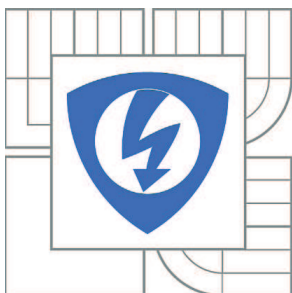


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

IZOLAČNÍ VLASTNOSTI STRUKTUR TYPU FLIP CHIP

INSULATING PROPERTIES OF FLIP CHIP STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

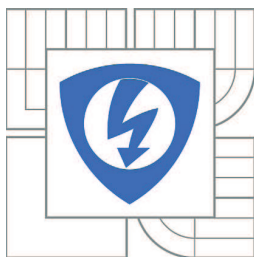
ROBERT DÓCZY

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ PULEC

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Robert Dóczy

ID: 106405

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Izolační vlastnosti struktur typu Flip chip

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte testovací strukturu typu Flip chip. Pro tuto strukturu vytvořte metodiku, která umožní klasifikovat vliv použitých aplikačních materiálů, které se používají při její realizaci, na parazitní vodivost. Z výsledků získaných za použití dané metodiky vyvoďte závěry a doporučení vedoucí k optimalizaci technologických procesů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jiří Pulec

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Tato práce se zabývá problematikou izolačních vlastností mikroelektronických struktur. Konkrétně odporem izolační mezery, jež odděluje vodivé části systému. Jsou zde nastíněny vlivy, které na izolační odpor působí a také metody, kterými se izolační odpor měří. Je zde také lehce nastíněna problematika návrhu pouzder a způsobů, kterými lze připojit mikroelektronický čip do obvodu. V experimentální části se práce zabývá konkrétním návrhem struktur typu flip-chip. Vodivý motiv těchto struktur byl zhotoven tak, aby umožnil zkoumat vliv materiálů, použitých při jejich kompletaci, na povrchový izolační odpor. Za tímto účelem byly struktury navíc podrobeny sérií oplachů, jejichž vliv je zde také prodiskutován.

Abstract:

This work deals with the insulation properties of microelectronic structures. Specifically, insulation resistance of the gap that separates the conductive parts of the system. There are also described the influences, which have the effect on insulation resistance and the methods by which the insulation resistance is measured. There are also slightly described the issues of designing microelectronic packages and ways in which the microelectronic chip can be connected to the circuit. In the experimental part, the thesis deals with specific design of microelectronic structure such as flip-chip. Conductive pattern of this structure was made to allow the measurement of insulation resistance which depends on the application materials which were used in structure assembly. For this purpose, the structures also undergo a series of cleaning, whose influence is also discussed.

Klíčová slova:

Izolační odpor, Flip chip, čištění, substrát

Keywords:

Insulation resistance, Flip chip, cleaning, substrate

Bibliografická citace práce:

DÓCZY, R. Izolační vlastnosti struktur typu Flip chip. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Pulec.

Prohlášení autora o původnosti:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Izolační vlastnosti struktur typu Flip chip“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Pulcovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce. Rád bych dále poděkoval Ing. Jiřímu Starému, PhD. za pomoc při tvorbě organických FR4 substrátů a také šablon. Zapomenout bych neměl ani na Ing. Petra Vyroubala, který mi pomohl při aplikaci nepájivé masky na organické substráty.

Obsah :

| | |
|--|-----------|
| 1. ÚVOD | 6 |
| 2. VYBRANÉ ZPŮSOBY REALIZACE PROPOJOVACÍCH STRUKTUR | 7 |
| 2.1 SÍTOTISK A ŠABLONOVÝ TISK | 7 |
| 2.2 SUBSTRAKTIVNÍ A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE | 7 |
| 3. ZPŮSOBY PŘIPOJOVÁNÍ ČIPU DO OBVODU | 9 |
| 3.1 PŘIPOJOVÁNÍ MIKRODRÁTKY (WIRE-BONDING) | 9 |
| 3.2 TECHNIKA TAB..... | 9 |
| 3.3 TECHNIKA FLIP CHIP | 10 |
| 3.3.1 Substráty používané pro flip chip..... | 11 |
| 4. PROBLEMATIKA NÁVRHU POUZDER | 13 |
| 4.1 TEPLOTNÍ POŽADAVKY A OMEZENÍ..... | 13 |
| 4.2 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI..... | 15 |
| 4.2.1 Postup návrhu integrovaného systému..... | 15 |
| 5. IZOLAČNÍ ODPOR A JEHO MĚŘENÍ | 17 |
| 5.1 JEV ELEKTROMIGRACE | 17 |
| 5.2 ELEKTROCHEMICKÁ KOROZE..... | 18 |
| 5.2.1 Typy koroze | 19 |
| 5.3 POVRCHOVÝ IZOLAČNÍ ODPOR (SIR) | 19 |
| 5.3.1 Tavidlo | 19 |
| 5.3.2 Pájecí pasta..... | 20 |
| 5.3.3 Měření povrchového izolačního odporu | 21 |
| 5.3.3.1 Měřicí standardy | 22 |
| 5.3.3.2 Metoda pro měření SIR substrátu..... | 23 |
| 5.3.3.3 Metoda pro měření SIR tavidel | 23 |
| 6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 25 |
| 6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH PARAMETRY | 25 |
| 6.1.1 Vodivá pasta ESL Cermet Silver\Palladium Conductor 9695-G | 25 |
| 6.1.2 Dielektrická pasta ESL 4917..... | 26 |
| 6.1.3 Nepájivá maska ImagecureSmart XV501T-4 | 26 |
| 6.1.4 Parametry použitých pájecích past | 27 |
| 6.2 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍCH STRUKTUR | 27 |
| 6.3 ROZVRŽENÍ EXPERIMENTU | 34 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 6.4 | NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY NAVRŽENÝCH STRUKTUR..... | 36 |
| 6.4.1 | <i>Výsledky pro struktury realizované na keramickém substrátu.....</i> | 36 |
| 6.4.1.1 | Výsledky pro pájecí pastu COBAR SAC3-XF3 | 36 |
| 6.4.1.2 | Výsledky pro pájecí pastu COBAR BI58-XM5S..... | 37 |
| 6.4.1.3 | Výsledky pro pájecí pastu Kester EM907..... | 38 |
| 6.4.1.4 | Výsledky pro pájecí pastu Kester R256 | 39 |
| 6.4.2 | <i>Výsledky pro struktury realizované na DPS.....</i> | 40 |
| 6.4.2.1 | Výsledky pro pájecí pastu Kester EM907..... | 40 |
| 6.4.2.2 | Výsledky pro pájecí pastu Kester R256 | 41 |
| 6.4.3 | <i>Zhodnocení výsledků měření navržených struktur</i> | 42 |
| 7. | ZÁVĚR..... | 44 |
| 8. | POUŽITÉ ZDROJE..... | 46 |

1. ÚVOD

Testování povrchového izolačního odporu se v elektronickém průmyslu provádí již od výroby prvních tranzistorů a prvních desek plošných spojů. Toto testování se realizuje v praxi ze tří hlavních důvodů. Prvním důvodem, proč se izolační odpor měří, je ověření způsobilosti a kvality hotových výrobků, jež musí odpovídat příslušným normám. Dále se používá také pro vyhodnocení a kontrolu výrobních procesů, zda jsou dodrženy příslušné postupy. Třetím důvodem je kontrola a porovnávání materiálů používaných při konstrukci produktu. Testování povrchového izolačního odporu je tedy velmi účinným nástrojem, který používají elektroničtí výrobci při kontrole a případném přizpůsobování se inovačním změnám ve výrobních procesech, použitých materiálech a výrobních zařízeních.

S testem povrchového izolačního odporu se setkáváme například v každé diskuzi o tavidlech, způsobech pájení i procesech čištění, neboť zde mohou vznikat zbytkové nečistoty, které na substrátu nebo struktuře zůstávají i po výrobních procesech. Nečistoty na povrchu materiálu totiž zvyšují celkový ztrátový proud (a tedy snižují povrchový izolační odpor), což má ve většině případů negativní efekt na funkci elektrických obvodů, obzvlášť jestliže se pracovní proudy pohybují na nižších hodnotách.

První část této práce se po úvodu do problematiky zabývá vlivy, které působí na povrchový izolační odpor struktur a také způsoby měření tohoto odporu. Je zde také okrajově nastíněna problematika návrhu elektronických pouzder, a způsobů, kterými lze připojit mikroelektronický čip do obvodu.

V druhé části, experimentální, se pak práce zabývá konkrétním návrhem testovací struktury typu flip-chip pro měření povrchového izolačního odporu. Následně jsou zjišťovány vlivy materiálů použitých při konstrukci a realizaci elektronických struktur, na povrchový izolační odpor.

2. VYBRANÉ ZPŮSOBY REALIZACE PROPOJOVACÍCH STRUKTUR

2.1 SÍTOTISK A ŠABLONOVÝ TISK

Sítotisk je základní technologií vytváření tlustých vrstev. Spočívá v protlačení tixotropní pasty přes síto na podložku pomocí speciální stěrky. Podložka je umístěna pod sítem, jež je upevněno v držáku a je vakuově uchycena, aby nedošlo k jejímu pohybu při samotném sítotisku. Na sítu bývá požadovaný motiv vytvořen fotocestou. Vzdálenost, ve které je síto umístěno nad podložkou definujeme jako odtrh. Zpravidla jde o vzdálenost 0,6 – 1 mm. Odtrh je jedním z hlavních faktorů, jež určují kvalitu natištěného obrazce. Po uchycení síta a podložky je třeba nanést potřebné množství pájecí pasty na síto. Následně se začne stěrka pohybovat po sítu určitou konstantní rychlostí za určité konstantní síly a tím protlačí pastu přes síto. Ta se v důsledku svých reologických vlastností přenesení na podložku a dochází k odskoku síta do své původní polohy. Tímto způsobem je přenesen požadovaný motiv na substrát. Stěrka musí být na jednu stranu odolná proti oděru, ale nesmí výrazně otírat sítku. Nejčastějším materiálem použitým pro výrobu stěrek je silikonová pryž.

Hlavní rozdíl mezi sítotiskem a šablonotiskem spočívá v tom, že při šablonotisku leží šablona přímo na substrátu. Nejčastěji bývá vyrobena v kovové nebo plastové variantě. [1]

2.2 SUBTRAKTIVNÍ A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Subtraktivní technologií se rozumí postup, kdy je na měděnou fólii vytvořen motiv krytý leptuodolnou vrstvou. Poté se tato měděná fólie vyleptá. Touto technologií lze vyrábět všechny druhy desek plošných spojů. Existuje mnoho modifikací této technologie, které se zpravidla liší způsobem zesílení vodivých motivů i druhem leptuodolného rezistu.

Hlavními typy subtraktivních technologií jsou pattern plating a panel plating. U technologie pattern plating se u materiálu plátovaného měděnou fólií galvanicky zesílí mědí vodivé cesty i otvory, které jsou poté pokoveny cínovým, případně cín-olovnatým fotorezistem. Po expozici, vyvolání fotorezistu a jeho odstripování je odhalená měď leptána. Tato technologie je nejrozšířenější.

U technologie panel plating je plátovaný materiál galvanicky zesílen mědí na celém svém povrchu, včetně otvorů. Po pokovení fotorezistem a jeho expozici a vyvolání zůstanou otvory a vodivé cesty pokryty fotorezistem, který zde slouží jako leptuodolná vrstva.

U aditivních technologií výroby desek plošných spojů se vodivé cesty i pokovení otvorů vytvoří jen chemickou mědí, bez procesu leptání či sítotisku. Poté co je základní materiál katalyticky upraven pro uchycení chemické mědi, je nalaminován fotorezist. Po jeho laminaci je nanese chemická měď a fotorezist je odstraněn. Na závěr celého postupu se tiskne polymerní stínící vrstva na bázi mědi nebo niklu a vodivý inkoust na bázi grafitu, který se poté vytvrdí v peci, čímž se získají požadované vodivé vlastnosti. [2]

3. ZPŮSOBY PŘIPOJOVÁNÍ ČIPU DO OBVODU

3.1 PŘIPOJOVÁNÍ MIKRODRÁTKY (WIRE-BONDING)

Tato technika je nejrozšířenějším způsobem, kterým se vytváří propojení mezi čipy a deskou plošných spojů. Připojování mikrodrátky je také považováno za nejvíce cenově dostupnou a flexibilní technologii. Tato technika je znázorněna na obrázku 3.2.

