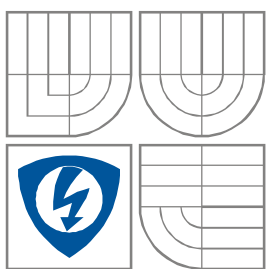


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PARAMETRY SPOJŮ BGA NA KERAMICKÝCH AL₂O₃ SUBSTRÁTECH

PARAMETERS OF BGA-TYPE INTERCONNECTION JOINTS CERAMIC AL₂O₃ SUBSTRATES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

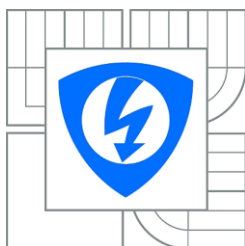
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB SOMER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL NICÁK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Jakub Somer
Ročník: 3

ID: 119609
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Parametry spojů BGA na keramických Al₂O₃ substrátech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte rešerši v problematice kuličkových propojů BGA (typy, zhotovení, materiály, základní vlastnosti). Vytvořte testovací motiv BGA pro substrát Al₂O₃. Otestujte vzájemnou kompatibilitu dostupných materiálů (vodivé tlustovrstvé pasty, pájecí pasty, pájecí kuličky, tavidla) zejména při pájení přetavením v parách. Proveďte optickou kontrolu a testy mechanické odolnosti stříhem na vybraných materiálových kombinacích. Navrhněte optimalizaci technologie (např. tvary plošek, nepájivé masky, šablony, metody tisku atd.).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Michal Nicák

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 týkající se parametrů kuličkových spojů, používaných především u BGA pouzder, na keramických substrátech. První část práce obsahuje teoretický rozbor problematiky kuličkových spojů BGA, jejich vlastnosti, struktury, metody výroby a použití. Následuje přípravná část, ve které jsou popsány všechny používané metody a postupy, včetně návrhu testovacího motivu. Poslední část práce je praktické testování vzájemné kompatibility vodivých past, pájecích past a tavidel při pájení přetavením v parách. V samotném závěru práce je popsán postup výběru, kompletního zapájení a výbrusu nejlepších dostupných kombinací materiálů.

Abstract

This project deals with questions related to parameters of solder balls, used on BGA packages, on ceramic substrates. First part of this project contains general characteristic of solder balls, their properties and usage. In the following part there are described technologies and methods used during the experiment including the design of test substrate. The last part is dedicated to practical examination of compatibility of selected conductive pastes, solder pastes and fluxes during vapor reflow soldering. At the end of this work the selection of materials, assembly, soldering and microsections are described.

Klíčová slova

pájecí kuličky, výrobní metody, BGA, kompatibilita, zkouška stříhem

Key words

solder balls, manufacturing methods, compatibility, BGA, ball shear test

Bibliografická citace

SOMER, J. *Parametry spojů BGA na Al₂O₃ keramických substrátech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 64 s. Vedoucí bakalářská práce Ing. Michal Nicák.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma **Parametry spojů BGA na keramických Al₂O₃ substrátech** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 2. června 2011

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Michalu Nicákovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Starému, PhD. za poskytnutí materiálu a pomoc při výrobě nepájivé masky. Rád bych také poděkoval Ing. Milanu Holíkovi za vyvrtání šablon.

V Brně dne 2. června 2011

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	7
1 Teoretická část	8
1.1 Typy pájkových kuliček	8
1.2 Výroba pájecích kuliček	11
1.2.1 Olejová granulace	12
1.2.2 Metoda UDS	14
1.3 Přímá výroba kuliček	15
1.3.1 Šablonový tisk nebo nanášení tryskami	15
1.3.2 Napařování	15
1.3.3 Galvanické pokovení	15
1.3.4 C4NP	16
1.4 Připojování pájkových kuliček	17
1.4.1 Nanášení tavidla	17
1.4.2 Manipulace s kuličkami	19
1.5 Reballing	21
1.5.1 Šablonové osazení	21
1.5.2 Osazení reballing páskou	22
1.5.3 Osazení kuliček s pomocí laseru	22
2 Přípravná část	23
2.1 Návrh testovacího motivu	23
2.2 Technologie a pracovní postupy použité v experimentální části	25
2.2.1 Sítotisk	25
2.2.2 Tisk pájecí pasty a tavidla	26
2.2.3 Nepájivá maska a její aplikace	26
2.2.4 Pájení v parách	27
2.2.5 Zkouška stříhem	28
3 Experimentální část	31
3.1 Použité materiály, postup	31
3.2 Sestavy pouze s pájecí pastou nebo tavidlem	33
3.3 Sestavy s nepájivou maskou	39

3.4	Sestavy s dielektrickou pastou	45
3.5	Zkouška pevnosti stříhem	48
3.6	Výroba výbrusu	52
4	Závěr	57
5	Seznam obrázků	60
6	Seznam tabulek	62
7	Použitá literatura.....	63

Úvod

Projekt je zaměřený na testování kompatibility kuličkových BGA spojů, moderní technologie umožňující vysokou hustotu propojení, která je na keramických substrátech neprobádána a její používání je minimální, důvodem je požadavek na použití více vrstev, které jsou nezbytné při použití pouzdra typu BGA. Cílem je zpracovaný přehled vzájemné kompatibility substrátu, pasty, tavidla a pájkových kuliček, což je prověření základních parametrů kuličkových spojů. Dále porovnání (opticky i mechanicky po zapájení) různých druhů vodivých past, pájecích past a tavidel. Práce je členěna do tří částí: teoretická část, přípravná část a experimentální část. První část obsahuje teoretický rozbor, ve kterém je pojednáváno o vlastnostech, výrobě a použití pájkových kuliček. Ve druhé kapitole jsou rozebrány postupy a technologie, které jsou použity při vypracování experimentální části projektu. Třetí kapitola se zabývá samotným experimentem, obsahuje seznam použitých materiálů, chronologicky řazený průběh experimentu a v závěru je popsána výroba výsledného zapájeného celku, který představuje nejlepší dostupnou materiálovou kombinaci.

1 Teoretická část

1.1 Typy pájkových kuliček

Propojovací kuličky lze dělit podle složení slitiny, ze které jsou vyrobeny, provedení nebo podle jejich velikosti. Podle slitiny, ze které jsou spoje vyrobeny, je můžeme dělit na

- olovnaté (Lead containing)
- bezolovnaté (Lead free)

Kuličky vyrobené z olovnatých slitin se dají dále dělit podle množství obsaženého olova na kuličky s vysokým obsahem olova (Sn10Pb90) nebo se standardním obsahem olova (Sn63Pb37, Sn62Pb36Ag2). Podle množství obsaženého olova se samozřejmě liší jejich teplota tání a s ní je svázán i vyšší nárok na teplotní odolnost propojovaných struktur (teplota tavení u slitiny Sn10Pb90 se pohybuje okolo 300°C).

Bezolovnaté spoje se používají pro chemické složení, které nezatěžuje životní prostředí. Jejich teplota tavení je ovšem vyšší než u klasické olovnaté slitiny. Krátký přehled používaných slitin a jejich teploty tavení ukazuje Tab. 1.

Tab. 1: Některé typy slitin a jejich teploty tavení

Typ slitiny	Teplota tavení[°C]
Sn63Pb37	183
Sn62Pb36Ag2	179
Sn10Pb90	268-302
Sn95.2Ag3.8Cu1	217-218
Sn96.5Ag3.5	220-221
Sn99.35Cu0.6Ni0.05	221-227
Sn42Bi58	133-138

Běžné rozměry kuliček se pohybují mezi 100 μ m po 900 μ m, ale můžeme se setkat i s většími rozměry nebo naopak s menšími rozměry pro speciální aplikace. Provedení pájkových kuliček lze rozlišovat na 3 základní druhy

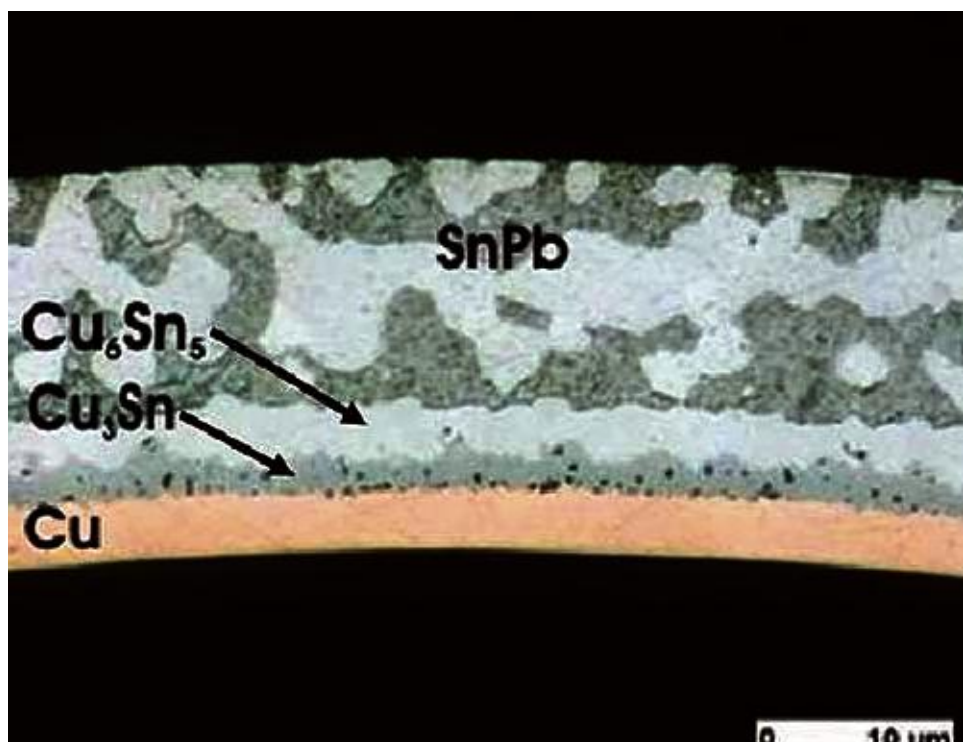
- z čistého kovu (Pure metal balls)
- slitinové (Alloy-type solder balls)
- s jádrem (Solid core balls)

Pájecí kuličky z čistého kovu jsou nejjednodušším typem, který lze použít pro pájení. Pro pájení se kuličky z čistého kovu používají jen výjimečně a to hlavně kuličky vyrobené z čistého cínu.

Největší využití v oblasti pájení mají kuličky vyrobené z pájecích slitin. Při připojování pomocí slitinových kuliček na substrát se ovšem může ukázat jako problematické udržení konstantní vzdálenosti mezi substrátem a připojovaným prvkem (např. BGA pouzdro).

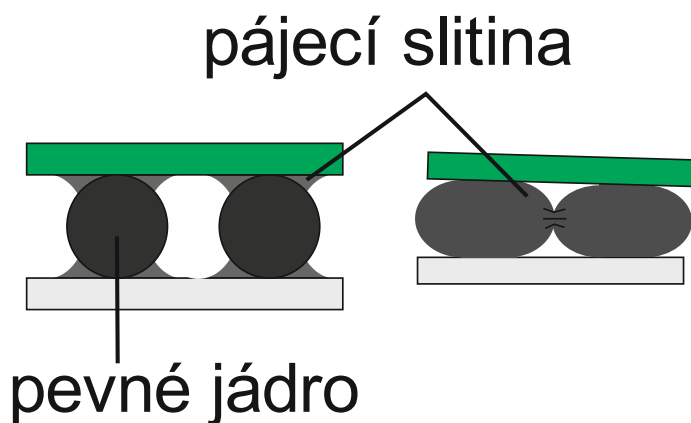
Dalším typem jsou kuličky s pevným jádrem, které je vyrobeno buď z kovu (měď, stříbro) nebo z polymeru. Jejich přednostmi jsou vynikající spolehlivost pájeného spoje a schopnost pevného jádra kuličky udržovat konstantní vzdálenost mezi substrátem a připojovaným zařízením. Další výhodou pájecích kuliček s pevným jádrem může být vyšší odolnost spoje proti teplotnímu a mechanickému namáhání, v porovnání například s klasickou pájecí slitinou Sn63Pb37, která začne vykazovat nižší viskozitu při tečení již na 120°C a tím se snižuje odolnost spoje proti mechanickému namáhání.

U většiny kuliček s pevným jádrem, ať už z mědi nebo polymeru s nanesenou vrstvou mědi, vznikají intermetalické fáze mědi a cínu (viz Obr. 1.1), které jsou křehké a mají špatný vliv na elastické vlastnosti jádra a na spolehlivost pájeného spoje. Po pájecím procesu se tloušťka této vrstvy ještě zdvojnásobí a dále se bude rozšiřovat v průběhu teplotního namáhání.



Obr. 1.1: Průřez vrstvami kuličky s Cu jádrem [2]

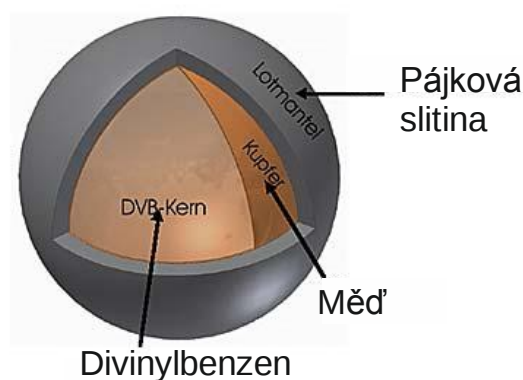
U kuliček s kovovým jádrem se většinou používá měď potažená vrstvou pájky. Při pájení se taví pouze vrchní vrstva pájky a kovové jádro zůstává tuhé. Ve výsledku tedy slouží kovové jádro kuličky jako oddělovač a elektrický vodič mezi jednotlivými pájenými plochami a udržuje tak mezi nimi konstantní vzdálenost (viz Obr. 1.2), s tím je také spojena vyšší spolehlivost pájeného spoje jako celku. Použitím pájkových kuliček s pevným jádrem lze také předejít roztečení pájecí slitiny a následného propojení sousedních spojů.



Obr. 1.2: Porovnání propojení slitinových kuliček a kuliček s pevným jádrem

Kovové jádro vykazuje malý stupeň degradace vlivem vysokých teplot. Výsledná velikost kuličky je dána průměrem jádra a tloušťkou vrstvy pájky, kterou můžeme volit podle potřeby a náročnosti aplikace.

Pájková kulička s polymerním jádrem od výrobce Sekisui (viz. Obr. 1.3) má 3 hlavní složky. Jádro je složeno z polymeru (hustě zesíťovaný divinyl-benzen DVB), na jeho povrchu je tenká vrstva mědi (asi 1-5 μ m), kovová vrstva musí být vysoce homogenní, aby mohla kompenzovat teplotní roztažnost polymerního jádra a nedošlo k jejímu popraskání (TCE divinyl-benzenu je asi 50ppm/K). Vnější vrstva je tvořena samotnou pájkou, která může být olovnatá, z eutektické slitiny Sn63Pb37, nebo z bezolovnatých slitin Sn98.5Ag1Cu0.5 nebo Sn65Ag3.5.



Obr. 1.3: Průřez pájkovou kuličkou s pevným jádrem [2]

Tloušťka vrstvy pájky se pohybuje mezi 10-20 μ m. Další výhodou pájecích kuliček s polymerním jádrem je jejich přibližně 3x nižší hmotnost oproti slitinovým kuličkám.

1.2 Výroba pájecích kuliček

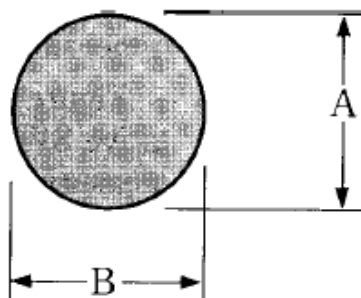
Požadavky na pájecí kuličky jsou:

- homogenní a hladký povrch kuličky
- dobrá elektrická a tepelná vodivost
- vysoká odolnost proti termomechanické únavě
- regulované úrovně nečistot a legujících prvků
- dostupnost materiálu
- přijatelná cena
- kompatibilita s výrobními procesy
- malá odchylka kulatosti
- malá odchylka průměru od požadované hodnoty

Při výrobě pájkových kuliček je třeba dbát na rozměrovou toleranci pro konkrétní velikost kuličky, její kulatost.

Odchylku od kulatosti lze označit S, udává se v procentech a neměla by překročit 1.5%. Odchylka kulatosti je určena následujícím vztahem, jednotlivé proměnné jsou definovány na Obr. 1.4:

$$S = 2 * \frac{A-B}{A+B} * 100 [\%] \quad [1]$$



Obr. 1.4: Popis rozměrů pájkové kuličky [1]

Rozměrová tolerance se pohybuje od 5μm (pro kuličky s malým rozměrem) do 20μm (pro kuličky s velkým rozměrem).

Existuje více způsobů a metod výroby pájkových kuliček o požadovaných rozměrech, například olejová granulace, pulzní rozprašování nebo metoda UDS.

