

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

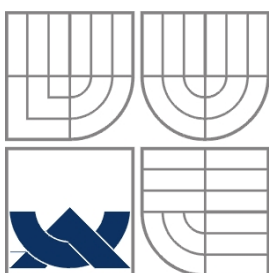
VODIVÉ PROPOJENÍ KERAMIKY S FR4 V 3D STRUKTUŘE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

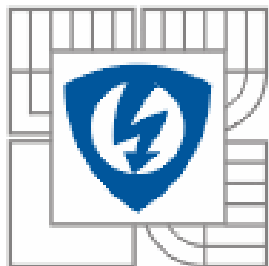
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV PELC

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VODIVÉ PROPOJENÍ KERAMIKY S FR4 V 3D STRUKTUŘE

CONDUCTIVE CONNECTION OF CERAMICS WITH FR4 IN 3D STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

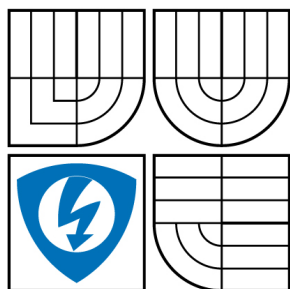
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV PELC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PETR KOSINA

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Pelc Miroslav

ID: 83372

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Vodivé propojení keramiky s FR4 v 3D struktuře

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student podle zapojení v katalogovém listu (MGA82563) vyhotoví na keramický substrát motiv plošného spoje. Pro tento modul navrhne vhodný stabilizátor napětí, který bude realizován na substrátu FR4. Po vyhotovení těchto dvou částí se zaměří na propojení (nakontaktování) keramického substrátu s FR4. Na závěr práce prověří spolehlivost spojení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/64765/HP/MGA-82563-BLK.html>

<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22743/STMICROELECTRONICS/LF33C.html>

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Petr Kosina

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Miroslav Pelc
Bytem: Kladeruby 87, 756 43
Narozen/a (datum a místo): 13.2.1985, Valašské Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vodivé propojení keramiky s FR4 v 3D struktuře
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Petr Kosina
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: 12.6. 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá vodivým propojením keramických substrátů s FR4 do trojrozměrných struktur. Jako konkrétní aplikace, byl na keramický substrát vytvořen vysokofrekvenční zesilovač, za účelem ověření vlastností substrátu na výsledné chování obvodu. Napájecí napětí pro tento zesilovač je zajišťováno ze zdroje stejnosměrného napětí, navrženého na FR4. Práce se dále zabývá ověřováním kvality vodivého propojení substrátů a jednotlivými aspekty, ovlivňujícími výslednou spolehlivost spojení.

Abstract:

This work deals with conductive connections ceramic substrate with FR4 into three – dimensional structure. High frequency amplifier was created on ceramic substrate as a concrete application, for check quality substrate on resulting behavior circuit. The supply voltage for this amplifier is provided by the DC voltage source developed for FR4. Further the thesis deals with quality verification of substances conductive connection and individual aspects, with affect resulting reliability of connection.

Klíčová slova:

Keramický substrát, FR4, 3D struktura, spolehlivost vodivého spojení, teplotní cyklování

Keywords:

Ceramic material, FR4, 3D structure, reliability of conductive connection, thermal cycling

Bibliografická citace díla:

PELC, M. *Vodivé propojení keramiky s FR4 v 3D struktuře*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kosinovi za metodické a cíleně orientované vedení, a za cenné náměty a odborné rady při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na bakalářskou práci. Dále děkuji Ing. Josefovi Šanderovi, Ph.D. za poskytnutí prostoru k realizaci experimentálních prací a za příkladné vedení při řešení jednotlivých projektů souvisejících s tématem bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. z Ústavu radioelektroniky, za poskytnutí prostoru k měření.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Miroslav Pelc
Název závěrečné práce: Vodivé propojení keramiky s FR4 v 3D struktuře
Název závěrečné práce ENG: Conductive connection of ceramics with FR4 in 3D structure

Anotace závěrečné práce:

Předkládaná práce se zabývá vodivým propojením keramického substrátu s běžně používaným materiálem pro torbu desek plošných spojů do trojrozměrných struktur. Jako konkrétní aplikace byl na keramický substrát vytvořen vysokofrekvenční zesilovač, za účelem ověření vlastností substrátu na výsledné chování obvodu. Napájecí napětí pro tento zesilovač je zajišťováno ze zdroje stejnosměrného napětí, navrženého na FR4. Práce se dále zabývá ověřováním kvality vodivého propojení substrátů a jednotlivými aspekty, ovlivňujícími výslednou spolehlivost spojení.

Anotace závěrečné práce ENG:

This work deals with conductive connections ceramic substrate with FR4 into three – dimensional structure. High frequency amplifier was created on ceramic substrate as a concrete application for check quality substrate on resulting behavior circuit. The supply voltage for this amplifier is provided by the DC voltage source developed for FR4. Further the thesis deals with quality verification of substances conductive connection and individual aspects, with affect resulting reliability of connection.

Klíčová slova:

Keramický substrát, FR4, 3D struktura, spolehlivost vodivého propojení, teplotní cyklování

Klíčová slova ENG:

Ceramic material, FR4, 3D structure, reliability of conductive connection, thermal cycling

Typ závěrečné práce: bakalářská
Datový formát elektronické verze: formát pdf
Jazyk závěrečné práce: český
Přidělovaný titul: Bc.
Vedoucí závěrečné práce: Ing. Petr Kosina

Škola: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor: Mikroelektronika

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	ZAKLADNÍ NOSNÉ SUBSTRÁTY	11
3	VRSTVOVÉ TECHNOLOGIE A SÍTOTISK	14
3.1	TLUSOVRSTVÉ TECHNOLOGIE.....	14
3.2	METODY NANÁŠENÍ TLUSTÝCH VRSTEV.....	16
3.3	VÝPAL.....	19
4	PÁJENÍ V PARÁCH	21
5	3D STRUKTURY	22
5.1	ZPŮSOBY KONTAKTOVÁNÍ 3D STRUKTUR.....	23
6	PRAKTICKÁ REALIZACE 3D STRUKTURY	26
6.1	NÁVRH VYSOKOFREKVENČNÍHO ZESILOVAČE	26
6.2	NÁVRH NAPÁJECÍ ČÁSTI	29
6.3	VYTVOŘENÍ 3D STRUKTURY	31
7	MĚŘENÍ	34
7.1	MĚŘENÍ SPOLEHLIVOSTI TEPLTNÍM CYKLOVÁNÍM	34
7.2	MĚŘENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY ZESILOVAČE	39
8	ZÁVĚR	41
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42

Seznam obrázků

Obr. 1: Pasivní odpor.....	15
Obr. 2: Princip sítotisku.....	16
Obr. 3: Sítotisková šablona.....	17
Obr. 4: Detail dvou sít s různou světlostí	18
Obr. 5: Teplotní profil výpalu LTCC	19
Obr. 6: Detail vypálené vrstvy.....	20
Obr. 7: Pájení v parách	21
Obr. 8: Teplotní profil pájení v parách	21
Obr. 9: Multičipová struktura	22
Obr. 10: Multisubstrátová struktura.....	22
Obr. 11: Propojení klasickými vývody.....	23
Obr. 12: Propojení hranovými spoji	23
Obr. 13: Propojení kulovými vývody	24
Obr. 14: Propojení pomocí SMD součástek	24
Obr. 15: Propojení LTCC substrátu prokovy	25
Obr. 16: Laminace	25
Obr. 17: Schéma zapojení zesilovače	26
Obr. 18: Vodivé propojení zesilovače, strana TOP	27
Obr. 19: Vodivé propojení zesilovače, strana BOTTOM.....	27
Obr. 20: Osazovací výkres zesilovače.....	27
Obr. 21: Natištěný a vypálený keramický substrát.....	27
Obr. 22: Ruční sítotiskový stroj.....	28
Obr. 23: Schéma napájecí části obvodu.....	29
Obr. 24: Motiv vodivého propojení.....	30
Obr. 25: Osazovací výkres.....	30
Obr. 26: Schéma vodivého propojení mezi substráty.....	32

Obr. 27: Technologický postup vytváření 3D struktury	33
Obr. 28: Výsledná 3D struktura FR4 - Keramika	33
Obr. 29: Výsledná 3D struktura FR4 – FR4.....	33
Obr. 30: Testované obvody: vlevo FR4 – FR4, vpravo FR4 – Al ₂ O ₃	34
Obr. 31: Velikosti působících sil vlivem TCE	36
Obr. 32: Umístění součástek pod substrátem, A) Podélně, B) Příčně	37
Obr. 33: Spodní strana desky keramického substrátu, po teplotním cyklování.....	38
Obr. 34: Detail SMD součástky po teplotním cyklování.....	38
Obr. 35: Měřené zesilovače, vlevo na substrátu FR4, vpravo na keramickém substrátu	39
Obr. 36: Naměřené charakteristiky zesilovačů.....	40

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení základních organických substrátů z hlediska výrobních materiálů.....	11
Tab. 2: Vlastnosti nejpoužívanějších základních organických materiálů.....	12
Tab. 3: Vlastnosti keramických substrátů.....	13
Tab. 4: Seznam použitých součástek pro vysokofrekvenční zesilovač	28
Tab. 5: Seznam použitých součástek pro napájecí část	31
Tab. 6: Varianty vodivého propojení.....	37

1 Úvod

V dnešní době jsou vytvářeny moderní elektrické obvody stále rychlejší a výkonnější. Vodivé části elektronických obvodů se chovají jako vedení a ovlivňují tvar signálu. Vznikají nežádoucí kapacitní a induktivní vazby, dochází k různým odrazům a rušení signálu. Pro dokonalý přenos je třeba zajistit jeho optimální šíření s minimálním zkreslením a ztrátami [1]. Na vzniku nežádoucích vazeb se může podílet špatný návrh a konstrukce, neposlední řadě také vlastnosti základního substrátu. Proto se tedy pro některé aplikace používají anorganické (keramické) materiály, které vykazují lepší elektrické, mechanické, chemické a teplotní vlastnosti.

Anorganické materiály mají i své nevýhody, především je to horší mechanické zpracování (vrtání, řezání), zpravidla nákladnější výroba a dostupnost technologií. Proto je třeba zvolit rozumný kompromis, při návrhu dané aplikace. Je zbytečné navrhovat složitější obvod na keramický substrát. Lepším řešením je rozčlenit danou aplikaci na jednotlivé funkční bloky. Poté pro tyto bloky vybrat vhodné základní materiály, vyhovující z hlediska tepelných, chemických mechanických a elektrických vlastností nebo podle konkrétních požadavků na konečný výrobek.

