícím růstem dendritů. Praktická část pak zkoumá vliv jednotlivých materiálů a prostředí a porovnává s teoretickými předpoklady.

Klíčová slova:

Pájení, elektrochemická migrace, růst dendritů

Abstract:

Diploma thesis deals with electrochemical migration and the related dendritic growth. The practical part examines the impact of individual materials and environment. This impact is compared with theoretical prediction.

Key words:

Soldering, electrochemical migration, dendritic growth

Obsah:

1 Úvod	8
2 Pájení.....	9
2.1 Základní vlastnosti pájených spojů	9
2.1.1 Přetavení.....	9
2.1.2 Intermetalické sloučeniny	10
2.1.3 Fázový diagram.....	10
2.1.4 Difuze.....	11
2.1.5 Smáčivost	12
2.1.6 Tavidla	13
2.2 Spolehlivost pájených spojů.....	14
2.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu spoje.....	14
2.2.2 Namáhání pájeného spoje	16
2.2.3 Chyby a vady související s pájenými spoji	16
2.3 Dělení pájení na základě teploty	20
2.3.1 Tvrdé	21
2.3.2 Měkké.....	21
2.4 Dělení pájení dle způsobu osazení součástek.....	21
2.4.1 SMT	21
2.4.2 THT	22
2.5 Dělení pájení dle zvolené technologie	22
2.5.1 Flow - pájení vlnou	22
2.5.2 Pájení přetavením.....	24
2.5.3 Pájení ruční páječkou	27
2.5.4 Pájení ponorem.....	28
3 Dendrity	29
3.1 Elektrochemická migrace.....	30
3.2 Faktory ovlivňující elektrochemickou migraci	31
3.2.1 Teplota	31
3.2.2 Relativní vlhkost	31
3.2.3 Přiložené napětí.....	31
3.2.3 Vzdálenost mezi vodiči	32
3.2.4 Vliv nečistot	32
3.3 Matematické modely.....	32
3.3.1 Arrheniusův model.....	32

4 Příprava experimentu	34
4.1 Postup přípravy	34
4.1.1 Návrh DPS	34
4.1.2 DPS s maskou a bez masky.....	35
4.1.3 Povrchové úpravy pájecích plošek.....	36
4.1.4 Pájecí pasty	36
4.1.5 Součástky	36
4.1.6 Šablona pro tisk.....	37
4.1.7 Příprava vzorků – nanesení pasty.....	37
4.1.8 Příprava vzorků – osazení součástek.....	38
4.1.9 Přetavení.....	38
4.1.10 Finální počet vzorků.....	42
5 Experiment	43
5.1 První část – dlouhodobý experiment.....	43
5.1.1 Průběh prvního experimentu	43
5.1.2 Snímky z mikroskopu	44
5.1.3 Poznatky z experimentu	48
5.2 Druhý experiment	48
5.2.1 Průběh druhého experimentu	49
5.2.2 Výsledky druhého experimentu	50
5.2.3 Snímky z mikroskopu	51
5.2.4 Poznatky z druhého experimentu.....	56
6 Závěr	59
Zdroje	61
Seznam obrázků	63

1 Úvod

V současnosti lze jednoznačně konstatovat, že v elektrotechnickém průmyslu neexistuje odvětví, které nevyužívá technologický proces pájení. Zjednodušeně lze pájení charakterizovat, jako základní spojování kovových předmětů za tepla. V dnešní době se používá velké množství pájecích slitin, tavidel, technologií a materiálů. Právě volba nejčastěji používaných materiálů prošla v posledních letech rapidní změnou. Lidé si začali uvědomovat, že spousta běžně užívaných materiálů v sobě obsahuje látky, které mohou mít negativní vliv na lidské zdraví a na životní prostředí. Jako příklad by se dalo uvést i použití bezolovnatých sloučenin. Velkým kladem je omezení využití toxického olova, ale na druhou stranu bezolovnaté sloučeniny v oblasti pájení přinášejí celou řadu technologických problémů a rizik.

Při pájení má zásadní význam kvalita spoje, a právě na ní je kladen velký důraz. Spoj totiž bývá často značně namáhaný nejen mechanicky a elektricky, ale velký vliv na něj má i prostředí, v kterém je provozován. Na deskách plošného spoje může docházet k mnoha chybám, jako například zkratům, nebo naopak chybějícím spojům. Ve své diplomové práci se právě těmto jevům budu věnovat s důrazem na elektrochemickou migraci a růst dendritů.

Celá práce bude rozdělena na dvě části – teoretický úvod a experimentální část. V první části se budu zabývat obecně pájením – základní teorií, spolehlivostí, chybami a základním rozdělením. Na konci první části se pokusím zpracovat teorii ohledně elektrochemické migrace a růstu dendritů. Tyto informace by mi měly pomoci s druhou praktickou částí diplomové práce.

V experimentální části si připravím desky plošných spojů s různými povrchovými úpravami. Tyto desky plošných spojů budu osazovat součástkami, přetavovat různými technologiemi a pokusím se na nich vypěstovat dendrity. Bude třeba, za pomoci teorie, vymyslet laboratorní podmínky, které elektrochemickou migraci umožní. Desky plošného spoje budu dlouhodobě pozorovat a výsledky budu prezentovat na fotografiích, pořízených na mikroskopu. Na závěr se pokusím sepsat jednotlivé poznatky a postřehy, kdy a za jakých podmínek docházelo k růstu dendritů a kdy nikoliv.

2 Pájení

Následující kapitola se zabývá základní teorií o pájení. Naleznete zde vybrané metody, technologie, vlastnosti a v neposlední řadě nejčastější chyby, vzniklé v pájeném spoji.

V průběhu pájení probíhá chemická reakce nejběžněji mezi cínem a mědí za vzniku intermetalické sloučeniny. Jedná se o jednu z nejstarších metod spojování dvou kovů. Během vývoje vzniklo mnoho metod a modifikací, které mají vliv na kvalitu a pevnost pájeného spoje. Obecně je pájený spoj velmi náchylný k poruchám – jedná se o místo, kde se spojují dvě rozhraní o různých vlastnostech. Dalším problémem posledních let je neustátá miniaturizace součástek a rostoucí proudová hustota v jednotlivých spojích. Dalším faktorem je například důraz na ekologický design elektrotechnických výrobků, proto se stává dříve nejběžnější slitina na bázi cínu a olova nepoužitelnou. Olovo je silně toxický materiál a výrobky, které ho obsahují, jsou automaticky zařazené mezi nebezpečné odpady. Nahrazováno je jinými bezolovnatými sloučeninami, z nichž některé budou probrány níže. [1]

2.1 Základní vlastnosti pájených spojů

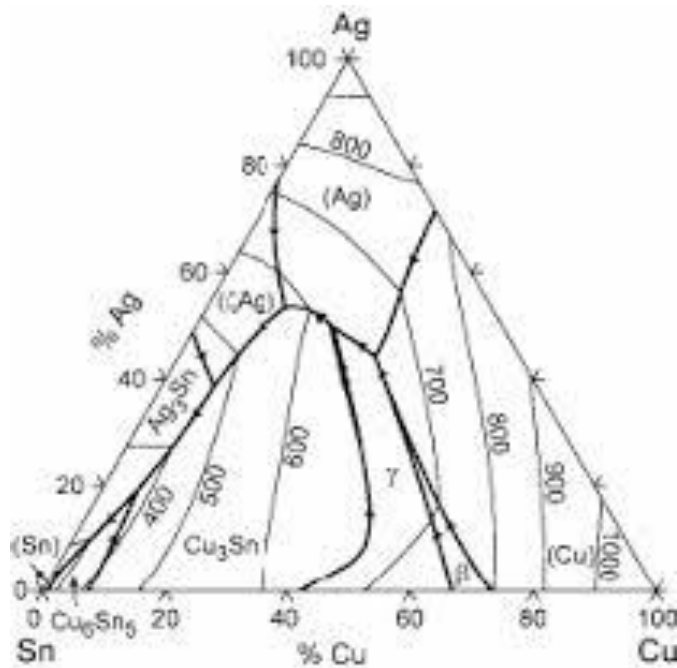
V této kapitole shrnu stručně základní vlastnosti pájených spojů. Tato problematika je důležitá především z toho důvodu, že se, v pozdějších fázích diplomové práce, budu zabývat spolehlivostí pájených spojů se zaměřením na dendrity, proto je třeba pochopit základní fyzikální a chemické jevy, které se pájení týkají.

2.1.1 Přetavení

Přetavení se skládá z několika dílčích procesů na rozhraní tuhé a tekuté fáze. Pokud je dodáno určité množství tepelné energie krystalickému materiálu, pak dochází k jeho roztavení. Rozpadne se krystalická mřížka a s ní i struktura materiálu. Atomy mohou volně kmitat, s čímž souvisí nárůst entropie. Dochází ke smáčení a na rozhraní dvou povrchů vznikají intermetalické sloučeniny. Po ustálení teploty začíná docházet k odpařování. Následující proces tuhnutí popisuje změnu skupenství zpět na pevné. Spoj začne chladnout, obnoví se struktura a dojde ke krystalizaci. Správný způsob tuhnutí má zásadní vliv na výslednou kvalitu pájeného spoje. [1], [4]

2.1.2 Intermetalické sloučeniny

Intermetalické sloučeniny vznikají z toho důvodu, že pájený spoj je tvořený cínem a ostatními kovy, které mají rozdílnou krystalickou mřížku a její parametry. Dalším důvodem je existence různých chemických vazeb, a to kovová, iontová a kovalentní. Z těchto jevů vychází i výsledné vlastnosti pájeného spoje. Intermetalické sloučeniny například Ag_3Sn obsahují větší množství atomů o větší hustotě, než samotný cín. To má za následek větší tvrdost a křehkost této sloučeniny. Obecně platí, že vazby mezi atomy v intermetalických sloučeninách jsou silnější. [1], [4]



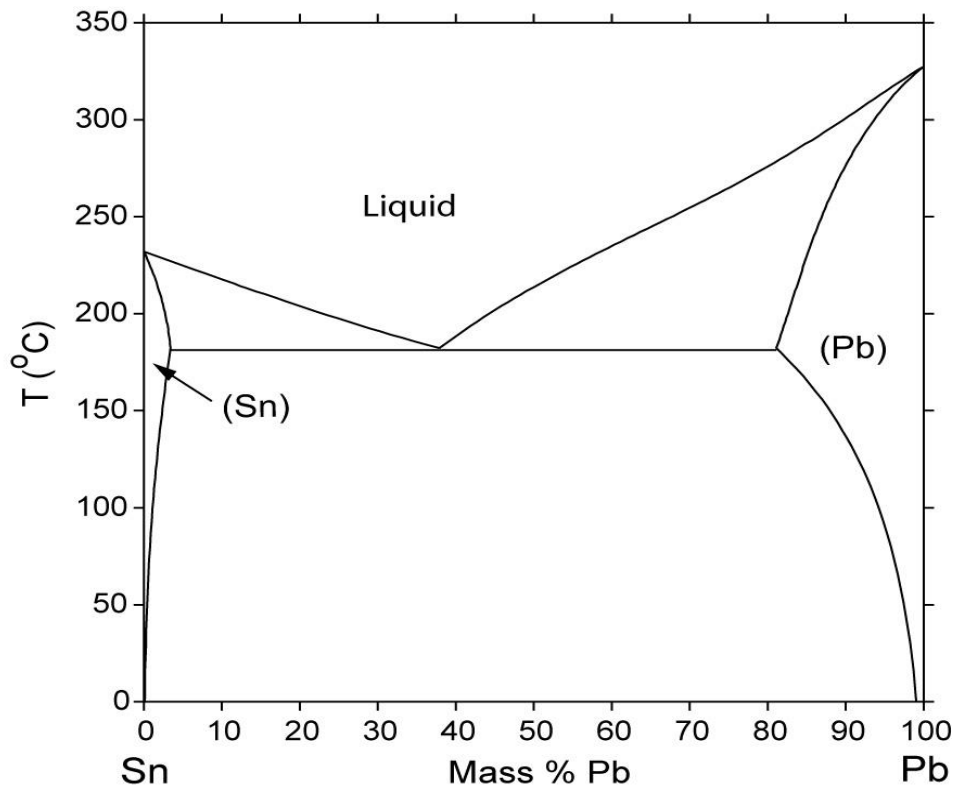
Obr. 1 Diagram vzniku intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájky [4]

2.1.3 Fázový diagram

Parametry a vlastnosti pájecích slitin úzce souvisí s jejich fázovými diagramy, z kterých je lze odvodit. Znalost těchto diagramů pomůže vyřešit mnohé technologické problémy.

Pájecí slitiny nemění strukturu při jedné určité teplotě, ale v intervalu teplot. V tomto intervalu mění svojí strukturu a vlastnosti, takže pro technologii je důležité vědět, jaké složení má daná slitina při určité teplotě.

Jednodušší případ jsou jednoduché slitiny dvou kovů. Jedná se například o pájku SnPb. Fázový diagram má typický tvar písmene V, kde spodní bod je eutektický. [1], [4], [5]



Obr. 2 Fázový diagram SnPb pájky [8]

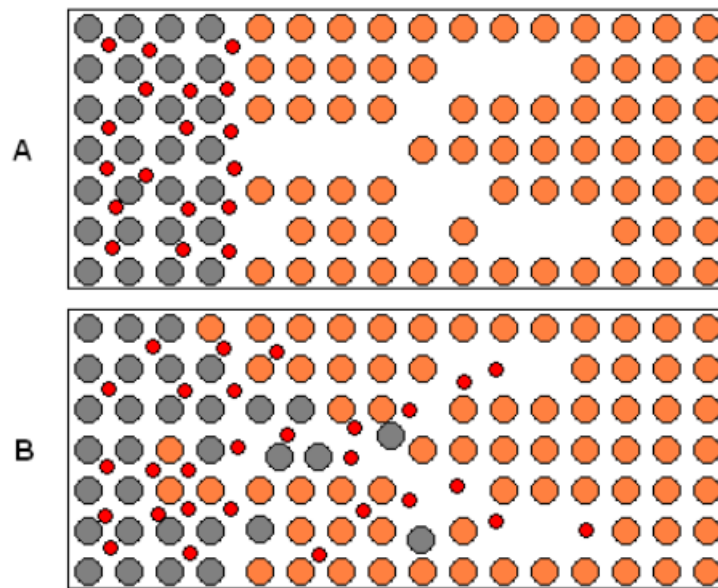
2.1.4 Difuze

Difuze je proces, kdy se atomy náhodně pohybují a rozptylují po prostoru a postupně vyrovnají svou koncentraci.

U kovů nejprve atomy kmitají, ale jsou vázány ve své krystalové mřížce. S rostoucí teplotou se z mřížky uvolní a mohou se začít samovolně pohybovat po náhodných drahách po celém prostoru. Tento moment je obecně známý, jako změna skupenství.

Tohoto jevu se využívá právě v pájení. Po zkapalnění se začnou atomy pájky volně pohybovat a některé z nich proniknou i do pájeného povrchu, zatímco atomy z pájeného povrchu naopak proniknou do pájky. Vzhledem k tomu, že některé atomy

mohou být menší než druhé, tak mohou proniknout i do větších hloubek pájeného povrchu. [1], [4]



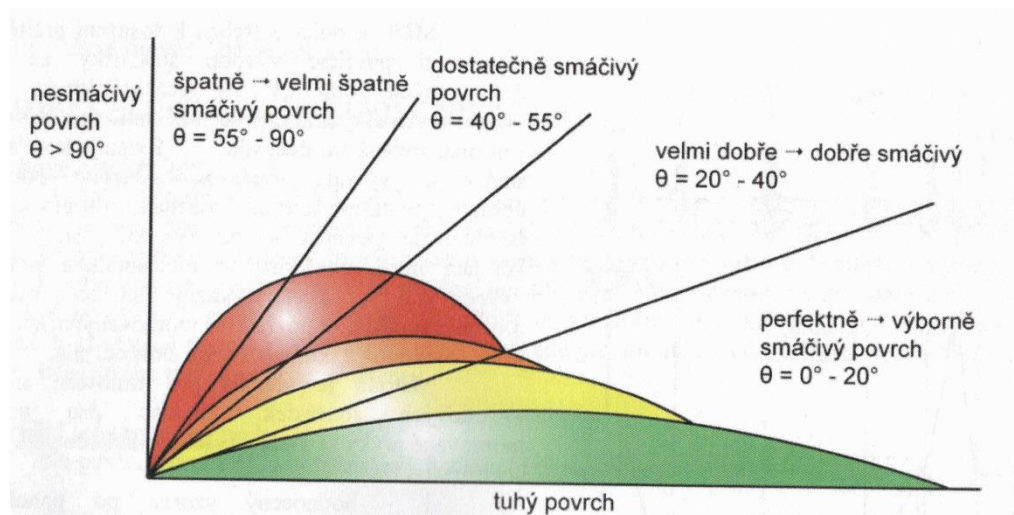
Obr. 3 Vliv difuze za pokojové a zvýšené teploty [4]

2.1.5 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost povrchu. Na povrchu s dobrou smáčivostí se vytvoří, po styku s roztavenou pájkou, tenká souvislá vrstva materiálu. Pro hodnocení tohoto faktoru se užívají dvě kritéria: Stupeň smáčivosti (jak daleko a rovnoměrně se materiál rozteče) a rychlost smáčení. Tyto faktory se dají ovlivnit použitím tavidla a rovnoměrným účinným zdrojem tepla.

Samotná roztavená pájka působí jako kapalina, proto se snaží dostat do kulového tvaru. Tento jev je způsoben velkými přitažlivými silami mezi atomy a molekulami. V kulovitém tvaru má pájka nejmenší povrch a nejmenší množství energie, proto se ho za pomoci povrchového napětí snaží dosáhnout.

Po styku roztavené pájky se substrátem se povrchové napětí pájky a substrátu navzájem vyrovná. Z chování pájky následně poznáme, jestli je povrch smáčivý, či nikoliv. Pokud je, smáčecí úhel velmi malý, pak jsme dosáhli dobrého smáčení. Naopak pokud je úhel velký a kapka roztavené pájky zůstala vypouklá, pak je povrch nesmáčivý, či špatně smáčivý. [1], [9]



Obr. 4 Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [9]

2.1.6 Tavidla

Do pájecích past se kvůli zlepšování pájecích vlastností přidávají tavidla. Tvoří přibližně desetinu hmotnosti pasty. Podmínkou kvalitního pájeného spoje je čistý povrch pájecích plošek – to znamená odstranění nečistot, oxidů a jiných látek. Zároveň výsledný spoj by měl být chráněn proti oxidaci. Tyto vlastnosti má právě již zmíněné tavidlo – odstraňuje nečistoty, oxidy, zabraňuje přístupu vzduchu během pájení, zlepšuje smáčivost a chrání výsledný spoj. Tavidlo má rovněž vliv i na vlastnosti samotné pasty. Konkrétně ovlivňuje její viskozitu a lepivost.

Obecně by se dala tavidla rozdělit do tří skupin: Organická, anorganická a kalafunová.