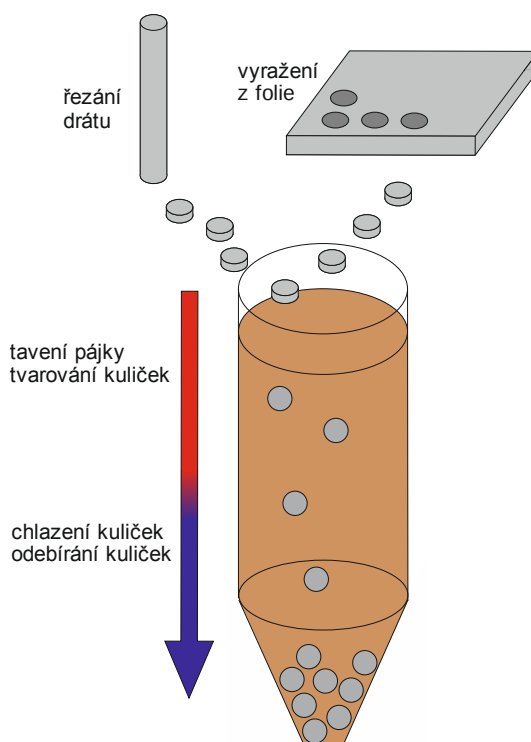
1.2.1 Olejová granulace

Jednou z metod výroby pájkových kuliček je olejová granulace (Oil-based granulation). Tato metoda je založena na principu dělení pájkové slitiny na části o dané hmotnosti, kdy po proběhnutí výrobního procesu dostaneme kuličku se stejnou hmotností o požadovaném rozměru. Výchozí materiál musí mít pokud možno co nejvyšší čistotu a přesné zastoupení jednotlivých prvků ve slitině.

Požadované množství pájky pro olejovou granulaci lze definovat dvěma způsoby:

- řezáním drátu (wire cutting)
- vyražením z folie (foil punching)

Pokud bychom porovnávali náročnost výrobního procesu z hlediska počtu potřebných kroků výroby výsledné kuličky, byla by lepší volbou metoda vyražením z folie s 19 kroky, oproti této metodě má metoda řezání drátu kroků 34. Vzhledem k tomu, že rozměry kuliček jsou většinou do 1mm a slitina je oddělována mechanicky za studena, je obtížné dosáhnout jednotných rozměrů kuliček.



Obr. 1.5: Olejová granulace [3]

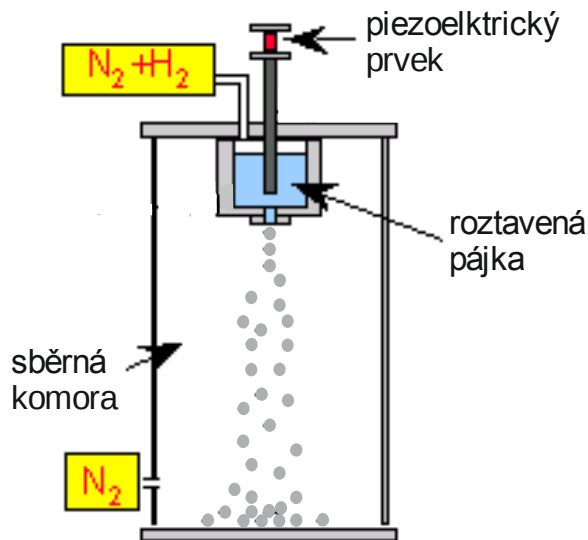
Po oddělení potřebného množství slitiny je vložena do olejové lázně. Olejová lázeň má nejvyšší teplotu ve vrchní části a je vyšší než teplota tavení použité slitiny. V této části olejové lázně dochází k tavení slitiny, která se vlivem povrchového napětí vytvaruje do formy kuličky. Teplota olejové lázně klesá směrem ke dnu nádoby, kde se kuličky postupně ochlazují a přecházejí do tuhého stavu (viz. Obr. 1.5).

Problémem olejové lázně je postupně se zhoršující se hladkost povrchu vyráběných kuliček v důsledku postupného rozkládání oleje za působícího tepla, proto je třeba olej měnit, což snižuje efektivitu výroby. Dalším problémem je znečištění kuliček olejem, které je třeba odmastit zásaditým roztokem nebo organickým rozpouštědlem.

Nevýhodou této metody je potřeba zpracování předchozího materiálu do formy drátu nebo folie, nízká produkční rychlost a časová náročnost procesu odstranění oleje a s tím spojená i nižší kvalita povrchu.

1.2.2 Metoda UDS

Metoda UDS (Uniform Droplet Spray) je modernější a efektivnější metoda výroby než olejová granulace. Tato metoda je založena na schopnosti tvarování roztavené pájky pomocí povrchového napětí. Pájková slitina se taví v komoře, která je naplněna inertním plynem (H_2 , N_2), aby nedocházelo ke znečištění nebo oxidaci taveniny, na spodku nádoby s taveninou je jeden nebo více otvorů, kterými bude následně protékat roztavená pájka. Proud roztavené pájky vytéká z otvoru na spodku nádoby a vlivem povrchového napětí se rozděluje do proudu kapek (viz. Obr. 1.6). K vytváření kapek také napomáhá pravidelná oscilace piezoelektrického oscilátoru s vlnovou délkou větší, než je obvod proudu pájky. Rozdíl v tlaku mezi horní komorou s vyšším tlakem, kde je roztavená pájka, a spodní komorou s nižším tlakem v podstatě nutí roztavenou pájku protékat skrz otvor horní nádoby. Krátce po vytvoření kapky z proudu pájky je třeba kuličky nabít elektrostatickým nábojem aby se předešlo vzájemnému propojení jednotlivých kapek během tuhnutí.



Obr. 1.6: Výrobní aparatura pro metodu UDS [3]

Tuhnutí probíhá buď v inertním plynu, nebo se kuličky chladí v kapalně lázni. U chlazení v kapalně lázni (např. Silikonový olej) může docházet k deformacím vlivem nárazu roztavené pájky na hladinu.

Metoda UDS oproti olejové granulaci vykazuje vysokou produktivitu. Další výhodou je, že lze vyrábět pájkové kuličky ze slitin, které nelze zpracovat do podoby drátu nebo folie.

1.3 Přímá výroba kuliček

Pokud chceme na substrátu spoje ve tvaru kuliček, nemusíme je mít vyrobené předem, ale lze si je vytvořit přímo na substrátu. Existují 3 základní metody přímé výroby kuliček.

1.3.1 Šablonový tisk nebo nanášení tryskami

Tato metoda se hodí pro aplikace, kdy nepotřebujeme tak vysokou kvalitu pájkových kuliček. Postup pro šablonový tisk i pro nanášení tryskami je postup přibližně stejný, liší se pouze ve způsobu přenesení pájecí pasty na pájecí plošky substrátu. U šablonového tisku přiložíme k substrátu šablonu s volnými plochami v místech, kde se na substrátu nacházejí pájecí plošky, přes které nanese požadované množství pájecí pasty. Nebo můžeme nanést na pájecí plošky potřebné množství pájecí pasty pomocí trysek. V obou případech následuje přetavení, kdy se vlivem povrchového napětí pájecí slitiny vytvoří kuličky pájky.

1.3.2 Napařování

Metoda výroby pájkových kuliček napařováním je založena na principu vypařování a následné kondenzaci na určeném povrchu (podobně jako je tomu například u vody). Před samotným napařováním je potřeba nejprve pokovit pájecí plošky tenkými vrstvami kovů (chrom, měď, nikl nebo zlato). Pokovením se sníží náchylnost pájecí plošky na nepříznivé vnější vlivy a zvýší pájitelnost povrchu. Napařování se provádí ve vakuové komoře. Na povrchu substrátu je umístěna kovová maska s otvory na pájecích ploškách, kde se při napařování usadí pájecí slitina. Po odstranění masky následuje přetavení a vytvarování nanesené pájecí slitiny do polokulatého tvaru. Nevýhoda této metody je ve vysokých pořizovacích nákladech na zařízení, čas potřebný k vytvoření odpovídajících spojů a vysoká spotřeba pájecí slitiny, vzhledem k tomu, že se slitina napařuje na celou plochu včetně masky. Další nepříjemnou záležitostí je také samozřejmě nutnost čištění masky, stěn vakuové komory a naleptávání masky.

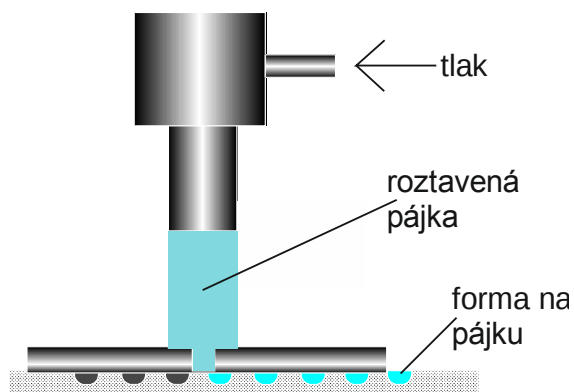
1.3.3 Galvanické pokovení

Postup pro galvanické pokovení je podobný jako u napařování. Nejdříve je třeba nanést tenké vrstvy kovů na pájecí plošky a velmi tenkou vrstvu titanu, která slouží jako zábrana pro roztavenou pájecí slitinu. V dalším kroku se nanese obrazec fotorezistu s otvory na pájecí

plošky. Následuje exponování masky, poté se substrát ponoří do elektrolytické lázně a na pokovené pájecí plošky se nanese odpovídající množství pájecí slitiny. Po odstranění fotocitlivé masky následuje přetavení a na pájecích ploškách se vytvoří pájkové kuličky. Obtížné je při galvanickém pokovení udržet v lázni rovnoměrné koncentrace materiálů a proudové hustoty. Pomocí pokovení lze vytvořit na substrátu velmi kvalitní pájkové spoje, jejichž cena nižší než při výrobě napařováním.

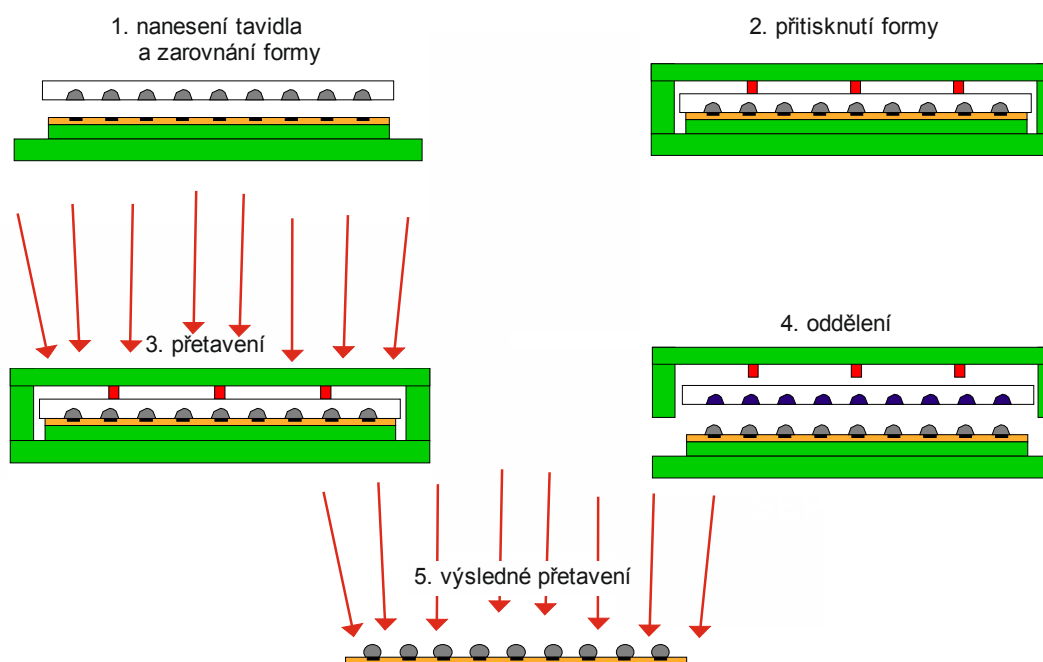
1.3.4 C4NP

Zkratka ze slov Controlled Collapse Chip Connection – New Process (řízený pokles čipových spojů). Tato metoda výroby spojů se používá hlavně pro výrobu na úrovni waferů. U této metody se roztavená pájka ze zásobníku pod tlakem napouští do připravených forem (viz. Obr. 1.7). Formy jsou tvarovány ve skelném substrátu, mají tvar polokoule a jsou rozmístěny tak, aby odpovídaly rozmístění pájecích plošek na waferu nebo na flip-chipu.



Obr. 1.7: Vstřikování roztavené pájky do formy [7]

Po zatuhnutí pájky ve formách se skleněná podložka otočí a vyrovná s pájecími ploškami na cílovém substrátu. Pokud je skelná forma vyrovnána, přichytí se k substrátu a přetaví se. Tak dojde ke spojení pájecích plošek na substrátu a pájky ve formách. Následně se odstraní skleněná forma. Po odstranění skleněné formy ještě následuje konečné přetavení, aby spoje získaly požadovaný tvar (viz. Obr. 1.8).



Obr. 1.8: Postup připojení pájkových kuliček na substrát [7]

1.4 Připojování pájkových kuliček

Pro připojení pájkových kuliček je třeba vyřešit problémy spojené se samotným způsobem připojení kuliček a s jejich manipulací.

Připojení kuličky se provádí pomocí nanesení tavidla nebo pájecí pasty přímo na kuličku nebo na pájecí plošku, na kterou má být připojena. Při použití tavidla i pájecí pasty je kulička lépe zafixovaná na své pozici než při použití samotného tavidla.

1.4.1 Nanášení tavidla

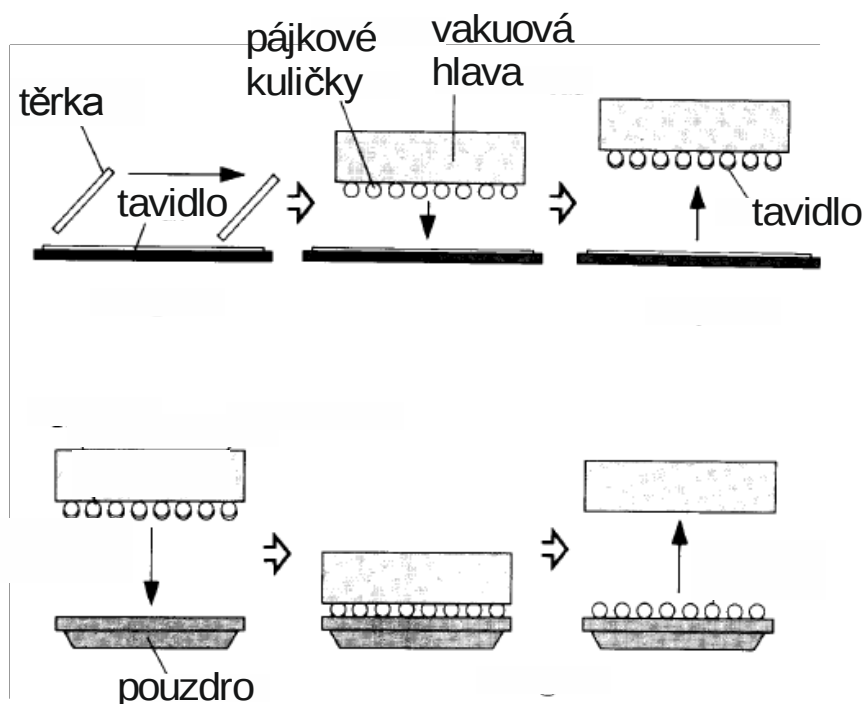
Existuje více metod nanášení tavidla, mezi hlavní metody patří tyto:

- přenos pomocí kuliček (Ball transfer using vacuum head)
- přenos tiskem (printing)
- přenos pomocí pinů (pin transfer)
- přenos pomocí dávkovače (dispenzer)

Přenos pomocí kuliček

Přenos tavidla pomocí kuliček probíhá v podstatě ve třech krocích, nejprve rovnoměrně rozetřeme tavidlo těrkou po podložce a uchytíme jednotlivé kuličky o požadovaném rozměru

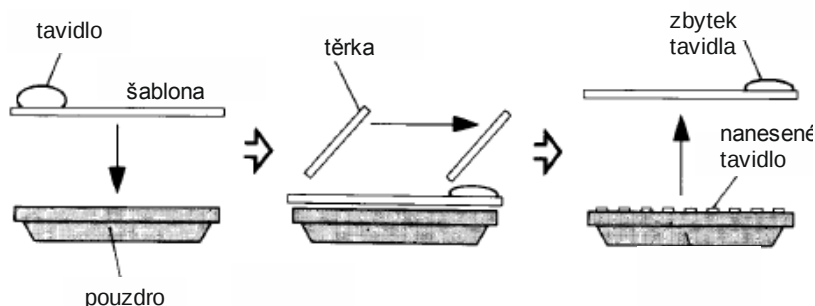
do vakuové hlavy. Dále na kuličky uchycené ve vakuové hlavě nanese tavidlo jednoduchým přiblížením na dostatečnou vzdálenost, aby došlo k přenesení tavidla na kuličky. Následně umístíme kuličky s naneseným tavidlem na substrát nebo pouzdro (viz. Obr. 1.9). Velká výhoda této metody je v tom, že nanášení tavidla na pájecí plošky a umisťování kuliček probíhá ve stejném kroku, což nám ušetří čas.



Obr. 1.9: Přenos tavidla pomocí kuliček [1]

Tisk

Při metodě tisku se tavidlo nanáší na pájecí plošky přes tiskovou šablonu, která je většinou kovová. Tloušťka šablony určuje výslednou tloušťku vrstvy naneseného tavidla. Šablona se přitiskne k substrátu nebo k pouzdro a přes ni se pomocí těrky nanese tavidlo (viz. Obr. 1.10).