Dále je potřeba vyřešit problém, jak tyto funkční bloky vhodně propojit. Spojení dvou substrátů pomocí konektorů a drátových vodičů se ukázalo pro některé aplikace jako nevhodné neefektivní z hlediska úspory místa a vzhledem k tvorbě nežádoucích vazeb, vyskytujících se především u vysokofrekvenčních a výkonových aplikací. Jako možné řešení se ukázalo spojení do tzv. 3D struktur. 3D struktury jsou trojrozměrná uspořádání funkčních bloků, celků nebo systémů. V podstatě jde o vodivé propojení základních nosných materiálů v ose z. 3D struktury nabízejí mnoho výhod, především jde o větší integraci součástí a úsporu místa, omezení negativních vazeb a různé konstrukční výhody vycházející ze způsobu propojení substrátů. Jako dílčí problém při vytváření 3D struktur je nutné vyřešit nestejnou teplotní délkovou roztažnost při spojení dvou různých substrátů.

Cílem předložené bakalářské práce je navrhnout a realizovat vodivé spojení FR4 a keramiky. Jako možnou aplikaci navrhnout na keramický substrát vysokofrekvenční zesilovač. Pro něj navrhnout zdroj napájení, realizovaný na substrátu FR4. Oba tyto funkční bloky propojit do 3D struktury a otestovat spolehlivost propojení.

2 Zakladní nosné substráty

Základní materiály jsou elektroizolační podložky, které slouží jako nosný substrát k zhotovení motivu a montáži součástek a jiných mechanických prvků. Nosné substráty se mohou dělit na organické a anorganické. Organické substráty se skládají z pojiva a výztuže. Na základní materiál je nanosená tenká měděná folie pro vytváření vodivých motivů. Pojiva jsou různé směsi pryskyřic a plastů, zajišťující pružnost a určitou elasticitu základního materiálu. Výztuž tvoří tenké vrstvy papíru nebo skelné tkaniny. Tato část základního materiálu vykazuje naopak určitou pevnost. Vhodným výběrem těchto materiálů lze vyrobit základní substrát s požadovanými mechanickými, chemickými, teplotními a elektrickými vlastnostmi. Rozdělení některých organických substrátů z hlediska výrobních materiálů je uvedeno v **Tab. 1.** [1]

Tab. 1: Rozdělení základních organických substrátů z hlediska výrobních materiálů

Materiál	Výztuž	Pojivo
FR2	Celulózový papír	Fenolformaldehydová pryskyřice
FR3	Tvrzený papír	Epoxidová pryskyřice
FR4	Skelná tkanina	Epoxidová pryskyřice
CEM-1	Papír, skelná tkanina	Epoxidová pryskyřice
FR5	Skelná tkanina	Epoxidová pryskyřice
FR6	Skelná rohož	Polyesterová pryskyřice

Zkratka FR (Flame Retardant) značí, že vybraný materiál je nehořlavý. Následující číslo označuje kvalitu základní podložky, čím vyšší je toto číslo, tím lepší materiály byly použity na její výrobu. V současnosti je stále častěji kladen důraz na vysokou kvalitu a jakost výrobku s ohledem na relativně nízkou cenu. Abychom mohli mezi sebou objektivně porovnávat různé druhy substrátů je třeba znát jejich vlastnosti a parametry. U organických substrátů posuzujeme parametry vodivé vrstvy a izolační podložky. Vodivá vrstva by měla mít tyto vlastnosti, např. dobrá elektrická vodivost nebo měrný elektrický odpor, dobrá tepelná vodivost a pokud možno, co nejmenší součinitel teplotní roztažnosti. U izolační podložky hodnotíme relativní permitivitu, izolační odpor a tangentu ztrátového činitele. Některé vlastnosti a parametry nejpoužívanějších organických substrátů jsou uvedeny v **Tab. 2.** [2]

Tab. 2: Vlastnosti nepoužívanějších základních organických materiálů

Vlastnost/Materiál	FR2	FR3	FR4
Permitivita (1MHz)	4,50	4,60	4,70
Ztrátový činitel (1 Mhz)	0,047	0,041	0,019
elektrická pevnost [kV/mm]	60-70	60-65	35-65
Tepelná vodivost [J/s.m.K]	0,24	0,23	0,25
Součinitel teplotní roztažnosti [ppm/K]	11,00	13,00	11,00
Pevnost v tahu [Mpa/mm ²]	88,00	83,00	280,00
Teplota skel. Přechodu [°C]	105,00	110,00	130,00

Výhody organických materiálu spočívají především v tom, že výrobní technologie jsou relativně jednodušší a rozšířené. Vzhledem k použitým materiálům, ze kterých se organické substráty vyrábějí se dobře mechanicky opracovávají (stříhání, vrtání). Na rozdíl od keramických substrátů jsou pružnější a lépe odolávají mechanickému namáhání a vibracím. Na druhou stranu jejich délková teplotní roztažnost je mnohem větší než u keramických substrátů. Nevýhodou organických materiálu je kvalita, především u FR2 a FR3. U mikrovlných aplikací se projevují některé negativní vlivy související s frekvencí. Jsou méně odolné z hlediska působení chemických reakcí probíhajících v atmosféře. Vyznačují se horším odvodem tepla.

Anorganické základní substráty jsou keramické materiály, které mají mnohé přednosti před organickými. Jsou chemicky odolnější, mají malý součinitel teplotní roztažnosti a lépe odvádějí teplo. Existuje však celá řada nevýhod, které brání masovějšímu využití keramických materiálů. Mezi tyto nevýhody patří především horší mechanické opracování (křehký materiál), použití náročnějších technologií na celkovou výrobu (výroba šablony, síťotisk, výpal v peci, vrtání a řez laserem, požadavek na speciální směsi vodivých, odporových a dalších past [3]).

Nejčastěji se používají substráty vyrobené z oxidu hliníku, (Alumina) nebo oxidu Berylia (BeO), jeho velkou nevýhodou je však toxicita. Zvláštním druhem keramiky je LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics), její vlastnosti se mírně liší od klasických keramických substrátů. Vykazuje nízké dielektrické ztráty, má přesně danou hodnotu relativní permitivity, nezávislou na frekvenci. Z tohoto důvodu často nachází uplatnění u vysokofrekvenčních aplikací [7].

Keramické substráty se v elektrotechnice používají již několik desetiletí. Především z důvodů vyšších nároků na spolehlivost, pro výrobu hybridních integrovaných obvodů, senzorů a jiných aplikací využívajících vlastností keramických materiálů. Některé parametry a vlastnosti anorganických materiálu jsou uvedeny **Tab. 3** [7]

Tab. 3: Vlastnosti keramických substrátu

Parametr/Materiál	96% Al ₂ O ₃	99% Al ₂ O ₃	99% BeO	LTCC (JHB62)
Tepelná vodivost [J.s ⁻¹ .m ⁻¹ .K ⁻¹]	35	37	250	250
Součinitel teplotní roztažnosti [ppm.K ⁻¹]	6,4	6,6	5	6,3
Elektrická pevnost [kV.mm ⁻¹]	8	9	14	> 40
Měrný odpor [Ω.mm]	7.10 ¹³	7.10 ¹³	7.10 ¹⁴	> 10 ¹⁴
Tangenta ztrátového činitele 100MHz [%]	0,55	0,08	0,04	0,002 (2 GHz)
Relativní permitivita ε _r	9	10	6,6	7,9 (3,2 MHz)

3 Vrstvové technologie a sítotisk

Vrstvové technologie se používají pro výrobu nekonvenčních aplikací, senzorů nebo jinak těžko zhotovitelných aplikací běžnými metodami výroby plošných spojů. Vyznačují se definovanou tloušťkou vrstvy a vlastnostmi přímo závislých na této tloušťce. Princip technologie spočívá v postupném nanášení jednotlivých vrstev většinou na keramický substrát. Podle tloušťky nanesené vrstvy se používají dvě základní technologie:

- Tlustovrstvé technologie - tloušťky vrstev řádově desítky mikrometrů
- Tenkovrstvé technologie - jsou nedílnou součástí vrstevových technologií. Na substrát se nanášejí především metodou vakuového napařování a katodového naprašování. Tloušťky vrstev se pohybují řádově v desítkách až stovkách nanometrů. Praktické části práce však použity nebyly.

3.1 Tlustovrstvé technologie

Tyto vrstvy se nanášejí ve formě pasty a přes síta se tisknou na substrát. Tlusté vrstvy jsou nehomogenní směsi několika složek:

- Funkční složka – jedná se o práškové částice drahých kovů velikosti 5 μm . Pro vodivé pasty se používají částice drahých kovů a jejich slitiny. U odporových past se používají vodivé a polovodivé oxidy kovů, pro izolační pasty se používají rekrystalizující skla [5].
- Tavivová složka – je tvořena skelnou fritou, která zajišťuje vazbu mezi substrátem a funkční složkou, slouží jako nosná část pro funkční složku. Používají se nízkotavitelná skla s teplotou měknutí kolem 600 $^{\circ}\text{C}$.
- Pojivová složka – obsahuje různé organické a polymerní látky zajišťující potřebné vlastnosti celé pasty (viskozita, stabilita pasty, adheze).

Rozdělení past podle funkční složky:

Vodivé pasty – funkční složku tvoří částice drahých kovů, jejich slitiny a směsi. Nejčastěji se používá stříbro, paladium, zlato a platina. Různou kombinací těchto kovů se dotváří konečné vlastnosti pasty. Teplota výpalu se pohybuje v rozmezí 750 $^{\circ}\text{C}$ až 1000 $^{\circ}\text{C}$, podle typu použitého kovu [5]. Vodivé vrstvy se používají k vytváření vodivých propojení mezi jednotlivými prvky obvodu, k realizaci termočlánků a tenzometrů.

Odporové pasty - odporovými vrstvami se realizují tlustovrstvé rezistory, jejich hodnota závisí na typu pasty a definované tloušťce vrstvy, proto bývá často vyjádřena jako odpor na čtverec (**Obr. 1**) [1].