- Organická tavidla jsou využívána pro pájení vlnou, obzvláště pro povrchovou montáž. Zbytky tavidel se snadno odstraňují, protože jsou rozpustné pomocí polárních rozpouštědel na bázi vody, což je zároveň jejich největší výhoda oproti tavidlům anorganickým. Zároveň mají o něco lepší vlastnosti než tavidla kalafunová
- Anorganická tavidla se příliš hojně nepoužívají z důvodu vysokého obsahu solí. Zanechávají po aplikaci chemicky aktivní zbytky a způsobují korozi. Jejich uplatnění je hlavně v neelektrických aplikacích.
- Kalafunová tavidla jsou založena na přírodní pryskyřici. Tavidla jsou rozpustná například v alkoholu. Velké uplatnění naleznou v olovnatém pájení, pro jehož

aplikaci mají ideální teplotu tání okolo 170 °C. Pro bezolovnaté pájení jsou do kalafuny přidávány další aktivátory, aby se zvýšila její účinnost i při vyšších teplotách. [1]

Ve svojí práci budu využívat tavidla pro bezolovnaté pájky. Tyto pájky mají obecně vyšší povrchové napětí, než pájky olovnaté, proto je obzvláště podstatné vylepšit jejich smáčivost. Dalším problémem může být fakt, že pro přetavení bezolovnatých pájek je třeba vyšší teplota – to znamená, že tavidlo musí rovněž vydržet vyšší teploty a nesmí se odpařit. Z tohoto důvodu se využívají tavidla s velkým podílem pevné složky. V průmyslové výrobě se běžně užívají tavidla, která jsou omyvatelná vodou. Obsahují velké množství aktivátorů a agresivních složek, které zabraňují oxidaci. Jejich nevýhodou je ekologická závadnost a nutnost jejich odstraňování po samotném pájení.

Vhodné řešení pro bezolovnaté pájení jsou tavidla VOC-free. Tato tavidla jsou ekologicky nezávadná. Obsahují 4-15 % pevné složky. Hůře se nanášejí, ale naopak jsou rychle aktivní, co se týče deoxidace povrchu. Jako aktivátor se používá živice. V tekutém skupenství odstraňují oxidy a čistí pájecí plošky, čímž zlepšují smáčivost povrchu a tím pádem i výslednou kvalitu. Dále poskytují ochranu vůči korozi, protože nejsou rozpustné ve vodě. [1]

2.2 Spolehlivost pájených spojů

Spolehlivost pájeného spoje lze definovat jako čas, během kterého je zaručená funkčnost (pevnost, vodivost ...). Na spolehlivost spoje má vliv velké množství faktorů. Může se jednat o použité materiály, tavidla, či samotný proces pájení. Dle použitých materiálů a procesů bude mít výsledný spoj určitou odolnost vůči teplotnímu namáhání, mechanickému namáhání, či stárnutí. Dalším faktorem jsou samozřejmě i podmínky, ve kterých je spoj provozován. [4]

2.2.1 Faktory ovlivňující kvalitu spoje

Pájka a její složení

Správný výběr pro danou aplikaci je jeden z nejdůležitějších faktorů, který má vliv na výslednou kvalitu spoje. Její složení určuje hlavně teplotu tání a tuhnutí, viskozitu roztavené pájky a smáčivost. Různé pájky se mohou lišit i množstvím nečistot

a oxidů, či povrchovým napětím. Důležité je i správné skladování a stáří pájecí pasty. [1]

Použití tavidla

Hlavní účelem použití tavidla je příprava povrchu. Správně použité tavidlo očistí povrch od oxidů a nečistot a ovlivňuje i smáčivost daného povrchu. Nevýhodou tavidla je, že teplota a čas pro pájení spoje je potřeba vyšší. [1]

Pájený povrch

Z pájeného povrchu je třeba odstranit maximum nečistot a oxidů. S tím přímo souvisí smáčivost povrchu. Pokud je povrch nedostatečně smáčivý, pak je nutné použít tavidlo (viz minulý odstavec) [1]

Průběh pájení

Výslednou kvalitu spoje velkou měrou ovlivňuje i průběh pájení – zvolená technologie, čas, rychlost ochlazování apod. Důležitý je správný teplotní profil peci, správná teplota páječky a teplota povrchu. V případě špatného průběhu pájení je běžný vznik studených spojů a dalších chyb. [1]



Obr. 5 Diagram vlivů na výslednou spolehlivost pájeného spoje. [10]

2.2.2 Namáhání pájeného spoje

Na pájený spoj a obecně na desku plošného spoje působí velká řada vlivů. Zde bychom mohli jmenovat atmosférické podmínky (vlhkost, teplota, tlak), mechanické namáhání nebo například i vliv solí, nečistot a oxidů. Velký vliv má i stárnutí materiálu, jelikož ve spoji probíhají postupem času chemické změny. Ty jsou způsobeny působením, již zmíněných atmosférických vlivů. Časem klesá pevnost spoje a zvyšováním odporu se zhoršují elektrické vlastnosti.

Mechanické namáhání

Pájený spoj je neustále alespoň v minimální míře mechanicky namáhán. Obecně na něj může působit vnější nebo vnitřní síla.

- Vnitřní – Vzniká kvůli rozdílné teplotní roztažnosti materiálů součástky a desky plošného spoje. Tím vzniká vnitřní napětí.
- Vnější – Působení tlaku, vibrací a jiných vnějších sil

Tepelné namáhání

Pájený spoj může být namáhán i vlivem tepla. To může být dvojího druhu. Teplo vyvolané ztrátami v obvodu a teplo vnější (například jiný spotřebič, sluneční záření ...). Změny vyvolané těmito jevy mohou být vratné nebo nevratné.

V praxi je pájený spoj vystavený v jisté míře všem vlivům, které jsem výše zmínil. Za určitých podmínek to může mít pro spoj fatální následky. Pokud bychom například dosáhli vysoké vlhkosti a teploty může dojít ke korozi (vliv vlhkosti a například CO_2 nebo SO_2) nebo iontové migraci. Tyto jevy budou popsány v kapitole 3. [1], [5], [15]

2.2.3 Chyby a vady související s pájenými spoji

Při pájení může vzniknout celá řada chyb a výrobní proces by měl být od samého začátku monitorován. Základem kvalitního spoje u pájení přetavením je správně zvolená pájecí pasta, neopotřebovaná a čistá šablona a správné množství nanesené pasty. Dalším krokem je umístit vhodné součástky na předem určené místo a celou DPS přetavit některou z vhodných technologií. Přes dodržení všech postupů, může dojít k některým chybám, a to provozováním pájeného spoje v náročných podmínkách.

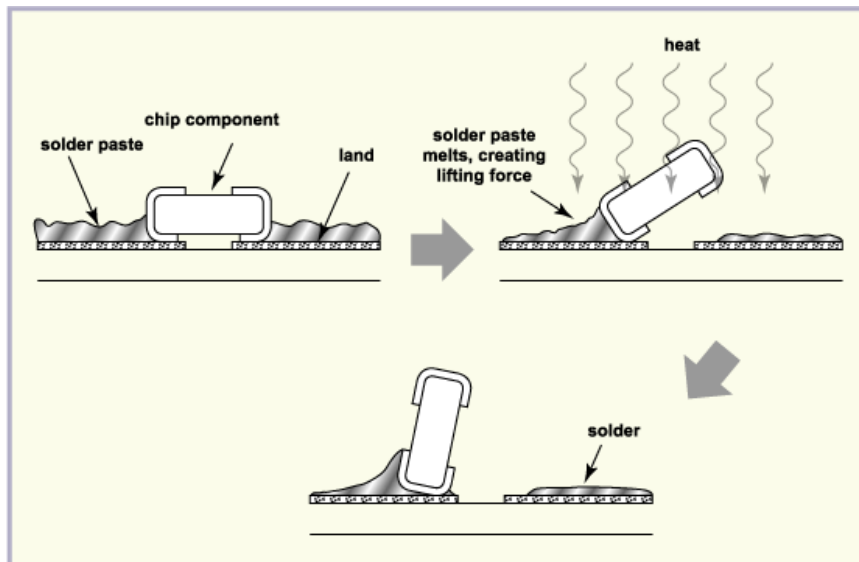
Oxidace

Pokud chceme stabilní pájený spoj s dobrými elektrickými a mechanickými vlastnostmi, pak je třeba začít od samého počátku – odstraněním nečistot a oxidů z desky plošného spoje. Po výrobě mohou být na kovových ploškách zbytky ať už organických, či anorganických nečistot. Kdyby nedošlo k jejich odstranění, mohly by ovlivnit smáčivost a tím i výslednou kvalitu pájeného spoje.

Většina vad vzniklých při pájení má úzkou souvislost s oxidací. Nedokonalým vyčištěním povrchu desky plošného spoje je tento jev urychlován. Je proto třeba, dle množství nečistot a použitého materiálu, vybrat vhodné tavidlo. Jeho dávkování je rovněž problematické. Zatímco malé množství by nemuselo desku dostatečně vyčistit, velké množství může zanechat zbytkovou vrstvu tavidla na desce a do budoucna negativně ovlivnit vlastnosti. Neodstraněním oxidační vrstvy může vzniknout například koroze pod umístěnými součástkami. [1], [5], [6]

Tombstoning

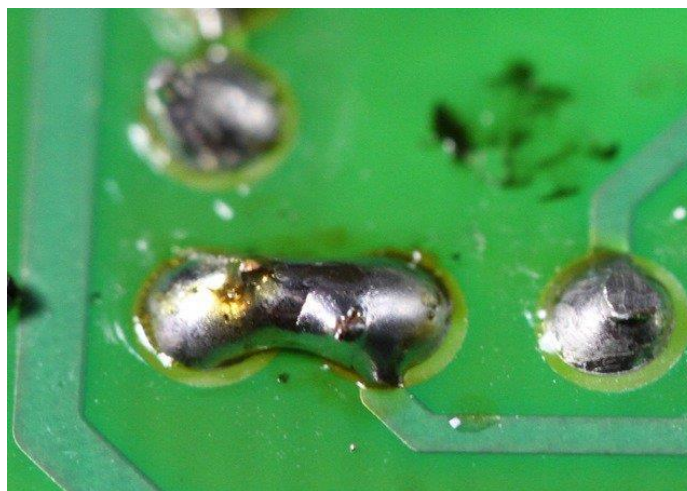
Tombstoning neboli nadzvednutí součástky je jev ke kterému dochází při povrchové montáži SMD součástek. Obecně jde o situaci, kdy je součástka připájená pouze za jeden vývod. Před přetavením se zdá být vše v pořádku – součástka je umístěná na správném místě a pod ní je nanесena pájecí pasta. Problém nastane při přetavení. Součástka se připájí jen na jednom vývodu a druhá strana se postaví v některých případech až do kolmé polohy. Tento jev je způsoben povrchovým napětím, kdy nejčastějším problémem je nerovnoměrné množství nanесené pájecí pasty, nerovnoměrný ohřev, či nestejná smáčivost každého z vývodů. Jedná se o fatální chybu, jelikož kompletně chybí jeden z vývodů. [7], [11]



Obr. 6 Tombstoning [11]

Můstek

Při nanášení pasty může vzniknout situace, kdy se pastou propojí 2 pájecí plošky. Toto nechtěné spojení vytvoří v podstatě zkrat. Jedná se o běžnou chybu při nanášení pasty přes šablonu. Nejčastější příčinou můstku je špatné čištění, či špatný návrh šablony a nevhodný tlak na stěrku. V některých případech si lze této chybě všimnout po nanášení pasty pouhým okem, ale v případě malých roztečí a velkých ploch DPS se používá SPI. Jedná se o optickou kontrolu „Solder paste inspection“. V horším případě se můstek projeví až po přetavení, kdy se vlivem tepla a smáčivost pasta rozteče do stran a k nechtěnému propojení dojde později. [7], [1]



Obr. 7 Můstek na DPS [7]

Otevřené, či chybějící spoje

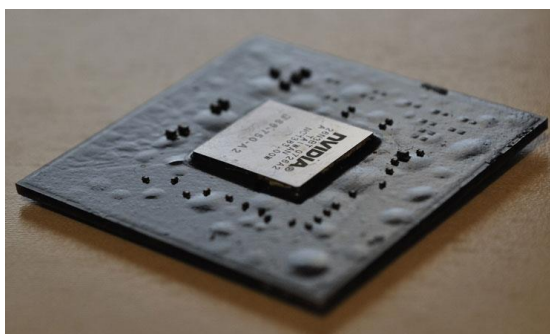
Jedná se o chybu, kdy po přetavení zůstane spoj otevřený, či nekvalitně spojený. Součástka nedokonale dosedá na plošku desky plošného spoje. Dochází k výraznému zvýšení odporu, nebo dokonce ke kompletnímu odpojení součástky. Tato chyba je nejčastěji způsobena vzlínáním pájky po vývodu součástky, nedostatečnou smáčivostí, špatně vysušeným, či nevhodně zvoleným tavidlem, částečně ucpanou šablonou a chybným množstvím nanesené pájecí pasty. Problematice přispívá i nevhodně zvolený přehřev při přetavení – nedostatečná aktivace tavidla. [6], [7]

Špatné umístění součástky

Tento jev vzniká především při ručním osazování. Součástka může být osazena šikmo, nebo může být posunuta blíž k některému z vývodů. Tato problematika se ve většině případů, vlivem povrchového napětí, napraví „sama“. Součástka se během přetavení posune do správné polohy. V některých případech může být součástka umístěna tak špatně, že ani povrchové napětí nepomůže a součástka se zapájí jako nakloněna nebo dojde k již zmíněnému „tombstoning efektu“ či otevřenému spoji. [5], [6], [7]

Popcorn efekt

Tento jev se vyskytuje u zapouzdřených součástek například do plastu. Pokud je součástka vystavena (uskladněna) v nepříznivých podmínkách, pak může absorbovat vlhkost. Tato vlhkost se při přetavení vlivem teplotního šoku začne rozpínat, čímž může poškodit pouzdro součástky. Na něm pak vznikají typické vyvýšeniny a „boule“. [5]



Obr. 8 Popcorn efekt [5]

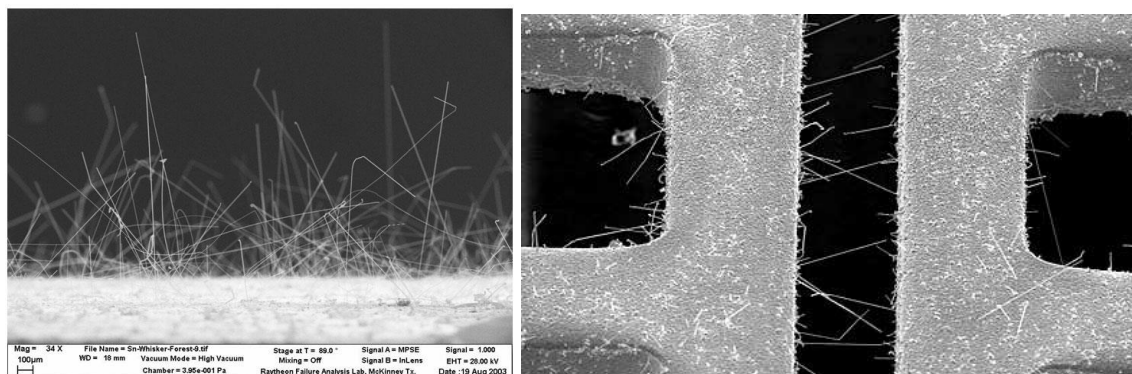
Voidy

Kvalita pájeného spoje se dá určit podle jeho pórovitosti. Ve struktuře spoje se objevují jak menší (jednotky až desítky mikronů), tak větší (stovky mikronů) dutiny, které zhoršují jeho spolehlivost a elektrické a mechanické vlastnosti. Tento jev může být způsoben několika vlivy. Jako příklad bych uvedl odpařování plynů z tavidel během procesu přetavení a příliš rychlé tuhnutí pájky, které způsobuje protáhlé tzv. „shrinkage voidy“ na jejím povrchu. [7]

Whisker

Jedná se o kovové „vláskové“ výrůstky na povrchu materiálu. U bezolovnatých pájek jsou tvořeny cínem. Rozměry whiskeru jsou v jednotkách mikronů, zatímco délka může dosahovat až 1 cm, nejčastěji však jednotky mm. Whiskery se objevují tam, kde na ně působí určitá vlhkost a teplota, za předpokladu vhodné krystalové struktury a mechanického namáhání. Materiál musí splňovat i vhodnou velikost zrn.

Tyto krystaly sice rostou vzácně a velice pomalu, ale po čase může dojít dokonce k nechtěným zkratům. [1], [12]



Obr. 9 Příklady whiskerů [12]

2.3 Dělení pájení na základě teploty

Na základě teploty dělíme pájky na měkké a tvrdé. Měkké se vyznačují nižší teplotou přetavení, zatímco tvrdé teplotou vyšší.

2.3.1 Tvrdé

Teplota tavení u tvrdých pájek je běžně více než 400 - 450 °C. Používá se všude tam, kde jsou spoje vystaveny velkému zatížení. Konkrétně jde o aplikace, které se ani nemusí týkat elektrotechniky, jako například příruby trubek, spojování rámu kol a motocyklů, ale i pro pájení žáruvzdorných ocelí. [1]

Při tvrdém pájení se používají slitiny kovů s vyšší teplotou tavení. Jedná se o slitiny na bázi stříbra, niklu, zinku, ale i mědi. Pro některé aplikace se používají i drahé kovy. Ve výjimečných případech se používají i čisté kovy, které se často pájí ve vakuu. Jedná se o zlato, měď a paladium. [1]

2.3.2 Měkké

Měkké pájení má mnohem širší využití, než pájení tvrdé. Hranice pro měkké pájení je do 400 °C, ale běžně se jedná o teploty mnohem nižší. Používá se všude tam, kde není požadavek velmi namáhaného spoje. Z konkrétních příkladů se jedná například o spoje v bižuterii, vodotěsné spoje, okapy, ale hlavním a nejzajímavějším odvětvím je pájení elektricky vodivých spojů v elektrotechnice.

Měkká pájka je slitina kovů s nízkou teplotou tavení. Používané kovy jsou olovo, cín, kadmium, zinek, stříbro atd. Dříve nejběžněji používaná slitina 37% olova a 63 % cínu je dnes již z důvodu toxicity nahrazována bezolovnatými slitinami. Měkká pájka je nejčastěji ve formě dutého drátu, který má uvnitř obsažené tavidlo. Druhou možností je pájka ve formě pasty, která se nanáší přes masku na plochu DPS a přetavuje se například horkým vzduchem, či v parách. Nevýhodou bezolovnatých pájek je často vyšší cena, vyšší teplota tavení a horší smáčivost. [1]

2.4 Dělení pájení dle způsobu osazení součástek

Pro výběr vhodné technologie je důležitý i způsob montáže součástek. V elektrotechnice se používají 2 způsoby osazování THT a v dnešní době perspektivnější SMT.

