



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**PROPOJOVACÍ TECHNOLOGIE PRO 3D ELEKTRONICKÉ
A MIKROELEKTRONICKÉ KONSTRUKCE**

INTERCONNECTION TECHNOLOGIES FOR 3D ELECTRONIC AND MICROELECTRONIC CONSTRUCTIONS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

ABRIDGED DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Nicák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

BRNO 2016

Abstrakt

Disertační práce je zaměřená na výzkum aplikačních možností pájených propojovacích struktur především pro použití s inovativními 3D strukturami sestavenými s využitím LTCC keramických materiálů, napařených i galvanicky upravených plošek a pájecích kuliček s pevným jádrem. Skládá se z několika hlavních částí. Na úvod navazuje teoretický rozbor současného stavu řešení a používaných technologií. Práce pokračuje definicí cílů s rozбором postupně prováděných experimentů s jejich výsledky. Závěr práce patří shrnutí výsledků a získaných poznatků.

Klíčová slova

Propojení, LTCC, keramika, 3D struktury, pouzdro, pájené spoje, pájecí kuličky

Abstract

The doctoral thesis is focused on research on application possibilities of soldered interconnection structures especially for the use with innovative 3D structures assembled using the LTCC ceramic materials, PVD deposited and galvanically modified pads, solid core solder balls. It consists of several main parts. Introduction is followed by theoretical survey of current situation and technologies. Thesis continues with introduction of main goals and with summary of successively performed experiments and their results. End of the work belongs to summary of results and gained knowledge.

Keywords

Interconnection, LTCC, ceramic, 3D structures, package, soldered joints, solder balls

Místo uložení práce

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, Technická 3058/10, 616 00 Brno

Bibliografická citace

Nicák, M. *Propojovací technologie pro 3D elektronické a mikroelektronické konstrukce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 97 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Obsah

1	ÚVOD	5
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2.1	KERAMICKÉ MATERIÁLY PRO ELEKTRONICKÉ VYUŽITÍ	6
2.2	TECHNOLOGIE LTCC	6
2.3	LTCC HERAEUS HERA-LOCK HL2000	6
2.4	PÁJENÁ PROPOJENÍ MEZI KERAMICKÝMI SUBSTRÁTY	7
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	8
4	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	9
4.1	ÚVODNÍ TEST KOMPATIBILITY VODIVÝCH PAST PRO LTCC HL2000 V KOMBINACI S PÁJECÍMI KULIČKAMI	9
4.1.1	<i>Použité substráty a materiály</i>	9
4.1.2	<i>Pájení v parách a testy s LTCC</i>	9
4.1.3	<i>Zjištěné poznatky</i>	9
4.2	TEST REALIZACE „DIMPLED“ STRUKTUR SE SUBSTRÁTY LTCC HL2000	10
4.2.1	<i>Vytvoření otvorů v LTCC HL2000</i>	10
4.2.2	<i>Testovací substrát BGA 225</i>	10
4.2.3	<i>Pájení struktury BGA 225</i>	11
4.2.4	<i>Teorie termomechanického namáhání struktur</i>	11
4.2.5	<i>Simulace struktur</i>	12
4.2.6	<i>Test pájených struktur</i>	13
4.2.7	<i>Zhodnocení prvních struktur</i>	13
4.3	POKROČILÝ TEST „DIMPLED“ STRUKTUR SE SUBSTRÁTY LTCC HL2000	14
4.3.1	<i>Pájené struktury „dimpled“ LTCC a jejich inspekce</i>	14
4.4	TEST REALIZACE NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH STRUKTUR	15
4.4.1	<i>Postup přípravy základní měděné vrstvy</i>	15
4.5	PRUŽNÉ MĚDĚNÉ PLOŠKY NA KERAMICE	16
4.6	TEST PÁJENÍ NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH STRUKTUR 16	
4.6.1	<i>Pájení a vyhodnocení substrátů s měděným motivem BGA 64</i>	17

4.7	TEST REALIZACE NAPAŘENÝCH A GALVANICKY ZESÍLENÝCH MĚDĚNÝCH „DIMPLED“ STRUKTUR NA LTCC HL2000.....	17
4.7.1	<i>Simulační rozbor „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami</i>	<i>17</i>
4.7.2	<i>Příprava „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami.....</i>	<i>18</i>
4.7.3	<i>Pájení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami.....</i>	<i>18</i>
4.7.4	<i>Zhodnocení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami</i>	<i>19</i>
4.8	TESTOVACÍ STRUKTURA „DIMPLED“ LTCC S NAPAŘENÝMI SILNÝMI CU VRSTVAMI.....	19
4.8.1	<i>Pájení a zhodnocení substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi.....</i>	<i>19</i>
4.9	SROVNÁNÍ PÁJECÍCH KULIČEK NA RŮZNÝCH SUBSTRÁTECH POMOCÍ TESTU STŘIHEM	20
4.9.1	<i>Příprava a postup srovnávacího testu stříhem</i>	<i>20</i>
4.9.2	<i>Vyhodnocení srovnávacího testu stříhem</i>	<i>21</i>
4.10	TESTOVACÍ STRUKTURY VYUŽÍVAJÍCÍ PÁJECÍ KULIČKY S PEVNÝM JÁDREM	21
4.10.1	<i>Vyhodnocení zapájených struktur.....</i>	<i>21</i>
4.10.2	<i>Propojení FR-4 + LTCC pájecími kuličkami SOL</i>	<i>21</i>
4.10.3	<i>Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami Senju s Cu jádrem</i>	<i>22</i>
4.11	VÍCEPATROVÁ LTCC STRUKTURA S PROKOVY A PÁJECÍMI KULIČKAMI S PEVNÝM JÁDREM	23
4.11.1	<i>Pájení a vyhodnocení zapájených struktur.....</i>	<i>23</i>
4.11.2	<i>Poznatky uplatnitelné při konstrukci univerzálního pouzdra:.....</i>	<i>24</i>
4.12	SROVNÁNÍ SMÁČIVOSTI VYBRANÝCH POVRCHŮ.....	25
4.12.1	<i>Výsledky testů.....</i>	<i>25</i>
5	ZÁVĚR.....	27
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
	VLASTNÍ TVŮRČÍ AKTIVITY.....	34

1 Úvod

Konstrukce 3D struktur není jednoduchou záležitostí a zejména při kombinaci různých materiálů je třeba uvážit jejich vzájemnou kompatibilitu. Ať už z hlediska samotné stavby, kde nevhodná kombinace materiálu plošky, povrchové úpravy a zvolené pájky znamená krátkou životnost celé struktury, tak také z pohledu teplotního managementu a rozdílných délkových i objemových roztažností použitých materiálů.

Tato práce je zaměřena právě na průzkum některých technologií užívaných při sestavování trojrozměrných elektronických a mikroelektronických konstrukcí a pouzder za použití anorganických substrátů. Zejména jde o propojovací technologie realizovatelné dostupnými procesy v možnostech Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT.

Práce částečně navazuje na předchozí diplomovou práci na téma „Moderní pouzdření a 3D systémy“ a prohlubuje pomocí celé řady dílčích testů poznatky v oblasti návrhu a konstrukce různých typů propojení mezi jednotlivými substráty.

Získané poznatky jsou následně vzaty v úvahu při návrhu postupu pro konstrukci mikroelektronického pouzdra typu SOP na bázi LTCC technologie, které je schopno s využitím nesporných výhod keramických materiálů, jako jsou zejména chemická, teplotní i mechanická odolnost, sloužit jako nosič pro obsaženou technologii i vhodný kontaktní element pro spojení s dalšími obvody na základním modulu. Originální propojení konstrukce by mělo být schopno do určité míry kompenzovat i rozdílnou délkovou a objemovou roztažnost. Představme si pro ilustraci 3D pouzdro, jež nese na vnějším substrátu tlustovrstvý, nebo na křemíkovém čipu realizovaný senzor a propojuje jej se základními obvody a SMD součástkami na dalších vnitřních substrátech v pouzdru, jako jsou například zesilovače a převodníky. Celé pouzdro je následně pomocí vhodných spojů připevněno ke zbytku systému, kde si můžeme představit množství typů substrátu od klasických FR-4 desek plošných spojů přes flexibilní substráty až po keramické nosiče.

Možností využití multisubstrátových pouzder zkonstruovaných na bázi keramiky, zejména dobře opracovatelné nízkoteplotní nízkosmrštlivé keramiky, je samozřejmě více. Jako další možné využití lze uvést i pouzdra pro výkonné LED, neboť keramický materiál je schopen dobře odvádět generované teplo a hlavně mu dlouhodobě odolávat na rozdíl od organických substrátů. A to s výhodou podstatně menších změn rozměrů v souvislosti s měnící-se teplotou, takže i propojení s osazeným čipem světlo emitující diody je méně namáháno. Velmi podobná je možnost využití substrátu pro osazení koncentračních fotovoltaických článků s optikou, u nichž se i přes chlazení vyskytují velmi vysoké teploty.

2 Současný stav problematiky

2.1 Keramické materiály pro elektronické využití

Keramické materiály jsou užívány po několik tisíc let v mnoha aplikacích. Není proto divu, že se hojně rozšířily i do oblasti mikroelektronických konstrukcí. Mezi dlouhodobě nejvíce používané anorganické materiály patří korundová keramika (Al_2O_3), aluminium-nitridová keramika (AlN) a beryliová keramika (BeO). Jedná se o klasické keramické substráty s vysokou teplotou výpalu – HTCC – High Temperature Cofired Ceramic. Tyto materiály tvoří základ nespočetného množství hybridních integrovaných obvodů, pasivních součástek, senzorů a dalších prvků. S expanzí mikroelektroniky v šedesátých letech minulého století se ale stále více prosazují substráty s teplotou výpalu pod úroveň 1000°C zvané nízkoteplotní keramika - LTCC – Low Temperature Cofired Ceramic. Proces využití LTCC substrátů je obdobný, jako u klasických keramických materiálů, což se týká sítotisku vypalovacích past, sušení i výpalu. Nově ale tyto substráty umožnily vytvářet několik vrstev spojených laminací do 3D struktury, čímž se rapidně zvýšila integrace, zkrátila se doba potřebná pro technologický proces a v mnoha ohledech se zvýšila spolehlivost vytvořených struktur, neboť propoje mezi laminovanými vrstvami jsou realizovány přímo vodivými pastami podobně jako prokovy v běžných vícevrstvých deskách plošných spojů a odpadají tak mnohá pájená propojení. Značnou výhodou ve srovnání s klasickými substráty je i podstatně snadnější opracovatelnost ražením, CNC obráběním, nebo laserem, což umožňuje tvorbu dutin, kanálku atd.

2.2 Technologie LTCC

LTCC substráty jsou v surovém stavu zpravidla nanесeny na plastové nosné folii a dodávány ve formě listů. Nosná folie zajišťuje dostatečnou pevnost listu během zpracování a po základním řezání, nebo vyrážení je oddělena. Samotné substráty lze následně z obou stran potiskovat vypalovacími pastami a realizovat tak vodivé motivy i pasivní prvky podobně jako u tlustovrstvé technologie na alumině. Rezistory lze vytvářet jak ve formě planární, tak i trojrozměrně mezi několika vrstvami keramiky. Velmi podobně lze realizovat i kapacitní prvky. Ať už na povrchu pomocí dielektrických past, ale lze využít i keramický materiál samotný, nebo v něm vytvořit dutiny se vzduchovou vrstvou, nebo vrstvou natištěného dielektrika. Také indukční prvky je možné realizovat v planární podobě i pomocí vnořených cívek, které prochází několika vrstvami. Velmi typické jsou antény pro komunikaci, nebo bezkontaktní přenos napájení.