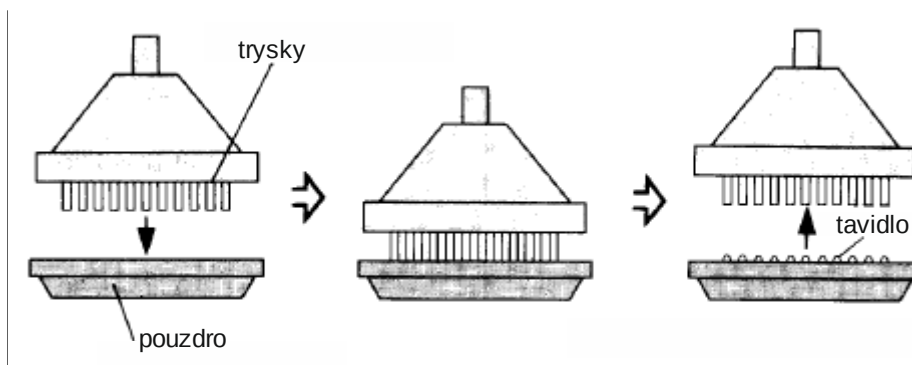
Obr. 1.10: Tisk tavidla [1]

Přenos pomocí pinů

Tato metoda se podobá metodě přenosu pomocí kuliček. Rozdíl je v tom, že k přenosu tavidla používáme piny, na které se nanese tavidlo z podložky a následně se piny přiloží k pájecím ploškám na substrátu nebo na pouzdru, následuje nanesení kuliček, například pomocí vakuové hlavy.

Přenos pomocí dávkovače

Tavidlo se aplikuje pomocí dávkovače, který dávkuje potřebné množství tavidla na určené místo a následuje nanesení kuliček. Nevýhodou oproti ostatním metodám je fakt, že dávkovací zařízení je složitější a dražší než ostatní metody nanášení. Tavidlo lze nanášet soustavou trysek, čímž dosáhneme vysoké rychlosti nanášení, ale omezuje flexibilitu procesu jako takového, kdy je potřeba jiná konfigurace trysek pro rozdílné rozložení pájecích plošek. Pokud požadujeme naopak vysokou flexibilitu, například pro malosériovou výrobu, můžeme použít jen jednu trysku, kterou lze programovat podle potřeby za cenu snížení rychlosti nanášení tavidla. Obr. 1.11 ilustruje průběh nanášení tavidla pomocí dávkovače.



Obr. 1.11: Přenos pomocí dávkovače [1]

1.4.2 Manipulace s kuličkami

Pro správné zapájení kuličkového spoje je potřeba přesné umístění pájkových kuliček, na to je zapotřebí přesných manipulačních zařízení. U manipulačních zařízení je vyžadována rychlost, přesnost umístění, opakovatelnost procesu a flexibilita. Nejrozšířenější metody manipulace s pájkovými kuličkami jsou

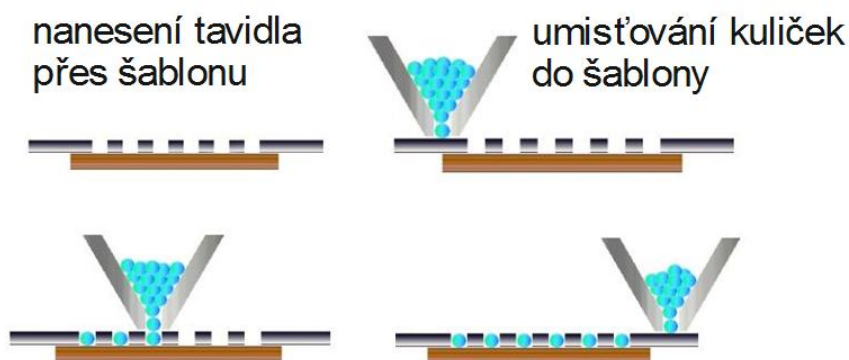
- vakuová hlava (Vacuum Head)
- nanášení kuliček (tisk)

Vakuová hlava

Tato metoda využívá vakua k vyzvednutí a následnému udržení kuličky na konci trysky. Abychom zajistili dobrou manipulovatelnost s kuličkou, je třeba, aby měla co nejvyšší kulatost a její povrch byl maximálně hladký. Při nedostatečném splnění těchto podmínek může dojít k uvolnění kuličky z trysky nebo ke špatnému umístění. Trysky vakuové hlavy s pájkovými kuličkami jsou rozmístěny tak aby odpovídalo jejich rozmístění požadovanému vzoru umístění. Součástí vakuové hlavy také může detekční systém složený z pole diod a průtokových senzorů, díky kterým lze určit, jestli na konci dané trysky kulička chybí. Mezikrokem při umísťování kuliček může být i například namočení kuliček pájky do tavidla (Ball transfer using vacuum head). Vakuová hlava se pohybuje pouze ve vertikálním směru nad substrátem, na který budou následně nanесeny pájkové kuličky. Proto je třeba, aby kuličky určené k vyzvednutí na vakuovou hlavu byly dopraveny na podkladu, který se pohybuje v horizontálním směru. Na tento podklad jsou kuličky dopravovány ze zásobníku, který je součástí zařízení. Ze zásobníku jsou pájkové kuličky samospádově dopravovány na podložku, kde jsou podle požadavků umístěny k následnému vyzvednutí.

Nanášení kuliček

Nanášení kuliček (Ball Drop) je další metodou jak dostat pájkové kuličky na odpovídající pozice. Tato metoda se velmi podobá tisku, rozdíl je v tom, že používáme mnohem větší částice (kuličky). Pro nanесení pájkových kuliček potřebujeme šablonu, která má volné plochy na požadované pozici kuličky. Před nanесením kuličky se zpravidla přes šablonu nanесе tavidlo. Kuličky se přenášejí do šablony ze zásobníku, který postupně přejede nad všemi otvory v šabloně, kam přijde kulička (viz. Obr. 1.12). Oproti metodě používající vakuovou hlavu je metoda tisknutí sice levnější, ale nelze efektivně zjistit, zda byla kulička dopravena na svou pozici.



Obr. 1.12: Metoda tisku kuliček [4]

1.5 Reballing

V průběhu používání komponent připojených pomocí pájkových kuliček (např. BGA pouzdro) může dojít ke zhoršení tepelné vodivosti, elektrických vlastností nebo k utržení kuličky ze substrátu nebo pouzdra. V takovém případě je třeba kuličky vyměnit, vzhledem k tomu, že by výměna jedné pájkové kuličky na pouzdra byla technologicky náročná, je zapotřebí vyměnit všechny kuličky. U všech metod výměny kuliček je potřeba nejprve nanést potřebné množství tavidla a odstranit staré kuličky, zbytky pájky a ostatní nečistoty z pouzdra. Při výměně kuliček je třeba také dbát na teplotní zatížitelnost zapouzďřeného obvodu, celé pouzdro totiž během běžných výměn (např. Šablonová nebo reballing páskou) prochází 4 teplotními cykly:

1. odstranění pouzdra ze substrátu
2. odstranění starých pájkových kuliček z pouzdra
3. připájení nových kuliček na pouzdro
4. připájení pouzdra na substrát

Z toho vyplývá, že se zvyšujícím se počtem výměn značně klesá spolehlivost zapouzďřeného obvodu jako celku.

1.5.1 Šablonové osazení

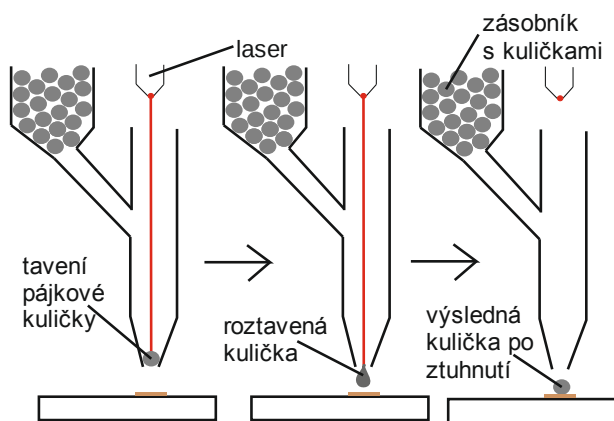
Výměna kuliček za pomoci šablony je jednou z nejjednodušších metod výměn. Po očištění pouzdra se přiloží šablona s požadovaným počtem a průměrem otvorů na pájkové kuličky, tyto otvory jsou po celé šabloně rovnoměrně rozmístěny. Kuličky, pod kterými nejsou pájecí plošky, nebudou zapájeny a po přetavení se snadno odstraní. Po přiložení šablony se přes ni nanese tavidlo a následně se do otvorů vpraví kuličky jednoduchým nasypáním na šablonu a postupným setřásáním. Důležité je, aby na povrchu šablony nezůstaly žádné kuličky. Mohlo by dojít k propojení s kuličkami na pájecích ploškách a při odstranění šablony by došlo k poškození čerstvě zapájených kuliček. Celé pouzdro i se šablonou se přetaví, po přetavení a vychladnutí se šablona odstraní. Tato metoda není příliš vhodná pro výměnu pájkových kuliček většího množství pouzder. Není také vhodná pro výměnu kuliček příliš malých rozměrů, ve většině případů se touto metodou vyměňují kuličky o průměru od 450μm do 800μm. Šablony jsou k dostání v různých velikostech podle potřeby. Materiál, ze kterého jsou vyrobeny, musí být nepájitelný (hliník nebo nerez), aby nedošlo k připájení kuliček k šabloně nebo k připájení šablony k pájecím ploškám pouzdra.

1.5.2 Osazení reballing páskou

Další metodou reballingu je výměna kuliček za pomoci pásky (preformed reballing tape), která se nanáší po odstranění starých kuliček. Tato páska se skládá ze tří složek. Hlavní součástí jsou pochopitelně pájkové kuličky, druhá část je polyimidem tvořený fixační celek s rozmístěním otvorů souhlasně s pájecími ploškami substrátu. Třetí část je tvořena páskou citlivou na tlak, která může být vyrobena také z materiálu na bázi polyimidu, na jejíž vrchní straně je lepidlo fixující pájkové kuličky. Před samotným přetavením je třeba odstranit pásku, která kryje lepidlo, přiložit pouzdro a sesouhlasit otvory pásky obsahující pájecí kuličky s pájecími ploškami na pouzdru. Následuje zapájení a po zapájení se odstraňují zbytky pásky.

1.5.3 Osazení kuliček s pomocí laseru

Tato metoda je založena na roztavení pájkové kuličky nad pájecí ploškou a jejím následným tuhnutím na ní. Nástroj pro laserové osazení kuliček je složen ze zásobníku kuliček, zdroje laseru, trysky a případně přívodu pro inertní plyn. Pájková kulička ze zásobníku se dobarví k hrdlu trysky (to má průměr nižší než je průměr kuličky) kde se působením laseru roztaví a steče na pájecí plošku. Po stečení na plošku a jejím smáčení přestane působit laser, pájka začne tuhnout a vlivem povrchového napětí vytvoří kuličku (viz. Obr. 1.13).



Obr. 1.13: Osazení kuličky pomocí laseru [16]

Touto metodou lze snadno vyměnit i jednotlivé chybějící kuličky. Vysoká flexibilita této metody je ovšem vyvážena cenou potřebného zařízení. Dalším problémem je použití vhodné pájecí slitiny s dostatečným povrchovým napětím v tekutém stavu aby vytvořila pájkovou kuličku s dostatečnou přesností, proto je vhodné pro bezolovnaté pájecí slitiny použití dusíkové atmosféry. Velkou výhodou je, že nedochází k zahřívání celého pouzdra, ale

zahřívá se pouze pájková kulička a pájecí ploška, což značně sníží teplotní namáhání celého pouzdra.

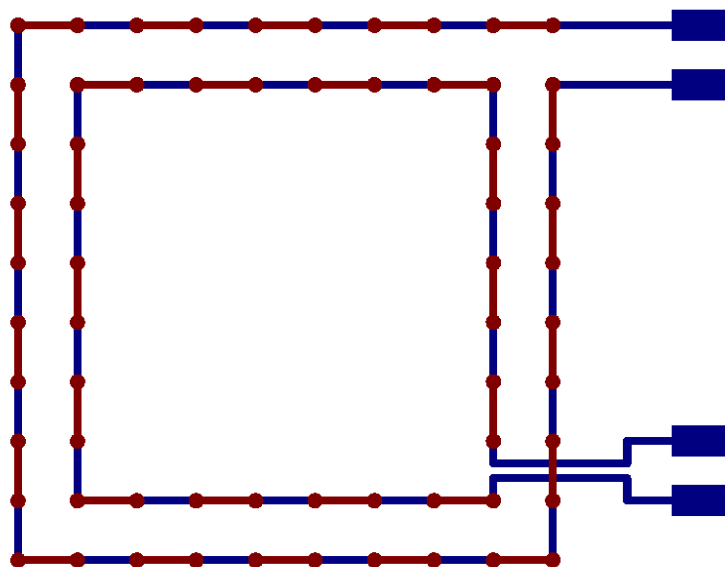
2 Přípravná část

2.1 Návrh testovacího motivu

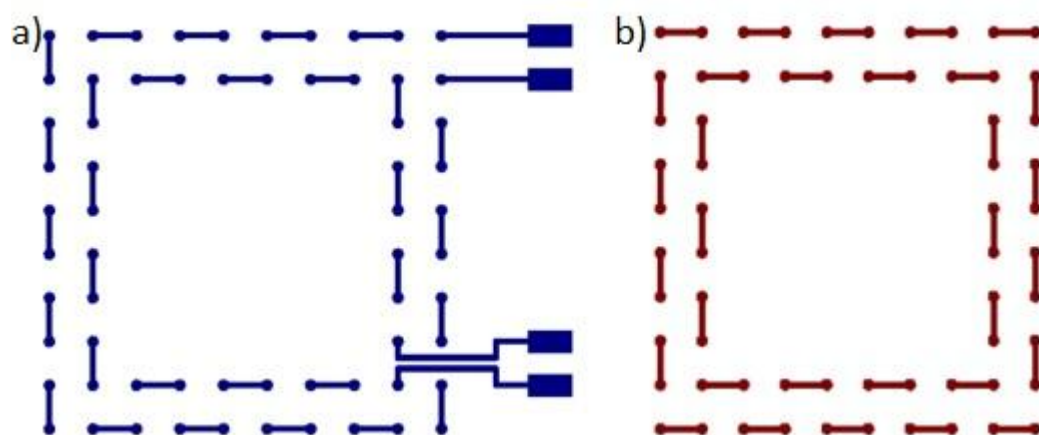
Pro otestování parametrů BGA spojů je navrhnut testovací motiv viz. Obr. 2.1. Motiv bude zhotoven vodivou tlustovrstvou pastou metodou sítotisku na keramický substrát z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Samotný návrh zahrnuje spodní vodivou část (viz Obr. 2.1, modrou barvou), vrchní vodivou část (viz Obr. 2.1, červenou barvou), která po zapájení bude představovat BGA pouzdro. V prvních částech experimentu se bude testování provádět pouze na spodní části viz. Obr. 2.2a) a vrchní díl bude použit až při vytváření konečného výrobku. Obdélníkové plošky na spodní části motivu slouží pro otestování vodivosti zapájeného celku.

Rozměry:

- substrát: 50x50x0,65mm
- šířka vodivých cest: 0,3mm
- průměr kulových plošek: 0,6mm
- rozteč kulových plošek: 2,54mm



Obr. 2.1: Testovací motiv, celý



Obr. 2.2: Testovací motiv a) spodní díl b) vrchní díl

2.2 Technologie a pracovní postupy použité v experimentální části

2.2.1 Sítotisk

Při nanášení vodivé pasty na substrát byl použit sítotiskový poloautomat AUREL, pro tisk dielektrické pasty byl použit laboratorní přípravek pro ruční sítotisk a pro nanesení definované tloušťky nepájivé masky byl použit také ruční sítotisk.

Sítotiskem lze nanášet tixotropní látky, které při zvýšeném tlaku zvyšují svoji viskozitu. Nanášení pasty se provádí přes síto s vlákny z nerezové oceli nebo z polyesteru, která jsou napnutá na rámu síta. Základními parametry síta jsou hustota tkaniny, která určuje počet ok síta na jednotku délky a světlnost, která definuje otevřenou plochu síta. Tloušťka nanášené vrstvy je určena průměrem vlákna a typem tkané osnovy. Síta z nerezové oceli jsou vhodná pro nanášení přesných struktur a jejich předností je dlouhá životnost. Pro běžné aplikace se používají síta polyesterová, která se vyznačují především nízkou cenou. Faktory působící na sítotisk dělíme do dvou skupin:

- vnitřní (tyto faktory se projevují přímo při tisku)
 - odskok síta
 - rychlost stěrky
 - tlak stěrky
 - úhel stěrky
- vnější (tyto faktory volíme před započítím samotného procesu)
 - typ síta
 - typ šablony
 - parametry nanášené pasty
 - typem substrátu
 - materiál stěrky
 - provedení stěrky

Sítotiskovou šablonu lze vytvořit dvěma způsoby. Přímá šablona je zhotovena vtlačáním fotocitlivého materiálu do ok síta, který je následně osvětlen a vlivem působení světla dochází k polymeraci, následně je nevytvrzený fotocitlivý materiál odstraněn. Nepřímá šablona je zhotovena zvlášť, na plastové nebo kovové folii, a před sítotiskem je se sítem pevně spojena. Tisk se provádí na vakuově připevněný keramický substrát přes síto

s vytvořeným motivem, které je umístěno od keramického substrátu v určité vzdálenosti nazývané odskok. Na síto je nanese pasta s požadovanými vlastnostmi a pomocí stěrky je protlačována do volných ok síta. Po ukončení pohybu stěrky se síto vrátí do původní vzdálenosti od substrátu a současně se přenese pasta z ok síta na substrát. [18]

2.2.2 Tisk pájecí pasty a tavidla

K nanášení pájecí pasty na vodivé plošky byl využit laboratorní přípravek pro ruční šablonový tisk.