Mikrodrátky jsou obvykle vyrobeny z jednoho z těchto materiálů:

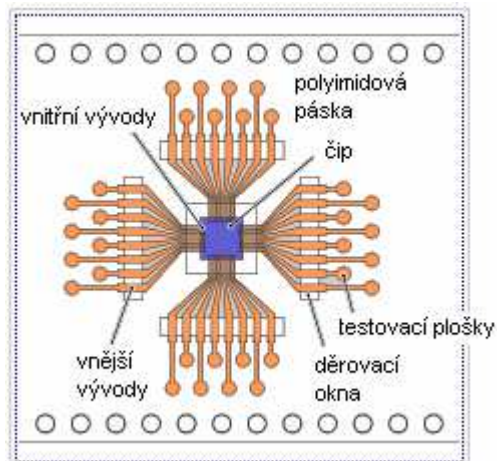
- zlato (Au)
- měď (Cu)
- hliník (Al)

Připojování mikrodrátky je prováděno třemi základními technologiemi: [4]

- termokompresní svařování (Au mikrodrátek)
- ultrazvukové svařování (AlSi mikrodrátek)
- termosonické svařování (Au a Cu mikrodrátek)

3.2 TECHNIKA TAB

Technika TAB (Tape Automated Bonding) je technika přímé montáže čipu na desku plošného spoje. Základem této techniky je tenká polyamidová fólie do níž jsou vyraženy otvory. Obvykle je ve tvaru pásu. Posléze se pokryje vrstvou Cu fólie a vyleptají se přívody, které jsou pokryty vrstvou Sn. Další krok spočívá v nakontaktování polovodičového čipu, který je poté testován. Pro připojení slouží testovací plošky. Na závěr se čip zapouzdří vrstvou pryskyřice, odstřihne se z polyamidového pásu a nalepí na základní desku. Pocínované přívody se připájejí speciálním nástrojem.[5] Přehledně je tato technika znázorněna na obrázku 3.1.



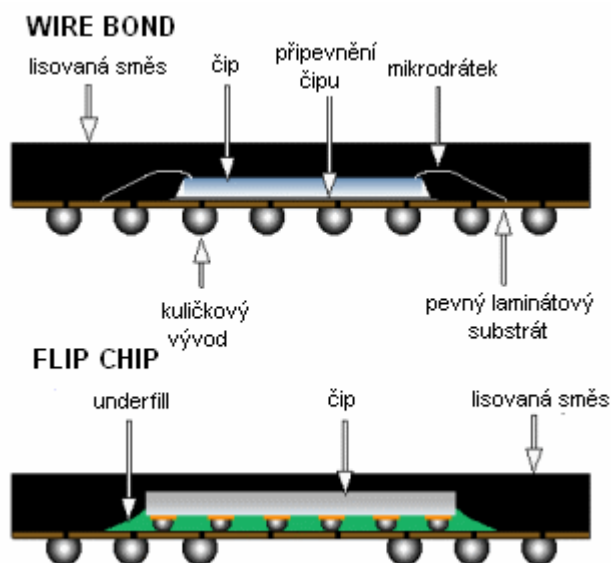
Obr. 3.1: Technika TAB [6]

3.3 TECHNIKA FLIP CHIP

Tato technika spočívá v propojení vývodů holého polovodičového čipu na substrát nebo do standardizovaného pouzdra (BGA, CSP), kdy čip je otočen svou aktivní stranou směrem dolů k substrátu. Odlišuje se tak od ostatních metod kontaktování, kdy je strana s kontaktními ploškami otočena směrem nahoru, což má za následek potřebu dodatečného připojení čipu do obvodu. Vývody u flip-chip jsou tedy na spodní straně čipu, mohou být realizovány pomocí kuličkových nebo sloupcových vývodů. [7] Pokud je nezapouzdřený čip nakontaktován přímo na nosný substrát jedná se o metodu přímého připojení, které je označováno FCOB (Flip chip on board). Při použití této techniky je vhodné, aby byl prostor mezi vývody čipu a substrátem vyplněn dielektrickým organickým materiálem, který dopomůže ke správné fixaci čipu k substrátu. Tento materiál se nazývá underfill.[8] Porovnání technik wire-bonding a flip-chip je přehledně znázorněno na obrázku 3.2.

Provedení kontaktu souvisí se způsobem montáže na substrát a může být realizováno:

- pájením na předem nanesenou pastu
- přetavením vývodů bez aplikace pájecí pasty
- připojení pomocí vodivého lepidla
- přímým spojením termokompresí



Obr. 3.2: Technika Wire bonding a Flip Chip [9]

3.3.1 Substráty používané pro flip chip

První flip chipy byly keramické a z hlediska výkonosti a také lehké montáže je tento materiál pro jejich výrobu stále používán. Během devadesátých let se velmi rozšířilo použití organických substrátů pro mnoho flip chipů, především u těch s menším počtem vývodů. Nicméně s přechodem na organické substráty se kvůli jejich poměrně vysoké tepelné roztažnosti objevil problém se značnou termomechanickou nesouhlasností takových struktur. Z toho důvodu se zde používá underfill, který dostatečně snižuje namáhání pájených spojů a umožňuje tak struktuře zachovat si dobrou spolehlivost.

Keramické substráty pro flip chip poskytují dvě hlavní výhody. Mají nízkou tepelnou roztažnost (CTE), takže je zde velmi malá termomechanická nesouhlasnost mezi substrátem a čipem. To znamená, že zde není nutno použít underfill, především u malých struktur. Druhou velkou výhodou keramiky je její vysoká teplotní stabilita a také výborná tepelná vodivost. [18]

V tabulce 3.1 jsou uvedeny tepelné vodivosti a hodnoty tepelných roztažností pro vybrané materiály používané v mikroelektronice.

Tab.3.1: Srovnání tepelných vodivostí a TCE různých materiálů

| Typ materiálu | λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹] | TCE[10 ⁻⁶ K ⁻¹] |
|--------------------|---|--|
| Cu | 400 | 18 |
| Si | 80 | 5 |
| Pájka Sn62Pb37 | 50 | 25 |
| Korundová keramika | 35 | 8 |
| Vodivé lepidlo | 5 | 30 |
| Sklolaminát FR4 | 0,2 | 14 |
| Aramid+epoxid | 0,2 | 8 |

4. PROBLEMATIKA NÁVRHU POUZDER

S každým krokem na cestě za lepší výkonností daného systému, technologie integrovaných obvodů hraje hlavní roli, zatímco technologie pouzdření se snaží udržet tempo s tímto vývojem. Jestliže máme určitý čip, není žádný způsob jak by mohlo pouzdro zlepšit jeho vlastnosti více než je potenciál daného čipu. V tomto smyslu pouzdro nepřidává produktu žádnou hodnotu. Může pouze zvýšit velikost systému, snížit rychlost čipu a zvýšit celkovou cenu systému. Z pohledu perspektivy pouzdření není otázkou, zda bude pouzdro zhoršovat vlastnosti systému, otázkou je do jaké míry jeho vlastnosti zhorší (cenu, velikost a rychlost systému) a jak tento negativní dopad udržet na přijatelné úrovni. [10]

Výběr pouzdra pro čip závisí na:

- velikosti čipu a počtu vodivých plošek
- ztrátovém výkonu a na vedení tepla
- hodinové frekvenci, šířce pásma, elektrickém šumu
- požadované mechanické spolehlivosti
- ceně

Čím méně je schopno pouzdro splnit tyto požadavky, tím více ovlivňuje hodinovou frekvenci, omezuje funkčnost vstupů a výstupů a zvyšuje energii potřebnou k napájení systému. Cílem výběru vhodné pouzdřicí technologie je minimalizovat tyto efekty. [10]

4.1 TEPLOTNÍ POŽADAVKY A OMEZENÍ

Teplotní rozdíl mezi zařízeními a okolním prostředím způsobuje proudění tepla pryč ze systému. Čím větší je teplotní rozdíl, tím více tepla je odváděno do okolí. Maximální teplota přechodu zařízení je dosažena, když je teplo proudící do okolí schopno „držet krok“ s energií produkovanou přechodem. Obor teplotního managementu rozhoduje jaká tato teplota bude.

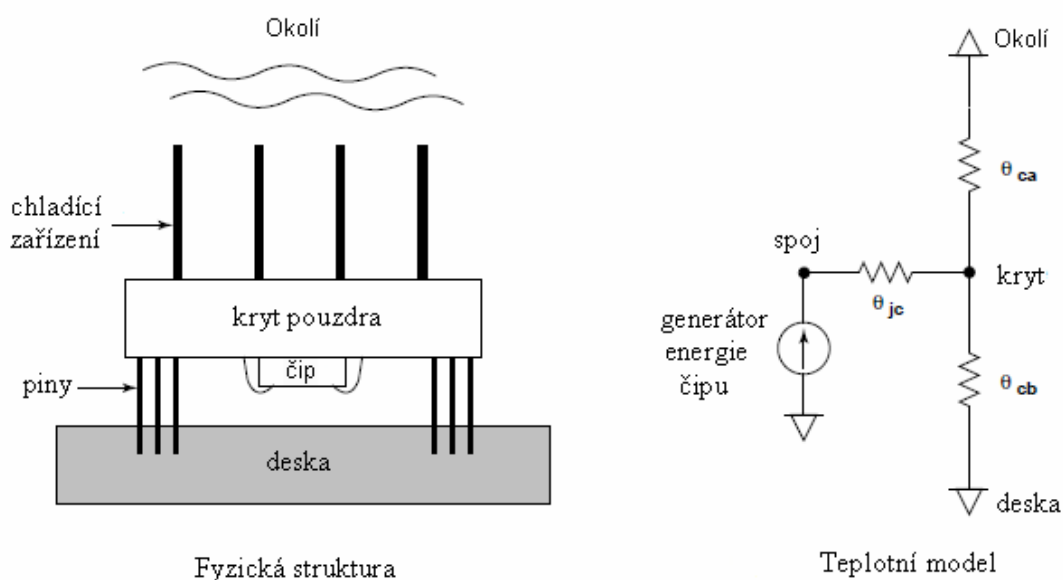
Se zvýšením teploty přechodu úzce souvisí spolehlivost a snížení rychlosti systému. V zásadě všechny poruchové mechanismy mají určitou spouštěcí energii, která může být dosažena pokud teplota přechodu stoupá.

Jestliže chceme popsat jak je teplo odváděno z čipu, je vhodné rozdělit cestu na dvě části; cesta ze spoje do krytu pouzdra, která je většinou nazývána vnitřní cestou a cesta z krytu pouzdra do okolí, která bývá nazývána vnější cestou.

Vnitřní cesta bývá většinou v části, která je v přímém kontaktu s podložkou, v které je tepelný proud převážně v jedné velikosti, a pak také v oblasti se zdrojem tohoto tepla, kde může dominovat druhotný proud. V zásadě je oblast této vnitřní cesty charakterizována vlastnostmi vnitřního materiálu a jeho rozměry. Zdroj tohoto tepla je jakýkoliv tlustý, tepelně vodivý kov. Dá se říci, že většina tepelného proudu prochází skrz tloušťku tohoto kovu. Důsledkem toho je zvětšování oblasti, přes kterou teplo proudí z krytu pouzdra do okolí.

Vnější cesta je ovládána mechanismem, který převádí teplo do okolního prostředí. Tím může být například chladič nebo větrák zajišťující proudění vzduchu. Hlavně pro chlazení vzduchem závisí schopnost odvodu tepla ze systému na vnějších vlastnostech pouzdra a větráku, který musí být schopen odvádět velké množství vzduchu. Teplotní odpor této vnější cesty je většinou empiricky charakterizován. [10]

Na následujícím obrázku je zobrazen příklad převodu mikroelektronické struktury na její teplotní model.