2.3 LTCC Heraeus Hera-Lock HL2000

Vyvinuta a na trhu představena v roce 2002 byla tzv. nízkosmrštivá LTCC systému HeraLock HL2000, označovaná také jako zero-shrink LTCC [7]. Její mimořádnou předností je naprosto minimální smršťování v osách x a y (pod 0,2%) při výpalu ve

srovnání s ostatními materiály. Dochází tak k výraznějšímu smrštění jen v ose z (tloušťka materiálu) a to přibližně o 32% [5, 6]. Díky tomu se hlavně u planárních struktur zjednodušil návrh a např. na Ústavu mikroelektroniky to umožňuje využití běžně dostupných návrhových systémů pro DPS a tlustovrstvé technologie. Malé smrštění také přispívá k omezení praskání průchozích otvorů a dutin během výpalu.

2.4 Pájená propojení mezi keramickými substráty

Propojení mezi keramickými substráty je možno realizovat celou řadou způsobů. V praxi používané metody vycházejí z technologií používaných u pouzder integrovaných obvodů – nejčastěji pájkové bumpy a pájecí kuličky.

Pájkové bumpy, půlkulaté útvary tvořené pájkovou slitinou, se obvykle vytvářejí přetavením pájecí pasty nanesené na pouzdro. Pouzdro s hotovými kontakty se následně osazuje na nosný substrát do pájecí pasty nebo tavidla v závislosti na konkrétní aplikaci.

Druhou nejrozšířenější variantou je využití pájecích kuliček, kterých lze rozeznávat mnoho typů podle složení i velikosti. Nejjednodušší variantou jsou kuličky tvořené pouze cínem. Daleko více používané jsou však kuličky zhotovené ze slitin. Příkladem mohou být klasické eutektické, nejčastěji Sn(63) Pb(37) s teplotou tání 183°C, nebo Sn(62) Pb(36) Ag(2) tající při 178°C. Existují i speciální kuličky, které se během pájení roztavit nemají, ale jsou osazeny do pájecí pasty, která po nich vzlíná. Jsou to např. Sn (10) Pb (90), které se taví až při 300°C. Pro bezolovnaté aplikace se používají např. kuličky Sn(96) Ag(3,5) Cu(0,5) s teplotou tavení 217°C. Nejběžnější průměry kuliček jsou 300 μm, 500 μm a 760 μm.

Existují i kuličky s pevným jádrem, které jsou schopné udržet definovanou mezeru mezi spojovanými substráty. Jádro může být kovové, jako např. u firmy Senju, kde je tvořeno měděnou nebo stříbrnou kuličkou s různými průměry, ale také plastové. Kuličky s plastovým jádrem (PCSB – Plastic Core Solder Ball) vyrábí firma Sekisui Chemical, jsou označeny jako Micropearl SOL. [8, 9, 35]

S ohledem na aktuální stav výzkumu v oblasti propojování moderních LTCC substrátů, ze kterého byly v této kapitole prezentovány určité poznatky, a také na základě dalších dosud neprobádaných možností, byly s přihlédnutím k dostupné technologii, materiálům i časovým nárokům zváženy následující směry výzkumu.

3 Cíle disertační práce

Oblast propojování je velmi široká a tak bylo zaměření přizpůsobeno technologiím dostupným na Ústavu mikroelektroniky. Smyslem této práce je rozšíření dosavadních a získání nových poznatků v oblasti propojování moderních substrátů do 3D struktur. Hlavní pozornost je věnována nízkoteplotně vypalovaným keramickým substrátům s nízkou smrštivostí, které jsou zatím využívány relativně málo a tak nabízejí mnoho prostoru pro bádání. Jak plyne z předchozího rozboru problematiky, při konstrukci propojovacích struktur na bázi LTCC bylo dosud využíváno kombinací běžných, ve všech osách smrštivých substrátů (nejvíce DuPont), s motivy zhotovenými tlustovrstvými vypalovacími pastami, nebo deponovanou zlatou vrstvou. Velkou neznámou pro LTCC HL2000 byla možnost realizace a vlastnosti vakuově napařených měděných motivů zesílených galvanickou cestou, jejichž cena je podstatně přijatelnější ve srovnání se zlatými vrstvami a které mají i některé technologické výhody zejména ve smyslu dobré pájitelnosti.

Cíle této disertační práce je možné rozdělit do následujících oddílů, z nichž značnou část představují praktické experimenty s cílem prozkoumat technologické možnosti, postupy a varianty propojení substrátů.

- Průzkum struktur zhotovených vakuovým napařením a galvanickým zesílením na substrátech Al_2O_3 a LTCC HL2000
- Prověření možnosti zhotovení pružných elementů propojení na bázi napařených a zesílených měděných struktur
- Realizace a otestování struktury „dimpled“ na bázi LTCC HL2000
- Testy různých typů pájených propojů s využitím více typů pájecích kuliček s měděným a plastovým jádrem
- Simulace namáhání různých typů spojů a jejich srovnání
- Testy vícepatrového pájeného propojení substrátů v 3D strukturu
- Návrh postupů pro konstrukci 3D pouzdra ve smyslu univerzálního nosiče pro integrované obvody, senzory nebo výkonné LED

Tyto body představují hlavní směry, jimž byla věnována pozornost během výzkumných a experimentálních aktivit. Během prací se však díky povaze využitých technologií objevila i celá řada dalších dílčích faktorů, které ovlivnily postup i výsledky, aniž s nimi bylo možno předem kalkulovat, nebo je zahrnout mezi cíle práce.

4 Výsledky disertační práce

V tomto oddíle jsou prezentovány jednotlivé části řešené problematiky. Na počátku výzkumu bylo mnoho neznámých a postupnými testy se dařilo nacházet nové možnosti, ale také některé zavrhnout pro nedostatek vhodného materiálu, technologickou náročnost nebo i dlouhodobé odstávky potřebných zařízení, což zejména u laseru, vakuové napařovací aparatury a vsázkové pece vyústilo v komplikace a zdržení...

4.1 Úvodní test kompatibility vodivých past pro LTCC HL2000 v kombinaci s pájecími kuličkami

První seznámení s materiálem HL2000 částečně navazovalo na předchozí diplomovou práci a bylo v počátku komplikováno teprve se budující technologickou základnou pro práci s LTCC materiály. S prvními dostupnými vodivými vypalovacími pastami pro HL2000 byly v roce 2009 nejprve provedeny testy síťotisku, laminace, výpalu a chování při pájení.

4.1.1 Použité substráty a materiály

Na substráty s rozměrem 35 x 30 mm byly natištěny testovací motivy s řetězcovou strukturou „Daisy chain“ BGA s 225 ploškami za použití tehdy jediných dostupných vodivých past (vodivá stříbrná TC0307 a zlatá TC8101). Substráty byly laminovány zpravidla ze tří nebo čtyř vrstev keramiky pro dostatečnou výslednou pevnost a vypáleny.

4.1.2 Pájení v parách a testy s LTCC

Na hotové substráty byly postupně do vrstvy dostupných tavidel a různých pájecích past osazovány i pájecí kuličky (Senju 760 μm , SnAgCu). Osazené substráty byly pájeny v zařízení pro pájení v parách Asscon Quicky 300, kde je jako teplovodného media užito inertní kapaliny Galden 230. Páry ohřáté kapaliny nasytí prostor pece a postupně kondenzují na vložených substrátech, dokud je neprohřejí na stejnou teplotu. Výhodou je přesně daný teplotní strop a velmi rovnoměrný ohřev i u složitějších sestav, které byly již tou dobou plánovány. Další výhodou je samotná atmosféra nasycených par Galdenu, neboť redukuje přístup kyslíku k pájeným spojům a tím omezuje problémy způsobené oxidacemi. Výhodou je i dobrá opakovatelnost pájecích procesů.

4.1.3 Zjištěné poznatky

Během pokusů se rychle ukázalo, že dostupné pasty nejsou vhodné pro standardní bezolovnaté pájení. U všech přetavených vzorků došlo k absorpci materiálu plošek do roztavené pájky, což je jev zvaný „leaching“ a je mu věnována pozornost v další části práce. Jako názorná ukázka může sloužit obrázek 4.2, na kterém je zobrazen substrát s motivem BGA 225 vytvořeným zlatou vodivou pastou.

Ukázalo se také, že smáčivost plošek není optimální a bylo rozhodnuto experimentovat s tlustovrstvými pastami určenými pro klasickou Al_2O_3 keramiku, které by byly nanášeny na již vypálené substráty a ty následně opět vypáleny hodinovým profilem podobně jako alumina. V mezidobě však firma Heraeus doplnila své portfolio a podařilo se sehnat pájitelnou vnější vodivou vypalovací pastu s označením TC0306, se kterou se výsledky obdobných testů poněkud zlepšily. Určitý problém s leachingem však přetrvával nadále zejména při opakovaných přetaveních.

Dále bylo tímto jednoduchým testem zjištěno, že vytváření planárních plošek se neobejde bez doplňující vrstvy, která by ponechala odkryté jen kontakty. Jednak bylo rozhodnuto otestovat různé varianty nepájivé masky, ale také využít další vrstvy LTCC s otvory pro plošky, čemuž se věnuje další díl experimentů.

4.2 Test realizace „dimpled“ struktur se substráty LTCC HL2000

Rozhodnutí otestovat další vrstvy LTCC substrátu jako krycí masku s sebou přineslo možnost vytvoření částečně vnořených plošek, tzv. „dimpled“ struktury. Výhoda této kombinace spočívá ve zlepšení spolehlivostních parametrů spoje, neboť se relativně prodlouží délka pájeného kuličkového propoje, který tak má více prostoru k vyrovnaní pnutí, které vzniká rozdíly v teplotní délkové i objemové roztažnosti a nejvíce se projevuje při spojení substrátů z různých materiálů.

4.2.1 Vytvoření otvorů v LTCC HL2000

Jako základní problém ve vytváření složitějších útvarů z keramiky se ukázalo vytvoření matrice stejnoměrných otvorů malého průměru ve velkém počtu. Mechanické vytváření otvorů vyrážáním by vyžadovalo zhotovení nákladného nástroje. Jako vhodný nástroj se jevil trimovací laser Aurel ALS 300, který bylo možno použít k řezání jednoduchých geometrických útvarů, což se využívalo k tvorbě obdélníkových LTCC plátků substrátů ze základních listů. K vyřezání prvních otvorů do testovacích substrátů byl vzhledem ke komplikacím s řezáním velkého množství kruhů a omezené programové výbavě použit externí gravírovací laser, jehož výkon a snazší programování umožnily připravit několik prvních substrátů. Kvalita ani přesnost opracování substrátů však nebyly právě ideální.

Další deformace tvaru nastává během laminace, kdy na keramiku působí tlak hydraulického lisu a v neposlední řadě jsou tvary ovlivněny během výpalu.

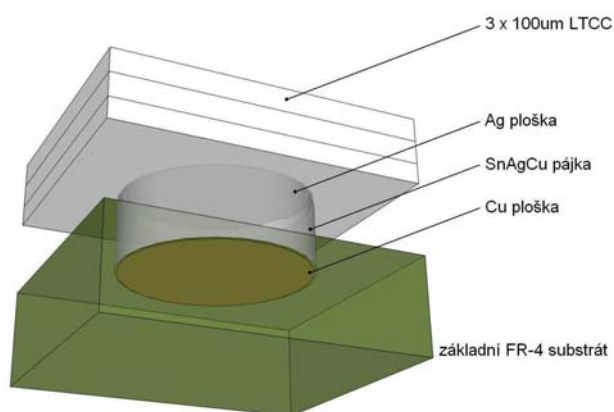
4.2.2 Testovací substrát BGA 225

Přes určité potíže byly postupně vytvořeny testovací „dimpled“ substráty ve formě jednoduchých BGA pouzder, kdy byl na dvojitou základní vrstvu keramiky natištěn Ag pastou motiv BGA 225 s řetězcovou testovací strukturou. Tuto sestavu překryla jedna vrstva LTCC s vyřezanými otvory o průměru 500 μm .

4.2.3 Pájení struktury BGA 225

Struktury byly následně pokryty vrstvou tavidla (Kester TSF 6592 pro BGA) a s pomocí nástroje pro osazení kuliček opatřeny kuličkami SnAgCu305 s průměrem 0,76 mm. Nástroj má v nerezovém plechu vyvrtanou matici otvorů, které slouží k fixaci kuliček na místě během procesu přetavení (reballing).