Na rozdíl od sítotisku je motiv, který chceme natisknout, vyhotoven na pevném materiálu, tato šablona se přikládá přímo na substrát. Na šablonu se nanese potřebné množství materiálu a pohybem stěrky se nanese do volných otvorů motivu. Po nanesení pasty do otvoru a ukončení pohybu stěrky je potřeba odtrhnout šablonu od substrátu s dostatečnou rychlostí, aby se nanášená pasta oddělila od stěn šablony a přitom si zachovala požadovaný tvar. Setkáváme se s různými typy šablon například

- chemicky leptané
- elektrogalvanicky nanášené
- polymerní
- řezané laserem
- vrtané

Množství přenesené pasty na substrát je určeno pouze plochou motivu a tloušťkou šablony. Tloušťky šablon se mohou pohybovat od 0,5mm do 0,1mm podle potřeb různých aplikací. Množstvím nanesené pasty jsou ovlivněny jak mechanické vlastnosti, tak elektrické. [18][19]

2.2.3 Nepájivá maska a její aplikace

Při experimentu byla nepájivá maska použita jako nepájivá, nesmáčivá oddělovací část pro vytvoření správného tvaru pájeného spoje.

Nepájivá maska slouží především jako elektroizolační a oddělovací ochranná vrstva nanesená na povrch daného materiálu. Tloušťka nepájivé masky se může pohybovat od 10μm až do 100μm a je složena ze sloučenin na bázi epoxidů, akrylátů nebo jejich kombinací. Použitím nepájivé masky lze minimalizovat tvorbu zkratů, usnadnit optickou kontrolu, chránit substrát před klimatickými vlivy, chránit tenké vodiče před mechanickým poškozením a

snižuje spotřebu pájky při strojním pájení. Nepájivé masky lze dělit na tekuté a tuhé. Tekutou nepájivou masku můžeme nanášet sítotiskem, clonou, elektrostaticky nebo navalováním. Při nanášení sítotiskové nepájivé masky přes síto je přesnost natisknutého motivu nepájivé masky dána sesouhlasením síta se substrátem, vlastním protažením síta a technologií tisku. Dalším možným způsobem vytvoření požadovaného obrazce je použití fotocitlivé nepájivé masky, kdy je požadovaný obrazec získán exponováním přes příslušnou filmovou předlohu, vyvoláním a konečným vytvrzením. Tuhé fotocitlivé masky se nanášejí vakuovým laminováním. Při manipulaci s fotocitlivou nepájivou maskou je třeba zamezit přístupu světla, aby nedoházelo k nechtěným polymeracím nepájivé masky. [19]

Postup při výrobě tekuté fotocitlivé nepájivé masky aplikované sítotiskem:

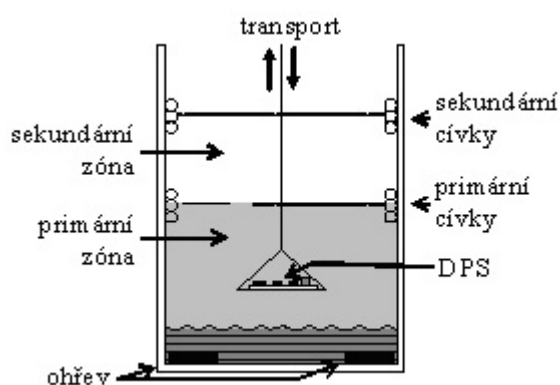
1. Nanesení přes síto
2. Předsušení
3. Expozice
4. Vyvolání
5. Vytvrzení

2.2.4 Pájení v parách

Ve výsledku by měl vrchní díl zamýšleného celku představovat BGA pouzdro, proto lze s výhodou použít pájení v parách, které je vhodné pro pájení atypicky tvarovaných materiálů, flexibilních materiálů, konektorů, BGA pouzder nebo 3D struktur.

Při pájení v parách se využívá skupenského tepla vypařované kapaliny, které dodává teplo pro pájecí proces. Toto skupenské teplo je uvolňováno ve formě páry inertní tekutiny, páry následně kondenzují na objektech s teplotou nižší než je teplota samotných par a předávají tak objektu svoje teplo a objekt je tímto zahříván. Vypařovaná kapalina vytváří husté nasycené páry, které vytlačují vzduch a vlhkost, pájení tedy probíhá bez přítomnosti kyslíku. Nejvyšší teplota dosažená při pájení odpovídá bodu varu použité kapaliny za atmosférického tlaku, tímto je zamezeno ohřátí nad definovanou teplotu a zamezeno poškození citlivých součástek. Při pájení v parách je pájený materiál zahříván na všech místech stejně, nezáleží na geometrii nebo barvě. Pájení v parách poskytuje inertní pájecí prostředí, bez použití dusíku (použití dusíku pouze redukuje obsah kyslíku, u nasycených par probíhá pájení zcela bez přítomnosti kyslíku), efektivní a rovnoměrné zahřívání desky. Koeficient přenosu tepla je u kondenzačního pájení podstatně vyšší, než u pájení horkým plynem, z toho plyne efektivnější využití energie a nižší náklady. U použitého kapalného

média je třeba zajištění jeho inertních vlastností a nezávadnosti jak z hlediska lidského zdraví, tak z hlediska jeho dopadu na životní prostředí. Tyto podmínky splňuje perforovaný polyeter (PFPE), který je také znám pod obchodními značkami jako Fomblin nebo Galden. Při větší molekulové hmotnosti použité kapaliny je i hustota nasycených par vyšší a tím pádem se zvyšuje i bod varu kapaliny. Výhodou pájení v parách je reprodukovatelnost a opakovatelnost dosažených výsledků. S ohledem na nižší smáčecí schopnost bezolovnatých slitin cínu v porovnání s olovnatými pájecími slitinami je výhodné užití inertní atmosféry v podobě nasycených par, které poskytují vynikající smáčecí podmínky pro přetavení. Problémem při pájení v parách je ten, že většina výrobců pájecích past doporučuje 3 zóny teplotního profilu, kterého je obtížné dosáhnout v jedné komoře pro pájení v parách. Pájecí pasty potřebují určitý čas na smáčení, aktivace tavidla a odpaření těkavých složek pájecí pasty, před přechodem do kapalného stavu. Teplotní profil pro pájení v parách je obvykle lineární. Upravení teplotního profilu lze řešit změnou výšky pájených komponent v pájecí komoře viz. Obr. 2.3. Druhým možným řešením je umístění chladicího okruhu na stěnách pájecí komory, které při umístění pájených komponent ve stejné výšce sníží nárůst teploty kondenzací par na chladicím okruhu (teplota chladicího okruhu musí být nižší než teplota pájených komponent).



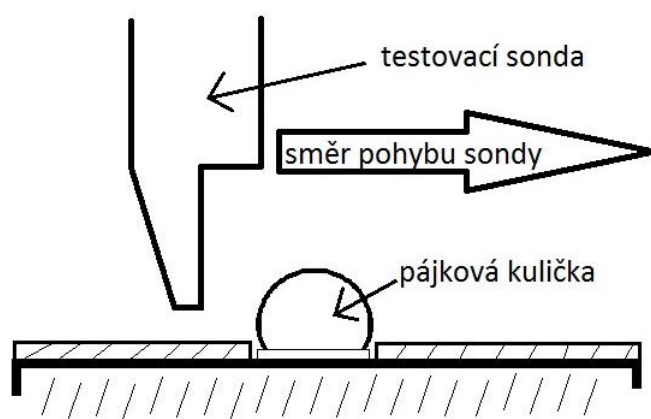
Obr. 2.3: Schéma zařízení pro pájení v parách [18]

2.2.5 Zkouška stříhem

V experimentální části složí zkouška stříhem ke srovnání mechanické pevnosti spojů, které jsou testovány za stejných podmínek.

Zkouška stříhem je destruktivní diagnostická metoda, jejímž úkolem je zjistit mechanickou odolnost spojů BGA pouzdra nebo Flip Chipu. Tato metoda získala na oblibě především z důvodu relativně jednoduchého provedení a zároveň dostatečné vypovídací hodnoty získaných výsledků o kvalitě spoje. Na pouzdro mohou působit smykové síly během

výroby, manipulace i při samotném provozu. Kritéria pro testování BGA spojů stříhem jsou stanovena normou vydanou nezávislou standardizační organizací JEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council) JESD22-B117. Před samotným započítáním zkoušky je třeba dostatečně upevnit substrát, který lze upevnit v horizontální i vertikální poloze, s testovanými spoji, aby se zamezilo jeho pohybu ve všech směrech, čímž by mohlo dojít k ovlivnění získaných výsledků. Sonda, která na kuličku působí, musí být vyrobena z pevných neohebných materiálů (např. ocel). Aby se předešlo jejímu ohybu, pohybuje se rovnoběžně s povrchem substrátu a svírá s ním úhel $90^\circ \pm 5^\circ$ (viz. Obr. 2.4).



Obr. 2.4: Schéma uspořádání při zkoušce stříhem [21]

Spodní strana sondy by se měla pohybovat ve vzdálenosti od povrchu maximálně 25% celkové výšky (zapájené) kuličky a minimálně $50\mu\text{m}$ od povrchu substrátu, aby nedošlo ke kontaktu sondy se substrátem. Splněním těchto podmínek by mělo být zajištěno, že sonda při kontaktu s kuličkou bude působit v místě maximálního průměru kuličky. Hlavními nastavovanými parametry pro zkoušku stříhem jsou vzdálenost sondy od substrátu a její rychlost. Tyto parametry výrazně ovlivňují výslednou pevnost kuličky, při nižší vzdálenosti sondy od substrátu se výsledná maximální síla působící na kuličku zvyšuje, podobně se i zvyšuje maximální působící síla při vyšší rychlosti sondy. V průběhu trhání je také důležité uchování konstantní rychlosti sondy. Při samotném vyhodnocení testu může dojít ke dvěma základním případům, které závisí pouze na maximálním povoleném zatížení zkoumané kuličky. V prvním případě kulička vydrží působení testovací síly, nedojde k jejímu odtržení a bude pouze v místě působení sondy deformovaná. Při dalším pokusu o její odtržení je pak pochopitelně potřebná síla k odtržení nižší, než by bylo potřeba při předešlém testování. Ve druhém případě kulička již nesplní kritéria pro úspěšný výsledek prováděného testu a dojde k jejímu odtržení, výraznějšímu poškození nebo k ovlivnění testovací sondy. Výsledky

neúspěšného testu lze dále dělit do dalších dvou skupin. Do první skupiny se řadí odtržení kuličky v důsledku příliš velké působící síly za přijatelných podmínek. V tomto případě mají získaná data dostatečnou vypovídací hodnotu a lze je použít k dalšímu zpracování. Jsou to především tyto případy:

- odstříhnutí kuličky
- zvednutí pájecí plošky i s kuličkou

Do druhé skupiny se řadí případy, které nemají dostatečnou vypovídací hodnotu a nelze je proto použít pro další zpracování. Tento fakt je způsoben testováním za nepřijatelných podmínek nebo špatnou materiálovou kombinací.

- odtržení kuličky vlivem nedostatečného smočení pájecí plošky
- odtržení pouze vršku kuličky v důsledku příliš velké vzdálenosti sondy od substrátu
- kontakt sondy se substrátem nebo s ostatními kuličkami

V případě, že dojde k odtržení kuličky v místě vrstvy intermetalických sloučenin (na plošce zůstane relativně hladká a tenká vrstva pájecí slitiny), lze odtržení kuličky zařadit do skupiny s dostatečnou vypovídací hodnotou, pokud dosáhne spoj potřebné mezi pevnosti. Pro další zpracování naměřených dat je tedy třeba zjistit příčiny neúspěšného testování.

3 Experimentální část

3.1 Použité materiály, postup

Cílem experimentu bylo zjistit, zda zkoumaná materiálová kombinace bude po zapájení splňovat požadavky pro správný tvar spoje a dostatečnou mechanickou pevnost. Při experimentu byly použity následující materiály:

Vodivé TLV pasty:

- Tesla Lanškroun TT5210 (Ag, Pd)
- ESL 9635 HG (Ag, Pd)
- CSP 1381 (Ag)
- ESL 9912-KFL (Ag)
- ESL 9695-G (Ag, Pd)
- ESL 9695-G (Ag, Pd)

Dielektrická TLV pasta:

- ESL 4771-P1

Pájecí pasty:

- Cobar SGM-XM3S
- Cobar Sn100c-XF3
- Cobar SAC3-XF3
- Cobar Bi58-XM5S
- Kester NXG1-HF

Tavidla:

- Kester TSF 6852

Pájkové kuličky:

- Senju #7097 d=0,76mm SAC405

Šablony:

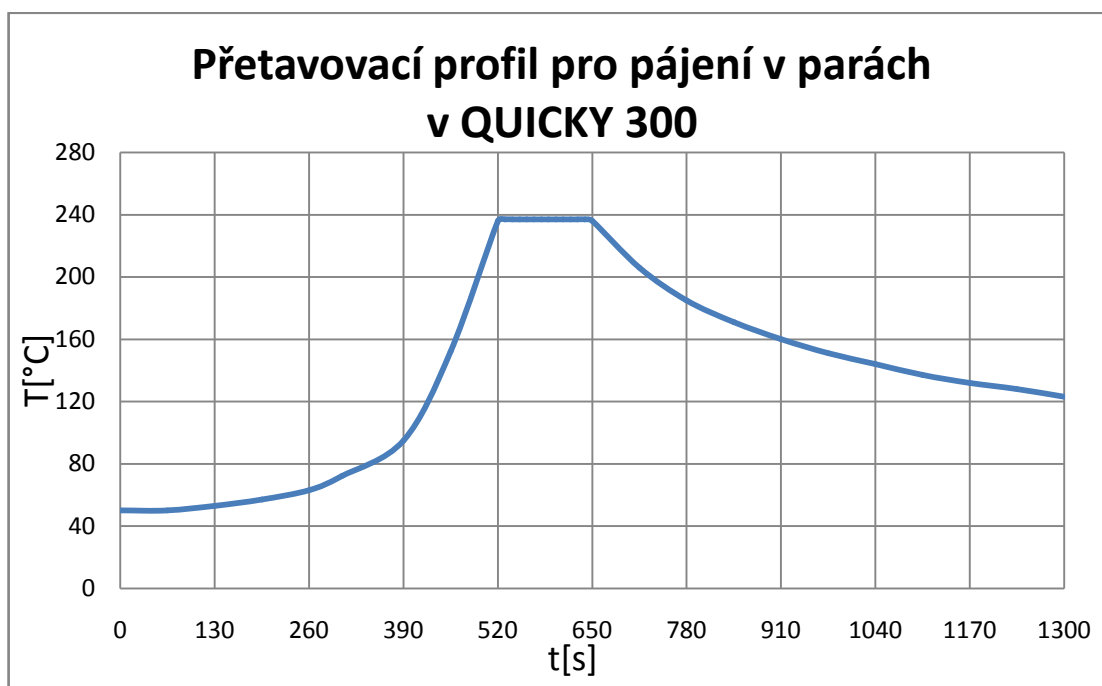
- nerezová šablona o tloušťce 0,1mm s otvory o průměru 0,6mm
- mosazná šablona o tloušťce 0,2mm s otvory o průměru 0,8mm

Použitá síta:

- síto pro sítotiskový poloautomat mesh 230 úhel 45°
- síto pro ruční sítotisk mesh 300 úhel 45°

Obecně byly jednotlivé variace experimentu realizovány zhruba podle stejného postupu:

1. Vytvoření vodivého motivu na keramický substrát
 - 1.1. Nanesení vodivé pasty sítotiskem na poloautomatu AUREL
 - 1.2. Sušení po dobu 15 minut při teplotě 125°C
 - 1.3. Výpal v průběžné peci při maximální teplotě 850°C po dobu 60 minut
2. Vytvoření motivu nepájecí masky nebo izolační vrstvy (viz. kapitoly Sestavy s nepájecí maskou a Sestavy s dielektrickou pastou)
3. Nanesení pájecí pasty nebo tavidla šablonovým tiskem
4. Osazení pájkovými kuličkami
5. Pájení v parách (přetavovací profil viz. Obr. 3.1)
6. Optická kontrola
7. Mechanická kontrola



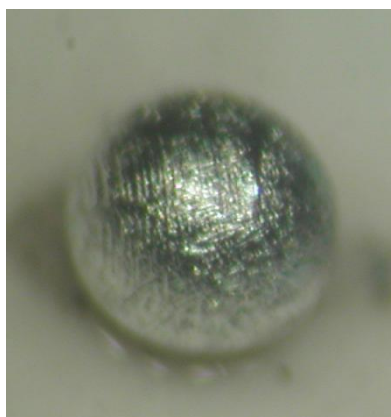
Obr. 3.1: Přetavovací profil pájení v parách

3.2 Sestavy pouze s pájecí pastou nebo tavidlem

Nejprve je bylo třeba zjistit, zda je vůbec možné vytvořit kuličkový spoj na vodivé pastě s požadovanými vlastnostmi pouze za pomoci tavidla, případně pájecí pasty. V tomto případě bylo třeba dbát na více faktorů ovlivňujících výsledek. Během experimentu bylo sledováno především, zda se nanesená pájecí pasta nebo tavidlo bude chovat k natištěné vodivé pastě agresivně, aby nedošlo k jejímu poškození. Dále bylo třeba zjistit smáčivost pájecí pasty i pájeného povrchu, což ovlivňovalo zejména výsledný vzhled pájeného spoje. A faktor, který by také mohl ovlivnit výsledné vlastnosti spoje, je množství nanesené pájecí pasty.

