

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1. ÚVOD | 3 |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST | 4 |
| 2.1. VÝZNAM POUZDŘENÍ | 4 |
| 2.2. JEDNOTLIVÉ ÚROVNĚ POUZDŘENÍ | 5 |
| 2.3. TYPY POUZDER | 7 |
| 2.3.1. <i>Volba typu pouzdra</i> | 7 |
| 2.3.2. <i>Pouzdra MCM</i> | 8 |
| 2.3.3. <i>Pouzdra CSP</i> | 9 |
| 2.3.4. <i>Nový směr – provedení WLP</i> | 10 |
| 2.3.4.1. <i>Definice WLP</i> | 10 |
| 2.3.4.2. <i>Aplikace</i> | 10 |
| 2.3.4.3. <i>Důvody pro využívání WLP</i> | 10 |
| 2.3.4.4. <i>Technologie výroby WLP</i> | 11 |
| 2.3.5. <i>Možné přístupy k návrhu pouzdra integrovaného obvodu</i> | 14 |
| 2.3.6. <i>Výběr vhodného druhu mikroelektronického pouzdra</i> | 15 |
| 2.4. TECHNOLOGIE POUZDER | 16 |
| 2.4.1. <i>Chip on board (COB)</i> | 16 |
| 2.4.2. <i>Soubor vývodů (Leadframe)</i> | 17 |
| 2.4.3. <i>Substráty pro pouzdra integrovaných obvodů</i> | 18 |
| 2.4.4. <i>Keramické moduly</i> | 19 |
| 2.4.5. <i>Kovová pouzdra hermetická</i> | 20 |
| 2.4.6. <i>Plastické pouzdrůčkové hmoty a technologie</i> | 21 |
| 2.5. TEPLOTNÍ MANGEMENT | 28 |
| 2.5.1. <i>Vznik tepla v polovodiči</i> | 28 |
| 2.5.2. <i>Přenos tepla</i> | 29 |
| 2.5.3. <i>Náhradní tepelný model součástky</i> | 30 |
| 2.5.4. <i>Návrh pouzdra s ohledem na teplotní poměry</i> | 32 |
| 2.6. VLIV ZNEČIŠTĚNÍ NA IZOLAČNÍ ODPOR SUBSTRÁTU | 36 |
| 2.6.1. <i>Jev elektromigrace</i> | 37 |
| 2.6.2. <i>Povrchový izolační odpor (SIR)</i> | 40 |
| 2.6.3. <i>Tavidlo</i> | 42 |
| 2.6.4. <i>Optimalizace procesu čištění</i> | 46 |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 47 |
| 3.1. DEFINICE CÍLŮ | 47 |
| 3.2. NÁVRH TESTOVACÍ STRUKTURY | 47 |
| 3.3. TESTOVACÍ METODIKA..... | 52 |
| 3.3.1. <i>Uspořádání pracoviště</i> | 52 |
| 3.3.2. <i>Rozvržení experimentu</i> | 53 |
| 3.3.3. <i>Parametry teplotního cyklování</i> | 54 |
| 3.4. PARAMETRY TESTOVACÍCH MATERIÁLŮ | 56 |
| 3.4.1. <i>Pájecí slitina Kovohutě Sn63Pb37</i> | 56 |
| 3.4.2. <i>Pájecí pasta COBAR S9M – XM3S</i> | 56 |
| 3.4.3. <i>Zalévací hmota EPO TEK H61</i> | 57 |
| 3.5. VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ PRO NAVRŽENOU STRUKTURU | 58 |
| 3.5.1. <i>Výsledky pro bezolovnatou pastu COBAR a hmotu EPO TEK</i> | 58 |
| 3.5.2. <i>Výsledky pro slitinu SnPb a hmotu EPO TEK</i> | 61 |
| 3.5.3. <i>Výsledky pro slitinu SnPb a jeden cyklus oplachu</i> | 64 |
| 3.5.4. <i>Výsledky pro slitinu SnPb bez čištění</i> | 67 |
| 3.5.5. <i>Zhodnocení výsledků měření navržených struktur</i> | 70 |
| 3.6. VÝSLEDKY PO TEPLIČNÍM CYKLOVÁNÍ..... | 72 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6.1. Zhodnocení výsledků po teplotním cyklování | 74 |
| 3.7. VÝSLEDKY ZKOUŠEK ČIŠTĚNÍ SUBSTRÁTŮ | 75 |
| 3.7.1. Zhodnocení výsledků po čištění substrátů | 78 |
| 3.8. DISKUSE VÝSLEDKŮ..... | 79 |
| 3.8.1. Návrhy na optimalizaci technologických procesů | 80 |
| 4. ZÁVĚR | 81 |
| 5. POUŽITÉ ZDROJE | 83 |

1. Úvod

Nároky na rychlost a výkon moderních elektronických systémů neustále rostou. se zvyšováním rychlosti se zvyšuje i stupeň integrace elektronických obvodů. Důsledkem těchto trendů je i nutnost zlepšování úrovně technologie, která je při výrobě využívána. Dále je zapotřebí hledat nové směry, které umožní dosažení lepších výsledků.

Jedním z problémů výroby integrovaných obvodů je jejich pouzdření. Mikroelektronické pouzdro je jedním z článků řetězce, který určuje výsledný výkon celého systému. Kromě v elektronickém systému pouzdro plní funkci ochrany integrovaného obvodu, zajišťuje jeho propojení do systému, dodává elektrickou energii a odvádí ztrátový tepelný výkon. Je tedy nutno při jeho návrhu tyto aspekty zohlednit a pouzdro navrhnout tak, aby požadavky co nejlépe splňovalo.

Protože v souvislosti s nepřehledným množstvím nejrůznějších typů monolitických integrovaných obvodů existuje i velké množství možností, jak zapouzdřit konkrétní integrovaný obvod, stojí systémový návrhář před rozhodnutím, jak pouzdření daného obvodu vyřešit. Přitom jsou brány v úvahu typ aplikace obvodu, pracovní prostředí, nároky na rozměry a hmotnost pouzdra a v neposlední řadě i hlediska ekonomická.

Úkolem této práce je rozebrání problematiky pouzdření integrovaných obvodů a mikroelektronických systémů s ohledem na technologické řešení, na jeho elektrické a teplotní parametry. První část práce poskytuje přehled možností, které se návrháři v průběhu řešení způsobu zapouzdření konkrétního integrovaného obvodu naskýtají. Jednotlivé možnosti, z nichž návrhář pouzdra vybírá, jsou uvedeny v přehledu s ohledem na typ aplikace a ekonomické parametry.

Druhá část je zaměřena na měření elektrického svodu u zapouzdřených systémů. Tato vodivost je u přesných analogových obvodů příčinou zkreslení zpracovávaných signálů. Praktická část proto vyšetřuje různé možnosti zapouzdření systému a vlivy způsobu zapouzdření na izolační odpor. Dále se zabývá změnou vlastností pouzdra vlivem prostředí, jemuž je pouzdro vystaveno. Cílem práce je optimalizovat proces mikroelektronického pouzdření vzhledem k vlivu této parazitní vodivosti, což je důležité hledisko u analogových obvodů, které zpracovávají často velmi slabé signály, které jsou tudíž velmi náchylné na rušení.

2. Teoretická část

2.1. Význam pouzdření

Aby byly elektronické součástky použitelné, je nutné je propojit do systému, vyřešit jejich napájení a odvod tepla vznikajícího ztrátovým výkonem. Dále je zapotřebí vyřešit jejich ochranu před cizími tělesy, které by poškodily jemnou a přesnou elektronickou strukturu. Toto je úkolem pouzder integrovaných obvodů.

Pouzdra elektronických obvodů jsou struktury, které obsahují jeden nebo více elektronických obvodů, jimž zajišťují signálové spojení s vodiči na nosném substrátu, dodávají jim napájecí napětí a ochraňují je před vlivy okolí. Tyto struktury mohou být vyrobeny jako standardizované – tzn. že velké množství různých elektronických obvodů nebo čipů používá tentýž typ pouzdra. Mohou být ovšem taktéž navrženy přímo pro určitý konkrétní obvod tak, aby co nejlépe splňovaly technické požadavky. Takové řešení s sebou nicméně většinou přináší vyšší náklady, protože je nutno zpracovat příslušnou dokumentaci a uvést do výroby nový produkt.

Vzhledem k velkému množství technologií výroby elektronických obvodů (hybridní tenko- a tlustovrstvé, monolitické apod.) existuje i mnoho možností, jak konkrétní obvod zapouzdřit tak, aby byly zabezpečeny všechny funkce výsledné struktury. Těmito funkcemi je mechanická a chemická ochrana obvodu, redistribuce signálu a napájení a odvod generovaného tepla z pouzdřeného obvodu či systému.

Podle nároků na spolehlivost daného obvodu nebo systému, pracovních podmínek či ekonomických hledisek je zvolen způsob zapouzdření obvodu. Pro jednoduché aplikace s nižšími nároky na spolehlivost a nižší cenou jsou využívána pouzdra nehermetická, která jsou nejčastěji plastová. Pokud jsou nároky na provozní spolehlivost již vyšší, používají se pouzdra hermetická – ta jsou kovová či keramická.

Mnohdy je u monolitického integrovaného obvodu funkce pouzdra sloučena s dalšími funkcemi obvodu. Například v případě hybridního integrovaného obvodu jsou holé křemíkové čipy připevněny a elektricky kontaktovány na keramický či plastový substrát, na kterém jsou dále vytvořeny pasivní sítě, tvořené tlusto- a tenkovrstvými rezistory, induktory a kondenzátory. Kromě toho, že slouží jako nosný substrát pro tyto sítě, je keramická nebo plastová destička i čipovým pouzdem, která zabezpečuje funkci propojení vývodů křemíkového čipu s vývody takto vytvořeného modulu. Celý modul zahrnující křemíkový čip, organický nebo anorganický substrát s vodivými sítěmi, propojení mezi čipem a substrátem a případně další aktivní či pasivní prvky může být uzavřen do hermetického kovového či plastového pouzdra nebo opatřen vývody a zalisován nebo zalit do plastu nebo fluidizován.

2.2. Jednotlivé úrovně pouzdření

Pouzdra integrovaných obvodů mají tedy za úkol ochranu elektronického obvodu, jeho signálové propojení s vnějším okolím a distribuci napájecího napětí. Přitom pouzdra je možno rozlišit na pouzdra čipová, která mají za úkol ochranu monolitických (nejčastěji křemíkových) čipů a dále na pouzdření integrovaných systémů, mezi něž patří tenko- i tlustovrstvé struktury a hybridní integrované obvody. Přitom pouzdra čipová můžeme dále rozdělit na jedno- a vícečipová, dále úlohu čipového pouzdra může plnit i hybridní integrovaný obvod, který je potom ještě dále zpracováván, fluidizován apod.

Jednotlivé úrovně pouzdření čipů a integrovaných systémů lze tedy systematizovat a rozdělit do jednotlivých úrovní, kde každá úroveň má svá specifika. V tabulce (**Tab. 2.1.**) jsou tyto úrovně shrnuty.

| Úroveň | Definice |
|--------|--|
| 1 | Spojení čipu se substrátem pouzdra nebo s jeho souborem vývodů |
| 1,5 | Přímé spojení čipu se základní deskou (COB a DCA), nebo s hybridním obvodem představujícím nadřazený modul |
| 2 | Spojení pouzdra nebo modulu se základní deskou (kartou) |
| 3 | Spojení jednotlivých karet s hlavní systémovou deskou |
| 4 | Spojení mezi jednotlivými systémovými deskami v systémové skříně |
| 5 | Spojení různých systémových skříní kabeláží |

Tab. 2. 1. Jednotlivé úrovně propojení čipů a modulů [15]

Z uvedeného je tedy zjevné, že mikroelektronická pouzdra a moduly spadají do první a druhé úrovně propojení. Jsou – li součástí integrovaného systému monolitické čipy, jedná se v tomto případě o připojení holých čipů (*bare die*) na nosnou podložku integrovaného modulu. Na místě monolitického čipu může být i vrstvý integrovaný obvod, který je takto propojen do vyšší úrovně, která je tvořena nosným modulem.

První úroveň připojení integrovaného obvodu je definována jako propojení kontaktních plošek obvodu s vývody pouzdra. V praxi lze potom toto ještě nadále rozdělit na dvě další úrovně:

- ➔ Kontaktování čipu (flip chip, wire bonding)
- ➔ Spojení uvnitř pouzdra (vodivé cesty na substrátu nebo soubor vývodů)

Kontaktováním čipu je rozuměno vlastní připojení kontaktních plošek čipu směrem k dalším úrovním – vodivé cesty na substrátu nebo soubor vývodů. Jde o vodivé spoje, které jsou zcela nejtěsněji vlastnímu čipu. V zásadě existují tři možná provedení:

- ➔ Wire bonding
- ➔ Flip chip
- ➔ TAB (Tape Automated Bonding)

Toto jsou tři hlavní způsoby propojení čipu s okolním světem. Naprostá většina čipů je připojována technikou wire-bonding. Úkolem všech je distribuce signálu, napájení a zemnění obvodu. Jednotlivé technologie propojů se od sebe liší způsobem realizace, elektrickými parametry i typickým provedením obrazce spojů na nosném substrátu, na který jsou čipy upevňovány. Pro každou z uvedených technologií propojení je typický jiný obrazec spojů na nosném substrátu nebo souboru vývodů.

Samotné mechanické upevnění čipu je také možné vícero způsoby. Konkrétní způsob závisí na typu provedení vodivého spojení. V tomto případě je čip položen na podložce a přípojné kontaktní plošky jsou umístěny kolem obvodu plošky pro upevnění čipu. Čip je možné na nosnou podložku pouzdra či leadframe vpájet nebo vlepit. Tabulka (Tab. 2.2.) tyto možnosti shrnuje.

| Technologie pouzdra | Materiál uchycení čipu | Typ upevnění |
|---|---|--|
| Keramika se skelnými zátavy, vrstevné technologie | Nízkotavné sklo se stříbrnými částicemi | Sintrace |
| Vícevrstvá keramická struktura | Eutektikum zlato – křemík Kyanátový ester + stříbrné částice | Eutektické uchycení Organické lepidlo |
| Zapouzdrění zalitím (zalisováním) do plastu | Epoxid | Organické lepení |

Tab 2.2. Možnosti chycení čipu s ohledem na technologii pouzdra při metodě připojení wire-bonding [9]

2.3. Typy pouzder

2.3.1. Volba typu pouzdra

Vzhledem k velkému množství různých pouzder na trhu je v současné době pro každou aplikaci možné vybrat nejvhodnější typ pouzdra. Přitom je nutno mít na paměti, že jednotliví výrobci často používají odlišné výrobní postupy i materiály. Na rozdíl od minulosti nepřipadají v dnešní době v úvahu výhradně pouzdra, která jsou vyráběna v typizovaných řadách.

První volbou při pouzdření je tedy volba samotného typu pouzdra. Zde je možný výběr:

- ➔ Pouzdra vyráběná ve standardizovaných řadách (DIP, SOJ, QFP)
- ➔ Pouzdra navrhovaná zákaznický (BGA, PGA, SiP)

2.3.1.1. Pouzdra vyráběná ve standardizovaných řadách

Tato pouzdra jsou vhodná pro jednoduché obvody s menším počtem vývodů. Výhodou je standardizace, která je všemi výrobci respektována a tím pádem i nízká cena plynoucí z využití stávajícího vybavení a absence nutnosti vyvíjet, zavádět a využívat rozdílné nástroje, lišící se pro každou zakázku. Navíc se zjednodušuje návrh desek plošných spojů díky typizovaným rozměrům a roztečím vývodů. Na druhou stranu zde chybí možnost přizpůsobit pouzdro konkrétní aplikaci, což může být problém především u složitých obvodů s velkým počtem vývodů.

2.3.1.2. Pouzdra navrhovaná zákaznický

Tato pouzdra umožňují přizpůsobit pouzdro konkrétnímu vyráběnému obvodu a optimalizovat jeho velikost a počet vývodů. Jde o důležitý rys v oblasti miniaturizace, kdy by neoptimalizovaná, typizovaná pouzdra představovala překážku pro zmenšování rozměrů zařízení. Díky optimalizaci z hlediska elektrických i teplotních parametrů lze vyrobit pouzdro jen o málo větší, než je rozměr pouzdřeného obvodu. Nevýhodou je vyšší cena hotové součástky a delší doba kompletního návrhu zařízení.

2.3.2. Pouzdra MCM

Zkratka MCM označuje *MultiChip Module*, což je takový typ mikroelektronického pouzdra, které pojme dva a více čipů. Počátek technologie sahá do poloviny osmdesátých let.

Základní filozofie vychází z poznatku, že zvyšování výkonu systému prostřednictvím zlepšování parametrů integrovaných obvodů má omezený význam, pokud současně nedochází i ke zlepšování parametrů propojů a ke snižování zpoždění ve vodičích. U dvou elektronických čipů, kdy je každý umístěn v samostatném pouzdře, musí signál zprostředkující jejich vzájemnou komunikaci projít přes kontakty mezi čipy a jejich pouzdry, přes spoje uvnitř obou pouzder, přes kontakty spojující čipové pouzdro a základní montážní substrát a přes vodivou trasu na tomto substrátu. Umístění dvou a popřípadě i více čipů do jednoho pouzdra umožňuje tuto cestu zkrátit a tím snížit parazitní vlastnosti, které zhoršují výkonnost systému. Dalším důvodem pro používání multičipových modulů je jejich větší hodnota efektivity pouzdření, která je definována:

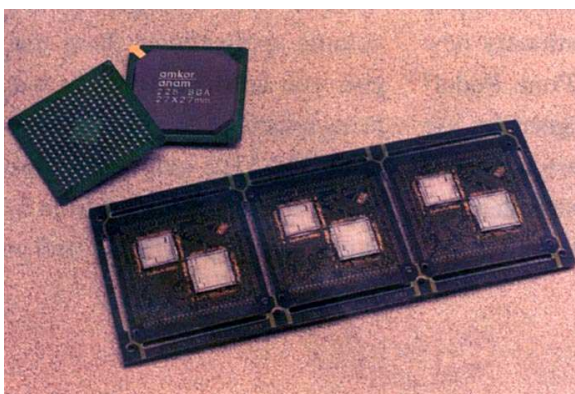
$$EP = (S_{\text{čip}}/S_{\text{pouzdro}}) * 100\% \quad (1)$$

EP - Efektivita pouzdření (%)

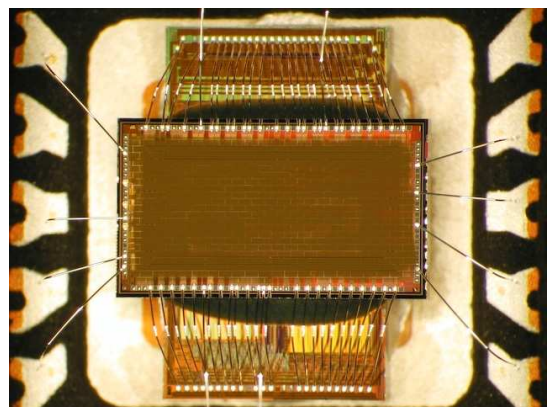
$S_{\text{čip}}$ - plocha čipu (m^2)

S_{pouzdro} - plocha pouzdra (m^2)

Multičipové moduly z hlediska uspořádání mohou existovat jako pouzdra, kde jsou jednotlivé čipy umístěny vedle sebe v jedné rovině (*side by side*) nebo jako struktura, kde jsou čipy skládány na sobě (*stacked die*). Ve druhém případě jsou jednotlivé čipy na sebe lepeny a mohou být i prokládány „falešnými“ čipy, což jsou křemíkové čipy bez vytvořené funkční struktury. Obrázek (**Obr.2.1.**) ukazuje provedení obou typů.



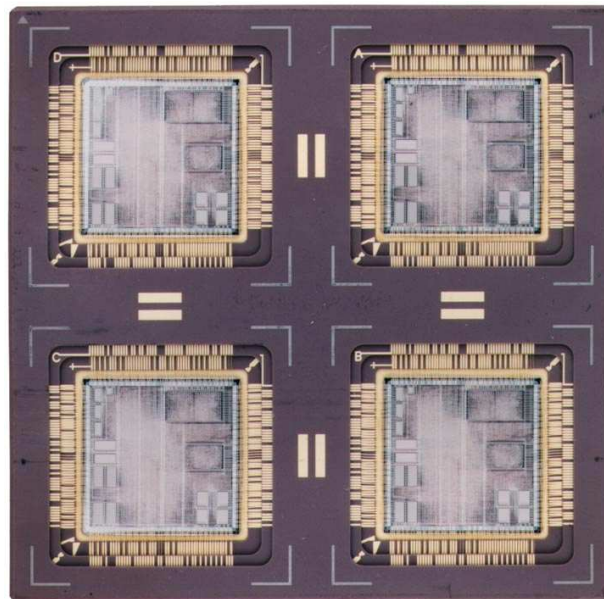
a



b

Obr.2.1. Provedení multičipových modulů s čipy a) vedle sebe a b) na sobě [15]

Další variantou multičipových modulů jsou keramická pouzdra se dvěma či více oddělenými dutinami, do nichž jsou jednotlivé čipy vkládány. Obrázek (**Obr. 2.2.**) ukazuje provedení takového modulu.



Obr. 2.2. Provedení keramického multičipového modulu se čtyřmi dutinami [15]

2.3.3. Pouzdra CSP

Zkratka označuje „*Chip Scale Packaging*“, což znamená „pouzdrění v rozsahu čipu“. Nejedná se o konkrétní technologii pouzder, ani o uzavřenou skupinu, pro kterou by byl typický nějaký způsob provedení nebo montáže. Jde o kategorii pouzder, kam spadá každé pouzdro, jehož výsledný rozměr na montážní desce nepřesahuje 120% plochy čipu. Uplatnění těchto pouzder je především v technologiích, kde je cílem co nejvyšší hustota součástek na malé ploše. Technologie, jakou jsou pouzdra patřící do kategorie CSP vyráběna, jsou velice rozmanité, může se jednat jak o pouzdra založena na nosném substrátu, tak i na souboru vývodů, který je následně lisován do plastu. Nicméně v každém případě jsou zde cílem co nejkratší vývody, které nejméně přesahují plochu čipu.

2.3.4. Nový směr – provedení WLP

2.3.4.1. Definice WLP

Akronym WLP označuje spojení „*Wafer Level Packaging*“, což v překladu označuje „pouzdrění na úrovni křemíkového waferu“. Jde zde o to, že na rozdíl od konvenčně vyráběných pouzder zde proces zapouzdrění není výrobní operací probíhající na křemíkových čipech, které vzniknou rozřezáním křemíkového waferu, jedná se zde o proces, který je součástí zpracování waferu jako celku, před jeho rozřezáním. Pouzdrění je zde tedy operací, která je včleněna do zpracování waferu. Znamená to, že je prováděno hromadně, na několika čipech zároveň.

2.3.4.2. Aplikace

WLP je využitelnou technologií pro pouzdrění celé řady polovodičových zařízení od jednoduchých s několika tranzistory až po složité mikroprocesory a zákaznický navrhované obvody (ASIC). Zajímavou oblastí využití jsou polovodičové paměti.

U složitých obvodů je nutno řešit problematiku chlazení. U WLP součástek je situace podobná jako u provedení flip chip s holou zadní stranou čipu: je možné umístění pasivního chladiče přímo na čip a chlazení je velmi efektivní.

2.3.4.3. Důvody pro využívání WLP

Cenová úspora: Hromadné pouzdrění a začlenění pouzdrění do zpracování waferu snižuje cenu za jeden zapouzdrěný čip. Pouzdrění je tedy cenově efektivnější. U konvenčních technologií je pouzdrění prováděno v oddělené provozovně, než kde je wafer vyroben – taková továrna se nachází nejčastěji v lokalitách s nízkou cenou práce. Wafer je rozřezán na čipy, které musí být nejprve proměřeny. S jednotlivými čipy se manipuluje postupně. Jsou umístěny na soubor vývodů či na základnu s využitím lepidla nebo pájecí pasty a připojeny.

Čipy musí být v rámci waferu aspoň minimálně testovány. Zapouzdrění vadné součástky nepřináší výrobcům žádný zisk. Navíc musí být testovány i po zapouzdrění za účelem zjištění výrobních vad a výrobky jdoucí do užívání musí být testovány znovu. Cena testování je minimálně dvojnásobná oproti ceně samotného pouzdra. U provedení WLP je kompletní testování provedeno předtím, než je wafer rozřezán, což náklady na testování výrazně snižuje.

Použití testovaných čipů: Jedním ze způsobů zefektivnění pouzdrění je technika přímého propojení čipu jako flip chip. Zatímco přímé náklady na pouzdrění jsou zde sníženy, náklady spojené s využíváním nestandardního vybavení zde dramaticky stoupají. Při používání flip chip je právě toto označeno za jeden z nejdůležitějších problémů. Velkým problémem je, že ujištění zákazníka o kvalitě vyrobených čipů je těžké, bez ohledu na to, jak byly čipy testovány při výrobě. WLP umožňuje relativně jednoduché řešení tohoto problému tohoto jinak složitěho problému.

Standardizace vstupů/výstupů čipu: Standardizace rozložení vstupních a výstupních kontaktů od všech výrobců flip chipů je velmi obtížné. Vyžaduje, aby všichni výrobci stále sledovali vývoj a dodržovali křivku osvojování znalostí. Což je náročné. Zmenšování čipů

znamená, že se všechny kontakty musí zmenšovat společně s čipem. Výjimku by bylo možno udělat, pokud by všechny výrobní společnosti postupovaly podle předem stanovených pravidel a vstupy a výstupy se postupně přemístily do středu čipu tak, jak se čip bude zmenšovat. Toto předpokládá, že čipy nebudou umístěny v místech, kde mohou být vystaveny proudu α -částic, které mohou být emitovány některými isotopy umístěnými v pájecích slitinách.

Naproti tomu WLP umožňuje vyřešit tyto problémy tím, že využívá běžné rozložení kontaktů na čipu, které jsou vlastní všem výrobcům čipů. Stále to předpokládá budoucí přizpůsobování návrhu vstupů a výstupů.