Kuličkami osazené substráty byly přetaveny a po sejmutí nástroje zůstaly kuličky připájeny na vnořených ploškách. Takto vzniklá testovací pouzdra bylo možné dále použít pro připájení ke standardním testovacím DPS (FR-4) s motivem základny pro BGA 225 a testování. Poněkud zjednodušené schéma spojení je znázorněno na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Schéma spojení struktury ve stavu po přetavení

4.2.4 Teorie termomechanického namáhání struktur

Teoretický výpočet životnosti pájeného spoje je možné získat s využitím mnoha únavových modelů, které kalkulují s teplotními cykly namáhajícími pájené spoje. Pro odhad životnosti, tedy počtu cyklů do poruchy, zamýšlených spojení bylo použito únavového modelu Engelmaiera [15], který počítá s počtem cyklů do 50% poruch z celkového počtu spojů podle rovnice 4.1:

$$N_f(50\%) = \frac{1}{2} \left[\frac{2\varepsilon_f}{\Delta D} \right]^m, \quad (4.1)$$

kde celkový počet cyklů do poruchy je N_f , ε_f vyjadřuje koeficient únavové tažnosti, ΔD vyjadřuje cyklické únavové poškození a m je exponent tvárnosti. Cyklické únavové poškození lze získat z rovnice 4.2:

$$\Delta D = \left[\frac{F \cdot DNP \cdot \Delta CTE \cdot \Delta T}{h} \right], \quad (4.2)$$

kde F je technický faktor, DNP je vzdálenost od nulového bodu/desky, ΔCTE je rozdíl součinitelů teplotní roztažnosti a ΔT je rozdíl teplot $(T-T_0)$ [K] při cyklech a h je výška pájeného spoje.

V rovnici 4.1 zmíněný exponent tvárnosti lze popsat rovnicí 4.3:

$$\frac{1}{m} = c_0 + c_1 \bar{T}_{SJ} - c_2 \ln\left(1 + \frac{t_0}{t_D}\right), \quad (4.3)$$

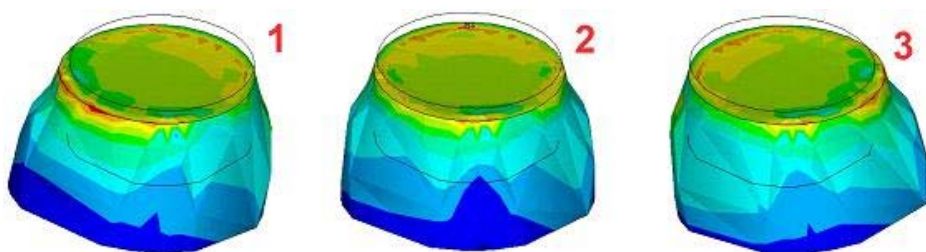
kde T_{SJ} vyjadřuje průměrnou cyklickou teplotu pájeného spoje, t_D je polovina doby trvání prodlevy za jeden cyklus [min] a t_0 , c_0 , c_1 , c_2 jsou specifické koeficienty pájecí slitiny. [15, 16]

Specifické koeficienty použité pro odhad vlastností struktury byly v případě SnAgCu pájky: $\epsilon_f = 0,425$; $c_0 = 0,480$; $c_1 = 9,3 \cdot 10^{-4}$; $c_2 = -1,92 \cdot 10^{-2}$ a $t_0 = 500$. Rozměrové parametry BGA 225 struktury jsou: $F = 1$; $DNP = 13,5$ mm; $CTE = 6,1$ ppm/°C⁻¹; $h = 0,538$ mm. FR-4 základna má $CTE = 14$ ppm/°C⁻¹. Testovací podmínky pro výpočet byly: $T_{\min} = -20^\circ\text{C}$, $T_{\max} = 100^\circ\text{C}$, $T_{si} = 40^\circ\text{C}$, $\Delta T = 120^\circ\text{C}$ a $t_D = 15$ min. Tedy $m = 2,225$ a $\Delta D = 0,0237$.

Na základě propočtů bylo zjištěno, že medián odpovídá 1430 cyklům, kdy by měly spoje s 50% pravděpodobností vykazovat poruchu. Pro testovací BGA 225 je však nutné si uvědomit, že tento stav je orientační a odpovídá již naprosto nefunkční struktuře. U obdobného skutečného BGA pouzdra často i poškození jen jednoho z propojů znamená ukončení provozu. Podobně přerušení i jednoho spoje v řetězcové testovací struktuře znamená stav poruchy.

4.2.5 Simulace struktur

Při spojení keramického a organického materiálu pájeným spojem byla provedena analýza namáhání pomocí simulačního programu Ansys. Vybrán byl segment s 25 propoji a použita teplota 100°C. Následující obrázek 4.2 znázorňuje vybrané tři pájené spoje struktury.



Obr. 4.2: Výstup základní simulace namáhání struktury BGA 225

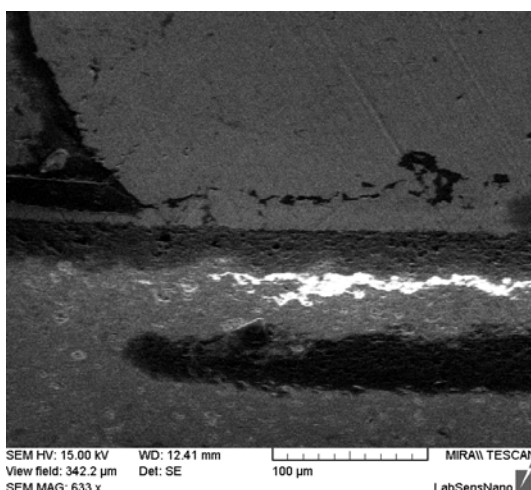
Z obrázku je patrné, že největší namáhání působí v místě spojení plošek na LTCC s pájkou spoje.

4.2.6 Test pájených struktur

Pro prozkoumání skutečných struktur bylo nutno nejprve takové struktury vytvořit. Jako základna posloužily již dříve zmíněné FR-4 desky plošných spojů s 35 μm vrstvou měděného motivu. Pájecí pasta pro osazení kuliček byla použita bezolovnatá pasta Cobar SAC3-XF3 se složením 96,5% Sn, 3% Ag, 0,5% Cu. Pasta byla natištěná pomocí nerezové šablony s tloušťkou 150 μm a otvory o průměru 800 μm . Kuličky byly použity od firmy Senju stejného složení, jako má pájecí pasta. Průměr kuliček 760 μm . K pájení bylo použito zařízení pro pájení v parách.

Zapájené substráty byly teplotně cyklovány v teplotní komoře od -20°C po $+100^{\circ}\text{C}$ a zpět každých 55 minut při setrvání 15 minut v obou extrémech. Struktury byly v komoře ponechány, dokud nedošlo k přerušení všech testovaných okruhů s cílem později detekovat místo poškození.

Na substrátech byl také proveden mechanický destruktivní test pomocí metalografického výbrusu. Na obrázku 4.3 je snímek zobrazující detailně jeden z mnoha zkoumaných „cracků“ neboli prasklin na pomezí cínového materiálu pájeného spoje (horní část) a keramického substrátu (spodní pás).



Obr. 4.3: Mikrovýbrus zapájené „dimpled“ struktury BGA 225

4.2.7 Zhodnocení prvních struktur

Při pájení se ukázalo, že SnAgCu pájka během přetavení ochotně narušovala stříbrné plošky v „dimpled“ struktuře a pohlcovala jejich stříbrný materiál, díky tomu značná část testovacích substrátů vykazovala problémy s propojením testovacího obrazce. Obtížná byla také příprava děrovaného substrátu. Jak simulace, tak následné testy v teplotní cyklovací komoře ukázaly nejvíce namáhané části struktury, ale také ve spojitosti se souběžnými testy Al_2O_3 struktur se shodným vodivým motivem potvrdily teorii, že vyšší spoje s „dimpled“ strukturou lépe odolávají namáhání

4.3 Pokročilý test „dimpled“ struktur se substráty LTCC HL2000

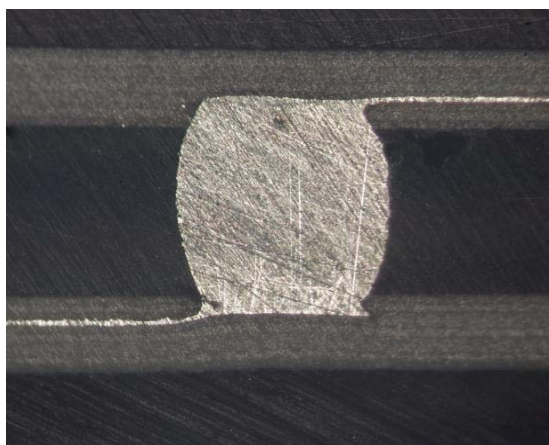
Navržen byl nový motiv typu „daisy chain“ s 64 propojenými ploškami, které po úspěšném zapájení vytvoří dva samostatné okruhy. Motiv respektuje standardizovanou velikost BGA pouzdra a také rozmístění plošek bylo zvoleno s ohledem na standard. Plošky mají průměr 0,6 mm a rozteč plošek je 2,54 mm střed – střed (tedy 2x standardní 1,27 mm). Šířka vodičů je 0,3 mm. Struktura se 64 otvory je také podstatně přijatelnější pro dostupný laser.

Vzhledem k deformacím testovacích vzorků s BGA 225 byly při laminaci používány zmírněné parametry lisu. Tlak (10 kN) a teplota (60°C) na úkor delších laminačních časů (10-15 min v závislosti na narůstající tloušťce). Laminace postupná po jedné vrstvě. Po natištění vodivého motivu s pomocí stříbrné pájitelné vypalovací pasty byly substráty zasušeny při teplotě 80°C po dobu 10 minut, aby se natištěná vrstva pasty zafixovala. Následně byla postupně laminována základna substrátu z trojice nepotištěných folií. Třetí vrstva je tvořena folií s vodivým motivem. Na závěr je laminována krycí vrstva s otvory. Po laminaci byly substráty vypáleny ve vsázkové peci LAC s pomocí perforovaných keramických podložek usnadňujících udržení rovinnosti

4.3.1 Pájené struktury „dimpled“ LTCC a jejich inspekce

Pro vytvoření propojení byla na protilehlé odpovídající substráty natištěna opět bezolovnatá pájecí pasta Cobar SAC3-XF3 s pomocí 100 µm šablony. Do natištěné vrstvy pasty byly osazeny pájecí kuličky Senju s průměrem 0,76 mm. Horní část sestavy byla po optickém sesouhlasení osazena s pomocí BGA opravárenské stanice Fritsch Mikroplacer a přetavena v zařízení pro pájení v parách.

Po zapájení byla u všech vzorků postupně provedena elektrická kontrola s pomocí testovacího obrazce, optická kontrola zařízením Ersascope a výbrusy. Metalografický výbrus jednoho ze spojů nasnímaný optickým mikroskopem je znázorněn na obr. 4.4.



Obr. 4.4: LTCC 3D „dimpled“ struktura po zapájení – detail výbrusu pájeného spoje

Z výbrusu je velmi dobře patrný soudkovitý tvar pájky, vodivé propojení stříbrnou pastou uvnitř keramických vrstev i tvar keramické vrstvy po laminaci a výpalu. Patrná

je určitá deformace tvaru, kdy se při laminaci materiál v lisu snaží přesunout do vytvořené dutiny, a zároveň tak deformuje i natištěné vodivé propoje. U různých spojů napříč všemi výbrusy byla tato deformace více či méně rozsáhlá, což naznačuje limity dostupné technologie a ukazuje na nutnost použití sofistikovanějších metod laminace pro případné vytváření přesných struktur podobného typu.

4.4 Test realizace napařených a galvanicky zesílených měděných struktur

Jako další zajímavá technologie využitelná v propojování se jeví využití depozice měděné vrstvy napařením [17]. Jako slibná se jevila možnost zhotovit pomocí takové vrstvy na keramice pružný element, ale také plošky, které by odolávaly při pájení lépe než plošky vytvořené stříbrnými vodivými vypalovacími pastami.