Jeho hodnotu lze odvodit následovně:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} = R_v \cdot \frac{1}{w} = R_v \cdot A \quad (1)$$

kde R je hodnota odporu rezistoru [Ω]

ρ je měrný odpor [$\Omega \cdot \text{m}$]

l je délka odporu [m]

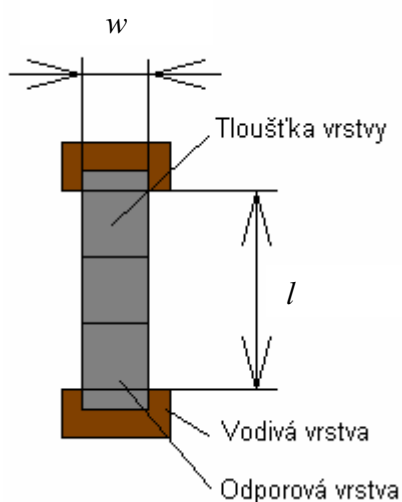
s je plocha průřezu odporu [m^2]

w je šířka odporu [m]

t je tloušťka odporu (vrstvy) [m]

R_v je vrstvový odpor [R/\square]

A je počet čtverců (vyjadřující poměr délky rezistoru ku šířce)



Obr. 1: Pasivní odpor

Izolační (dielektrické) pasty – dělí se tří hlavních skupin. První skupina obsahuje pasty pro tvorbu kapacitorů, druhá zahrnuje pasty izolující křížení vodičů, do třetí skupiny lze zahrnout pasty, které se používají jako krytí důležitých částí obvodů a k pouzdření rezistorových sítí. Jako funkční složka se používají různé druhy práškových skel. V případě výroby kapacitorů se používá podobný materiál jako při výrobě keramických kondenzátorů. Existuje ještě skupina past, která se označuje jako speciální. Používají se např. k výrobě stínících vrstev a jiných speciálních aplikací.

3.2 Metody nanášení tlustých vrstev

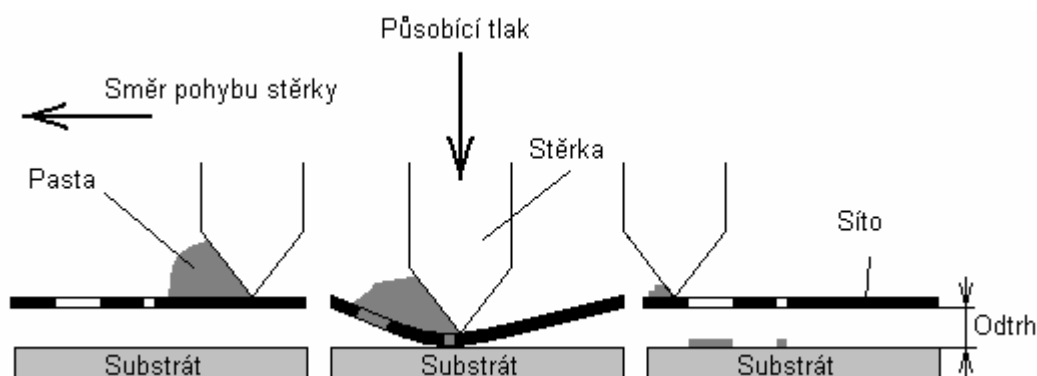
Nejrozšířenější metodou nanášení tlustých vrstev je sítotisk. Je to relativně nenáročná metoda, kdy se definované množství pasty nanese přes síto na nosný substrát. Princip sítotisku (**Obr. 2**) je založen na dvou fyzikálních zákonitostech. První princip využívá poklesu viskozity pasty v závislosti na tlaku. Druhý využívá závislosti napnutí síta a jeho protažení. Nanesením pasty na síto a následně jejím protlačení stěrkou na substrát vznikne požadovaný motiv. Na výslednou kvalitu natištěného motivu působí mnoho faktorů, některé lze ovlivnit jiné ne.

Faktory působící a ovlivňující výslednou kvalitu naneseného motivu:

- Pasta (stabilita, stáří, zrnitost, homogenita, viskozita, adheze)
- Substrát (rovinnost, materiál, rozměry, drsnost)
- Síto (průměr vláken, materiál, hrubost síta, orientace výpletu vzhledem k posuvu stěrky, uchycení, čistota, kvalita motivu)
- Technologické parametry (vystředění, tlak, rychlost, úhel stěrky, odtrh)
- Lidský faktor (zkušenosti, preciznost, vedení)

Postup při vytváření tlustých vrstev

Očištěný základní substrát je uchycen buď mechanicky nebo vakuově do sítotiskového stroje. Nad substrátem je zafixovaná sítotisková šablona s daným motivem. Na šablonu se nanese pasta před motiv, poté se přiloží stěrka na kraj síta a definovaným tlakem a rychlostí se pasta protlačí na nosný substrát.



Obr. 2: Princip sítotisku

Nejčastější chyby vznikající při sítotisku:

- nerovnoměrná vrstva pasty
- neostré obrysy
- nehomogenita

Síta

Vyrábějí se nejčastěji z nerezavějících ocelových vláken nebo polyamidových a polyesterových tkanin. Vlákna z nerezavějící oceli se vyznačují vyšší životností síta a přesnější realizací motivu, (minimální šířka cesty, jenž je uspokojivě realizovatelná se pohybuje kolem 100um). Síta z polyesterových a polyamidových tkanin se používají pro běžné aplikace, vyznačují se nižší cenou. Motiv se na sítotiskovou šablonu (**Obr. 3**) přenáší dvěma způsoby. Buď fotolitografickými metodami, podobně jako u výroby DPS, nebo se k sítotiskové tkanině přidá plastová nebo kovová folie s motivem. Parametry síta [1] ovlivňují výslednou kvalitu naneseného motivu, proto je výběr síta jedním z důležitých rozhodnutí při procesu sítotisku.



Obr. 3: Sítotisková šablona

Základní parametry síta:

hustota tkaniny n (vyjadřuje počet ok na jednotku délky, většinou vtažené na centimetry)

$$n = \frac{10}{w + d} \quad (2)$$

světlost síta A_0 (otevřená plocha síta)

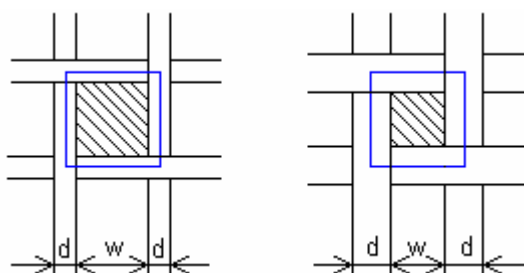
$$A_0 = \left(\frac{w}{w + d} + d^2 \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

kde n je hustota tkaniny [počet ok na cm]

A_0 je světlost síta [%]

w je rozměr strany volné plochy oka [mm]

d je průměr vlákna [mm]



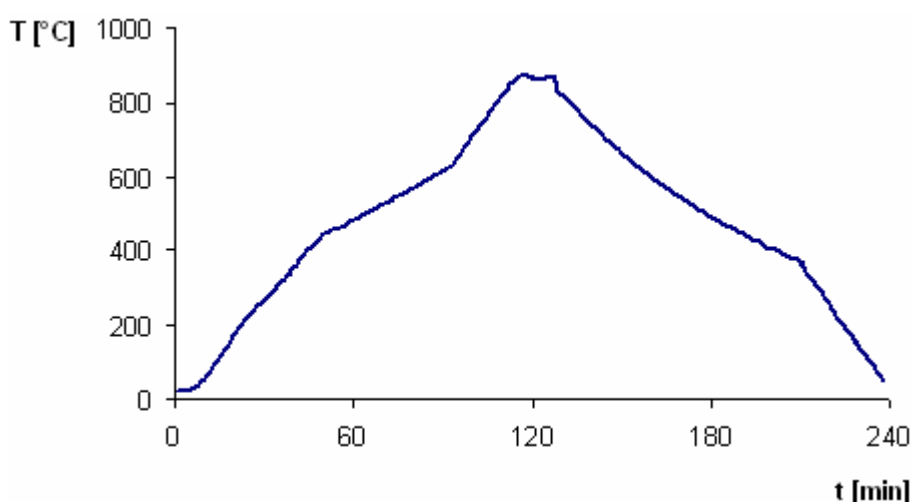
Obr. 4: Detail dvou sít s různou světlostí

Šablonový tisk

Šablonový tisk je jistá obměna sítotisku, místo sít se používají kovové šablony. Motiv se může vyrábět mechanicky např. vrtáním nebo lisováním. Často se také používá laser, výhoda laserového obrábění spočívá v tvorbě motivu o velmi vysokém rozlišení. Pro vytváření hrubých šablon, tzn. kde nejsou velké požadavky na přesnost (podleptávání hran) se používá chemické leptání.

3.3 Výpal

Výpal se provádí buď v průběžných nebo vsázkových pecích. Pro zachování správných vlastností vypalovaného substrátu je velmi důležité dodržovat teplotní profil výpalu (**Obr. 5**) [9]. Teplotní profil vyjadřuje závislost teploty na čase. Pro jednotlivé druhy past se tato závislost mírně liší. Doba výpalu se pohybuje řádově od desítek minut až po jednotky hodin, při vrcholových teplotách okolo 850 °C. Při výpalu dochází k vytváření vazby mezi substrátem pastou (**Obr. 6**). Vazbu zajišťuje tavivová část pasty, která při výpalu měkne a vytváří tak nosnou část pro funkční složku. Výpalem dochází k přeměně pasty na funkční vrstvu s konečnými požadovanými vlastnostmi.

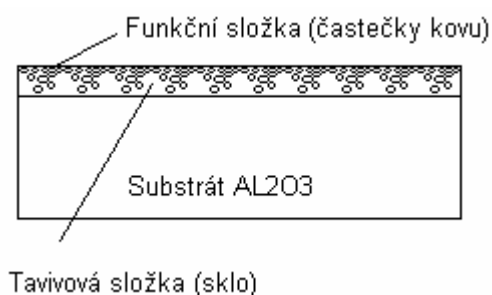


Obr. 5: Teplotní profil výpalu LTCC

Každý teplotní profil se skládá ze z několika částí s různým nárůstem teplot. Nejčastěji se však teplotní profil dělí do čtyř hlavních zón.

- zóna sušení
- zóna přehřevu
- zóna výpalu
- zóna chladnutí

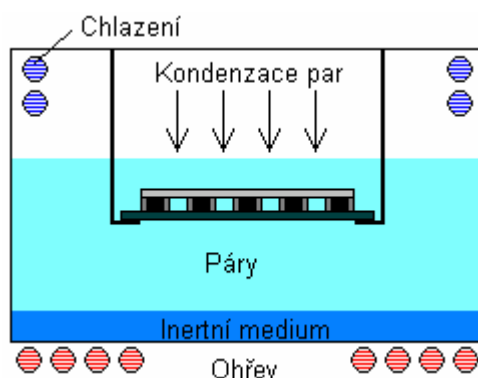
V první zóně probíhá tzv. sušení. Při sušení se vypaří látky, které zajišťovaly vhodné vlastnosti při sítotiskovém procesu. Sušení pasty trvá přibližně 15 minut při teplotách kolem 120 °C. Poté následuje přehřev, kdy se substrát postupně ohřívá až na teplotu výpalu. V zóně výpalu probíhají důležité chemické reakce potřebné k vytvoření požadovaných vlastností vypálené vrstvy. Doba, kdy se substrát nachází v zóně výpalu je přibližně 10 minut. Následuje zóna chladnutí kdy vypálená vrstva postupně chladne na teplotu okolí. Celková doba výpalu se pohybuje v rozmezí desítek minut až jednotek hodin, v závislosti na vypalovaném substrátu.