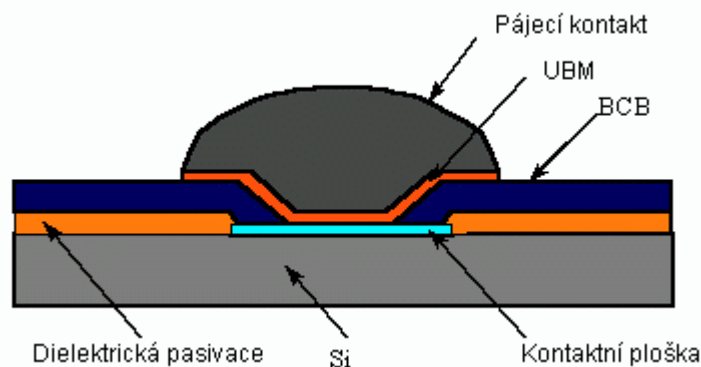
Vyhovující kapacity propojení: Přímé připojení čipu může být problémem, pokud uvážíme rozdílné součinitele teplotní roztažnosti mezi čipem a nosným – často organickým – substrátem.

Vyhovující návrh WLP umožňuje se tomuto problému vyhnout. Kvalitně navržené WLP umožňuje problém rozdílné teplotní roztažnosti snížit tím, že uvnitř zapouzdřeného celku je již obsažena vrstva, která redukuje pnutí v oblasti spojů mezi pouzdrem a nosným substrátem.

2.3.4.4. Technologie výroby WLP

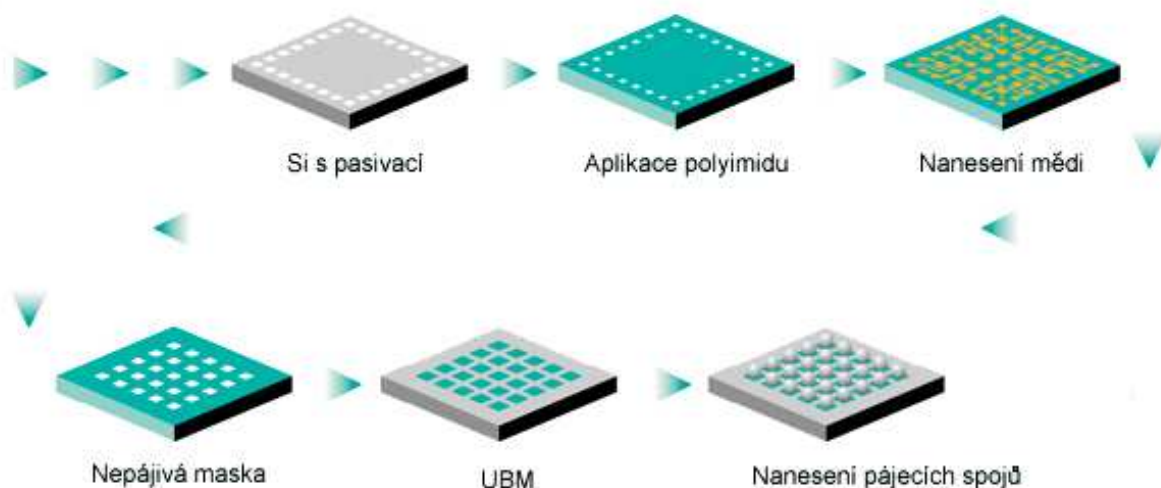
Provedení s pájecími kuličkami

Jak již bylo zmíněno, u WLP je pouzdrění provedeno ještě předtím, nežli je křemíkový wafer rozřezán. Na hotovém křemíkovém waferu je vytvořena pouzdřicí struktura a wafer je potom rozřezán. Protože pouzdrění probíhá ve stejné továrně, jako výroba waferu, jedná se o časově nenáročný proces. Obrázek (**Obr. 2.3.**) již zachycuje průřez typickou strukturou WLP. Jde o provedení, kde k propojení mezi pouzdrem a nosným substrátem slouží pájecí kuličky.



Obr. 2.3. Průřez typickou WLP strukturou [14]

Celý proces výroby probíhá na úrovni křemíkového waferu. Na obrázku (**Obr. 2.4.**) je postup výroby WLP struktury zachycen. Jedná se již o pokročilou strukturu, která obsahuje redistribuční vrstvu a nepájivou masku.

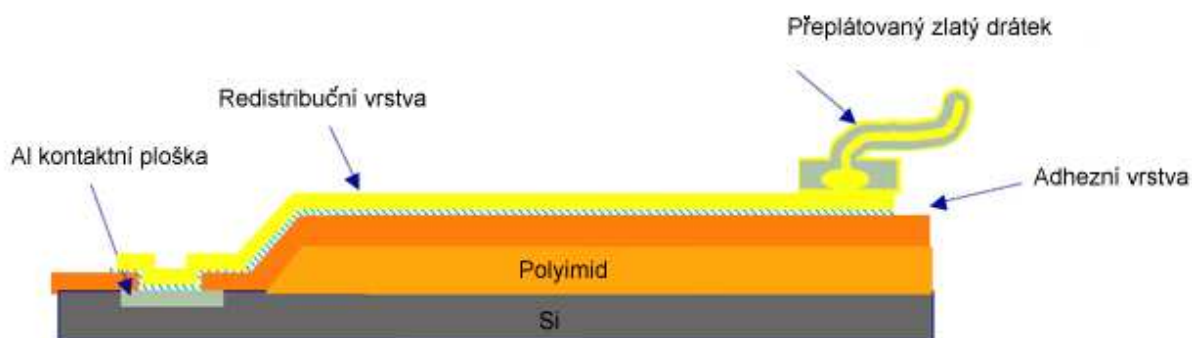


Obr. 2.4. Postup výroby struktury WLP [13]

Provedení s drátkovými propoji

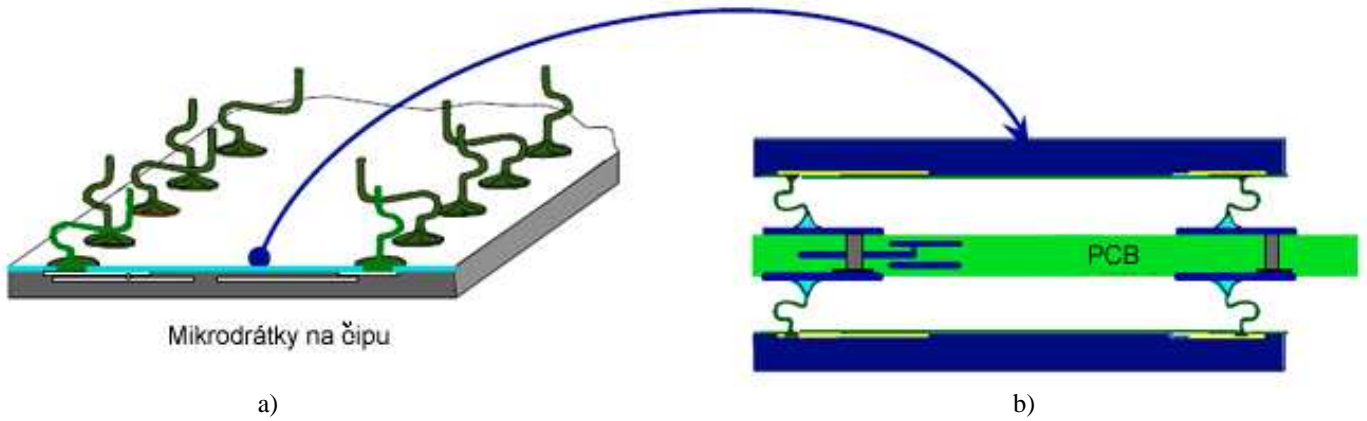
Vedle pájecích kuliček, kdy struktura WLP navenek působí jako běžné BGA pouzdro, je ještě možno využít techniku modifikovaných drátkových propojů (wire-bonding).

Hlavní výhodou této technologie je využívání stávajících technologií, specifické použití široce rozšířených termosonických wire bonderů. Technologie spočívá v tom, že na kontaktní plošce na čipu je vytvořen spoj a následně vytvarován a odtržen. Drátkový spoj je potom zanechán tak, jak byl utržen, nebo je pomocí plamene na jeho konci vytvořena kulička (ball bond). Drátek je potom ještě opatřen krycí vrstvou. Na obrázku (**Obr. 2.5.**) je uveden průřez touto strukturou.



Obr. 2.5. Průřez strukturou WLP využívající mikrodrátky [10]

Hotová struktura se potom prostřednictvím drátkových vývodů připájí na nosný substrát. Protože drátky jsou pružné, jedná se o velmi elegantní řešení problematiky kolem rozdílu teplotní roztažnosti mezi čipem a substrátem. Zkompletovaná montážní a propojovací struktura je vyobrazena na obrázku (**Obr. 2.6.**).

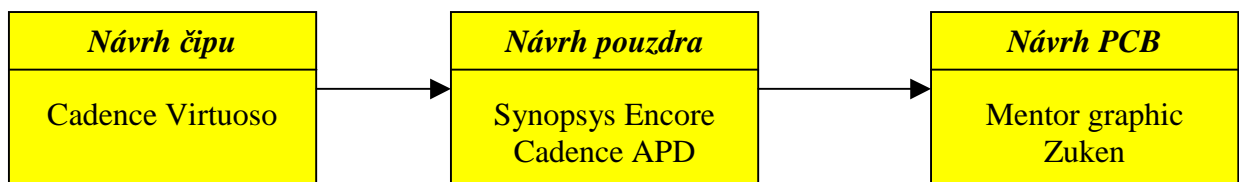


Obr. 2.6. a) Čip s mikrodrátky, b) montážní a propojovací struktury s těmito čipy [12]

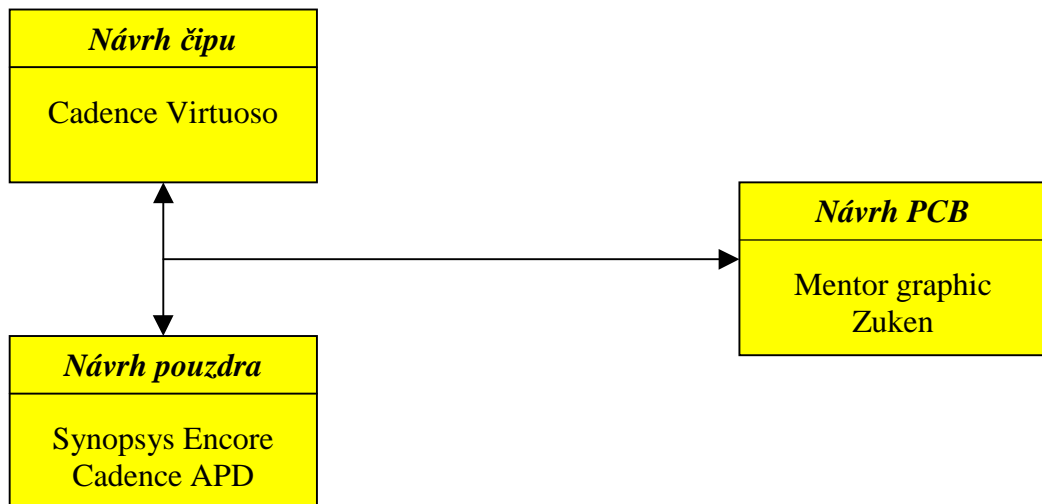
2.3.5. Možné přístupy k návrhu pouzdra integrovaného obvodu

Pouzdro integrovaného obvodu je klíčovým článkem v řetězci, článkem, který zabezpečuje komunikaci křemíkového čipu s okolím. Jeho úlohou je distribuce signálu, dodávka elektrického napětí, odvod ztrátového výkonu a mechanická ochrana čipu. Proto je zapotřebí pouzdro posuzovat jak z hlediska elektrického a tepelného, tak i mechanického. Dále je nutné respektovat požadavky týkající se celkového provedení pouzdra z hlediska rozmístění vývodů, jejich tvaru a rozteče. V zásadě existují dva možné přístupy k návrhu pouzdra v rámci systému.

Dřívější přístup:



Dnešní přístup:



Obr. 2.7. Obecné přístupy k návrhu čipového pouzdra

Z uvedeného je tedy patrné, že v rámci systému lze v současné době mluvit o souběžném návrhu čipu a pouzdra. To je významná změna oproti dřívějším roků, kdy návrhář pouzdra musel zcela respektovat návrh čipu takový, jaký byl. V současnosti je možné některé parametry čipu (velikost a uspořádání kontaktních plošek) přizpůsobit navrhovanému pouzdru. Souběžný návrh tedy umožňuje optimalizovat zapouzdřenou součástku jako celek.

2.3.6. Výběr vhodného druhu mikroelektronického pouzdra

Před vlastním návrhem je dále nutné stanovit, pro jaký typ aplikace bude pouzdro určeno. Od toho se odvíjí výběr pouzdra buď hermetického, nebo nehermetického.

Pouzdra hermetická mají dutinu, ve které je čip umístěn a pomocí zlatých či hliníkových drátků připojen ke kontaktním ploškám pouzdra. Tělo pouzdra je nejčastěji keramické, vývody jsou buď pájkové kuličky, nebo kovarové piny plátované niklem a zlatem. Jde o strukturu, která vznikne laminací několika keramických vrstev, na nichž je vodivý motiv vytvořen technologií sítotisku. Používají se tlustovrstvé pasty založené na wolframu, exponované plochy jsou plátovány niklem a zlatem. Dutinka je uzavřena pomocí kovového nebo keramického víčka.

Tato pouzdra jsou vhodná pro náročné aplikace, kde je kritická spolehlivost a ochrana čipu. Jsou také vhodná pro pouzdření testovacích vzorků a prototypů. Jejich nevýhodou je náročnější technologie výroby a z toho plynoucí vyšší cena.

Pouzdra nehermetická vyrobena z plastu, popř. kombinují keramiku a plastické hmoty. Neposkytují hermetické uzavření čipu, ale postačují pro většinu aplikací. V zásadě jsou vyráběny ve dvou velkých podskupinách.

Tou první jsou pouzdra založená na leadframe. Tím je samonosný soubor vývodů, který je vyroben technologií leptání, ražení, popř. aditivně galvanoplasticky. Součástí souboru vývodů je ploška, na kterou je křemíkový čip umístěn a následně propojen s vývody. Vzniklá struktura je následně zalisována do plastu. Poté jsou vývody povrchově upravovány, zkráceny a tvarovány.

Druhou možností je destička z izolačního materiálu, na které je fotolitografií, popř. sítotiskem nebo napařováním vytvořen vodivý motiv. Destička funguje jako mechanická kostra pouzdra, jako redistribuční vrstva a k odvodu tepla z čipu. Může být vyrobena z organického i anorganického materiálu, může být jedno- a vícevrstvá. Na spodní straně základní destičky jsou vytvořeny vývody – mohou jimi být metalizované plošky (LGA), pájkové kuličky (BGA), pájecí sloupky (CGA) nebo piny (PGA). Na horní stranu se upevní a elektricky připojí samotný čip.

2.4. Technologie pouzder

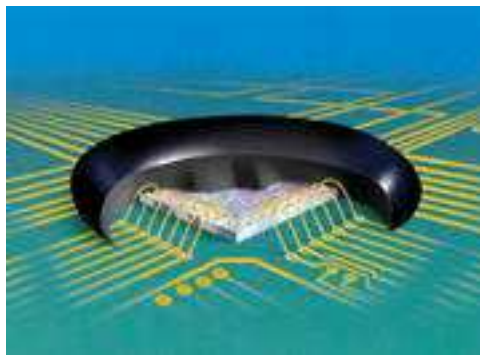
2.4.1. Chip on board (COB)

Polovodičové čipy jsou nezbytnou součástí, často přímo jádrem moderních elektronických systémů. Jejich mechanická ochrana, jakožto i distribuce signálu je úkolem čipového pouzdra. Toto pouzdro může být realizováno jako hermetické či nehermetické, rozličné jsou taktéž materiály, z nichž může být vyrobeno.

Čipové pouzdro je následně montováno na nosnou desku. V některých aplikacích však nosná deska plošného spoje úlohu pouzdra přejímá. Jedná se o případ, kdy je nosný substrát současně i čipovým pouzdrem. Tento způsob pozdření se označuje jako COB , popřípadě jako DCA:

- ➔ COB – čip je položen na nosné desce svou zadní stranou, vodivé spojení s touto deskou je provedeno pomocí tenkých kovových drátků. Čip je zalit ochrannou epoxidovou hmotou, která jemu a kovovým drátkům poskytuje ochranu před vlivy prostředí.
- ➔ DCA – *direct chip attach* – Při této technice je čip k nosné desce obrácen svou lící stranou a vodivé spojení je zprostředkováno pájkovými kontakty, vodivými pahýly nebo sloupky (flip-chip). Prostor mezi kontakty je vyplněn epoxidem (*underfill*) který má opět za úkol ochranu aktivní strany čipu a kontaktů před okolním prostředím.

Z hlediska rozdělení propojení na úrovně se jedná o úroveň 1.5 – jde tedy o splnutí úrovně 1 a 2 – propoje spojují čip s nosnou deskou přímo.



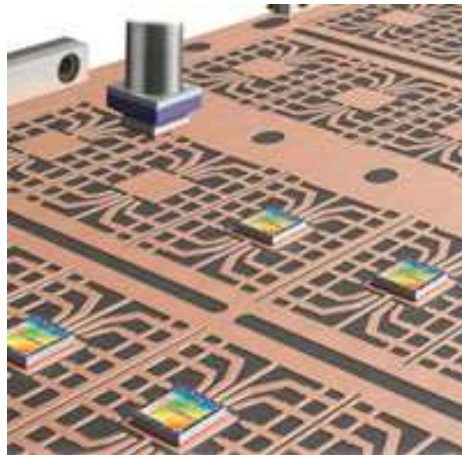
Obr. 2.8. Struktura Chip On Board [8]

2.4.2. Soubor vývodů (Leadframe)

Protože úkolem pouzdra integrovaného obvodu je zprostředkování vodivého spojení obvodu s okolním světem, jsou jeho důležitou součástí vodivé cesty, které toto spojení zprostředkují. Tyto vodivé trasy mohou vzniknout sítotiskem nebo litografickými procesy na substrátu, který tvoří nosnou podložku pouzdra, nebo mohou existovat jako samonosný soubor vývodů (*leadframe*), který slouží i jako nosná struktura pro vlastní planární integrovaný obvod. Po vodivém spojení integrovaného obvodu se souborem vývodů je vytvořeno vlastní tělo pouzdra integrovaného obvodu nejčastěji zalisováním souboru vývodů do epoxidu. Leadframe existuje jako spojitý celek a po zalisování jsou jednotlivé vývody odděleny (*singulation*) a vytvarovány.

Leadframe je tedy dvourozměrná struktura vyrobená nejčastěji z mědi. Je několik možností, jak lze leadframe vyrobit:

- Ražení
- Leptání
- Galvanoplastické nanášení



Obr. 2.9. Soubory vývodů při montáži čipů [20]

V segmentu pouzder pro monolitické integrované obvody je naprostá většina vyráběna s leadframe. Důvodem je příznivá cena pro velké série.

2.4.3. Substráty pro pouzdra integrovaných obvodů

Základem pouzdra integrovaného obvodu je jeho nosná konstrukce a současně propojovací struktura, která zajišťuje redistribuci signálu a distribuci napájecího napětí. Nosná konstrukce je nosným prvkem, na který se upevňuje polovodičový čip předtím, než je zalit pouzdricí hmotou, zalisován do ní, či uzavřen kovovým nebo keramickým víčkem. V případě vrstevných technologií může být tato podložka jak nosnou podložkou pro vlastní funkční strukturu, tak i součástí pouzdra – nosným substrátem, k němuž jsou připájeny vývody.

Na těchto substrátech může být funkční (vodivá a odporová) struktura vytvořena aditivně či subtraktivně. Aditivní technologie spočívá v nanášení prvků tvořících funkční strukturu na substrát. U subtraktivní technologie funkční struktura vznikne odebráním těch částí funkční vrstvy, které se nemají stát součástí funkční struktury.

Lze rozlišit tyto technologie obvodů:

- ➔ Obvody založené na organických substrátech
- ➔ Obvody založené na keramických substrátech
- ➔ Tlusté vrstvy
- ➔ Tenké vrstvy

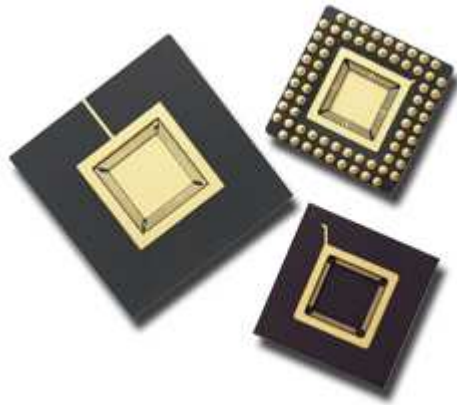
Substráty s vytvořeným vodivým motivem mají tyto funkce:

- ➔ Distribuce napájení
- ➔ Distribuce signálu – propojení čipu s jiným čipem nebo propojení na další úrovni s přijatelnou signálovou integritou
- ➔ Mechanické – jako podložka se součinitelem teplotní roztažnosti blízkým součiniteli teplotní roztažnosti instalovaných komponentů

Substráty u pouzder IO dále přispívají k odvodu tepla, přičemž musí zachovat svou funkčnost v širokém rozsahu pracovních podmínek a neměly by být drahé.

2.4.4. Keramické moduly

Tato pouzdra jsou v zásadě výrobně dokončena ještě předtím, než je do nich čip vložen. Tato pouzdra mají zpravidla dutinu, do níž je čip vložen. Jde v případě keramických pouzder o laminovanou keramiku, kde jsou vodivé trasy zhotoveny technologií síťotisku, nejčastěji na bázi wolframu. Jednotlivé vrstvy jsou po natištění vrstev laminovány a vypáleny. Po výpalu následuje ještě plátování vodičů na povrchu a v dutině pro zajištění dobrého kontaktu mezi kontaktní ploškou a drátkem, který plošku spojuje s čipem nebo vrstevným integrovaným obvodem. Obvod je následně v dutině uzavřen nejčastěji kovovým víčkem se zlato – cínovou pájkou nebo keramickým víčkem a skelnou fritou.



Obr. 2.10. Pouzdra PGA [16]

2.4.5. Kovová pouzdra hermetická

Jde o vývojově jeden z nejstarších způsobů pouzdření součástek. Základem je kovová destička, v níž jsou vytvořeny průchody, jimiž procházejí vývody pouzdra. Tyto vývody mají sloupkovitý tvar a jejich část, která je nad destičkou, slouží ke kontaktování zlatými nebo hliníkovými drátky, které spojují pouzdřený obvod s těmito vývody. Opačná strana vývodů po destičkou slouží k zapájení na nosný substrát. Na tuto základnu je přivařeno víčko, přičemž svar je proveden nejčastěji laserem. Vývody bývají nejčastěji z kovu, průchodky jsou sleněné

Nejstarším typem kovových pouzder je kulaté pouzdro hrníčkového tvaru, které se původně využívalo pro pouzdření tranzistorů, po zvýšení počtu vývodů je toto pouzdro použitelné i pro složitější obvody, jimiž mohou být např. operační zesilovače. Vývody jsou rozmístěny po obvodu pouzdra a jsou uspořádány do kružnice. Počet vývodů je zde značně omezen. K těmto typům se řadí například pouzdro TO70.

Pro nevýhody výše uvedeného typu byl vyvinut další typ pouzdra, jímž je ploché kovové pouzdro ve tvaru obdélníku nebo čtverce. Vývody jsou zde uspořádány do tvaru pravoúhelníku. I zde je utěsnění provedeno pomocí svaru mezi základnou a víčkem pouzdra. Pouzdro tohoto typu poskytuje mnohem více možností, jak lze rozmístit vývody na jeho spodní straně.

Pouzdra kovová jsou výrobcům elektronických součástek snadno dostupná, jsou vyráběna jako standardizovaná, proto se jedná o dobrou volbu pro kusovou výrobu a malé série.

2.4.6. Plastické pouzdrící hmoty a technologie

2.4.6.1. Lisování do plastu

Lisování je technikou, kdy je elektronický obvod vložen do formy, která je následně vyplněna plastickou hmotou. Jde o proces, kdy je rozehrátá plastická hmota vstřikována do formy, do níž byl předtím vložen mikroelektronický obvod včetně souboru vývodů. V této části budou probrány tyto aspekty:

- Proces
- Procesní uspořádání
- Používaný materiál
- Řízení procesu
- Defekty
- Zásady pro návrh

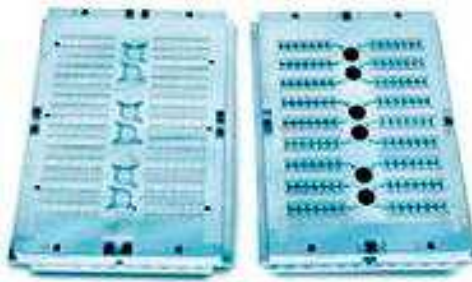
Proces

Po předehřátí je pouzdrící hmota hydraulicky vstřikována do nádoby, kde její teplota vzroste na teplotu tání materiálu. Pouzdrící hmota se stává tekutou a je dále pod tlakem dopravována kanálkem, který slouží jako vodící cesta. Tímto kanálkem je hmota dopravena až do dutiny, kde již je připravena sestava složená z mikroelektronického obvodu a souboru vývodů, která je určena k zalisování.

Uspořádání

V konvenčních sestavách jsou jednotlivé dutinky plněny hmotou metodou „vánočního stromu“. V tomto uspořádání jsou dutiny umístěné nejbližší dopravovacímu kanálku plněny jako první. Na první dutině je nejprve zkoušena nejvyšší rychlost, jakou lze dutiny vyplňovat. Tato rychlost nicméně klesá, jakmile je první dutina vyplněna.

Další dutiny jsou plněny postupně vzrůstající rychlostí, která dosáhne maxima u dutiny poslední. Tato rychlost je tedy druhá nejvyšší, hned po rychlosti, kterou byla plněna první dutina. Proto je první a poslední plněná dutina nejvíce náchylná na defekty týkající se změny polohy kontaktních drátků a posunutí plošky, na níž je umístěn čip. Obrázek **Obr. 2.11.** představuje pohled na formu sloužící k lisování těchto pouzder.