4.4.1 Postup přípravy základní měděné vrstvy

Testovány byly postupně různé tloušťky napařené vrstvy od cca 250 nm až po jednotky mikrometrů (5 - 7 μm). Ukázalo se však, že příliš silná vrstva napařené mědi, která snadněji překoná nerovnosti u LTCC vrstev nebo vrstev rezistu má na druhou stranu větší problémy s přilnutím k podkladu. Povrchová rezistivita napařené vrstvy se u plochých LTCC substrátů pohybuje v rozsahu 0,4 - 0,6 Ω při měření z rohu do rohu substrátu, u substrátů se schodovým přechodem mezi LTCC vrstvami narůstá na 2 Ω při měření přes schod. Napařený substrát je v následujícím kroku opatřen vrstvou fotocitlivého rezistu, který po osvitě a vyvolání ponechá obnažené jen plochy určené k zesílení měděné vrstvy, kdy se pomocí přípravku pro galvanické nanášení mědi zesílí vrstva v oblasti nezakryté rezistem. Jako mědicí lázeň slouží kyselý roztok 100 g CuSO_4 + 25 g H_2SO_4 na 0,5 l destilované vody [18]. Cílem bylo vytvoření 25 μm vrstvy, která byla kontrolována opticky porovnáním s vrstvou rezistu. Po vytvoření požadované vrstvy je 10 % roztokem hydroxidu sodného odstraněn zbývající fotorezist, čímž se opět obnaží napařená pomocná vrstva mědi, ze které vystupuje zesílený motiv. Ten je v dalším kroku od zbytku oddělen mikroleptem za pomoci silně ředěného roztoku kyseliny chlorovodíkové a peroxidu vodíku. Výsledný vzhled motivu po všech procesech je možné vidět na obrázcích 4.5.



Obr. 4.5: Výsledná podoba galvanicky zesíleného motivu (mikroskopický detail)

4.5 Pružné měděné plošky na keramice

Během testování technologie vytváření plošek na keramických substrátech se jako zajímavá varianta jevílo použití vakuově napařené a galvanicky zesílené vrstvy mědi k vytvoření pružné, tedy nefixované, plošky umožňující větší rozsah pohybu (pružnosti) ve srovnání s ploškami pevnými během teplotního namáhání substrátu a spoje.

Snahou bylo vytvořit plošky, které by byly na jedné straně pevně fixované k substrátu, a opačný konec by sloužil k připájení neseného substrátu. Jako vhodný výrobní postup se jevila modifikace procesu spočívající v nanesení, vytvrzení a vyvolání fotorezistu na část Al_2O_3 substrátu ještě před procesem napařením tenké vrstvy Cu. Těmito kroky by rozpuštěním fotorezistu pod mědí vznikl později uvolněný díl měděné struktury.

Jeden z mnoha výsledků těchto experimentů s dobře patrným poškozením motivu po odstranění fotorezistu je zobrazen na obrázku 4.6:



Obr. 4.6: Testovací sestava částečně uvolněných měděných plošek po odstranění fotorezistivních vrstev

Zatímco teoretická představa počítala s oddělením plošek po odstranění první vrstvy rezistu, v praxi se ukázalo, že právě onen rezist pod napařenou měděnou vrstvou je velmi obtížné odstranit tak, aby nedošlo k přílišnému poškození uvolňovaných částí měděného motivu. Postupně bylo otestováno několik různých tvarů (přímé, zahnuté, spirálovité) a šířek takovýchto struktur, ale zamýšlený postup se ukázal být náročnější na materiály, které byly k dispozici, než se očekávalo. Opakovatelný a k pájení použitelný výsledek se ale nepodařilo dosáhnout.

4.6 Test pájení napařených a galvanicky zesílených měděných struktur

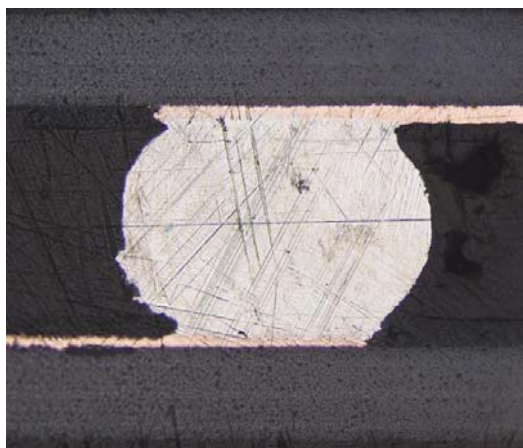
Dalším testem v pořadí bylo zhotovení pájitelných planárních motivů vhodných pro propojení substrátů do 3D struktur. Bylo rozhodnuto otestovat jak propojení keramika - keramika, tak také propojení keramika - FR-4. Vzhledem k již hotovým FR-4 testovacím substrátům i šablonám pro tisk pasty byl opět použit motiv BGA 64.

4.6.1 Pájení a vyhodnocení substrátů s měděným motivem BGA 64

Pro pájení substrátů bylo použito pro konzistenci s předchozími pokusy pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 natištěné na obě styčné plochy substrátů s pomocí 100 μm šablony.

Po přetavení byla provedena optická kontrola prozrazující rovnoměrné tvary pájených spojů jak u spojení keramika – keramika, tak u spojení keramiky s organickými substráty FR-4. Tvarům pájených spojů mezi keramikou a FR-4 napomáhá prakticky shodná úroveň smáčivosti mezi oběma měděnými povrchy. Přestože galvanicky zesílená měď je více porézní, je podstatně lépe smáčivá ve srovnání s vypalovanou stříbrnou vodivou tlustovrstvou pastou.

Kromě optické a elektrické nedestruktivní kontroly byly provedeny také mikrovýbrusy. Detail jednoho výbrusu je zachycen na následujícím obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Mikrovýbrus zapájené sestavy LTCC substrátů s měděnými vrstvami

Na obrázku je řez strukturou zhotovenou pomocí dvojice keramických substrátů skládajících se ze tří vrstev LTCC HL2000 s měděnými vrstvami. Při detailním zkoumání jsou dobře patrné intermetalické vrstvy na obou rozhraních, což poukazuje na kvalitně zapájené spoje. Stejně tak soudkovitý až mírně kulovitý tvar pájkového spoje s naprostým minimem bublin nebo prasklin je dokladem úspěšného pájení.

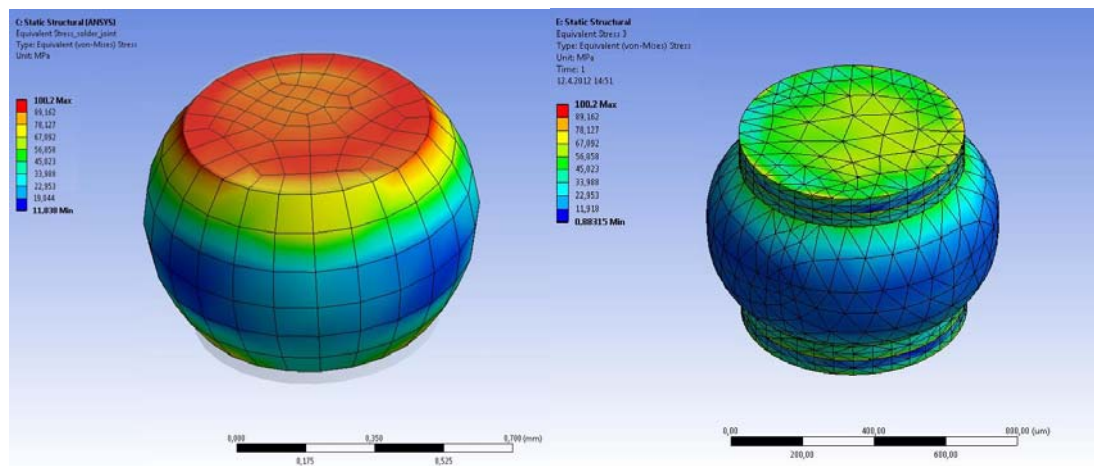
4.7 Test realizace napařených a galvanicky zesílených měděných „dimpled“ struktur na LTCC HL2000

Logickým vyústěním předchozích experimentů byla kombinace technologií do podoby „dimpled“ struktury s otvory v keramice opatřenými vrstvou napařené a galvanicky zesílené mědi.

4.7.1 Simulační rozbor „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

Jako jeden z prvních kroků před realizací vzorků však byla provedena simulace mechanického namáhání spojů při potenciálním teplotním cyklování s teplotním rozsahem -20°C až $+100^{\circ}\text{C}$. Největší namáhání klasického spoje je v místě spojení pájky s ploškou, zatímco samotné tělo pájkového spoje je již namáhání vystaveno méně.

Situace „dimpled“ struktury nám připomíná ve větším detailu „dimpled“ strukturu z předchozích simulací. Menší rozdíl je tvořen další vrstvou, která zvětšuje množství materiálu, jenž je k dispozici pro rozložení působení sil, které při teplotním namáhání vytvářejí pnutí ve spoji. Porovnání je zachyceno na Obr. 4.8.



Obr. 4.8: Schéma „dimpled“ LTCC sestav s napařenými a galvanicky zesílenými Cu ploškami

4.7.2 Příprava „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

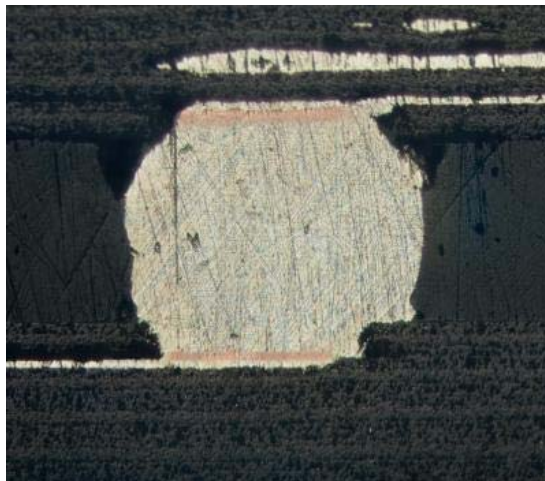
Postupné kroky přípravy vzorků vycházejí z technologií popsanych v předchozích kapitolách, což umožňuje poněkud zestručnit celý proces. Jako testovací motiv byl opět zvolen řetězcový BGA 64. Laserem vyřezané a stříbrným tlustovrstvým motivem potištěné substráty byly postupně po jedné vrstvě laminovány a následně vypáleny ve vsázkové peci. Změnou je krok, kdy byly vypálené substráty obratem umístěny do zařízení pro vakuové napařování, kde byly opatřeny 280 - 320 nm vrstvou mědi.

Substráty opatřené napařenou vrstvou byly dále potaženy laminovaným fotorezistem, ve kterém byly pomocí osvitů přes filmovou předlohu a vyvolání vytvořeny otvory korespondující s otvory v krycí vrstvě LTCC. Takto připravené substráty bylo možné v dalším kroku upevnit do pokovovacího přípravku a odhalenou vrstvu napařené mědi galvanicky zesílit. Po galvanickém procesu byl odstraněn nyní nepotřebný fotorezist a byla odleptána pomocná napařená vrstva mědi. Tloušťka výsledné vrstvy zesílené mědi se u vzorků pohybovala mezi 20 a 30 μm .

4.7.3 Pájení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

Pájení bylo opět provedeno v inertní atmosféře zařízení pro pájení v parách a zapájené vzorky byly podrobeny optické inspekci a elektrické kontrole obvodu.

Na vybraných vzorcích byly také provedeny mikrovýbrusy (Obr. 4.9) umožňující prozkoumání jednotlivých vrstev. Jak je z řezu patrné, vrstvy byly úspěšně spojeny jednotlivé vrstvy kovů. Při větším zvětšení detailů byly na vzorcích dobře detekovatelné i tenké vrstvy intermetalických slitin na rozhraních jednotlivých přechodů. Dobře patrné jsou také navazující vodivé cesty utopené ve vrstvách LTCC keramických substrátů.