Obr. 6: Detail vypálené vrstvy

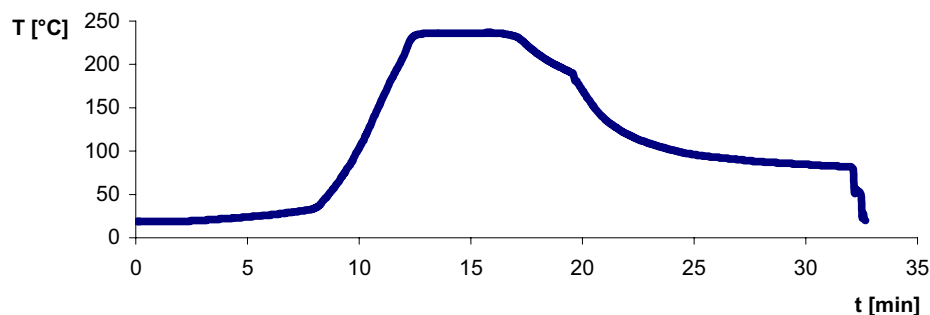
4 Pájení v parách

Pájení v parách (**Obr. 7**) je metoda, kdy inertní medium předává teplo pájenému výrobku změnou svého skupenství. V uzavřené soustavě se zahřívá medium až k bodu varu, vznikající páry stoupají vzhůru a ohřívají pájený objekt. Teplo z par se předává pájenému výrobku procesem kondenzace, teplota media přitom zůstává stejná (latentní teplo). Vhodným výběrem přenosového media se určuje maximální teplota v pájeném systému. Takto lze nastavit požadované teploty přetavení pro různé slitiny pájek [10]. Jako přenosového media se používá perflurpolyeteru (PTFE), je inertní a neškodí lidskému organismu ani přírodě. Lze jej vyrobit s různými teplotami varu.



Obr. 7: Pájení v parách

Metoda pájení v parách je vhodná pro pájení s vyšší teplotou přetavení, jelikož přenos tepla horkými párami je podstatně lepší než přenos tepla horkým plynem. Pájené součástky nejsou tolik teplotně namáhány, výsledná kvalita a spolehlivost pájených spojů je podstatně větší. Teplotní profil pájení v parách je zobrazen na **Obr. 8**. Zvýše popsanych důvodu nabývá pájení v parách v posledních letech na významnosti.



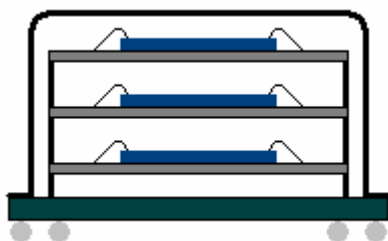
Obr. 8: Teplotní profil pájení v parách

5 3D struktury

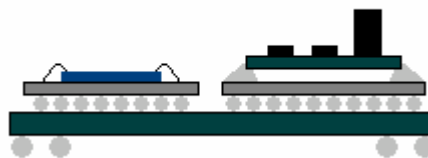
Cílem 3D struktur je zvyšovat hustotu integrace součástek, snažit se omezovat negativní vlivy (parazitní indukčnosti a kapacity) vzniklé 3D strukturami, snižovat ztráty energie a v neposlední řadě zajistit dostatečný odvod tepla. Snaha vyhovět těmto požadavkům, se dále promítá na vývoji, návrhu a realizaci trojrozměrných struktur.

Vývoj v oblasti 3D aplikací se v dnešní době ubírá dvěma hlavními cestami. První z nich je 3D pouzření (3D packaging), zabývá se návrhem a integrováním dílčích funkčních bloků 3D struktur zalitých nebo jinak uzavřených do jednoho kompaktního pouzdra. Typickým příkladem jsou MCM (Multi Chips Modules) (**Obr. 9**). Multičipové moduly jsou kompaktní celky, jenž mohou obsahovat více čipů na různých nosných substrátech. Připojení čipu k venkovním vývodům je prováděno několika metodami. Mohou být kontaktovány klasickými drátovými propojkami (bondování), metodou TAB nebo jako flip – chip. V podstatě jde o řešení, kdy jsou jednotlivé čipy na různých substrátech uzavřeny do jednoho uceleného pouzdra. Tyto pouzdra se poté kontaktují na nosný substrát standardními vývody typu „L, J” nebo BGA. Hlavní výhodou je především vysoká komplexnost systému.

Druhá technologie označovaná MSM (Multi Substrate Modules) se zaměřuje na víceúrovňové propojování několika substrátů (**Obr. 10**). Na základní substrát se kontaktují další nosné substráty a to nejen v horizontálním, ale i ve vertikálním směru. Multisubstrátové technologie, na rozdíl od 3D pouzření, nabízejí možnost snadné modifikace, opravy nebo výměny jednotlivých dílčích bloků výrobku. Každá z metod má své výhody a nevýhody a konečné použití závisí na požadavcích konkrétní aplikace.



Obr. 9: Multičipová struktura



Obr. 10: Multisubstrátová struktura

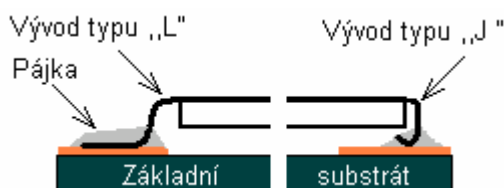
5.1 Způsoby kontaktování 3D struktur

Vhodný způsob propojení je závislý na konstrukci dané aplikace. Obecně lze říci že k propojení 3D struktur se využívá stejných nebo podobných principů, které se uplatňují při kontaktování některých klasických pouzder a součástek („J, L” vývody, BGA, SMD) Při vytváření trojrozměrných struktur se mohou jednotlivá propojení různě kombinovat v závislosti na požadovaných parametrech a funkci výsledného výrobku.

Existuje několik základních způsobů propojení:

Propojení pomocí klasických vývodů

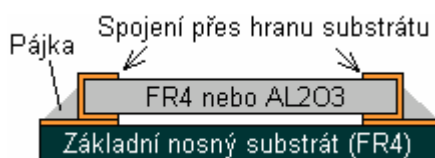
Vodivé elektrické spojení mezi 3D strukturou a nosným substrátem je realizováno zapájením klasických vývodu typu L nebo J (**Obr. 11**). Výhodou tohoto spojení je snadná optická kontrola, neboť kontakty nejsou umístěny pod spodní stranou substrátu. Mezi nevýhody patří omezený počet vývodu. S počtem vývodů nadměrně stoupá plocha celého systému.



Obr. 11: Propojení klasickými vývody

Propojení hranu substrátu

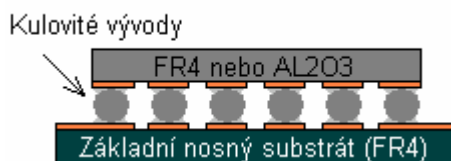
Kontaktní plošky 3D struktury jsou vyvedeny na hranu substrátu a vodivé propojení je realizováno pájkou. (**Obr. 12**) Výhody a nevýhody jsou v podstatě stejné jako u předchozího typu spojení.



Obr. 12: Propojení hranovými spoji

Propojení pomocí kulovitých nebo válcovitých částic pájky

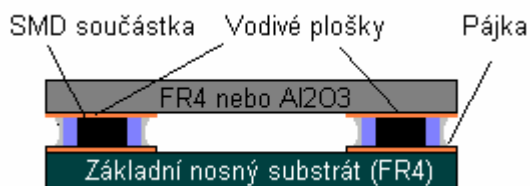
Kontaktní plošky 3D struktury jsou umístěny na spodní straně substrátu v určitém pravidelném uspořádání (např. čtvercová matice). Na základním nosném substrátu jsou plošky v tomtéž uspořádání. Vodivé propojení je realizováno kulovitými nebo válečkovitými částicemi pájky daného průměru, případně délky. (**Obr. 13**) Výhodou tohoto typu spojení je velká koncentrace vývodů na relativně malé ploše.



Obr. 13: Propojení kulovými vývody

Propojení pomocí SMD součástek

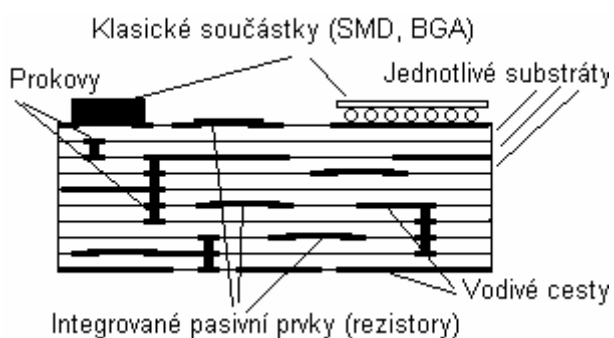
Tato metoda spojení se neuzívá v průmyslové výrobě, stále se testuje a vyvíjí. Je založena na podobném principu jako propojení pomocí kulovitých částí pájky. (**Obr. 14**) Mezi výhody patří velký počet vývodů, propojovací SMD součástky mohou sloužit jako funkční části obvodu. Další výhodou je snadná automatizace a strojní osazování součástek. Mezi nevýhody patří problémy se součinitelem délkové teplotní roztažnosti.



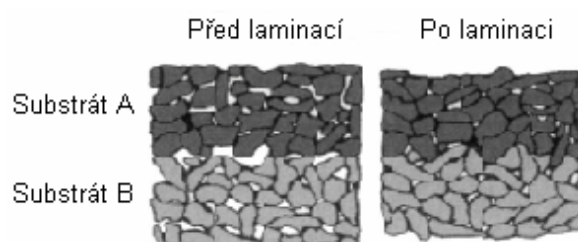
Obr. 14: Propojení pomocí SMD součástek

Propojení pomocí prokovů

Používá se pro vodivé spojení jednotlivých keramických (LTCC) substrátů, vrstvených na sebe, přes prokovy (**Obr. 15**). Mezi jednotlivými substráty mohou být integrovány pasivní prvky, což přispívá k větší integraci celého systému. Proces spojování jednotlivých keramických substrátů se nazývá laminace. Při laminaci (**Obr. 16**) se srovnané substráty neoddělitelně spojí současným působením teploty a tlaku. Obvykle $2100 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$ při teplotě $70 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu deseti minut [8]. Kvalita prokovených otvorů závisí na velikosti a tvaru vytvořených děr, na použitých vnitřních pastách a na celkové přesnosti výroby.