Obr. 2.11. Lisovací formy pro výrobu plastových pouzder [8]

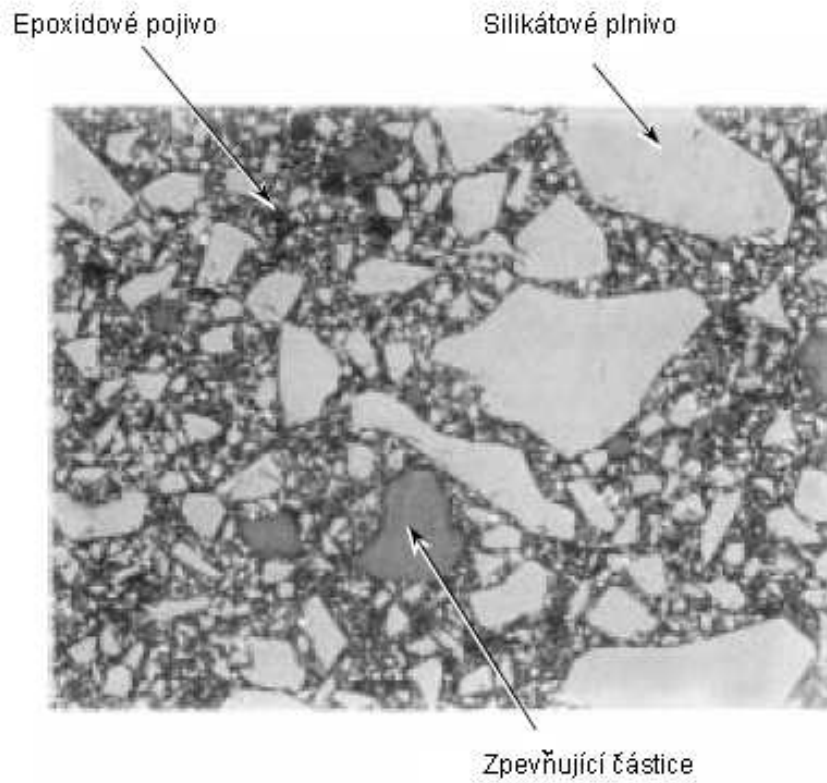
Materiál

Pouzdricí hmota pro lisování je složkovým materiálem, jehož jednotlivé složky nastavují vlastnosti, které jsou kritické vzhledem k celkové výkonnosti systému.

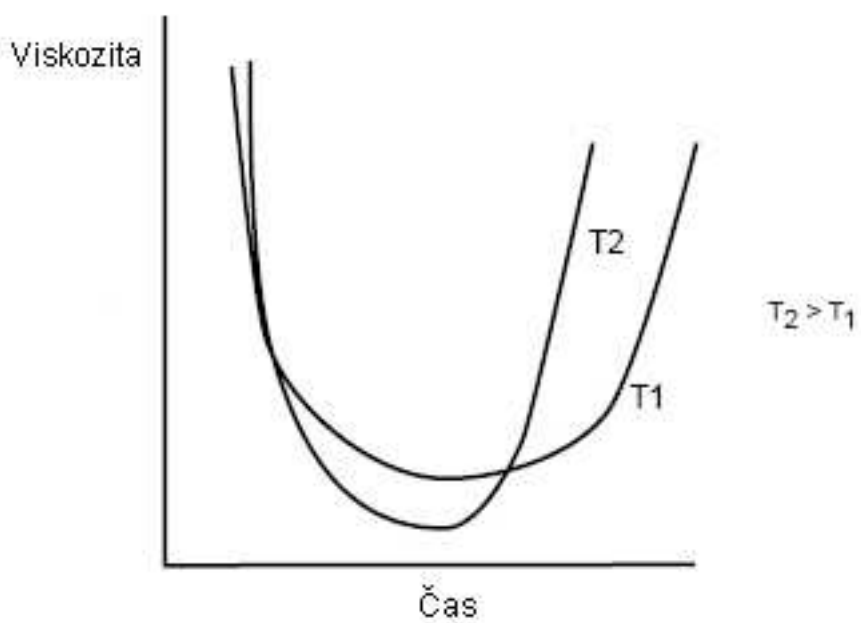
Jednou z možností je použití polymeru založeného na epoxidovém krezolu. Tento materiál má rozměrovou stabilitu, je ionicky čistý a odolný vůči montážním operacím a teplotám. Složkou s největším hmotnostním zastoupením je silikátové plnivo, které řídí součinitel teplotní délkové roztažnosti, teplotní vodivost a zvyšuje tuhost materiálu. Tento materiál je také odolný vzhledem k vlhkosti. U těchto částic je optimalizována jejich velikost a tvar za účelem dosažení co nejlepších vlastností.

Dále pouzdricí hmota sestává z elastomerických plniv, zpomalovačů hoření, vazebních přísad pro zlepšení adheze mezi pojivem a plnivem a přísad usnadňujících odvod zplodin z hmot.

Materiál je většinou dodáván ve formě drobných granulí – předlisků kulového tvaru. Při zpracování je epoxid zahříván, čímž klesá jeho viskozita. Toto dovoluje snadné zatečení mezi kontaktními drátky a vyplnění celé dutiny. Další zvyšování teploty způsobí zesíťování epoxidové hmoty – toto pokračuje až do okamžiku, kdy je materiál již tvrdý – v této fázi je epoxid už nerozpustný a netavitelný. Obrázek **Obr. 2.12.** poskytuje pohled na složení epoxidové hmoty. Na obrázku **Obr. 2.13.** je zobrazena závislost doby zesíťování na teplotě pro dvě různé teploty vytvrzení.



Obr.2.12. Pouzdřící hmota pro lisování [9]



Obr. 2.13. Závislost doby vytvrzení na teplotě při vytvrzování [9]

Řízení procesu

Parametry procesu lisování jsou teplota zesíťování, rychlost dopravy epoxidové hmoty a doba zesíťování. Všechny tyto parametry jsou sledovány a ovládány za účelem zajištění co nejlepší spolehlivosti vyrobeného pouzdra. Stejný význam má i návrh dopravníku a systému ventilů, přes které pouzdřicí hmota vstupuje do dutin.

Defekty

Pokud není proces optimalizován, mohou se objevit defekty jako neúplné zaplnění dutiny, bubliny v pouzdřicí hmotě a změna polohy kontaktních drátků.

Návrhové zásady

Zapouzdřená součástka je soustavou složenou ze souboru vývodů z měděné slitiny, lepidla mezi čipem a čipovou podložkou, samotného křemíkového čipu, zlatých drátků a epoxidové hmoty. Všechny složky mají svou vlastní množinu fyzikálních vlastností jako rozdíl teplotní roztažnosti. Vzájemná integrita jednotlivých složek a rozhraní mezi nimi je podpořena existencí modulu pružnosti, který rozdíl mezi složkami kompenzuje.

Kvůli rozdílným hodnotám roztažnosti materiálů dochází ke vzniku pnutí na rozhraní mezi nimi během teplotních cyklů. Pokud tato pnutí přesáhnou mez pevnosti jednotlivých materiálů, může dojít ke vznikům prasklin a k delaminacím. Přítomnost vlhkosti je dalším faktorem, který zvyšuje pravděpodobnost tohoto jevu zejména během procesu povrchové montáže.

Aby výrobci zabránili těmto jevům, jsou přijímána opatření během výroby, testování a při provozních teplotách. Z hlediska materiálu je snahou jeho výrobců vytvoření směsi s minimální absorpcí vlhkosti. Navíc jsou vazební příměsi určeny k maximalizování adheze mezi epoxidovým pojivem a silikátovým plnivem pro potlačení vstupu vlhkosti. Optimalizace dalších materiálových vlastností jako pevnost, modul pružnosti a tuhost zajišťují, že výrobek může pracovat i v náročných podmínkách teplotního cyklování a pod vlivem vlhkosti bez výskytu delaminací a prasklin, které mohou vést k pronikání koroze způsobené kontaminací. Pouzdřicí hmota obsahuje elastomerické zpevňující příměsi, které v případě vzniku prasklin zabraňují jejich dalšímu růstu. Dále tyto materiály díky značné pružnosti a nízkým hodnotám pnutí chrání křehký povrch čipu před stříhovou deformací a prasklinami na tenkovrstvé struktuře vytvořené na povrchu čipu za účelem propojení jednotlivých částí struktury do výsledného obvodu.

Důsledný návrh pouzdra a výrobního procesu vede k zajištění dobré integrity. Návrháři pouzdra používají návrhové prvky, které zlepšují odolnost součástky vytvořením mechanického spojení mezi pouzdřicí hmotou a souborem vývodů. Návrháři výrobního procesu vytvářejí takový postup, který maximalizuje adhezi a omezuje vystavení vlhkosti během výroby, dopravy a montáže.

2.4.6.2. Zalévání

Zalévání je dalším způsobem, jak lze opatřit integrovaný obvod ochrannou hmotou.

- Podstata metody
- Druhy zalévání
- Použití metody

Podstata metody

Zalévání spočívá v dopravení roztavené pouzdricí hmoty, kterou je nejčastěji termoplast nebo termoset, do prostoru, který má být takto pouzdřen. Doprava probíhá prostřednictvím kapiláry, kterou je roztavená hmota vedena na místo určení.

Druhy zalévání

Můžeme rozlišit mezi dvěma verzemi tohoto procesu, kdy rozdíl spočívá v úpravě substrátu (modulu), který je takto pouzdřen.

- Zalévání dutiny
- Pouzdření na rovný substrát (glob top)

V prvním případě je roztavená hmota dopravována do dutiny, která je vytvořena v cílovém modulu. Před zapouzdřením je do dutiny vložen cílový obvod (čip) a dutina je po vytvrdnutí plastické hmoty uzavřena.

Druhý případ spočívá v nanesení hmoty na rovný substrát. Vlivem povrchového napětí pouzdricí hmoty se na povrchu materiálu vytvoří kapka – „glob top“ – v níž je sledovaný obvod zapouzdřen – „zakápnut“.

Použití metody

Metoda je použitelná při pouzdření obvodů v provedení COB a při jiných metodách, kdy je čip umístěn na nestandardní substrát. Výhoda metody spočívá v nízkých iniciálních nákladech, neboť její zavedení není spojeno s nutností návrhu a výroby lisovací formy, což je záležitostí metody předchozí. Proto je tento způsob pouzdření používán i u malosériové výroby a tam, kde často dochází ke změně substrátu pro pouzdření.

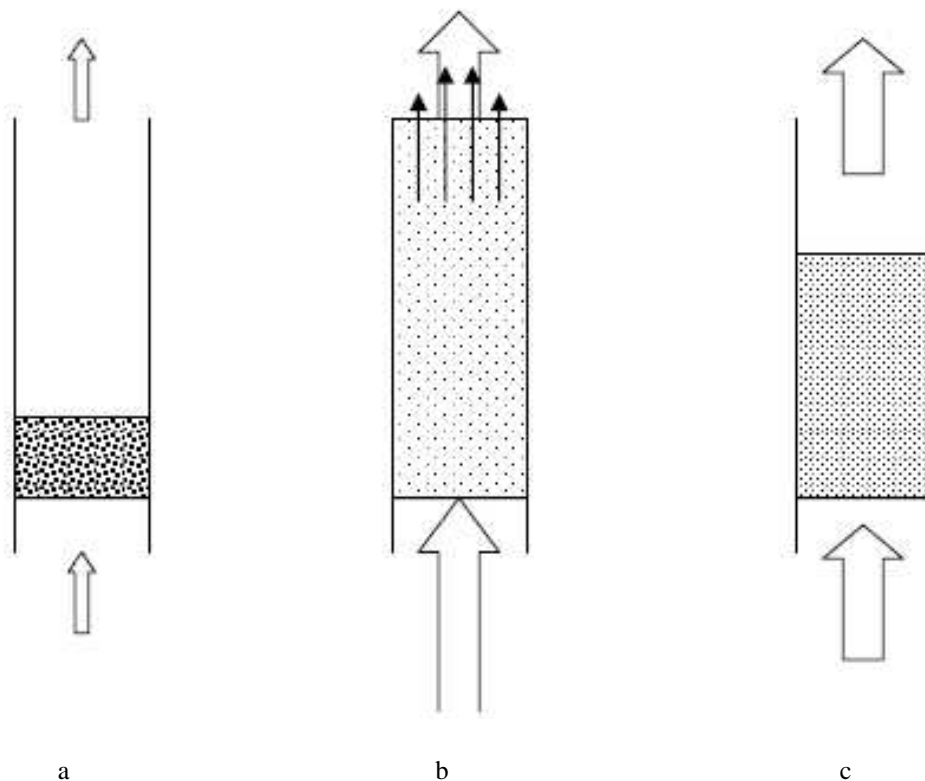
2.4.6.3. Fluidizace

Podstata jevu

Fluidizace je proces, kdy sypká prášková hmota nabývá vlastností kapalin. Podstatou procesu fluidizace jsou drobné pevné částice plastické hmoty. Tyto částice jsou umístěny v nádobě s perforovaným dnem, kterým do nádoby proudí vzduch. Pokud je průtok vzduchu malý, prochází proud vzduchu mezi částicemi a celkově hladinou téměř nepohne. Jde o *ustálený stav*

Pokud je naopak proud vzduchu velký, jsou drobné částice vymršťovány z pracovního prostoru. Pokud je proud mezi těmito extrémami, dochází k vzedmutí hladiny, která ale nepřesáhne okraj pracovní nádoby. Tento stav se nazývá *expandovaným* stavem.

V stavu jsou částice ve vzájemném kontaktu se všemi částicemi okolními. Ve stavu expandovaném existuje mezi jednotlivými částicemi určitá volná vzdálenost, přičemž jsou částice nesený tahem vzduchu. Expandovaný stav se dále označuje jako *fluidizovaný*. [18]



Obr.2.14. a) průtok plynu nenadzvedne částice, b) částice jsou vymršťovány ven z pracovní nádoby, c) střední úroveň průtoku plynu způsobí vzedmutí hladiny částic [18]

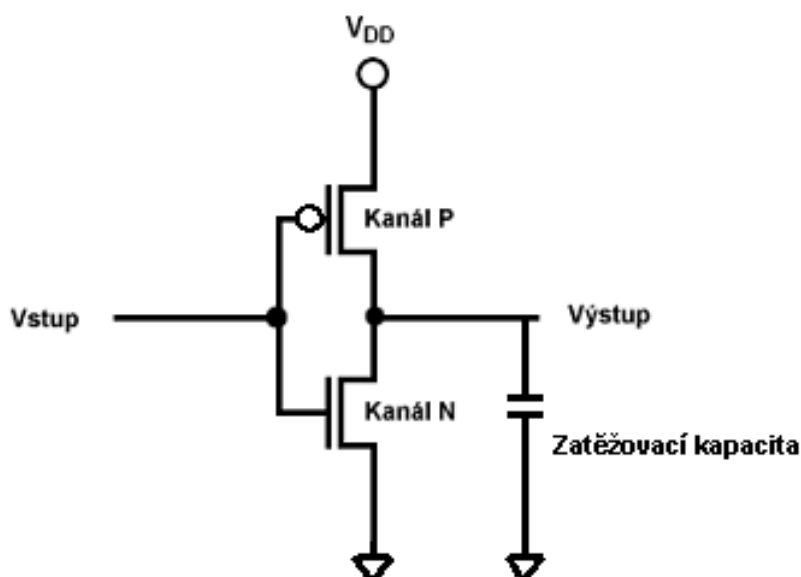
Při využití procesu fluidizace k pouzdření mikroelektronických obvodů jsou drobné částice termosetu uvedeny do expandovaného stavu, kdy má hmota relativně nízkou hustotu a umožňuje, aby v ní byl substrát máčen a aby na jeho zahřátém povrchu částice ulpěly. Cyklickým nahříváním a máčením zahřátého substrátu dochází k ulpívání vrstev na jeho povrchu, čímž je celý obvod postupně zapouzdřen do plastické hmoty, která ho chrání před mechanickými, elektrickými a chemickými vlivy.

2.5. Teplotní management

2.5.1. Vznik tepla v polovodiči

Vlivem průchodu elektrického proudu přes polovodičovou strukturu dochází k jejímu zahřívání. Elektrony, které polovodičovým materiálem procházejí, narážejí do atomů krystalové mřížky. Přitom jim předávají část své kinetické energie a způsobují jejich rozkmitání – polovodič se zahřívá.

V polovodiči tedy vzniká teplo. Jeho vznik je u moderních struktur realizovaných technologií CMOS spojen s přepínáním stavů zapnuto (Hi) / vypnuto (Lo) a vypnuto (Lo) / zapnuto (Hi). Jejich technologické řešení umožňuje, že se polovodič téměř nezahřívá v ustáleném stavu – je-li jeden tranzistor oteřen a druhý uzavřen, neprochází jejich sériovou kombinací téměř žádný proud (viz **Obr.2.15.**). Rovněž do vstupu navazující dvojice tranzistorů téměř žádný proud neteče. Z tohoto důvodu se v ustáleném stavu struktura prakticky nezahřívá.



Obr.2.15. Struktura CMOS

Struktura se zahřívá v okamžiku, kdy dochází k přepnutí vstupu ze stavu 0 do stavu 1 nebo naopak. Hrany signálů nejsou ideálně strmé a tak při přepínání nastává stav, kdy jsou oba tranzistory v saturaci a prochází přes ně proud. V tomto okamžiku se struktura nejvíce zahřívá.

Z uvedeného plyne, že množství tepla, které ve struktuře vznikne, bude tím větší, čím častěji bude docházet k přechodům mezi stavy. To znamená, že množství ztrátového výkonu, který v systému vznikne, bude narůstat s jeho pracovním kmitočtem.

Protože oxidová vrstva pod hradlem funguje jako dielektrikum, dochází v ní k akumulaci náboje a struktura se chová jako kondenzátor. Množství akumulovaného náboje se dále podílí na celkovém množství ztrátového výkonu ve struktuře CMOS.

Rovněž platí, že proud procházející strukturou narůstá se zvyšujícím se napájecím napětím. V důsledku toho je množství ztrátového výkonu úměrné napájecímu napětí.

Vzhledem k informacím obsaženým na předchozích řádcích můžeme stanovit ztrátový výkon ve CMOS struktuře podle jednoduchého vztahu [2]:

$$P_{AC} = C * I * U * f / 2 = C * U^2 * f / 2 \quad (2)$$

P_{AC} – ztrátový výkon (W)

C – kapacita oxidové vrstvy pod hradlem (F)

I – proud tekoucí kanály tranzistorů (A)

U – napájecí napětí (V)

F – kmitočet spínání (Hz)

Frekvence spínání konkrétní dvojice tranzistoru může být různá, maximálně je rovna hodinovému taktovacím kmitočtu.

2.5.2. Přenos tepla

Produkce tepla je nedílnou součástí procesu zpracování informace. Vyšší kmitočty přinášejí vzhledem k výše uvedeným důvodům i vyšší produkci tepla. Tento problém se řeší používáním takových mikroelektronických pouzder, která jsou již navržena tak, aby efektivně odváděla teplo.

Teplo je z čipu odváděno dvěma způsoby:

1. Prouděním
2. Vedením
3. Zářením

Mechanismus proudění přímo z čipu se uplatní u struktur s obrácenými čipy – u flip chip a pouzdrů WLP, kde je zadní strana čipu holá. U ostatních typů je teplo prouděním odváděno z povrchu pouzdra. Teplo je odváděno ze zadní strany čipu nebo pouzdra volným nebo nuceným prouděním vzduchu. Částice proudícího plynu přijímají část kinetické energie částic křemíku ze zadní strany křemíkového čipu. Částice v průběhu času mění svou polohu v prostoru a kinetickou energii odnášejí s sebou. Těsně u povrchu pouzdra či čipu se vytvoří

tenká vrstva vzduchu, kde dochází k přenosu tepla vedením. Částice vzduchu do této vrstvy vstoupí, přijmou kinetickou energii a poté tuto vrstvu opustí a rozptýlí se ve volném prostoru.

Vedení je mechanismem, kdy je kinetická energie částic předávána jen mezi částicemi, které spolu bezprostředně sousedí. Teplo ve formě kinetické energie je postupně přenášeno objemem materiálu. Mechanismus vedení se na odvodu tepla ze součástky podílí největší měrou. Kmitání částic je přenášeno ve vlnách, které jsou označovány jako *fonony*.

Mechanismus přenosu tepla zářením spočívá v infračerveném vyzařování plochy čipu a pouzdra. Teplo je zde přenášeno formou elektromagnetického záření, přičemž vyzářený výkon vypočítáme jako [2]:

$$P = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \quad (3)$$

P – vyzářený výkon (W)

ε - emisivita tělesa (-)

σ - Stefan – Boltzmannova konstanta ($5,670\ 32\ E-8\ W.m^{-2}K^{-4}$)

A – plocha, ze které je vyzařováno (m^2)

T – termodynamická teplota (K)

2.5.3. Náhradní tepelný model součástky

Náhradní tepelný model je ekvivalentní schéma, v němž jsou tepelné poměry modelovány jako elektrické parametry. Prvky produkující teplo jsou modelovány jako zdroje, rozdíl teplot mezi dvěma místy je reprezentován napětím mezi dvěma uzly. Množství tepla, které projde prostředím, je ekvivalentem proudu, prostředí je modelováno svým tepelným odporem. Tento fiktivní model umožňuje modelovat přenos tepla jako přenos elektrického náboje v obvodu tvořeného běžnými součástkami.

Prostředí, přes které je vedeno teplo, je modelováno jako odpor [2]:

$$R = \Delta T / \Phi \quad (4)$$

R – tepelný odpor prostředí (WK^{-1})

ΔT – rozdíl teplot mezi body A a B ($^{\circ}C, K$)

Φ - tepelný tok mezi body A a B (W)

Odpor prostředí mezi body A a B, kterým prochází tepelný tok, můžeme rovněž určit při znalosti měrného tepelného odporu prostředí [2]:

$$R = l * \beta / A \quad (5)$$

R – tepelný odpor (WK^{-1})

l – vzdálenost mezi místy A a B (m)

A – plocha, kterou tepelný tok prochází (m^2)

β - měrný tepelný odpor (rezistance) ($WK^{-1}m$)

Převrácenou hodnotou měrného tepelného odporu materiálu je jeho měrná tepelná vodivost. Tabulka (**Tab.2.3.**) shrnuje tepelné vodivosti jednotlivých materiálů.

| Materiál | Tepelná vodivost ($Wm^{-1}K^{-1}$) |
|--------------------------|--|
| Křemík | 150 |
| Stříbro | 430 |
| Hlinitá keramika | 30 |
| Deska FR4 | 0,2 |
| Měď | 400 |
| Hliník | 230 |
| Nikl | 92 |
| Mosaz | 110 |
| Pájka SnPb | 57 |
| Korund | 230 |
| Zlato | 297 |
| Molybden | 140 |
| Zalévací epoxidová hmota | 2 |
| Vzduch | 0,02 |

Tab. 2.3. Tepelné rezistance různých materiálů [9]

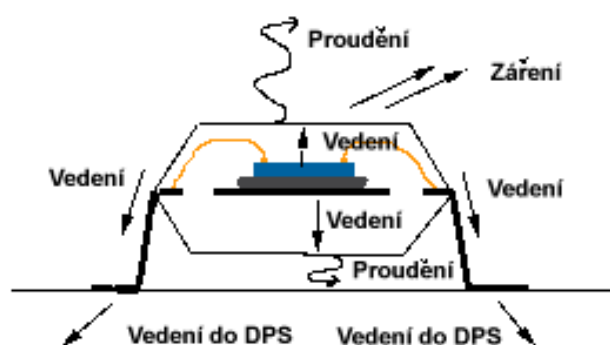
2.5.4. Návrh pouzdra s ohledem na teplotní poměry

Vzhledem k nutnosti odvádět ztrátový výkon z čipu je jedním z cílů kvalitního návrhu pouzdra integrovaného obvodu i efektivní vyřešení problematiky přenosu tepla skrze materiál pouzdra. Teplo je vedeno objemem pouzdra k jeho povrchu, odkud je odváděno výše popsaným mechanismem proudění a záření. Pro zlepšení odvodu tepla jsou využívány chladiče, které se upevňují na povrch pouzdra. Do materiálu chladiče přestupuje teplo mechanismem vedení, z jeho povrchu je odváděno prouděním a zářením. Proudění tepla je často nucené – je vynucováno aktivním chladičem.

Přestože odvod tepla z čipu lze zlepšit přidáváním chladičů, má na teplotní poměry velký vliv samotné pouzdro.

2.5.4.1. Charakteristika přenosu tepla v pouzdru

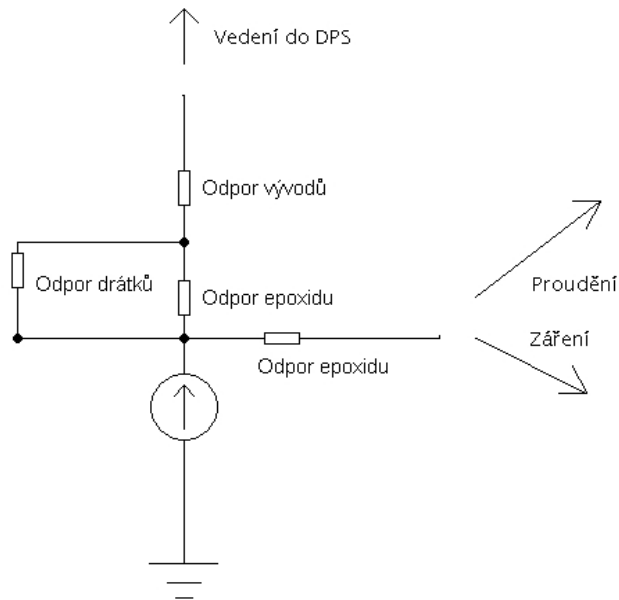
U pouzder, kde není čip připojen tak, že by jeho část zůstala holá, je teplo ze samotného čipu odváděno vždy mechanismem proudění. Teplo prochází objemem epoxidové hmoty, která pouzdří čip, a z povrchu pouzdra je odvedeno mechanismem proudění nebo záření. Toto řešení je zobrazeno na (**Obr. 2.16.**) Jde o klasické pouzdro SOIC s páskovými vývody.



Obr. 2.16. Tepelná charakteristika pouzdra

2.5.4.2. Náhradní tepelný model pouzdra

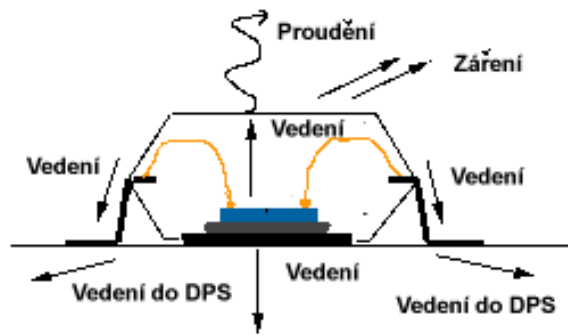
V náhradním tepelném modelu pouzdra (**Obr.2.17**) integrovaného obvodu jsou tepelné odpory prostředí modelovány jako elektrické odpory, které vedou tepelnou energii z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou vyšší.