Obr. 4.9: Detail mikrovýbrusu pájeného spoje

4.7.4 Zhodnocení „dimpled“ LTCC substrátů s měděnými ploškami

Jak je z mikrovýbrusu patrné, nepodařilo se uspokojivě dosáhnout předpokládané tloušťky měděné zesílené vrstvy v „dimpled“ struktuře. Nicméně experiment i tak ukázal zajímavou konstrukční možnost a také technologické limity dostupných přípravků.

4.8 Testovací struktura „dimpled“ LTCC s napařenými silnými Cu vrstvami

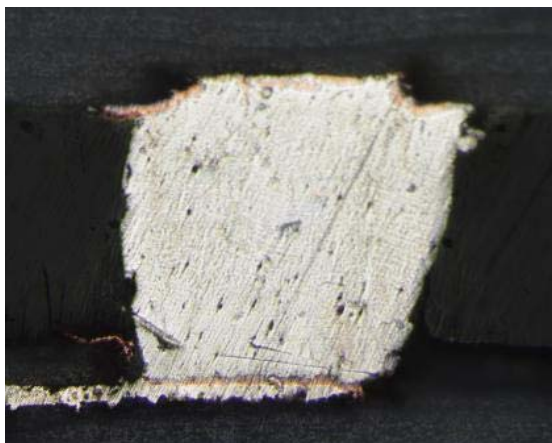
Během tvorby předchozího experimentu vyvstala myšlenka alternativního nanesení vrstvy mědi s pomocí napaření silné vrstvy přes šablonu s otvory. Takto zhotovená výsledná vrstva by poskytla dostatečnou ochranu pájecích plošek proti odsávání stříbra roztavenou pájkou a také by zajistila velmi dobrou smáčivost a pájitelnost povrchu.

Substráty pro tento experiment byly připraveny obdobně jako pro předchozí test. Rozdílný byl však proces napařování. LTCC „dimpled“ substráty byly po vypálení a prověření vodivých vrstev překryty mosaznými šablonami o tloušťce 100 μm s vyleptanými otvory pro motiv BGA 64. Testováno bylo několik různých průměrů otvorů od 0,5 mm až po 0,9 mm. Postupně bylo napařeno několik různých vrstev, z nichž nejsilnější dosáhly až úrovně 9 - 10 μm .

4.8.1 Pájení a zhodnocení substrátů s napařenou silnou vrstvou mědi

Na hotové substráty byla podobně jako u předchozích experimentů nanесena bezolovnatá pájecí pasta Cobar SAC3-XF3 pomocí 100 μm šablony. Následně byly do pasty osazeny pájecí kuličky Senju o průměru 0,76 mm. Substráty byly sesouhlaseny s pomocí stanice Fritsch a poté pájeny v zařízení pro pájení v parách.

Po pájení byla u substrátů úspěšně provedena elektrická a optická kontrola. Pro nahlédnutí do struktury pájených spojů byly provedeny mikrovýbrusy (Obr 4.10)



Obr. 4.10: Mikrovýbrus pájeného propoje mezi LTCC substráty se silnou vrstvou napařené Cu

Na fotografii mikrovýbrusu je patrná tenká vrstvička napařené mědi, která i po pájecím procesu kryje stříbrnou plošku z tlustovrstvé pasty, přes kterou je napařena. Je evidentní, že ani v tomto případě nedošlo k poškození plošek odsátím stříbra do pájkového propoje. Metoda může být využita tehdy, když není možné provést zesílení galvanické například z důvodu velmi složitého motivu.

4.9 Srovnání pájecích kuliček na různých substrátech pomocí testu stříhem

Pro porovnání jednotlivých typů kuličkových propojení byl mj. proveden test pevnosti stříhem. Kuličky jsou s pomocí nástroje testovacího zařízení namáhány silou působící ze strany, dokud nedojde k odtržení pájkového materiálu nebo i celého spoje včetně plošky. Síla působící na kuličku je průběžně měřena a zaznamenána je maximální hodnota před poklesem odporu hmoty, tedy zlomem, stříhem, odtržením.

Pro testy bylo použito zařízení Nordson Dage Bond Test 2400 PC. Stroj je vybaven hlavou umožňující uchycení různě širokých nástrojů pro horizontální test pevnosti stříhem, kdy nástroj ze strany působí silou na zkoumaný spoj.

4.9.1 Příprava a postup srovnávacího testu stříhem

K testu byly zvoleny substráty zastupující několik technologií: HL2000 LTCC „dimpled“ struktura, LTCC s měděnou zesílenou vrstvou, Al_2O_3 s měděnou vrstvou, Al_2O_3 se stříbrnými tlustovrstvými ploškami a také FR-4 substrát.

Substráty byly opatřeny 100 μm vrstvou pájecí pasty Cobar SAC3-XF3, do které byly osazeny pájkové kuličky Senju s průměrem 0,76 mm. Osazené sestavy byly zapájeny v zařízení pro pájení v parách.

Hotové vzorky byly v dalším kroku po jednom uchyceny do zařízení a na zapájených kuličkách byl proveden test stříhem.

4.9.2 Vyhodnocení srovnávacího testu stříhem

V grafickém zobrazení je možné snadno porovnat výsledky. Jako nejpevnější se ukázaly kuličky pájené na plošky organického FR-4 substrátu. Pouze s malým rozdílem se jako další v pořadí umístil Al_2O_3 substrát s napařenými a galvanicky zesílenými ploškami doplněnými nepájivou maskou. Na dalším místě s jen mírným odstupem se umístil „dimpled“ LTCC substrát HL2000. Ačkoliv je odolnost této kombinace ve srovnání s FR-4 přibližně poloviční, jde v oblasti LTCC o velmi dobrý výsledek, neboť LTCC substráty jsou oproti Al_2O_3 substrátům podstatně méně mechanicky odolné.

To se projevuje na hned dalším vzorku v pořadí, kterým je LTCC HL2000 substrát s měděnými galvanicky zesílenými ploškami. Při testu u tohoto vzorku docházelo k destrukci (natržení) měděných plošek v místě kontaktu s nosným substrátem, což potvrzuje odolnost měděné vrstvy i křehkost LTCC keramiky.

Jako poslední se umístila standardizovaná tlustovrstvá technologie využívající AgPd vodivou pastou vytvořený motiv.

4.10 Testovací struktury využívající pájecí kuličky s pevným jádrem

Jak již bylo zmíněno, kromě pájecích kuliček tvořených pouze pájovou slitinou existují také kuličky obsahující pevné jádro obalené vrstvou pájecí slitiny.

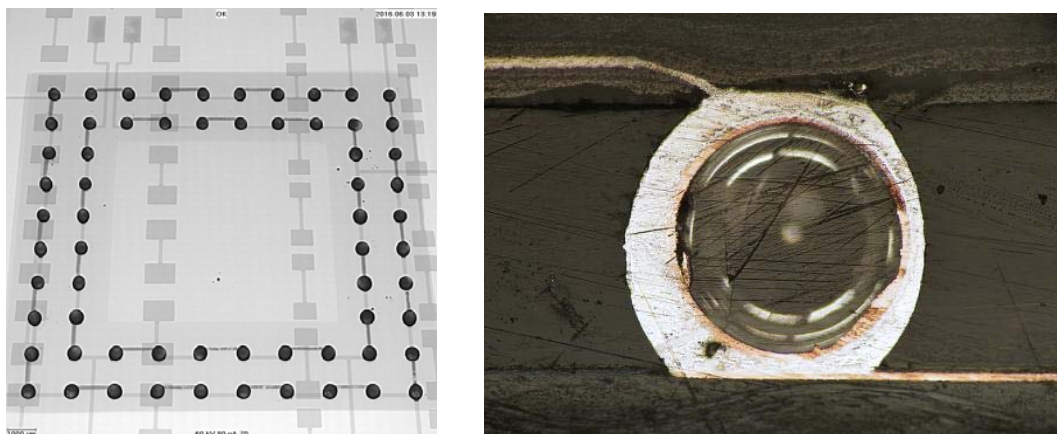
Pro testy struktur s pájecími kuličkami s pevným jádrem bylo zvoleno několik kombinací substrátů keramických i organických. LTCC HL2000 substráty v „dimpled“ verzi byly zhotoveny stejným postupem jako v předchozích experimentech s využitím ověřených postupů.

4.10.1 Vyhodnocení zapájených struktur

Po pájení byly sestavy podrobeny elektrickému testu řetězcového motivu. Vyhověly. Provedena byla také optická kontrola, při níž byly pomocí zařízení Ersascope pořízeny snímky tvaru pájených spojů. U části struktur byla také provedena 3D rentgenová analýza s cílem nahlédnout do struktury jakožto propojeného celku. Jako poslední pak byly provedeny rozbor detailů pájených spojů pomocí destruktivních mikrovýbrusů.

4.10.2 Propojení FR-4 + LTCC pájecími kuličkami SOL

Na obrázku 4.11 je k dispozici snímek z rentgenové analýzy tohoto spojení. Na snímku jsou dobře patrná jádra kuliček v jednotlivých pájených spoích i souměrnost spojů. Zároveň jsou velmi dobře patrná propojení jak měděným motivem na FR-4 substrátu, tak i uvnitř HL2000 LTCC „dimpled“ struktury. Na obrázku vpravo je dále zobrazen mikrovýbrus zkoumaného spojení. V řezu je dobře patrný jak pájkový spoj, tak i SOL kulička v pájce připájena.



Obr. 4.11: Rentgenová analýza spojení FR-4 + LTCC a detail výbrusu pájeného spoje

Zachycený řez spoje také ukazuje velmi souměrný případ pozice kuličky s plastovým jádrem. Je obklopena téměř souměrnou vrstvou cínu. Shodná vzdálenost od obou substrátů také potvrzuje funkci kuličky ve smyslu udržení mezery mezi substráty během přetavení.

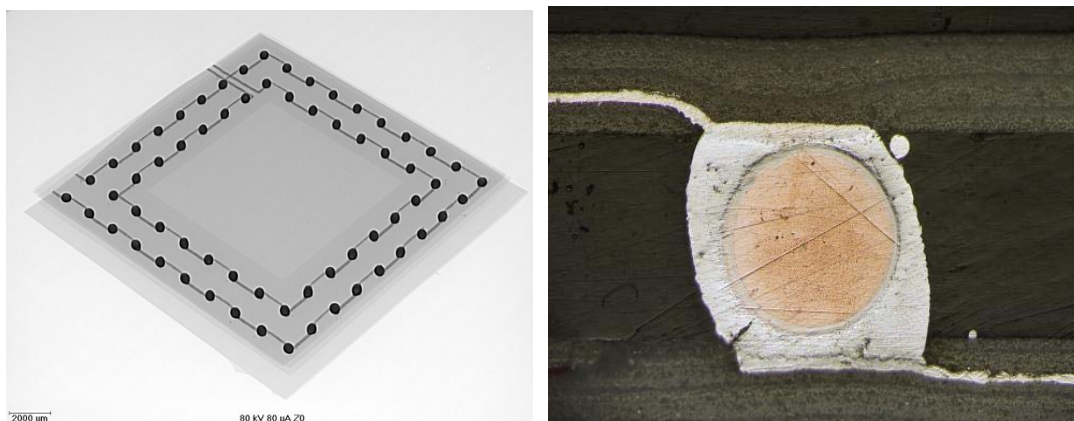
4.10.3 Propojení LTCC + LTCC pájecími kuličkami Senju s Cu jádrem

S použitím kuliček s měděným jádrem vznikla třetí varianta propojení. Tyto kuličky byly testovány v propojení LTCC substrátů, neboť jejich výhodu lze spatřovat jak v udržení definované mezery mezi spojovanými substráty, tak také ve velmi dobré vodivosti elektrické a hlavně tepelné. Právě tepelná vodivost mědi ve spojení s teplotně orientovanými parametry keramických materiálů jako jsou odolnost teplotnímu namáhání, menší teplotní délková i objemová roztažnost oproti organickým substrátům a výhodná vysoká tepelná vodivost zejména u Al_2O_3 , ale i relativně nižší, avšak stále dobře využitelná, u rozličných LTCC substrátů.