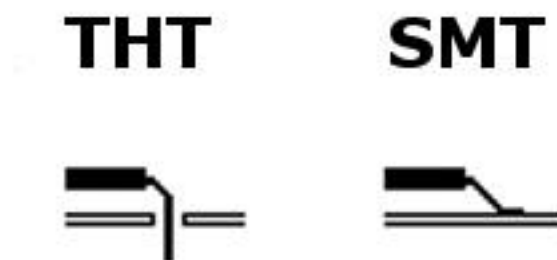
2.4.1 SMT

SMT (Surface mount technology), neboli způsob, kde se součástky osazují na povrch DPS. Jejich kontaktní plošky jsou přímo v rovině pouzdra součástky například

na jeho obvodu. Tento způsob umožňuje jednodušší automatizaci, celkově menší a lehčí zařízení a ve finále je levnější. Další výhodou je možnost osazování součástek z obou stran DPS – mnohem větší hustota osazení součástek. Automatizace je realizována osazovacími zařízeními, která dle naprogramovaného softwaru nanesou pastu, osadí správné součástky a připravenou DPS již stačí jen přetavit. Když je deska hotová, tak je důležitá i následná kontrola. [1]

2.4.2 THT

Druhý způsob montáže součástek je THT (Through hole technology), neboli způsob, kdy vývody součástek jsou prostrčeny skrz DPS a připájeny jsou z druhé strany. Součástky jsou dodávány s dostatečně dlouhými vývody, aby byly universální a bylo možné je dle dané aplikace nastříhat a ohýbat. [1]



Obr. 10 Tvary vývodů THT a SMT součástek

2.5 Dělení pájení dle zvolené technologie

Nejčastěji využívanými technologiemi v průmyslu jsou pájení vlnou a přetavením. Další používaný způsob je selektivní, neboli ruční pájení. Každá metoda má svá pro a proti. Zatímco pájení vlnou a přetavením umožňuje hromadnou výrobu, selektivní pájení umožňuje drobné opravy v rámci celé desky – například během vývoje, výměny součástek apod.

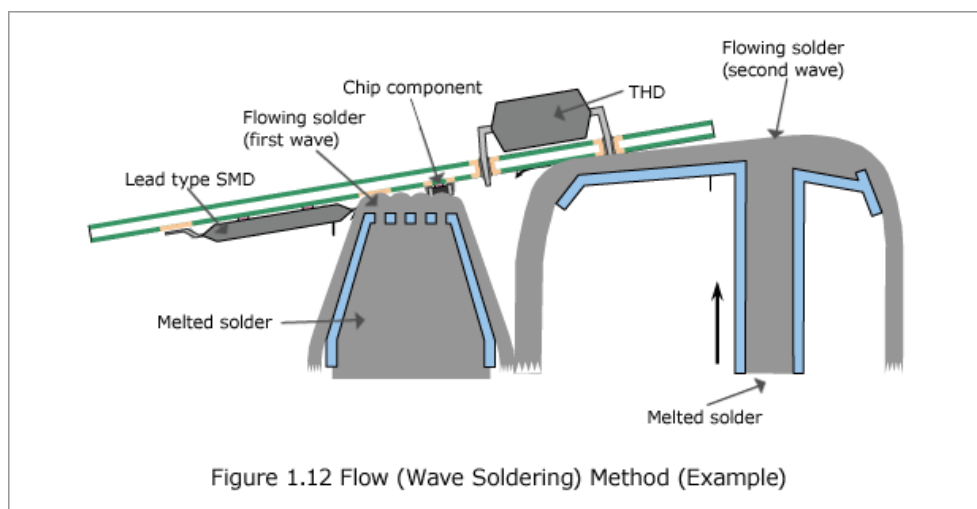
2.5.1 Flow - pájení vlnou

Tyto postupy patří dodnes k velmi používaným především v oblastech pájení THD součástek. Mezi hlavní metody patří především pájení vlnou popřípadě vlečením, či ponorem. Základní charakteristikou této metody je, že pájka je dodávána do místa spoje až v průběhu pájení. [1]

Tato metoda se používá pro pájení především THD součástek. Ty jsou upevněny proti vypadnutí pomocí ohnutí a tvarování vývodů. Všechny součástky jsou osazeny z jedné strany desky. Pro pájení SMD součástek je vhodnější pájení přetavením, ale v některých aplikacích mají THD součástky a pájení vlnou stále přednost. [1]

DPS se pohybují na dopravníku a jsou v přímém dotyku s pájkou. Jako první je třeba nanést tavidlo (nejčastěji roztoky kalafuny). Nanášení probíhá například pomocí kartáče, který potírá spodní stranu DPS a zároveň se máčí v nádrži s tavidlem. Poté projede dopravník zónou, kde je celá DPS předeřhřata na teplotu blízkou teplotě rozpuštěné pájky. Poté již DPS projíždějí vlnou rozpuštěné pájky. Pájka je pumpována čerpadlem. Celý systém musí být seřízený tak, aby roztavená pájka nepronikla i na druhou stranu DPS – je nutné utěsnit případné nevyužité otvory v DPS. V průmyslu se využívá nejčastěji jednoduchá vlna, ale lze využít například i dvojitou, kdy druhá nižší vlna má za úkol odstranit vzniklé krápníky a přebytečnou pájku. Posledním krokem je očištění hotových osazených desek plošných spojů v myčce. [1]

V případě využití této technologie u SMD součástek je třeba na DPS nanést z dávkovače lepidlo. Poté jsou součástky osazeny a následně je lepidlo vytvrzeno v peci. Až poté je možné využít vlnu pro připájení součástek. [1]



Obr. 11 Pájení vlnou [13]

2.5.2 Pájení přetavením

Tato technologie je jedna z nejvíce používaných metod pájení SMD součástek. Umožňuje velmi husté osazení součástek, automatizaci a osazování z obou stran DPS. V této teoretické části se jí budu zabývat podrobněji, než ostatními metodami, protože k přípravě mých vzorků jsem právě přetavení použil.

Základem této metody je nanesení pájecí pasty na povrch DPS. K tomuto účelu slouží například předem připravené šablony. V případě automatizované výroby je pasta nanesena pomocí programovatelného stroje. Dalším krokem je osazení součástek do připravené pasty. Poté je na řadě přehřívání, které má několik funkcí. Mění se viskozita pasty, probíhá čištění povrchu vlivem aktivace tavidla a zároveň se zabrání následnému teplotnímu šoku. Následné přetavení není tak prudké – neodpaří se prudce tolik plynů a je menší pravděpodobnost, že se nechtěně posunou součástky, případně dojde k jiným nechtěným jevům, jako jsou studené spoje a další chyby.

Důležité je správné množství a rovnoměrnost nanesené pasty, stejně velké kovové plošky a správně zvolený teplotní profil peci pro přetavení. V případě chyb může docházet k posunutí součástek k větší plošce nebo k „tombstoning“ efektu. V případě nevhodně zvoleného teplotního profilu může dojít k nedokonalému přetavení pasty, kdy spoj není tak kvalitní a pevný. Může docházet i ke „studeným“ nevodivým spojům. V případě správného přetavení se součástky vlivem povrchového napětí samy dokáží narovnat, takže i v případě ručního nedokonalého umístění součástky lze docílit pěkných výsledků. Pastu lze přetavit několika zdroji tepla. Mezi základní patří horký plyn nebo infračervené záření, ale užívá se i například laser. [1] [13]

Obecně k přenosu tepla dochází kondukcí, konvekcí a radiací (vedení, proudění a záření).

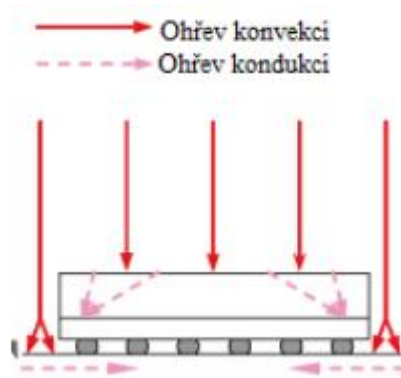
K přenosu kondukcí využíváme rozdíl teplot DPS a některého média. Tím může být plyn, pevná látka, nebo kapalina. Tohoto přenosu se využívá u dobře vodivých materiálů, jakými jsou kovy.

V případě konvekce se jedná k plynné nebo kapalné médium. To se pohybuje a tím dochází k přenosu. Konvekce může být nucená nebo přirozená. Přirozená působením gravitace a rozdílných hustot studenější a teplejší části média. Nucenou konvekci vytváříme pomocí čerpadel a ventilátorů.

K přenosu tepla radiací dochází pomocí elektromagnetických vln. [7] [6] [1]

Přetavení horkým plynem

Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších ve velkosériové výrobě. V zařízení se nachází tryska, z které proudí zahřátý plyn na teplotu řádově o několik desítek stupňů vyšší, než je teplota přetavení pasty. Plyn je proháněn ohřivačem a rychle dosahuje požadovaných teplot. Jako plyn bývá nejčastěji využíván vzduch, ale v některých případech i dusík, který zároveň vytváří interní atmosféru. Jedná se o technologicky jednodušší zařízení a dochází k dobrému prohřátí DPS a spoje, ale na druhou stranu je přetavení časově náročnější. Nejčastěji jsou pece s dopravníky kombinovány s IR zářiči. Tím využijeme radiaci, konvekci i kondukcii a celý proces se zrychlí. [1] [4]

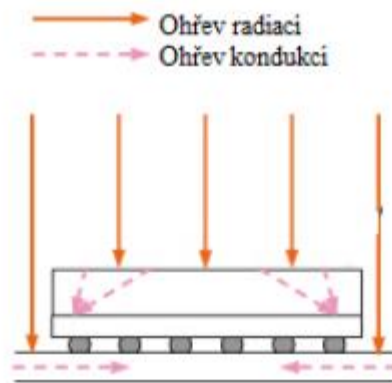


Obr. 12 Pájení přetavením pomocí horkého vzduchu [7]

Pájení infračerveným zářením

Zdrojem infračerveného záření bývá halogenová zářivka. Podobně jako u pájení laserem, tak i zde funguje fyzika a ohřev je realizován absorbovanou složkou záření (velká část se odrazí, případně prostoupí). Je zajímavé, že pro ohřev na teplotu kolem 200 °C musíme mít zdroj dimenzovaný na teplotu vyšší než 2000 °C.

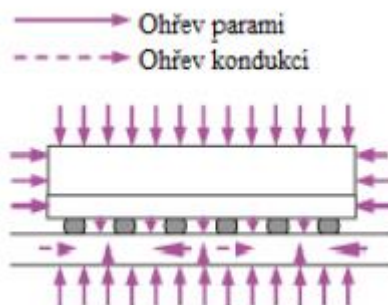
Problém tohoto ohřevu je nerovnoměrné zahřívání, protože každá součástka může mít jinou barvu, povrch nebo materiál. Světlá, kovová součástka se bude ohřívat mnohem rychleji, než součástka v plastovém, tmavém pouzdře. Z tohoto důvodu může být část desky více teplotně namáhána než jiná, proto se používají různé reflexní nátěry aplikované na plastová pouzdra. [1] [7]



Obr. 13 Pájení přetavením pomocí IR zářiče [7]

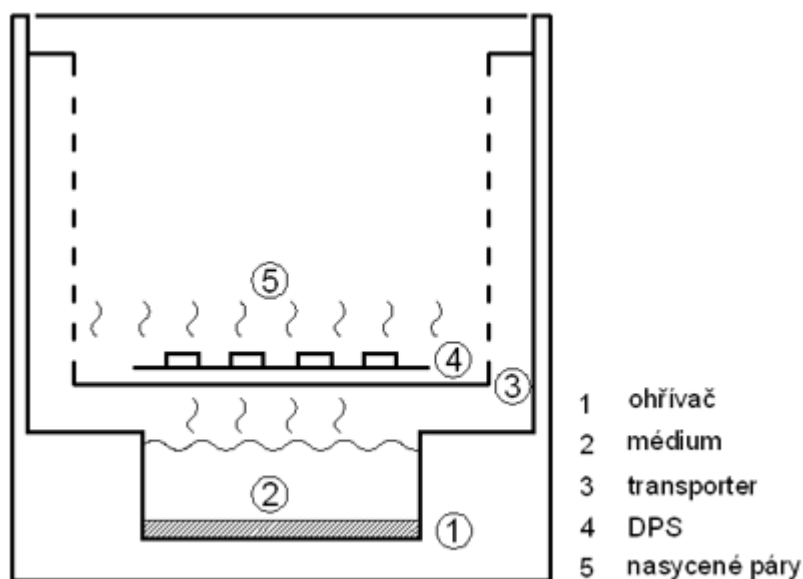
Kondenzační pájení

Jedná se o pájení v parách média (v našem případě konkrétně v parách galdenu). Předávání tepla probíhá procesem kondenzace. Na dně zařízení se nachází kapalina (galden) v kapalném skupenství. Do zařízení se vloží desky, které chceme přetavit. Galden se zahřívá na teplotu varu, kdy se vytvářejí páry, které vytvoří parní zónu. Tato zóna postupem času houstne a těžkne, čímž vytlačuje ostatní plyny, které by mohly mít na přetavení vliv. [1] [7]



Obr. 14 Pájení přetavením v parách [7]

Proces přetavení je o něco dražší, než například přetavení horkým vzduchem, ale pájení probíhá bez přítomnosti kyslíku, takže není třeba používat tavidla s velkým množstvím aktivátorů. Další výhodou je rovnoměrný přenos tepla. [1] [7]



Obr. 15 Schéma komory pro přetavení v parách [13]

Pájení laserem

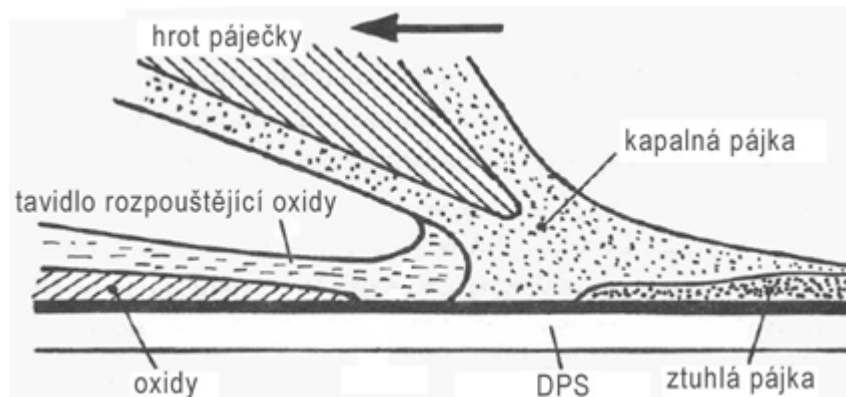
Velká výhoda laseru je, že se jedná o světlo, takže lze snadno pomocí optiky usměrnit, zpracovat a dosáhnout požadované intenzity. Absorbovaná složka laseru se mění na teplo a ohřívá pájku. Teplotu lze regulovat i vlnovou délkou laserových impulzů. Nejvíce se využívá pro jemné pájení a tam, kde nechceme zbytečně tepelně zatěžovat součástky umístěné na DPS. [1] [7]

2.5.3 Pájení ruční páječkou

Jak jsem již zmínil výše, tak ruční pájení je v dnešní době vhodné spíše pro malovýrobu, nejčastěji však drobné opravy, pájení speciálních součástek, které není možné přetavit v peci, či na domácí kutilství. Pájka je realizována nejčastěji dutým drátem, který má ve svém nitru obsažené tavidlo a teplo se dodá pomocí páječky s nahřátým hrotem.

Při ručním pájení je třeba nejprve osadit součástku na připravenou a čistou DPS. Postup osazování se liší u THD a SMD součástek. U THD součástek se vytvářejí vývody do požadovaného tvaru a osadí do vyvrtaných otvorů v desce. Dalším krokem je nahřátí místa, kde chceme vytvořit spoj. Hrot páječky by měl mít pro bezolovnaté pájení 371 – 427 °C, toto se však liší podle typu pájky (pro pájky na bázi bismutu by měly být teploty o 100 – 150 °C nižší). Nahříváme nejprve kovové části a obecně části, jejichž

ohřev bude trvat delší dobu. Poté je potřeba rychle přiložit pájku a to ne přímo na hrot páječky, ale zároveň co nejbližší. Pájka se rychle roztaví. Celý proces tavení by měl trvat něco v rozmezí 2 až 5 s dle velikosti hrotu a teploty páječky. Důležité je, aby se pájka nepřehřála příliš a nezhoršili se tím výsledné vlastnosti spoje. Pokud bychom místo dostatečně nepřehřáli před aplikací pájky, může docházet k nedostatečnému smáčení a vzniku studeného spoje. Výsledný spoj by měl být hladký a lesklý, nikoliv kalný, hrudkovitý nebo nepravidelný. [1]



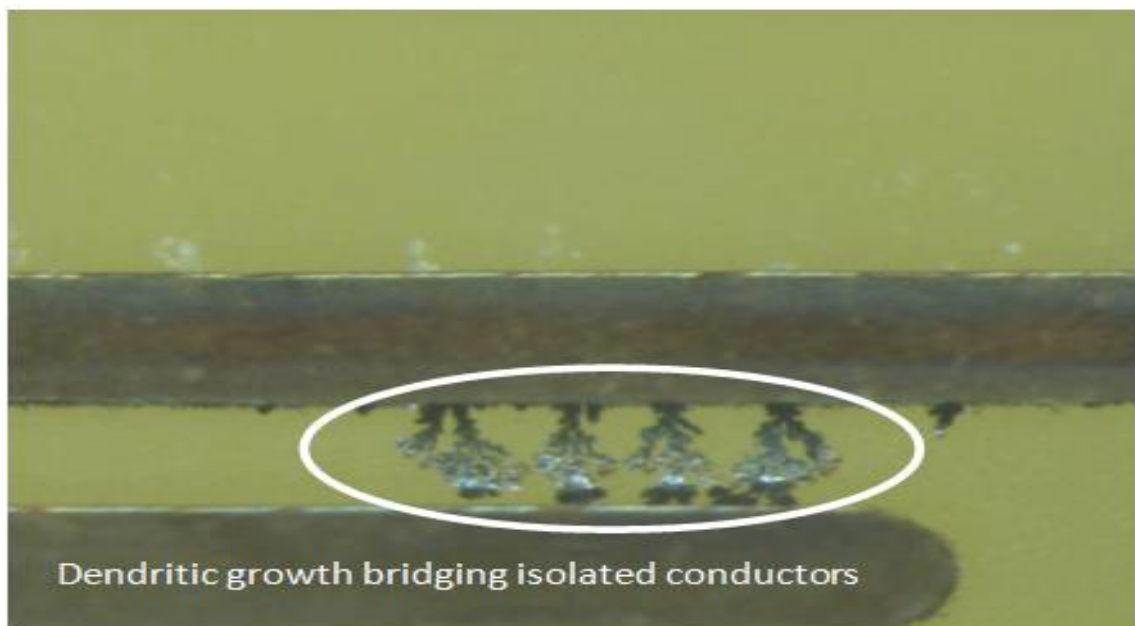
Obr. 16 Ruční pájení [13]