Obr. 15: Propojení LTCC substrátu prokovy



Obr. 16: Laminace

6 Praktická realizace 3D struktury

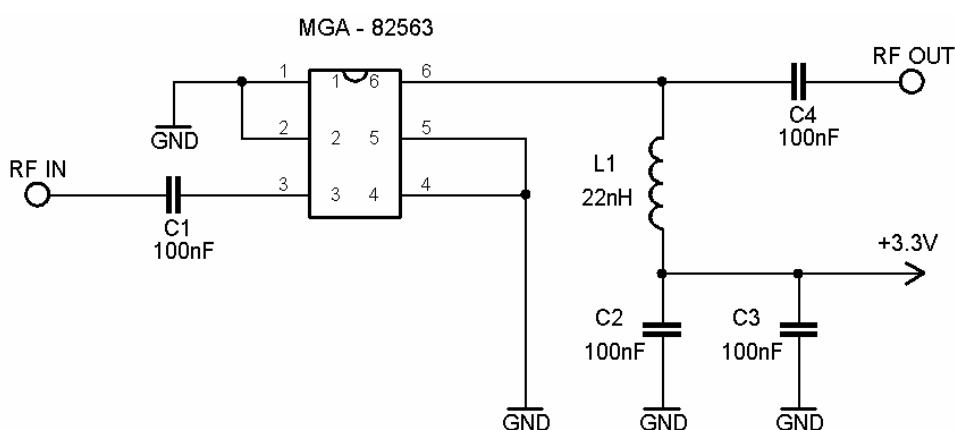
Propojování funkčních bloků do 3D struktur zvyšuje integraci celého systému, použití různých materiálů nosných podložek umožňuje, aby obvod jako celek využíval pozitivní vlastnosti jednotlivých substrátů. To znamená, že v důsledku bude mít výsledný obvod lepší parametry a vlastnosti než kdyby byl navržen pouze na jednom typu substrátu.

6.1 Návrh vysokofrekvenčního zesilovače

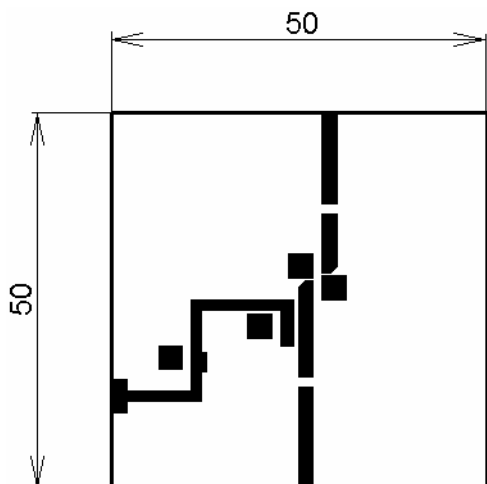
Vzhledem k lepším vlastnostem keramických materiálů v oblastech vysokých kmitočtů byl na keramický substrát realizován jednoduchý zesilovač, jako konkrétní aplikace pro vodivé propojení systému keramika – FR4.

Pro zesilování vysokofrekvenčního signálu byl vybrán nízkopříkonový a snadno použitelný monolitický vysokofrekvenční integrovaný obvod MGA-82563 od firmy Hewlett – Packard. Zesilovač nabízí velký zisk a nízký šum pro aplikace pracující v oblastech frekvencí 0,1 až 6 GHz. Obvod zesiluje pásmo kmitočtů vytvořené kolem rezonanční frekvence. Rezonanční frekvence se nastaví hodnotami součástek C1 až C4 a L1. Struktura obvodu umožňuje činnost zesilovače od napájecího napětí 3 V. Odporová zpětná vazba zabezpečuje stabilitu na celém rozsahu pracovních frekvencí a teplot. Jeho další výhodou jsou malé rozměry, obvod je zapouzdřen v pouzdře SOT 363. Podrobné údaje a parametry o MGA-82563 jsou uvedeny v katalogovém listu zesilovače [6].

Schéma zapojení (**Obr. 17**) i s motivem vodivého propojení (**Obr. 18**) bylo převzato z doporučeného zapojení uvedeného v katalogovém listu [6], následně překresleno a upraveno v editoru plošných spojů EAGLE verze 4.16r2.



Obr. 17: Schéma zapojení zesilovače



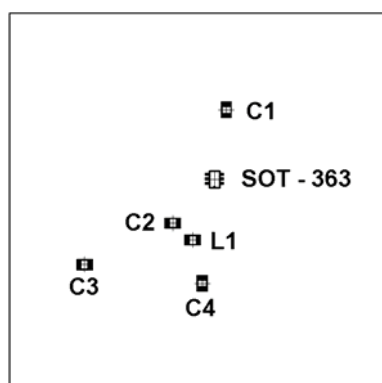
Obr. 18: Vodivé propojení zesilovače, strana TOP



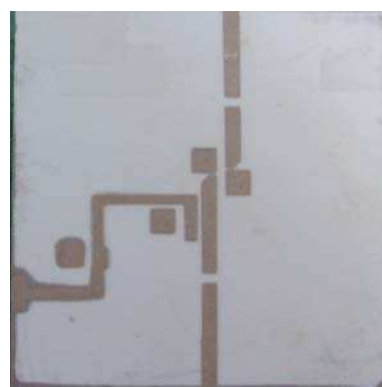
Obr. 19: Vodivé propojení zesilovače, strana BOTTOM

Realizace zesilovače – postup výroby

Pečlivě očištěný keramický nebo LTCC substrát byl umístěn do sítotiskového stroje (**Obr. 22**). Substrát byl vakuově upnut (přísátí k podložce) a zajistěn proti nechtěnému pohybu. Nad něj byla umístěna sítotisková šablona v požadované vzdálenosti nazývané odtrh nebo též odskok. Šablona byla vycentrována a taktéž mechanicky zajištěna proti nechtěnému pohybu. Na šablonu byla nanášena vodivá pasta po celé šířce vodivého motivu. Principem sítotisku (**Obr. 2**) se pasta přenesla na substrát. Natištěný motiv se nechal vysušit při teplotě asi 120 °C po dobu 15 minut. Poté byl substrát znovu upnut do sítotiskového stroje a přes volné síto byla natisknuta druhá strana substrátu.



Obr. 20: Osazovací výkres zesilovače



Obr. 21: Natištěný a vypálený keramický substrát

Na **Obr. 18** je zobrazen vodivý motiv zesilovače, strana TOP. Na **Obr. 19** je zobrazena strana BOTTOM, nanesená vodivá vrstva slouží jako:

- stínění
- zem pro zesilovač
- vodivá vrstva pro spojení s FR4 přes SMD součástky



Obr. 22: Ruční sitotiskový stroj

Po natištění obou stran se nechá substrát vypálit v průběžné peci. Teplotní profil výpalu je uveden na **Obr. 5**. Během výpalu se pasta přemění v amorfni vrstvu s požadovanými vlastnostmi. Keramický substrát s vypáleným vodivým motivem je zobrazen na **Obr. 21**, rozměry substrátu jsou 50 x 50 mm.

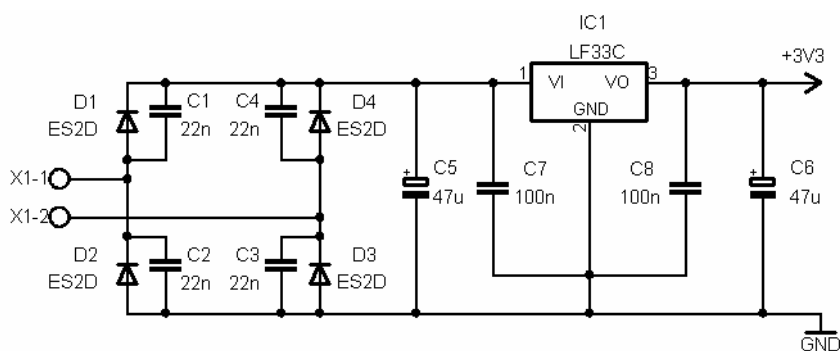
Laserem se vypálí průchozí otvory o průměru 0,6 mm, aby bylo možno prokovit zemnicí plošky z jedné strany substrátu na druhou. Případně lze keramický (LTCC) substrát „ořezat“ laserem na požadovanou velikost. Takto připravený substrát lze již osadit součástkami podle osazovacího výkresu (**Obr. 20**). Součástky byly zapájeny ručně, s použitím bezolovnaté pájky SnAgCu. Seznam použitých součástek pro vysokofrekvenční část je uveden v **Tab. 4**

Tab. 4: Seznam použitých součástek pro vysokofrekvenční zesilovač

Název	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
MGA-82563		SOT 363	Parametry v katalogovém listu [6]
C1, C2, C3, C4	100 nF	SMD 0805	
L	22 nH	SMD 0805	

6.2 Návrh napájecí části

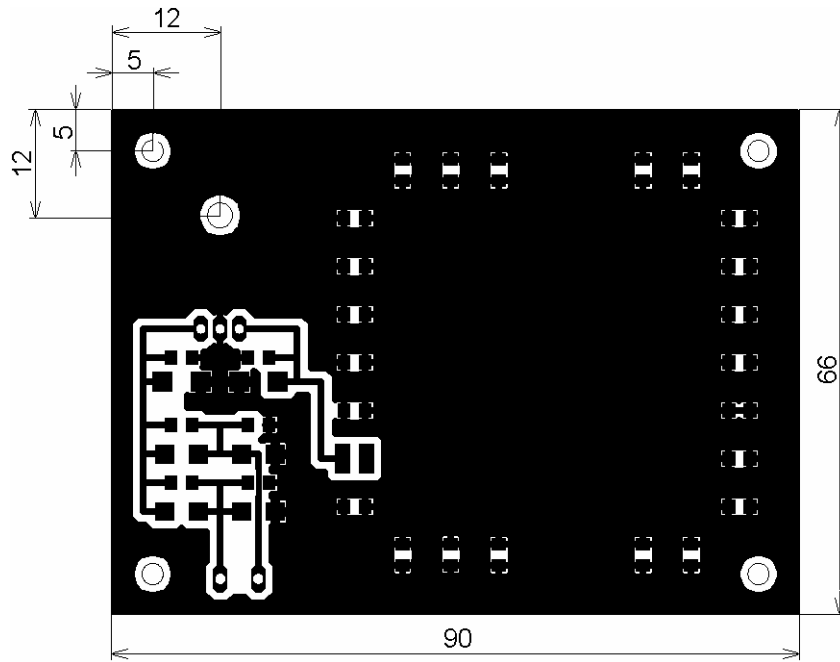
Napájení vysokofrekvenčního zesilovače je řešeno zdrojem napětí realizovaném na klasickém organickém substrátu typu FR4. Deska Plošných Spojů (DPS) napájecího obvodu lze rozdělit na dvě části, vlevo byl navrhnout zdroj napětí, vpravo se pak nachází prostor pro vytvoření vodivého spojení s keramickým substrátem. Schéma (**Obr. 23**) i vodivý motiv DPS (**Obr. 24**), stejně jako u keramického substrátu, byl navržen v editoru plošných spojů EAGLE. Deska plošného spoje byla vyrobena běžně používanými fotolitografickými metodami. Zdroj byl navržen podle klasické koncepce - usměrnění, filtrace a stabilizace vstupního napájení. Jako stabilizátor napětí byl použit obvod LF 33C. Výstupní napětí stabilizuje na 3,3 V při minimálním výstupním proudu 500 mA. Podrobnější parametry jsou uvedeny v katalogovém listu součástky [11] Rozměry desky jsou 66 x 90 mm. V každém z rohů desky jsou umístěn jeden montážní otvor. V levé části, nad motivem zdroje napětí se nachází další otvor, který slouží k přichycení třibodového stabilizátoru (pouzdro TO 220) k podložce nebo případné montáži chladiče. Průměr všech montážních otvorů je 3 mm a jejich umístění na DPS je zakótováno na **Obr. 24**. Osazovací výkres je zobrazen na **Obr. 25**.