V závislosti na průměru kuliček lze spoje s nimi realizovat buď tak, že je jádro těsně obtékáno cínovou pájecí slitinou, nebo tak, že je jádro obklopeno silnější vrstvou pájky. První varianta vzniká při osazení do tavidla, druhá varianta při osazení do pájecí pasty a poskytuje více materiálu k absorpci teplotně mechanického namáhání během pájení. Pro testy byla použita varianta osazení do pájecí pasty.

Na obrázku 4.12 je dále k dispozici pohled na strukturu zachycený pomocí rentgenu. Tak jako u předchozích variant je zde dobře viditelné propojení testovacího obvodu. Rentgenovaná sestava byla kuličkami s měděným jádrem osazena pouze v rohových čtveřicích, což by bylo při praktickém nasazení výhodné spojení výhody udržení rovnoměrné mezery mezi spojovanými substráty, a zároveň snížení ceny.

Měděné jádro je u tohoto spoje i přes množství pájecí slitiny dominantní a snímek 4.12 podobně jako u SOL kuliček také ukazuje souměrnost mezery a umístění kuličky ve spoji. Na okrajích kuličky je také dobře vidět vrstva intermetalické slitiny na okraji kuličky, kde se setkává med', pájkový obal kuličky a pájecí slitina přidané pájecí pasty.



Obr. 4.12: Rentgenový pohled na spojení LTCC substrátů pájecími kuličkami s Cu jádrem a jeho mikrovýbrus

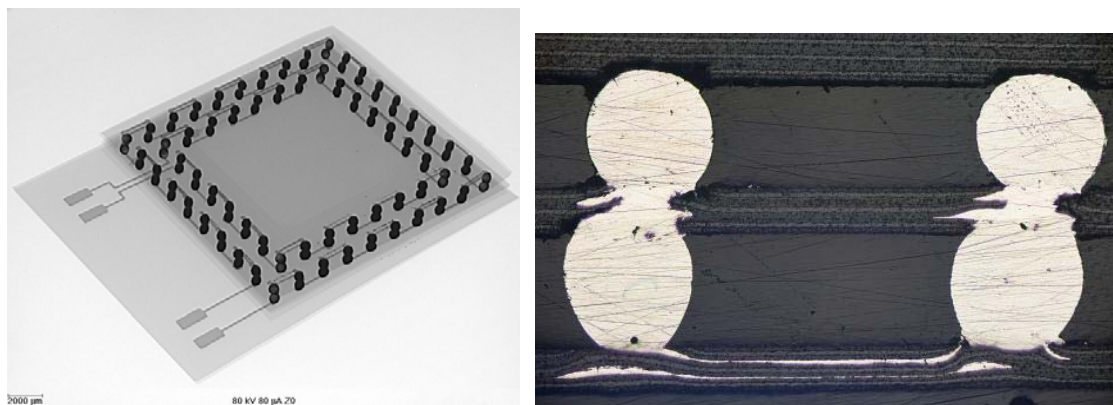
4.11 Vícepatrová LTCC struktura s prokovením a pájecími kuličkami s pevným jádrem

Dosud zkoumané varianty spojení si braly za cíl propojit vertikální cestou dva sousedící substráty formou pájeného spojení. V případě použití takové technologie pro pokročilejší sestavy je však třeba počítat i s propojením do dalších pater vzniklé struktury, nebo pouzdra. K tomu, aby bylo možné vést vodivou cestu přes substrát, je nutné nejprve substrát opatřit otvory v místě zamýšlených propojů. K vyplnění vytvořených kanálků byla použita vnitřní vodivá vypalovací stříbrná pasta Heraeus TC0308. Pasta byla do otvorů přes šablonu protlačena manuálně pomocí nerezové špachtle plnící funkcí těrky.

4.11.1 Pájení a vyhodnocení zapájených struktur

Hotové substráty byly potištěny 100 μm vrstvou pájecí pasty Cobar SAC3-XF3 a osazeny pájecími kuličkami Senju SAC 305 o průměru 0,76 mm. Pro udržení stejnoměrné mezery mezi substráty byly v rozích substrátu osazeny dvojice Sekisui SOL kuliček s plastovým jádrem.

Zapájené substráty byly zkontrolovány elektrickým testem. Pro náhled dovnitř struktury byly pořízeny rentgenové snímky (Obr. 4.13). Na obrázku jsou poměrně dobře detekovatelná velká plastová jádra u rohových dvojic, respektive u celé sestavy čtveřic, SOL kuliček. Snímek také dokumentuje řetězec testovací struktury, který prochází všemi vrstvami a umožňuje tak snadno otestovat elektrické propojení celou 3D strukturou. Pro doplnění přehledu je na obrázku také zachycen mikrovýbrus struktury v místě propoje klasických pájkových kuliček.



Obr. 4.13: 3D LTCC pájená vertikální struktura – rentgenové zobrazení a mikrovýbrus

4.11.2 Poznatky uplatnitelné při konstrukci univerzálního pouzdra:

Při výchozí rozvaze o budoucí konstrukci je třeba vycházet ze zamýšlené funkce kompletní sestavy, z osazených komponent i z prostředí pro danou aplikaci. Rozdělme si možné případy do několika příkladů:

Vícevrstvé pouzdro pro vytvoření kompaktního snímače s doplňkovými obvody

V tomto případě lze předpokládat snahu o minimální rozměry z důvodu možné instalace i do obtížně přístupných prostor. Svrchní vnější substrát bude pravděpodobně osazen snímacím prvkem na bázi elektrod. Tyto mohou být doplněny vytápěcím elementem z odporové vrstvy pro stabilizaci podmínek měření. Svrchní substrát bude dále elektricky propojen do další vrstvy struktury tak, aby byly pomocné obvody s převodníky a napájením co nejméně vystaveny působení snímaného prostředí. Při takovémto provedení by bylo vhodné použít „dimpled“ strukturu s prokovy vedenými přes substrát ve formě obvodového věnce kontaktů (podobně jako má motiv BGA 64) a na rohové plošky osadit kuličky s plastovým jádrem, které umožní dodržet rovnoměrný odstup mezi substráty. V případě agresivního prostředí bude vhodné vnitřní substráty opatřit krycí vrstvou (např. napářený Parylen), ochranným lakem, nebo i kompletní výplní mezer například epoxidem.

Vícevrstvé pouzdro pro výkonné součástky

Při konstrukci sestavy pro součástky generující množství problematického tepla, jako můžou být například výkonné LED diody, je nutno přizpůsobit dobrému odvodu tepla i samotnou strukturu svrchního vnějšího substrátu. Předpokládejme výkonnou diodu opatřenou nejlépe vlastním kovovým chladičem. Teplo z takové součástky je nutno co nejefektivněji rozvést do hmoty substrátů a odvádět dále na základní nosný substrát nebo další chladič. Výrazně zvýšit tepelnou vodivost vícevrstvé laminované LTCC keramiky lze oboustranným potiskem jednotlivých listů keramiky stříbrnou pastou a využitím velmi hustě zhotovených prokovů opět s výplní provedenou pomocí stříbrné vypalovací pasty. V místě kontaktu horního vnějšího substrátu s chladičem diody může absorpci tepla velmi dobře posloužit i dodatečná silná vrstva galvanické mědi

překrývající dále vedoucí prokovy. V místě montáže na další substráty bude vhodné zvážit i využití kuliček s měděným jádrem, neboť jejich tepelná vodivost ($360 \sim 400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ pro Cu jádro) je ve srovnání s čistě pájkovými kuličkami prakticky dvojnásobná. Měděná jádra navíc neobsahují po pájecím procesu duté voidy, neboli plynové bubliny, způsobené uvolňováním plynů z tavidel i roztavených materiálů do kapalné pájky, které přenos tepla pájeným spojem ještě dále zhoršují. Vzhledem k předpokládanému značnému tepelnému namáhání by jako základna dobře posloužil Al_2O_3 substrát dostatečné tloušťky, nebo deska plošných spojů s výraznou vrstvou metalického jádra z mědi či hliníku.

Propojovací element mezi keramickým pouzdrem a DPS

Vzhledem k širokým možnostem využití LTCC se naskytá i možnost substrát „dimpled“ struktury s prokovy osadit jako mezistupeň pro montáž keramického pouzdra, nebo křemíkového čipu s pájkovými kontakty (CSP) k dalším nosným substrátům. Cílem takového propojení je regulace teplotního mechanického namáhání, které je problémem v případě pájení CSP nebo keramických pouzder přímo na organické desky plošných spojů. Takto osazený prvek je zpravidla namáhán velkým rozdílem teplotní roztažnosti obou propojených materiálů a veškerá kompenzace spoléhá na samotné pájené spoje. Při pájení i při provozu se namáhání neziřídka projeví prasklinami v pouzdře, nebo ještě častěji poruchami pájených spojů. V případě použití mezipatra vytvořeného díky opracovatelnosti LTCC přesně na míru, by bylo možné zvláště s využitím kuliček s plastovým jádrem výrazně zredukovat mechanický stres působící na spojené díly. Zdvojení výšky propojů také dále rozloží působící síly.

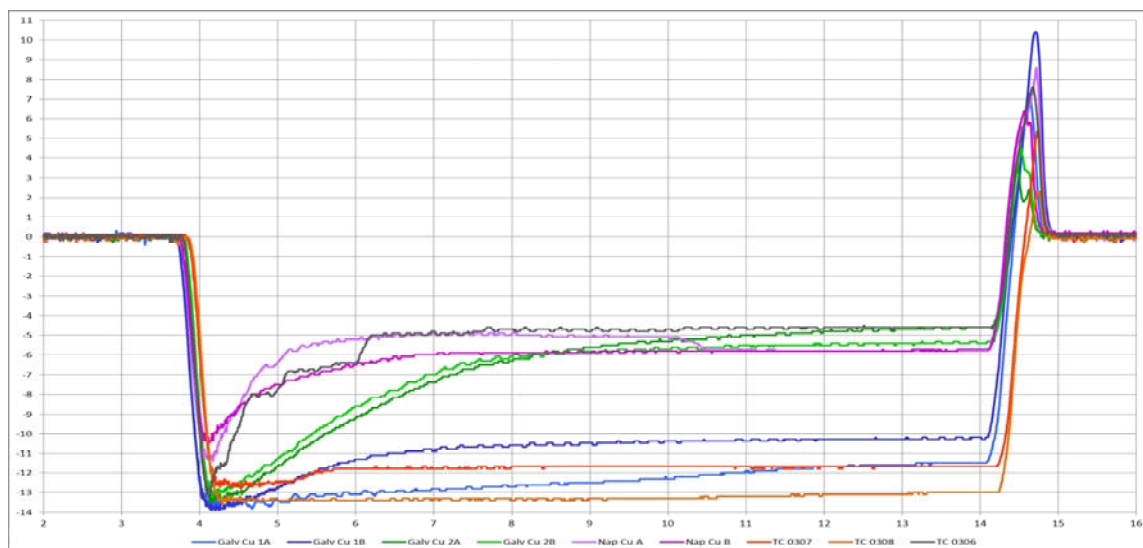
4.12 Srovnání smáčivosti vybraných povrchů

Pro doplnění dosavadních poznatků z pájení byl také proveden srovnávací test smáčivosti povrchů, které byly v této práci na LTCC HL2000 substrátech testovány. Jedná se o trojici stříbrných vypalovacích past TC0306, TC0307, TC0308 a dále povrchu s napařenou vrstvou mědi a povrchu s napařenou a galvanicky zesílenou vrstvou mědi. Cílem experimentu bylo vzájemně porovnat vzorky mezi sebou.

Pro test byly zhotoveny substráty o rozměru $14 \times 14 \text{ mm}$ sestávající vždy z trojice laminovaných vrstev LTCC opatřených zkoumanými povrchy. Pro měření byla použita bezolovnatá pájecí slitina SnAgCu 305 rozežhřátá v nádobce na teplotu 245°C . Vzorky byly do roztavené pájky ponořeny 3 mm hluboko. Použité tavidlo Cobar 396-DRX-M+. Smočení vzorku v pájce trvalo 10 sekund. Měděné vzorky byly použity z obou stran pro lepší prozkoumání opakovatelnosti.