2.5.4 Pájení ponorem

Pájení ponorem je velmi jednoduchá metoda, kdy se DPS s osazenými součástkami ponoří do lázně s roztavenou pájkou. Ta je roztavena ve vaničce se zdrojem tepla. Běžná doba ponoru se pohybuje mezi 3 a 10 s. Velkou výhodou tohoto pájení je, že probíhá bez přístupu vzduchu, takže je zabráněno případně povrchové oxidaci. Další výhodou je rovnoměrnost nanesení pájky a ohřevu. Důležitá je suchost připravených DPS. Přebytečná pájka je odstraněná horkovzdušným nožem. [1]

3 Dendrity

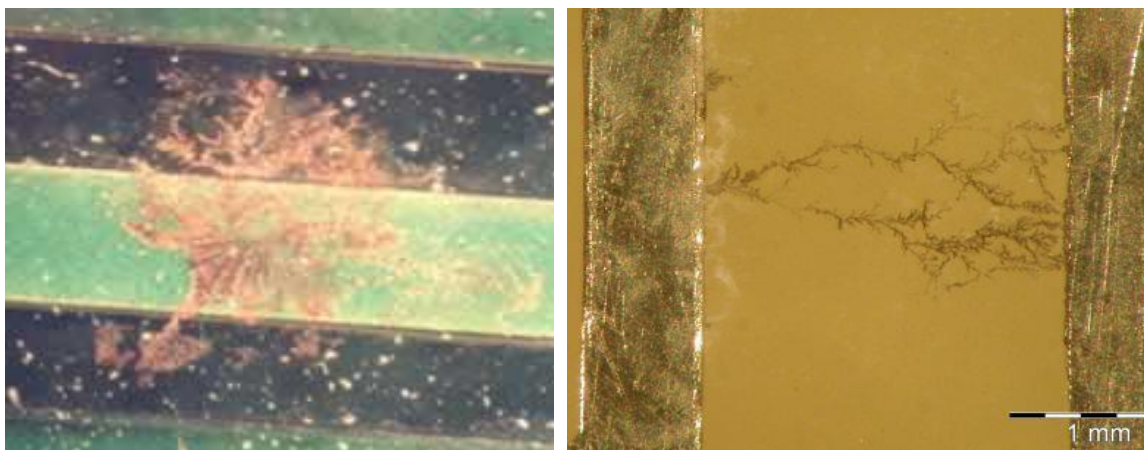
V posledních letech jsou elektronické součástky stále více a více miniaturizovány a osazovány s mnohem vyšší hustotou. Kvůli mnohem menším mezerám jsou jednotlivé součástky více ohrožovány termo-izolačním selháním. Za určitých podmínek vlhkosti a teploty se součástky pod napětím můžou stát elektrochemicky nestabilní. Kovy nebo pájecí pasta se ionizují, dvě sousední plošky se začnou chovat jako katoda a anoda a vytvoří se mezi nimi vlákna, která mohou být vodivá. [2], [3]



Obr. 17 Příklad růstu dendritů [2]

Vytvořená vlákna způsobují zkratky na součástkách, kterým logicky následují poruchy větších elektrotechnických celků. Vytvořené zkratky jsou známy, jako elektrochemická migrace. Mechanismus, který má velký podíl za elektrochemickou migraci, je růst dendritů.

Růst dendritů je důsledkem migrace iontů z anody a následného ukládání na katodě. Následně se vytváří „stromečková“, či „jehličková“ struktura. Tvorba dendritů je jeden z významných způsobů selhání elektrických a elektronických systémů, zejména pak mikroelektronických součástek. [2] [3]



Obr. 18 Příklad růstu dendritů [14]

3.1 Elektrochemická migrace

Elektrochemická migrace je definována, jako růst vodivých metalických vláken na povrchu desky plošného spoje. Podmínkou celého jevu je přítomnost vhodného elektrolytického roztoku a stejnosměrného napětí.

Dendrity, které se pomocí elektrochemické migrace mohou vytvořit, jsou velmi křehké výrůstky stromovitého nebo jehličkového charakteru. Pokud dojde k propojení dvou sousedních plošek (sousedních vodičů), pak dojde k náhlému poklesu odporu a často dochází k takzvanému „vyhoření“ dendritu. Z tohoto důvodu je často složité identifikovat pravou příčinu poruchy. K vyhoření dochází v případě, kdy je vyšší proudová hustota a dendrit velmi malého průřezu.

Základní metoda pro kontrolu elektrochemické migrace je přímou kontrolou čistoty desky plošných spojů. Konkrétně se jedná o bromidy, chloridy a halogenidy. Dalším důležitým aspektem je zmenšování mezer mezi vodiči a použití bezolovnatých pájek. Díky všem těmto aspektům je výskyt elektrochemické migrace běžnější.

Tvorba dendritů by se dala rozdělit na 3 fáze. První fází je prakticky tvorba „cesty“. Druhá fáze je inicializační a třetí je samotný růst dendritů. Nejprve se začnou odlučovat částice kovu na jednom vodiči, dojde k jejich transportu a ukládání na opačně nabitým vodiči. Tuto migraci umožní elektrolyt a opakováním tohoto postupu se vytvoří celá struktura dendritu. [2]

3.2 Faktory ovlivňující elektrochemickou migraci

Mezi tyto faktory by se dala zařadit teplota, relativní vlhkost, přiložené napětí, materiál vodičů, rozteče mezi vodiči, provedení DPS a případně znečištění. [2]

3.2.1 Teplota

Elektrochemická migrace se běžně objevuje v rozmezí 0 – 100 °C. Mimo toto rozmezí se určité typy migrace objevují, ale nejsou příliš časté. Příkladem by šla uvést migrace stříbra při teplotách okolo 150 °C.

Rychlost šíření dendritů má tendenci se zvyšovat s rostoucí teplotou. Souvislost mezi teplotou a elektrochemickou migrací lze modelovat Arrheniusovým vztahem (rovnice 1). [2]

3.2.2 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost udává, jaké množství vody v plynném stavu obsahuje dané množství vzduchu.

Obecně je pro elektrotechniku vlhkost problémem. Na deskách plošných spojů se vlhkost může srážet a přinášet nečistoty, čímž vytváří elektrolyt a významně přispívá k elektrochemické migraci. Množství vody se vyjadřuje v mono-vrstvách, kde kritické množství je přibližně 20.

Vztah mezi počtem mono-vrstev potřebných k migraci a vlhkostí vzduchu je závislý na adsorbčních vlastnostech plošného spoje. Ta může být ovlivněna například nečistotami, které ploška obsahuje. Velký rozdíl bude i u DPS s maskou, či bez masky. Obecně platí, že čím vyšší relativní vlhkost, tím rychlejší a pravděpodobnější elektrochemická migrace je.

Pokud se pohybujeme kolem teploty rosného bodu, pak je dendritický růst velmi pravděpodobný a čas pro tvorbu těchto útvarů je velmi malý. Jedná se řádově o několik sekund. Pro porovnání – pokud vlhkost nekondenzuje, jedná se řádově o hodiny. [2]

3.2.3 Přiložené napětí

Nutnou podmínkou vzniku elektrochemické migrace je přiložené napětí. Rozdíl potenciálů vytvoří prakticky katodu a anodu, kolem kterých vznikne elektrické pole. To

má za následek tvorbu kladně nabitých iontů, které migrují z anody na katodu. Obecně větší rozdíl potenciálů zvyšuje pravděpodobnost a zrychluje celý proces.

Velikost napětí, která je potřeba ke vzniku dendritu, se velmi pravděpodobně liší u různých kovů, které jsou použité pro vodiče (stříbro, měď, hliník, ...). Obecně se dá říci, že elektrochemická migrace se může vyskytnout již u 2V, s rostoucím napětím se pravděpodobnost zvyšuje a pomyslnou horní hranicí se dá označit 100 V, kdy by se jednalo spíše o jiné druhy poruch. [2]

3.2.3 Vzdálenost mezi vodiči

Vzdálenost mezi 2 vodiči o opačných potenciálech je další z důležitých parametrů, které ovlivňují růst dendritů. Obecně se dá říct, že při zachování podmínek a snižování vzdálenosti, bude pravděpodobnost vzniku dendritů růst a zrychlovat se. K tomuto zrychlení prakticky dochází ze dvou příčin. První z nich je fakt, že mezi součástkami (vodiči), které jsou blíže u sebe a jsou na opačných potenciálech, vzniká silnější elektrické pole. Druhý důvod je, že menší prostor se hůře čistí a snáze se zde usadí nečistoty, které mají na elektrochemickou migraci velký vliv. [2]

3.2.4 Vliv nečistot

Čistota desky plošného spoje a s tím spojená koncentrace nečistot má na elektrochemickou migraci podstatný vliv. Některé nečistoty mohou ovlivňovat vodivost elektrolytu a tím usnadnit migraci iontů z katody na anodu. [2]

S vlivem nečistot souvisí i použití tavidla. Právě jeho typ a chemické složení může mít na růst dendritu zásadní vliv.

3.3 Matematické modely

Některé parametry a vlastnosti zmíněné v předchozí kapitole lze alespoň přibližně popsat matematickými modely. [2]

3.3.1 Arrheniusův model

$$t = A \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right)$$

Rovnice 1 – Arrheniusův model [2]

Zjednodušeně se dá říci, že popisuje chemickou reakci.

- t - čas potřebný pro selhání systému
- A - konstanta měřítka
- H - aktivační energie
- k - Boltzmanova konstanta
- T - teplota.

Tento model má pro vyjádření elektrochemické migrace jednu hlavní velkou nevýhodu – zohledňuje pouze závislost na teplotě.

Matematický model, který z tohoto vztahu vychází a popisuje vznik dendritů, je Hornungův vztah.

$$t = \left(\frac{\alpha G}{V} \right) \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right)$$

Rovnice 2 – Hornungův vztah [2]

- G - udává vzdálenost mezi vodiči (součástkami)
- V - hodnota přiloženého napětí.

4 Příprava experimentu

Hlavním výstupem diplomové práce by měly být experimentálně vypěstované dendrity na deskách plošných spojů. V rámci této kapitoly se budu zabývat přípravnou fází experimentu. Praktickou část jsem započal již během letního semestru 2015, a to v rámci týmového projektu. Dále jsem pokračoval během individuálního projektu a experimenty dokončil v diplomové práci.

4.1 Postup přípravy

Časově nejnáročnější fází celého experimentu bylo vše připravit a promyslet. Vzhledem k tomu, že podobné problematice se příliš mnoho lidí nevěnuje a neexistuje valné množství podkladů a teoretických předpokladů, tak jsem musel vycházet pouze z několika málo dokumentů, ale hlavně jsme spolu s vedoucím práce museli spoustu věcí sami vymyslet a vyzkoušet. Pozitivní je, že spousta našich domněnek se potvrdila, ale zabralo to samozřejmě více času.

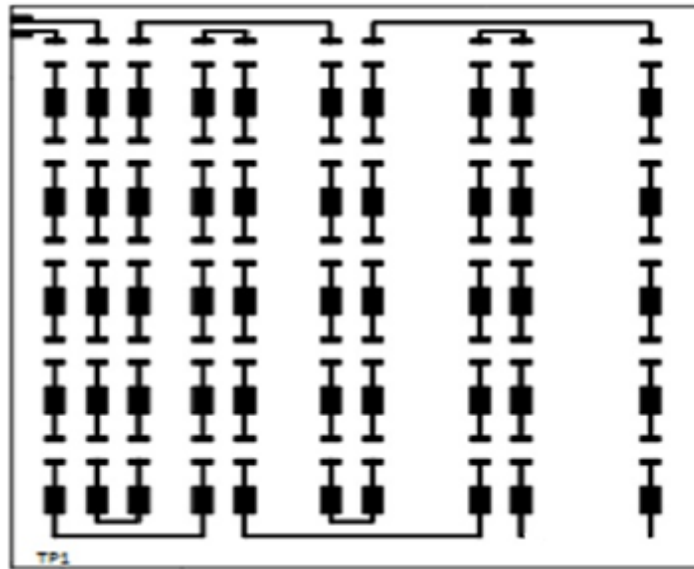
Pokud vyjdeme z teoretických předpokladů z kapitoly 3, pak je jasné, že potřebujeme desku plošného spoje, kterou necháme pod napětím v určitých podmínkách. Z toho vyplývá následující seznam úkolů:

1. Návrh DPS
2. DPS s maskou a bez masky
3. Volba povrchových úprav pájecích plošek
4. Volba pájecích past
5. Nanesení pájecí pasty
6. Osazení součástek
7. Vizuální kontrola
8. Přetavení
9. Připojení hotových DPS ke zdroji

4.1.1 Návrh DPS

Pro experiment bylo třeba navrhnout desku plošného spoje, na které se budu o růst dendritů pokoušet. Bylo třeba vyrobit desku plošného spoje tak, aby vznikala místa s opačným potenciálem a malou šířkou mezery, kde pravděpodobnost vzniku dendritů

roste. Velikosti zvolených mezer jsou 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm a 10 mm. Různé velikosti mezer jsem zvolil, protože jsem si nebyl jistý, jaký rozměr bude nejvhodnější. Takto vyrobená DPS byla nejuniverzálnější. Na plošném spoji se nachází plošky připravené pro napájení odporů. Výsledná DPS byla vytvořena v programu Microsoft Visio 2013.



Obr. 19 Návrh DPS v MS Visio

Když byla deska navržena, tak bylo třeba zvolit její parametry. Konkrétně se jedná o povrchové úpravy a materiál pájecích plošek.

4.1.2 DPS s maskou a bez masky

Pro experimentální účely jsem zvolil dva typy vzorků, a to bez pájecí masky a s ní. Rozdíl mezi nimi je, že plošný spoj s nepájecí maskou má více hladký povrch, ale v oblastech, kde je nanesen kov jsou znatelné menší vyvýšeniny. Desky bez nepájecí masky tyto vyvýšeniny nemají – povrch je v rovině. Jejich nevýhodou je hrubší povrch a horší izolační vlastnosti. Rozdílné vlastnosti mezi vzorky mě přivedly k myšlence, že je třeba vzít v potaz obě možnosti, protože právě tyto vlastnosti by mohly mít na růst dendritů vliv. Největší rozdíl by mohl být u povrchu s maskou, kde velmi záleží, jak kvalitně je maska vyrobena. Mohou zde vznikat místa, kde je „mezera“ mezi kovem a kovem. Tato mezera v podstatě prodlužuje vzdálenost mezi dvěma ploškami.

4.1.3 Povrchové úpravy pájecích plošek

Vzhledem k tomu, že jsem si nebyl jistý, jaké úpravy pájecích plošek by mohly mít největší vliv na růstu dendritů, tak jsem se rozhodl, že zvolím hned tři.

- DPS bez povrchové úpravy (Cu)
- DPS s HAL povrchovou úpravou
- DPS s ENIG povrchovou úpravou

4.1.4 Pájecí pasty

Pro připájení odporů jsem se rozhodl použít 2 pasty. Obě jsou bezolovnaté a poměrně běžně používané.

Pasta	Sn%	Cu%	Ag%	Bi%
L20-SSG-010-42-10	42	0	0	58
Qualitek SAC 305 Type 862	96,5	0,5	3	0

Qualitek SAC 305 Type 862

Jedná se o pájecí pastu typu SAC – slitina cínu, stříbra a mědi. V našem případě konkrétně 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Co se týče vlastností této pájky, tak její eutektická teplota je v rozmezí 216 – 217 °C. Stříbro je obsaženo hlavně pro snížení eutektické teploty. Výhodou jsou dobré mechanické a elektrické vlastnosti. Typ použitého tavidla v této pastě je ROL0.

L20-SSG-010-42-10

Druhá pájecí pasta, kterou budu používat je slitinou cínu a bismutu. Obecně se tyto pájky vyznačují výrazně nižší teplotou potřebnou pro přetavení. Konkrétně se jedná o teploty kolem 150 °C. Tyto pájky jsou levnější, než například výše zmíněná SAC, ale vyskytují se u nich horší mechanické vlastnosti. Typ použitého tavidla této pasty se mi bohužel nepodařilo dohledat.

4.1.5 Součástky

Na hotové desky bylo třeba osadit součástky. Jako nejjednodušší a nejlevnější varianta jsou obyčejné rezistory. Na každou desku se jich vejde 50. Zvolil jsem SMD rezistor velikosti 1206.

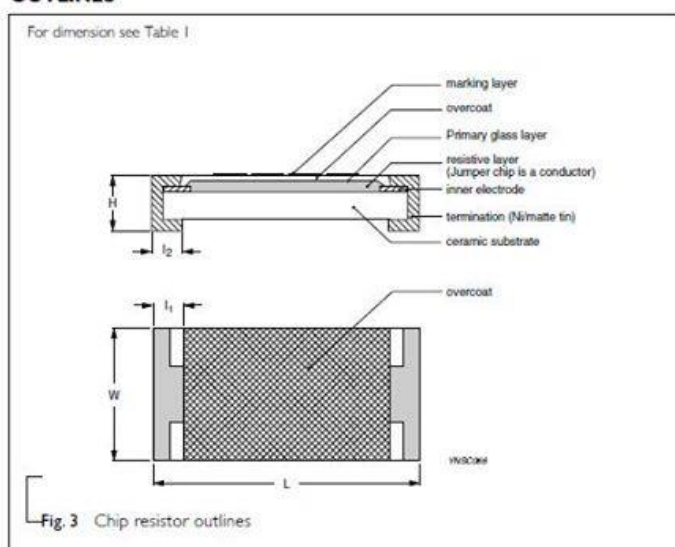
CONSTRUCTION

The resistor is constructed on top of a high-grade ceramic body. Internal metal electrodes are added on each end to make the contacts to the thick film resistive element. The composition of the resistive element is a noble metal imbedded into a glass and covered by a second glass to prevent environment influences. The resistor is laser trimmed to the rated resistance value. The resistor is covered with a protective epoxy coat, finally the two external terminations (matte tin on Ni-barrier) are added. See fig.3

DIMENSIONS

Table 1	
TYPE	RC1206
L (mm)	3.10 ± 0.10
W (mm)	1.60 ± 0.10
H (mm)	0.55 ± 0.10
l ₁ (mm)	0.45 ± 0.20
l ₂ (mm)	0.40 ± 0.20

OUTLINES



Obr. 20 Datasheet výrobce odporů

4.1.6 Šablona pro tisk

S výrobou desek plošných spojů jsme zadali i výrobu příslušné šablony pro nanášení pájecí pasty.

4.1.7 Příprava vzorků – nanesení pasty

Dalším krokem je nanést pájecí pastu na hotové a připravené desky plošného spoje. Vzhledem k dostupnému vybavení a malému množství vzorků jsem zvolil ruční nanášení pomocí stěrky.

Nejprve jsem DPS uchytil pevně do držáku, upevnil šablonu pro tisk a celé zařízení seřídil, aby otvory v šabloně seděly přesně na připravené pájecí plošky.

Ve chvíli, kdy všechny otvory seděly, tak jsem pomocí dláta nanesl přiměřené množství pasty na šablonu. Pomocí stěrky jsem nejprve pastu setřel k sobě, otřel přebytečnou pastu a znovu postup opakoval směrem od sebe.