Obr. 4.1: Teplotní model pouzdra [10]

Vnitřní cesta: θ_{jc} = teplotní odpor ze spoje do krytu

Vnější cesta: θ_{cb} = teplotní odpor z krytu do desky

θ_{ca} = teplotní odpor z krytu do okolí

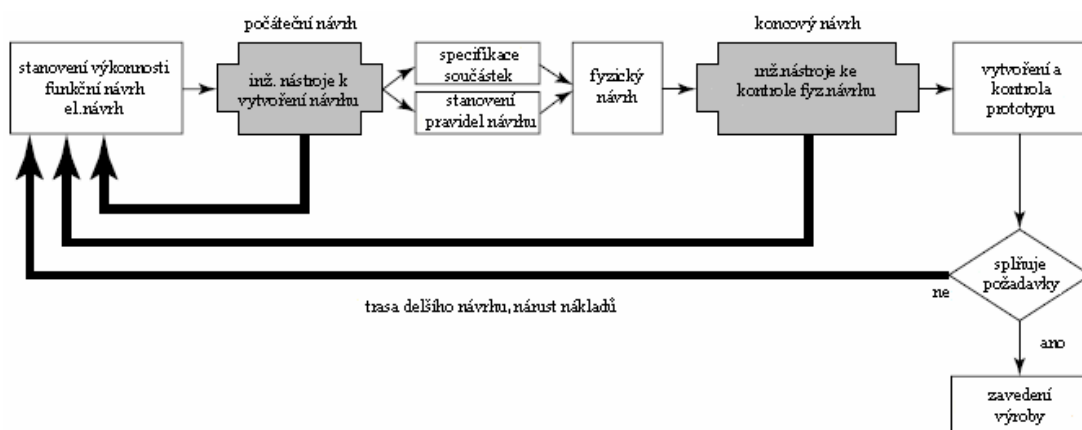
4.2 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

Propojovací systém vždy zhoršuje kvalitu signálu mezi zařízeními. Konstrukteři považují elektronické pouzdro za systém složený ze dvou komponent. Tou první je propojení, druhou pak parazitní signálové cesty. Pokovení čipu, pouzření a propojení mohou vytvářet parazitní kapacitu, odpor a indukčnost a mohou také deformovat vlnové signály přicházející z uzlů.

Při vytváření propojovacího systému s velkou rychlostí je především nutné co nejvíce omezit škodlivý vliv pouzder a propojení. Na nízkých frekvencích jsou propojení zřetelná, takže zde nejsou zavedena žádná zvláštní pravidla pro jejich tvorbu. Pokud ovšem integrovaný obvod pracuje na vysokých frekvencích a tvorbě propojení není věnována dostatečná péče, obvod nemusí správně fungovat kvůli jednomu nebo více jevům, které mohou nastat (překročená hranice šumu, zpožděné šíření signálu,...). [10]

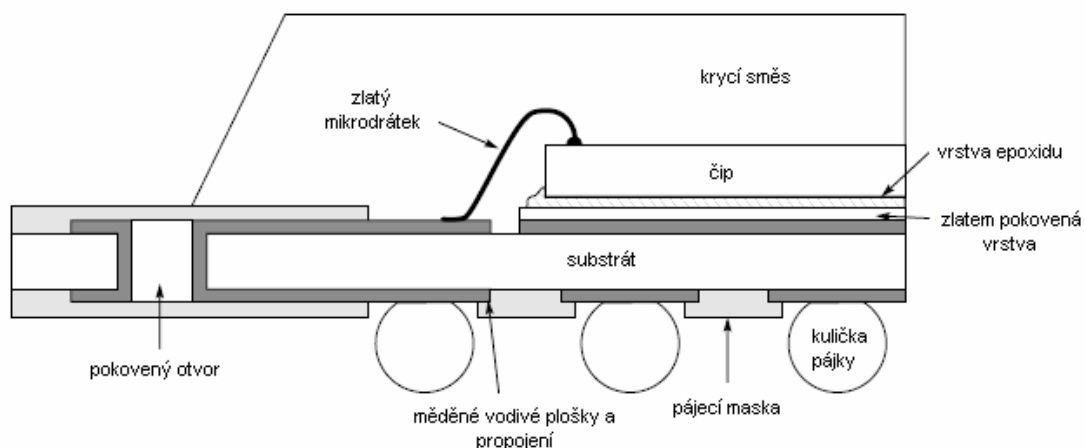
4.2.1 Postup návrhu integrovaného systému

V systémech kde jsou propojení dobře přehledná, bývá používán typický postup návrhu. Navržení systému-sestavení-testování-případné opravy. Tento jednoduchý postup bohužel nemůže být aplikován na vysokorychlostní systémy z důvodů uvedených výše. Způsob postupu návrhu takových systémů je uveden na obrázku 4.2. Elektrické efekty propojovacího systému jsou zde začleněny do dvou fází návrhu. V první počáteční fázi jsou vytvořeny pravidla návrhu, v druhé koncové fázi se tyto pravidla kontrolují a testují. Oba tyto kroky se spoléhají především na dva počítačové simulační nástroje. [10]

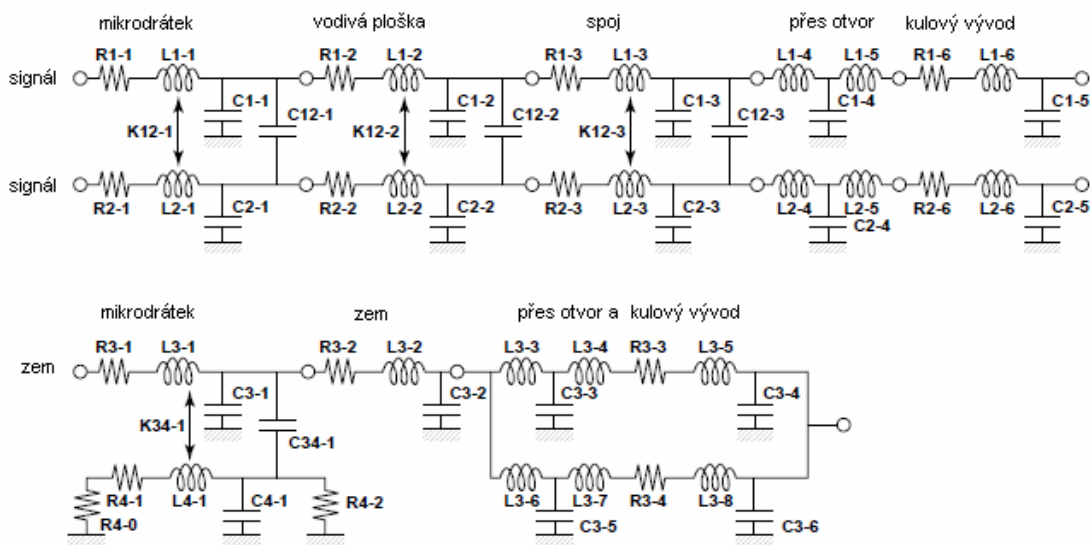


Obr. 4.2: Postup návrhu integrovaného systému[10]

První, obvykle uveden jako elektromagnetický modelovací nástroj, převádí fyzické geometrické struktury a materiálové vlastnosti do ekvivalentních prvků elektrických obvodů. Například, pouzdro s kontaktními plochami a drátovými propojeními může být převedeno do RLC prvků. Na obrázku 4.3. je uvedeno pouzdro BGA od firmy Motorola, na obrázku 4.4. je znázorněno jeho náhradní elektrické schéma. [10]



Obr. 4.3: Pouzdro BGA firmy Motorola [10]



Obr. 4.4: Ekvivalentní schéma pro pouzdro BGA od firmy Motorola [10]

Druhým nástrojem, který simuluje průběhy napětí a proudů odpovídajícím dění na čipu je nejčastěji program SPICE. Tento program dokáže přesně předpovědět výkon vybraného obvodu.

5. IZOLAČNÍ ODPOR A JEHO MĚŘENÍ

Důležitou vlastností, která je velmi podstatná u pouzder citlivých analogových obvodů, je izolační odpor mezi jednotlivými vodivými cestami. U pouzder založených na souboru vývodů (leadframe) se jedná o svod mezi dvěma blízkými signálovými vodiči, 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 vodiči.

U pouzder se projevuje povrchová vodivost substrátu, na němž jsou vytvořeny, jež je dána vlhkostí působící na obvod při výrobním procesu a nečistotami usazenými na jeho povrchu. Pokud bylo například v testovacím obvodu použito tavidlo, je jeho vliv také jevem, který se na povrchovém izolačním odporu substrátu projeví. [4]

5.1 JEV ELEKTROMIGRACE

Elektromigrace je jev, při kterém dochází k přenosu iontů vlivem přiloženého elektrického pole. Kladné ionty jsou přitom nesený k záporné elektrodě a záporné ionty zase ke kladné elektrodě. Tento jev tedy umožňuje vedení elektrického proudu elektrolytem.

Tento proud je nežádoucí tehdy, pokud je primární určení materiálu sloužícího jako elektrolyt právě izolační oddělení dvou míst s různými potenciály, fungujícími jako elektrody. Velikost tohoto proudu je [11]:

$$J = (U - E_{j,A} + E_{j,K}) / (L \cdot \rho), \quad (4)$$

kde

J proudová hustota (A/m^2)

U přiložené napětí (V)

$E_{j,A}$ přepětí anody (V)

$E_{j,K}$ přepětí katody (V)

L vzdálenost elektrod (m)

ρ měrný odpor elektrolytu (Ωm)

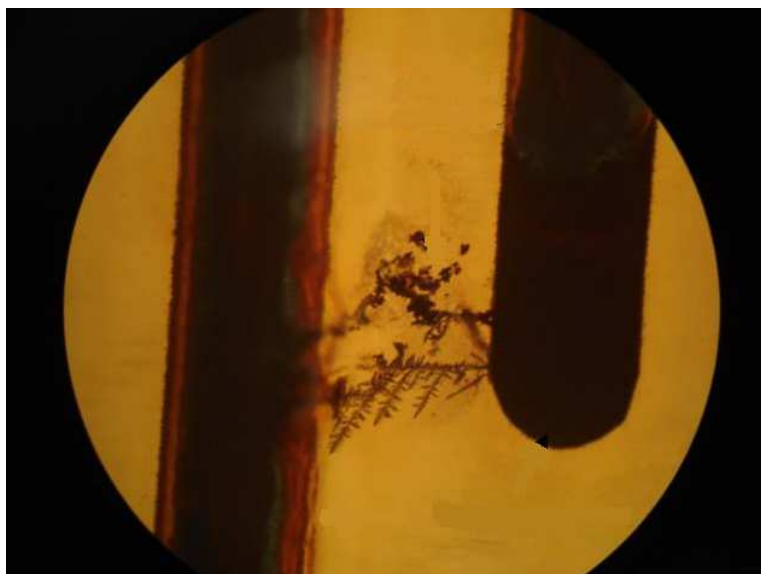
Je zřejmé, že elektrodové přepětí tvoří významnou složku celkového napětí a jako takové představuje důležitý parametr ovlivňující účinnost probíhajících dějů.

Podle jejich příčiny dělíme elektrodová přepětí do čtyř základních kategorií: [11]

- koncentrační přepětí, způsobené pomalým přenosem elektrického náboje přes mezifázové rozhraní.
- homogenní reakční přepětí, způsobené pomalou předřazenou chemickou reakcí v objemu elektrolytu.
- heterogenní reakční přepětí, způsobené pomalou chemickou reakcí probíhající na povrchu elektrody.
- přenosové přepětí, způsobené pomalým přenosem elektrického náboje přes mezifázové rozhraní.

5.2 ELEKTROCHEMICKÁ KOROZE

Chloridy a ostatní halogenidy vyskytující se především v tavidlech často vytvářejí kyselinové roztoky, které narušují kovový povrch. Čím větší je koncentrace halogenidů, tím silnější tyto kyselinové roztoky jsou. Tyto kyselinové elektrolytické roztoky rozežirají kovové materiály jako měděné a cínové vodivé cesty a plošky. Působením napětí se urychluje korozivní proces a uvolňují se ionty z kovů. Ionty obsažené v roztoku poté vytváří vodivé dendrity na povrchu materiálu anebo vodivé soli jako chlorid měďnatý a síran měďnatý. Tyto dendrity a vodivé soli snižují povrchový izolační odpor a jejich následkem jsou zkraty v obvodu a ztrátový proud. [13] Příklad růstu dendritů mezi vodivými cestami je uveden na obrázku 5.1.