Obr.2.17. Náhradní tepelný model pouzdra

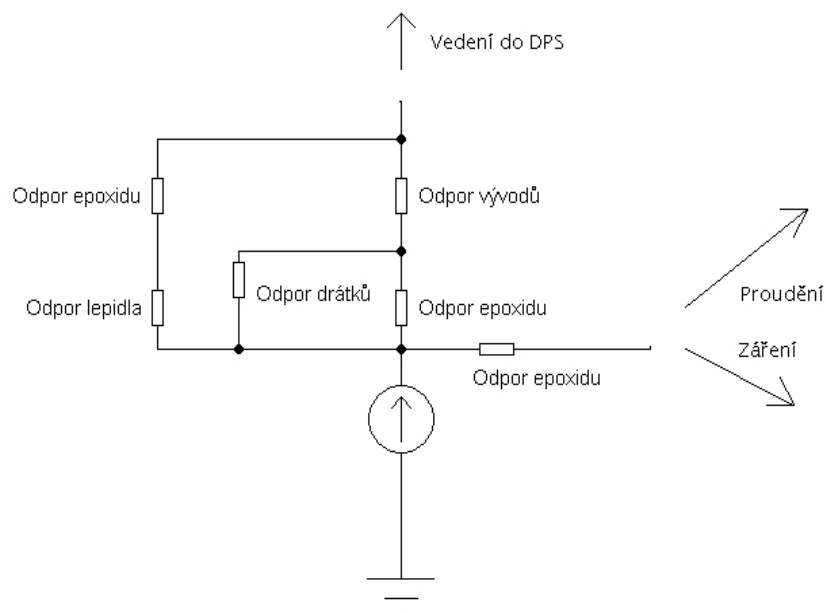
2.5.4.3. Příklad zlepšení tepelných vlastností pouzdra

Pouzdro z předchozího příkladu lze modifikovat a tak můžeme odvod tepla z čipu zlepšit. Cestou k tomuto je speciální úprava souboru vývodů, kdy ploška pro upevnění čipu bude současně fungovat jako chladič. Protože obecně se nejvíce na přestupu tepla mezi materiály podílí mechanismus vedení, nabízí se možnost využít velmi dobré tepelné vodivosti kovové plošky pro čip pro odvod tepla z pouzdra. Toho docílíme tak, že soubor vývodů upravíme snížením plošky pro čip. Při zalisování do epoxidu potom bude do epoxidu zalita pouze ta strana plošky, na níž je upevněn čip. Druhá strana zůstane odhalená a ztrátový výkon generovaný čipem bude touto ploškou bezprostředně odváděn. Při montáži pouzdra na nosný substrát se potom pouzdro bude touto ploškou substrátu dotýkat. Kromě odvodu tepla bude tedy ploška plnit funkci dalšího vývodu – lze ji využít pro zemnění. Ztrátové teplo bude pájeným spojem efektivně odváděno do DPS. Provedení je znázorněno na (**Obr.2.18.**).



Obr. 2.18. Upravená verze pouzdra SOIC

V náhradním tepelném obvodu (**Obr. 2.19.**) potom přibude další cesta odvádějící teplo z čipu. Tato cesta se uplatní jak paralelní větev, která vede teplo do substrátu vedle vedení tepla přes vývody. Větev je tvořena sériovou kombinací odporu materiálu pro upevnění čipu (tepl vodné lepidlo) a samotné plošky.



Obr.2.19. Náhradní tepelný obvod upravené verze pouzdra

2.5.4.4. Matematické modelování tepelných poměrů využitím metody konečných prvků (FEA)

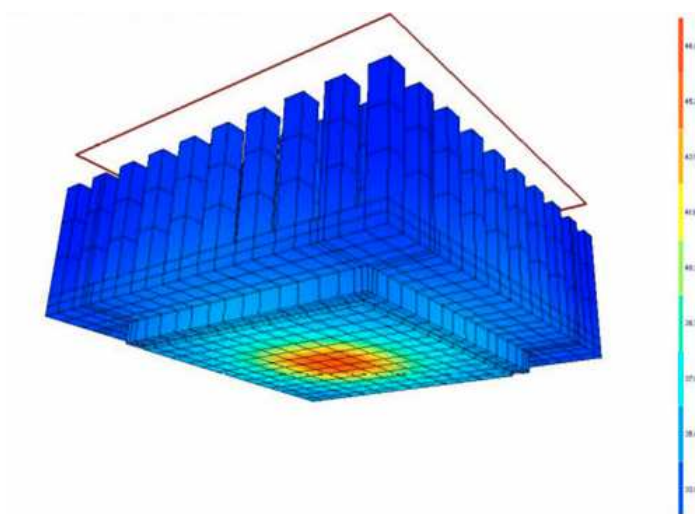
Náhradní tepelný obvod je metodou vhodnou pro návrh a charakterizaci komplexního pouzdra. Přitom tento způsob modelování teplotních parametrů nic nevyovídá o skutečném rozložení teploty uvnitř struktur se složitými geometrickými tvary. Abychom mohli odpovědět na otázku, jak je teplota uvnitř geometricky složité struktury rozložena a jak probíhá šíření tepla, je nutné vytvořit v rámci geometrické struktury sledovaného tělesa teplotní model sestávající z velkého množství uzlů, mezi kterými budeme sledovat teplotní rozdíly. Přenos tepla a teplotní rozdíly mezi dvěma libovolnými body ve struktuře můžeme sledovat pomocí diferenciálních rovnic. Pro řešení složitých struktur by již řešení diferenciálními rovnicemi bylo velmi náročné. Proto se zavádí matematická aproximace nazvaná *metoda konečných prvků*.

Jedná se o metodu, která je matematickým přiblížením řešení diferenciálními rovnicemi. Je přesnost je pro inženýrské aplikace dostatečná, jednotlivé výpočty jsou jednoduché, je ovšem jich nutné provést velké množství. Proto je použití metody konečných prvků spjato s využitím výpočetní techniky.

V rámci struktury je vytvořena síť, která sestává z plošných či prostorových elementů (podle toho, je-li modelovaná struktura 2D nebo 3D). Jednotlivé elementární útvary jsou označovány jako *konečné prvky*, v jejich rámci jsou prováděny elementární výpočty. Počet konečných prvků, na něž je síť rozdělena, souvisí s přesností výsledků – přesnější výpočty vyžadují větší počet konečných prvků s menšími rozměry.

Při vlastním výpočtu jsou počítány teplotní rozdíly v rámci jednotlivých elementů, přičemž je prováděno velké množství výpočetních operací s velkým počtem proměnných. Výsledkem je přiřazení teplotních parametrů jednotlivým uzlům sítě.

Grafickým výstupem simulace je geometrie struktury s přiřazenou teplotou v jednotlivých jejích částech. Teplota je zobrazována prostřednictvím barevné škály, kdy různým teplotám přísluší jednotlivé barevné odstíny (**Obr. 2.20.**).



Obr. 2.20. Rozložení teploty v kovovém chladiči [8]

2.6. Vliv znečištění na izolační odpor substrátu

Důležitou vlastností, která je kritériem obzvláště pro pouzdra citlivých analogových obvodů, je izolační odpor mezi jednotlivými vodivými cestami. U pouzder založených na souboru vývodů (leadframe) se jedná o svod mezi dvěma vývody jdoucími blízko sebe, které jsou ale navzájem odděleny izolační hmotou. V takovém případě se zde projevuje svodová vodivost materiálu pouzdra a svodové proudy tečou materiálem pouzdra mezi sousedními vývody.

U pouzder založených na ohebném nebo neohebném substrátu s vytvořenými vodivými cestami, který je zalit nebo fluidizován, se projevuje povrchová vodivost tohoto substrátu, která je dána jeho znečištěním, vlhkostí, která na obvod působila při výrobním procesu. Dále se v tomto případě uplatní vliv samotné pouzdřicí hmoty, její svodová vodivost zde působí paralelně s povrchovou vodivostí substrátu. Protože ve sledovaných skupinách testovacích obvodů bylo použito tavidlo, je vliv tohoto tavidla taktéž sledovaným vlivem, který se na povrchovém izolačním odporu substrátu projevuje.

Protože na vedení proudu mají vliv volné elektrony i ionty, je nezanedbatelnou složkou jevu svodové vodivosti elektromigrace. Jedná se o přenos hmoty způsobený pohybem iontů ve směru působícího elektrického pole. Protože zde dochází k pohybu nabitých částic, dochází zde i k přesunu náboje. Tento náboj se může jevit jako kritický v případě, že jsou navrženy integrované obvody určeny mimo jiné i ke sledování a případně zesilování velmi malých signálů – například naměřených chemo- a biosenzory. V takovém případě je možnost výrazného zkreslení výstupní informace způsobené právě nežádoucím pohybem nosičů náboje mezi paralelními vodiči.

2.6.1. Jev elektromigrace

Elektromigrace je jevem, kdy dochází k přenosu (= migraci) hmoty vlivem přiloženého elektrického pole. Ionty, které tvoří hmotu, jsou zde vlivem elektrického pole nesený materiálem, v němž k elektromigraci dochází. Přitom jsou záporné ionty nesený ke kladnější elektrodě a kladné ionty k záporné elektrodě. Materiály, kde dochází k elektromigraci, se nazývají **elektrolyty**.

Z elektrotechnického hlediska jsou elektrolyty vodiči druhého řádu. Přenos elektrického náboje je zde zprostředkován přenosem elektricky nabitých částic, které jsou nesený ve směru nebo proti směru elektrického pole, v závislosti na náboji iontů. Potom můžeme celkové množství látky vyjádřit takto [3]:

$$n = Q / (z * F) \quad (6)$$

n – látkové množství (mol)

Q - elektrický náboj (C)

z – počet vyměněných elektronů (-)

F – Faradayův náboj (C / mol)

Přenos částic je tedy příčinou vedení elektrického proudu přes elektrolyt. Tento proud je nežádoucí tehdy, pokud je primární určením materiálu sloužícího jako elektrolyt právě izolační oddělení dvou míst s různými potenciály, fungujícími jako elektrody. Velikost tohoto proudu je odtud [3]:

$$J = (U - E_{j,A} + E_{j,K}) / (L * \rho) \quad (7)$$

J – proudová hustota (A / m²)

U – přiložené napětí (V)

E_{j,A} – přepětí anody (V)

E_{j,K} – přepětí katody (V)

L – vzdálenost elektrod (m)

ρ - měrný odpor elektrolytu (Ω * m)

Přepětí elektrody ovlivňuje velikost napětí mezi elektrodami. Závisí na samotné velikosti proudové hustoty. Podle příčiny můžeme toto přepětí rozdělit na 4 druhy [3]:

- ➔ Přenosové přepětí – způsobené pomalým přenosem náboje přes mezifázové rozhraní
- ➔ Koncentrační přepětí – způsobené pomalým přenosem látky z objemu elektrolytu na elektrodu
- ➔ Homogenní reakční přepětí – způsobené chemickou reakcí v elektrolytu
- ➔ Heterogenní reakční přepětí – způsobené chemickou reakcí na povrchu elektrody

Elektrochemické reakce se mohou i skládat, přičemž projevem každé reakce je její vlastní elektrický proud. Potom platí pro celkovou hodnotu protékajícího proudu [3]:

$$J_T = J_1 + J_2 + J_3 + \dots + J_n \quad (8)$$

J_T – výsledná proudová hustota (A/m^2)

$J_1, J_2, J_3 \dots$ - komponenty proudové hustoty (A/m^2)

Převrácenou hodnotou měrného odporu elektrolytu je měrná vodivost elektrolytu. Pokud je počet elektroaktivních látek v elektrolytu k , je tato vodivost vyjádřena jako [3]:

$$\sigma = F * \sum_{i=1}^k c_i * u_i * z_i \quad (9)$$

F – Faradayův náboj (C/mol)

σ - měrná vodivost (S/m)

c_i – molární koncentrace iontů i – té složky v roztoku (mol/m^3)

u_i – pohyblivost iontů i – té složky ($m^2 V^{-1} s^{-1}$)

z_i – počet vyměněných elektronů u iontů pro i – tou složku (-)

Na přenos částic v elektrolytu nemá vliv pouze přiložené elektrické pole, ale i koncentrační gradient těchto částí. Jeho projevem je difuze částic, která je další složkou proudové hustoty v systému. Difuze se úplně stejně uplatňuje u látek neelektrických.

Pokud je tedy započtena difuze do celkového mechanismu transportu nosičů, přejde celý vztah na [3]:

$$J = -F * \sum_{i=1}^K * D_i * z_i * \nabla c_i - \sigma * \nabla \varphi \quad (10)$$

F – Faradayův náboj (C / mol)

σ - měrná vodivost (S/m)

c_i – molární koncentrace iontů i – té složky v roztoku (mol / m³)

u_i – pohyblivost iontů i – té složky (m² V⁻¹ s⁻¹)

z_i – počet vyměněných elektronů u iontů pro i –tou složku (-)

∇c_i – koncentrační gradient (mol * m⁻³)

$\nabla \varphi$ – potenciálový spád (V)

Důsledkem elektromigrace je tedy kromě samotného vedení elektrického proudu i změna rozložení částic v elektrolytu. V případě transportů iontů se potom rovná o polarizaci hmoty, která slouží jako pouzdřicí materiál. Vzniknou takto vázané náboje, které mohou nepříznivě ovlivňovat pouzdřenou funkční strukturu. Proto je vhodné vlivy elektromigrace na funkci struktury klasifikovat a kvantifikovat pomocí příslušných metod, k nimž patří měření rozšíření vodivé cesty na testovacím obrazci pod vlivem působení stejnosměrného proudu.

2.6.2. Povrchový izolační odpor (SIR)

Nejdůležitějším vlivem, který se na povrchové vodivost tuhých izolantů projevuje, je voda, která se na povrchu izolantu zachytí. I tenký vodní film stačí ke značnému zvýšení povrchové vodivosti. Tloušťka vodního filmu, který se na povrchu materiálu zachytí, je závislá především na vlastnostech materiálu, proto je tato vlastnost posuzována jako specifická pro každý materiál.

Na povrchové vodivosti se nejvíce projevují relativní vlhkost prostředí, schopnost látky vázat a odpuzovat vodu a čistota povrchu materiálu. Důležitý je fakt, že u povrchů drsnějších je větší tendence k zachytávání nečistot, které potom snižují povrchový izolační odpor. Toto se projeví zejména u smáčivých povrchů, zatímco u povrchů nesmáčivých je tento vliv relativně malý. [17]

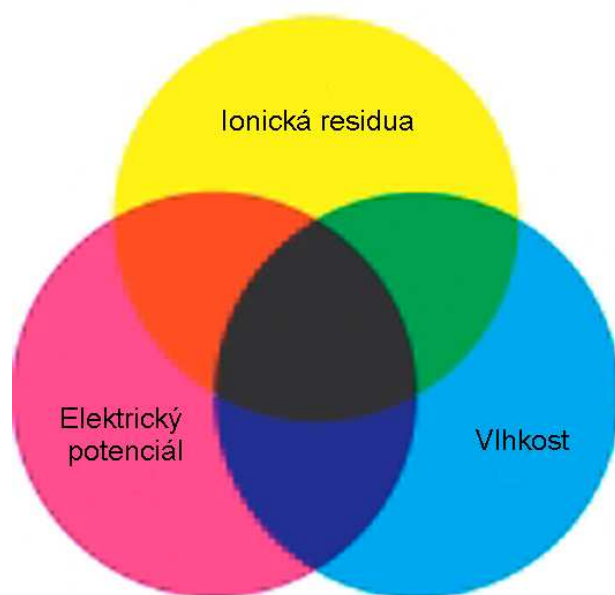
Samotné zkoumání povrchového izolačního odporu je nedestruktivní metodika, která je využívána k vývoji materiálů pro elektroniku a optimalizaci výrobních procesů, jakožto i způsobem stanovení spolehlivosti.

Cílem testování SIR je odhalení nebezpečných sklonů ke vzniku elektrochemických poruchových mechanismů, jimiž mohou být neakceptovatelné svody způsobené vlhkostí, dále koroze a přenos kovů, k nimž může na hotových zařízeních docházet.

Třemi faktory, jejichž přítomnost je pro vznik poruchových mechanismů nezbytná, jsou:

- Elektrický potenciál
- Vlhkost
- Ionická residua

Elektrochemické poruchové mechanismy mohou být nejlépe znázorněny diagramem VENN. Zvyšování a snižování jednotlivých faktorů může být znázorněno zde jako změna průměru jednotlivých kruhů v diagramu. [19]



Obr. 2.21. Vennův diagram znázorňující vlivy na povrchový izolační odpor

2.6.3. Tavidlo

Tavidlo se používá pro zlepšení parametrů pájení a tím i vytvoření spoje s lepšími vlastnostmi. Toho se docílí lepšími vlastnostmi smáčení pájecí plošky pájecí slitinou. Tavidlo napomáhá smáčivosti tím, že:

- Zlepšuje vedení tepla
- Rozpouští oxidy a brání reoxidaci
- Odstraňuje nečistoty ze spojovaných materiálů, čímž umožňuje lepší roztékavost

Tavidlo zvyšuje povrchové napětí pájky a tím pomáhá k lepšímu smočení pájecí plošky. Navíc zabraňuje vzniku oxidů na pájecí plošce během pájení. Dobrých vlastností tavidla je dosahováno pomocí jejich aktivátorů. Nejstarším tavidlem je kalafuna, což je přírodní pryskyřice, která je složená hlavně z organických kyselin. [17]

Požadavkem, který je v první řadě na tavidla kladen, je zajištění spolehlivého pájecího procesu s reprodukovatelnou kvalitou pájených spojů a s minimálním zbytkovým obsahem nečistot po pájení, které mohou způsobit v klimaticky náročnějších podmínkách zhošení izolačních vlastností korundové podložky nebo DPS a případně i korozi vývodů součástek a přerušování vodivých obrazců na substrátu. [17]

2.6.3.1. Dělení tavidel

Tavidla jsou dělena do skupin podle chemické povahy, rozpustnosti, obsahu aktivátoru a fyzikální konzistence. Je používáno několik dělení tavidel podle několika norem.

| Typ tavidla | Základní složka | Aktivátor | Forma tavidla |
|--------------|--|--|----------------------------------|
| Pryskyřicové | 1. Kalafuna 2. Syntetická pryskyřice | 1. Bez aktivátoru 2. Halogenidy 3. Aktivátor bez halogenidů | 1. Tekuté 2. Tuhé 3. Pasta |
| Organické | 1. Rozpustné ve vodě 2. Nerozpustné ve vodě | 1. Bez aktivátoru 2. Halogenidy 3. Aktivováno bez halogenidů | 1. Tekuté 2. Tuhé 3. Pasta |
| Anorganické | 1. Soli | 1. NH_4Cl 2. Bez NH_4Cl | 1. Tekuté 2. Tuhé 3. Pasta |
| | 2. Kyseliny | 1. Kyselina fosforečná 2. Jiné kyseliny | |
| | 3. Zásady | Kyseliny nebo amoniak | |

Tab. 2.4. Klasifikace tavidel podle ČSN EN ISO 9454 – 1 [17]

| Typ | Popis | Požadavek na čištění |
|------------|--|-----------------------------|
| F – SW 34 | Organické bezhalogenidové kyseliny s přírodní pryskyřicí bez aminů | No clean |
| F – SW 33 | Syntetické pryskyřice s organickými aktivátory bez halogenidů a aminů | No clean |
| F – SW 32 | Čistá přírodní pryskyřice s organickými aktivátory bez halogenidů a aminů | No clean |
| F – SW 26 | Přírodní pryskyřice nebo modifikovaná přírodní pryskyřice s přísadou organických aktivátorů s halogenidy v max. množství 0,6 % | Doporučeno čištění |

Tab. 2.5. Klasifikace tavidel podle DIN 85 11 [17]

Tavidla se dále řadí a označují podle jejich základu, jímž mohou být přírodní a syntetické pryskyřice, organické a anorganické kyseliny.

| Základ tavidla | Ekvivalent | Zkratka |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| Přírodní pryskyřice | Rosin | RO |
| Syntetická pryskyřice | Resin | RE |
| Organické kyseliny | Organic | OR |
| Anorganické kyseliny | Inorganic | IN |

Tab. 2. 6. Členění tavidel podle ČSN EN 61190-1-1:2002 [17]

2.6.3.2. Metody sledování kvality tavidel

Cílem je porovnání tavidel z hlediska korozivních vlastností, vodivosti tavidla a tavidlových zbytků, smáčecích schopností pájky. Používá se několik metod sledování kvality tavidla [17]:

- Test na měděné zrcadlo
- Test na ionizovatelné nečistoty
- SIR – povrchový izolační odpor – k měření se používá testovací obrazec
- Korozní test – úroveň koroze se sleduje po deseti dnech stárnutí vzorku
- Elektromigrace – sleduje se změna SIR a a nárůst šířky vodičů v důsledku elektromigrace, měří se při 50 V ss

2.6.3.3. Požadavky na no – clean tavidla

No – clean tavidla jsou tavidla, která není nutno čistit po dokončení procesu pájení. Z toho vyplývají některé požadavky na ně [17]:

- Vysoká účinnost při pájecí teplotě
- Nízká reaktivita při běžné teplotě okolí
- Bez vypařování a rozkládání při běžné teplotě
- Stabilní
- Bezhalidové
- Hydrofobní
- Vysoký povrchový izolační odpor
- Bez elektromigrace

2.6.4. Optimalizace procesu čištění

Nečistoty na substrátu jsou převážně organické, které se na substrát dostaly během samotného procesu výroby substrátu a během montážních operací. Tavidla mají deoxidační účinek – jejich působením jsou pájecí plošky a terminály součástek zbavovány oxidů. V případě pájecích past jsou částice pájecí slitiny v pastě takto zbavovány oxidů. Tavidla obsahují organické kyseliny, syntetické pryskyřice a jiné materiály, které plní požadovanou funkci. [6]

Pojmem *bezoplachové* (no clean) se označují podle platných norem tavidla, jejichž zbytky po pájení jsou chemicky bezpečné a lze je ponechat na substrátu. Pro tyto účely jsou prováděny testy korozivity, test povrchové izolační rezistance, elektromigrace a další specializované testy, které mají ozřejmit obsah halogenidů a halidů a mají za úkol prokázat, že čištění substrátu není nutné. Kromě toho pro aplikace s vysokou spolehlivostí nesmí na substrátu zůstat vůbec žádné tavidlové zbytky. [6]

Je nutné mít jistotu, že čisticí prostředky, které se pro čištění tavidlových zbytků používají, jsou s tavidlovými zbytky kompatibilní. Vzhledem k faktu, že část halidů může být skryta či zachycena pod součástkami na substrátu, jen částečné čištění takto může způsobit neblahé důsledky způsobené uvolněním těchto iontů. Může dojít až k nárůstu dendridů, které způsobí zkratky mezi částmi obvodu.

Vodivé sítě na substrátech moderních systémů jsou stále hustší, což znamená nutnost kvalitnějšího čištění pro zbavení desky residuů. Zmenšování vzdálenosti mezi součástkami a deskou pokračuje tím, jak jsou v čím dále větší míře využívány bezvývodové součástky, miniaturní diskretní součástky, CSP apod.

Pájecí pasty a bezoplachová tavidla je obtížnější čistit než tavidla podle dřívějších typů, které obsahovaly pryskyřice s agresivními aktivátory. Navíc je teplotní profil u přetavení bezolovnatých pájecích past přibližně o 20 °C vyšší než u olovnatých.

Čisticí proces musí vyhovět podmínkám technologickým i podmínkám legislativním – norma CEE 648, REACH – týkajícím se toho, jaké chemikálie mohou být při čištění použity a které se používat nemohou. Nové procesy byly během posledních let vyvinuty za účelem nahrazení procesů starších. Jde o eliminaci některých substancí, jako CFC, ETD, HCFC a jiné. Tyto čističe byly nahrazeny čističi bez chloridů a založenými na vodní bázi. [6]

3. Experimentální část

3.1. Definice cílů

Cílem experimentální části této práce je klasifikovat vlivy znečištění na izolační odpor mezi vodivými trasami zkoumané struktury. Tato struktura bude v důsledku pájení vývodových hřebínků vystavena působení tavidlových reziduí. Cílem zkoumání v této části bude dále klasifikovat vliv čištění tavidlových zbytků na celkový izolační odpor mezery mezi vodiči. Výsledky zkoumání budou shrnuty v následující diskusi, kde bude určen optimální způsob čištění takové struktury s ohledem na způsob pájení.

Dalším cílem práce bude prošetření vlivu pouzdření na funkčnost testované struktury. Sledován bude opět izolační odpor mezi jednotlivými částmi vodivé struktury. Výsledky experimentů budou rovněž diskutovány a na jejich základě budou stanoveny zásady pro optimalizaci procesu pouzdření integrovaného obvodu.

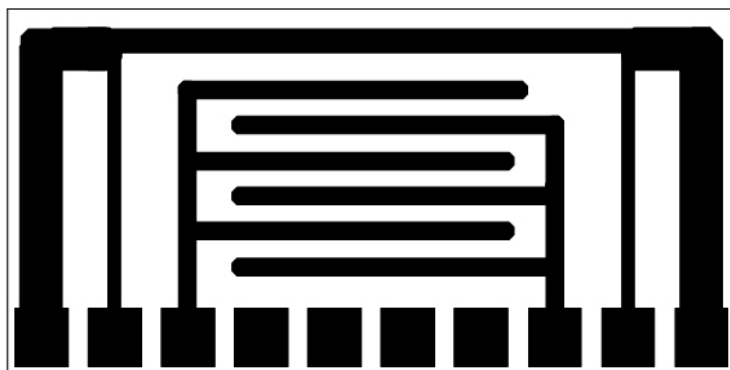
Za účelem testování je struktura vystavena vlivu změn teplot v intervalu od 0°C do 100°C po dobu 500 hodin. U všech vzorků je sledováno, jak se klimatické namáhání projeví na izolačních vlastnostech struktury.

3.2. Návrh testovací struktury

Testovací struktura byla navržena tak, aby co nejlépe umožnila sledovat vlivy znečištění a pouzdřicích hmot na izolační odpor vytvořených vodivých tras a aby taktéž bylo možno tyto vlivy sledovat a kvantifikovat. Byla podle zadání zvolena podložka z korundové keramiky, na níž byla procesem sítotisku zhotovena tlustovrstvá struktura sloužící jako testovací motiv. Tento motiv je tvořen několika paralelními vodiči, mezi nimiž je odpor sledován.