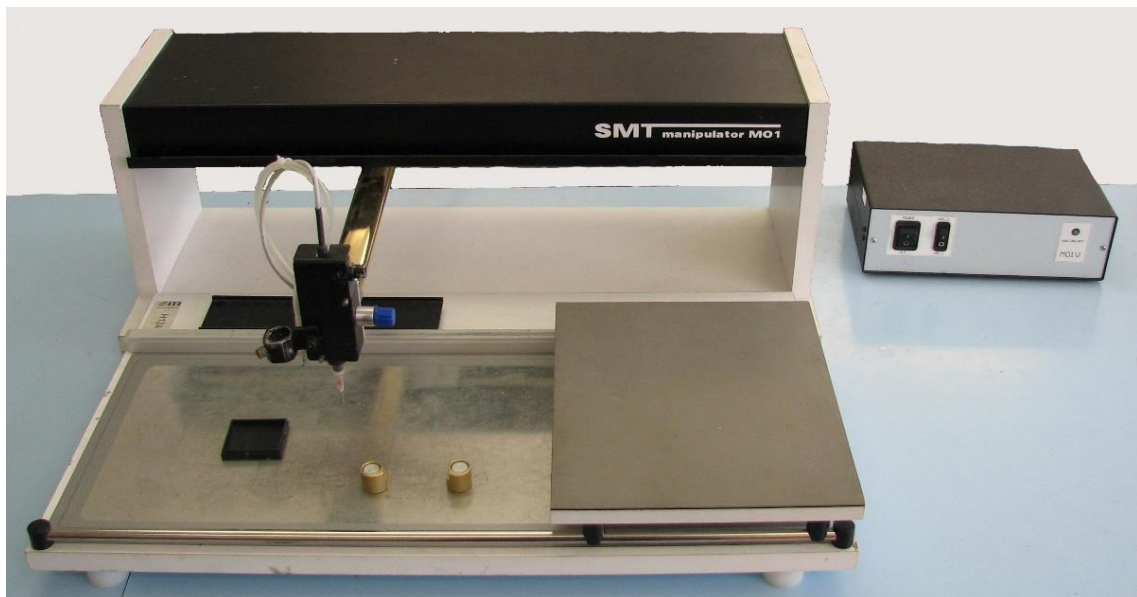
Tento postup bylo třeba dodržet u všech desek, aby bylo všude přibližně stejné množství pasty. Právě rovnoměrnost a množství nanesené pasty by mohlo ovlivňovat

výsledné parametry. Po několika pokusech, tedy osvojení si určitého cviku, se mi dařilo pastu nanášet rovnoměrně a poměrně rychle.

4.1.8 Příprava vzorků – osazení součástek

Ve chvíli, kdy byla pasta nanesená na desce, bylo třeba osadit součástky na připravené plošky. Jak jsem již zmínil, tak na každou desku se vejde 50 rezistorů, proto byl tento úkol poměrně časově náročný.

Jako první jsem vyzkoušel osazování pomocí obyčejné pinzety se zahnutým hrotem. Tímto způsobem se dalo osadit několik desek, ale při dlouhodobější práci jsem potřeboval nějaké zjednodušení. Z toho důvodu jsem využil osazovací manipulátor. Na plochu manipulátoru se upevní DPS a do volného prostoru se připraví rezistory. Pomocí ramena, na kterém je upevněna tryska se můžeme pohybovat po celé ploše. V trysce je podtlak potřebný pro uchopení součástky a navíc s ní lze libovolně otáčet. Když součástku narovnáme a osadíme na místo, pak jí jednoduchým mechanismem pustíme a okamžitě můžeme uchopit další. Jediným problémem bylo občasné ucpávání, takže jsem musel několikrát trysku sundat a vyčistit. Celkově ale bylo toto poloautomatické osazování mnohem pohodlnější a rychlejší, než ruční osazování pinzetou.



Obr. 21 Manipulátor na osazování SMD součástek

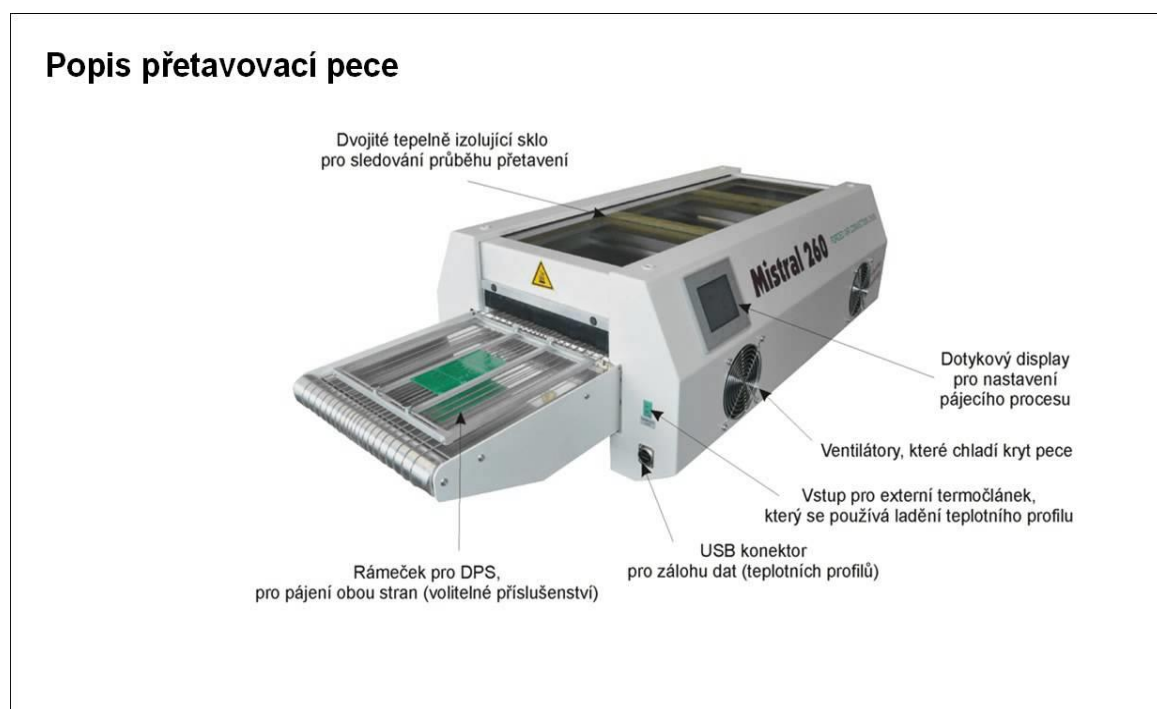
4.1.9 Přetavení

Hotové, osazené DPS v tuto chvíli stačilo přetavit. Pro svoje experimenty jsem zvolil dvě metody – přetavení horkým vzduchem a přetavení v parách galdenu (neboli

kondenzační). Horký vzduch jsem zvolil, jako nejjednodušší a nejběžnější metodu pro přetavení. Kondenzační pájení jsem zvolil, jelikož na neočištěných hotových DPS zůstanou zbytky této látky a mohlo by to znamenat příznivější prostředí pro růst dendritů.

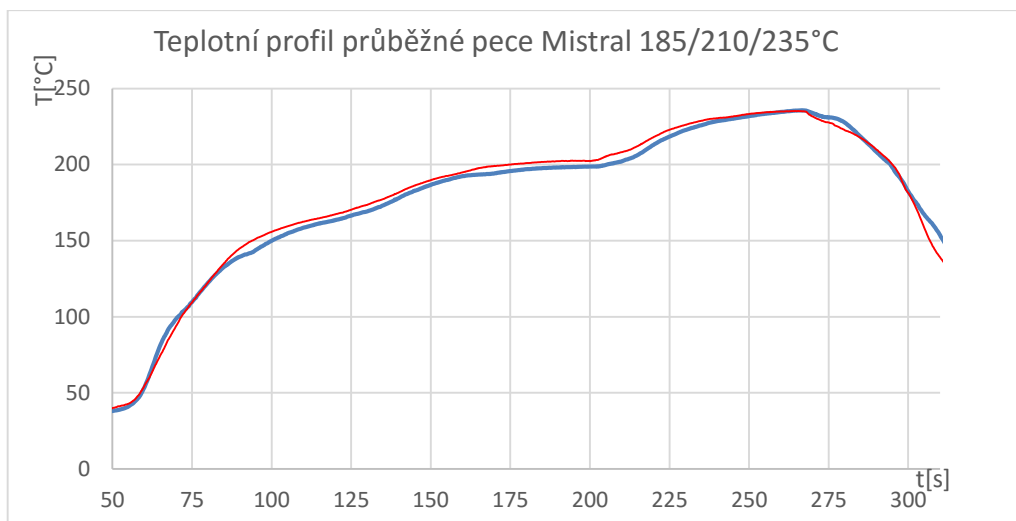
Přetavení horkým vzduchem

Pro přetavení horkým vzduchem jsem využil pec Mistral 260. Jedná se o tří zónovou pec vybavenou dotykovým displejem pro nastavení pájecího procesu (teploty jednotlivých zón, rychlosti dopravníku). Celá pec je prosklená, takže lze jednoduše sledovat proces přetavení.

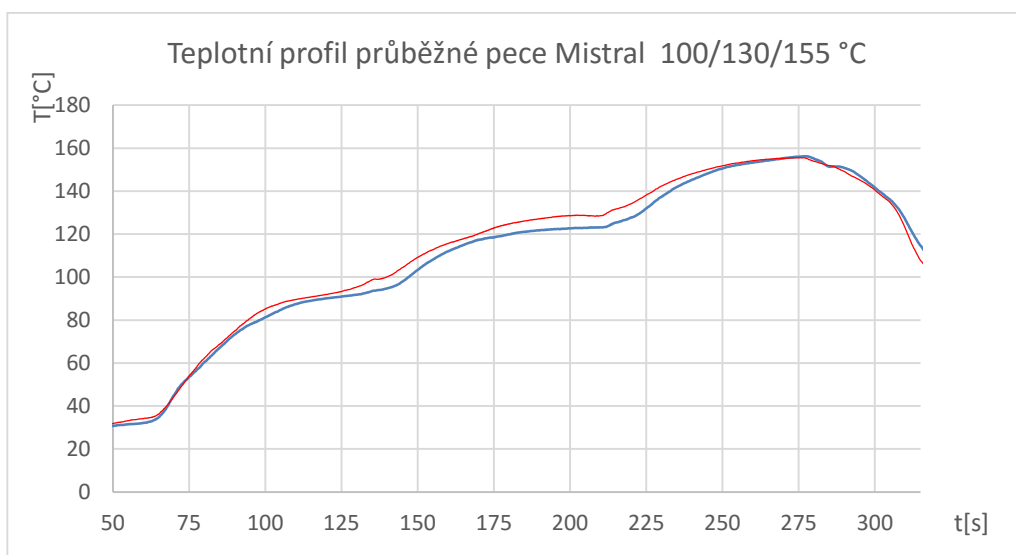


Obr. 22 Přetavovací pec Mistral 260

Při přetavení horkým vzduchem je třeba zvolit rychlost pásového dopravníku a hlavně teplotu předehřevu a samotného přetavení. Vzhledem k tomu, že jsem použil 2 druhy pájecích past, tak jsem musel přetavovat nadvakrát. Jak jsem zmínil v teoretické části, tak pasta s obsahem bismutu vyžaduje na přetavení přibližně o 40 % nižší teplotu než SAC.



Obr. 23 Teplotní profil průběžné pece Mistral (jednotlivé zóny pece nastaveny na 185/210/235°C)



Obr. 24 Teplotní profil průběžné pece Mistral (jednotlivé zóny pece nastaveny na 100/130/155°C)

Konkrétní teploty pro přetavení jsou udávány výrobcem pro konkrétní pastu. V peci jsem nastavil pro každou zónu přibližně o 10 °C více a teploty si ověřil měřením teplotního profilu na testovací DPS pomocí dvou termočlánků (červený a modrý průběh).

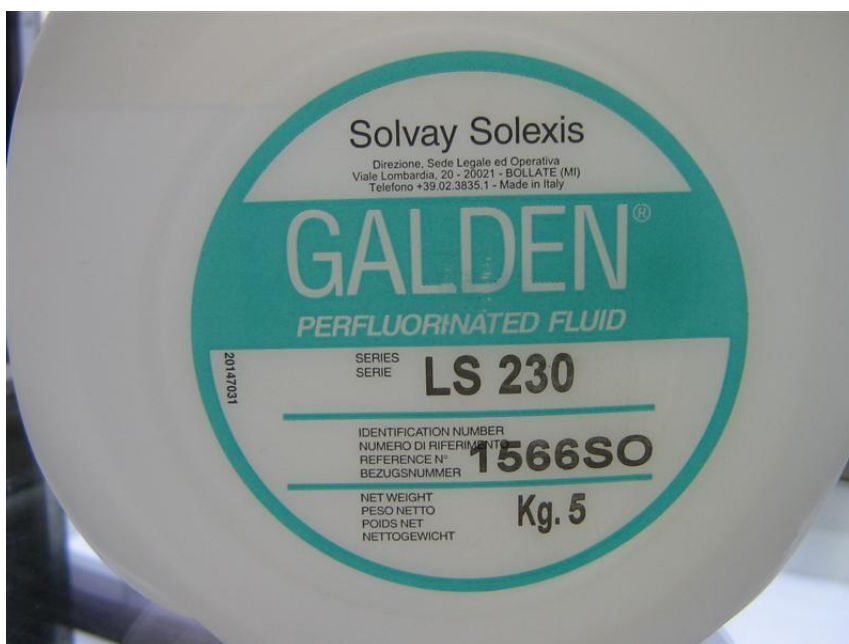
Přetavení v parách

Část DPS jsem přetavil v parách galdenu. Výhody, nevýhody a základní informace o této technologii jsem již popsal v kapitole 2.5.2 (kondenzační pájení). Pro

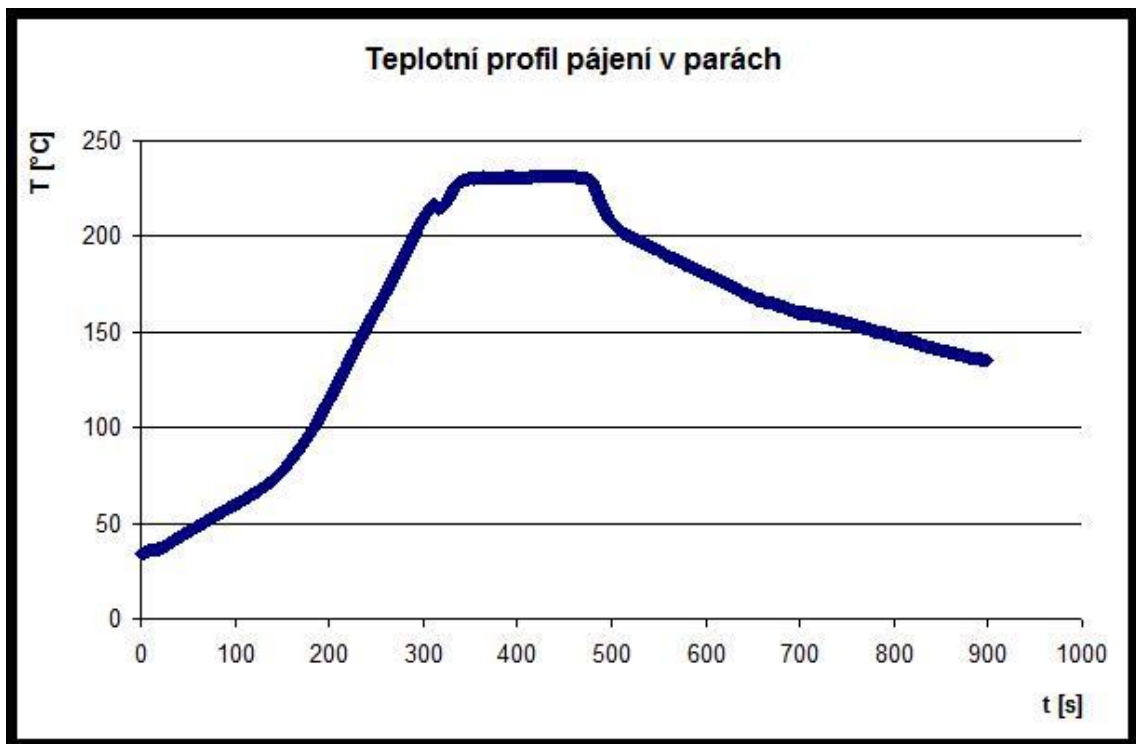
přetavení jsem využil pec QUICKY 300 a jako médium již zmíněný galden. Během přetavení jsem naměřil i teplotní profil uvedený na obrázku 27.



Obr. 25 Pec pro kondenzační pájení QUICKY 300



Obr. 26 Specifikace použitého galdenu



Obr. 27 Teplotní profil pájení v parách

4.1.10 Finální počet vzorků

Hotové DPS bylo třeba rozdělit do jednotlivých skupin a připájet na připravené plošky vodiče. Skupiny jsem se rozhodl dělat po 12 kusech. Aby bylo na každé DPS stejné napětí, tak jsem je připojil paralelně ke zdroji, čímž byla celá skupina připravená. Vzhledem ke značnému množství parametrů bylo třeba připravit velké množství vzorků. Konkrétní počty a kombinace budu rozebírat v další kapitole, ale celkem jsem osadil přes 70 kusů DPS.

5 Experiment

Ve chvíli, kdy jsem měl připravené DPS a znal jsem základní teoretické předpoklady, tak již nic nebránilo tomu pokusit se dendrity vypěstovat. Celý experiment se dá pomyslně rozdělit na dvě části.

5.1 První část – dlouhodobý experiment

Při prvním pokusu jsem se soustředil hlavně na volbu prostředí, takže jsem zvolil pouze jednu hladinu napětí a jeden způsob přetavení. S vedoucím práce jsme se rozhodli, že se pokusíme o dlouhodobý experiment a dendrity necháme pod napětím několik měsíců. Prostorů jsme zvolili hned tři:

- Pokojové podmínky
- Suché teplo v klimatické komoře – 40 °C
- Teplo a vlhko v klimatické komoře – 40°C a 80 % vlhkosti

Celková kombinace vzorků:

Parametr:	Počet:	
Pájecí pasty	2	SAC, SnBi
Povrchová úprava pájecích plošek	3	Bez povrchové úpravy, HAL, ENIG
Povrchové úpravy DPS	2	S maskou a bez
Prostředí	3	Pokojové, suché teplo, teplo a vlhko
Napětí	1	24 V
Technologie přetavení	1	Horkým vzduchem
Celkem	36 Vzorků	

Tabulka 1 Celková kombinace vzorků prvního experimentu

Z tabulky jednoduchým vynásobením počtu jednotlivých parametrů vyplývá, že pro dlouhodobý experiment bylo třeba připravit 36 vzorků, ty rozdělit do tří skupin a připojit ke zdroji napětí.

5.1.1 Průběh prvního experimentu

Ve chvíli, kdy byly vzorky připojené, nezbývalo nic jiného, než čekat a pravidelně desky vizuálně kontrolovat.

Přibližně po měsíci nepřetržitého provozu jsem zjistil, že nedochází k žádným viditelným změnám, proto jsme se s vedoucím práce rozhodli zvýšit napětí na 48 V. Dle teorie ohledně elektrochemické migrace, by tento krok měl významně zvýšit pravděpodobnost růstu dendritů.