Obr.5.1:Růst dendritů mezi vodivými cestami [12]

5.2.1 Typy koroze

Koroze kovu se může projevovat různými způsoby, jež závisí na vlastnostech kovu a složení prostředí, ve kterém se kov vyskytuje. Hovoříme pak o různých typech koroze a podle charakteristických projevů je rozdělujeme do dvou skupin: [2]

Koroze rovnoměrná – projevuje se stejnosměrným úbytkem kovu po celém povrchu. Tento druh koroze je nejrozšířenější.

Koroze nerovnoměrná – projevuje se napadením pouze určité části povrchu nebo i vnitřku kovu. Může být důlková, bodová, laminární, mezikrystalová a transkrystalová.

5.3 POVRCHOVÝ IZOLAČNÍ ODPOR (SIR)

Nejdůležitější vliv na povrchovou vodivost izolantů má voda, která se na jejich povrchu zachytí. Ke značnému zvýšení povrchové vodivosti stačí i tenký vodní film. Tloušťka tohoto filmu je závislá především na vlastnostech materiálu, proto je tato vlastnost posuzována pro každý materiál zvlášť. [4]

Co vlastně znamená měření izolačního odporu? Obecně řečeno, do obvodu se zavádí napětí (zpravidla vysoce regulovatelný, stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí) přes dielektrikum, přičemž se měří množství proudu protékající přes toto dielektrikum. Následně se odpor vypočítá jednoduše pomocí Ohmova zákona. Proud, který prochází přes dielektrikum, se nazývá ztrátový proud. Může to být například 1 pA, ale i to je stále proud, který je nutno brát v úvahu. Čím větší napětí bude v obvodu, tím větší bude tento ztrátový proud. Ztrátový proud nepoškozuje kvalitní izolaci, nicméně u horší izolace může být skutečným problémem. [17]

5.3.1 Tavidlo

Hlavním účelem tavidla je pomáhat při odstranění kovových oxidů, nečistot z pájitelných povrchů a také jej chránit proti oxidaci během procesu pájení. Pokud struktura není po výrobě náležitě očištěna od tavidla, může časem dojít k její korozi. Jestliže je do takové struktury přiveden proud, kovové ionty se vysráží podél siločar elektromagnetického pole a vytvoří dendritové zkraty. Přítomnost těchto residuí může také změnit izolační

vlastnosti struktury, ovlivnit přilnavost pouzdra nebo se dostat do kontaktu s pohyblivými částmi struktury. [17]

Pro správnou volbu čistících prostředků je třeba znát množství a počet tavidlových residuí, jež se zachytí na povrchu materiálu. Složení čistících prostředků tedy závisí na složení tavidla.

Tavidla jsou posuzována podle jejich aktivační úrovně a zbytků, které zanechávají na materiálu po procesu pájení. Aktivační úroveň tavidla určuje jeho schopnost vyčištění (odstranění oxidu a matnosti) z pájitelných povrchů. Dříve byla aktivace tavidla dosažena přidáním halidů. Residua zanechaná po takových tavidlech jsou ale velmi korozivní a je tedy důležitá jejich koncentrace. Přidáním slabé organické kyseliny je dosažena méně agresivní aktivace tavidla. Aktivační úroveň je tedy popisována podle toho, jestli tavidlo obsahuje halidy nebo ne (0 nebo 1) a také množstvím residuí (L=nízké, M=střední, H=vysoké).

Tavidla, jež mají nízký obsah solidů a residuí jsou označována jako „no clean“. Tyto tavidla jsou navržena tak, aby zanechala na materiálu pouze nepatrné množství residuí, která mohou, ale nemusí být očištěna. Obvykle mají nízké (L) nebo střední (M) aktivační úrovně. [2] Konkrétní značení tavidel podle základu tavidla a úrovně aktivace je uvedeno v tabulce 5.1.

Tab.5.1.: Členění tavidel dle ANSI J-STD-004[2]

| Základ tavidla | zkratka | úroveň aktivace | | | | | |
|-----------------------|----------------|-----------------|--------|------------|------------|------------|------------|
| | | L0 (0) | L1 (0) | M0 (0,5-2) | M1 (0,5-2) | H0 (nad 2) | H1 (nad 2) |
| přírodní pryskyřice | RO - ROSIN | A | B | C | D | E | F |
| syntetické pryskyřice | RE - RESIN | G | H | I | J | K | L |
| organické kyseliny | OR - ORGANIC | M | N | P | Q | R | S |
| anorganické kyseliny | IN - INORGANIC | T | U | V | W | X | Y |

5.3.2 Pájecí pasta

Pájecí pasta je homogenní směs, která se skládá z práškovité pájky a tavidlového nosiče. Pájka většinou tvoří 65-96% celkové hmotnosti pasty. Tavidlovými nosiči se rozumí gelová tavidla, aktivátory, rozpouštědla a reologické modifikátory.

Prášková pájka je charakterizována typem pájecí slitiny a dále tvarem a velikostí částic. Má hlavní podíl na tvaru smáčecí charakteristiky, tiskových vlastnostech a předurčuje teplotu tavení.

Pájecí pasta se nanáší dávkovačem (viskozita 200-450 Pa.s), sítotiskem (viskozita 400-700 Pa.s) a šablonovým tiskem (viskozita 600-1000 Pa.s). [2]

5.3.3 Měření povrchového izolačního odporu

Cílem testování povrchového izolačního odporu je zjistit, jestli je materiál použitý ve výrobě náchylný na tvorbu neakceptovatelných elektrochemických poruchových mechanismů, jako jsou koroze kovů nebo svody způsobené vlhkostí na povrchu materiálu.

Třemi faktory, jejichž přítomnost je pro vznik poruchových mechanismů nezbytná jsou: [4]

- elektrický potenciál
- vlhkost
- ionická residua

Výsledky měření povrchového izolačního odporu mohou být použity pro různé účely, například pro:[12]

- klasifikace tavidel
- kvalifikaci tavidel a past
- vylepšení čistícího procesu
- kvalifikaci a porovnání materiálů pro ochranné vrstvy
- porovnání čistících materiálů
- porovnání tavidlových materiálů
- kvalifikaci čistoty holé desky

K měření izolačního odporu se používá přístroj speciálně k tomu určený. Jedná se v podstatě o přenosný ohmmetr se zabudovaným generátorem vytvářejícím vysoké stejnosměrné napětí. Toto napětí (obvykle 500V a více) způsobuje tok malého proudu na povrchu izolační vrstvy. Přístroj poskytuje přímý údaj o hodnotě izolačního odporu v ohmech (megaohmech).

Při provádění měření je důležité zachovat určitou stálost prostředí, protože i tak se elektrická izolace v průběhu testu nevyhne určitým nahodilým reakcím ať už je kvalitní či ne. Pro vyhodnocení výsledků daného obvodu je tedy potřeba provést několik měření za co

nejpodobnějších podmínek. Naměřené hodnoty se také v průběhu času mění. To je způsobeno určitou kapacitou, kterou izolační materiál vykazuje a tak se bude v průběhu testu nabíjet.

Izolační odpor je citlivý na teplotu. S přibývajícím teplotou izolační odpor klesá a naopak. Obecným pravidlem je, že izolační odpor se mění násobkem 1 nebo 2 za každých 10 °C. Takže k porovnání starých výsledků s novými je potřeba „upravit“ naměřené hodnoty na určitou výchozí teplotu.

Testování izolačního odporu určuje korozivní efekt tavidel, pouzdření a čisticích materiálů. Taktéž charakterizuje odolnost materiálu k vytváření zkratů v obvodu. Obvykle je používáno, jestliže došlo ke změně čisticích materiálů nebo složení tavidla. [17]

5.3.3.1 Měřící standardy

Existuje několik průmyslových standardů vyvinutých firmami IPC, Bellcore a JIS (Japanese Industrial Standards) používaných ke klasifikaci tavidel, jejich zbytků a materiálů pro ochranné vrstvy. Použité standardy, testovací podmínky a návrh pro testovací metodu jsou závislé na testovaném materiálu. V tabulce 5.2. je přehled typických použití pro nejpobulárnější testové návrhy. [13]

Tab.5.2: Nejběžnější návrhy metod testování SIR [13]

| popis | testované materiály | poznámka |
|---|---|--|
| IPC-B-24 | tekutá tavidla, pájecí pasty mat.pro ochranné vrstvy | použitelné pro pájení vlnou |
| IPC-B-36 | tavidla, pasty, čisticí materiály, čisticí procesy | dobré pro hodnocení způsobnosti procesu |
| IPC-B-25 IPC-B-25A | pájecí masky a ochranné vrstvy pájecích masek | |
| testovací návrh Bellcore | tavidla, pasty, čisticí materiály, čisticí procesy | |
| nízké zbytky pájení rychlý test pojivo | tavidla, pasty | poskytuje data pro vysoce spolehlivé no-clean aplikace |

5.3.3.2 Metoda pro měření SIR substrátu

Pro testování se používá testovací vzorek kruhového tvaru, který se vystavuje specifickým podmínkám jako jsou teplota, vlhkost a další.

Měrný povrchový odpor (ρ_p) se zpravidla měří megaohmetrem při napětí 500V mezikruhově realizovanými elektrodami. Jednoduché schéma takového měření je zobrazeno na obrázku 5.2.

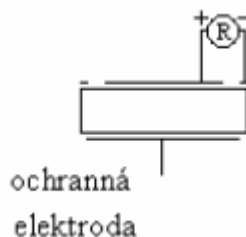
Poté se tento odpor vypočítá pomocí následujícího vzorce: [14]

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{O}{l} \quad (5)$$

kde R_p změřený odpor

O obvod středního mezikruží

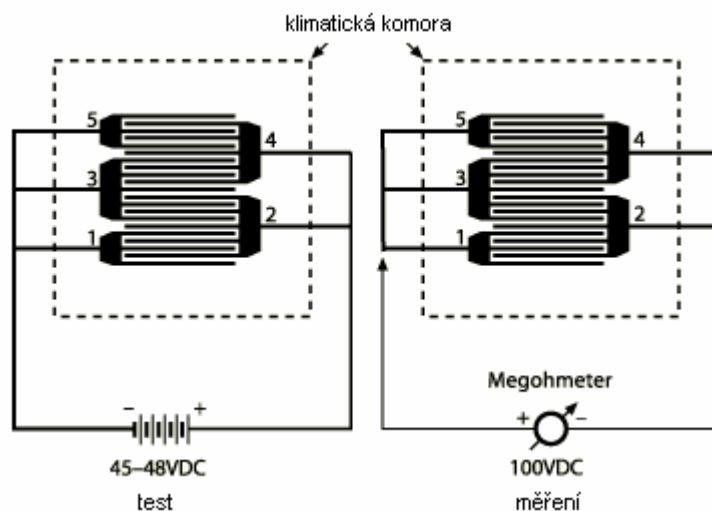
l šířka mezery



Obr. 5.2: Metoda měření povrchového izolačního odporu substrátu

5.3.3.3 Metoda pro měření SIR tavidel

S tímto testem se setkáváme pravidelně v každé diskuzi o tavidlech, pájecích a čistících procesech a tavidlových zbytcích z důvodu možného vzniku svodového proudu, který negativně ovlivňuje vlastnosti celého obvodu a mimo jiné zapříčiní klesnutí operačního proudu obvodu na nižší hodnoty. [15]



Obr. 5.3: Metoda měření povrchového izolačního odporu tavidel [15]

Na obrázku 5.3 je konkrétní příklad testování izolačního odporu substrátu na přítomnost tavidlových zbytků. Z důvodu zajištění maximální citlivosti testu je svodový proud měřen mezi dlouhými paralelně orientovanými vodiči v různých elektrických potenciálech. Na místo vytváření dlouhých a úzkých cest jsou obvykle používány elektricky ekvivalentní hřebínkové struktury.

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části této práce je vhodné navržení testovacích struktur typu Flip chip za účelem zjištění vlivu materiálů, použitých při jejich realizaci, na parazitní vodivost. Struktura bude vystavena působení tavidlových zbytků, prozkoumán bude i vliv jejich čištění na celkový izolační odpor mezery mezi vodiči.