Vodiče na korundovém substrátu jsou vytvořeny stříbrnou pastou ESL-9912-K. Po zasušení a vypálení je celá keramická destička opatřena vývodovými hřebínky, které slouží jako kontakty pro měření a současně i proces pájení je součástí experimentu, kdy jde o sledování vlivu použitého tavidla a o jeho čištění. Testována byla jako olovnatá pájky eutektická, tak i pájka bezolovnatá.

Struktura byla navržena v programu EAGLE, na obrázku (**Obr. 3.1.**) je zobrazena a v tabulce (**Tab. 3.1.**) jsou uvedeny její rozměry.



Obr. 3.1. Návrh testovací struktury pro měření izolačního odporu mezi vodivými trasami

| | Rozměr (mm) |
|-------|--------------------|
| Výška | 12,5 |
| Šířka | 25 |

Tab. 3.1. Rozměry navržené struktury

Testovací struktura byla vytvořena nevakuovým procesem sítotisku na korundovém substrátu. Korundové substráty měly výchozí rozměry 50 * 50 mm , přičemž na každém substrátu takto bylo hromadně vytvořeno dohromady 8 testovacích obvodů. Substráty byly po natisknutí ponechány, aby došlo k rovnoměrnému rozlití pájecí pasty. Poté byly vzorky zasušeny a vypáleny. Po zpracování přední strany bylo nutné vytvořit pájecí plošky i na zadní straně vzorků, aby bylo možné připájet kontakty. Zadní strana vzorku je zobrazena na obrázku (**Obr. 3.2.**).



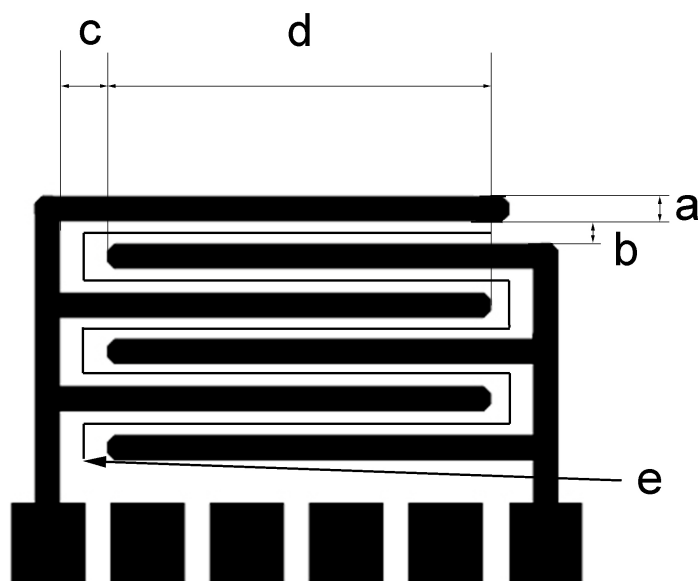
Obr. 3.2. Zadní strana substrátu s ploškami pro připájená vývodových hřebínků

Protože cílem práce je sledování izolačního odporu v mezeře mezi dvěma plošnými vodivými trasami, je důležitou hodnotou rozměr této mezery. V tabulce (**Tab. 3. 3.**) jsou popsány plošné rozměry jednotlivých prvků vodivé struktury.

| | Rozměr (mm) |
|------------------------------|--------------------|
| Rozteč kontaktních plošek | 2,5 |
| Zadní strana | |
| Šířka kontaktních plošek | 1,8 |
| Výška kontaktních plošek | 3 |
| Mezera mezi ploškami | 0,7 |
| Vzdálenost od dolního okraje | 0,3 |
| Přední strana | |
| Šířka kontaktních plošek | 1,8 |
| Výška kontaktních plošek | 2 |
| Mezera mezi ploškami | 0,7 |
| Vzdálenost od dolního okraje | 0,3 |

Tab. 3.2. Rozměry kontaktních plošek na testovací struktuře

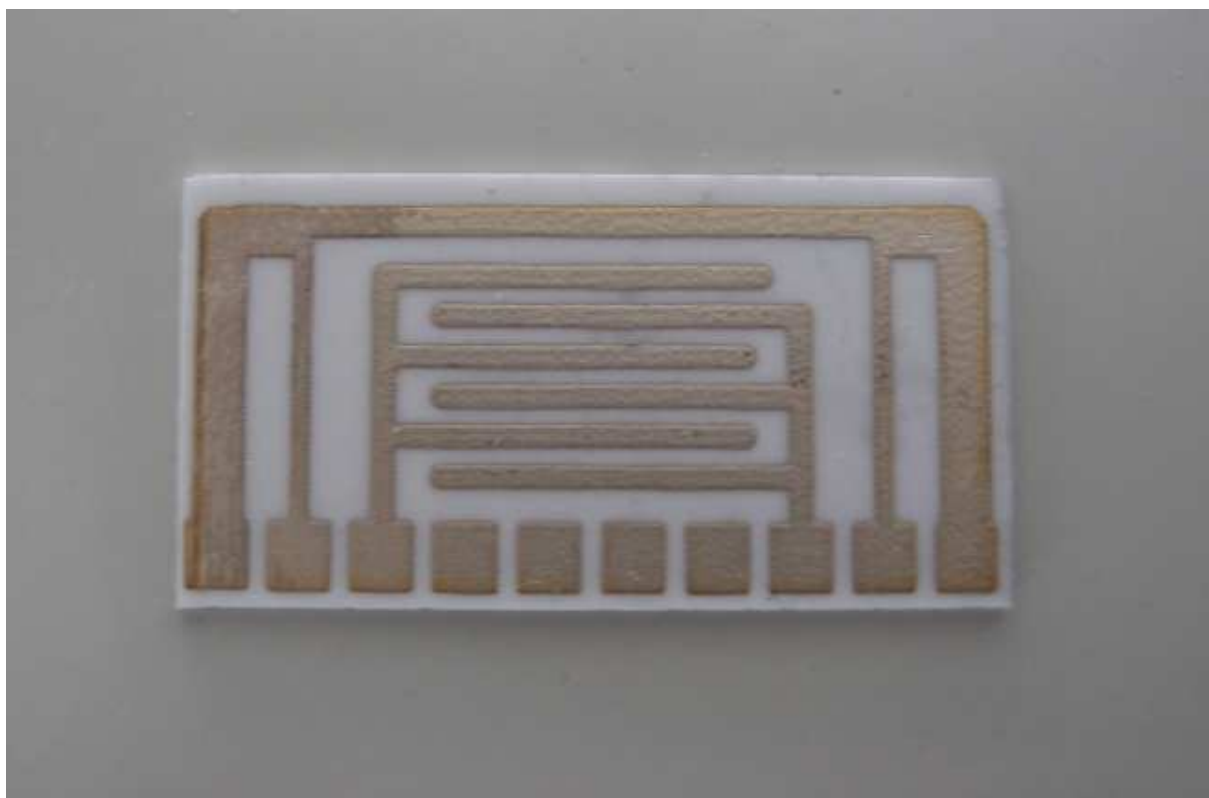
Jak je vidět na obrázku (**Obr. 3.3**), je izolační mezera tvořena kombinací mezer mezi jednotlivými plošnými vodiči. Celkové geometrické rozměry měřené oblasti jsou určeny vzdáleností **b** mezi plošnými vodiči, což odpovídá délce měřeného odporového prvku. Šířka jedné části měřené odporové oblasti je na obrázku znázorněna jako rozměr **d**. Výsledný rozměr je tedy dán součtem přes všechny části měřené struktury, jak je na obrázku znázorněno trajektorií **e**, která prochází středem měřené izolační oblasti. Její celková šíře byla vypočtena jako součet všech izolačních mezer mezi plošnými vodiči, který byl ještě zvětšený o polovinu vzdálenosti k protilehlému meandru a o vzdálenost mezi středy sousedních izolačních mezer, jak je to znázorněno na obrázku. Účelem bylo co nepřesnější analytické určení šíře izolační mezery.



Obr. 3.3. Rozměry prvků ve sledované části struktury

| Prvek | Popis | Rozměr (mm) |
|-------|--|-------------|
| a | Šířka plošného vodiče | 0,6 |
| b | Izolační mezera #1 | 0,6 |
| c | Izolační mezera #2 | 1,2 |
| d | Délka jednoho vodiče | 9,6 |
| e | Šíře výsledné izolační mezery: $e = 5*d + 9*(1/2)*c + 4(a+b) + (1/2)*b + a$ | 59,1 |

Tab. 3.3. Rozměry jednotlivých prvků z obrázku 3.3.



Obr..3.4. Vzhled výsledné struktury

3.3. Testovací metodika

3.3.1. Uspořádání pracoviště

Vytvořené vzorky byly po rozřezání základní destičky podrobeny testování na vliv nečistot na izolační odpor. Jako testovací pracoviště sloužila měřicí stanice s megaohmmetrem s maximální měřenou hodnotou $1 \cdot 10^{15} \Omega$. Měřicí svorky byly uvedeny na napětí 300 V a při tomto napětí probíhalo měření odporu. Velikost odporu byla potom odečtena ze stupnice na megaohmmetru.

Připravené vzorky byly podrobeny působení měřicího napětí o velikosti 300 V, přičemž údaj o odporu byl odečten po uplynutí jedné minuty od zapnutí napájení. Postupně tedy byly proměřeny všechny vzorky tlustovrstvé keramiky.



Obr. 3.5. Uspořádání měřicího pracoviště

3.3.2. Rozvržení experimentu

Experiment byl rozvržen tak, aby byly prověřeny vlivy a kombinace vlivů, které na odpor izolační mezery u tlustovrstvé keramiky mohou mít vliv. Celkový počet zhotovených vzorků byl takto rozdělen na skupiny, které byly potom odděleně zpracovávány, přičemž každá skupina vzorků byla podrobena jiným procesům čištění a pouzdření, popřípadě jejím kombinacím. Mezi jednotlivými technologickými kroky probíhalo kontinuální měření za účelem zjištění vliv daného technologického kroku na izolační vlastnosti keramického substrátu zpracovávaného danou technologií.

Všechny vzorky struktury byly podrobeny úvodnímu měření, které proběhlo ještě před jakoukoli operací na nich. Úkolem prvního měření bylo získání referenční hodnoty pro srovnávání s hodnotami získanými během následujících měření mezi jednotlivými technologickými kroky. Bylo zjištěno, že tato hodnota je u každého vyrobeného vzorku na začátku trochu jiná, proto bylo nutné provést toto pořízení hodnoty pro srovnání.

Před prováděním technologických kroků byly všechny vzorky opatřeny vývodovými hřebínky. Účelem tohoto procesu bylo záměrné znečištění substrátu tavidlem, které je součástí trubičkové pájky olovnaté i bezolovnaté pájecí pasty, které byly použity pro zapájení vývodů. Dalším úkolem bylo vytvoření kontaktních vývodů pro usnadnění samotného měření a demonstrace skutečného provedení součástky.

Následující krok se týkal čištění tavidlových zbytků. Tomuto kroku byly podrobeny pouze některé skupiny vzorků za účelem srovnání s těmi vzorky, které čištěny nebyly. K čištění byla použita ultrazvuková lázeň, jako čistící médium sloužila demineralizovaná voda. Do této demineralizované vody byl alternativně přidán izopropyl za účelem sledování účinnosti takového čištění. Každý cyklus čištění trval přibližně 20 minut a po každém takovém cyklu bylo provedeno proměření vlastností struktury. Cílem tohoto postupu bylo objasnění vlivu každého kroku na izolační vlastnosti a posouzení účinnosti vícenásobného čištění. Vícenásobné čištění dále sloužilo k demonstraci případů, kdy jsou vyráběné obvody během několika opakování totožných výrobních operací (například pájení) vícekrát čištěny od zbytků tavidla. Operace čištění byla alternativní a byla provedena pouze na vybraných skupinách vzorků.

Závěrečným technologickým krokem bylo výsledné zapouzdření testované struktury. Tato operace měla za úkol objasnit vliv pouzdrícího materiálu na vlastnosti vyrobené struktury, kde mezi hlavními vlivy je povrchový izolační odpor a elektromigrace. Vzhledem k alternativnímu provádění operace čištění v předchozím kroku zde byly sledovány i vlivy předchozího čištění na vlastnosti struktury po zapouzdření a na eventuální projevy interakce mezi neodstraněnými zbytky tavidla a použitou pouzdrící hmotou.

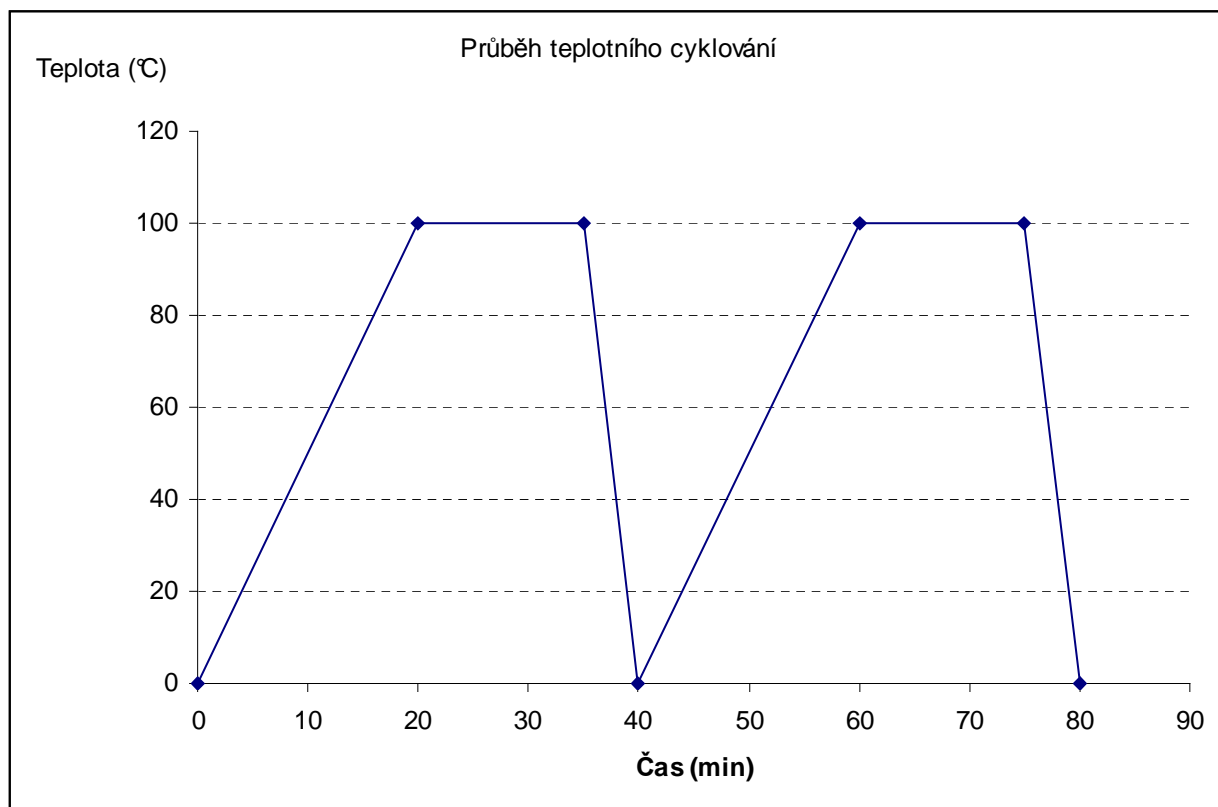
Testovaným způsobem pouzdření je zalití testované struktury do jednosložkové epoxidové hmoty, která je vytvrzena teplem. Nanášení hmoty probíhalo ručně na každý vzorek zvlášť, vytvrzení bylo provedeno v peci při teplotě 150 °C po dobu 30 minut. Po provedení zapouzdření bylo provedeno proměření struktury.

Posledním experimentem bylo provedení klimatických zkoušek. Jedná se o simulaci vlivu různých měnících se teplot na izolační vlastnosti již zapouzdřené struktury. Experiment byl proveden jako teplotní cyklování, které trvalo 500 hodin pro zjištění vlivu klimatických změn na vytvořenou strukturu.

3.3.3. Parametry teplotního cyklování

K provedení klimatických zkoušek bylo využito teplotní cyklování v rozsahu teplot od 0°C do 100°C. Cyklování trvalo 500 hodin pro každou skupinu vzorků, jeden cyklus trval 40 minut.

Jak je patrné z (**Obr. 3.6.**), během první fáze trvající asi 20 minut dochází k lineárnímu nárůstu teploty. Po dosažení 100 °C se teplota ustálí a setrvává takto 15 minut. Poté je systém chlazen. Během 500 hodin proběhlo těchto cyklů celkem 750.



Obr. 3.6. Průběh teplotních cyklů při klimatických zkouškách

| Skupina číslo | Pájení | Čištění | Pouzdrění |
|---|-----------------|---------------|------------|
| Vzorky pro teplotní cyklování | | | |
| 1 | Bezolovnatá SAC | Neproběhlo | Zalévání |
| 2 | Eutektická SnPb | Neproběhlo | Zalévání |
| 3 | Eutektická SnPb | 1 cyklus voda | Neproběhlo |
| 4 | Eutektická SnPb | Neproběhlo | Neproběhlo |
| Vzorky pro stanovení významu čištění | | | |
| 5 | Eutektická SnPb | 3 cykly voda | Neproběhlo |

Tab. 3.4. Rozvržení testů pro různé skupiny vzorků

Tabulka (**Tab. 3.4.**) obsahuje plán experimentů pro všechny skupiny vzorků, které jsou v rámci této práce prováděny. Zatímco první dvě skupiny jsou zapouzdrěny, jsou další dvě skupiny ponechány nezapouzdrěny, aby byl tak z výsledků experimentů na nich provedených zjevný vliv čištění tavidlových zbytků na změnu svodového odporu při klimatických zkouškách. Poslední skupina slouží k ověření a klasifikaci významu čištění po pájení.

3.4. Parametry testovacích materiálů

3.4.1. Pájecí slitina Kovohutě Sn63Pb37

| | |
|---------------------------|--|
| Pájecí slitina | Sn63Pb37 |
| Doporučená teplota pájení | 215 °C |
| Tavidlo | Nízko aktivovaná pryskyřice |
| Označení tavidla | MTL-408 |
| Typ tavidla | F - SW 26 |
| Oplachovost | Bezoplachové |
| Korozivní účinky | Nekorozivní |
| Vodivost vodného výluhu | 10 – 30 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ |

Tab. 3.5. Parametry pájecí slitiny Kovohutě Sn 63 Pb 37

3.4.2. Pájecí pasta COBAR S9M – XM3S

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Pájecí slitina | Sn96Ag3,75Cu0,25 |
| Teplota likvidu | 221°C |
| Teplota solidu | 217°C |
| Doporučená teplota pájení | 232 – 250 °C |
| Velikost částic | 25 – 45 μm |
| Tavidlo | Syntetická pryskyřice |
| Obsah halidů v tavidle | Do 0,5 % |

Tab. 3.6. Parametry pájecí slitiny COBAR S9M – XM3S

3.4.3. Zalévací hmota EPO TEK H61

Epoxidová elektroizolační hmota EPO-TEK H61 byla použita pro finální zalití funkční struktury. Hmota byla nanášena ručně na meandry tvořící funkční strukturu a po nanesení následovalo vytvrzení v peci při 150 °C po dobu 30 minut.

| | | |
|------------------------------|--|----------|
| Počet složek | Jednosložkové | |
| Barva | Šedá | |
| Konzistence | Středně hrubá | |
| Index tixotropnosti | 3,9 | |
| Viskozita | 40,000 – 60,000 cPs | |
| Teplota skelného přechodu | > 90 °C | |
| Tepelná roztažnost | Pod teplotou Tg | 71 ppm |
| | Nad Tg | 171 ppm |
| Objemová elektrická vodivost | $1 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ | |
| Tepelná vodivost | 1,0 W/mK | |
| Doba vytvrzení | Při 120 °C | 60 minut |
| | Při 150 °C | 30 minut |

Tab. 3.7. Parametry lepidla EPO-TEK H61

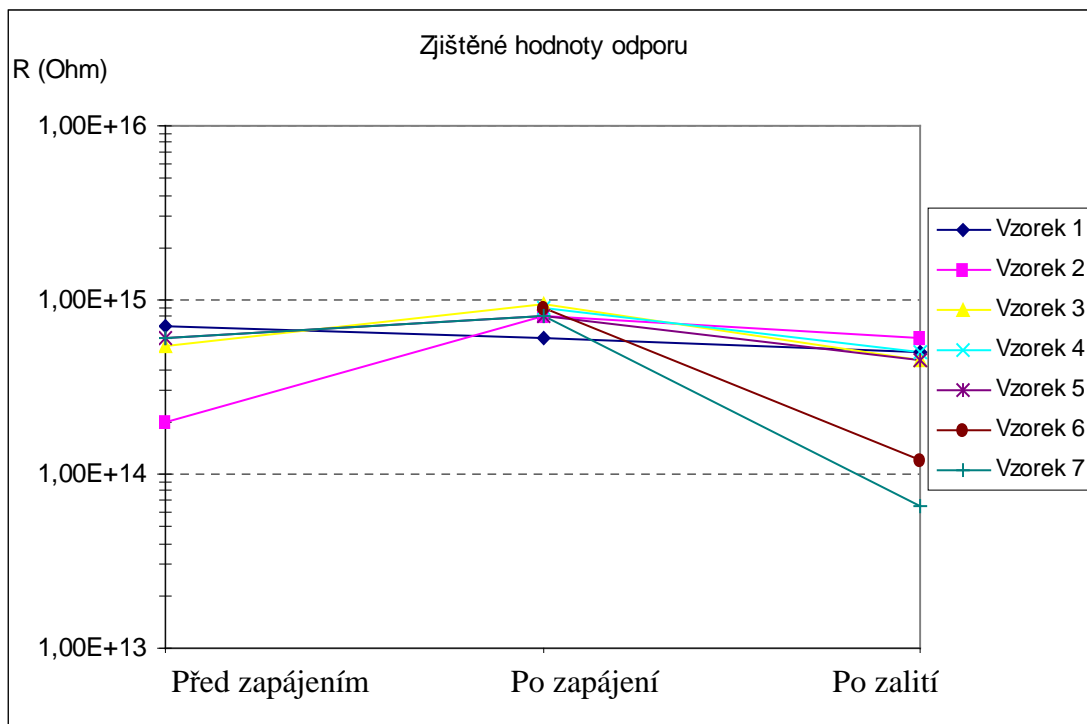
3.5. Výsledky experimentů pro navrženou strukturu

3.5.1. Výsledky pro bezolovnatou pastu COBAR a hmotu EPO TEK

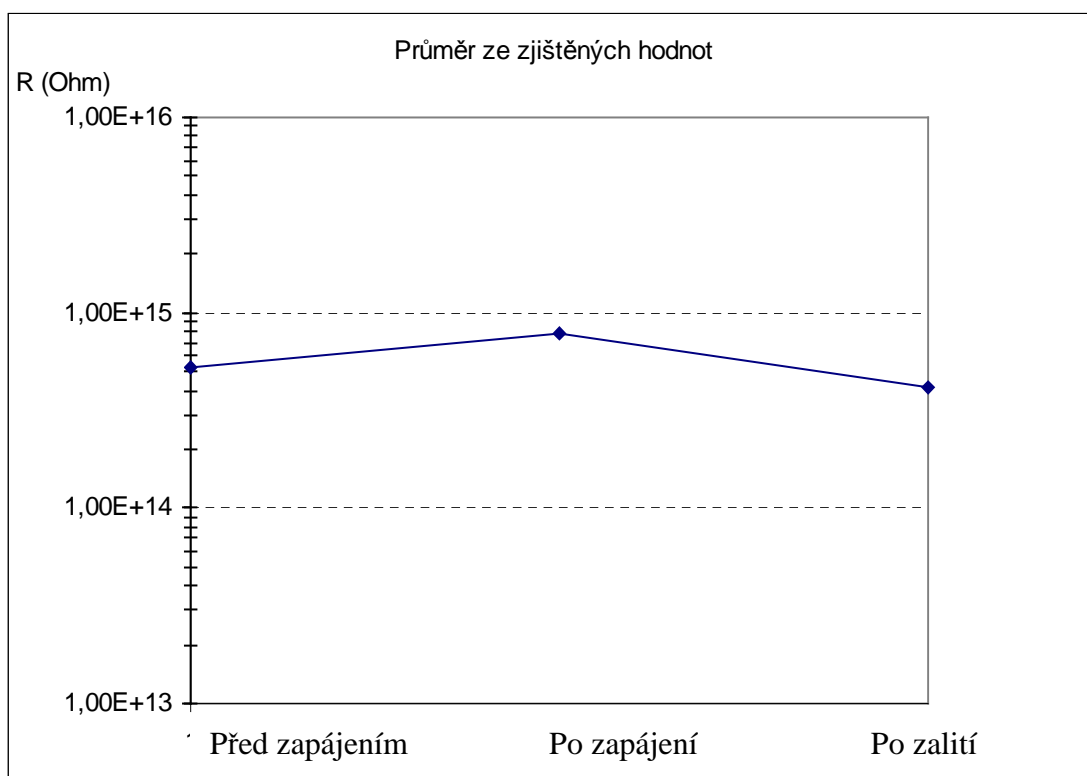
Skupina 1 byla pájena přetavením s bezolovnatou pastou COBAR S9M – XM3S. Přetavení proběhlo IR ohřevem. Po přetavení pájecí pasty byly opět proměřeny parametry vzorků a následně byly vzorky zapouzďeny hmotou EPO TEK H61. V tabulce (**TAB. 3.8.**) jsou uvedeny výsledky měření, obrázky (**Obr. 3.7, 3.8. , 3.9. a 3.10.**) jsou znázorněním průběhů svodových vodivostí po jednotlivých technologických krocích.

| vzorek | Odpor izolační mezery (Ohm) | | |
|--------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | čistá keramika | Po zapájení pastou COBAR S9M XM3S | po zapouzďení EPO-TEK D61 |
| 1 | 7,00E+14 | 6,00E+14 | 5,00E+14 |
| 2 | 2,00E+14 | 8,00E+14 | 6,00E+14 |
| 3 | 5,50E+14 | 9,50E+14 | 4,50E+14 |
| 4 | více než 1E+15 | 9,00E+14 | 5,00E+14 |
| 5 | 6,00E+14 | 8,00E+14 | 4,50E+14 |
| 6 | více než 1E+15 | 9,00E+14 | 1,20E+14 |
| 7 | 6,00E+14 | 8,00E+14 | 6,50E+13 |
| průměr | 5,30E+14 | 7,90E+14 | 4,13E+14 |