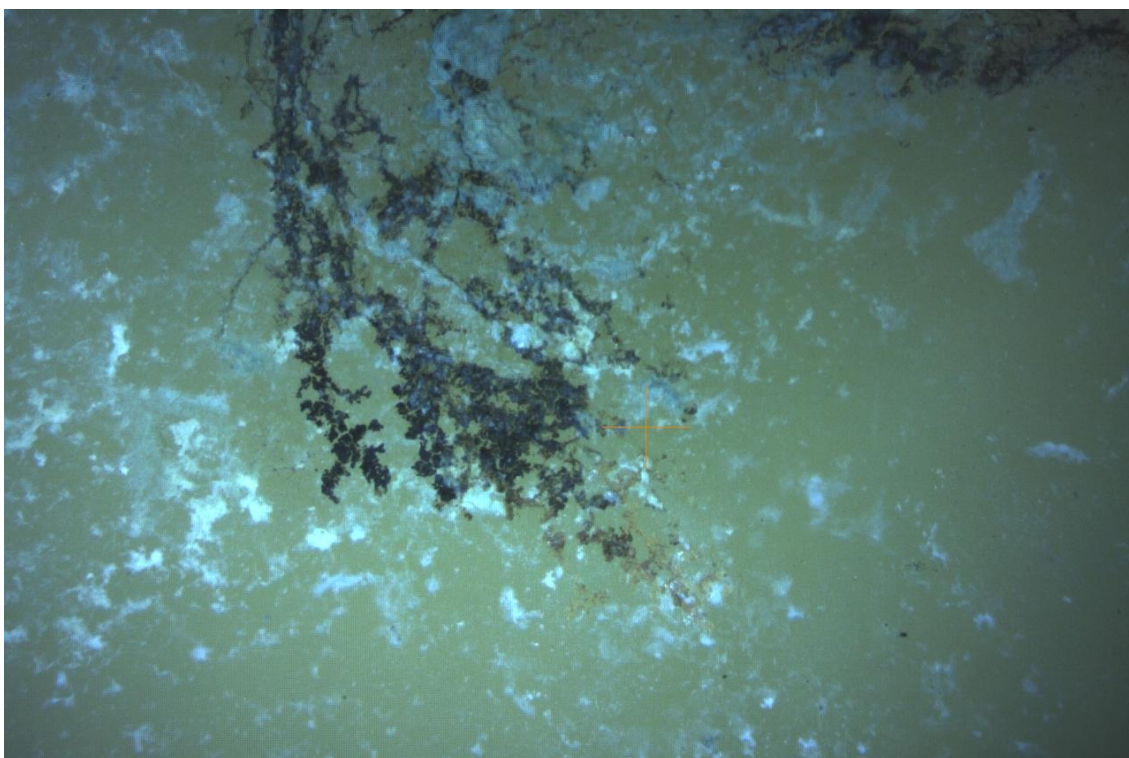
Po dalším měsíci nepřetržitého provozu se na deskách plošných spojů stále neobjevily viditelné změny. To mě přivedlo k myšlence, že pravděpodobnost je zřejmě stále velmi malá, jelikož dle teorie o elektrochemické migraci, je mnohem větší šance růstu, pokud vlhkost přímo kondenzuje na DPS.

Ve chvíli, kdy to vypadalo, že tímto způsobem výsledků nedosáhneme, nebo za velmi dlouhou dobu, tak jsme se rozhodli pro řekněme extrémnější podmínky. Pomocí rozprašovače jsme zvýšili vlhkost na DPS, čímž za velmi krátkou chvíli došlo k několika zkratům. Následně jsem pod mikroskopem zjistil, že za mnohé zkraty byla zodpovědná elektrochemická migrace a s ní spojený růst dendritů.

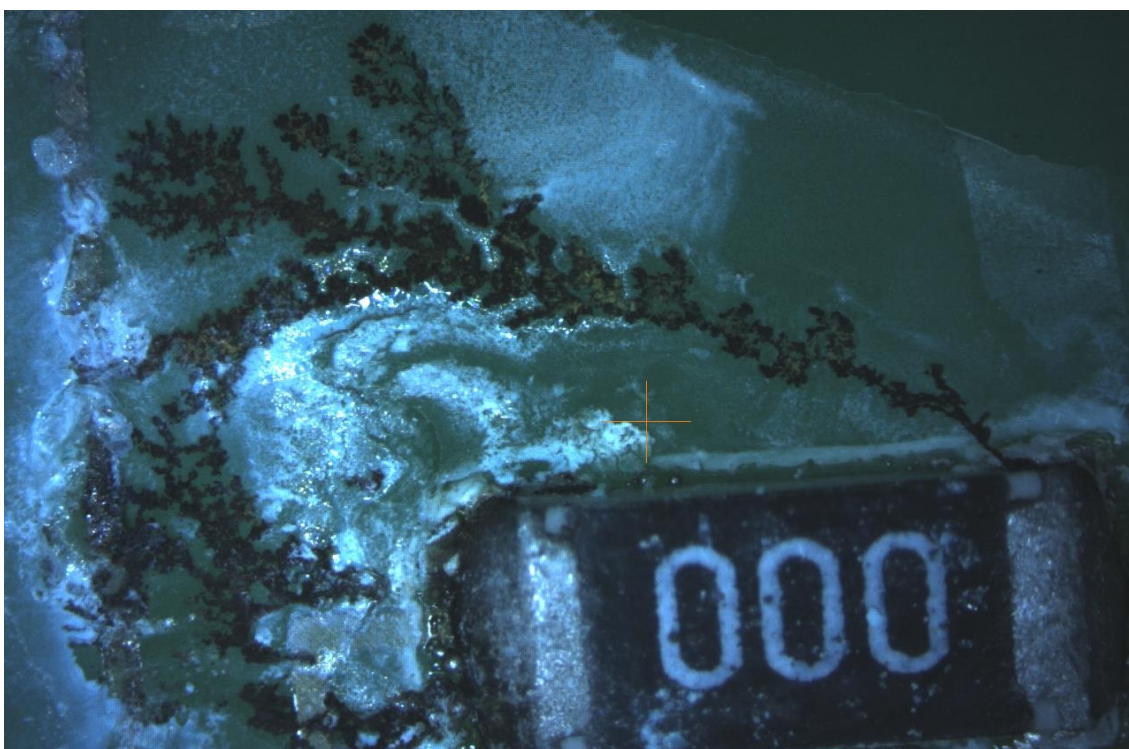
5.1.2 Snímky z mikroskopu

Snímky DPS pořízené na mikroskopu. Na všech snímcích je dobře patrná stromečková, či jehličková struktura dendritů. Veškeré vodivé „cestičky“ jsou zčernalé, kvůli proběhlým zkratům. Jak jsem již zmínil výše, tak všechny tyto snímky jsou z DPS, které byly umístěné ve vlhkosti. U každé fotografie je potom rozepsáno, jaké další vlastnosti patřičná deska měla.

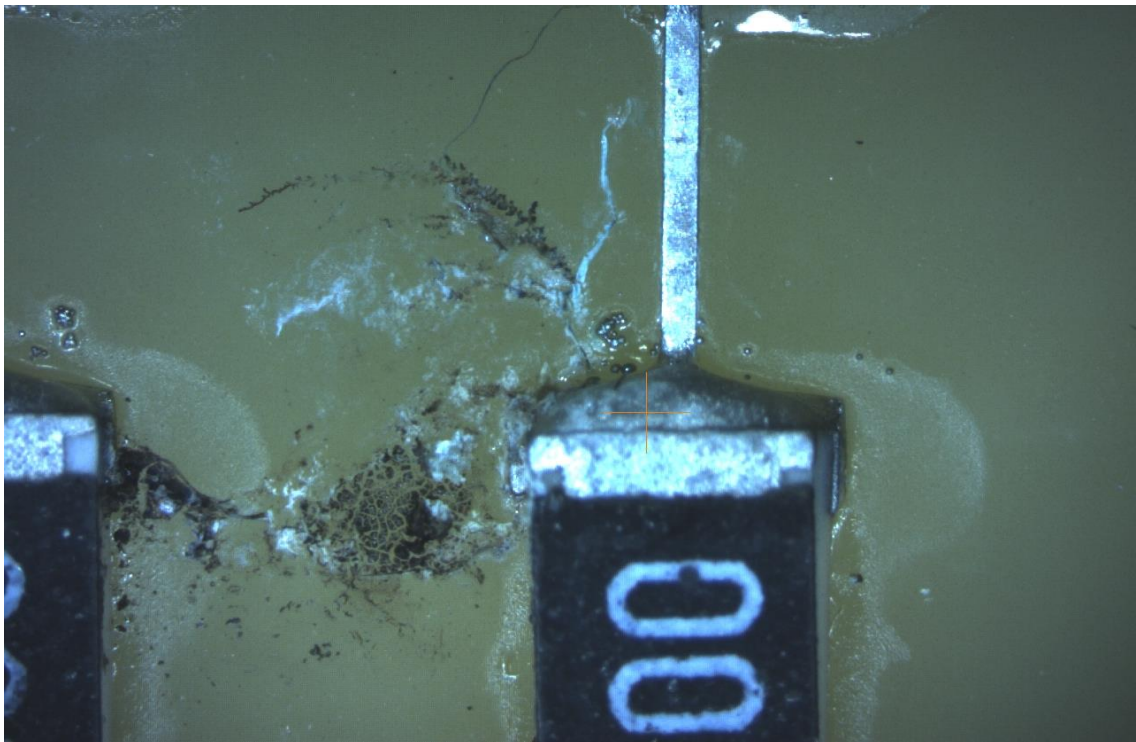
Zde uvedené snímky jsou pouze příklady těch největších a nejvíce viditelných dendritů, co jsem na DPS našel.



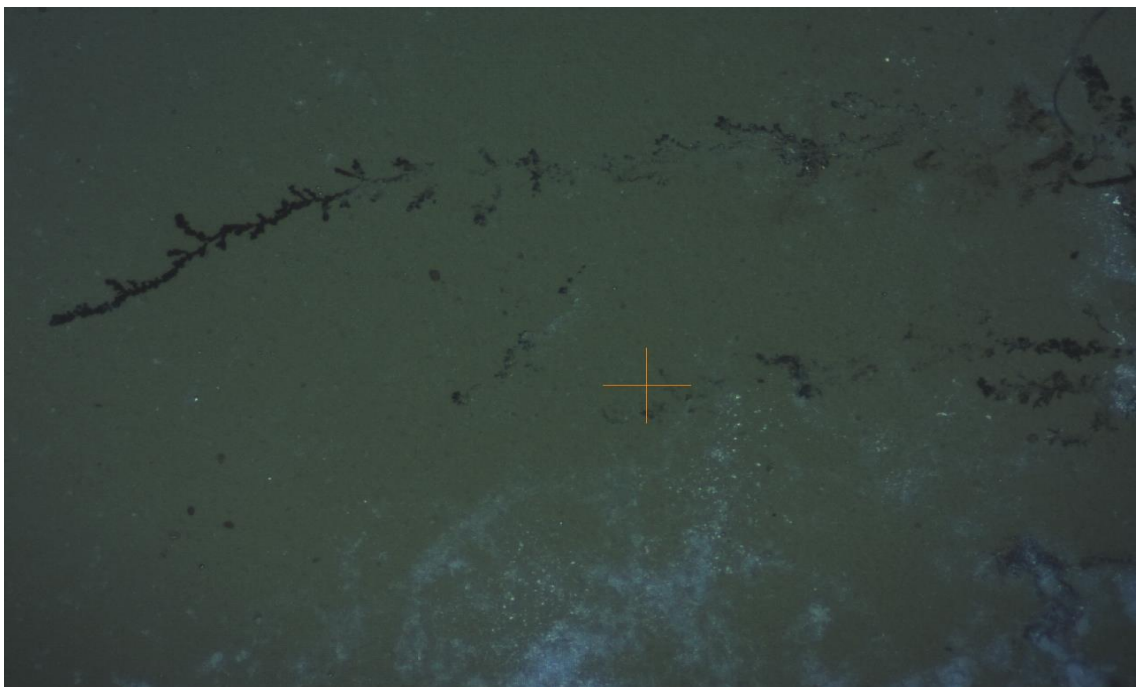
Obr. 28 DPS bez masky, pájecí pasta SnBi, bez povrchové úpravy (CU)



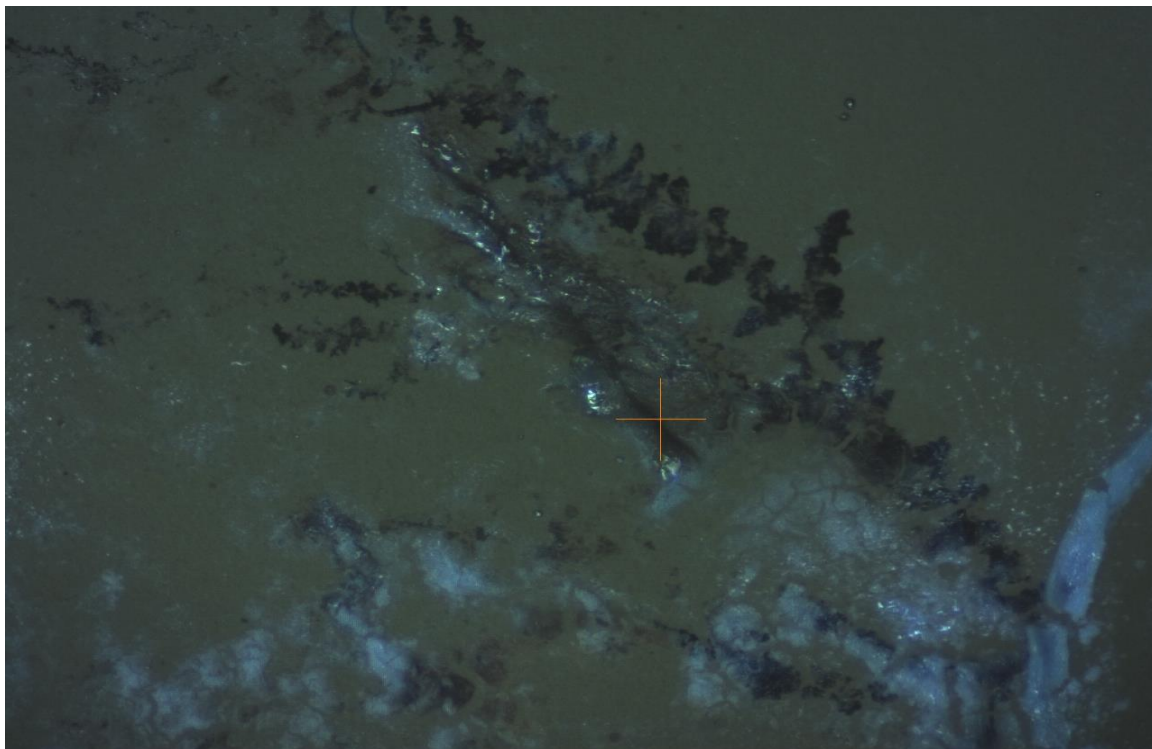
Obr. 29 DPS bez masky, pájecí pasta SnBi, povrchová úprava HAL



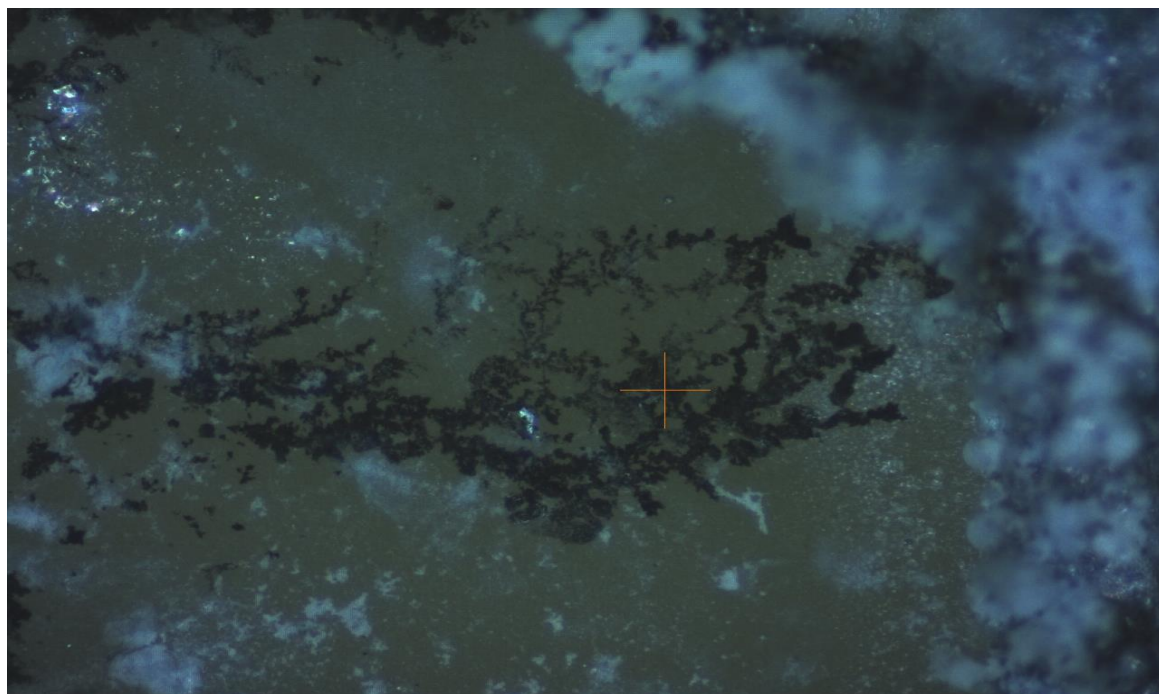
Obr. 30 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, povrchová úprava HAL



Obr. 31 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, povrchová úprava HAL, detail na Obr. 30



Obr. 32 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, Povrchová úprava HAL, detail na obr. 30



Obr. 33 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, Povrchová úprava HAL, Detail na obr. 30

5.1.3 Poznatky z experimentu

Veškeré postřehy, které zde budu uvádět, jsou posbírány z velmi malého množství vzorků. Není proto možné z nich učinit závěry, ale spíše domněnky, které se mi budou velmi hodit pro další experimenty.

Z omezeného množství vzorků, které jsem mohl zkoumat po prvním experimentu, se dendrity ani jednou neobjevily na DPS s maskou. Tato úprava bude mít zřejmě vyšší odolnost proti takovým jevům a pravděpodobnost růstu zde bude nižší. Je to nejspíše zapříčiněno kvalitou výroby masky, kdy u méně kvalitních úprav vzniká mezi vodivou částí a samotnou maskou prohlubeň. Tato prohlubeň prakticky zvyšuje vzdálenost 2 vodivých plošek a tím pádem snižuje pravděpodobnost migrace.

Další poznatek je, že dendrity se mi podařilo vypěstovat jen na vzorcích vystavených vysoké vlhkosti, což odpovídalo mým teoretickým předpokladům.

Na posouzení vlivu povrchových úprav jsem měl možnost zkoumat jen malé množství vzorků, ale předpokládám, že ENIG bude proti migraci mnohem odolnější, než HAL, případně deska bez povrchové úpravy. Na DPS s touto úpravou se totiž dendrity neobjevily.