6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH PARAMETRY

Struktury v experimentu byly zhotoveny z keramiky i organického materiálu FR4. Parametry těchto materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.1. Použité pájecí kuličky v tomto experimentu jsou bezolovnaté i olovnaté.

Bezolovnaté kuličky Senju #7097 d=0,76mm SAC405

Olovnaté kuličky SnPb d=0,76mm

6.1.1 Vodivá pasta ESL Cermet Silver\Palladium Conductor 9695-G

U keramických struktur byla pro zhotovení vodivého motivu použita vodivá pasta ESL 9695-G. Tato pasta se obvykle používá ve vícevrstvých strukturách, což je i náš případ, jelikož pasta bude z části překryta dielektrickou pastou. Vybrané hodnoty jejích parametrů jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tab.6.1: Parametry použité vodivé pasty

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| výrobce | ESL |
| označení | 9695-G |
| slitina | AgPd |
| viskozita | 225+-25 Pa.S |
| doba levellingu (při 20°C) | 5-10minut |
| Doba sušení (při125°C) | 10-15minut |
| teplota výpalu | 625-930°C |
| doba výpalu | 1hodina |

6.1.2 Dielektrická pasta ESL 4917

Tato pasta byla použita u keramických struktur z důvodu vymezení vodivé plošky pro osazení pájecích kuliček. Toto bylo provedeno z důvodu zamezení roztečení pájecí pasty a případně i kuliček mimo vymezený prostor. Dielektrická pasta také pomáhá k vytvoření správně vypadajícího kuličkového spoje. Její parametry jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab.6.2: Parametry použité dielektrické pasty

| | |
|-----------------------|-----------------|
| výrobce | ESL |
| označení | 4917 |
| materiál | nízkotavné sklo |
| viskozita | 250+-25 Pa.S |
| teplota výpalu | 850°C |
| doba výpalu | 10minut |

6.1.3 Nepájivá maska ImagecureSmart XV501T-4

U struktur se základním materiálem FR4 byla použita bílá fotocitlivá nepájivá maska ImagecureSmart XV501T-4. Její vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tab.6.3: Parametry použité nepájivé masky

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Viskozita | 14-18 Pa.S |
| Teplota vzplanutí | >70°C |
| Obsah netěkavých látek | 70,6% |
| Obsah VOC | 390-400g/l |
| Odolnost pájce | 30s @ 288°C |
| Iontová kontaminace | <0,3µg NaCl/cm ² |

6.1.4 Parametry použitých pájecích past

Při kompletaci struktur bylo potřeba nějakým způsobem zamezit odplavání a „cestování“ pájecích kuliček po substrátu při vlastním přetavení. Toto bylo provedeno jednak vymezením pájecích plošek dielektrickou vrstvou (u keramických struktur) nebo nepájívou maskou (u struktur s organickým FR4 substrátem), především pak ale použitím pájecích past, které byly na pájecí plošky natisknuty před osazením pájecích kuliček. Z tohoto hlediska se ukázalo být vhodnějším použití pájecí pasty na úkor pouze samotného tavidla, jelikož určité množství pájky v pájecí pastě zabezpečí zafixování kuličky na pájecí plošce. Parametry pájecích past použitých v experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tab.6.4: Parametry použitých pájecích past

| výrobce | cobar | cobar | kester | kester |
|-----------------|---------------------|---------------|---------------------|------------------|
| označení | SAC3-XF3 | BI58-XM5S | EM907 | R256 |
| pájecí slitina | Sn96,5 Ag3 Cu0,5 | Sn37,8 Bi52,2 | Sn96,5 Ag3 Cu0,5 | Sn62 Pb36 Ag2 |
| teplota pájení | 232-250 | 155-180 | 235-255 | 210-225 |
| teplota liquidu | 219 | 138 | 210 | 183 |
| teplota solidu | 217 | 120 | 208 | 180 |
| obsah slitiny | 88% | 88% | 88,50% | 90% |
| obsah tavidla | 12% | 12% | 11,50% | 10% |

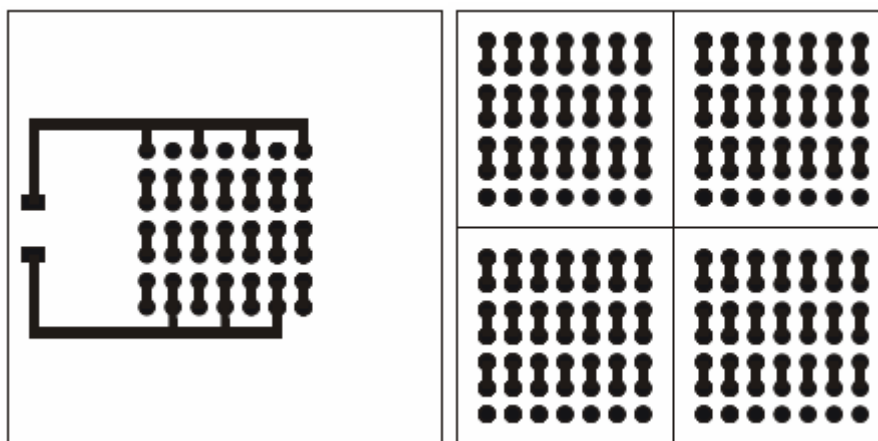
6.2 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍCH STRUKTUR

Jelikož cílem této práce je zkoumat izolační odpor u technologie Flip chip, skládá se testovací struktura jednak ze substrátu osazeného pájecími kuličkami a také z horní destičky, která na něj byla „přiložena“. Substrát je také opatřen vývody pro připojení měřicího přístroje.

Motiv testovací struktury byl zhotoven tak, aby co nejlepším způsobem umožnil zjišťovat vliv znečištění na izolační odpor vytvořených vodivých cest. Za účelem porovnání

materiálů byly zhotoveny struktury jak z korundové keramiky, tak i z organického materiálu FR4 za použití různých pájecích past a typů pájecích kuliček.

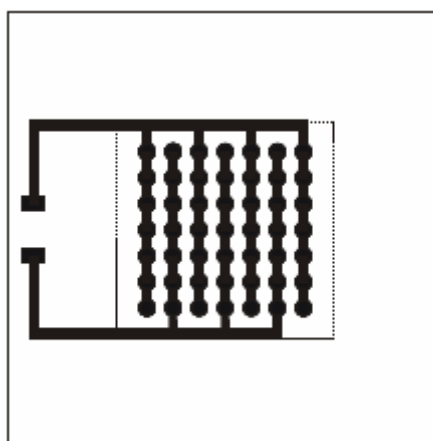
Návrh testovací struktury byl navržen v programu CorelDraw a jeho podoba pro substrát i horní destičku je zobrazena na obr.6.1.



Obr.6.1: Návrh vodivých motivů

Korundové substráty měly výchozí rozměry 50x50 mm a tak je zřejmé, že na jednom substrátu byly vytvořeny 4 horní destičky, které musely být posléze rozřezány za pomoci manuální řezačky s diamantovým hrotem.

Po osazení kuličkami a zapájení struktury tedy bude vypadat výsledný motiv tak , jak je zobrazen na obrázku 6.2.



Obr.6.2: Výsledný motiv struktury

V tabulce 6.5 jsou uvedeny rozměry jednotlivých prvků struktury.

Tab.6.5: Rozměry prvků struktury

| | rozměr [mm] |
|--|----------------|
| průměr vodivých plošek | 1,7 |
| šířka vodivých cest | 1 |
| rozteč vodivých plošek | 1,3 |
| rozteč vodivých cest | 2 |
| vzdálenost plošek od okraje | 2,65 |
| substrát s vývody pro měřicí přístroj | |
| šířka plošek | 2,5 |
| výška plošek | 1,5 |
| rozteč plošek | 4,5 |

Na korundovou keramiku byla realizována tlustovrstvá struktura sloužící jako testovací motiv metodou sítotisku na sítotiskovém poloautomatu Aurel Mod.C880 (obr.6.3). Vodivý motiv byl natisknut AgPd pastou ESL 9695-G obvykle používanou ve vícevrstvých strukturách. Vodivá pasta pro vícevrstvé struktury byla zvolena proto, že část vodivých plošek bude dodatečně překryta dielektrickou vrstvou.



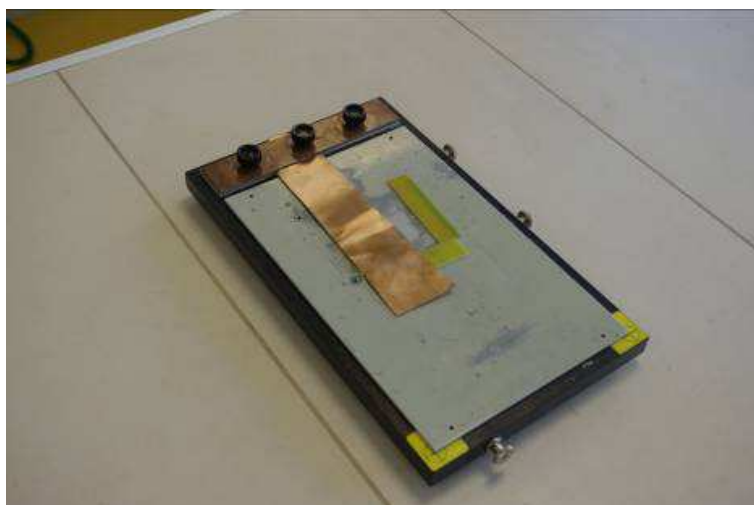
Obr.6.3: Sítotiskový poloautomat Aurel Mod.C880[16]

Substráty byly po natisknutí několik minut ponechány v klidu z důvodu rovnoměrného rozlití pájecí pasty, poté byly zasušeny a vypáleny. Vypalování proběhlo v in-line peci BTU BUCR1 (obr.6.4) přibližně 60minut za příslušné teploty. Následně byla natisknuta dielektrická vrstva pastou ESL 4917, která vymezila vodivou plochu pro vsazení pájecích kuliček. Postup tisku a výpalu této dielektrické pasty byl shodný jako postup při vytváření vodivé vrstvy.



Obr.6.4: In-line pec BUCR1 od firmy BTU[16]

Jelikož pájecí kuličky použité v tomto experimentu mají průměr 0,76mm, byly pájecí plošky zredukovány dielektrickou vrstvou na průměr 0,52mm, což je 70% průměru kuliček. Toto bylo provedeno z důvodu zamezení roztečení pájecí slitiny po vodivých ploškách. Kuličky byly vsazovány do pájecí pasty z důvodu zamezení jejich odplavání při přetavení. Pájecí pasta byla na vodivé plošky natisknuta metodou šablonového tisku. Vzhled aparatury i s použitou šablonou je znázorněn na obrázku 6.5.



Obr.6.5: Aparatura pro šablonový tisk

Po osazení substrátů kuličkami bylo nutno provést sesouhlasení motivů pro finální kompletaci struktury. Toto bylo provedeno na přístroji MikroPlacer od firmy Fritsch (obr.6.6). Tento přístroj umožňuje zobrazit překrývající se obrazce obou spojovaných povrchů a následně přesné osazení horní destičky vakuovou hlavou. Všechny struktury byly přetaveny na vyhřívané desce HP 100 SMD Heating-plate, zkráceně označované jako hot-plate, za teplot uvedených v datasheetech příslušných pájecích past.