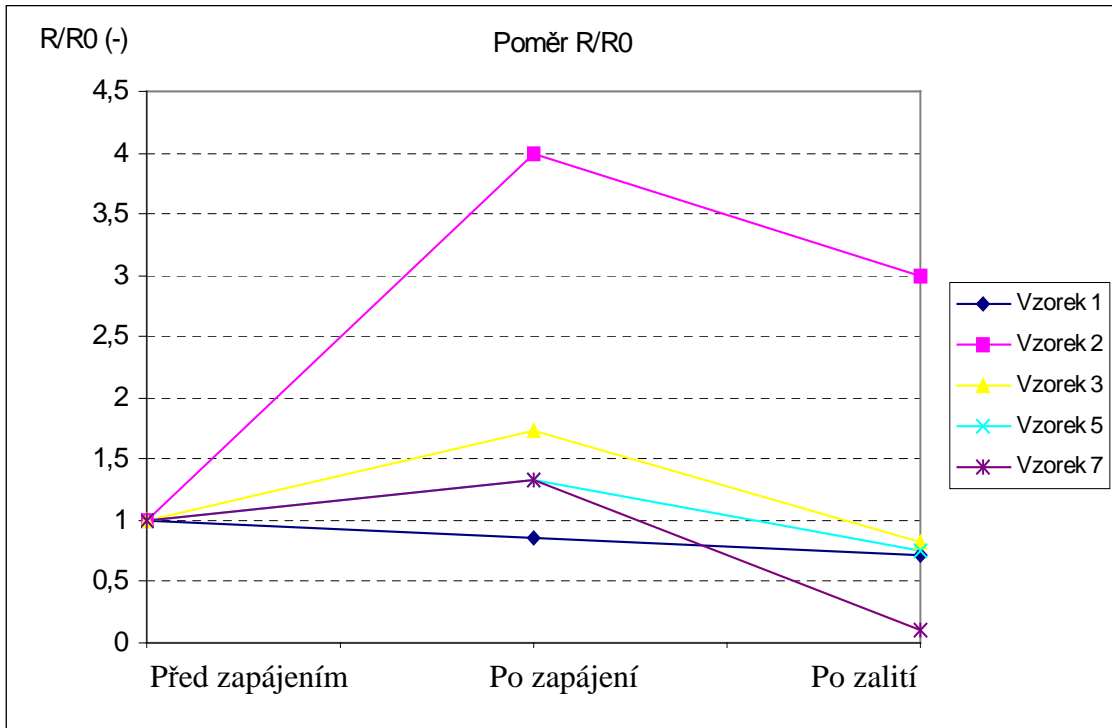
Tab 3.8. Průběhy odporů pro první skupinu vzorků



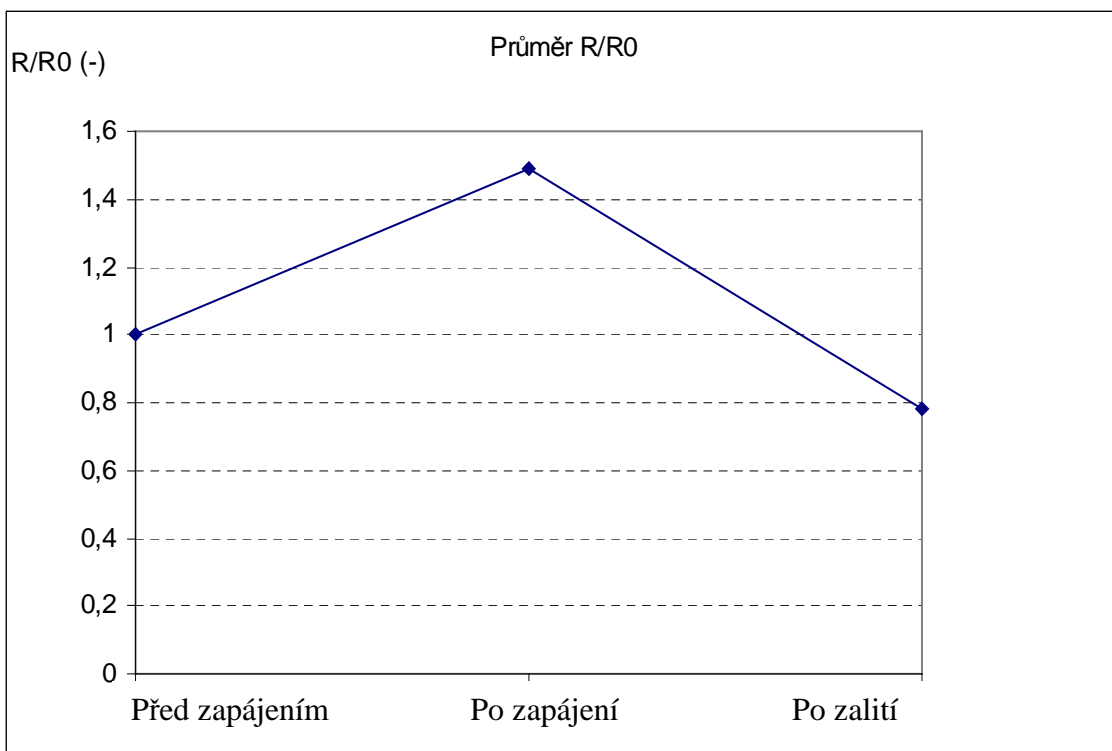
Obr. 3.7. Zjištěné hodnoty odporu po jednotlivých technologických krocích



Obr. 3.8. Průměr ze změřených hodnot po jednotlivých krocích



Obr. 3.9. Hodnoty odporu po jednotlivých krocích vztahené k R0 každého vzorku



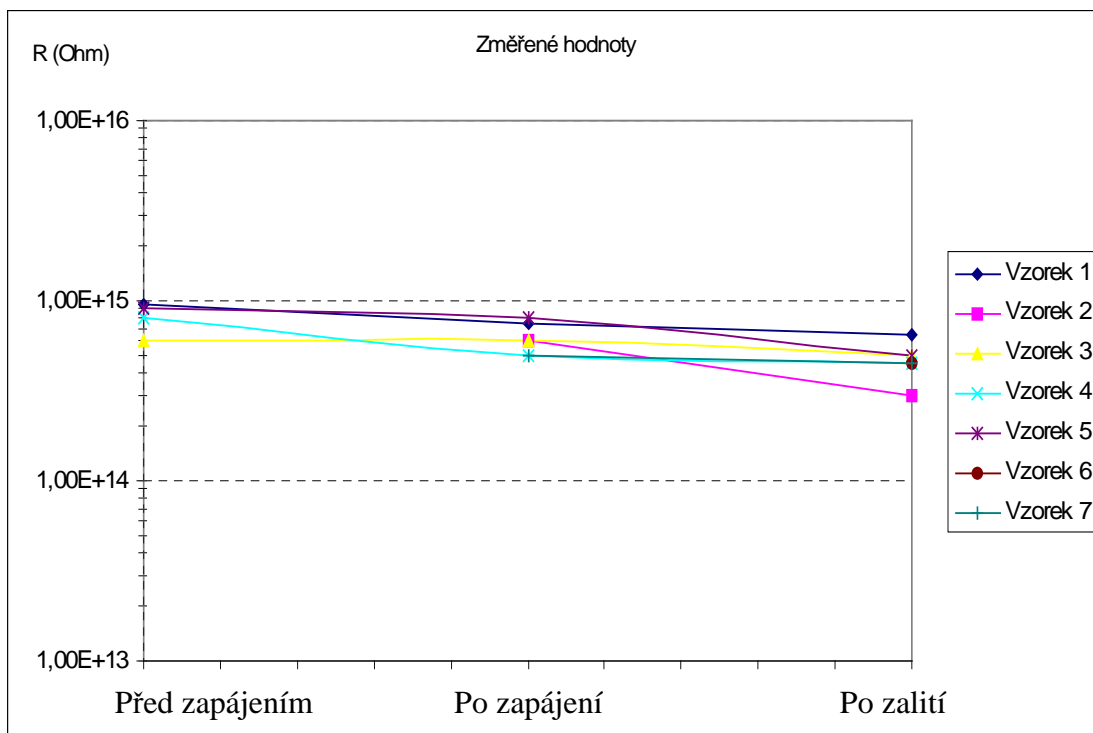
Obr. 3.10. Průměr poměrů R/ R0

3.5.2. Výsledky pro slitinu SnPb a hmotu EPO TEK

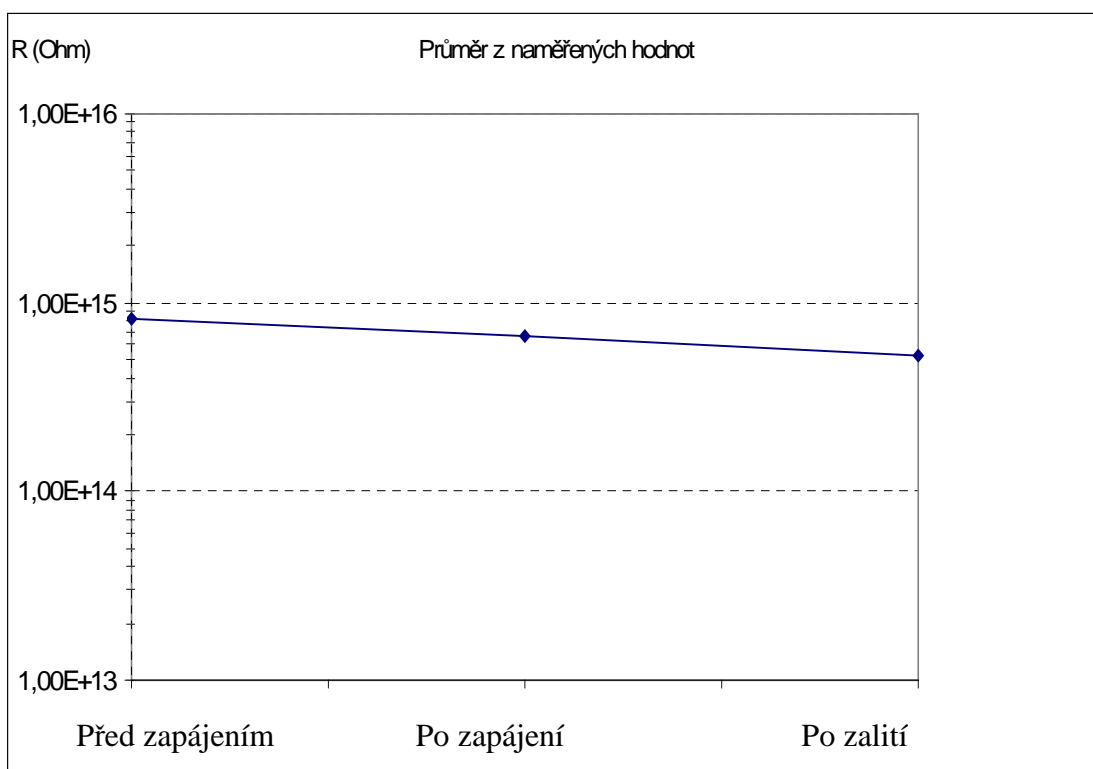
Druhá skupina byla opatřena vývodovými hřebínky, které byly připájeny pomocí olovnaté eutektické pájky SnPb s obsahem přírodních pryskyřic. Tyto vzorky nebyly po pájení čištěny a byly zalaty do epoxidové hmoty EPO TEK H61 stejně jako u skupiny 1. Tabulka (**Tab. 3.9.**) obsahuje výsledky experimentů, graficky jsou tyto znázorněny na (**Obr. 3.11., 3.12., 3.13. a 3.14.**).

| Vzorek | Odpor (Ohm) | | |
|--------|----------------|------------------|------------------------|
| | čistá keramika | po zapájení SnPb | Po zapouzdření EPO-TEK |
| 1 | 9,50E+14 | 7,50E+14 | 6,50E+14 |
| 2 | více než 1E+15 | 6,00E+14 | 3,00E+14 |
| 3 | 6,00E+14 | 6,00E+14 | 5,00E+14 |
| 4 | 8,00E+14 | 5,00E+14 | 4,50E+14 |
| 5 | 9,00E+14 | 8,00E+14 | 5,00E+14 |
| 6 | více než 1E+15 | víc než 1E+15 | 4,50E+14 |
| 7 | více než 1E+15 | 5,00E+14 | 4,50E+14 |
| průměr | 8,13E+14 | 6,63E+14 | 5,25E+14 |

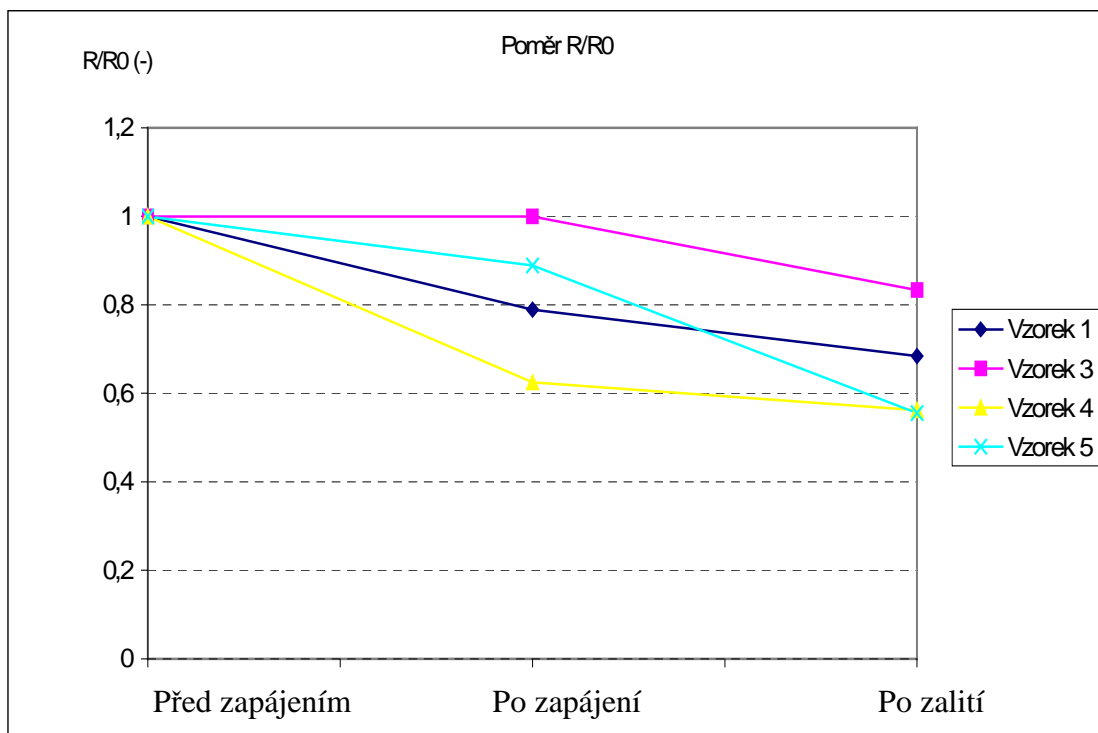
Tab. 3.9. Rezistivity u druhé skupiny



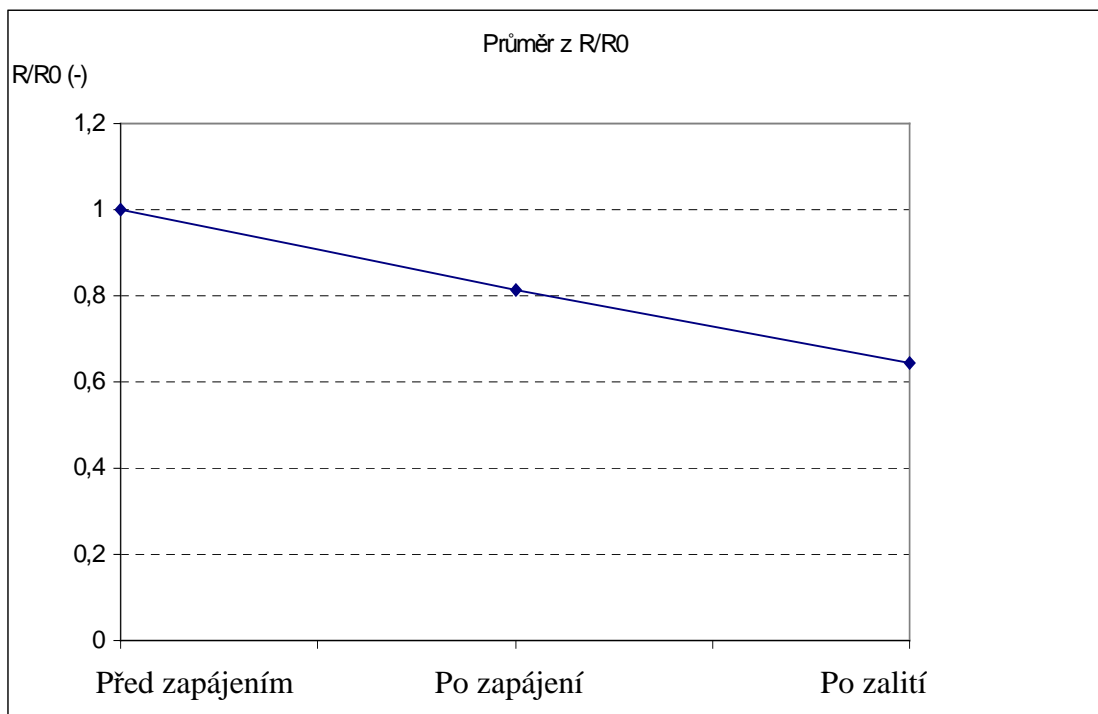
Obr. 3.11. Naměřené hodnoty rezistivit



Obr. 3.12. Průměr naměřených hodnot



Obr. 3.13. Poměr změřených hodnot rezistivit k počáteční rezistivitě čisté keramiky



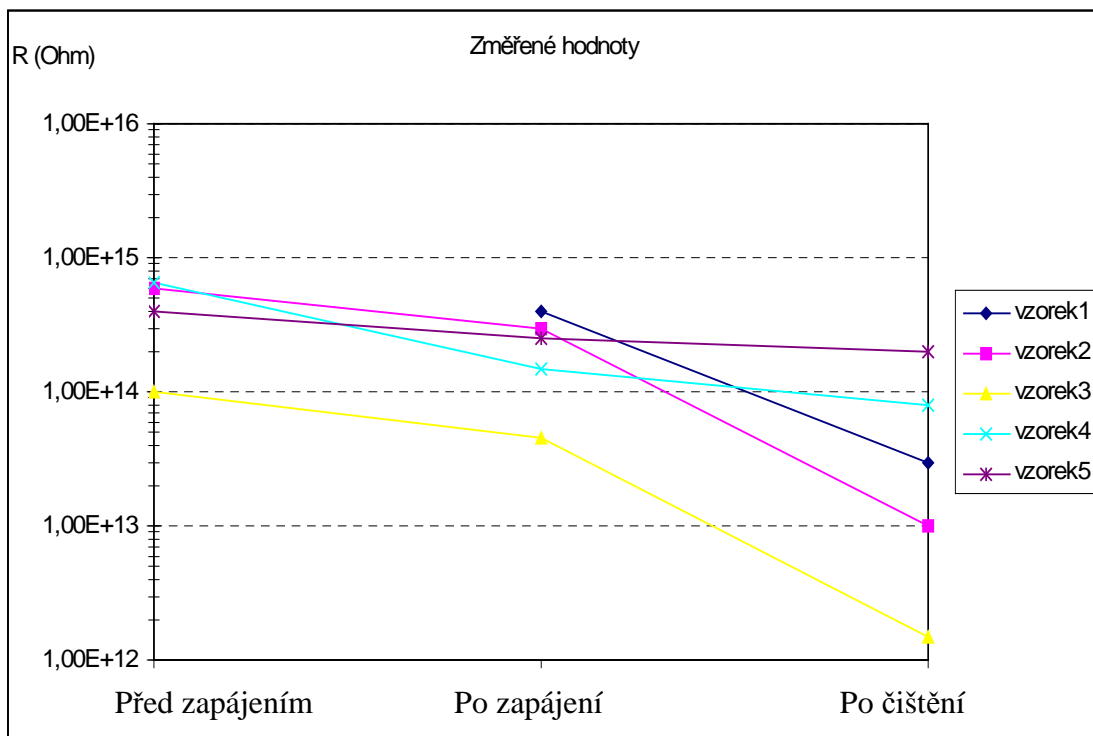
Obr. 3.14. Průměr z hodnot poměru R/R0

3.5.3. Výsledky pro slitinu SnPb a jeden cyklus oplachu

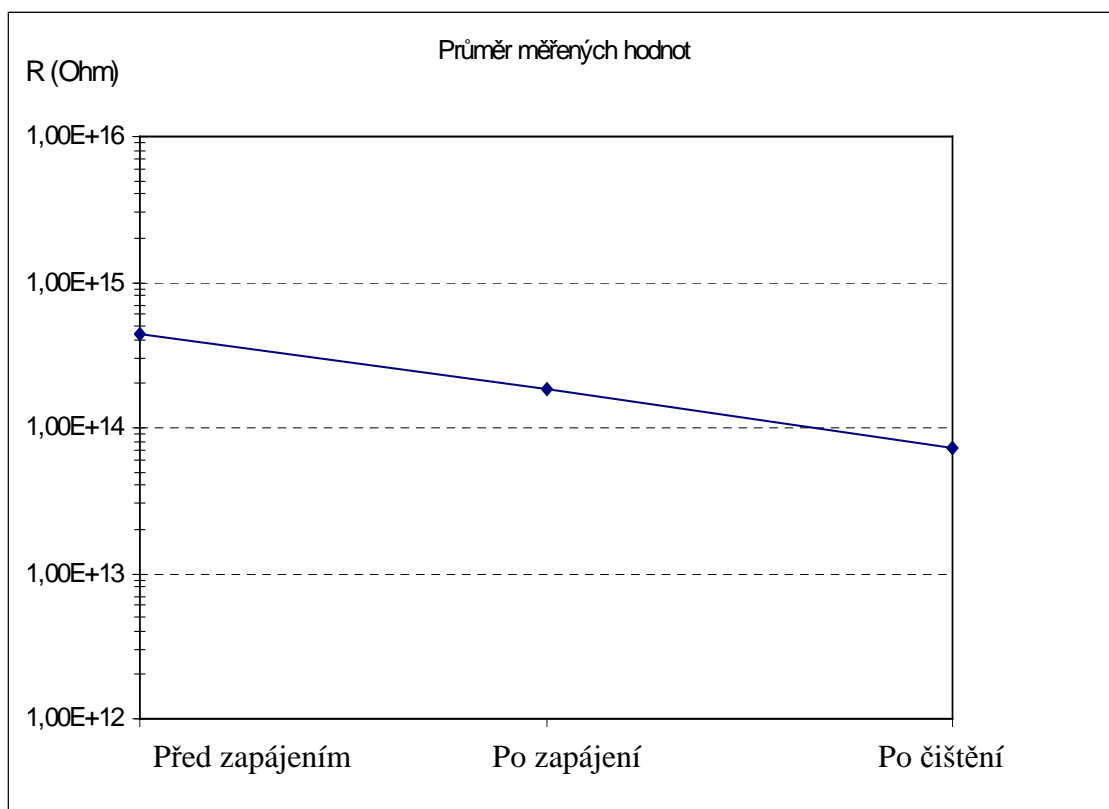
Třetí skupina vzorků nebyla nikterak pouzdřena. Jednotlivé vzorky keramiky byly opatřeny vývodovými hřebínky, které byly připájeny pomocí eutektické pájky s obsahem přírodních pryskyřic. Vzorky byly po pájení čištěny v demineralizované vodě, jejich čištění bylo provedeno za působení ultrazvuku po dobu dvaceti minut. V tabulce (**Tab. 3.10.**) jsou výsledky pro tuto skupinu. Obrázky (**Obr. 3.15., 3.16., 3.17. a 3.18.**) potom znázorňují výsledky experimentů a výpočtů pro tuto skupinu.

| Vzorek | Odpor (Ohm) | | |
|--------|----------------|------------------|------------|
| | čistá keramika | po zapájení SnPb | Po čištění |
| 1 | více než 1e+15 | 4,00E+14 | 3,00E+13 |
| 2 | 6,00E+14 | 3,00E+14 | 1,00E+13 |
| 3 | 1,00E+14 | 4,50E+13 | 1,50E+12 |
| 4 | 6,50E+14 | 1,50E+14 | 8,00E+13 |
| 5 | 4,00E+14 | 2,50E+14 | 2,00E+14 |
| průměr | 4,38E+14 | 1,86E+14 | 7,29E+13 |

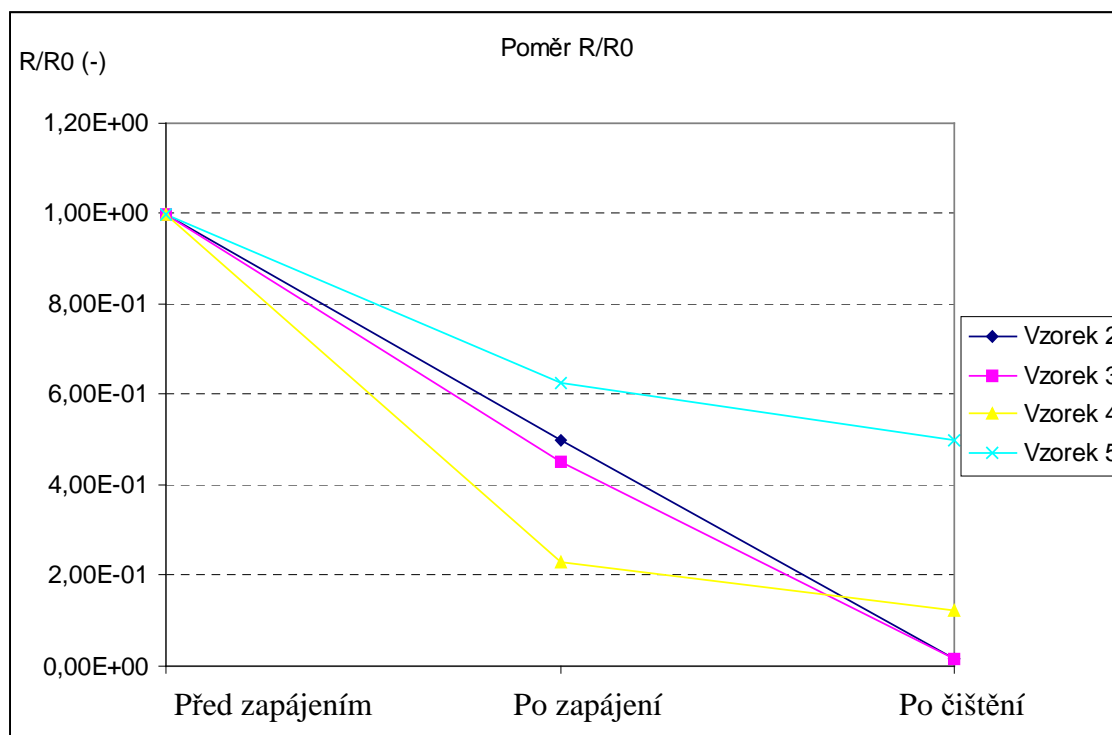
Tab.3.15. Hodnoty rezistivit pro třetí skupinu vzorků