4.12.1 Výsledky testů

Souhrnný výsledek z experimentu je k dispozici na následujícím grafu (Obr. 4.14), kde je možné pozorovat vzájemné srovnání povrchů.



Obr. 4.14: Graf celkových výsledků testu smáčivosti

Z grafických závislostí smáčecích sil na čase lze vyvodit řadu zjištění, která je však také nutné zkombinovat se stavem vzorků po experimentu.

Jako první byly zkoumány vzorky s napařenou a galvanicky zesílenou vrstvou mědi. Méně pórovitý povrch při setkání s pájkou poněkud déle odolával smočení. Při vyjímání vzorku se již ale na měděné ploše pájka dobře uchytila. Měděný povrch nebyl během testu nijak poškozen, vrstva se jen pokryla vrstvičkou cínu. U druhého vzorku s pórovitějším povrchem je možno pozorovat rychlejší smočení pájkou, ale na konci testu se pájka vzorku snadno pustila. Při pohledu na vzorek po experimentu jsou souvislosti jasnější. Poréznější méně kompaktní vrstva mědi byla agresivní kapalnou pájkou během ponoření zkonzumována, což vysvětluje rychlé opadnutí sil při vyjmutí vzorku.

Třetí vzorek opatřený pouze napařenou mědí vykázal velmi dobrý výsledek poměrně rychlého smočení. I v tomto případě však velmi agresivní rozehřátá pájka absorbovala a od keramiky částečně oddělila měděný materiál.

Vzorky s pastami TC0307 a TC0308 dle očekávání vykázaly smáčení omezené.

Vzorek TC0306 pájitelné stříbrné pasty je možné srovnávat s mědí. Po ponoru do roztavené pájky došlo relativně rychle ke smočení a pájka setrvala v kontaktu i při vyjmutí vzorku.

Zde je na místě použítou metodu uvést do souvislosti se situací při pájení v parách. Proces pájení v parách za použití kapaliny Galden 230 je výrazně delší než desetisekundový test smáčení. Rozdíl je jak v předehřevu, který u testu smáčivosti neexistuje, tak i v délce času, kdy roztavená pájka působí na pájecí plošky. Již z úvodních testů pájení jednotlivých struktur vyplynul nepříznivý vliv delšího působení kapalně pájky na stříbrnou pastu, což se později omezilo aplikací jak galvanicky zesílené, tak silné napařené vrstvy mědi. Dalším rozdílem jsou množství poměry roztavené pájky, její teploty i množství tavidla.

5 Závěr

Hlavním záměrem práce bylo rozšíření a ověření některých možných propojovacích postupů zejména u keramických substrátů a ve spojení s rozšířeným organickým substrátem úrovně FR-4. Jako nejzajímavější se k výzkumu jevily dosud jen málo prozkoumané ambiciózní nízkosmrštivé keramické LTCC substráty HeraLock HL2000 firmy Heraeus. Tato nová technologie spolu s kompatibilními vypalovacími pastami v sobě spojuje některé výhody keramických substrátů s možností tvorby vícevrstevných struktur. Důvodem volby těchto substrátů byla také jejich dostupnost na Ústavu mikroelektroniky a postupně rozvinutá základní sestava zařízení k práci s nimi sestávající s laseru pro přípravu substrátů, síťotisku, laminovacího lisu i vypalovací vsázkové pece. Na rozdíl od ostatních typů LTCC keramiky díky omezenému smrštění v planární úrovni se také design motivů a tvarování substrátů jevily jako proveditelné.

V součinnosti s celou řadou rozličných experimentů skupiny mikroelektronických technologií s tímto materiálem byla pozornost věnována hlavně metodám propojování substrátů. Úvodní experimenty s tímto neobvyklým materiálem měly za cíl otestovat realizovatelnost zamýšlených konstrukcí, nalézt zásadní problémy a pokusit se vyvinout postupy vedoucí ke zhotovení pozdějších komplikovanějších konstrukcí. Mnohdy to znamenalo nejen objevení nové slepé uličky, ale také potřebu obstarat další materiál, pomůcky i zařízení, nebo přístup k nim.

Velmi důležitým krokem pro tuto práci byla aplikace překryvné vrstvy LTCC s otvory přes motiv s pájecími ploškami, čímž vznikla struktura s d'olíky nazývaná u obdobných konstrukcí jako „dimpled“. Zmíněná struktura prokázala své výhody ve smyslu zlepšení odolnosti pájeného spoje na keramickém substrátu, což bylo během dalších experimentů hojně využito.

Další rozsáhlou částí práce je kapitola, jež se věnuje vytváření měděných struktur. Přestože aplikace mědi na keramický substrát sama o sobě není myšlenkou novou, aplikace měděné vrstvy na nízkosmrštivý LTCC substrát se specifickými vlastnostmi dosud testována a publikována nebyla. Po ověření základní technologie pro takový proces na snáze dostupné Al_2O_3 keramice byly provedeny četné pokusy také na LTCC substrátech.

Jedním ze směrů aplikace mědi byla snaha vytvořit z tohoto materiálu pružný element. Ukázalo se však, že technologické požadavky na výslednou vrstvu poněkud překračují dostupné technologické možnosti, a tak byla další pozornost věnována především aplikaci měděné vrstvy ve spojitosti s „dimpled“ strukturou, kde se podařilo dosáhnout úspěchů u zhotovených testovacích struktur.

Metoda aplikace mědi s pomocí napaření a zesílení otevřela také dveře možnosti využít jako vrstvy v pájených strukturách i pružné mylarové folie opatřené motivem. Poněkud stranou bylo zhotoveno i několik experimentálních substrátů na folii, nicméně se jedná o téma spíše pro samostatnou rozsáhlou práci, která by se věnovala rozdílnému chování jednotlivých fólií během pokovení, pájení, namáhání apod.

Obdobně dopadla zajímavá idea využití sestavy vrstev nepájivé masky ve spojitosti s napařenými a galvanicky zesilovanými vrstvami vedoucí k vytvoření velmi kompaktní vícevrstvé struktury na jednom nosném substrátu. Představit si lze nejen jednoduché propoje přemostňující dráhy vodivých cest, ale také vytvoření zvýšených měděných platforem pro osazení součástek, které by redukovaly mechanické namáhání během teplotních změn. Vzhledem k odbočení takových struktur do svébytné problematiky velkého rozsahu daleko od pájených vrstvených substrátů byla tato technologie ponechána k důkladnějšímu prozkoumání v jiných výzkumných pracích. Opět zde vyvstávají otázky chování jednotlivých materiálů nepájivých masek. Různá složení, tloušťky, metody nanášení i vytvrzování, vzájemná interakce s měděnými vrstvami, ale i elektrické parametry takových konstrukcí (průrazná napětí, elektromagnetická kompatibilita, rušení..).

Při vytváření keramických propojených substrátů se však také ukázalo mnoho nových komplikací, z nichž ne všechny bylo možné uspokojivě překonat. V laboratorně dostupných podmínkách je proces zpracování LTCC omezen hned na několika místech dosažitelnou přesností. Ať už při osvitu a vyvolání použitého fotorezistu, tak také při galvanickém procesu samotném, kdy je obtížné dosáhnout u všech vzorků po celé ploše konzistentní tloušťky i struktury zesílené vrstvy.

I samotná příprava surových keramických substrátů z LTCC se potýká s celou řadou dílčích těžkostí. Jsou to přesnost řezání s pomocí laseru, kdy paprsek opaluje substrát a nedokáže vytvořit čisté řezy přesně podle návrhu. Přesnost a opakovatelnost sítotisku tlustovrstvých vypalovacích past, kdy se projevují problémy sesouhlasení sítotisku jak pro více vrstev pasty, tak pro více substrátů. Používání malého objemu starší pasty také není z procesního hlediska ideální pro opakovatelné výsledky. A konečně sítotiskové zařízení samo, které je původně určeno pro tisk na Al_2O_3 substráty a je vybaveno vakuovým přísátím měkkých LTCC substrátů spíše provizorního charakteru.

Další výzvou je přesnost a opakovatelnost sesouhlasení substrátů při velmi kritickém laminačním procesu a také potíže s deformacemi, které jsou způsobeny použitím dostupného, ale zdaleka ne ideálního jednoosého hydraulického lisu.

Výpal struktur přinesl potřebu substráty podepřít rovnou, avšak nepřilnavou podložkou, která by umožnila nerušený přenos tepla a odpařování chemikálií, které se uvolňují ze substrátů samotných, ale také z natištěných past. V mnoha případech však nestačí ani dobrá podložka, neboť substráty složené z rozličně tvarovaných vrstev LTCC laminovaných dohromady mají tendenci se během výpalu kroutit. Tento jev lze omezit pouze sevřením substrátů mezi vhodné podložky, ovšem za cenu ještě větších omezení volného odpařování chemikálií i rovnoměrnosti ohřevu.

Celou kapitolu možných potíží dále představuje proces napařování, kdy rovnoměrná a přesně definovaná vrstva napařené mědi by vyžadovala velmi zdlouhavé napařování substrátů v omezeném počtu na otočném karuselu za neustálého sledování tloušťky napařené vrstvy. Dále také proces galvanického zesílení vrstvy, při kterém hraje roli celá řada faktorů počínaje kondicí mědicího roztoku, kvalitou elektrod, přesnou dávkou proudu, mícháním roztoku, oxidací, kontakty a detekcí tloušťky konče.

Stranou nelze ponechat ani simulace struktur, neboť některé ze vstupních parametrů LTCC materiálu a pájecí slitiny se podařilo získat až během experimentální činnosti vlastní i dalších kolegů ve skupině věnujících se testování pájených spojů např. u SMT součástek.

Kromě zaměření na pájkové spoje se práce věnovala také zajímavé technologii využívající speciální pájecí kuličky s pevným jádrem. Tyto kuličky představují minimálně rozšířenou propojovací technologii, která nabízí celou řadu výhod hlavně ve smyslu definování rovnoměrné mezery mezi spojovanými substráty, kde i drobné odchylky mohou způsobit rozsáhlé problémy se zkratovými můstky. Prozkoumány byly postupně kuličky s plastovým pokoveným i měděným jádrem. Zapájené spoje se ukázaly býti funkční alternativou pro klasický postup s kuličkami z pájecí slitiny.

Kombinací dosud zmíněných technologií pak byla závěrečná realizace vícestupňových propojení s pomocí prokovů v LTCC substrátech. Zapájené struktury jednak potvrdily možnost zhotovit vícevrstvé pouzdro pro spojení několika technologií do jednoho celku, ale opět upozornily na celou řadu dílčích procesních problémů, které v experimentálních podmínkách laboratoře nepříznivě ovlivňují opakovatelnost a přesnost zhotovených struktur.

Jak je z práce patrné, otevřela dveře mnoha novým postupům, které je možné dále rozvíjet ať už experimentální formou studentských prací, ale i při případných průmyslových aplikacích. Zde je vhodné aspoň okrajově zmínit například zájem britské pobočky firmy Selex ES o zmíněné metody 3D propojů LTCC substrátů. Bohužel pro odmítavý postoji firmy ke zveřejnění podrobností v závislosti na utajený vojenský vývoj v oblasti radarových technologií nebylo do druhé kapitoly práce možné zahrnout ani dílčí výsledky testů, které s LTCC provádějí. Z komunikace během roku 2015 si ale lze dovodit, že i dílčí výsledky práce publikované otevřeně, a tedy bez možnosti dalšího patentování, na studentských konferencích ISSE mohly směřovat například vývoj technologie budoucí avioniky pro letouny Eurofighter, nebo námořní radary.

Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, I., Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno, 2006, ISBN80-214-3292-6.
- [2] TUMMALA, R., Introduction to System-On-Package, McGraw-Hill, 2007, ISBN 0071459065
- [3] TUMMALA, R., Fundaments of Microsystems Packaging, McGraw-Hill, 2001, ISBN 0071371699
- [4] KOSINA, P. Planární obvodové prvky na technické keramice s nízkou teplotou výpalu. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012, Vedoucí práce J. Šandera
- [5] HERAEUS. Design Guidelines for LTCC: HeraLock HL200 Materials System. 2005. Dostupné z: <http://www.seaceramics.com/Download/Design%20Guides/HL2KDG.pdf>
- [6] HeraLock Tape HL2000. Heraeus [online]. 2011 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: http://heraeus-circuitscomponents.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/HL2000.pdf
- [7] LAUTZENHISER, F., AMAYA, E., HeraLock™ 2000 Self-constrained LTCC Tape, p. 43-49, Proceedings of the 2002 International Conference on Advanced Packaging and Systems (ICAPS), Reno, Nevada, March 12-13, 2002
- [8] Senju Metal Industry Co., Technical Bulletin, Sparkle Ball for BGA, CSP, Flip Chip Application, 1997
- [9] Sekisui Chemical Co., Plastic Core Solder Balls overview, Dostupné z: http://www.sekisui.com.hk/eng/product/fcd_a05.htm
- [10] LAUTZENHISER, F., AMAYA, E., BARNWELL, P., WOOD, J., Microwave module design with HeraLock™ HL2000 LTCC, Proceedings of IMAPS 2002, Denver, USA, ISBN 0-930815-66-1
- [11] PINEL, S., CHARKRABORTY, S., MANDAL, S., LIANG, H., LIM, K., ROELLING, M., KUNZE, R., TUMMALA, R., TENTZERIS, M., LASKAR, J., 3D integrated LTCC module using μ BGA technology for compact C-band RF front-end-module, Proceedings of IEEE International Microwave Symposium, 2002, s. 1553-1556, ISBN 0-7803-7239-5
- [12] SCHWANKE, D., HAAS, T., ZEILMANN, C., HALSER, K., KLEIN, M., Reliability Investigation of BGA-Interconnections between RF-LTCC-Modules and PCBs, In: Proceedings of 14th European Microelectronics and Packaging Conference, Fridrichshafen, Germany, p 213-218
- [13] KANGASVIERI, T., Surface-mountable LTCC-SIP module approach for reliable RF and millimetre-wave packaging, University of Oulu, Tampere, Finland, 2008, ISBN 978-951-42-8921-7

- [14] NOUSIAINEN, O., Characterization of second-level lead-free BGA interconnections in thermomechanically loaded LTCC/PWB assemblies, University of Oulu, Tampere, Finland, 2010, ISBN 978-951-42-6353-8
- [15] ENGELMAIER, W., Solder joint reliability: acceleration transforms and acceleration factors. Global SMT and Packaging. 2009. vol. 9. no. 8. ISSN 1474-0893
- [16] ENGELMAIER, W., Solder joint reliability prediction for chip components, MELFs, TSOPs, SOTs, etc. Global SMT and Packaging. 2009. vol. 9. no. 6. ISSN 1474-0893
- [17] MATTOX, D., M., Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, S.E., Elsevier Inc, 2010, ISBN 978-0-8155-2037-5
- [18] ŠKEŘÍK, J., Receptář pro elektrotechnika, SNTL, 1974, ISBN 0453788
- [19] KLÍMA, M. Nekonenční aplikace keramiky s nízkou teplotou výpalu. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2015. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [20] ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Temperature Cycling with Peltier Elements of Boards with SMD Components and Failure Evaluation. SOLDERING & SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, 2014, roč. 26, č. 2, s. 53-61. ISSN: 0954- 0911.
- [21] ADÁMEK, M.; ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Testování vlastností montáže součástek pro povrchovou montáž na desce č.v. 750555011 „Jednotka řízení snímače“, Závěrečná zpráva k úkolu řešeném v rámci smlouvy o dílo pro SMTplus.CZ s.r.o., HS 18257009, na základě objednávky č. 225/2013/UVY/ 570 od společnosti AŽD Praha. VUT Brno: 2014. s. 1-35.
- [22] ŠANDERA, J.; NICÁK, M. Výsledky teplotního cyklování vzorků a diagnostika poruch I. Brno: 2013. s. 1-11.
- [23] PSOTA, B.; KLÍMA, M.; NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Usage of LTCC Technology in Electronic Packaging. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics, 2013, roč. 36, č. 2013, s. 206-209. ISSN: 2161- 2528.
- [24] NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; STARÝ, J.; KOSINA, P.; PSOTA, B. Properties of 3D LTCC Structure Interconnections. ElectroScope - <http://www.electroscope.zcu.cz>, 2012, roč. 2012, č. VI., s. 1-5. ISSN: 1802-4564.
- [25] NICÁK, M.; PSOTA, B.; KOSINA, P.; STARÝ, J.; ŠANDERA, J. Properties of 3D LTCC Structure interconnections. In Electronics Devices and Systems 2012. 1. Tábor 43a, 612 00 Brno: Ing. Vladislav Novotný - Litera, 2012. s. 245-251. ISBN: 978-80-214-4539- 0.

- [26] NICÁK, M.; PSOTA, B.; STARÝ, J.; ŠANDERA, J.; KOSINA, P. Zero Shrink LTCC 3D Structure Interconnections. In 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27- 29, A-1040 Wien - Austria: IEEE Xplore digital library, 2012. s. 128-132. ISBN: 978-1-4673-2241- 6. ISSN: 2161- 2528.
- [27] NICÁK, M.; ŠANDERA, J. 3D LTCC and Flexible Structure Interconnections Based on Galvanized Layers. In Proceedings of 18th European microelectronics packaging conference EMPC 2011. Brighton, UK: IMAPS- Europe, 2011. s. 358-361. ISBN: 978-0-9568086-0- 8.
- [28] NICÁK, M.; KOSINA, P.; ŠANDERA, J. 3D Propojovací struktury realizované pomocí galvanických vrstev na keramických substrátech. In MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. 1. Brno: Novpress, 2011. s. 25-30. ISBN: 978-80-214-4405- 8.
- [29] ADÁMEK, M.; NICÁK, M. Některé aspekty postavení pájení BGA pouzder a speciálních komponent ve výukovém procesu. In IMAPS - Mikroelektronika současnosti. Odborný seminář organizovaný International Microelectronics and Packaging Society. Sborník příspěvků. Brno: NOVAPRESS s.r.o., Brno, 2011. s. 44-48. ISBN: 978-80-214-4404- 1.
- [30] ŠVECOVÁ, O.; NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; KOSINA, P. Recent advance in solder ball interconnections reliability examination. In ISSE 2011 - Proceedings. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. 1. Košice, SK: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 253-257. ISBN: 978-1-4577-2111- 3. ISSN: 2161- 2528.
- [31] NICÁK, M.; ŠANDERA, J. On the Application of 3D LTCC and Flexible Structures Based on Galvanized Layers. In ISSE 2011 - Proceedings. Electronics Technology (ISSE), 2011 34th International Spring Seminar on Electronics. 1. Košice, SK: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 109-111. ISBN: 978-1-4577-2111- 3. ISSN: 2161- 2528.
- [32] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; ŠANDERA, J.; PULEC, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead- Free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structure. In Key Engineering Materials Vol. 465 (2011). Key Engineering Materials (print). Švýcarsko: Trans Tech Publications, 2011. s. 491-494. ISBN: 978-3-03785-006- 0. ISSN: 1013- 9826.
- [33] NICÁK, M. Development of Lead-free Soldered 3D structures. In STUDENT EEICT 2010. 1. Brno: NOVAPRESS, 2010. s. 231-235. ISBN: 978-80-214-4079- 1.
- [34] NICÁK, M.; ŠVECOVÁ, O.; PULEC, J.; ŠANDERA, J.; SZENDIUCH, I. Reliability and Simulation of Lead- free Solder Joint Behavior in 3D Packaging Structures. 6th International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture - MSMF6 - Abstract booklet. 1. Brno: VUT Brno,

- FSI & Repropress, Srbská 53, Brno, 2010. s. 184-184. ISBN: 978-80-214-4112-5.
- [35] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Použití pájecích kuliček v 3D pouzdření. In Mikrosyn. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích. 1. Brno: Novpress, 2010. s. 11-19. ISBN: 978-80-214-4229- 0.
 - [36] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Contribution to Lead-free soldered 3D Structures. In Second Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum "Education Quality - 2010" : Proceedings. Izhevsk, Russia: Publishing House of ISTU, 2010. s. 378-382. ISBN: 978-5-7526-0442- 3.
 - [37] 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.
 - [38] NICÁK, M.; ŠANDERA, J.; SZENDIUCH, I. Contribution to realization of 3D structures. In 33rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2010. Warsaw, Poland: IEEE Xplore digital library, 2010. s. 156-159. ISBN: 978-1-4244-7849- 1.
 - [39] NICÁK, M.; SZENDIUCH, I. Contribution to realization of 3D structures. Abstract proceedings. Polymer Electronics and Nanotechnologies: towards System Integration. Warsaw, Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010. s. 110-111. ISBN: 978-83-7207-870- 4.
 - [40] ADÁMEK, M.; PRÁŠEK, J.; NICÁK, M. The students' workplace for special components soldering and inspection. In EDS'09 IMAPS CS International Conference Proceedings. Brno: NOV PRESS s.r.o., 2009. s. 392-396. ISBN: 978-80-214-3933- 7.
 - [41] ADÁMEK, M.; PRÁŠEK, J.; NICÁK, M. New trends of BGA Soldering in education. Electronics, 2009, roč. 3, č. 2, s. 26-28. ISSN: 1313- 1842.
 - [42] NICÁK, M. Optimalization of Lead-free Soldering Process. In Proceedings of the 13th Conference Student EEICT 2007. Volume 1. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Ondráčková 105, Brno, 2007. s. 135-137. ISBN: 978-80-214-3407- 3.

Vedené bakalářské práce

- [43] SOMER, J.; Parametry spojů BGA na keramických Al₂O₃ substrátech, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2011
- [44] BOBEK, J.; Návrh a zhotovení zařízení pro osazování pájecích kuliček, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2013
- [45] BRÁNECKÝ, M.; Návrh a realizace úprav zařízení pro metalografické výbrusy, Brno, Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2013

Vlastní tvůrčí aktivity

- [F1] NICÁK, M.; KLÍMA, M.: OSVIT_ NK; Zařízení k UV osvit sít určených pro sítotisk tlustovrstvých hybridních integrovaných obvodů. Technická 10, Lab. 0. 67. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-osvitka.pdf>. (funkční vzorek)
- [F2] NICÁK, M.; BRÁNECKÝ, M.: Metasinex Lux; Automatizace zařízení pro metalografické výbrusy. Technická 10, Lab 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-metasinex.pdf>. (funkční vzorek)
- [F3] NICÁK, M.; BOBEK, J.: Ball Placer; Zařízení pro hromadné osazení pájecích kuliček BGA. Technická 10, Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/nicak-fv-rameno.pdf>. (funkční vzorek)
- [F4] KOSINA, P.; NICÁK, M.: sablona 82x82; Šablony pro laminaci LTCC. Technická 10, Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/kosina-fv-sablony.pdf>. (funkční vzorek)
- [F5] KLÍMA, M.; NICÁK, M.: M1/2012; Horizontální válcová míchačka tlustovrstvých past. VUT, FEKT, UMEL, Technická 3058/10, 616 00 Brno. Lab. 0. 64. URL:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/vyzkum/vysledky/funkcni-vzorky/klima-fv-michacka.pdf>. (funkční vzorek)

Účast na projektech:

- [P1] Výzkum moderních a inovačních technologií pro propojování a pouzdření v mikroelektronice, zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2016
- [P2] Pracoviště pro testování pevnosti pájených spojů - 2738 - G1, zahájení: 01.03.2011, ukončení: 31.12.2011 (*hlavní řešitel*)
- [P3] Výzkum excelentních technologií pro 3D pouzdření a propojování elektronických čipů a obvodů, zahájení: 01.01.2011, ukončení: 31.12.2014
- [P4] Integrované 3D vícevrstvé struktury a pouzdra s vnořenými (embedded) součástkami, zahájení: 01.01.2010, ukončení: 31.12.2010
- [P5] FR-TII/072, Aplikace moderních montážních technologií a materiálů v elektrotechnickém průmyslu, zahájení: 04.03.2009, ukončení: 31.12.2011