Obr.6.6: Mikroplacer od firmy Fritsch[3]

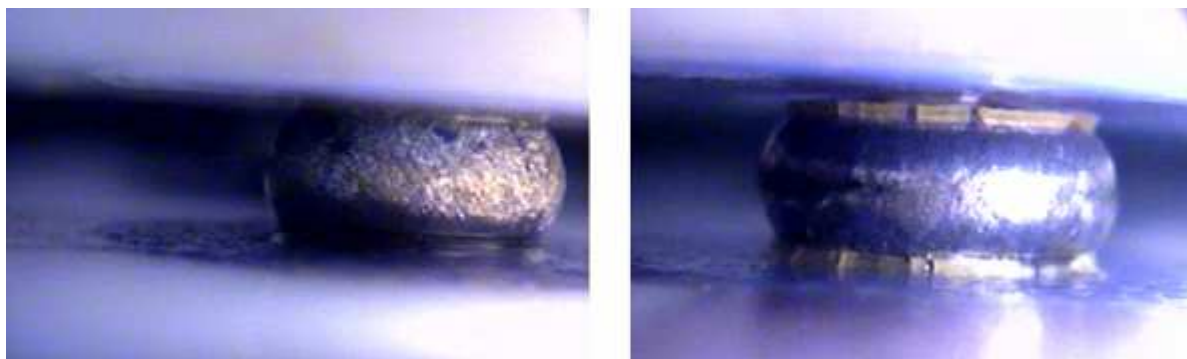
Na organický materiál FR4 byla struktura realizována substrativní technologií panel plating. Po vyleptání vodivého motivu a rozřezání destiček byla nanášena bílá nepáživá maska ImagecureSmart XV501T-4 z důvodu vymezení vodivých plošek pro pájecí kuličky a tím zabránění přílišného roztečení pájeného spoje. Následující postup je shodný s realizací keramických struktur.

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny horní destičky struktur osazené pájecími kuličkami. Nalevo je keramická destička, napravo destička z FR4 s nanášenou nepáživou maskou.



Obr.6.7.:Horní destičky osazené pájecími kuličkami

Následující obrázky byly pořízeny na přístroji Ersascope.



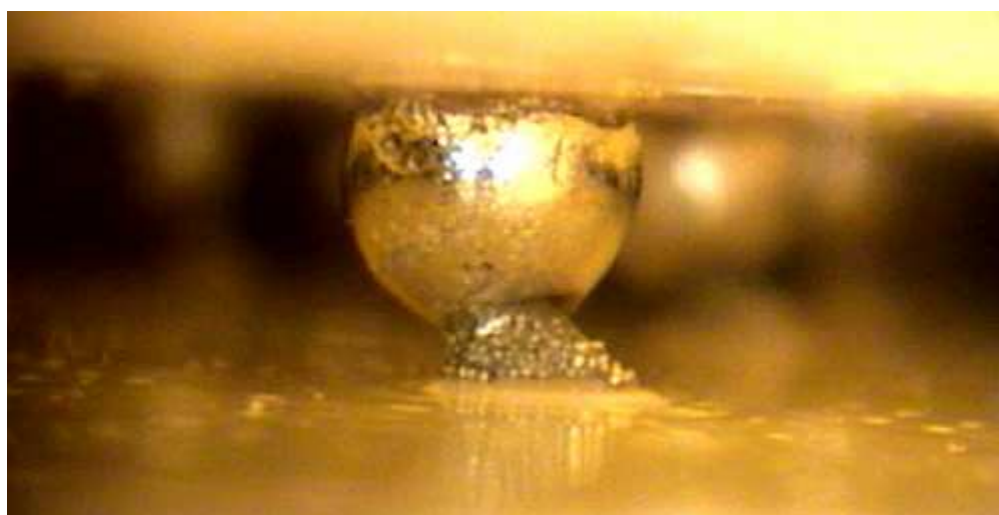
Obr.6.8: Příklady kuličkových spojů - keramika

Na obrázku 6.8. jsou zobrazeny příklady kuličkových spojů ve zhotovených strukturách. Na levém obrázku je bezolovnatá kulička na keramickém substrátu s pájecí pastou Kester EM907. Na pravém obrázku je olovnatá kulička na keramickém substrátu s pájecí pastou Kester R256.



Obr.6.9: Kuličkový spoj – FR4

Na obrázku 6.9. je zobrazen kuličkový spoj struktury se substrátem FR4 a olovnatými kuličkami při použité pájecí pastě Kester R256.



Obr.6.10: Vadný kuličkový spoj

Na obrázku 6.10. je zobrazen nekvalitně provedený kuličkový spoj struktury se substrátem FR4 a bezolovnatými kuličkami při použité pájecí pastě Kester EM907. Jak je zřejmé, pájecí pasta je zde nedostatečně přetavena. Také je zde zřetelně vidět přítomnost tavidlových zbytků na povrchu substrátu.

6.3 ROZVRŽENÍ EXPERIMENTU

Experiment byl rozvržen tak, aby byl prozkoumán vliv materiálů použitých při výrobě struktur na jejich celkový povrchový izolační odpor. Zhotovené struktury budou podrobeny měření na povrchový izolační odpor a poté bude na vybraných strukturách provedeno několik způsobů oplachů za účelem zjištění jejich vlivu na povrchový izolační odpor.

Pro lepší přehlednost byly zhotovené struktury rozděleny do skupin podle materiálů použitých při jejich výrobě. Každá skupina navíc obsahuje více „stejných“ struktur, aby byl vliv použitých materiálů více patrný. Konkrétní rozdělení struktur do skupin je znázorněno v tabulce 6.6.

Tab.6.6.: Rozdělení zhotovených struktur

| číslo skupiny | substrát | pájecí pasta | pájecí kuličky | počet struktur ve skupině |
|---------------|----------|-----------------|----------------|---------------------------|
| 1 | Keramika | Cobar SAC3-XF3 | Bezolovnaté | 3 |
| 2 | Keramika | Cobar BI58-XM5S | Bezolovnaté | 3 |
| 3 | Keramika | Kester EM907 | Bezolovnaté | 3 |
| 4 | Keramika | Kester R256 | Olovnaté | 3 |
| 5 | FR4 | Kester EM907 | Bezolovnaté | 2 |
| 6 | FR4 | Kester R256 | Olovnaté | 2 |

Měření bylo prováděno pomocí přístroje Keithley 6487 Picoammeter/voltage source a odporové komory Keithley 8009 Rezistivity test fixture (obr.6.11). Do jednotlivých struktur bylo zavedeno napětí 500V a poté byl ze stupnice přístroje odečten proud procházející izolační mezerou. Výsledný izolační odpor mezery byl následně vypočítán pomocí Ohmova zákona jako podíl napětí a proudu.



Obr.6.11: Aparatura použitá pro měření izolačního odporu

Po dokončení měření byly jednotlivé struktury podrobeny několika oplachy za účelem zjištění jejich vlivu na celkový izolační odpor. Celkově byly provedeny dva cykly oplachů. Struktury byly čištěny destilovanou vodou i různými koncentráty izopropyl alkoholu a vody a to tak, že byly v tomto roztoku vždy 20 minut ponořeny. Po dokončení jednotlivých oplachových cyklů a přirozeném vysušení struktur byl opět změřen izolační odpor. Konkrétní plán jednotlivých oplachů je uveden v tabulce 6.7.

Tab.6.7.: Plán oplachů

| číslo struktury | 1.oplach | 2.oplach | číslo struktury | 1.oplach | 2.oplach |
|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| 1a | destilovaná voda | destilovaná voda | 4a | destilovaná voda | destilovaná voda |
| 1b | izopropyl 10% | izopropyl 10% | 4b | izopropyl 10% | izopropyl 10% |
| 1c | izopropyl 75% | izopropyl 75% | 4c | izopropyl 75% | izopropyl 75% |
| 2a | destilovaná voda | destilovaná voda | 5a | destilovaná voda | destilovaná voda |
| 2b | izopropyl 10% | izopropyl 10% | 5b | izopropyl 75% | izopropyl 75% |
| 2c | izopropyl 75% | izopropyl 75% | 6a | destilovaná voda | destilovaná voda |
| 3a | destilovaná voda | destilovaná voda | 6b | izopropyl 75% | izopropyl 75% |
| 3b | izopropyl 10% | izopropyl 10% | - | - | - |
| 3c | izopropyl 75% | izopropyl 75% | - | - | - |

6.4 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY NAVRŽENÝCH STRUKTUR

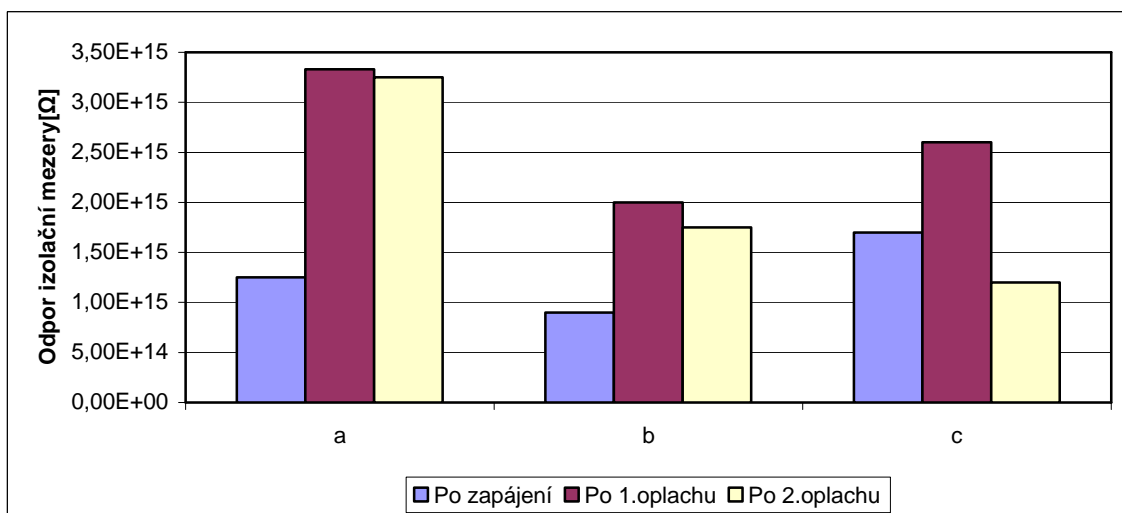
6.4.1 Výsledky pro struktury realizované na keramickém substrátu

6.4.1.1 Výsledky pro pájecí pastu COBAR SAC3-XF3

1. skupina byla zhotovena na keramickém substrátu s bezolovnatými kuličkami Senju #7097 a pájecí pastou COBAR SAC3-XF3 použitou při jejich přetavení. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Čím přesně byly struktury oplachovány je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.8. Na obrázku 6.12. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.8.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu COBAR SAC3-XF3 na Al₂O₃

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 0,400 | 1,25E+15 | 0,152 | 3,33E+15 | 0,154 | 3,25E+15 |
| b | 0,560 | 9,00E+14 | 0,250 | 2,00E+15 | 0,286 | 1,75E+15 |
| c | 0,294 | 1,70E+15 | 0,192 | 2,60E+15 | 0,417 | 1,20E+15 |



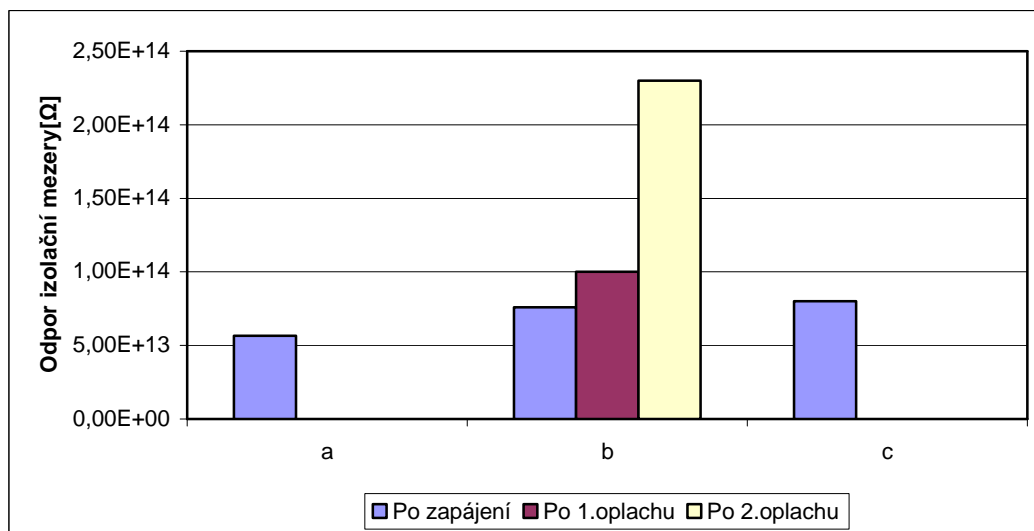
Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu COBAR SAC3-XF3 na Al₂O₃