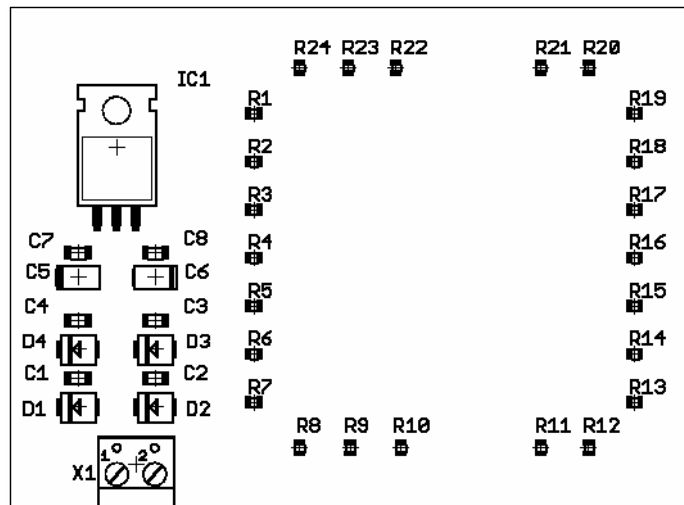
Obr. 23: Schéma napájecí části obvodu

Popis funkce obvodu

Na svorky obvodu X1 je přivedeno střídavé síťové napětí přibližně o 2 V větší než je předpokládané výstupní napětí stabilizátoru. Diody D1 až D4, jsou uspořádány jako čtyřcestný usměrňovač v Gretzově zapojení, usměrňující střídavé napětí. Kondenzátory C1 až C4 jsou blokovací, C5 a C6 jsou elektrolytické filtrační kondenzátory. Obvod LF33C stabilizuje napětí na hodnotu 3,3 V. Kondenzátory C7 a C8 jsou opět blokovací. Seznam všech použitých součástek je uveden v **Tab. 5**



Obr. 24: Motiv vodivého propojení



Obr. 25: Osazovací výkres

Tab. 5: Seznam použitých součástek pro napájecí část

Název	Hodnota	Pouzdro
D1, D2, D3, D4	$U_{\max} = 100 \text{ V}$, $I_{\text{out}} = 0,5 \text{ A}$	ES2D
C1, C2, C3, C4	22 nF	SMD 1206
C5, C6	47 μF	6032 typ C
C7, C8	100 nF	SMD 1206
IC1 (LF33C)	$U_{\text{vyst}} = 3,3 \text{ V}$, $I_{\text{out}} = 0,5 \text{ A}$	TO 220H
X1		W 237 – 102
R1 až R24	0 Ω	SMD 0805, 1206, 2512

Pro měřicí účely byly místo wago svorek použity PIN konektory. Pro aplikační použití je výhodnější ponechat navržené wago svorky. Velikost pouzder R1 až 24 se liší v závislosti na použité variantě vodivého propojení (**Tab. 6**).

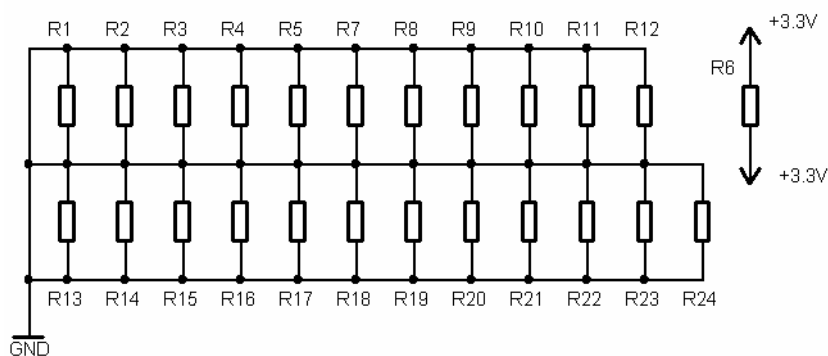
6.3 Vytvoření 3D struktury

Vodivé spojení tvoří síť SMD rezistorů (**Obr. 26**) vhodně umístěných mezi organickým a keramickým substrátem. Pro porovnání vlastností byla stejným způsobem vytvořena struktura ze dvou organických substrátů.

Metoda spojení pomocí SMD součástek nabízí určité výhody, kvůli nimž byla právě vybrána. Jedním z hlavních důvodů byla eliminace silových dilatací ve spojích, způsobených rozdílnými koeficienty délkové teplotní roztažnosti materiálů.

Především byl ověřován vliv výšky SMD a velikost vztyčné plochy tzn. velikost plochy doteku keramického substrátu se součástkami po zapájení. Dalším z důvodů, proč byla vybrána právě tato metoda, je fakt, že součástka může sloužit buď jako vodivé propojení nebo jako funkční celek systému. V neposlední řadě by bylo vhodné zmínit jednoduchou automatizaci celé metody a její zavádění do průmyslové výroby.

Zvýše popsaných důvodů bylo vytvořeno několik modifikovaných verzí propojení (**Tab. 6**). Jednalo se hlavně o změnu některých parametrů vodivého spojení např. velikost propojovacích součástek.



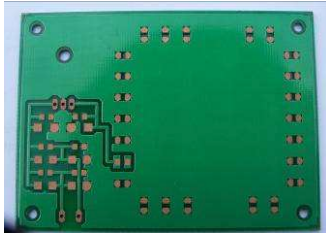
Obr. 26: Schéma vodivého propojení mezi substráty

Postup vytvoření 3D struktury

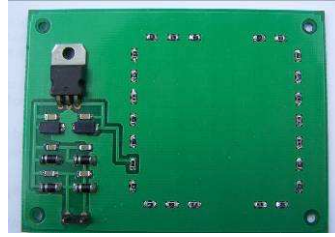
Deska plošného spoje se osadí propojovacími SMD rezistory. Součástky se mohou zapájet buď ručně za pomoci mikropájký, nebo jinou vhodnou metodou, např. přetavením. Poté bylo na horní stranu kontaktů součástek naneno přiměřené množství pájecí pasty. Nanesení pasty bylo provedeno dispenzerem. Keramický substrát se přiloží vodivou vrstvou (strana BOTTOM) na připravené SMD součástky a mírně se přitlačí, aby se vodivá pasta přenesla na keramický substrát. Připravený celek se nechá přetavit (**Obr. 27**).

Jedná z možných variant přetavení je v průběžné peci, ale vzhledem k složitosti 3D struktury, kdy je pájená spoj umístěn mezi dva substráty, je lepší využít metodu pájení v parách. Především díky lepšímu přenosu tepla a vzhledem k vlastnostem uvedeným v kapitole 4. Přetavení 3D struktury trvalo přibližně 20 minut.

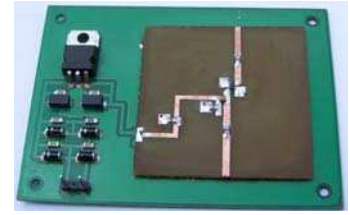
Obecně se součástky mohou osadit i před přetavením, v některých případech přímo musí, např. je-li součástka mezi substráty vytvářejícími 3D strukturu, doporučuje se však osazovat desky až po vytvoření 3D struktury, součástky tak nebudou vystaveny působení vysokých teplot, vznikajících při přetavení. Na **Obr. 28** a **Obr. 29** jsou zobrazeny zhotovené 3D struktury.



A



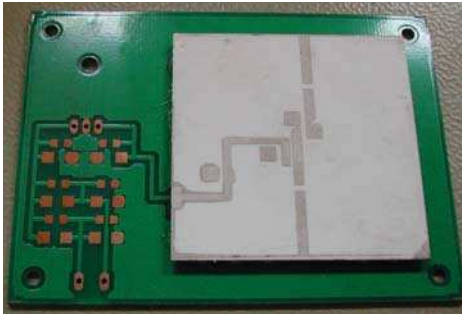
B



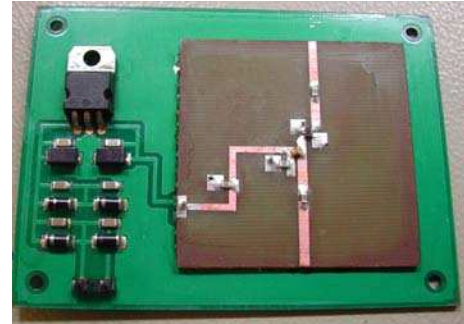
C

Obr. 27: Technologický postup vytváření 3D struktury

A) Vyrobená DPS, B) Osazená DPS, C) Přetavená 3D struktura



Obr. 28: Výsledná 3D struktura FR4 - Keramika



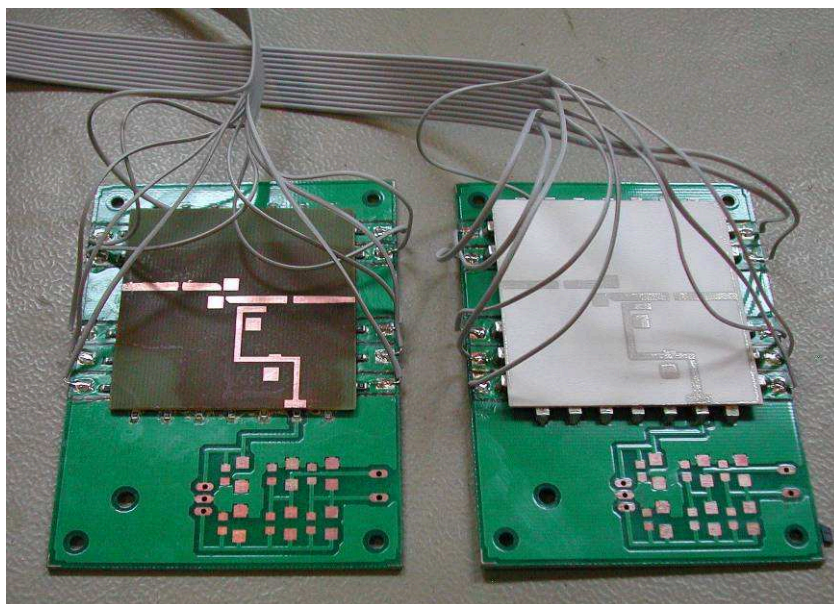
Obr. 29: Výsledná 3D struktura FR4 – FR4

7 Měření

Vyrobené vzorky, byly podrobeny dvěma měřeními. V prvním měření se testovala spolehlivost vodivého propojení jednotlivých modifikací 3D struktur metodou teplotního cyklování. V druhém měření se ověřoval vliv substrátů na výsledné vlastnosti zesilovačů. Na FR4 a LTCC substrátu byly zhotoveny dva identické zesilovače, na kterých bylo provedeno měření frekvenčních přenosových charakteristik.