5.2 Druhý experiment

Po relativně úspěšném prvním experimentu jsem stejným způsobem připravil DPS a mohl se pustit do dalších pokusů.

Vzhledem k poznatkům z prvního experimentu jsem se musel rozhodnout, jakým způsobem budu v práci pokračovat, abych byl efektivní a zároveň si potvrdil některé své hypotézy.

Co se týče vlivu prostředí, tak jsem se rozhodl, že vzhledem k teoretickým předpokladům a mým poznatkům z prvního experimentu, se nebudu již dále pokoušet vypěstovat dendrity v jiném prostředí, než ve vlhkosti. Tímto krokem zredukuji počet vzorků na třetinu, což mi dá případný prostor věnovat se jiným parametrům

Domněnku ohledně vlivu povrchové úpravy DPS se pokusím potvrdit v dalších experimentech, proto jsem osadil znovu DPS s maskou i bez masky.

I přesto že výsledky zatím naznačují, že pasta SAC zvyšuje pravděpodobnost růstu dendritů, nadále budu používat obě pájecí pasty, abych tuto informaci mohl potvrdit s větší pravděpodobností.

Napětíovou hladinu jsem zvolil nejprve 24V a později 48V. Pro vzorky s SnBi pájecí pastou jsem nastavil rovnou vyšší hodnotu napětí.

Celková kombinace vzorků:

Parametr:	Počet:	
Pájecí pasty	2	SAC, SnBi
Povrchová úprava pájecích plošek	3	Bez povrchové úpravy, ENIG, HAL
Povrchové úpravy DPS	2	S maskou a bez masky
Prostředí	1	Vlhkost
Napětí	2	24 V, 48 V
Technologie přetavení	2	Horkým vzduchem, kondenzační
Celkem	36 Vzorků	Pro SnBi pájecí pastu jsem zvolil napětí pouze 48V

Tabulka 2 Celková kombinace vzorků druhého experimentu

Kombinací parametrů jsme se opět dostali na 36 připravených vzorků. Oproti minulým pokusům je rozdíl především ve dvou technologiích přetavení a pouze v jednom prostředí, kam jsem vzorky umístil.

5.2.1 Průběh druhého experimentu

Podle teoretických předpokladů by měl pro vypěstování dendritů stačit vlhký vzduch, ale experiment by trval velmi dlouhou dobu a ani v tu chvíli bych neměl záruku, že skutečně dosáhnu výsledků. Proto jsem v tuto chvíli potřeboval, aby na deskách plošných spojů kondenzovala rovnoměrně vlhkost. V minulém pokusu jsem využil rozprašovače, ale ten nesplní nutnou podmínku – rovnoměrné rozložení vlhkosti. Možnost, která nás s vedoucím práce napadla, bylo využít mrazák. Vzorky vložit do silného mrazu a po několika minutách vystavit pokojové teplotě. Za těchto podmínek by měla začít na deskách kondenzovat vlhkost a to rovnoměrně.

Připravil jsem si první skupinu 12 DPS a připojil ke zdroji napětí. Jako první jsem zvolil skupinu, kde jsem použil SAC pájecí pastu. Zdroj jsem umístil do blízkosti mrazáku, který jsem mezitím nastavil na -21 °C. DPS jsem měl připojeny na dostatečně

dlouhý vodič, abych je bez problému mohl vložit na dno mrazáku. Vzhledem k tepelné kapacitě materiálu bylo nutné kontrolovat, za jakou dobu se desky ochladí na požadovanou teplotu. Za tímto účelem jsem použil teplotní čidlo, jež jsem připevnil pomocí lepenky k povrchu naprosto stejné DPS.

Po vložení do mrazáku trvalo 9 minut, než byly desky ochlazené na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po vyjmutí desek jsem čekal, až se v pokojové teplotě ohřejí zpět na teplotu kolem $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. To zabralo téměř 15 minut. Desky jsem pozoroval a zjistil, že okolo teploty $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k silné kondenzaci vlhkosti a okolo $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ už bývají desky téměř suché. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl, že proces urychlím a budu mrazit pouze na $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ohřívat na $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento krok ušetří přibližně 5 minut pro ochlazování a 7 minut pro ohřívání a neměl by mít vliv na experiment.

Celkem jsem provedl 10 cyklů pod napětím 24V a stejný počet cyklů pod napětím 48 V, kdy jsem použil oba druhy pájecích past. DPS jsem během experimentu, a to po 5 cyklech, kontroloval pod mikroskopem, jestli došlo k nějakým změnám.

5.2.2 Výsledky druhého experimentu

Vzorky jsem po 5 a následně po 10 cyklech odpojil od zdroje a zkoumal pod mikroskopem.

Jako první jsem zkontroloval DPS, které byly pod napětím 24V a použil jsem v jejich případě SAC pájecí pastu. Bohužel ani po 5 ani po 10 cyklech nedošlo k žádným viditelným změnám. I proto jsem se rozhodl pro ostatní DPS použít 48V zdroj.

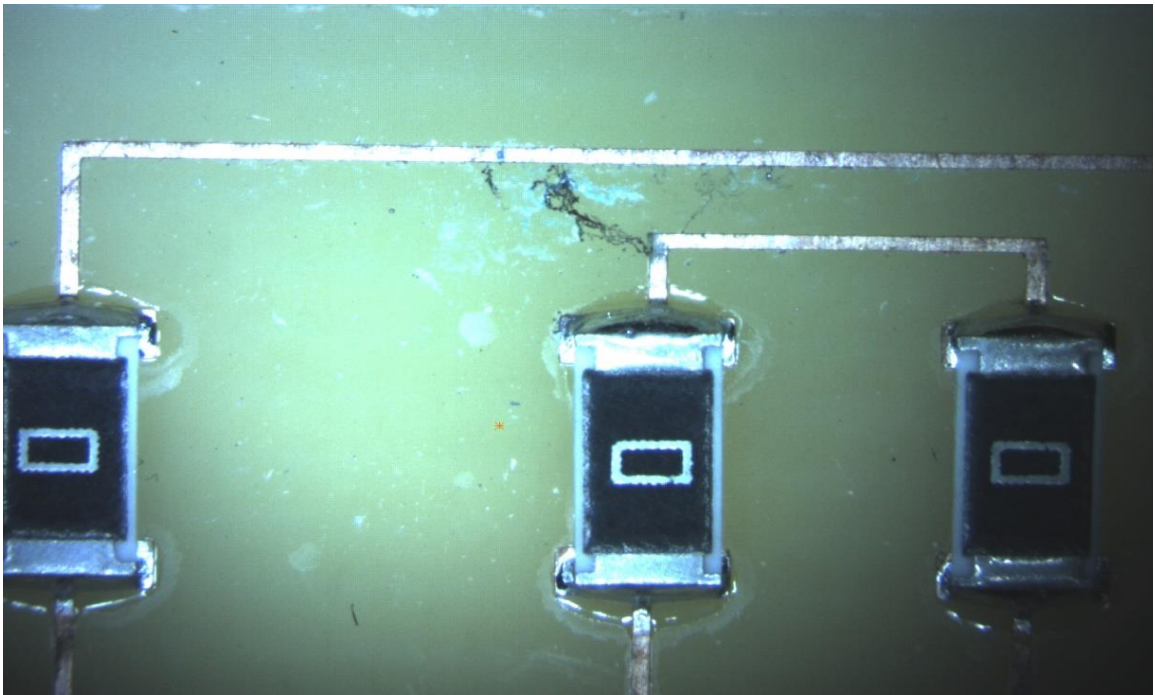
Druhá skupina, kterou jsem zkoumal pod mikroskopem, byla SnBi pájecí pasta. Ani v tomto případě nedošlo k žádným změnám, zkratům, elektrochemické migraci a tím pádem ani k růstu dendritů.

Toto se ovšem netýká třetí skupiny (SAC pájecí pasta, 48V zdroj), kde jsem již po 5 cyklech našel několik dendritů a po 10 cyklech bylo těchto nálezů ještě mnohem více. V následující kapitole budu prezentovat tyto výsledky

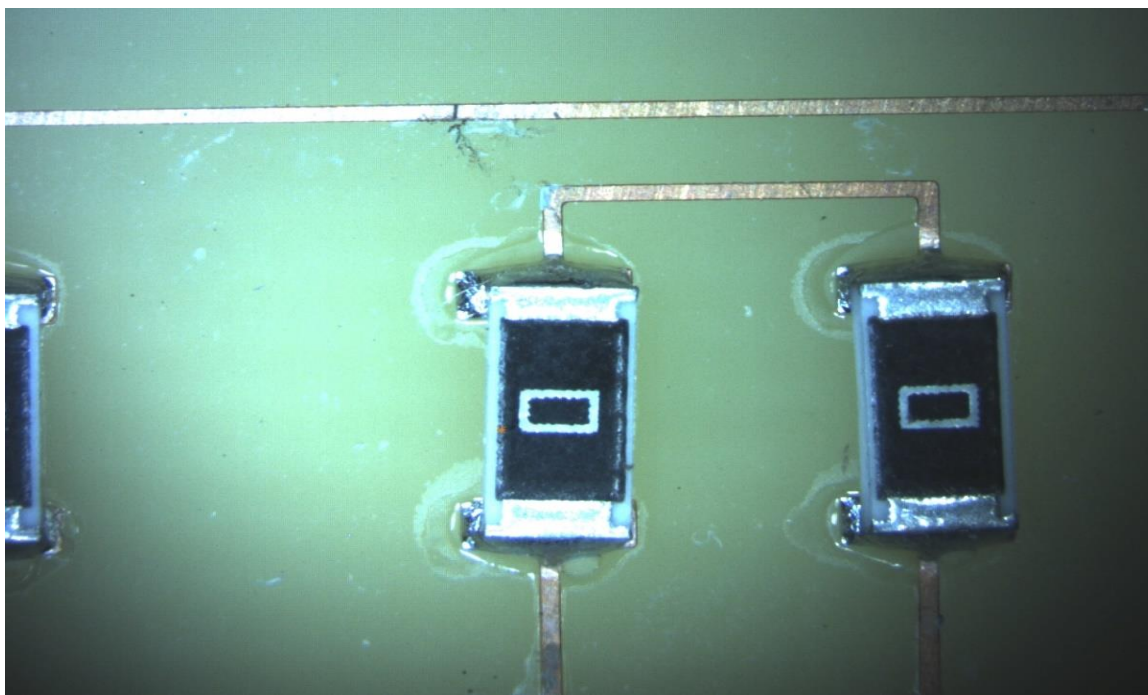
5.2.3 Snímky z mikroskopu

Na následujících fotografiích jsou zaznamenány dendrity vzniklé na DPS osazených SAC pájecí pastou pod napětím 48V. V první skupině jsou snímky po 5 cyklech ochlazení a následného zahřátí. Druhá skupina zachycuje stav po 10 cyklech. Na fotografiích je dobře patrná stromečková, či jehličková struktura dendritů. U každého snímku jsou rozepsány parametry té konkrétní desky.

Po 5 cyklech:



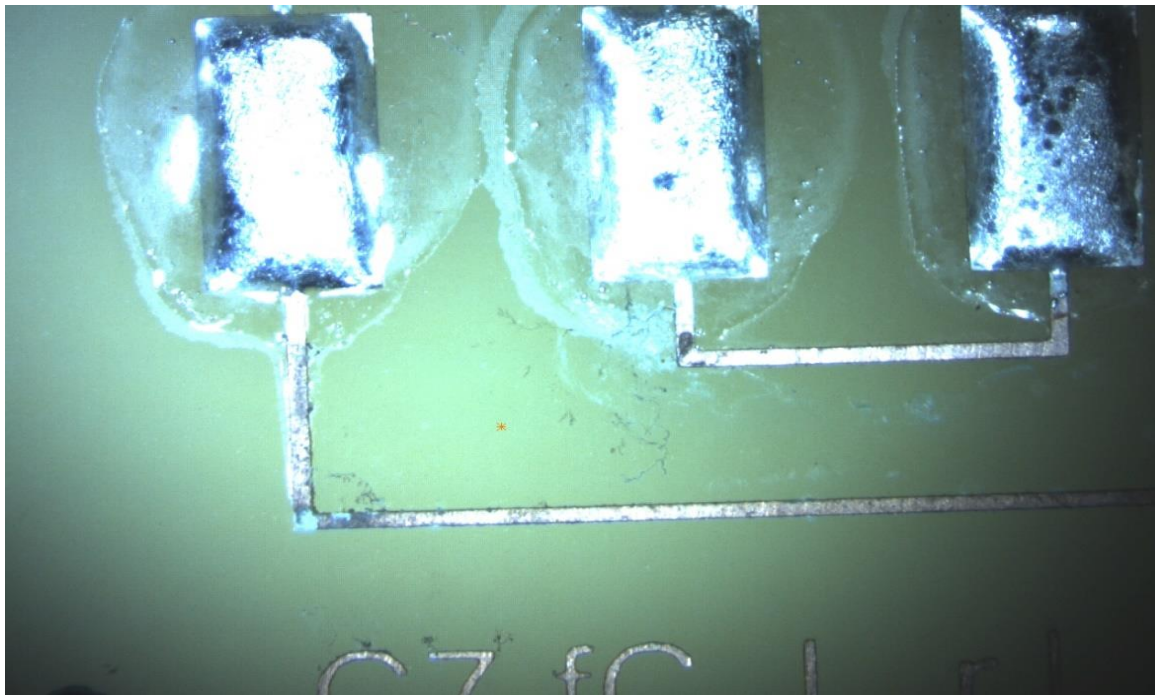
Obr. 34 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu



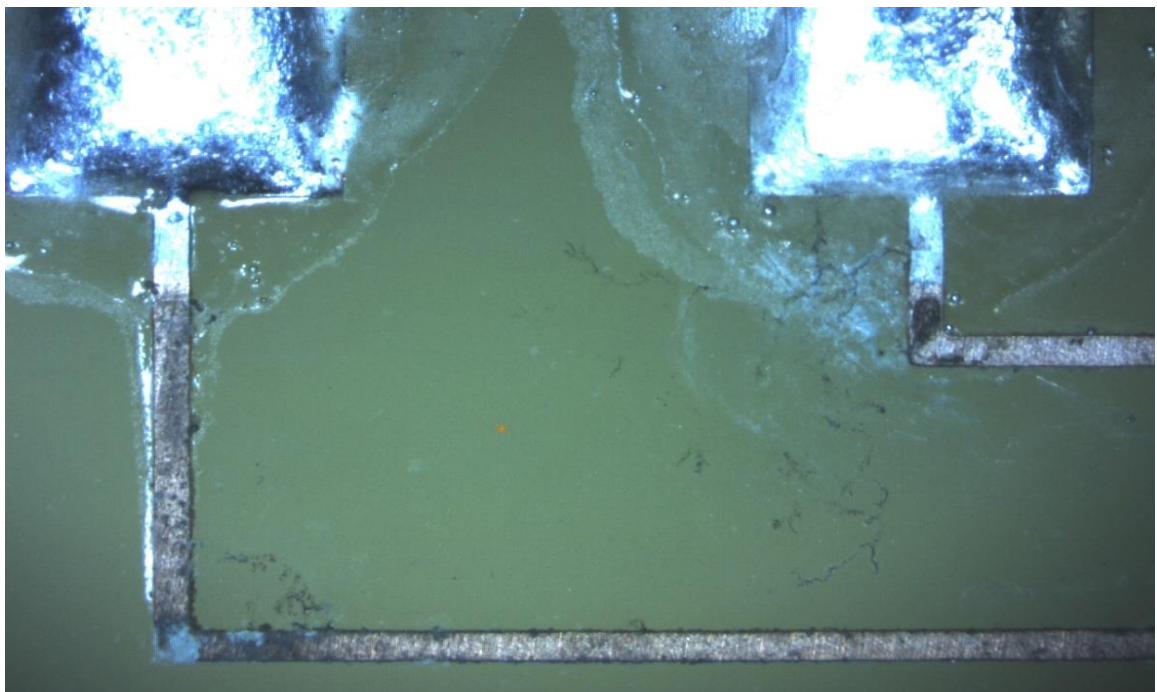
Obr. 35 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno horkým vzduchem

Po 5 cyklech se mi podařilo nalézt tyto dva dendrity. Oba jsem našel na DPS bez masky s měděnými ploškami. Pro obě DPS jsem použil SAC pájecí pastu. Jediným rozdílem bylo, že každá deska byla přetavena jinou technologií.