6.4.1.2 Výsledky pro pájecí pastu COBAR BI58-XM5S

Skupina 2 byla zhotovena na keramickém substrátu s bezolovnatými kuličkami Senju #7097 a bismutovou pájecí pastou COBAR BI58-XM5S použitou při jejich přetavení. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Tyto struktury vykazovaly velmi malou pevnost výsledných kuličkových spojů. Po prvním kole oplachů a následné manipulaci došlo u dvou struktur k oddělení horní destičky od substrátu. Izolační odpor po oplachu zde tedy nemohl být změřen. Čím přesně byla zbývající struktura oplachována je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.9. Na obrázku 6.13. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.9.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu COBAR BI58-XM5S

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 8,850 | 5,65E+13 | - | | - | |
| b | 6,579 | 7,60E+13 | 5 | 1,00E+14 | 2,174 | 2,30E+14 |
| c | 6,25 | 8,00E+13 | - | | - | |



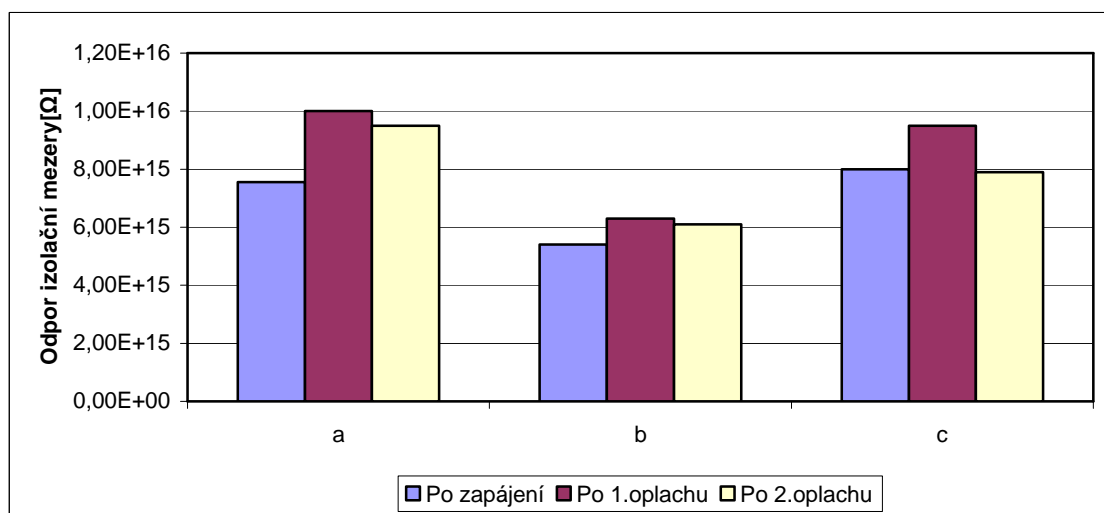
Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu COBAR BI58-XM5S na Al₂O₃

6.4.1.3 Výsledky pro pájecí pastu Kester EM907

Skupina 3 byla zhotovena na keramickém substrátu s bezolovnatými kuličkami Senju #7097 a pájecí pastou Kester EM907 použitou při jejich přetavení. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Čím přesně byly struktury oplachovány je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.10. Na obrázku 6.14. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.10.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu Kester EM907 na Al₂O₃

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 0,066 | 7,55E+15 | 0,050 | 1,00E+16 | 0,053 | 9,50E+15 |
| b | 0,093 | 5,40E+15 | 0,079 | 6,30E+15 | 0,082 | 6,10E+15 |
| c | 0,063 | 8,00E+15 | 0,053 | 9,50E+15 | 0,063 | 7,90E+15 |



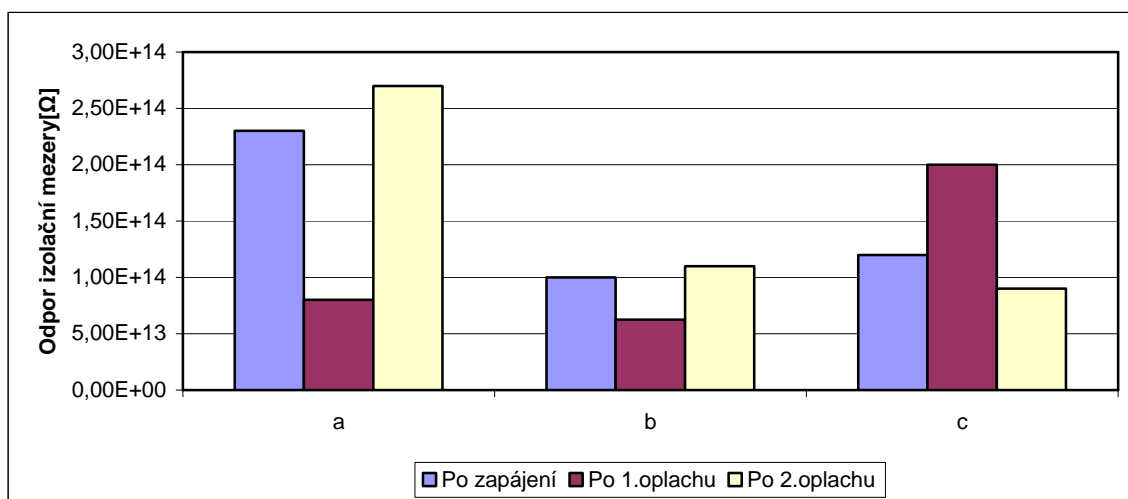
Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu Kester EM907 na Al₂O₃

6.4.1.4 Výsledky pro pájecí pastu Kester R256

Skupina 4 byla zhotovena na keramickém substrátu za použití olovnatých kuliček SnPb a olovnaté pájecí pasty Kester R256. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Čím přesně byly struktury oplachovány je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.11. Na obrázku 6.15. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.11.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu Kester R256 na AL2O3

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 2,174 | 2,30E+14 | 6,25 | 8,00E+13 | 1,852 | 2,70E+14 |
| b | 5 | 1,00E+14 | 8 | 6,25E+13 | 4,545 | 1,10E+14 |
| c | 4,167 | 1,20E+14 | 2,5 | 2,00E+14 | 5,556 | 9,00E+13 |



Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu Kester R256 na Al2O3

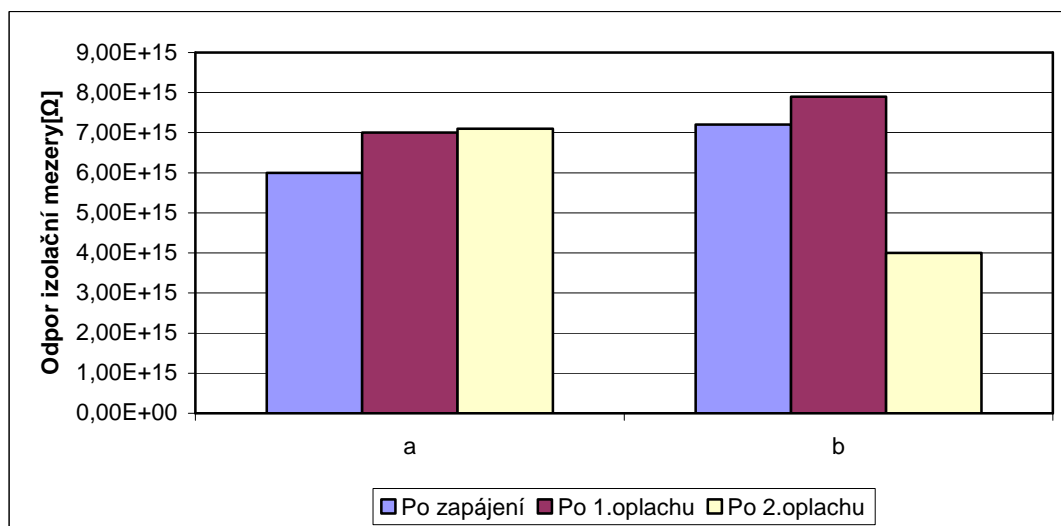
6.4.2 Výsledky pro struktury realizované na DPS

6.4.2.1 Výsledky pro pájecí pastu Kester EM907

U skupiny 5 byl jako substrát použit organický materiál FR4, který byl opět osazen bezolovnatými kuličkami Senju #7097. Jako pájecí pasta byla použita Kester EM907. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Čím přesně byly struktury oplachovány je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.12. Na obrázku 6.16. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.12.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu Kester EM907 na FR4

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 0,084 | 6,00E+15 | 0,071 | 7,00E+15 | 0,070 | 7,10E+15 |
| b | 0,069 | 7,20E+15 | 0,063 | 7,90E+15 | 0,125 | 4,00E+15 |



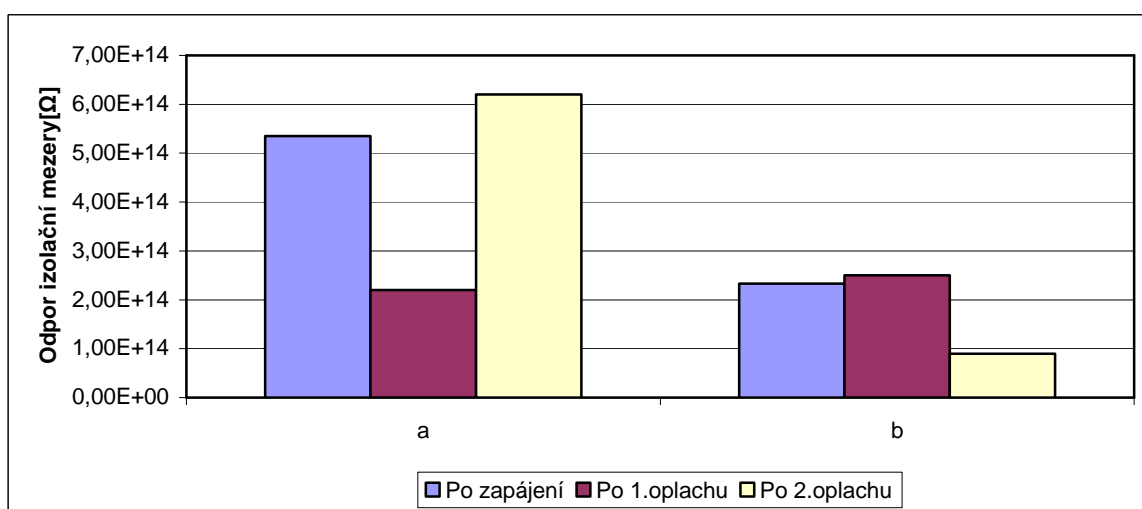
Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu Kester EM907 na FR4

6.4.2.2 Výsledky pro pájecí pastu Kester R256

Skupina 6 byla zhotovena na substrátu FR4 za použití olovnatých kuliček SnPb a olovnaté pájecí pasty Kester R256. Po kompletaci byly na jednotlivých strukturách provedeny dvě kola oplachů. Čím přesně byly struktury oplachovány je uvedeno v tabulce 6.7. Po každém technologickém kroku byl změřen povrchový izolační odpor. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.13. Na obrázku 6.17. jsou uvedeny hodnoty svodových vodivostí po jednotlivých krocích.

Tab.6.13.: Naměřené hodnoty pro pájecí pastu Kester R256 na FR4

| Skupina 1 | před oplachem | | po 1.oplachu | | po 2.oplachu | |
|-----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] | Proud[pA] | SIR[Ω] |
| a | 0,093 | 5,35E+14 | 2,273 | 2,20E+14 | 0,081 | 6,20E+14 |
| b | 2,146 | 2,33E+14 | 2 | 2,50E+14 | 5,556 | 9,00E+13 |



Obr.6.12: Hodnoty odporu pro pájecí pastu Kester R256 na FR4

6.4.3 Zhodnocení výsledků měření navržených struktur

Účelem experimentu bylo zjistit vliv aplikačních materiálů použitých při výrobě struktur typu Flip-chip na jejich povrchový izolační odpor. Struktury tedy byly podle toho rozděleny do šesti skupin, jak je uvedeno v tabulce 6.6. Další částí experimentu bylo provedení oplachů na jednotlivých strukturách. Přitom po každém technologickém kroku byla změřena rezistivita izolační mezery. Pro větší přehlednost jsou hodnoty jednotlivých rezistivit zpracovány do grafů pro každou skupinu struktur.