Vodivá pasta Tesla Lanškroun TT5210 (Ag, Pd)

Použití této vodivé pasty se z počátku jevilo jako relativně vhodné, zejména vzhledem k tomu, že při použití tavidla Kester TSF-6852 měli pájkové kuličky prakticky ideální tvar (viz. Obr. 3.2), problém ovšem byla jejich pevnost. Takto zapájené kuličky šli odstranit velmi lehce a v některých případech s pájkovou kuličkou byla odstraněna i vodivá ploška.

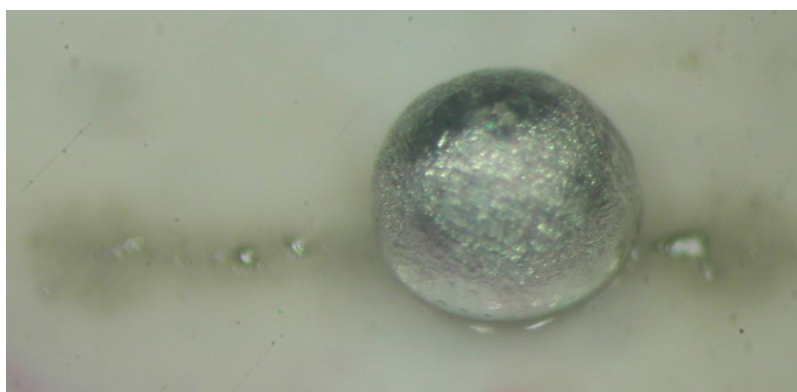


Obr. 3.2: Tvar spoje při použití vodivé pasty Tesla Lanškroun TT5210 a tavidla Kester TSF 6852

Zřejmě největším problémem, který se vyskytnul, bylo poškození vodivé plošky. Tento problém byl naštěstí pouze u této vodivé pasty, která je již delší dobu proslá, a tudíž její vlastnosti nejsou ideální. Po zapájení pomocí pájecí pasty došlo ke zničení vodivé pasty a slití pájecí slitiny viz. Obr. 3.3 a Obr. 3.4



Obr. 3.3: Zničená vodivá ploška při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3



Obr. 3.4: Zničená vodivá ploška při použití pájecí pasty Kester NXG1-HF

Tato vodivá pasta vzhledem ke svému stáří není schopná odolat působení tavidel a připájené spoje prakticky nedrží, vodivou pastu také lze velmi snadno oddělit od substrátu.

Vodivá pasta ESL 9635 HG (Ag, Pd)

Již při prvním pokusu o vytvoření spojů se objevil problém s nadměrným rozléváním pájecí slitiny po vodivých ploškách, tento jev byl také částečně závislý na použité pájecí pastě nebo tavidlu, především se tento jev projevil při kombinaci s tavidlem Kester TSF-6852 viz. Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Roztečení pájecí slitiny při použití tavidla Kester TSF 6852

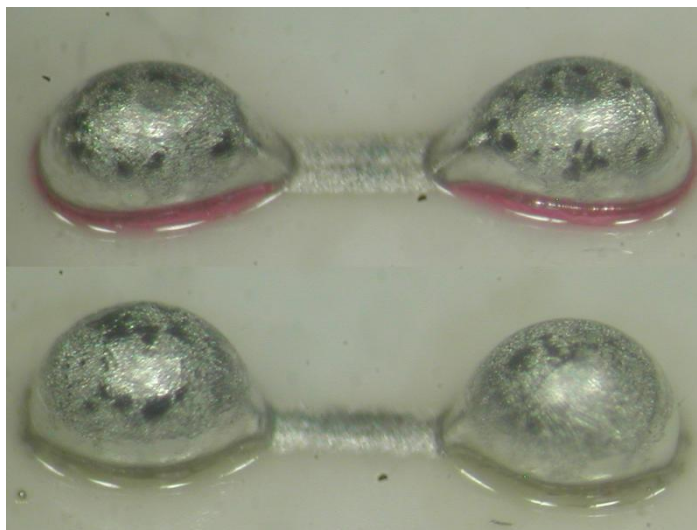
Ale ani u dalších kombinací s pájecími pastami nebo tavidlem nebyl výsledek dostačující, tato vodivá pasta vykazovala vůbec nejvyšší smáčivost ze všech. V extrémních případech došlo dokonce ke slití dvou pájkových kuliček do jedné viz. Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Slití pájecí slitiny při použití pájecí pasty Kester NXG1-HF

CSP 1381, ESL 9912-KFL (Ag)

Tyto vodivé pasty, jejichž vodivá složka obsahuje pouze stříbro, vykazovaly prakticky stejné vlastnosti se všemi materiálovými kombinacemi. Jediný rozdíl byl v mírně vyšší smáčivosti vodivé pasty CSP 1381 (nahore) oproti ESL 9912-KFL (dole) viz. Obr. 3.7.

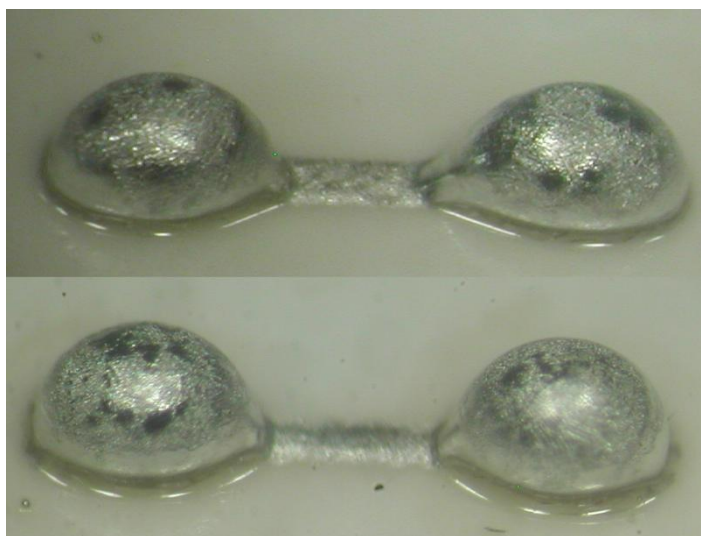


Obr. 3.7: Rozdíl ve smáčivosti vodivých past CSP 1381 a ESL 9912-KFL při použité pájecí pastě Cobar Sn100c-XF3

Vzhledem ke vhodným vlastnostem, bylo na vodivé pastě ESL 9912-KFL testován vliv množství nanesené pájecí pasty. Nanášení se provádělo šablonovým tiskem přes nerezové šablony viz. Použité materiály, postup. Z rozměrů šablon lze snadno vypočítat objem volné plochy šablony a tedy množství nanášených materiálů, při použití šablony s většími rozměry byl přenesen 3,5x vyšší objem materiálu než přes šablonu s menšími rozměry.

Ve výsledku se mechanické vlastnosti spoje při různém množství pájecí pasty výrazně neliší a vzhledový rozdíl je minimální, pouze je pájka nepatrně více rozlita do stran viz. Obr. 3.8.

V porovnání s ostatními vodivými pastami vykazovaly nejlepší výsledky ve smáčivosti, tvaru i pevnosti, jsou proto vhodné pro použití při dalších experimentech.



Obr. 3.8: Vliv množství pájecí pasty na tvar spoje

ESL 9695-G (Ag, Pd)

Oproti předchozím vodivým pastám, které obsahovaly stříbro a paladium, vykazovala tato pasta vlastnosti, které by se daly klasifikovat jako průměrné. Smáčivost vodivé pasty je při některých kombinacích vyšší a při jiných nižší viz. Obr. 3.9.



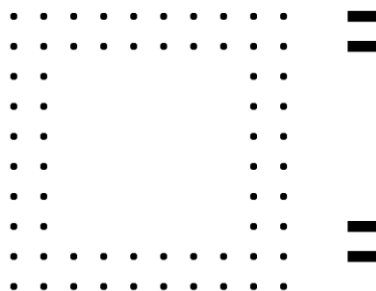
Obr. 3.9: Rozdíly ve smáčivosti vodivé pasty ESL 9695-G

Pevnost spoje byla dostatečná a je možné tuto vodivou pastu použít při dalších experimentech.

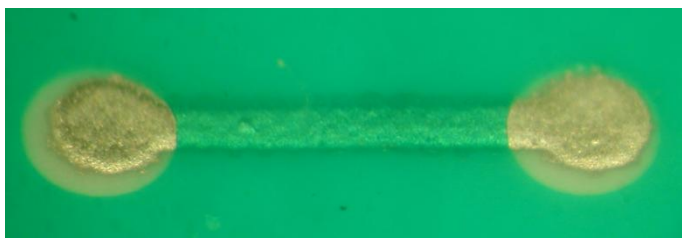
Tyto pokusy posloužily jako hrubé síto, pomocí kterého byly vyřazeny materiály a postupy s nevyhovujícími výsledky. Z výše zmíněných důvodů tedy již nebyla použita vodivá pasta Tesla Lanškroun TT5210. Přestože vodivá pasta ESL 9635 HG také nevyhověla stanoveným požadavkům, je možné ji při dalších experimentech použít vzhledem k tomu, že rozlévání pájky bude zamezeno. Z výsledků vyplývá, že množství nanesené pájecí pasty nebo tavidla nemá velký vliv kvalitu výsledného spoje, proto je zbytečné použít šablonu s většími rozměry a dále se bude používat pouze šablona s otvory o průměru 0,6mm a tloušťkou 0,1mm.

3.3 Sestavy s nepájivou maskou

Při předchozích experimentech se ukázalo, že vzhledem ke smáčivosti povrchu vodivé i pájecí pasty dochází k roztečení výsledného spoje, proto je potřeba tento nežádoucí jev odstranit. První možností je použití nepájivé masky. Při použití nepájivé masky je nejdříve potřeba navrhnout motiv, který chceme vytvořit. Vzhledem k tomu, že byla použita negativní fotocitlivá nepájivá maska, filmová předloha musí být také negativní. Pro krytí okolí plošky se spojem lze navrhnout různé motivy, které se liší způsobem krytí. Jednotlivé motivy se také mohou lišit volnou plochou okolo samotné plošky, větší plocha umožňuje lepší sesouhlasení filmové předlohy a natisknuté vodivé pasty. První možností je překrýt nepájivou maskou vše, kromě plošek spojů a kontaktů viz. Obr. 3.10 a Obr. 3.11.

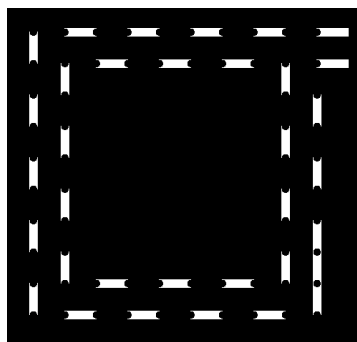


Obr. 3.10: Filmová předloha nepájivé masky - kolečka

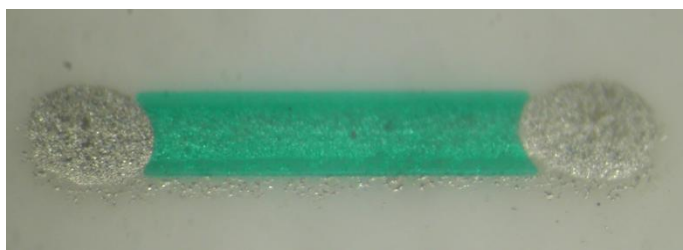


Obr. 3.11: Nanesená nepájivá maska na vodivé pastě ESL 9695-G

Další možností je překrýt pouze plošku mezi kuličkami viz. Obr. 3.12: Filmová předloha nepájivé masky – plošky a Obr. 3.13: Nanesená nepájivá maska na vodivé pastě CSP 1381.

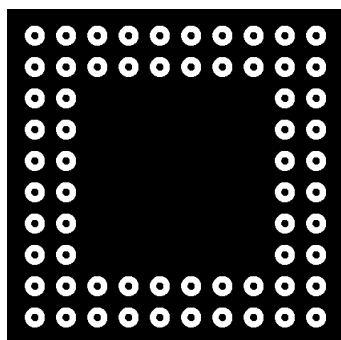


Obr. 3.12: Filmová předloha nepájivé masky – plošky

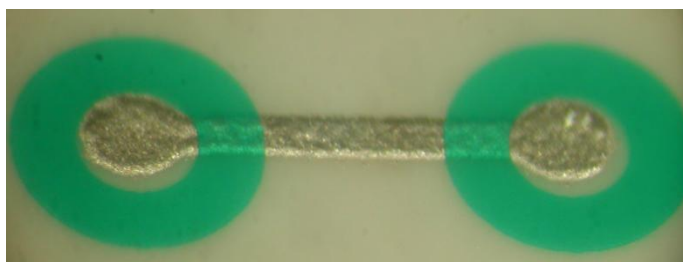


Obr. 3.13: Nanesená nepájivá maska na vodivé pastě CSP 1381

Jako nejlepší možnost se jeví motiv s kroužky okolo plošek (viz. Obr. 3.14 a Obr. 3.15), toto uspořádání je univerzální a lze ho následně použít i pro vytvoření nepájivé masky na vrchní díl zamýšlené struktury.



Obr. 3.14: Filmová předloha nepájivé masky - kroužky

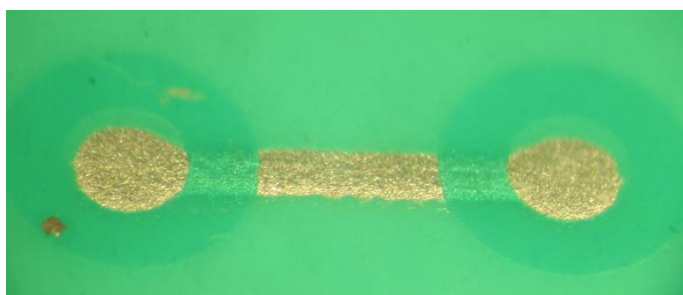


Obr. 3.15: Nanesená nepájivá maska na vodivé pastě ESL 9635 HG

Aplikovaná nepájivá maska: SunChemical Circuits CAWN2321, CAWN2432

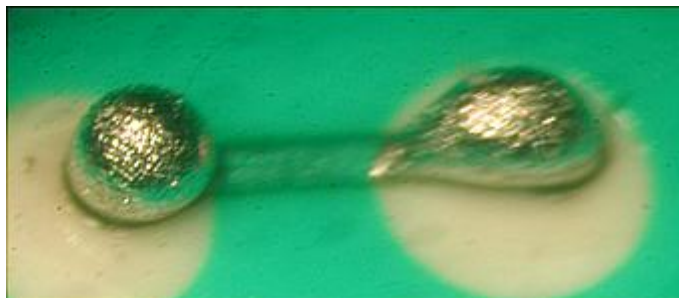
Postup výroby nepájivé masky

1. smíchání jednotlivých složek nepájivé masky
2. důkladné rozmíchání
3. nanesení fotocitlivé nepájivé masky přes síto na substrát
4. předsušení do nelepivého stavu masky po dobu 30 minut při teplotě 60°C
5. přiložení příslušné předlohy natisknutou stanou k substrátu, aby nedocházelo k podsvícení a zároveň podložit substrát pro světlo nepropustnou podložkou, aby nedocházelo k prosvícení UV záření keramikou viz. Obr. 3.16 a nedocházelo k nechtěnému polymerování nepájivé masky
6. exponování UV světlem po dobu 80s
7. vyvolání v roztoku Na_2CO_3 , kde se odstraní nezpolymerované zbytky nepájivé masky, s následným oplachem
8. vytvrzení po dobu 60 minut při teplotě 130°C



Obr. 3.16: Prosvícení keramického substrátu a nechtěná expozice

Po aplikaci nepájivé masky následovalo optické zhodnocení výsledku a vhodnost použití jednotlivých vzorků. Jak již bylo zmíněno výše, důležité bylo sesouhlasení motivu filmové předlohy motivu s vodivými ploškami. V případě nepřesného sesouhlasení může nastat případ nesouměrného ohraničení jednotlivých plošek viz. Obr. 3.17, který dobře ilustruje rozdíl ve tvaru spoje při rozdílné volné ploše nepájivé masky.

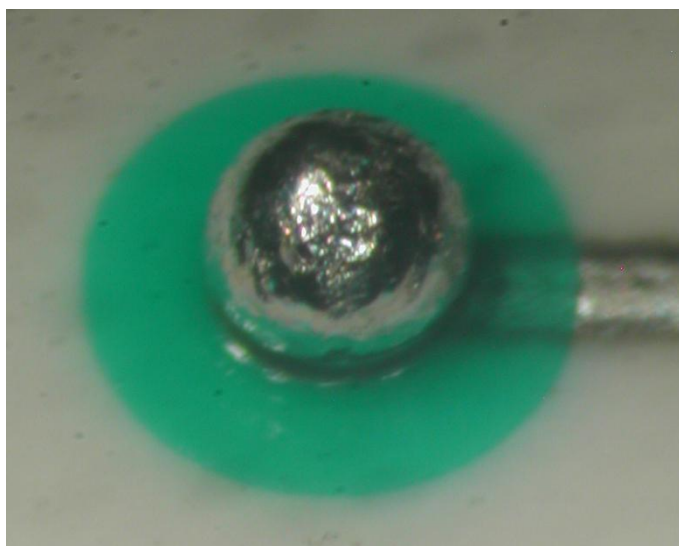


Obr. 3.17: Závislost roztečení pájecí slitiny na volném prostoru nepájkivé masky

Při experimentu byly použity vybrané vodivé pasty z předchozího experimentu a jejich chování je popsáno níže, vodivé pasty CSP 1381, ESL 9912-KFL jsou popsány společně vzhledem k jejich prakticky identickým vlastnostem.