Po 10 cyklech:



Obr. 36 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu



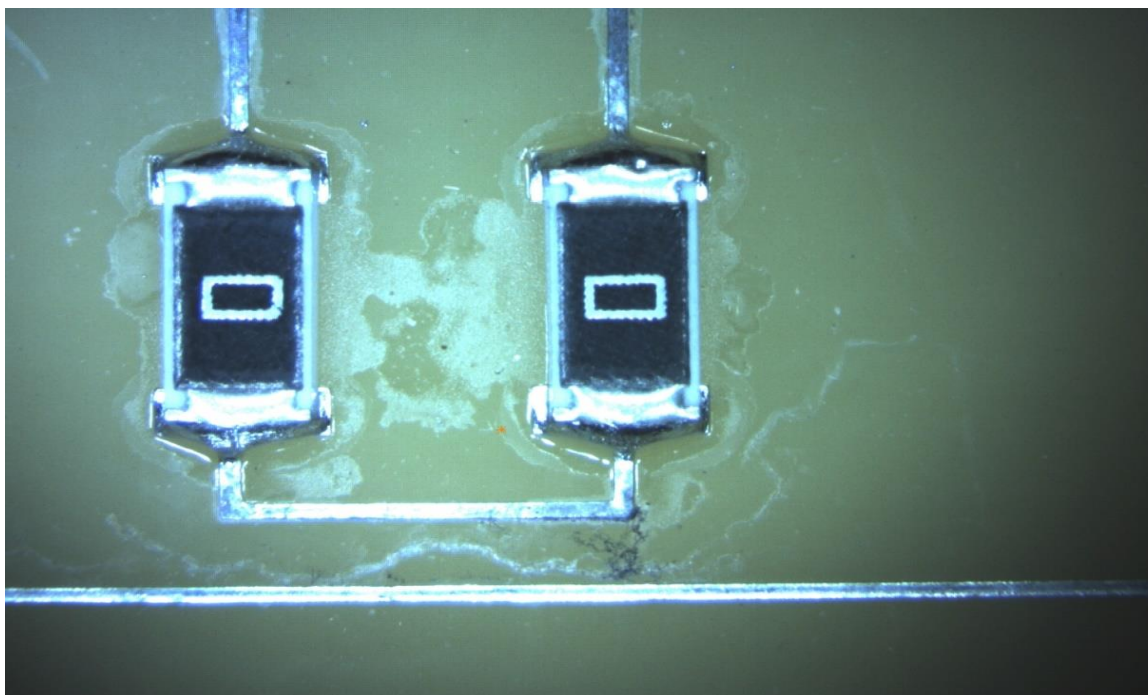
Obr. 37 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 36



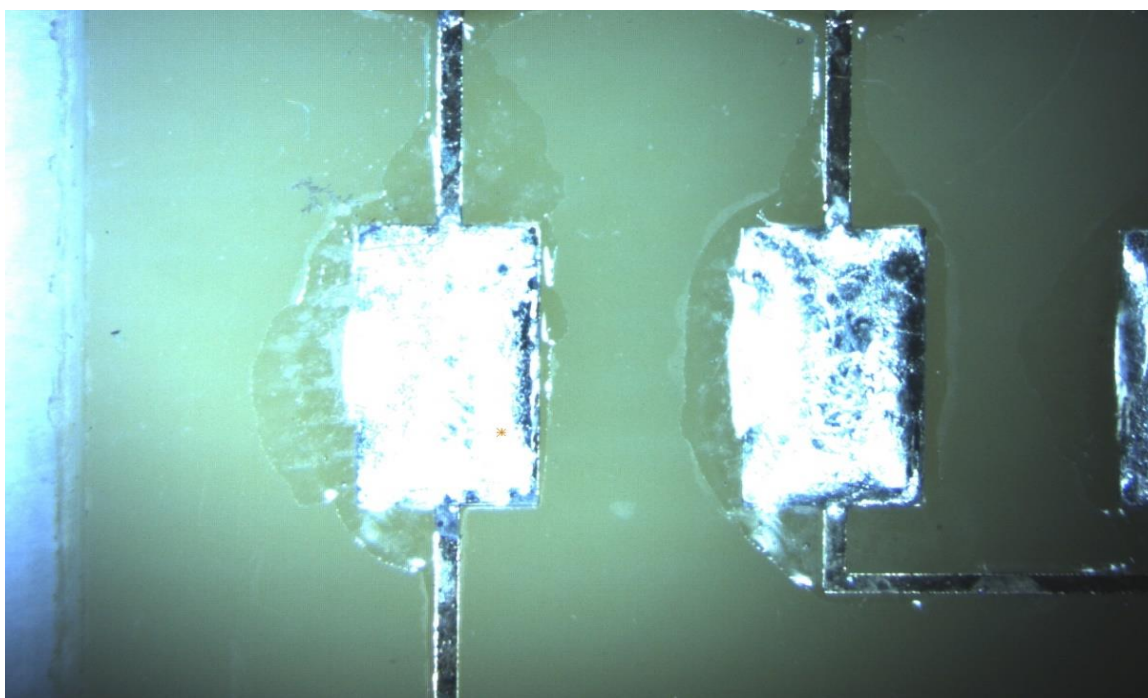
Obr. 38 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu



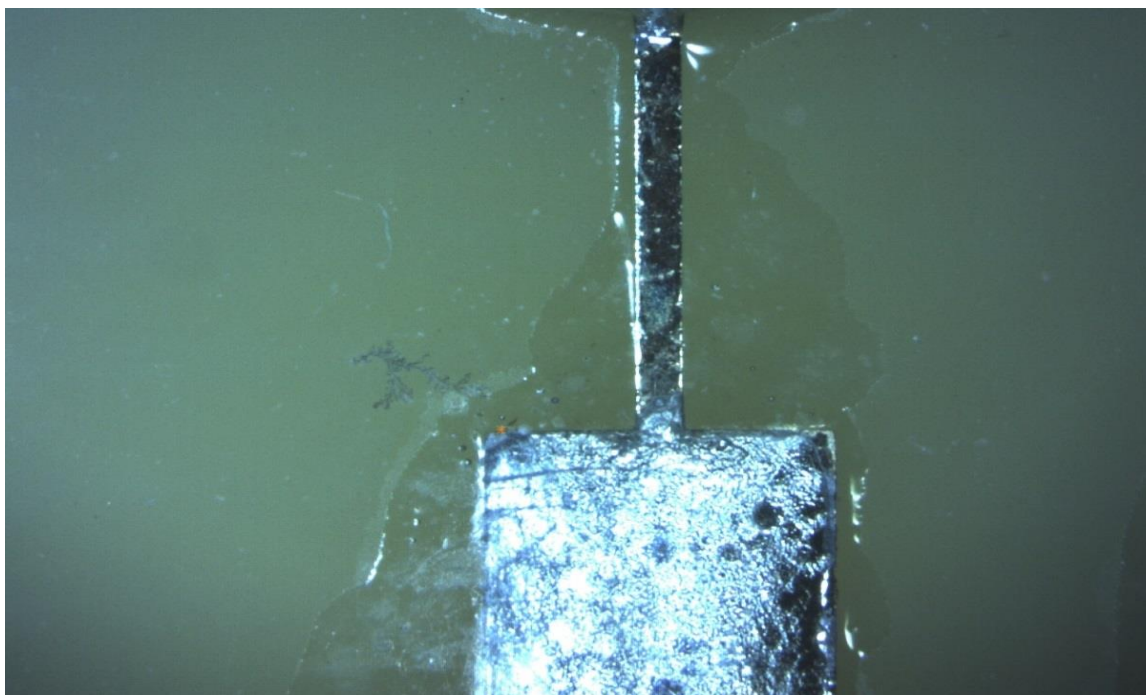
Obr. 39 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 38



Obr. 40 DPS bez masky, povrchová úprava HAL, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu



Obr. 41 DPS bez masky, povrchová úprava ENIG, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu



Obr. 42 DPS bez masky, povrchová úprava ENIG, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 41

5.2.4 Poznatky z druhého experimentu

Do experimentu jsem měl připravené tři skupiny vzorků po dvanácti kusech. V každé skupině byla kombinace všech parametrů a lišily se použitou pájecí pastou. Dvě skupiny byly naprosto stejné a použil jsem v jejich případě SAC pastu. U třetí jsem využil SnBi pájecí pastu.

První poznatek je, že dendrity se mi pomocí klimatické komory (resp. mrazicí komory) podařilo vypěstovat. Výsledků jsem dosáhl u skupiny, která byla napájena 48V a osazena byla pomocí SAC pasty. U ostatních vzorků jsem výsledků nedosáhl, ale díky tomu jsem si potvrdil některé své domněnky a teoretické předpoklady.

Podařilo se mi potvrdit předpoklad, že velikost napětí silně ovlivňuje rychlost a pravděpodobnost elektrochemické migrace. Skupina, kterou jsem napájel pouze 24V, nevykazovala po pěti ani po deseti cyklech žádné viditelné změny a k žádnému růstu dendritů nedocházelo. Z časových důvodů jsem neprováděl další cykly, ale je velmi pravděpodobné, že po určitém počtu cyklů by k migraci došlo. Přesto jsem dokázal, že rychlost a pravděpodobnost je nižší, jelikož v případě vzorků pod napětím 48V došlo k růstu již po pěti cyklech.

K růstu dendritů opět nedocházelo na DPS s maskou. Tím jsem si potvrdil předpoklad, který jsem vznesl již po prvním experimentu, že tato úprava bude mít vyšší odolnost vůči elektrochemické migraci. Jak jsem již zmínil, tak nejpravděpodobnější příčina bude ne příliš kvalitně vyrobená maska, která přesně neohraničuje vodivé plošky a vodiče. Tím vzniká prohlubeň, která bude mít za následek tento jev. Pravděpodobně bude mít za následek i změny v povrchovém napětí, ale to je pouze moje hypotéza, kterou jsem nijak nezkoumal. Rozhodně můžu prohlásit, že pravděpodobnost růstu dendritů je vyšší na DPS bez masky než s maskou.

Co se týče druhu pájecí pasty, tak v tomto případě jsem byl úspěšný pouze v případě nejběžnější SAC. Nesmím ovšem opomenout, že v rámci minulého experimentu se mi podařilo vypěstovat dendrity i na druhé použité pájecí pastě. Jednotlivé pájecí pasty se mohou lišit i použitým typem tavidla, ale bohužel u jednoho z výrobců jsem tuto informaci nedohledal. Přesto SnBi pájecí pasta bude mít pravděpodobně o něco vyšší odolnost vůči elektrochemické migraci, ale vzhledem ke stále poměrně malému množství vzorků, to nemůžu konstatovat s jistotou.

Dalším parametrem je povrchová úprava vodivých pájecích plošek. S jistotou mohu říci, že nejmenší odolnost vůči elektrochemické migraci má měď (tedy bez povrchové úpravy). V případě DPS bez masky a zároveň bez povrchové úpravy jsem našel největší množství dendritů. Co se týče HALu, tak jsem schopen říci, že pravděpodobně bude odolnější než měď, ale i v případě této úpravy k několika růstům došlo. Do poslední chvíle jsem si myslel, že na deskách plošných spojů s povrchovou úpravou ENIG k žádné elektrochemické migraci nedošlo a že tato úprava je proti dendritům velmi odolná. Tuto domněnku mi vyvrátilo pečlivé zkoumání jedné DPS s povrchovou úpravou ENIG, kde jsem našel velmi nepatrnou stromečkovou strukturu. Po přiblížení jsem zjistil, že i zde začínalo docházet k elektrochemické migraci (viz obr. 41, 42). Přesto to byl jediný nález, co se týče této úpravy, takže stále bych jí označil, jako více odolnou než měď nebo HAL.

Zajímavý a zároveň poslední parametr, který jsem zkoumal, je vliv způsobu přetavení. Polovinu vzorků jsem přetavil pomocí horkého vzduchu a druhou v parách galidenu. I když počet vzorků není příliš rozsáhlý, dá se konstatovat, že k růstu dendritů docházelo ve větší míře u DPS přetavených v parách. V případě přetavení horkým vzduchem se dendrity sice podařilo vypěstovat, ale pouze s měděnou povrchovou

úpravou pájecích plošek. Tato skutečnost bude mít souvislost s tím, že v případě pájení v parách pájecí kapalina rozpustí tavidlo po ploše DPS. Jak jsem již zmínil, tak po této technologii je vhodné DPS čistit, což jsem v případě svého experimentu neudělal. Tento vliv je určitě zajímavé téma ke zkoumání, ale bohužel mimo rozsah této práce.

6 Závěr

Diplomová práce se dá rozdělit na tři větší celky. V rámci první části jsem prováděl rešerši pájených spojů. V druhé části jsem se zaměřil na teorii, týkající se chyb se zaměřením na růst dendritů. Ve třetí části jsem využil tyto poznatky a dendrity sám vypěstoval.

V první části jsem sepsal přehled základní teorie. Nejprve jsem se zaměřil na základní vlastnosti pájených spojů. Tyto poznatky se mi později hodily při přípravě vzorků. Dále jsem rozebíral rozdíly mezi měkkým a tvrdým pájením, mezi THD a SMD součástkami a zaměřil jsem se i na různé druhy pájení dle zvolené technologie, se zaměřením na pájení přetavením, které jsem sám později využíval.

Jako druhou část bych označil kapitolu, kde jsem se věnoval spolehlivosti pájených spojů. Zaměřil jsem se na jednotlivé faktory a druhy namáhání a nakonec jsem zpracoval i krátkou rešerši nejčastějších chyb a problémů, které v pájených spojích vznikají. Hlavní kapitolou druhé části je ovšem teorie týkající se dendritů a elektrochemické migrace. Vzhledem k tomu, že v praktické části diplomové práce jsem sám dendrity pěstoval, tak zpracovat tuto kapitolu pro mne bylo klíčové. Zpracoval jsem jednotlivé faktory, které mají vliv na elektrochemickou migraci, věnoval jsem se matematickým modelům, ale hlavně jsem díky tomu zjistil, v jakých podmínkách bude nejpravděpodobnější, že dendrity vypěstují.

Třetí celek mé diplomové práce je praktická část. Ta se dá pomyslně rozdělit na dva menší okruhy, a to přípravná fáze a samotný experiment.

V přípravné fázi bylo nejdůležitějším úkolem vymyslet, jak budu dendrity pěstovat. Dle zpracované teorie jsem navrhl DPS, šablonu, zvolil vhodné bezolovnaté pájecí pasty, nanesl, osadil součástkami a přetavil. Dále bylo třeba zvolit vhodné prostředí, na hotové DPS připájet vodiče a připojit zdroj napětí. V rámci přípravy jsem zvolil kombinace DPS s různými povrchovými úpravami, pájecími pastami a prostředími, abych zjistil za jakých podmínek a jestli se mi podaří dendrity vypěstovat a případně, kde se budou vyskytovat nejčastěji.

Samotný experiment by se dal rozdělit na dvě části. O první části mluvím, jako o dlouhodobém experimentu. V rámci první části jsem vzorky nechal několik týdnů až

měsíců pod napětím ve vlivu prostředí. Po několika pokusech jsem dosáhl prvních výsledků a podařilo se mi ve velmi vysoké vlhkosti a teple vypěstovat první dendrity.

Poznatků z toho experimentu jsem využil v rámci druhé části. Využíval jsem kondenzace kapaliny při prudkém ochlazení a následném zahřátí. Tím se na DPS srážela vlhkost a rostla pravděpodobnost elektrochemické migrace. Desky pod napětím jsem vkládal do mrazicí komory a následně nechal zahřát zpět na pokojovou teplotu. Takto jsem prováděl několik cyklů a průběžně kontroloval výsledky. I tímto způsobem se mi podařilo po několika cyklech dendrity vypěstovat.

Ze svojí práce si odnáším celou řadu poznatků, co se týče vlivu jednotlivých parametrů na růst dendritů. Potvrdil jsem si například předpoklad, že velikost napětí má velký vliv na růst dendritů. V rámci mého experimentu jsem nedosáhl výsledků, pokud byly desky pod napětím 24V, zatímco v případě 48V jsem dendritického růstu dosáhl. K růstu dendritů nedocházelo na DPS s maskou, zatímco na deskách bez masky ano. Lišily se i výsledky dle použití pájecí pasty. Mnohem úspěšnější jsem byl, co se týče běžné SAC, než u druhé použité pasty Sn42/Bi58. Další parametr byla úprava pájecích plošek. Téměř s jistotou mohu konstatovat, že nejmenší odolnost proti elektrochemické migraci má měď (tedy bez povrchové úpravy). V druhé části práce jsem zkoumal vliv kondenzačního přetavení a zjistil jsem, že vliv mít pravděpodobně bude, jelikož k růstu dendritů zde docházelo čteněji, než u přetavení horkým vzduchem.

V době, kdy jsem začínal pracovat na diplomové práci, tak jsem si nebyl jistý, jestli dosáhnu nějakých výsledků, ale nakonec jsem byl úspěšný. Dendrity se mi vypěstovat podařilo a navíc jsem potvrdil i několik teoretických předpokladů.

Zdroje

- [1] Diagnostika a optimalizace použití ekologických materiálů pro vodivá spojení v elektrotechnice, Autoři: Prof. Ing. Alena Pietriková, CSc., Doc. Ing. Pavel Mach SSc., Ing. Juraj Ďurišin, PhD.
- [2] *A Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.dfrsolutions.com/uploads/white-papers/Time-to-Failure_Metallic_Migration.pdf
- [3] Electrochemical Migration (ECM) Testing. *NTS* [online]. 2008 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.nts.com/services/environmental/electrochemical-migration>
- [4] Diplomová práce: Studium spolehlivost bezolovnatého pájení, Bc. Jan Pícha, https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27814
- [5] *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájení* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27814
- [6] *Výzkum spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40024
- [7] *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24080/F3-BP-2014-Slavata-Michal-prace.pdf?sequence=3>
- [8] *Chegg* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/b-90-wt-sn-10-wt-pb-alloy-heated-temperature-beta-liquid-phase-region-composition-liquid-p-q5761779>
- [9] Pájecí slitiny. *Elektrotechnika* [online]. 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=6096>
- [10] FAJKUS, Martin. Spolehlivost pájeného spoje a faktory, které ji ovlivňují. 2009, 5 s. [cit. 2013-07-17]. Dostupné z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/spolehlivostpajeneho-spoje-a-faktory-kt-ji-ovlivnuji-m10817-p1.html>
- [11] Tombstoning. *Elektrotechnika* [online]. 2010 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0168_tomb/index.html

- [12] Within a whisker of failure. *Theguardian.com* [online]. 2008 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/technology/2008/apr/03/research.engineering>
- [13] Pájení v elektrotechnice. *Multimediální výukový systém* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [14] *Investigation on electrochemical migration in microelectronics* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2013/honlap/Medgyes_Balint_en.htm
- [15] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001

Seznam obrázků

Obr. 1 Diagram vzniku intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájky [4].....	10
Obr. 2 Fázový diagram SnPb pájky [8]	11
Obr. 3 Vliv difuze za pokojové a zvýšené teploty [4]	12
Obr. 4 Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecího úhlu [9]	13
Obr. 5 Diagram vlivů na výslednou spolehlivost pájeného spoje. [10].....	15
Obr. 6 Tombstoning [11]	18
Obr. 7 Můstek na DPS [7]	18
Obr. 8 Popcorn efekt [5]	19
Obr. 9 Příklady whiskerů [12]	20
Obr. 10 Tvary vývodů THT a SMT součástek	22
Obr. 11 Pájení vlnou [13]	23
Obr. 12 Pájení přetavením pomocí horkého vzduchu [7].....	25
Obr. 13 Pájení přetavením pomocí IR zářiče [7].....	26
Obr. 14 Pájení přetavením v parách [7].....	26
Obr. 15 Schéma komory pro přetavení v parách [13]	27
Obr. 16 Ruční pájení [13]	28
Obr. 17 Příklad růstu dendritů [2]	29
Obr. 18 Příklad růstu dendritů [14]	30
Obr. 19 Návrh DPS v MS Visio.....	35
Obr. 20 Datasheet výrobce odporů.....	37
Obr. 21 Manipulátor na osazování SMD součástek.....	38
Obr. 22 Přetavovací pec Mistral 260	39
Obr. 23 Teplotní profil průběžné pece Mistral (jednotlivé zóny pece nastaveny na 185/210/235°C).....	40
Obr. 24 Teplotní profil průběžné pece Mistral (jednotlivé zóny pece nastaveny na 100/130/155°C).....	40
Obr. 25 Pec pro kondenzační pájení QUICKY 300	41
Obr. 26 Specifikace použitého galdenu	41
Obr. 27 Teplotní profil pájení v parách	42
Obr. 28 DPS bez masky, pájecí pasta SnBi, bez povrchové úpravy (CU).....	45
Obr. 29 DPS bez masky, pájecí pasta SnBi, povrchová úprava HAL.....	45
Obr. 30 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, povrchová úprava HAL	46
Obr. 31 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, povrchová úprava HAL, detail na Obr. 30 ...	46
Obr. 32 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, Povrchová úprava HAL, detail na obr. 30	47

Obr. 33 DPS bez masky, pájecí pasta SAC, Povrchová úprava HAL, Detail na obr. 30....	47
Obr. 34 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu	51
Obr. 35 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno horkým vzduchem	52
Obr. 36 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu	53
Obr. 37 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 36	53
Obr. 38 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu	54
Obr. 39 DPS bez masky, bez povrchové úpravy, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 38	54
Obr. 40 DPS bez masky, povrchová úprava HAL, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu	55
Obr. 41 DPS bez masky, povrchová úprava ENIG, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu	55
Obr. 42 DPS bez masky, povrchová úprava ENIG, SAC pájecí pasta, přetaveno v parách galdenu, detail na obr. 41	56