7.1 Měření spolehlivosti teplotním cyklováním

Teplotní cyklování je metoda, jíž se ověřuje výsledná kvalita pájeného spoje. Princip metody spočívá v cyklickém namáhání testovaného výrobku teplotou. K tomuto účelu se používá speciální zařízení nazývané teplotní komora. K jednotlivým vodivým propojům se připojí kabel, který se průchodkou ve stěně komory připojí na vyhodnocovací a indikační zařízení. Testovaný obvod (**Obr. 30**) se vloží do teplotní komory, a nechá se cyklovat. Z důvodů měření musely být jednotlivé vodivé spoje od sebe nevodivě odděleny, aby bylo možné indikovat případnou poruchu. Přerušil-li se vodivé spojení mezi substráty, dojde i k rozpojení měřicího obvodu, vzniklý impuls přes klopný obvod rozsvítí signalizační diodu.



Obr. 30: Testované obvody: vlevo FR4 – FR4, vpravo FR4 – Al₂O₃

Průběh cyklování může být různý, v závislosti na testované aplikaci se podle norem vyberou správné parametry pro testování. Mezi základní parametry patří minimální a maximální teplota cyklu, nárůst teploty za určitý časový úsek, nebo délka jednoho cyklu.

Jednotlivé profily cyklování určuje norma [12], v případě testování vodivého propojení keramiky s FR4 se rozmezí teplot pohybovalo od 0 °C do 100 °C, doba jednoho cyklu trvala přibližně 40 minut.

Při teplotním cyklování se testovaný objekt namáhá tepelně. Při zahřívání se jednotlivé substráty protahují vlivem teplotních dilatací, které ovlivňují výslednou kvalitu a spolehlivost spojení. Míra protažení jednotlivých těles se vyjadřuje tzv. součinitelem délkové teplotní roztažnosti. Označuje se buď α nebo TCE. Vyjadřuje, o kolik jednotek délky se daný materiál protáhne při zahřátí o 1 °C. Jednotka se nejčastěji udává v ppm . K⁻¹. Vypočítá se jako:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (4)$$

kde α je součinitel délkové teplotní roztažnosti [ppm . K⁻¹]

l_0 je počáteční délka tělesa [m]

$\frac{dl}{dt}$ je změna délky tělesa při změně teploty [m . K⁻¹]

Každý materiál má tento koeficient jiný, záleží na vlastnostech a struktuře daného tělesa a také na tom, zda je materiál izotropní nebo anizotropní. V anizotropních tělesech může být délková roztažnost v různých směrech různá (např. v krystalech), izotropní tělesa mají délkovou roztažnost ve všech směrech stejnou. Keramické materiály patří mezi izotropní materiály. FR4 naopak patří mezi anizotropní materiály, což je způsobeno složením nosného substrátu (skelná tkanina, epoxidová priskříce).

Spojení keramika – SMD součástka – FR4 je heterogenní systém, při teplotním namáhání se začnou projevovat určité mechanické napětí a síly způsobené rozdílnými koeficienty TCE zvolených materiálů. Efektivní namáhání celého spojení lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$\Delta\gamma = \frac{L}{h} \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot E_p \quad (5)$$

kde $\Delta\gamma$ je efektivní protažení [MPa]

L je délka keramického substrátu [m]

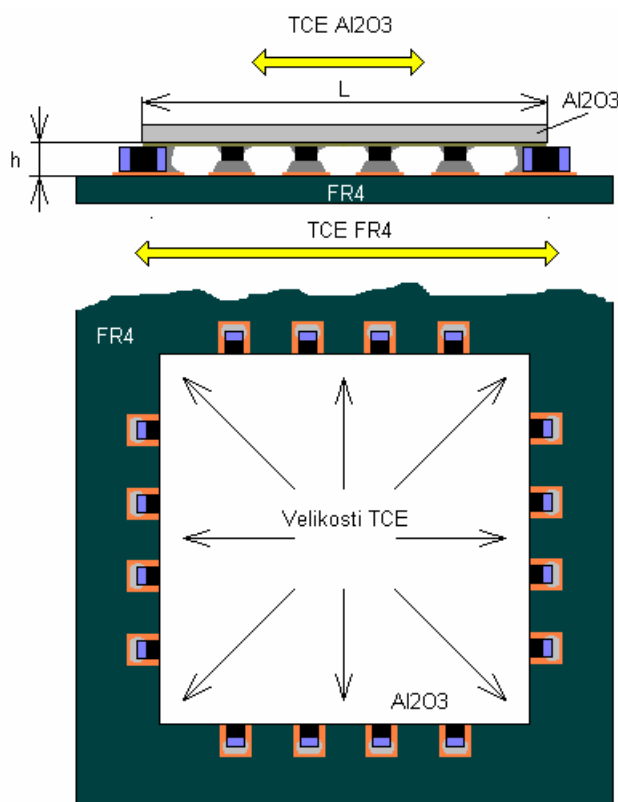
h je výška mezi keramickým substrátem a FR4 [m]

$\Delta\alpha$ je rozdíl mezi hodnotami TCE jednotlivých materiálů [ppm . K⁻¹]

$\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot jednotlivých materiálů [°C]

E_p je Younguv modul pružnosti [N . mm⁻² = MPa].

Z uvedené rovnice je patrné, že na výslednou velikost namáhání systému má vliv výška mezi spojenými substráty, velikost a materiály jednotlivých nosných podložek, které jsou použity. Na **Obr. 31** je zobrazeno působení sil, při zahřívání celého systému. Velikosti jednotlivých šipek vyjadřují velikost a směr protažení substrátů, respektive velikost sil, působících v daném místě. Z **Obr. 31** je patrné, že nejvíce budou namáhány vodivá spojení na hranách substrátu.

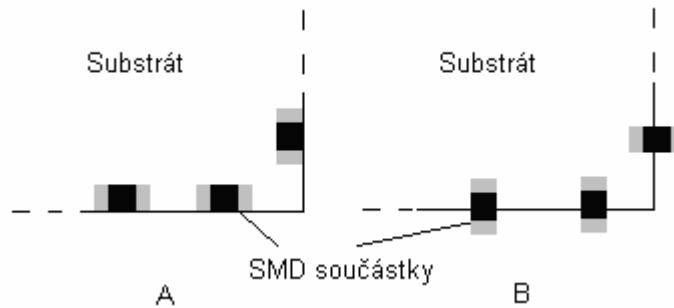


Obr. 31: Velikosti působících sil vlivem TCE

V případě spojení keramického substrátu s FR4 přes SMD součástky bylo vytvořeno několik variant, u nichž se předpokládal pozitivní dopad na omezení silových působení. Varianty propojení jsou přehledně zobrazeny v **Tab. 6**

Tab. 6: Varianty vodivého propojení

Varianta	Velikost součástky	Umístění
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 2512	Podélně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 2512	Příčně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 1206	Podélně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 1206	Příčně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 1206, výška 2mm	Podélně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 1206, výška 2mm	Příčně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 0805	Podélně pod substrátem
FR4 – Al ₂ O ₃	Rezistory 0805	Příčně pod substrátem
FR4 – FR4	Rezistory 1206	Podélně pod substrátem



Obr. 32: Umístění součástek pod substrátem, A) Podélně, B) Příčně

Při vyhodnocování teplotního cyklování se používá Coffin – Mansonuv vztah, který uvádí do relace cyklické namáhání vodivého spojení, způsobené rozdílnými TCE jednotlivých materiálů a počet cyklu do poruchy [13].

$$N_f = \frac{C}{\delta^2} \quad (6)$$

kde N_f je počet cyklu do poruchy

C je materiálová konstanta

δ^2 je plastická deformace během jednoho cyklu

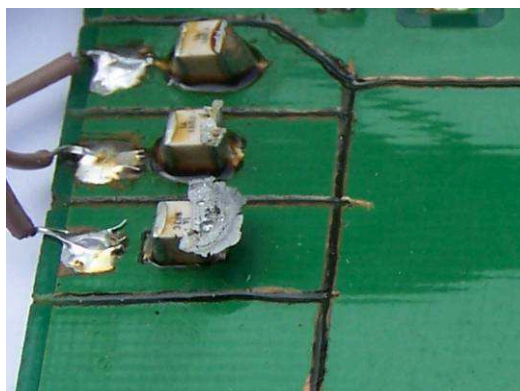
Výsledky teplotního cyklování

Při teplotním cyklování se projevil vliv rozdílných součinitelů délkové teplotní roztažnosti. Spojení keramika – FR4 vydrželo přibližně 75 cyklů, což odpovídá dvěma dnům teplotního cyklování. Délka keramického substrátu a rozdíly v TCE byly tak velké, že uvažované modifikace neměly žádný vliv na výslednou spolehlivost vodivého propojení. Spojení FR4 – keramika se za daných podmínek projevilo jako velmi nespolehlivé. Zvýšení spolehlivosti vodivého spojení by se dalo dosáhnout zmenšením plochy keramického substrátu, zvětšením výšky mezi oběma substráty nebo volbou materiálů nosných podložek přibližně se stejným součinitelem teplotní délkové roztažnosti.