ESL 9635 HG

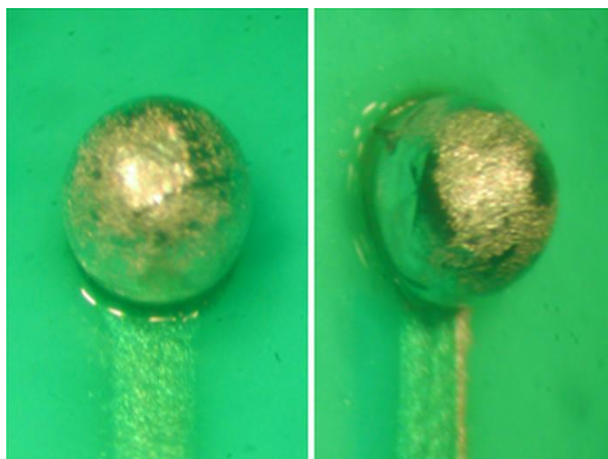
K použití této vodivé bylo přistoupeno i přes nežádoucí vlastnosti popsané v předešlé kapitole. Velká smáčivost vodivé pasty zde byla kompenzována použitím nepájkivé masky, která zamezí roztečení pájecí slitiny. Při použití vhodného motivu nepájkivé masky bylo dosaženo téměř ideálního vzhledu výsledného spoje viz. Obr. 3.18 a lze následně přistoupit k mechanické zkoušce pevnosti stříhem.



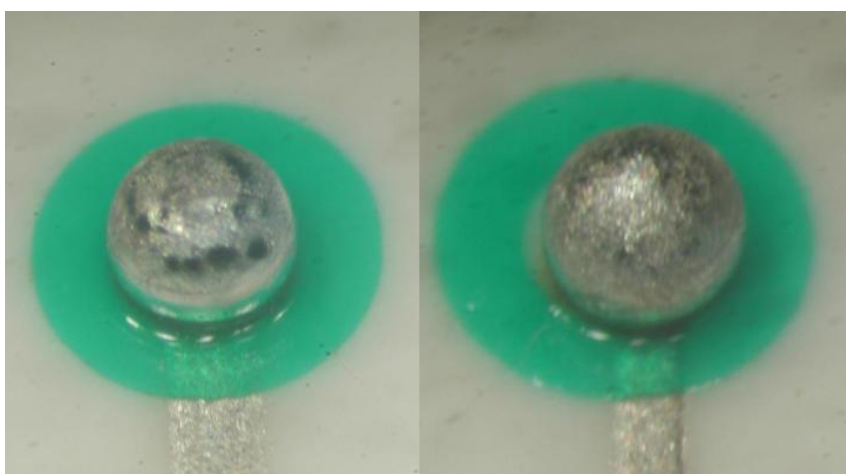
Obr. 3.18: Tvar spoje při použití nepájkivé masky

CSP 1381, ESL 9912-KFL

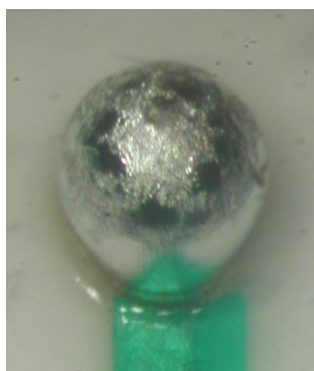
Při předchozím experimentu tyto vodivé pasty, jejíž vodivá složka obsahuje pouze stříbro, prokázaly vhodné vlastnosti. Pájecí slitina se na těchto ploškách příliš neroztékala, ale přesto bylo pro docílení správného tvaru spoje potřeba aplikovat nepájivou masku. Použití různých pájecích past na tvar spoje nemělo vliv, případné rozdíly se projeví až při mechanické zkoušce pevnosti. Ukázky jednotlivých spojů s různými motivy nepájivé masky a pájecími pastami viz. Obr. 3.19, Obr. 3.20 a Obr. 3.21. Vždy vlevo jsou spoje na vodivé pastě CSP 1381 a vpravo je použita vodivá pasta ESL 9912-KFL



Obr. 3.19: Tvar spojů při použití pájecí pasty Cobar Sn100c-XF3



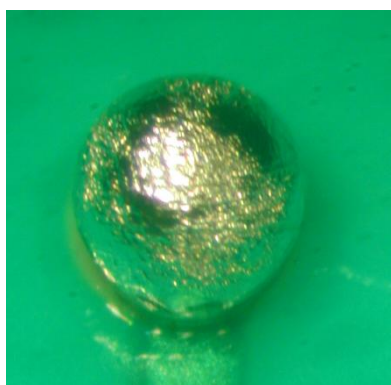
Obr. 3.20: Tvar spojů při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 vlevo a Cobar Bi58-XM5S vpravo



Obr. 3.21: Tvar spoje při použití vodivé pasty ESL 9912-KFL a pájecí pasty Cobar SAC3-XF3

ESL 9695-G

Tato vodivá pasta při předchozím experimentu také vykazovala poměrně dobré vlastnosti, při požití nepájivé masky měl výsledný spoj správný tvar a dostatečnou mechanickou pevnost, která je ověřena v kapitole Zkouška stříhem. Při správném sesouhlasení nepájivé masky s ploškami vodivé pasty neměla na výsledný tvar spoje použitá pájecí pasta velký vliv viz. Obr. 3.22.



Obr. 3.22: Tvar spoje při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3

V průběhu experimentu s aplikací nepájivé masky se neobjevil žádný závažnější problém, který by zamezoval jejímu použití na výsledném vzorku. Spoje vytvořené na substrátu s nepájivou maskou mají již požadovaný tvar a dostatečnou mechanickou pevnost, která bude následně ověřena. Vzhledem k tomu, že aplikace nepájivé masky je poměrně složitá a časově náročná, bude prozkoumána možnost zamezení roztékání pájecí slitiny také za pomoci dielektrické pasty.

3.4 Sestavy s dielektrickou pastou

Jak bylo v předchozí kapitole řečeno, bude účelem dalšího experimentu prozkoumat vliv dielektrické pasty, použité jako izolační a nepájivé vrstvy, na výslednou kvalitu spoje. Nejdříve je potřeba vybrat vhodnou dielektrickou pastu, která by splňovala především požadavek na teplotu jejího výpalu, aby nedošlo k poškození již natištěné vodivé pasty. Tento požadavek splňuje dielektrická pasta ESL 4771-P1 s teplotou výpalu 550°C. Pro aplikaci dielektrické pasty bylo nejdříve potřeba vyrobit síto pro laboratorní přípravek ručního sítotisku.

Postup výroby síta:

V první části je možné pracovat se sítem při běžném osvětlení

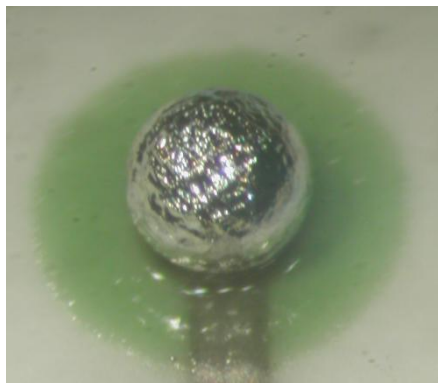
- síto je nejprve očištěno lihem za použití štětečku, aby se odstranili případné nečistoty, a následně je pod proudem tekoucí vody opláchnuto
- pro lepší smáčecí vlastnosti povrchu síta je aplikován štětečkem přípravek Autotype Universal Mesh Prep. (doba působení 90 sekund) a následně je pod proudem tekoucí vody opláchnut.

Ve druhé části je již potřeba všechny operace provádět v temné komoře za žlutého osvětlení

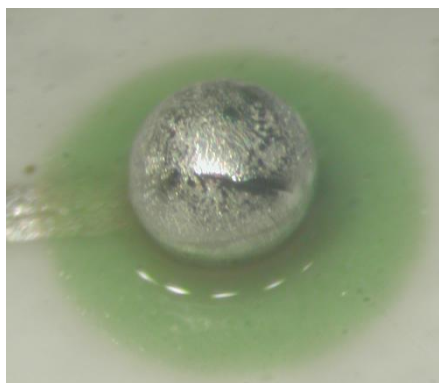
- před samotnou aplikací fotocitlivého materiálu je síto ponořeno do vody a následně pomalu vytaženo, aby zůstala voda mezi oky
- fotocitlivý materiál Kiwofilm DS je dodáván ve formě role, ze které se potřebné množství ustříhne, ponoří do vody a naválí do ok síta
- takto aplikovaný fotocitlivý materiál je dále sušen studeným vzduchem po dobu 10 minut a po jeho usušení je sloupnuta krycí folie z kapilárního filmu
- osvit fotocitlivého materiálu se provádí podobně jako u nepájivé masky, přiložením filmové předlohy stranou s natisknutým motivem, zatížením sklíčkem, umístěním rámu síta na tmavou podložku a osvitem UV lampou ze vzdálenosti 10 cm po dobu 7,5 minuty
- vyvolání motivu probíhá ve vodní lázni odstraněním osvícených částí štětečkem

Nanášený motiv dielektrické pasty je v podstatě stejný jako u nepájivé masky viz. Obr. 3.14. Nanášení dielektrické pasty sítotiskem neprobíhalo zcela bez problémů, největším problémem bylo sesouhlasení s natisknutou vodivou pastou. Po výpalu dielektrické pasty se

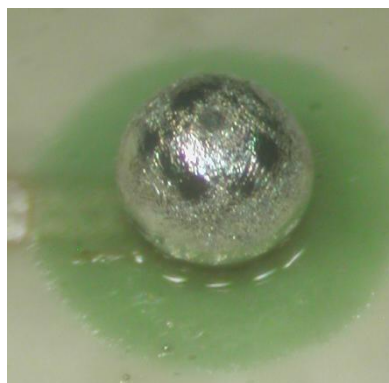
již může natisknout pájecí pasta nebo tavidlo, osadit pájkovými kuličkami a zapájet. Vzhledem k tomu, že dielektrická pasta zabránila rozlévání pájecí slitiny, vytvořily se na ploškách spoje s dostatečnou kulatostí. Na Obrázcích Obr. 3.23, Obr. 3.24, Obr. 3.25 a Obr. 3.26 jsou vidět tvary spojů na různých vodivých pastách za použití různých pájecích past a tavidla.



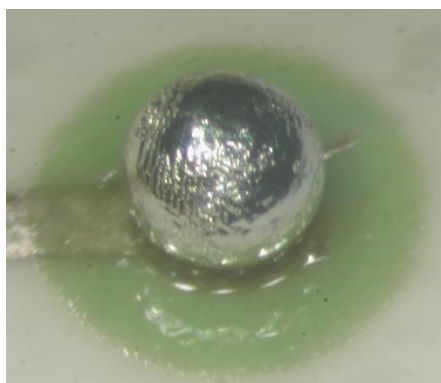
Obr. 3.23: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9635 HG s pájecí pastou Cobar Sn100c-XF3



Obr. 3.24: Vytvořený spoj na vodivé pastě CSP 1381 s tavidlem Kester TSF 6852



Obr. 3.25: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9912-KFL s pájecí pastou Cobar SAC3-XF3



Obr. 3.26: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9695-G s pájecí pastou Kester NXG1-HF

Vzhled spojů se při použití různých kombinací vodivých past s pájecími pastami nijak výrazně neměnil. Rozdíl lze ovšem čekat při zkoušce mechanické pevnosti stříhem.

3.5 Zkouška pevnosti stříhem

V předchozích experimentech byly vytvořeny spoje, u kterých je pro zhodnocení jejich kvality, potřeba provést mechanickou zkoušku stříhem. Ne všechny vytvořené spoje budou podrobeny této zkoušce. Spoje, které jsou vytvořeny bez nepájivé masky nebo dielektrické pasty, nemají požadovaný tvar, a proto se testovat nebudou. Pokud by se testovali spoje, které nemají požadovaný tvar, tedy jsou více rozteklé na vodivé plošce, vznikly by dva problémy. Prvním by byl problém s nesplněním podmínky pro výšku sondy při samotném trhání (viz. kapitola Zkouška stříhem) a druhý problém by nastal, pokud bychom vyřešili první problém snížením výšky trhu a tím pádem by nebylo možné porovnat získaná data s daty získanými pro větší výšku sondy při trhání.

Zkouška pevnosti stříhem se prováděla na testovacím zařízení Nordson Dage PC2400T. Při samotném testu byly nastaveny následující parametry

- maximální zatížení 5000g
- testovací výška 200 μ m
- rychlost pohybu 270 μ m/s
- testovací rychlost 50 μ m/s
- vzdálenost po odtržení 100 μ m

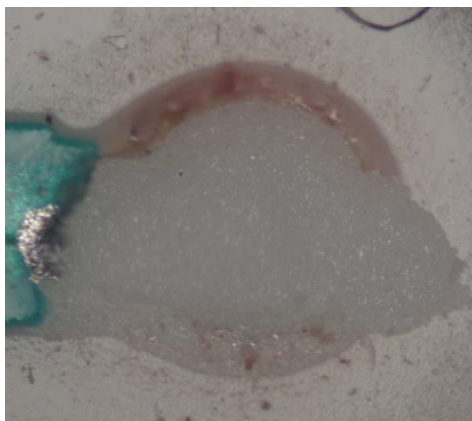
Parametry byly pro všechny testované vzorky nastaveny stejně, aby se pak jednotlivé výsledky mohly mezi sebou porovnávat.

Samotný proces trhání probíhal pro všechny testované vzorky stejně. Po nastavení parametrů se za pomoci vakua upevnil keramický substrát na podložce, sonda pro trhání se nastavila do správné pozice a poté se provedlo samotné odtržení. K odtržení pájeného spoje došlo téměř ve všech případech vzhledem k tomu, že dosahované hodnoty pevností spojů byly výrazně nižší než nastavené maximální zatížení. Situace, kdy nedošlo k odtržení, nastala pouze u dvou spojů. Příčinou nebyla vysoká mechanická pevnost, ale elastické vlastnosti spoje, které zapříčinily jeho tažení. Vysoké maximální zatížení bylo nastaveno z důvodu získání přesných výsledků u všech zkoumaných spojů. Pokud by bylo maximální zatížení nastaveno na nižší hodnotu a spoj by odolal působící síle, nebylo by možné z výsledku určit maximální zatížení testovaného spoje.

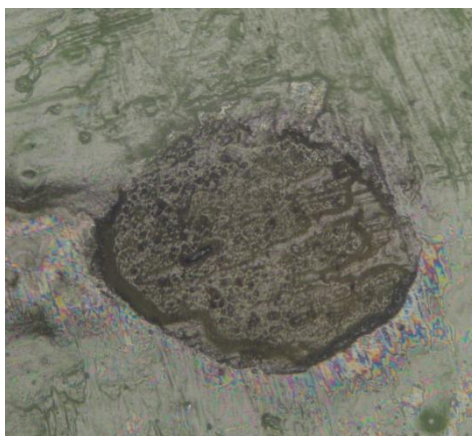
V průběhu testování došlo ke třem způsobům odstřihnutí spoje popsaným v kapitole Zkouška stříhem.



Obr. 3.27: Odstřihnutí kuličky



Obr. 3.28: Odtržení pájecí plošky i s kuličkou



Obr. 3.29: Odtržení kuličky v místě vrstvy intermetalických sloučenin

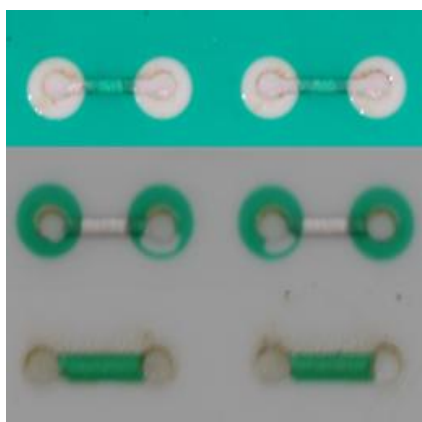
Získané výsledky byly rozděleny do dvou částí, v první části jsou shrnuty výsledky trhání spojů zapájených na substrátech s nepájivou maskou a ve druhé části jsou výsledky spojů na substrátech s dielektrickou pastou.

U testování spojů na substrátech s nepájivou maskou byly použity různé motivy nepájivé masky, testováním bylo zjištěno, že použitý motiv prakticky nemá vliv na výslednou pevnost. Ta je ovlivněna pouze mírou roztečení pájecí slitiny, při správné aplikaci nepájivé masky by měla být stejná pro různé motivy. Názorně je to ilustrováno na následujícím příkladu, kdy je pro vytvoření vodivého motivu použita pasta ESL 9695-G (Ag, Pd) a jako pájecí pasta je použita Cobar Bi58-XM5S. Následuje Tab. 2: Hodnoty pevnosti spojů pro různé motivy nepájivé masky s naměřenými hodnotami, kde je udávána minimální, maximální a průměrná hodnota maximálního dosaženého zatížení.

Tab. 2: Hodnoty pevnosti spojů pro různé motivy nepájivé masky

Motiv	Maximální hodnota [g]	Minimální hodnota [g]	Průměrná hodnota [g]
Celý	1444	1149	1224
Kroužky	1066	676	902
Cesty	1085	729	887

Na Obr. 3.30 jsou vidět použité motivy nepájivých masek, které ukazují možnou míru roztečení jednotlivých spojů. Horní motiv umožní větší roztečení pájecí slitiny a ve výsledku bude jeho mechanická pevnost vyšší. Spodní a prostřední motiv umožní menší rozlití pájecí slitiny, jejich mechanická pevnost bude nižší. Mezi kruhovým motivem nepájivé masky a motivem překrývajícím pouze propojovací plošky není z hlediska pevnosti značný rozdíl vzhledem k tomu, že je roztečení pájecí slitiny stejné.