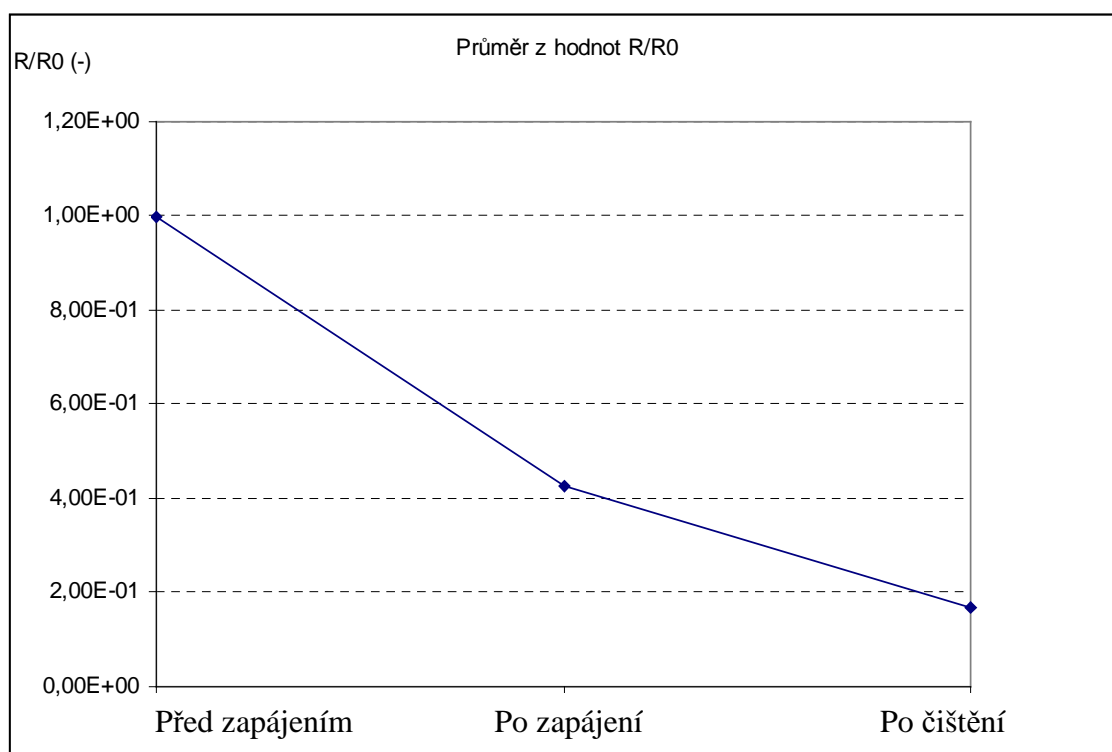
Obr. 3.15. Změřené hodnoty rezistivit



Obr. 3.16. Průměr ze změřených hodnot rezistivit



Obr. 3.17. Hodnoty poměru R/R0 pro jednotlivé vzorky



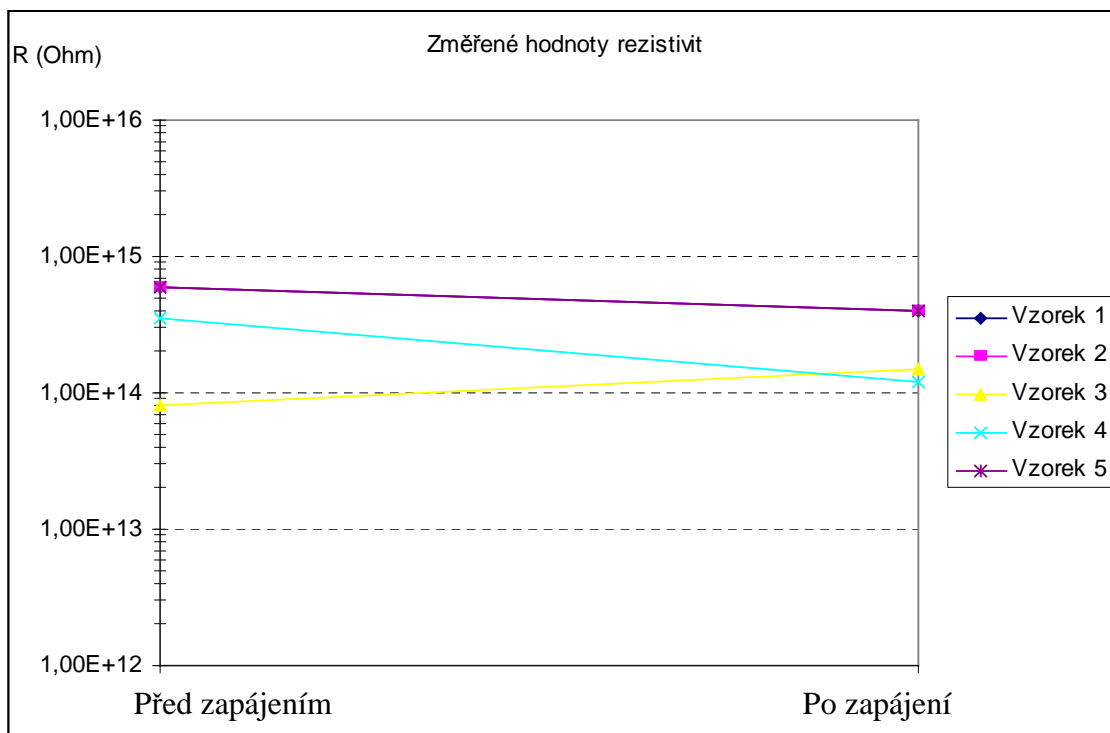
Obr. 3.18. Průměr z hodnot poměrů R/R0

3.5.4. Výsledky pro slitinu SnPb bez čištění

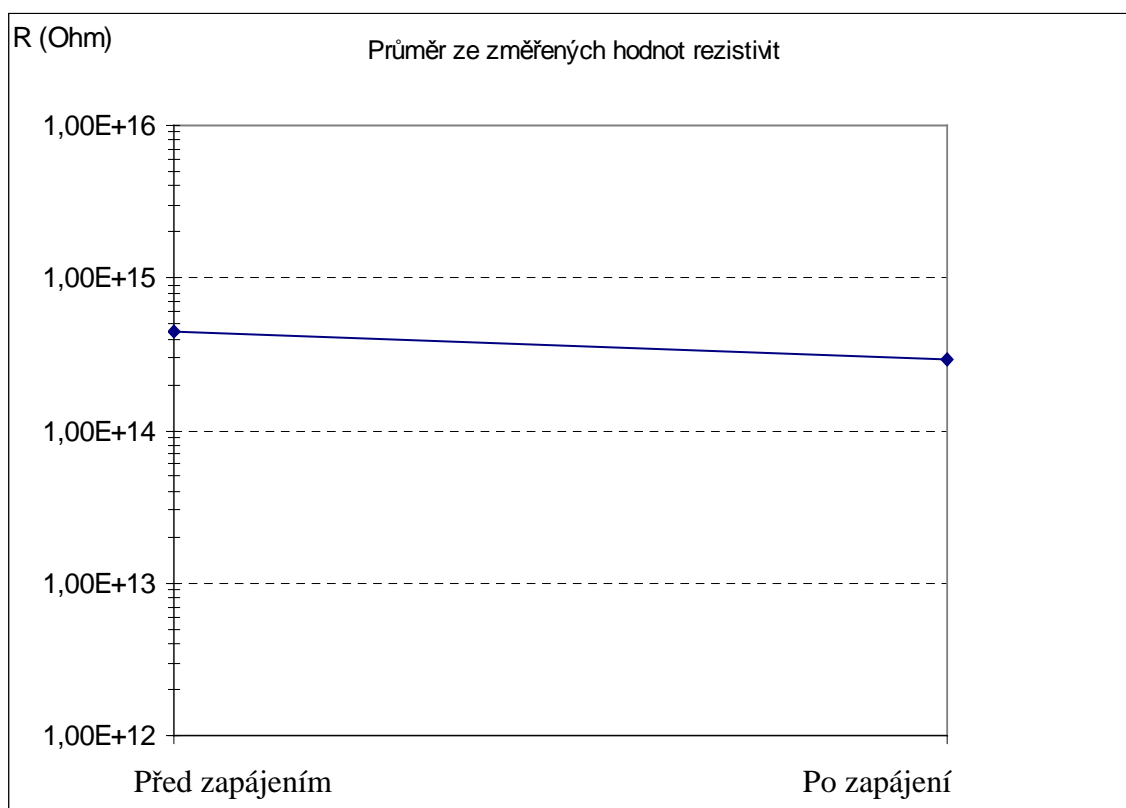
Vzorky čtvrté skupiny byly opatřeny vývodovými hřebínky, přičemž k jejich upevnění bylo použito opět eutektické pájecí slitiny SnPb. Po provedení zapájení již byly vzorky ihned nasazeny na teplotní cyklování, neprobíhalo zde žádné čištění ani pouzdření. Tabulka (Tab.3.11) shrnuje výsledky pro čtvrtou skupinu vzorků, jejich grafické vyjádření je v grafech (Obr. 3.19., 3.20., 3.21. a 3.22.)

| Vzorek | Odpor (Ohm) | |
|--------|----------------|------------------|
| | čistá keramika | po zapájení SnPb |
| 1 | 6,00E+14 | 4,00E+14 |
| 2 | 6,00E+14 | 4,00E+14 |
| 3 | 8,00E+13 | 1,50E+14 |
| 4 | 3,50E+14 | 1,20E+14 |
| 5 | 6,00E+14 | 4,00E+14 |
| průměr | 4,46E+14 | 2,94E+14 |

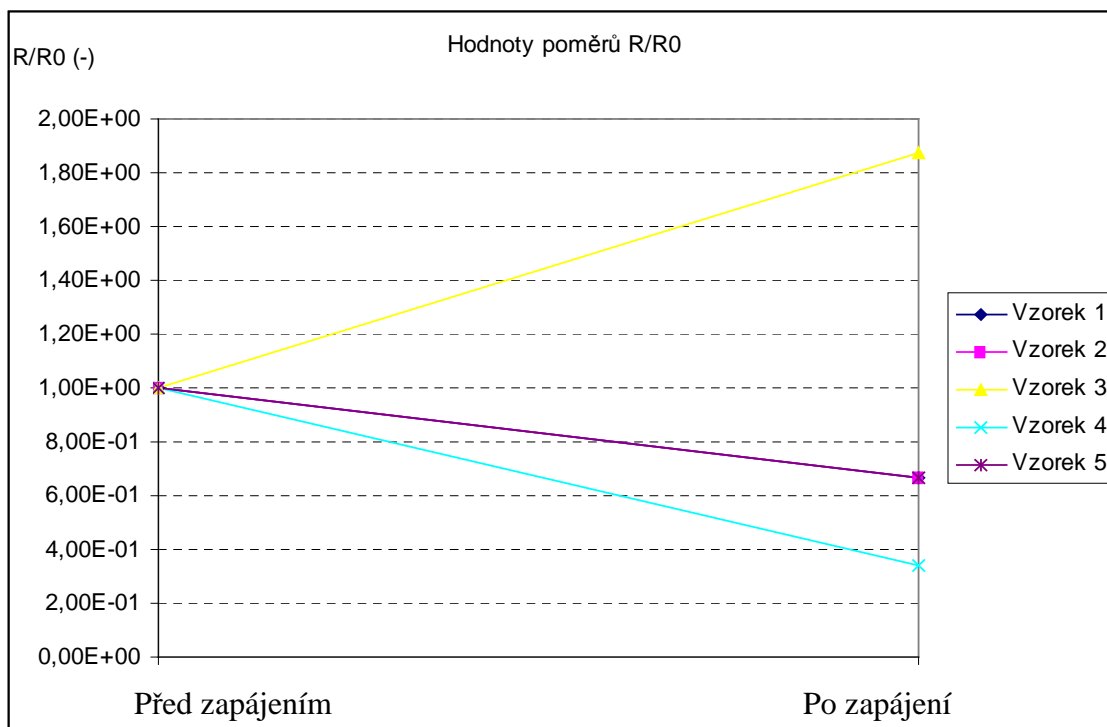
Tab. 3.11. Výsledky u čtvrté skupiny vzorků



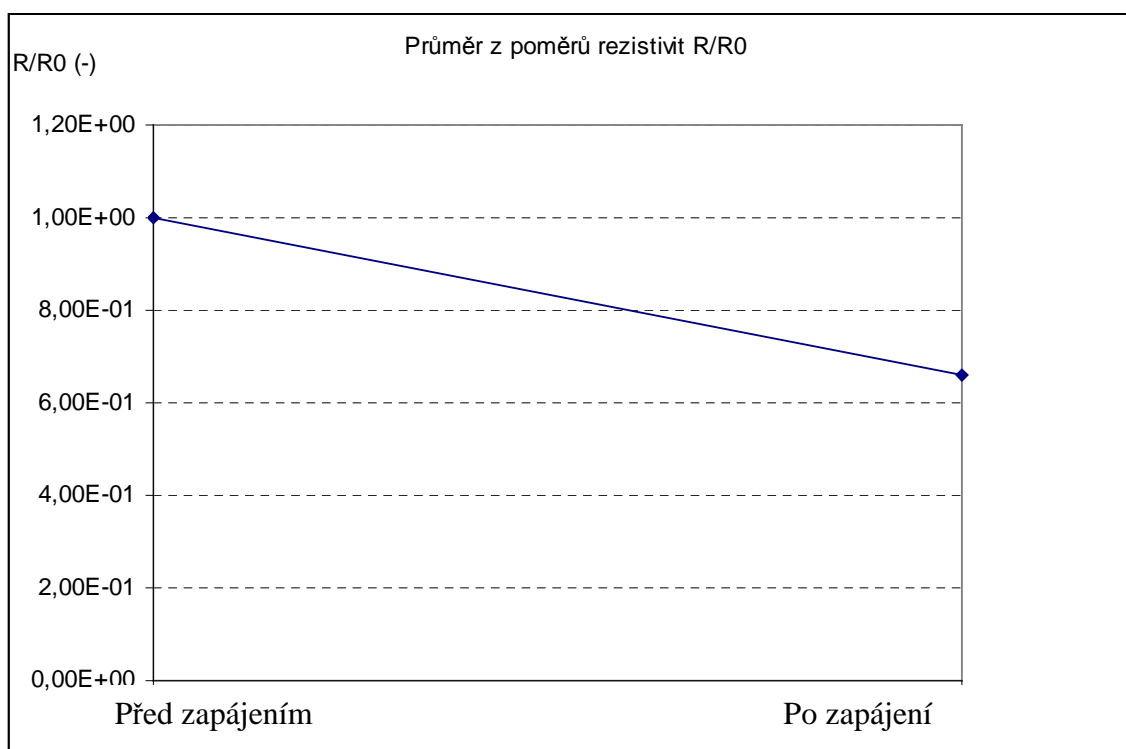
Obr. 3.19. Změřené hodnoty odporů



Obr. 3.20. Průměr ze změřených hodnot rezistivit



Obr. 3.21. Poměry R/R0 pro jednotlivé vzorky



Obr. 3.22. Průměr z hodnot poměrů rezistivit

3.5.5. Zhodnocení výsledků měření navržených struktur

Byly zkoumány vlastnosti čtyř skupin vzorků s různým postupem technologického zpracování. Experimenty spočívaly v napájení vývodových hřebínků, což proběhlo u všech vzorků, volitelném čištění a volitelném zalití do epoxidu. Přitom po každém technologickém kroku byla změřena rezistivita izolační mezery u každého vzorku a staticky byl vyhodnocen poměr změny této rezistivity k rezistivitě na počátku technologického zpracování. K tomu byly pro absolutní i relativní hodnoty ještě vypracovány grafy znázorňující průměrný průběh u každé skupiny.

U první skupiny je na absolutním i relativním průběhu zřejmé, že rezistivita vzorků po zapájení byla u většiny vzorků vyšší než rezistivita vzorků před zapájením. Pravděpodobnou příčinou tohoto stavu je fakt, že tato skupina byla pájena bezolovnatou pájecí slitinou, která obsahuje modernější tavidla s lepšími vlastnostmi než pájecí slitiny olovnaté. Z tohoto důvodu se lze domnívat, že nečistoty usazené na povrchu keramických vzorků a zvyšující svodovou vodivost byly tímto tavidlem rozpuštěny a odstraněny, čímž se zlepšily elektrické izolační vlastnosti mezery. Dále k lepším izolačním vlastnostem mohl přispět i fakt vyšší teploty přetavení vzorku. Po pájení nebyly vzorky již čištěny, zapouzďení bylo provedeno do epoxidové hmoty. Tento krok znamenal u všech vzorků snížení odporu izolační mezery na hodnotu v průměru 0,8-násobek z hodnoty odporu u čisté keramiky. Patrnou příčinou je zde obsah příměsí v epoxidové hmotě, které se na parazitních svodech podílejí a k čemuž dochází na nečištěných substrátech vlivem migrace a rozpouštění zbytků tavidla v epoxidu.

Druhá skupina vzorků byla podobně jako první skupina zapouzďena do epoxidové hmoty, nicméně vzorky tentokrát byly opatřeny vývody, které byly zapájeny olovnatou eutektickou pájkou. Rozdíl oproti první skupině je nejlépe viditelný na obrázku (**Obr. 3.14**). Zde si tedy můžeme povšimnout, že na rozdíl od první skupiny, která byla pájena bezolovnatou pájkou, se pájení na odporu izolační mezery podepisuje negativně – izolační odpor klesne asi na 80% své iniciální hodnoty na čisté keramice. Dalším krokem je zde opět zapouzďení do epoxidu, kdy dojde – podobně jako u první skupiny – k dalšímu poklesu odporu izolační mezery opět na cca 80% z hodnoty, kterou odpor izolační mezery měl po pouhém zapájení vzorků.

Třetí skupina nebyla již pouzďena, jejím účelem bylo klasifikovat vliv a význam čištění na hodnotu izolačního odporu po zapájení vzorků. Prvním technologickým krokem při zpracování této skupiny bylo připájení vývodů eutektickou olovnatou pájkou, při němž byly vzorky kontaminovány podobně jako v předcházejících případech tavidlem. Následovalo čištění v demineralizované vodě, přičemž úkolem byla klasifikace významu tohoto čištění na elektrický izolační odpor. Na obrázku (**Obr. 3.18**) je zachycen průběh změny odporu izolační mezery u této skupiny vzhledem k hodnotě iniciálního odporu na keramice před zpracováním. Je možno si zde povšimnout, že čištění v tomto případě elektrické vlastnosti izolační mezery ještě zhoršilo. Patrnou příčinou tohoto faktu je skutečnost, že nečistoty odplavené ze substrátu zůstávají v roztoku a opětovně jsou adsorbovány na povrch vzorku, přičemž oplach ve vodě napomáhá jejich rovnoměrnému rozdělení na povrchu substrátu a tím i snížení rezistivity. Další možností je elektrická aktivace kontaminantů, k níž dojde kontaktem s vodou a působením ultrazvukové energie, která je k čištění využívána. Proto lze na tomto místě konstatovat, že jediný cyklus čištění se na vlastnostech rezistivity u izolační mezery nepodepíše příznivě.

Čtvrtá skupina vzorků byla zařazena experimentu pro zjištění vlivu teplotního cyklování na vlastnosti vzorkům které byly pouze opatřeny vývodovými hřebínky a nebyly nikterak dále upravovány. Obrázek (**Obr. 3.22.**) ukazuje, jak se odpor izolačním mezery změní po pájení olovnatou pájkou. Lze si povšimnout, že zde dochází k podobné změně jako u ostatních skupin – projeví se zde vliv tavidla, které se na celkové rezistivitě podepíše negativně.

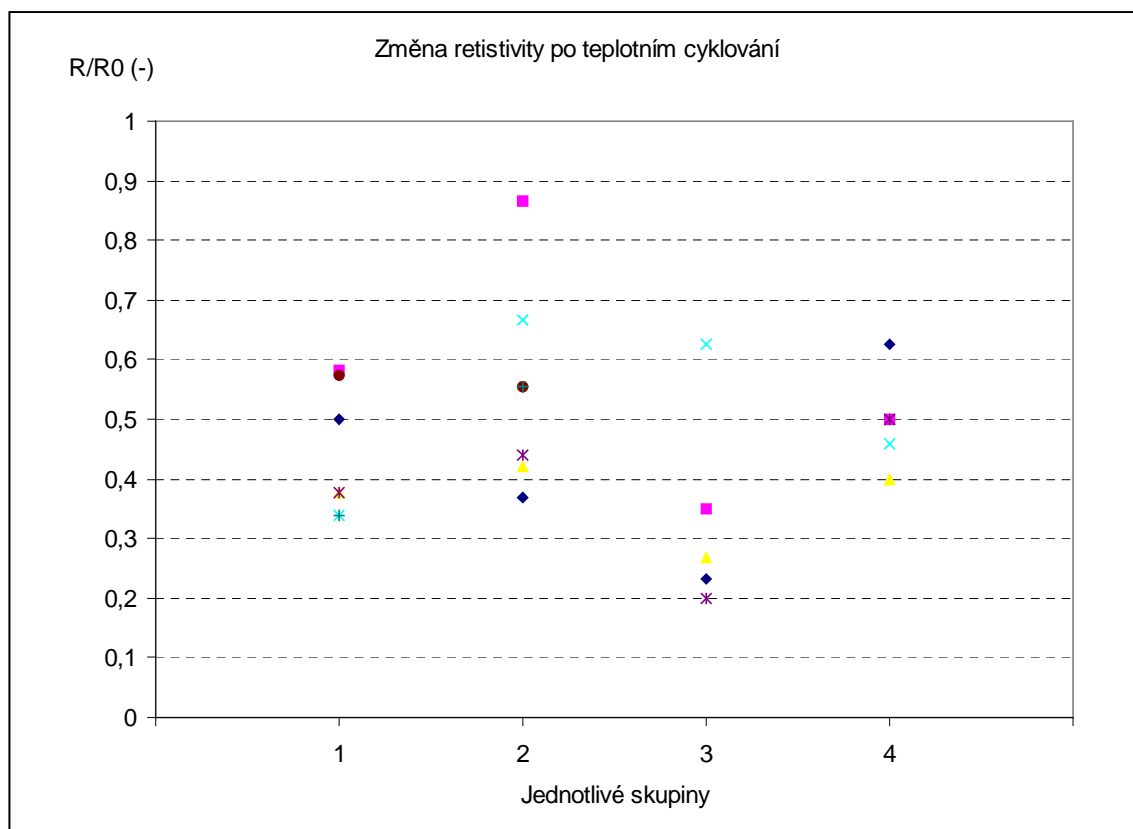
3.6. Výsledky po teplotním cyklování

Teplotní cyklování probíhalo přibližně 500 hodin v intervalu teplot od 0 do 100°C , přičemž perioda jednoho cyklu byla 40 minut. Sledovány byly jak absolutní hodnoty rezistivit, tak i relativní změna hodnoty rezistivity po cyklování vzhledem k hodnotě na začátku cyklování.

V tabulce (**Tab. 3.11.**) jsou uvedeny výsledky pro každý vzorek jak na začátku cyklování, tak i na jeho konci. Dále je v tabulce vynesena hodnota R/R_0 představující poměr mezi jednotlivými hodnotami na začátku a na konci cyklování. Graficky je vše znázorněno na grafu na (**Obr. 3. 23.**)

| skupina1 | | | |
|----------|-----------------|--------------|----------|
| | před cyklováním | po cyklování | r/r0 |
| | 5,00E+14 | 2,50E+14 | 5,00E-01 |
| | 6,00E+14 | 3,50E+14 | 5,83E-01 |
| | 4,50E+14 | 1,70E+14 | 3,78E-01 |
| | 5,00E+14 | 1,70E+14 | 3,40E-01 |
| | 4,50E+14 | 1,70E+14 | 3,78E-01 |
| | 1,20E+14 | 6,90E+13 | 5,75E-01 |
| | 6,50E+13 | 2,20E+13 | 3,38E-01 |
| průměr | 4,13E+14 | 1,72E+14 | 4,15E-01 |
| skupina2 | | | |
| | před cyklováním | po cyklování | r/r0 |
| | 6,50E+14 | 2,40E+14 | 3,69E-01 |
| | 3,00E+14 | 2,60E+14 | 8,67E-01 |
| | 5,00E+14 | 2,10E+14 | 4,20E-01 |
| | 4,50E+14 | 3,00E+14 | 6,67E-01 |
| | 5,00E+14 | 2,20E+14 | 4,40E-01 |
| | 4,50E+14 | 2,50E+14 | 5,56E-01 |
| | 4,50E+14 | 2,50E+14 | 5,56E-01 |
| průměr | 5,25E+14 | 2,47E+14 | 4,71E-01 |
| skupina3 | | | |
| | před cyklováním | po cyklování | r/r0 |
| | 3,00E+13 | 7,00E+12 | 2,33E-01 |
| | 1,00E+13 | 3,50E+12 | 3,50E-01 |
| | 1,50E+12 | 4,00E+11 | 2,67E-01 |
| | 8,00E+13 | 5,00E+13 | 6,25E-01 |
| | 2,00E+14 | 4,00E+13 | 2,00E-01 |
| průměr | 6,43E+13 | 2,02E+13 | 3,14E-01 |
| skupina4 | | | |
| | před cyklováním | po cyklování | r/r0 |
| | 4,00E+14 | 2,50E+14 | 6,25E-01 |
| | 4,00E+14 | 2,00E+14 | 5,00E-01 |
| | 1,50E+14 | 6,00E+13 | 4,00E-01 |
| | 1,20E+14 | 5,50E+13 | 4,58E-01 |
| | 4,00E+14 | 2,00E+14 | 5,00E-01 |
| průměr | 2,94E+14 | 1,53E+14 | 5,20E-01 |

Tab. 3. 11. Tabulka shrnující výsledky před a po teplotním cyklování a jejich vzájemný poměr



Obr. 3.23. Změny rezistivit po teplotním cyklování pro jednotlivé vzorky

3.6.1. Zhodnocení výsledků po teplotním cyklování

Jak lze vidět na grafu na (**Obr. 3.23.**), nejmenší změnu R/R_0 čtvrtá skupina, která byla pájena pomocí eutektické pájecí slitiny a dále již na ní žádné další kroky prováděny nebyly. Naopak nejvíce se cyklování projeví na třetí skupině, která byla čištěna pomocí demineralizované vody. Pravděpodobnou příčinou tohoto jevu je skutečnost, že nečistoty, které byly aktivovány v průběhu čištění, se na zhoršení izolačních vlastností projevují více než u vzorků, které takto čištěny nebyly (viz. 4. skupina).