Vodivé spojení FR4 – FR4 se ukázalo jako spolehlivé. Protože oba substráty mají stejný koeficient TCE, protahovaly se oba materiály o stejnou délku, čímž se omezilo silové působení ve spoji. Tato struktura vydržela 1500 cyklů, projevila se porucha pouze u jediného vodivého propojení, hned na začátku cyklování. Porucha byla způsobena chybným zapájením.



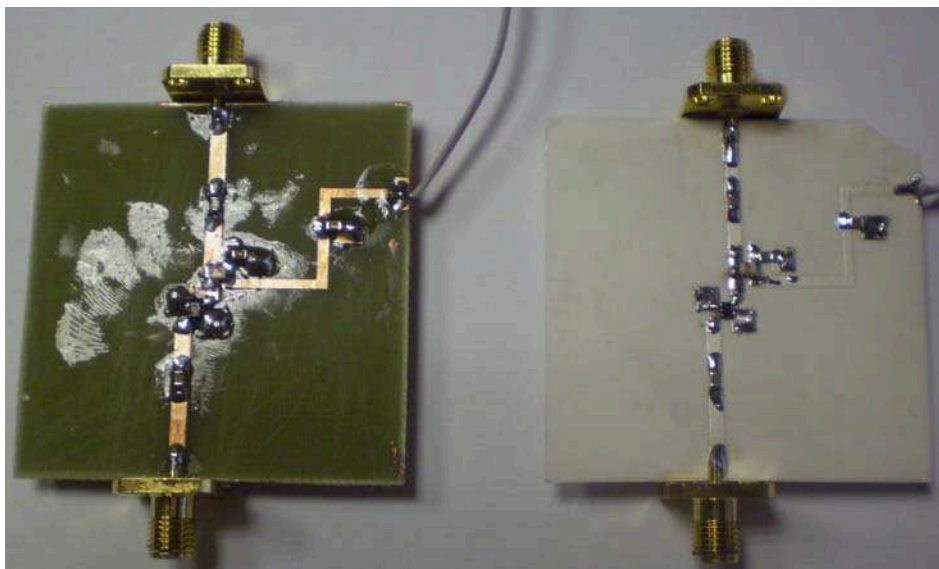
Obr. 33: Spodní strana desky keramického substrátu, po teplotním cyklování



Obr. 34: Detail SMD součástky po teplotním cyklování

7.2 Měření frekvenční charakteristiky zesilovače

Byly měřeny přenosové frekvenční charakteristiky zesilovače (**Obr. 35**), vyrobeného na dvou odlišných substrátech. Ověřoval se vliv použitých substrátů na výsledné vlastnosti zesilovačů, při napájecím napětí 3 V a 3,3 V

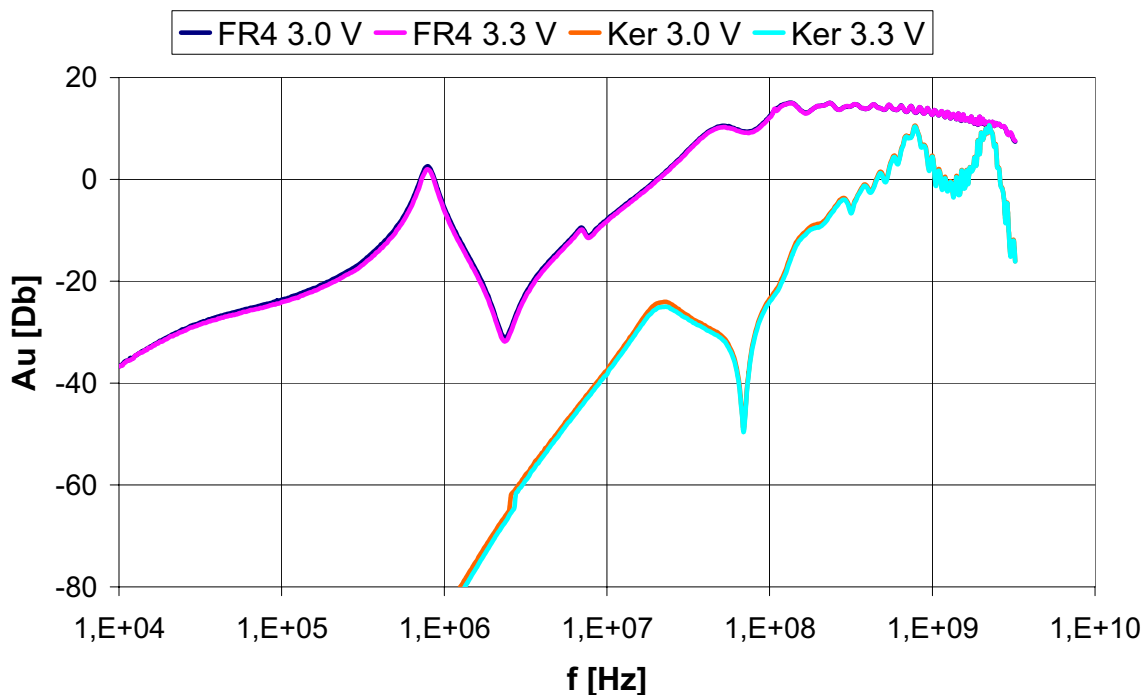


Obr. 35: Měřené zesilovače, vlevo na substrátu FR4, vpravo na keramickém substrátu

Byla měřena závislost zesílení na kmitočtu. Měřené obvody, zesilovaly pásmo kmitočtů, vytvořené kolem rezonanční frekvence. Tato rezonanční frekvence, je dána použitými součástkami a konstrukcí daného obvodu. Jednotlivé části vodivého motivu a součástky vytvářejí LC obvod, ovlivňující vlastnosti MGA - 82563. Správná funkce zesilovače je dána od minimálního napájecího napětí 3 V. Při napětí 3,3V by měl měřený obvod, vykazovat nejlepší zesílení [6]. Proto byly obvody měřeny při těchto dvou napájecích napětích. Výsledné charakteristiky však ukázaly, že změna napájecího napětí nemá téměř žádný vliv.

Z naměřených charakteristik je patrné, že lepší vlastnosti má evidentně obvod, který byl vyrobený na FR4. Což je neodpovídá všeobecně známému faktu, že keramické substráty jsou vhodnější pro vysokofrekvenční aplikace. Je to způsobeno tím, že převzatý obvod, byl přímo navržen a optimalizován pro substrát FR4. Naměřený zisk (13 Db) odpovídá údajům v katalogovém listu zesilovače [6].

Obvod na LTCC substrátu vykazoval velké nepřizpůsobení impedancí, které způsobilo odrazy na vstupu zesilovače tím zhoršení kvality. Permittivita substrátu, délky vodivých cest a součástky na kmitočtech řádově jednotky GHz ovlivňovaly nastavení pracovního bodu zesilovače. Jeho konstrukce nebyla optimalizována, docházelo k různým útlumům a odrazům. Lepších vlastností zesilovače by se dalo dosáhnout simulacemi a následnou optimalizací celého zapojení. To však nebylo předmětem bakalářské práce.



Obr. 36: Naměřené charakteristiky zesilovačů

8 Závěr

V předložené práci byly splněny všechny body zadání. Byly zhotoveny různé varianty propojení 3D struktur. Spolehlivost vodivého propojení keramiky a FR4 se za daných parametrů ukázala jako nevyhovující. V 3D struktuře vznikala velká pnutí, způsobená rozdílnými koeficienty délkové teplotní roztažnosti, vybraných materiálů. Pro srovnání byla testována spolehlivost spojení systému FR4 – FR4. Protože oba substráty měly stejnou velikost TCE, bylo mechanické namáhání substrátů minimální a výsledná kvalita vodivého spojení lepší. Na závěr byly měřeny frekvenční charakteristiky zesilovače vyrobeného na keramickém i organickém substrátu. Byl ověřován vliv substrátu na výsledné zesílení. Zesilovač vyrobený na organickém substrátu vykazoval lepší výsledky, protože byl optimalizován na vlastnosti daného substrátu.

Používání 3D struktur, je dobrým krokem vedoucím k minimalizaci obvodů a rostoucí integraci součástek. Při spojování jednotlivých substrátů do trojrozměrných struktur musí být brán ohled na jednotlivé dílčí problémy vznikající při konstrukci výsledné aplikace. Především jsou to silová působení, vznikající tepelnými, chemickými a mechanickými účinky. Také je nutné zohlednit tepelné namáhání součástek při přetavení, náročnost vytváření 3D struktur a cenu. Při návrhu 3D struktur musí být všechny negativní aspekty brány v úvahu a minimalizovány vhodnou konstrukcí a optimalizací výsledného výrobku.

Přínos 3D struktur je především v postupující integraci a zmenšování finálních produktů, při zachování odpovídajících vlastností, daných použitými substráty. To znamená, že jednotlivé funkční bloky výrobku mohou být navrhovány na takový substrát, který nejvíce vyhovuje daným potřebám obvodu. Funkční bloky se pak spojí do 3D struktur, které mohou vykazovat lepší výsledné parametry a vlastnosti, než obvod konstruovaný klasickými metodami na jediném substrátu.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2006. 379 s. ISBN 80-2143292-6.
- [2] STARÝ, Jiří., KAHLE, Petr. *Plošné spoje a povrchová montáž*, Vysokoškolské skriptum pro VUT v Brně
- [3] Low Temperature Co-fired Ceramic [online]. [2008] [cit. 2008-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://americas.kyocera.com/kai/semiparts/products/ltcc.cfm?page=16>>.
- [4] Tlusté vrstvy - Tisk, vytvrzení, měření [online]. c2000 [cit. 2008-04-30]. Dostupný z WWW: <<http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/KAT/tlustrvsy.pdf>>.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek S*, Vysokoškolské skriptum pro VUT v Brně
- [6] Katalogový list MGA - 82563 [online]. c2008 [cit. 2007-10-15]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/G/A/8/MGA82563.shtml>.
- [7] Moderní technologie pro konstrukci elektronických systémů [online]. [2005] [cit. 2008-05-06]. Dostupný z WWW: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/04_moderni_technologie.pdf>
- [8] SZENDIUCH, Ivan, *Mikroelektronika a technologie součástek L*, Vysokoškolské skriptum pro VUT v Brně
- [9] Pájení v parách [online]. 2007 [cit. 2008-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.ok2imh.com/view.php?cisloclanku=2007040005>>.
- [10] Katalogový list LF33C [online]. c2008 [cit. 2007-10-20]. Dostupný z WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/F/3/3/LF33C.shtml>.
- [11] IPC - SM - 785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachment [online]. [1992] [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <www.ipc.org>.
- [12] Pájené spoje [online]. [2008] [cit. 2008-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://147.229.68.79/SMT/eltext/PSPM/7.pdf>>.