Obr. 3.30: Míra možného roztečení pájecí slitiny pro různé motivy nepájivé masky

Hodnoty mechanických pevností jednotlivých spojů se pohybovaly od 600g až do 2500g. Průměrné hodnoty se až na výjimky pohybují většinou okolo 1000g. Tab. 3 shrnuje celkové výsledky všech kombinací na substrátech s nepájivou maskou, nejlepších výsledků mechanické pevnosti dosáhly stříbrné pasty CSP 1381, ESL 9912-KFL v kombinaci s pájecí pastou Cobar Bi58-XM5S, o poznání horšího výsledku dosáhla kombinace vodivé pasty ESL 9912-KFL a pájecí pasty Cobar SAC3-XF3.

Tab. 3: Hodnoty mechanických pevností spojů vytvořených s nepájivou maskou

		Pájecí pasty		
		Bi58-XM5S	Sn100c-XF3	SAC3-XF3
Vodivé pasty	ESL 9635 HG	1129g	953g	989g
	CSP 1381	1781g	1173g	1114g
	ESL 9912-KFL	1830g	1176g	1285g
	ESL 9695-G	1004g	1156g	1166g

Ve druhé části testování mechanické odolnosti spojů se testovali spoje, které byly vytvořeny na substrátech s nanesenou dielektrickou pastou. Při testování se ukázalo, že tyto spoje mají podstatně nižší mechanickou pevnost než spoje vytvořené na substrátech s nepájivou maskou viz. Tab. 4.

Tab. 4: Hodnoty mechanických pevností spojů vytvořených s dielektrickou pastou

		Pájecí pasty				
		Bi58-XM5S	Sn100c-XF3	SAC3-XF3	NXG1-HF	TSF 6852
Vodivé pasty	ESL 9635 HG	434g	744g	928g	1048g	682g
	CSP 1381	773g	455g	955g	1138g	626g
	ESL 9912-KFL	1032g	762g	653g	778g	775g
	ESL 9695-G	546g	447g	575g	928g	651g

Nižší mechanická pevnost spojů s použitou dielektrickou pastou byla s největší pravděpodobností způsobena teplotním namáháním při výpalu dielektrické pasty a částečným znečištěním plošek zbytky dielektrické pasty.

3.6 Výroba výbrusu

Pomocí předchozích experimentů byly vybrány kombinace, které se jeví jako nejlepší dostupné, tyto kombinace byly použity pro kompletní zapájení náhražky BGA pouzdra na keramický substrát.

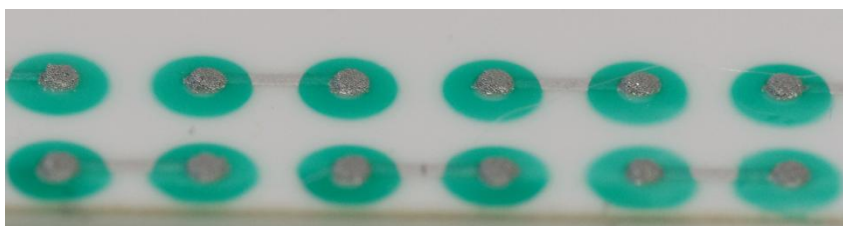
Největší mechanické pevnosti dosáhla kombinace vodivé pasty ESL 9912-KFL s pájecí pastou Cobar Bi58-XM5S, vzhledem k tomu, že Bismut je lehce toxický, byla vybrána ještě druhá kombinace. Nejlepších výsledků po kombinacích s Bismutovou pastou dosáhla vodivá pasta CSP 1381 s pájecí pastou Cobar SAC3-XF3.

Při výrobě kompletního zapájeného vzorku bylo postupováno podobně jako při předešlých experimentech.

Nejdříve byla natisknuta vodivá pasta na spodní díl a následně i na horní díl. Vzhledem k tomu, že rozměry substrátu vrchního dílu byly pouze o 2 mm větší než rozměry tisknutého motivu, musela být vodivá pasta natisknuta velice přesně.

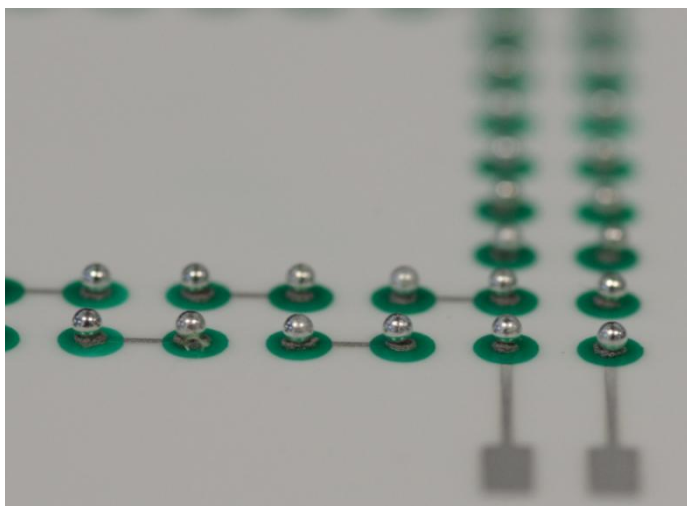
Při aplikaci nepájecí masky bylo upuštěno od nanášení nepájecí fotocitlivé emulze sítotiskem a místo toho byla nanášena hrubým štětcem, což pro potřeby jednoduchého odizolování pájecí slitiny je více než dostačující. Použit byl motiv stejný jako při aplikaci dielektrické pasty.

Pájecí pasta byla nanášena na spodní i horní díl (viz. Obr. 3.31) přes nerezovou šablonu s průměrem otvoru 0,6mm a tloušťkou 0,1mm.



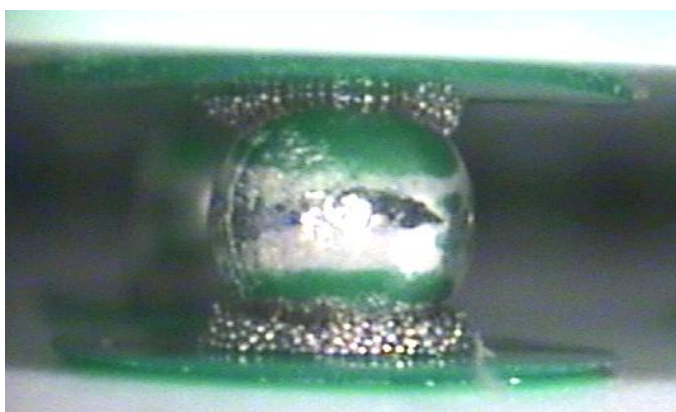
Obr. 3.31: Vodivé plošky s nepájecí maskou a nanesenou pájecí pastou

Po nanesení pájecí pasty na spodní i horní díl byly do pájecí pasty na spodním dílu osazeny pájkové kuličky (viz. Obr. 3.32).

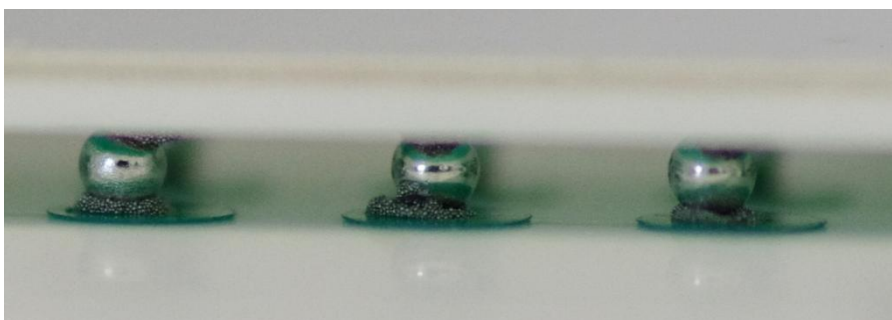


Obr. 3.32: Osazené kuličky v pájecí pastě

Přiložení vrchního dílu se provádělo za pomoci osazovacího zařízení FRITSCH Mikro Placer. Spodní a vrchní díl se sesouhlasily a následně byl vrchní díl přiložen na spodní (viz. Obr. 3.34 a Obr. 3.35).

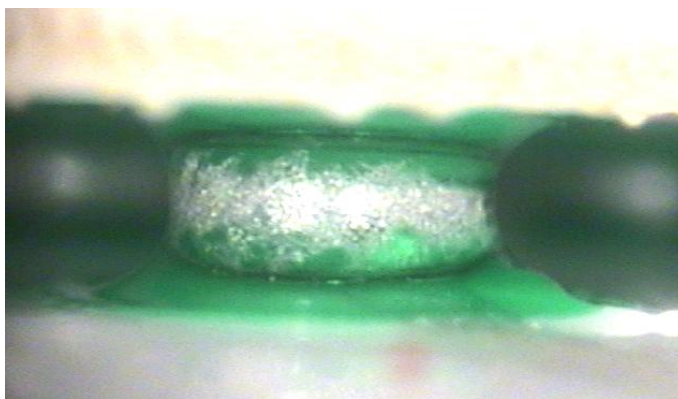


Obr. 3.33: Pájková kulička mezi přiloženými substráty před zapájením

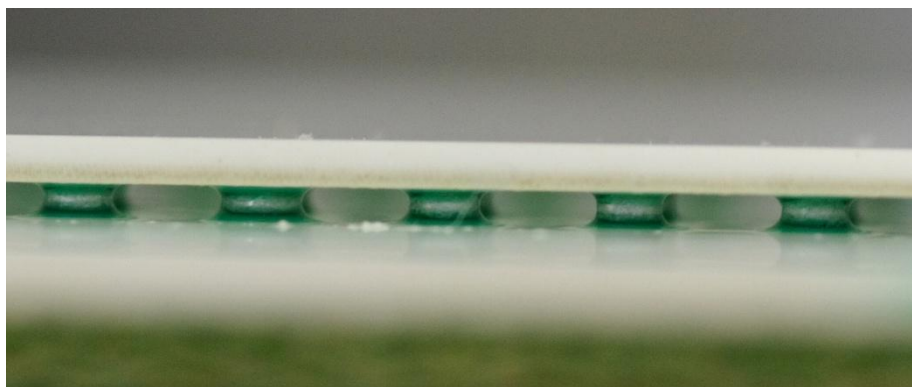


Obr. 3.34: Pájkové kuličky mezi přiloženými substráty před zapájením

Následovalo pájení přetavením v parách, po přetavení klesnul vrchní díl vlivem tíhy substrátu na roztavenou pájecí slitinu, která se nepatrně rozlila (viz. Obr. 3.35 a Obr. 3.36).

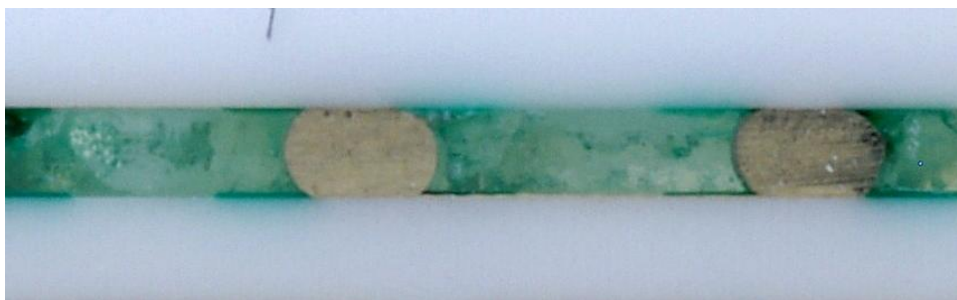


Obr. 3.35: Pájková kulička mezi po zapájení



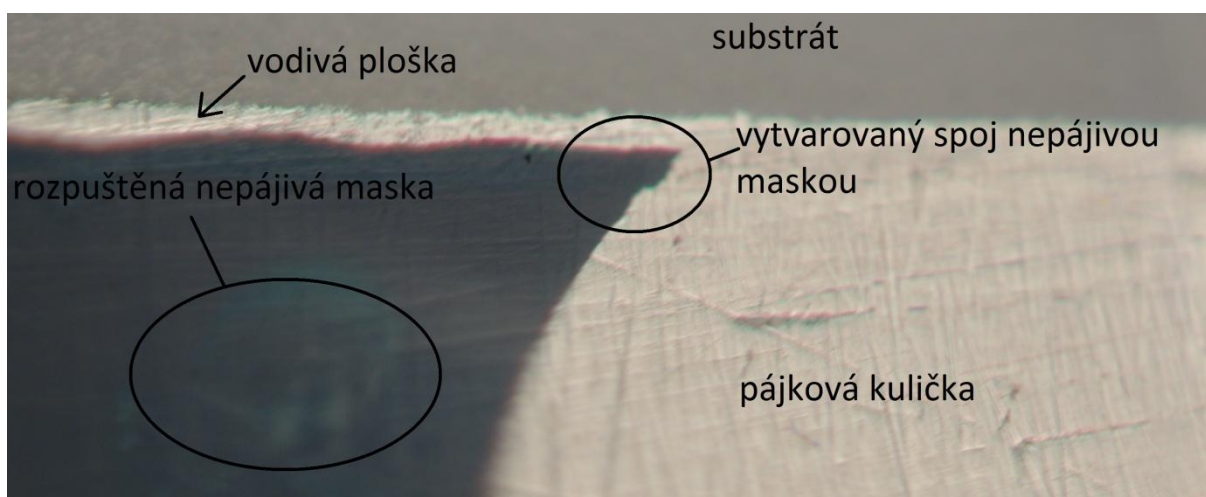
Obr. 3.36: Pájkové kuličky po zapájení

Vzhledem k tomu, že bude realizován výbrus, je vhodné odříznout laserem co největší kus přebytečné keramiky, která by se zbytečně dlouho brousila. Z takto připraveného celku je již možné udělat výbrus. Nejdříve se zapájený vzorek zalije do Methylmetakrylátové licí pryskyřice a pryskyřice se nechá ztuhnout. Uřízne se pryskyřice pokud možno co nejbližší k zamýšlenému výbrusu a následuje samotné broušení.



Obr. 3.37: Rozpuštěná nepájivá maska v pryskyřici

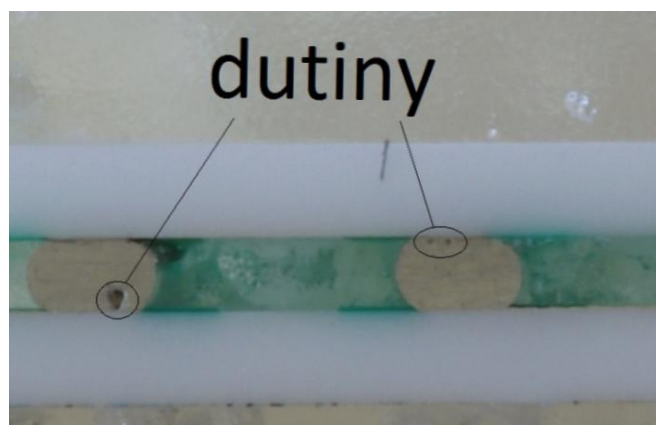
Nevýhoda zalití do Methylmetakrylátové licí pryskyřice byla odhalena až při samotném výbrusu. Po zalití se vlivem působení rozpouštědel obsažených v pryskyřici narušila struktura nepájivé masky viz. Obr. 3.37.



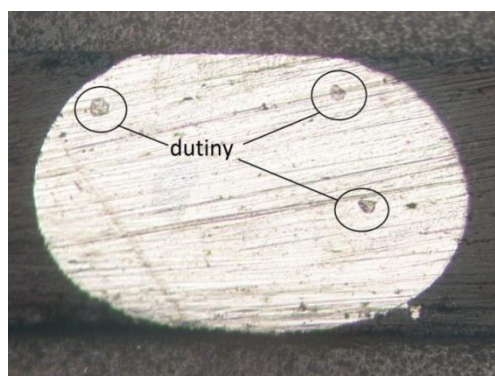
Obr. 3.38: Struktura spoje

Při detailním pohledu lze vidět vodivou plošku i vytvarování spoje nepájivou maskou a její rozpuštěnou část viz. Obr. 3.38, tento obrázek ilustruje, jak účinně nepájivá maska zabraňuje roztékání pájecí slitiny, míra přetečení je minimální.

Vzhledem k tomu, že byla použita bezolovnatá pájecí slitina, lze předpokládat tvorbu dutin v pájeném spoji, vytvářely se dutiny menší, ale i dutiny poměrně velkých rozměrů, které jsou vidět pouhým okem (viz. Obr. 3.39 a Obr. 3.40).