Z naměřených hodnot vyplývá, že největší odpor izolační mezery vykazují struktury ze třetí skupiny, jež byly zhotoveny na keramickém substrátu při použití pájecí pasty ze slitiny SnAgCu od firmy Kester a pájecích kuliček ze stejné slitiny. Stejná kombinace aplikačních materiálů byla použita i u struktur z páté skupiny, jako substrát zde byl ale použit organický materiál FR4. U těchto struktur byl naměřen velmi podobný izolační odpor jako u skupiny třetí. První skupina byla taktéž zhotovena s pájecí pastou SnAgCu, nicméně tato pasta byla vyrobena firmou COBAR. V porovnání se třetí skupinou struktur je zde patrný pokles rezistivity izolační mezery o téměř jeden řád. To je nejspíš zapříčiněno faktem, že tato pájecí pasta byla daleko starší než pasta použitá ve třetí skupině, a tak došlo k degradaci jejích původních vlastností. Ještě horší hodnoty izolačního odporu byly ale naměřeny u struktur, které byly osazeny olovnatými pájecími kuličkami a u nichž byla použita olovnatá pájecí pasta firmy Kester. To může být zapříčiněno tím, že tavidlo obsažené v této pastě není tak kvalitní a proto zanechává na povrchu substrátu více zbytků než je tomu u bezolovnatých pájecích slitin. V porovnání těchto dvou skupin jsou pak na tom z hlediska naměřeného izolačního odporu o něco lépe struktury zhotovené na organickém materiálu FR4, na což má nejspíš vliv nepájivá maska, která mimojiné minimalizuje tvorbu můstků a zkratů na vodičích a mezi nimi. Vůbec nejhůře si ale v měření vedly keramické struktury, při jejichž kompletaci byla použita bismutová pájecí pasta. Výsledná rezistivita izolační mezery zde byla jednoznačně nejhorší, což je určitě z části zapříčiněno stářím této pasty, která byla ze všech pájecích past použitých v experimentu nejstarší. Dalším problémem je navíc její teplota přetavení, která činí pouhých 155-180°C a vzhledem k použitým pájecím kuličkám, které jsou ze slitiny SnAgCu a jejichž ideální pájecí teplota se pohybuje kolem 230°C, musela být pájecí teplota kuliček dodržena. To se samozřejmě nemohlo na vlastnostech pasty projevit příznivě.

Po provedení měření byly struktury podrobeny sérií oplachů za účelem zjištění vlivu takového postupu na rezistivitu izolační mezery. Čištění se provádělo ponořením struktury do čistícího roztoku na 20 minut. Poté byly struktury opláchnuty, vysušeny a následně mohla být opět změřena rezistivita izolační mezery. Celkově byly na všech strukturách provedeny dvě kola oplachů. Každá struktura v jednotlivých skupinách byla oplachována destilovanou

vodou. Další struktura ve skupině pak byla čištěna roztokem, který obsahoval ze 75% isopropyl alkohol a 25% destilované vody. Zbývající struktury ve skupinách keramických substrátů byly ještě čištěny roztokem, který tvořil z 10% isopropyl alkohol a z 90% destilovaná voda. Nutno dodat, že struktury ze druhé skupiny, u kterých byla při výrobě použita bismutová pasta, vykazovali natolik malou pevnost výsledných kuličkových spojů, že již po prvním oplachu a následné manipulaci s nimi došlo k oddělení horních destiček od substrátu u dvou ze tří struktur. Vliv těchto oplachů zde tedy bohužel nemohl být zjištěn.

Z naměřených hodnot je patrné, že nejpříznivější účinky na izolační odpor struktur mají oplachy destilovanou vodou. U bezolovnatých struktur již první oplach příznivě ovlivnil výslednou rezistivitu izolační mezery, zatímco po druhém oplachu již struktury nevykazovali zlepšení povrchového odporu. Patrně již zde bylo dosaženo hranice procesních možností.

U olovnatých struktur ale došlo po prvním oplachu destilovanou vodou k poměrně značnému snížení výsledného izolačního odporu. To je zřejmě následkem větší koncentrace tavidlových zbytků na povrchu substrátu, jež se sice nejprve z povrchu uvolnily, dá se ale předpokládat, že následně došlo k jejich zpětnému vstřebání na povrch substrátu, kdy byly za pomoci vody rovnoměrněji rozloženy a tak zde došlo ke vzniku svodu. Po druhém oplachu již byla většina těchto nečistot odplavena a tak došlo k velice mírnému nárůstu izolačního odporu oproti původní hodnotě. Dle mého názoru by zde prospěl ještě třetí oplach, po kterém by mohlo dojít k dalšímu zvýšení povrchové rezistivity. Oplachy roztokem skládajícím se z destilované vody a z 10% isopropyl alkoholem má podobné účinky jako oplachy pouze destilovanou vodou, příznivý vliv zde ale není tak značný.

Zajímavé bylo sledovat vliv roztoku skládajícího se ze 75% isopropyl alkoholu. První oplach tímto roztokem má na rezistivitu izolační mezery všech struktur vesměs pozitivní účinky a to i na struktury zhotovené z olovených aplikačních materiálů. Druhý oplach se ale u všech struktur projevuje velice nepříznivě. Lze předpokládat, že působením roztoku s takovou koncentrací isopropyl alkoholu dochází po určité době nejen k extrakci iontů z povrchu substrátu, ale také k extrakci iontů ze samotných materiálů, z kterých byla struktura zhotovena.

7. ZÁVĚR

Práce obsahuje zpracovanou rešerši týkající se problematiky měření povrchového izolačního odporu a vlivů, jež na něj působí. Je zde také nastíněna problematika výroby propojovacích struktur, způsobů připojení čipu do obvodu a výčet parametrů, které nutno brát v úvahu při tvorbě pouzdra pro čip.

Experimentální část práce se zabývá návrhem testovací struktury typu Flip chip pro testování vlivu parazitní vodivosti způsobené kontaminací izolační mezery při výrobě struktur. Sleduje se zde tedy vliv použitých aplikačních materiálů na povrchový izolační odpor.

Prvním krokem bylo vytvoření testovacího motivu, který je tvořen paralelně umístěnými motivy vodič – mezera, jejichž uspořádání umožňuje měření izolačního odporu. Struktury byly zhotoveny na keramickém Al₂O₃ substrátu i na organickém materiálu FR4. Na keramice byl motiv zhotoven tlustovrstvou technologií, konkrétně sítotiskem. K vytvoření motivu byla použita AgPd vodivá pasta ESL 9695-G. Poté byla kolem pájecích plošek zhotovena ještě dielektrická vrstva pastou ESL 4917. Účelem této vrstvy bylo vymezení prostoru pro osazení pájecích kuliček, což má za následek zamezení roztečení slitiny při přetavení. Tato vrstva také výrazně napomáhá vytvoření správně vypadajícího kuličkového spoje. Na organických FR4 substrátech byl vytvořen vodivý motiv substraktivní technologií panel-plating. Poté zde byla nanášena permanentní nepájivá maska ze stejného důvodu jako dielektrická vrstva u keramických struktur. Aby se zamezilo „cestování“ pájecích kuliček při samotném přetavení, byly kuličky osazovány do pájecí pasty, která je pro tento účel vhodnější než použití samotného tavidla, jelikož právě přítomnost pájecí slitiny pomáhá k fixaci kuliček na substrát.

Samotné měření probíhalo tak, že struktury byly rozděleny do šesti skupin podle aplikačních materiálů, které byly použity při jejich výrobě. Po provedení měření ještě byly na všech strukturách provedeny dvě kola oplachů za účelem zjištění vlivu takového postupu na rezistivitu izolační mezery.

Experimenty ukázaly, že jedním z nejdůležitějších faktorů je volba pájecí pasty a její kompatibilita s pájecími kuličkami. Při pájení totiž dochází ke kontaminaci substrátu tavidlem, což má vliv na výslednou parazitní vodivost izolační mezery. Podstatný rozdíl je také ve výsledcích struktur, jež byly vytvořeny z SnAgCu pájecí pasty, kuliček a struktur, jež byly vytvořeny z olovnaté pájecí pasty a kuliček. Zatímco bezolovnaté struktury vykazovaly větší rezistivitu izolační mezery, olovnaté struktury zřejmě díky zastaralejšímu tavidlu, které zanechává na povrchu substrátu více nečistot, a nižším pájecím teplotám měly rezistivitu izolační mezery podstatně menší.

Na základě výsledků čištění lze dále konstatovat, že nejvyšší hodnoty povrchového odporu bylo dosaženo oplachy struktury destilovanou vodou.. U olovnatých struktur ale docházelo po prvním oplachu destilovanou vodou ke snížení rezistivity izolační mezery, což je pravděpodobně způsobeno zpětným vstřebáním kontaminantů na povrch substrátu, jež se za pomoci vody navíc rovnoměrně rozložily po povrchu, v důsledku čeho zde vznikl svod. Po druhém cyklu oplachu došlo k definitivnímu odstranění těchto nečistot a tak zde můžeme pozorovat mírný nárůst rezistivity oproti hodnotám, jež měly struktury před prvním čištěním. Z výsledků jednotlivých oplachů také vyplývá, že se zvyšující koncentrací isopropyl alkoholu v roztoku dochází k extrakci iontů nejen z povrchu substrátu, ale také ze samotných materiálů použitých při výrobě struktur. Destilovaná voda tedy odstraňuje z povrchu materiálu většinu rozpustných iontů, zatímco přídavek isopropyl alkoholu pomáhá k odstranění iontů z vnitřku materiálu.

Všechny výsledky jsou v předložené práci zpracovány v tabulkách a grafech, které přehledně znázorňují jak se hodnoty svodových vodivostí měnily po jednotlivých technologických krocích.

8. POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Nicák, M., Hejátková, E., Řezníček, M., Švecová, O. Skriptum VUT. Realizace HIO. Brno, 2009, 14s.
- [2] Starý, J., Zatloukal, M., Stejskal, P. Skriptum VUT. Montážní a propojovací technologie. Brno: nakladatelství VUT, 260s.
- [3] Obrázek dostupný online na: <http://www.mpelektronik.cz/fritsch-osazovani>
- [4] Pulec, J. Skriptum VUT. Mikroelektronika a technologie součástek: Ochrana čipů a obvodů. Brno, 2010, 20s.
- [5] Šandera, J., Hejátková, E. dostupné online na:
<http://www.smtplus.cz/litSMT/Clbga1/Bgai.htm>
- [6] Tape Automated Bonding, dostupný online na: http://en.wikipedia.org/wiki/Tape-automated_bonding
- [7] Szendiuch, I. Technologie elektronických obvodů a systémů. 1.vyd. Brno: VUTIUM, 2002, 239s. ISBN 80-214-2072-3.
- [8] Critical materials and process issues, dostupný online na:
<http://www.tms.org/pubs/journals/>
- [9] Obrázek dostupný online na:
<http://content.answers.com/main/content/img/CDE/AMKFLIP.GIF>
- [10] Bogatin, E. Roadmaps of packaging technology, dostupný online na:
<http://smithsonianchips.si.edu>
- [11] Bouzek, K. Elektrochemické inženýrství. 1.vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 158s. ISBN 80-7080-368-1.
- [12] Surface insulation resistance testing of soldering pastes and fluxes, dostupný online na: <http://www.tracelabs.com/TechLibraryDoc.aspx?id=4>
- [13] Blaine, P. SIR testing, dostupný online na:
<http://www.empf.org/empfasis/feb04/sirtesting.htm>
- [14] Šandera, J. Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž. 1.vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 270s. ISBN 80-7300-181-0.
- [15] Tarr, M. SIR, dostupný online na:
http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0151_sir/index.html

- [16] Obrázek dostupný online na:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/LabSensNano/Facilities.aspx?id=4>
- [17] DeDad, John A. Insulation Resistance Testing: How and why?, dostupný online na:
http://ecmweb.com/mag/electric_insulation_resistance_testing_3/
- [18] Gilleo, K. Substrates for Flip Chip, dostupný online na:
<http://flipchips.com/tutorial/process/substrates-for-flip-chips/>