Na základě těchto výsledků lze tedy konstatovat, že nejméně se klimatické změny projeví na vzorku, který nebyl ani vystaven působení čistícího média, ani nebyl pouzdřen – částice obsažené v pouzdríci epoxidové hmotě se taktéž mohou projevit na celkovém izolačním odporu mezery.

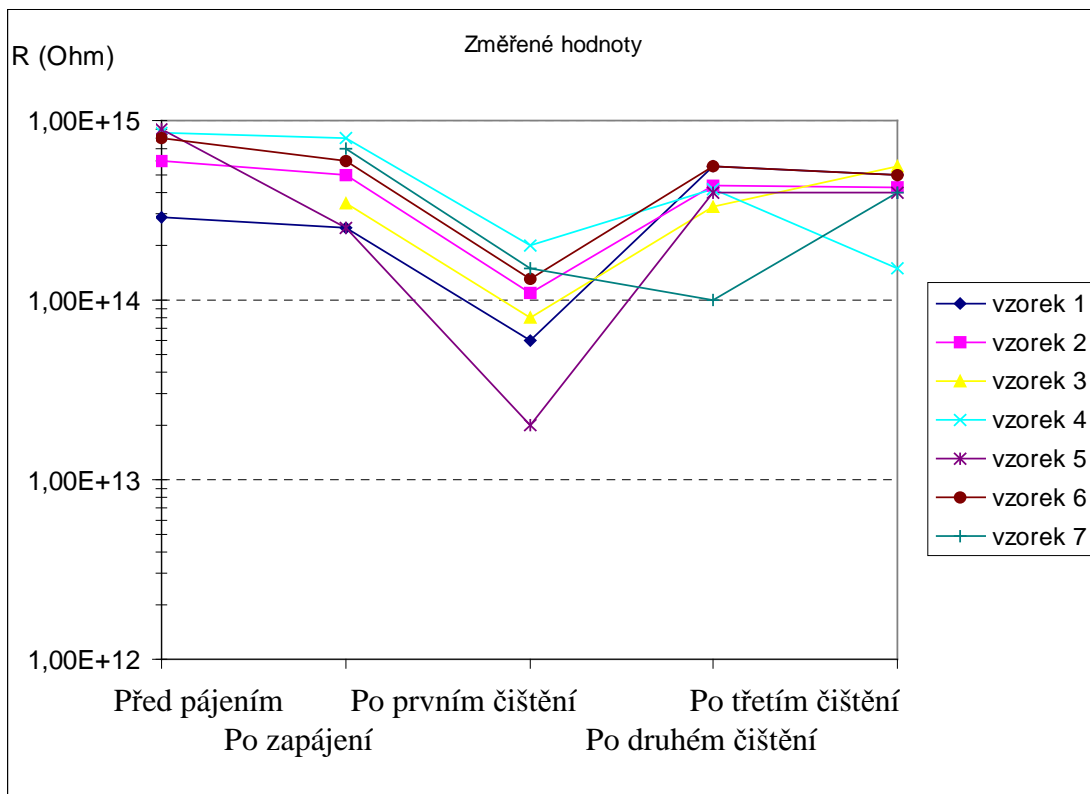
3.7. Výsledky zkoušek čištění substrátů

Dalším experimentem, který byl v rámci diplomového projektu proveden, bylo posouzení a klasifikace významu čištění substrátu opatřeného vývodovými hřebínky. Cílem bylo posoudit a diskutovat význam vícenásobného čištění vzorků. Tento experiment byl prováděn na samostatné skupině, kde byla pro zapájení hřebínek použita opět eutektická slitina SnPb od firmy Kovohutě s nízko aktivovanou pryskyřicí jakožto tavítkem. Jako takové byly vzorky opatřeny vývodovými hřebínky a po jejich zapájení následoval oplach v demineralizované vodě. Tento oplach proběhl celkem třikrát, poslední cyklus probíhal ve vodě s přídatkem izopropylenu.

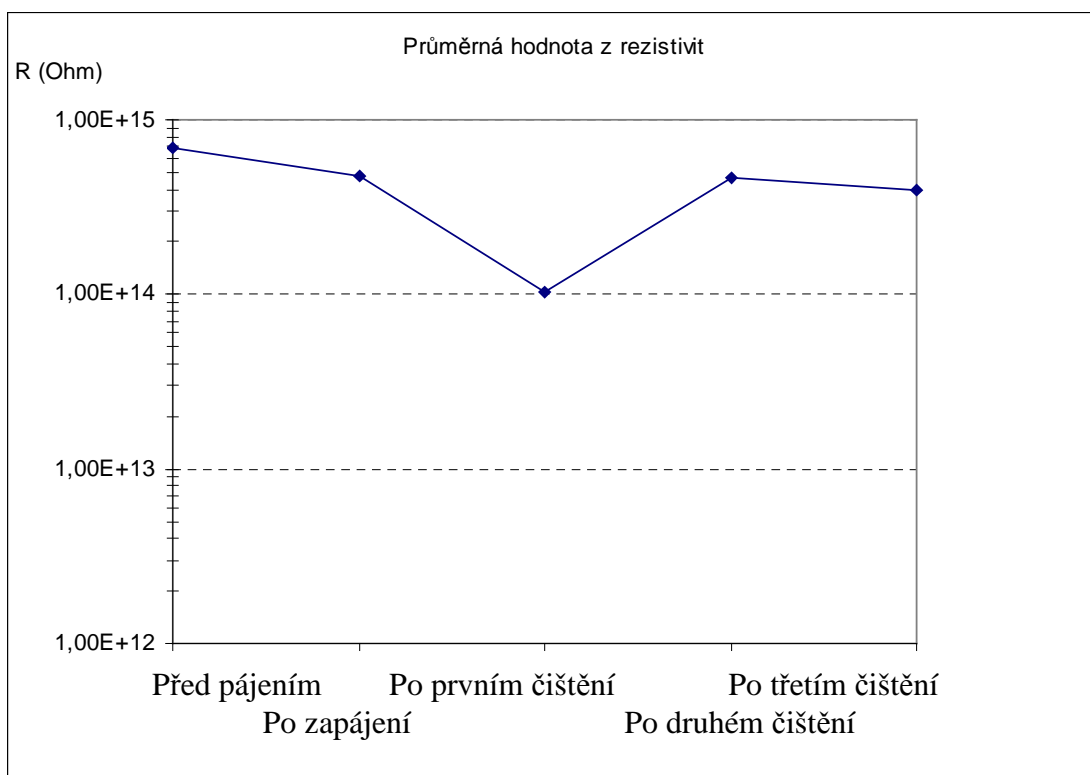
Vzorky byly průběžně proměřovány, výsledky měření jsou shrnuty v tabulce (**Tab. 3.12.**). Na obrázcích (**Obr. 3.24., 3.25., 3.26. a 3.27.**) jsou opět shrnuty průběhy absolutních a relativních naměřených hodnot pro každý vzorek zvlášť a průměrné hodnoty získané proměřením po každém technologickém kroku.

| Vzorek | Odpor (Ohm) | | | | |
|--------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| | čistá keramika | po zapájení | po 1.čištění | po 2.čištění | po 3.čištění |
| 1 | 2,90E+14 | 2,50E+14 | 6,00E+13 | 5,50E+14 | 5,00E+14 |
| 2 | 6,00E+14 | 5,00E+14 | 1,10E+14 | 4,30E+14 | 4,25E+14 |
| 3 | větší než 1e+15 | 3,50E+14 | 8,00E+13 | 3,30E+14 | 5,50E+14 |
| 4 | 8,50E+14 | 8,00E+14 | 2,00E+14 | 4,10E+14 | 1,50E+14 |
| 5 | 9,00E+14 | 2,50E+14 | 2,00E+13 | 4,00E+14 | 4,00E+14 |
| 6 | 8,00E+14 | 6,00E+14 | 1,30E+14 | 5,50E+14 | 5,00E+14 |
| 7 | více než 1e+15 | 7,00E+14 | 1,50E+14 | 1,00E+14 | 4,00E+14 |
| průměr | 6,88E+14 | 4,80E+14 | 1,04E+14 | 4,68E+14 | 3,95E+14 |

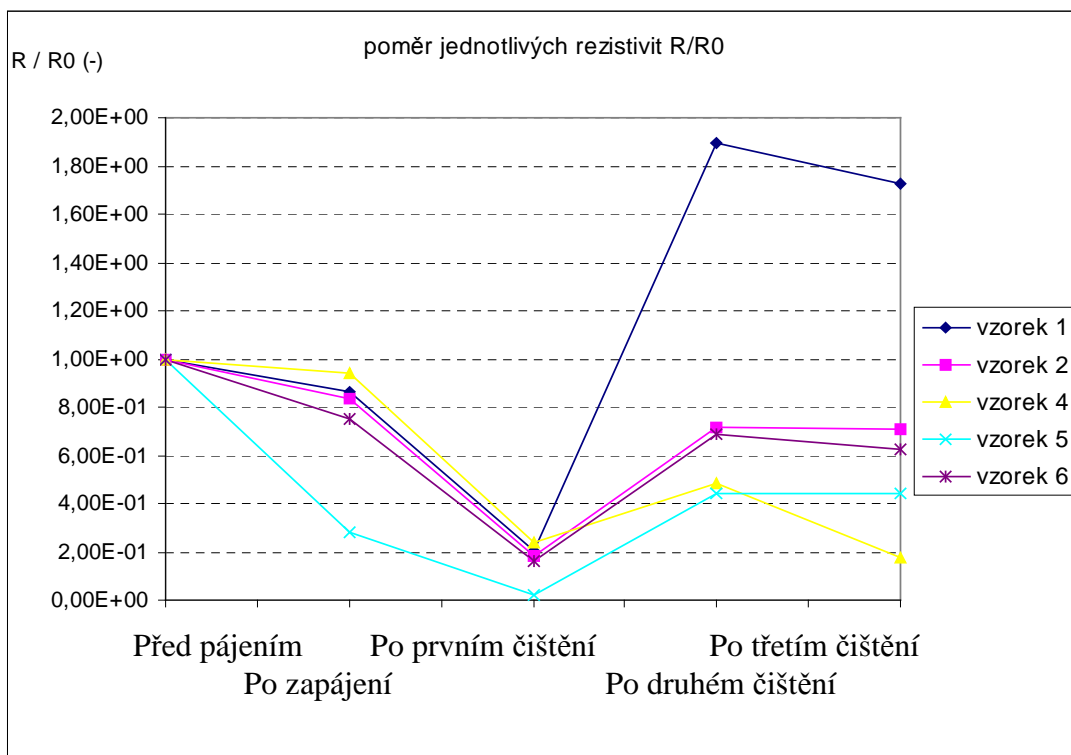
Tab. 3.12. Hodnoty rezistivit po zapájení a jednotlivých cyklech čištění



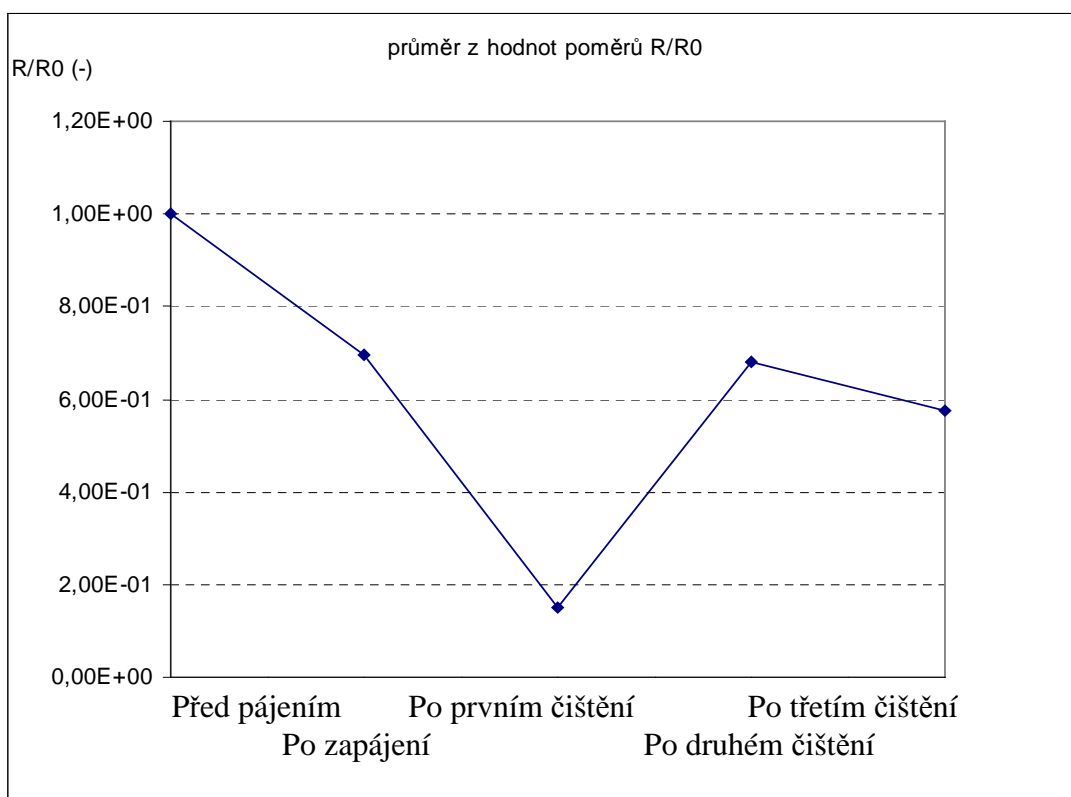
Obr. 3.24. Změřené hodnoty rezistivit pro jednotlivé vzorky



Obr.3.25. Průměr z naměřených hodnot rezistivit



Obr. 3.26. Poměrné hodnoty odporů u jednotlivých vzorků po jednotlivých cyklech čištění



Obr. 3.27. Průměr z jednotlivých hodnot poměrů R/R0

3.7.1. Zhodnocení výsledků po čištění substrátů

Na grafech lze zpozorovat nejprve vliv pájení hřebínků. Je vidět, že tento vliv je nepříznivý, odpor izolační mezery poklesne na asi 70% iniciální hodnoty. I zde sehrává svou roli s největší pravděpodobností tavidlo, obsažené v pájecí pastě. Následně tedy byly prováděny opakované cykly čištění, kdy čistícím médiem byla v prvních dvou případech voda, ve třetím případě byl do vody přidán isopropylen. Čištění vždy trvalo 20 minut a bylo prováděno za pomoci ultrazvuku.

Z grafu je patrné, že vliv prvního cyklu čištění je velmi nepříznivý, izolační odpor po tomto čištění klesl v průměru na přibližně 15% ze své iniciální hodnoty. Patrnou příčinou tohoto jevu je prvotní uvolnění kontaminantu (tavidla) z povrchu vzorků a jeho opětovná adsorpce na jeho povrch. Přitom kontaminant byl adsorbován na povrch rovnoměrně, čímž došlo ke vzniku filmu obsahujícího migrující ionty způsobující svod. Část kontaminantu nicméně byla z povrchu obvodu odstraněna a zpětně se již na povrch vzorků neadsorbovala.

Z tohoto důvodu nabývá významu druhý cyklus čištění. Jak je vidět na grafickém znázornění, má druhý cyklus velmi pozitivní vliv na celkovou rezistivitu substrátu. Patrně je zde příčinou fakt, že po prvním cyklu, kdy se část kontaminantu zpětně adsorbovala na povrch vzorků, dochází v druhém cyklu k definitivnímu odstranění takto vzniklého filmu. Proto zde můžeme zpozorovat nárůst hodnot rezistivity na hodnotu, kterou měl vzorek před prvním čištěním.

Úkolem třetího cyklu čištění bylo klasifikovat, zda má další čištění ještě význam. Pro zlepšení procesu byl do demineralizované vody přidán izopropylen. Na grafu si lze povšimnout, že tento cyklus už na celkový izolační odpor výrazný vliv nemá. Pravděpodobně již zde bylo dosaženo hranice procesních možností, kdy by další čištění již nevedlo ke zlepšení celkových elektrických vlastností obvodu.

3.8. Diskuse výsledků

Na základě provedených experimentů lze vyslovit následující závěry a stanovit návrh na optimalizaci. V prvním experimentu byly zkoumány různé technologické kroky na čtyřech různých skupinách, které byly odděleně zpracovávány a proměřovány. Ze změřených výsledků lze tedy vyvodit následující závěry:

- ➔ Tavidla obsažená v eutektické pájecí slitině způsobí snížení celkové rezistivity o přibližně 20% - 40%
- ➔ Bezolovnatá pájecí pasta přispívá ke zlepšení izolačních vlastností mezery, protože novější typ tavidla v ní obsažené zanechává méně nečistot povrchu substrátu
- ➔ Epoxidová pouzdricí hmota u použitých vzorků způsobila snížení rezistivity izolační mezery o 20% - 50%
- ➔ Výrazné snížení rezistivity vzorky zaznamenaly po jednom cyklu čištění vodou

Se závěrem posledního bodu souvisí další experiment, který byl prováděn. Výsledkem tohoto experimentu je výrazné snížení rezistivity izolační mezery. Tato rezistivita se po prvním cyklu významně snížila, což je patrně zapříčiněno zpětnou adsorpcí kontaminantu na povrch keramického substrátu. Ke zlepšení rezistivity tedy dochází až po druhém cyklu čištění substrátů, kdy jsou již kontaminanty definitivně odplaveny a zpět na substrát se už neadsorbují.

3.8.1. Návrhy na optimalizaci technologických procesů

Na základě změřených výsledků lze tedy stanovit následující návrhy na optimalizaci procesu:

- ➔ Bezolovnatá pájecí slitina je lepší volbou v případě, že má být dosaženo vyššího odporu izolační mezery již v první fázi technologického procesu. Moderní tavidlo použité ke zlepšení pájení zanechává méně kontaminantů již v průběhu pájení
- ➔ Pokud má být po pájení olovnatou pájecí slitinou prováděno čištění, je nutné cyklus čištění provést dvakrát až třikrát. Při pouze jednom cyklu dochází ke zpětné adsorpci kontaminantů zpět na substrát, kde takto vznikne souvislý film způsobující parazitní svody. Další možností je provádět dynamický oplach místo statického
- ➔ Epoxidová zalévací hmota je dobrou volbou tehdy, pokud není obvod použit pro zpracování velmi malých signálů v analogových zařízeních. Pokud tomu tak je, může být vlastní svodová vodivost způsobená rozpuštěním tavidlových zbytků v epoxidové izolační hmotě problémem a v takovém případě je nutno uvažovat jiný způsob pouzdření – nejlépe hermetické moduly. Taktéž je možno před zalitím substrát důkladně čistit
- ➔ Má – li být obvod vystaven klimaticky náročnému prostředí, je nutno kvůli možným vlivům na svody na substrátu nutno odstranit film kontaminantů adsorbovaný na substrátu. Jediný cyklus čištění je spíše příčinou zhoršeného izolačního odporu, protože se kontaminant na substrátu rozdělí rovnoměrně a je ještě polárními molekulami vody aktivován

4. Závěr

Cílem práce bylo navržení struktury pro testování vlivu parazitní vodivosti způsobené kontaminací izolační mezery v průběhu technologických procesů a následné provedení klasifikace vlivů, které se na zhoršení izolačního odporu mezery podílejí. Na základě získaných výsledků potom byly navrženy resp. doporučeny modifikace technologických procesů, jež vedou ke zvýšení spolehlivosti realizovaných struktur v obecné podobě.

Prvním krokem bylo navržení testovací struktury, jež je vytvořena technologií tlusté vrstvy, v tomto případě sítotiskem na keramickém substrátu. Vodivý motiv je realizován vodivou tlustovrstvou pastou ESL-9912-K, a je tvořen paralelně umístěnými motivy vodič – mezera, jejichž uspořádání odpovídá možnosti realizovat měření izolačního odporu .

Vlastní měření probíhalo tak, že bylo vytyčeno pět skupin těchto testovacích struktur, kdy každá skupina byla podrobena rozdílným technologickým krokům a v průběhu těchto kroků byla kontinuálně proměřována a byly takto hodnoceny vlivy, které na testovací strukturu působí.

Čtyři skupiny byly podrobeny teplotnímu cyklování a na zbývající probíhalo měření týkající se zhodnocení vlivu čištění substrátu na odpor izolační mezery. Cílem bylo klasifikovat, zda má čištění význam.

Experimenty ukázaly, že jedním z citlivých bodů celého technologického procesu je cyklus pájení. V důsledku pájení dochází ke kontaminaci substrátu tavidlem, které má vliv na parazitní vodivost izolační mezery. Ukázalo se, že je rozdíl v pájení olovnatou a bezolvnatou pájecí slitinou: zatímco olovnatá slitina způsobí zhoršení izolačních vlastností mezery, bezolvnatá díky modernějšímu tavidlu a vyšším pájecím teplotám se takto negativně na odporu izolační mezery neprojeví.

Samotné pouzdření do epoxidové hmoty se taktéž projevilo nepříznivě na odporu izolační mezery, patrným důsledkem zhoršení izolačního odporu je obsah kontaminantů, který vznikl rozpuštěním zbytků tavidla původně na vodivé vrstvě do epoxidu.

Z výsledků teplotního cyklování lze vyvodit závěr, že tenký film kontaminantů, který se na substrátu po jediném cyklu čištění vytvořil, nemá jen vliv na zhoršení izolačních vlastností substrátu, ale především na hodnoty izolačního odporu po teplotním cyklování, kdy dochází k největšímu poklesu.

Na základě výsledků lze dále konstatovat, že pokud má být čištění prováděno, potom je žádoucí provádět minimálně dva cykly, protože jediný cyklus čištění (statického oplachu) naopak znamená zpětnou adsorpci kontaminantů na substrát a jejich případnou aktivaci polárními molekulami vody. Jako významné zjištění lze uvést závažnost procesu čištění, jež může být prováděno různými metodami. Proto je této problematice třeba věnovat nemalou pozornost a využívat možnosti testování kontaminace substrátů, např. metodou popsanou v [23].

Všechny relevantní výsledky jsou v předložené práci shrnuty v tabulkách a grafech, které znázorňují nejen naměřené a zprůměrované hodnoty, ale i normované hodnoty znázorňující, jak se sledovaná veličina v průběhu technologických operací měnila vzhledem ke své iniciální hodnotě.

5. Použité zdroje

- [1] Scarlett, J.A. Plošné spoje pro mikroelektroniku. Praha: SNTL, 1977. 280 stran. ISBN 04-510-77
- [2] Szendiuch. I. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno: VUTIUM, 2007. 372 stran. ISBN 80-214-3292-6.
- [3] Bouzek, K. Elektrochemické inženýrství. Praha: Vydavatelství VŠCHT. 1999. 158 stran. ISBN 80-7080-368-1
- [4] Fjelstad, J. , Chaffarian, R. , Kim, Y. , Chip scale packaging for modern electronics, Electrochemical publications ltd., 2003
- [5] Soutor, Z., Šavel, J., Žůrek, J., Hybridní integrované obvody. Praha: SNTL. 1982. 369 stran. ISBN 04-532-82
- [6] Abidh, G., Matching cleaning process to solder paste. Avantec SA. Online 2008. Dostupné na <http://smt.pennnet.com>
- [7] Riley, George A., Flipchips Dot Com, online 2001, dostupné z: www.flipchips.com
- [8] Soubor článků dostupných na: www.siliconfareast.com
- [9] Série článků dostupná na: <http://www.intel.com/design/packtech/packbook>
- [10] Novitsky, J., Wafer-level CSP, wafer-level assembly/test: integrating backend processes, online 2001, dostupné na: www.solid-state.com
- [11] Wafer-level packaging, online článek, dostupný na: www.imec.be
- [12] Martens, R., Recipe for reliability in wafer level packaging, materiál k 8. Annual KGD Workshop, 2001, dostupný na: www.napakgd.com
- [13] High Density Interconnect & Wafer Level Packaging, dostupné z: www.izm.fraunhofer.de/Images/hdi_wlp_en_tcm358-91809.pdf
- [14] Série článků dostupná na: www.chipscalereview.com
- [15] Série článků dostupná online na : <http://smithsonianchips.si.edu/>

- [16] Katalog firmy Spectrum semiconductor materials, dostupné na:
www.spectrum-semi.com
- [17] Starý, J., Kahle, P., Plošné spoje a povrchová montáž. Skriptum VUT.
- [18] Chase, G., Fluidization, článek ze série Solids notes, dostupný online na:
www.engineering.uakron.edu/
- [19] Surface insulating resistance, online 2003, dostupné na:
<http://www.emtworldwide.com/>
- [20] Katalog společnosti Henkel, značka Ablestik. Dostupné na www.ablestik.com
- [21] ELLIS, B. N. Cleaning and contamination of electronics components and assemblies. Ayr: Electrochemical publications limited, 1986, 376 stran. ISBN 0 901150 20 7
- [22] CALA, F.R., WINSTON, A.E. Handbook of aqueous cleaning technology for electronic assemblies. Asahi House, Church Road, Port Erin, Isle of man: Electrochemical publications limited, 1996, 318 stran. ISBN 0 901150 31 2
- [23] Buršík, M. Účinnost čistících metod v elektronice a hodnocení z hlediska ekologie, diplomová práce, Brno 2008. 99 stran