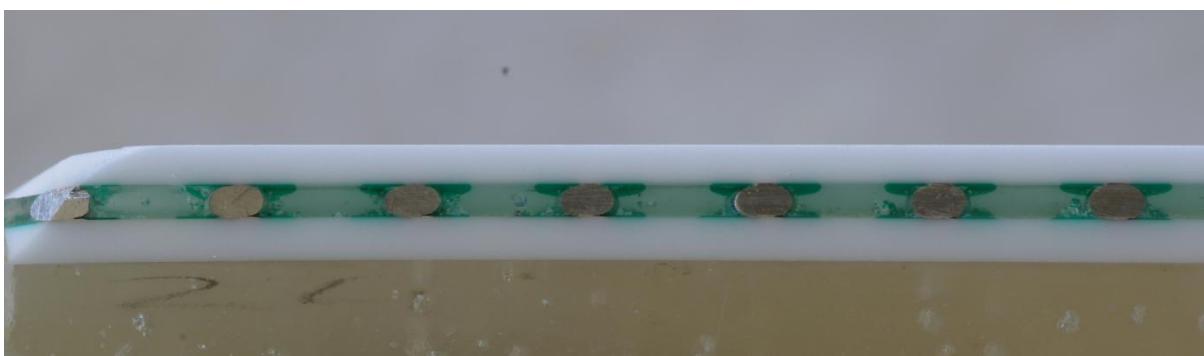


Obr. 3.39: Vytvořené dutiny ve spojích



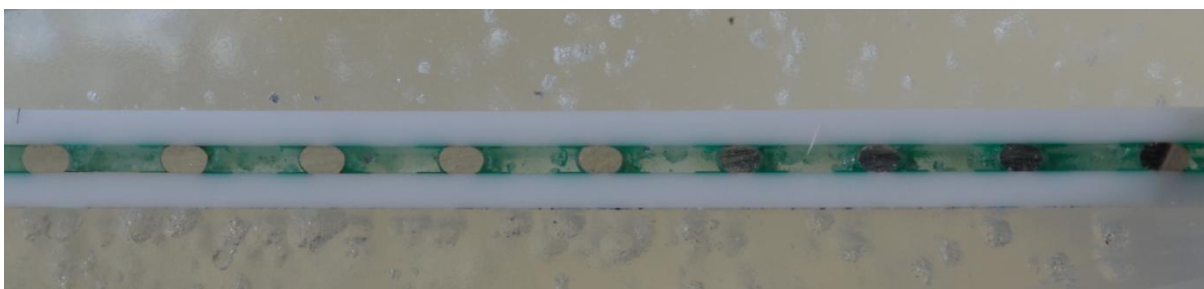
Obr. 3.40: Vytvořené dutiny ve spojích pod mikroskopem

Na Obr. 3.41 je vidět výsledný výbrus kombinace CSP 1381 s pájecí pastou Cobar SAC3-XF3.



Obr. 3.41: Výsledný výbrus s vodivou pastou CSP 1381

A na Obr. 3.42 je výsledný výbrus kombinace ESL 9912-KFL s pájecí pastou Cobar Bi58-XM5S. Z obrázků výsledných výbrusů je vidět, že během pájení nedošlo k nerovnoměrnému poklesu vrchního substrátu ani v jednom případě.



Obr. 3.42: Výsledný výbrus s vodivou pastou ESL 9912-KFL

Z výbrusů lze dále jasně vidět vliv nepáživé masky na roztečení pájecí slitiny, na Obr. 3.38 je v detailu vidět přetečení, které není u všech spojů stejné, na Obr. 3.43 je přetečení podstatně větší.



Obr. 3.43: Detail spoje

4 Závěr

Práce obsahuje zpracovanou rešerši týkající se problematiky kuličkových propojů BGA. Popsány jsou jejich typy, výroba, připojování a reballing. Dále byl navrhnut testovací motiv pro aplikaci vodivé pasty na spodní i horní substrát. Horní substrát ve výsledku představuje pouzdro BGA připojované na substrát. Testování vzájemné kompatibility dostupných materiálů (vodivé tlustovrstvé pasty, pájecí pasty a tavidel) při pájení přetavením v parách, probíhalo ve čtyřech krocích. Prvním krokem bylo testování vlastností výsledného spoje připojeného pájecí pastou nebo tavidlem bez dalších úprav substrátu. Ukázalo se, že pokud použijeme pouze pájecí pasty nebo tavidla, není možné z dostupných materiálů získat na vodivé pastě spoj požadovaného vzhledu a zároveň s dostatečnou mechanickou pevností. Výsledkem této části bylo vyřazení vodivé pasty Tesla Lanškroun TT5210 vzhledem k jejím nedostačujícím vlastnostem, tato vodivá pasta byla rozložena agresivními tavidly nebo docházelo k jejímu oddělení od samotného substrátu. Dále bylo zjištěno, že použití samotných tavidel není vhodné, mechanická pevnost takto vytvořených spojů nebyla dostatečná. Výjimkou u tavidel bylo tavidlo Kester TSF 6852, jehož vlastnosti se při vhodné kombinaci s vodivou pastou blížily sestavám s pájecími pastami. Zamezení přílišnému roztečení pájecí slitiny na vodivých ploškách bylo provedeno pomocí nepájivé masky. Při experimentu se ukázalo použití nepájivé masky jako vhodné. Při použití správného motivu a dostatečném sesouhlasení motivu nepájivé masky s vodivými ploškami byly vytvořeny spoje s dostatečnou mechanickou pevností a s téměř ideálním vzhledem. Jelikož byla aplikace nepájivé masky poměrně časově náročná, bylo v další části realizováno zamezení roztečení pájecí slitiny za pomoci tlustovrstvé dielektrické pasty. Aplikace dielektrické pasty se ovšem ukázala jako mírně náročnější. Nejdříve muselo být vyrobeno síťotiskové síto s odpovídajícím motivem, který se aplikoval pomocí ručního síťotiskového přípravku, sesouhlasení motivu dielektrické pasty a vodivého motivu na substrátu se ukázalo jako velmi náročné. Vytvořené spoje vzhledově odpovídaly spojům vytvořeným pomocí nepájivé masky. Dalším krokem v experimentu bylo otestování mechanické pevnosti stříhem vytvořených spojů. Testování se neprovádělo na spojích, které byly vytvořeny pouze aplikací pájecích past nebo tavidel, důvodem byl jejich tvar, který neodpovídal požadavkům, a výsledky testů mechanické pevnosti by mohli vést k nesprávným závěrům. Při samotném trhání došlo ke zjištění, že spoje vytvořené pomocí dielektrické pasty, mají obecně nižší pevnost než spoje vytvořené s aplikovanou nepájivou maskou. Z testu nejlépe vyšla kombinace vodivé pasty ESL 9912-KFL s pájecí pastou Cobar Bi58-XM5S. Vzhledem k tomu, že je Bismut lehce toxický, byla vybrána ještě jedna varianta, která by byla nezávadná. Jako další nejvhodnější se ukázala kombinace vodivé pasty CSP 1381 s pájecí pastou Cobar SAC3-XF3, při výběru této

kombinace muselo být přihlédnuto i k výsledkům mechanických pevností spojů vytvořených s aplikovanou dielektrickou pastou. V poslední části byly realizovány kompletní zapájené celky s použitými kombinacemi vodivých a pájecích past uvedených výše. Bylo vyrobeno celkem osm vzorků, z nichž ani jeden nevykazoval známky špatného zapájení nebo jiného defektu, pomocí multimetru byla u všech vzorků ověřena vodivost. Následně byl na jednom vzorku od každé kombinace proveden výbrus a prozkoumána struktura vytvořených spojů. Struktura výsledných spojů byla homogenní až na občasný výskyt dutin v pájecí slitině. Celkově lze říci, že při použití výše zmíněných kombinací vodivé a pájecí pasty, lze s aplikovanou nepájkivou maskou vytvořit spojení s dostatečnou mechanickou pevností a reprodukovatelností. Pro dosažení přesnějších výsledků v otázkách spolehlivosti spoje by bylo potřeba vyhotovit více kompletně zapájených vzorků, které by byly podrobeny testování v cyklovací komoře zkouškou zrychleného stárnutí a následně vyhodnotit získané výsledky, bohužel tuto poslední zkoušku v rámci bakalářské práce nebylo z časových důvodů možné realizovat.

5 Seznam obrázků

Obr. 1.1: Průřez vrstvami kuličky s Cu jádrem [2]	10
Obr. 1.2: Porovnání propojení slitinových kuliček a kuliček s pevným jádrem	10
Obr. 1.3: Průřez pájkovou kuličkou s pevným jádrem [2]	11
Obr. 1.4: Popis rozměrů pájkové kuličky [1]	12
Obr. 1.5: Olejová granulace [3].....	13
Obr. 1.6: Výrobní aparatura pro metodu UDS [3]	14
Obr. 1.7: Vstřikování roztavené pájky do formy [7]	16
Obr. 1.8: Postup připojení pájkových kuliček na substrát [7]	17
Obr. 1.9: Přenos tavidla pomocí kuliček [1]	18
Obr. 1.10: Tisk tavidla [1]	18
Obr. 1.11: Přenos pomocí dávkovače [1]	19
Obr. 1.12: Metoda tisku kuliček [4]	20
Obr. 1.13: Osazení kuličky pomocí laseru [16].....	22
Obr. 2.1: Testovací motiv, celý	23
Obr. 2.2: Testovací motiv a) spodní díl b) vrchní díl	24
Obr. 2.3: Schéma zařízení pro pájení v parách [18]	28
Obr. 2.4: Schéma uspořádání při zkoušce stříhem [21]	29
Obr. 3.1: Přetavovací profil pájení v parách	32
Obr. 3.2: Tvar spoje při použití vodivé pasty Tesla Lanškroun TT5210 a tavidla Kester TSF 6852 ...	33
Obr. 3.3: Zničená vodivá ploška při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3	34
Obr. 3.4: Zničená vodivá ploška při použití pájecí pasty Kester NXG1-HF	34
Obr. 3.5: Roztečení pájecí slitiny při použití tavidla Kester TSF 6852	35
Obr. 3.6: Slití pájecí slitiny při použití pájecí pasty Kester NXG1-HF	35
Obr. 3.7: Rozdíl ve smáčivosti vodivých past CSP 1381 a ESL 9912-KFL při použité pájecí pastě Cobar Sn100c-XF3.....	36
Obr. 3.8: Vliv množství pájecí pasty na tvar spoje	37
Obr. 3.9: Rozdíly ve smáčivosti vodivé pasty ESL 9695-G	37
Obr. 3.10: Filmová předloha nepájecí masky - kolečka.....	39
Obr. 3.11: Nanesená nepájecí maska na vodivé pastě ESL 9695-G	39
Obr. 3.12: Filmová předloha nepájecí masky – plošky.....	40
Obr. 3.13: Nanesená nepájecí maska na vodivé pastě CSP 1381	40
Obr. 3.14: Filmová předloha nepájecí masky - kroužky	40
Obr. 3.15: Nanesená nepájecí maska na vodivé pastě ESL 9635 HG.....	40
Obr. 3.16: Prosvícení keramického substrátu a nechtěná expozice.....	41
Obr. 3.17: Závislost roztečení pájecí slitiny na volném prostoru nepájecí masky	42
Obr. 3.18: Tvar spoje při použití nepájecí masky	42
Obr. 3.19: Tvar spojů při použití pájecí pasty Cobar Sn100c-XF3.....	43
Obr. 3.20: Tvar spojů při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 vlevo a Cobar Bi58-XM5S vpravo .	43
Obr. 3.21: Tvar spoje při použití vodivé pasty ESL 9912-KFL a pájecí pasty Cobar SAC3-XF3	44
Obr. 3.22: Tvar spoje při použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3	44

Obr. 3.23: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9635 HG s pájecí pastou Cobar Sn100c-XF3.....	46
Obr. 3.24: Vytvořený spoj na vodivé pastě CSP 1381 s tavidlem Kester TSF 6852	46
Obr. 3.25: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9912-KFL s pájecí pastou Cobar SAC3-XF3.....	46
Obr. 3.26: Vytvořený spoj na vodivé pastě ESL 9695-G s pájecí pastou Kester NXG1-HF	47
Obr. 3.27: Odstřihnutí kuličky	49
Obr. 3.28: Odtržení pájecí plošky i s kuličkou.....	49
Obr. 3.29: Odtržení kuličky v místě vrstvy intermetalických sloučenin	49
Obr. 3.30: Míra možného roztečení pájecí slitiny pro různé motivy nepájecí masky.....	50
Obr. 3.31: Vodivé plošky s nepájecí maskou a nanesenou pájecí pastou	52
Obr. 3.32: Osazené kuličky v pájecí pastě	53
Obr. 3.33: Pájková kulička mezi přiloženými substráty před zapájením	53
Obr. 3.34: Pájkové kuličky mezi přiloženými substráty před zapájením.....	54
Obr. 3.35: Pájková kulička mezi po zapájení	54
Obr. 3.36: Pájkové kuličky po zapájení	54
Obr. 3.37: Rozpuštěná nepájecí maska v pryskyřici	55
Obr. 3.38: Struktura spoje	55
Obr. 3.39: Vytvořené dutiny ve spojích	56
Obr. 3.40: Vytvořené dutiny ve spojích pod mikroskopem	56
Obr. 3.41: Výsledný výbrus s vodivou pastou CSP 1381	56
Obr. 3.42: Výsledný výbrus s vodivou pastou ESL 9912-KFL	57
Obr. 3.43: Detail spoje	57

6 Seznam tabulek

Tab. 1: Některé typy slitin a jejich teploty tavení.....	8
Tab. 2: Hodnoty pevnosti spojů pro různé motivy nepájivé masky	50
Tab. 3: Hodnoty mechanických pevností spojů vytvořených s nepájivou maskou	51
Tab. 4: Hodnoty mechanických pevností spojů vytvořených s dielektrickou pastou	51

7 Použitá literatura

- [1] Sphere_Tech_Bulletin. *Senju Metal Industry Co.* [Online] 1997. [Citace: 01. 12 2010.] http://www.senjucomtek.com/images/tech/pdf/Sphere_Tech_Bulletin.pdf.
- [2] LOEFFLER, Mario. Polymer-Core Solder Balls: An Alternative to Solid Solder Balls? *Circuitree*. [Online] 2006. [Citace: 27. 11 2010.] http://www.circuitree.com/Articles/Feature_Article/4d93912c4d26b010VgnVCM100000f932a8c0_____.
- [3] Lead-free solder balls. *Hitachi-metals*. [Online] 1997. [Citace: 04. 12 2010.] http://www.hitachi-metals.co.jp/e/prod/prod07/p07_2_12.html.
- [4] HISERT, Jim. Theory of “Ball Drop” Sphere Placement. *Indium Corporation*. [Online] 2009. [Citace: 6. 12 2010.] <http://blogs.indium.com/blog/jim-hisert/0/0/theory-of-8220ball-drop8221-sphere-placement>.
- [5] RILEY, George. The Promise of C4NP. *Flipchips*. [Online] 2005. [Citace: 13. 12 2010.] <http://www.flipchips.com/tutorial55.html>.
- [6] Solder Bump Flip Chip. *Flipchips*. [Online] 2000. [Citace: 4. 12 2010.] <http://www.flipchips.com/tutorial02a.html>.
- [7] C4NP. *IBM Research*. [Online] 2004. [Citace: 6. 12 2010.] <http://www.research.ibm.com/c4np/images/C4NPTechnicalPresentation.ppt>.
- [8] SZENDIUCH, I.; NICÁK, M. On the Application of Solder Balls for 3D Packaging. *PLUS*, 2010, roč. 2010, č. 8, s. 1855-1860. ISSN: 1436- 7505.
- [9] Motorola, Inc. (Schaumburg, IL). *Method of transferring solder balls onto a semiconductor device*. Původce vynálezu: Lin, Paul T. (Austin, TX). United States. Patentový spis 5219117. <http://www.freepatentsonline.com/5219117.html>.
- [10] BEST, Inc. (Chicago, IL) . *Manual method for reballing using a solder preform*. Původce vynálezu: Robert P. Wettermann, Hung Hoang. United States. Patentový spis 228119. <http://www.faqs.org/patents/app/20080308612>.
- [11] Texas Instruments Incorporated (Dallas, TX). *Solder Ball Placement Vacuum Tool*. Původce vynálezu: Wyatt A. Huddleston. United States. Patentový spis 228246. <http://www.faqs.org/patents/app/20090108053#ixzz17vJM43KL>.
- [12] Cahill, Sutton & Thomas P.L.C. . *Solder ball placement machine*. Původce vynálezu: Ito, Carl T. (9882 E. Caron St., Scottsdale, AZ, 85258). United States. Patentový spis 5540377. <http://www.freepatentsonline.com/5540377.html>.
- [13] NEC Corporation (JP). *Solder ball mounting apparatus and method*. Původce vynálezu: Miura, Takeo (Kumamoto, JP). United States. Patentový spis 6158649. <http://www.freepatentsonline.com/6158649.html>.
- [14] Sughrue Mion, PLLC. *Method Solder ball and method for producing same*. Původce vynálezu: Koji Sato, Takeshi Kuboi, Masayoshi Date. Japan. Patentový spis 6517602. <http://www.patentstorm.us/patents/6517602/fulltext.html>.
- [15] Spraytech, Ltd.. *Apparatus and method for manufacturing solder balls*. Původce vynálezu: Lee, Choong-Won. United States. Patentový spis 6540129. <http://www.patentstorm.us/patents/6540129/fulltext.html>.
- [16] *Emulation : Reballing instruction* [online]. 2002 [Citace: 2010-11-15]. http://www.emulation.com/pdf/102003BGA_Reballing_Instruction_Manual.pdf.
- [17] Senju Metal Industry Co., Ltd. (Tokyo, JP). *Solder Ball*. Původce vynálezu: Satou, Isamu (Souka, JP), Nomoto, Shinichi (Hanyu, JP), Okada, Hiroshi (Souka, JP). United States. Patentový spis 7097090. <http://www.freepatentsonline.com/7097090.html>.

- [18] SZENDIUCH, Ivan, et al. *Mikroelektronika a technologie součástek*. Brno : NOVAPRESS, 2009. 190 s.
- [19] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž 1. část*. Brno, 2009. 90 s.
- [20] Advantages of vapour phase reflow for lead-free soldering. *Dataweek* [online]. 2008 [citace 2011-04-28]. <http://dataweek.co.za/news.aspx?pklnnewsid=30546>.
- [21] *BGA Ball Shear : JESD22-B117*. Arlington : JEDEC Solid State Technology Association, 2000. 13 s. <http://www.docin.com/p-44072726.html>.
- [22] HO BANG, Woong, et al. Fracture Mechanics of Solder Bumps During Ball Shear Testing: Effect of Bump Size. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS* [online]. 2009, [citace 2011-05-10]. http://engineering.snu.ac.kr/pdf/189-bang_Journal%20of%20ELECTRONIC%20MATERIALS.pdf.