



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет Електронна техника и технологии

Катедра Микроелектроника

маг. инж. Нина Руменова Спасова

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА МУЛТИЧИПНИ МОДУЛИ – МОНТАЖ И
ТОПЛООТДАВАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 Електротехника,
електроника и автоматика

Научна специалност: Микроелектроника

**Научни ръководители: проф. дн Славка Цанова
доц. д-р Светозар Андреев**

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Микроелектроника“ към Факултет Електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 19.04.2021 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 02.09.2021 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-59/ 25.05.2021 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р Анна Стойнова – председател
2. проф. дн. Славка Цанова – научен секретар
3. проф. дтн. Тихомир Таков
4. проф. д-р Петко Витанов
5. проф. дтн. Антон Георгиев

Рецензенти:

1. проф. д-р Анна Стойнова
2. проф. дтн. Тихомир Таков

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Факултет Електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1357.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Микроелектроника“ на факултет Електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Нина Спасова

Заглавие: Изследване на мултичипни модули – монтаж и топлоотдаване

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В настоящия момент мултичипните модули играят значителна роля в изграждането на сложни и многофункционални системи, като целта е да се развиват и усъвършенстват във всички технологични направления - подобряване на използваните материали, развитие на процеса на производството и насищането им с компоненти, повишаване на надеждността, бързодействието им и намаляване на габаритните размери, както и редуциране броя на отказите при работата им, търсене на възможност на създаване на системи с много входи/изходи и същевременно, компактност и намаляване броя на външните изводи за зададена функционалност, а не на последно място и понижаване на производствените цени.

В дисертационния труд се разглеждат тенденциите за развитие и оптимизиране на процесите на производство на мултичипни модули. Разгледани са проблемите за съвместимост между различните технологии за производство на МЧМ, както и проблеми при многослойната комутация като паразитни капацитети и съпротивления, разсейването на по-голяма мощност на по-малка площ, влошаване на условията на топлообмен. Предложени са нови методи за метализиране на проходни отвори. Изследвани са свойствата на многослойни подложки от различни материали за подобряване на топлоотдаването като се приложат различни методи за реализиране на проходни отвори и МЧМ.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целите в дисертационния труд са за изследване и определяне на методология за измерване на диелектричната проникваемост и качествения фактор на анодния алуминиев оксид за приложението му като носител в мултичипни модули; изследване на различни методи за метализирането на проходните отвори в многослойните структури на мултичипни модули; както и реализирането и изследването на многослойни подложки за МЧМ от различни материали и изследване на топлоотдаването. За да се постигне целта ще бъдат изпълнени следните задачи: проектиране на топологична структура на аноден алуминиев оксид; измервания на създадени прототипи за оценка на диелектричната проникваемост и качествения фактор на ААО; реализиране на подложки от различни материали за подобряване на топлоотдаването; измерване на топлоотдаването на многослойни структури и разпределяне на топлината в тях; определяне на електрическото натоварване и топлоотдаването в проходни отвори.

Научна новост

В дисертацията е предложена методология за измерване диелектричната проникваемост и качествения фактор на аноден алуминиев оксид. Предложената методология по метода на ринг резонатора е приложила и за други тънкослойни диелектрици. Предложени са нови методи за метализиране на проходни отвори. Използвана е нетрадиционна рецепта за метализиране на проходни отвори чрез меден хипофосфит. Изследвани са свойствата на многослойни подложки от различни материали за подобряване на топлоотдаването като се приложат различни методи за реализиране на проходни отвори и МЧМ. Създадена е нова конфигурация на медни проводящи шини и метализация на проходни отвори.

Практическа приложимост

Направените изследвания по дисертацията имат своята приложимост в следната насоченост:

- за подобряване на топлоотвеждането на многослойни подложки чрез различна конфигурация на проводящи шини и проходни отвори. За реализирането на тези подложки беше изработена и нова специализирана хидравлична преса, която е приложима както за ламиниране на материали от стъклотекстолит, така и за многослойни структури от нискотемпературна керамика.

- метализация по по-изгоден икономически метод, който среща интерес от колеги от Турция, които са прочели публикуваните резултати. Интересът се изразява във внедряване на методите за метализиране на проходни отвори за производствено на печатни платки.

Апробация

Основната работа по дисертацията е осъществена в лабораториите на катедра Микроелектроника към Техническият Университет София, както и в София Тех Парк.

Финансовата подкрепа по изследванията е осигурена от докторантски договор 172ПД0022-03: Изследване на многослойни носители за мултичипни модули

Благодарности

Авторът би искал да изкаже своите най-искрени благодарности на своите научни ръководители проф. дн Славка Цанова и доц. д-р Светозар Андреев за ползотворната съвместна работа, за подкрепата през цялото време, за всички съвети и градивни критики, които отправиха.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 научни статии, от които 3 на международни конференции в страната и 1 самостоятелна в реферирано списание.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **137** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **102** литературни източници, като **90** са на латиница и **2** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **68** фигури и **10** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Литературен обзор

Повишената степен на интеграция и плътност на монтажа поставят и някои проблеми при проектирането и производството на мултичипните модули:

- проблеми за съвместимост между различните технологии за производство на МЧМ;
- проблеми при многослойната комутация като паразитни капацитети и съпротивления, както и разсейването на по-голяма мощност на по-малка площ, влошаване на условията на топлообмен.

От гледна точка на проектирането и създаването на надеждни и безотказни електронни системи (в частност – МЧМ) е необходимо споменатите по-горе проблеми да бъдат изучени в дълбочина и предлагането на нови решения. Това от своя страна налага изследването на поведението на реални образци и анализ на резултатите.

Изводите от направения литературен обзор, свързани с целта на дисертацията са:

➤ Изследвания на подложки от алуминиев оксид

В литературата са публикувани предимно резултати от изследвания по метода на плоския кондензатор. При него се отчита по-висок капацитет на структурите и това води до некоректни изчисления на диелектричната константа на анодния алуминиев оксид. В дисертацията ще направим изследвания по метода на ринг резонатор с цел получаване на по-точни резултати.

➤ Методи за метализиране на проходни отвори.

В литературата са представени експерименти с метализация на проходните отвори на основата на паладий и въглерод. В дисертацията ще експериментираме метализация с меден хипофосфит, който е по-изгоден икономически.

➤ Електрическо натоварване и топлоотдаване в проходни отвори

В литературата има множество изследвания за ширината на пистите и недостатъчна информация за метализацията на проходните отвори. В дисертацията ще извършим практически експерименти и изследване на топлоотдаването и отказите при различни структури на подложки за МЧМ.

В резултат от обстойния литературен обзор са формулирани следните цели и задачи.

Целта на работата е да се изследват свойствата на многослойни подложки от различни материали за подобряване на топлоотдаването като се приложат различни методи за реализиране на проходни отвори и МЧМ.

За да се постигне целта ще бъдат изпълнени следните задачи:

- реализиране и измерване на многослойни подложки от различни материали за подобряване на топлоотдаването;

- измерване на топлоотдаването на структурите и разпределяне на топлината в тях при съответен електрически товар;
- определяне на топлоотдаването в проходните отвори;
- изследване на използването на различни материали и техники за производство на многослойни подложки за МЧМ;
- изследване на различните технологии за монтаж на мултичипни модули и обединяването им в една обща електронна микросистема.

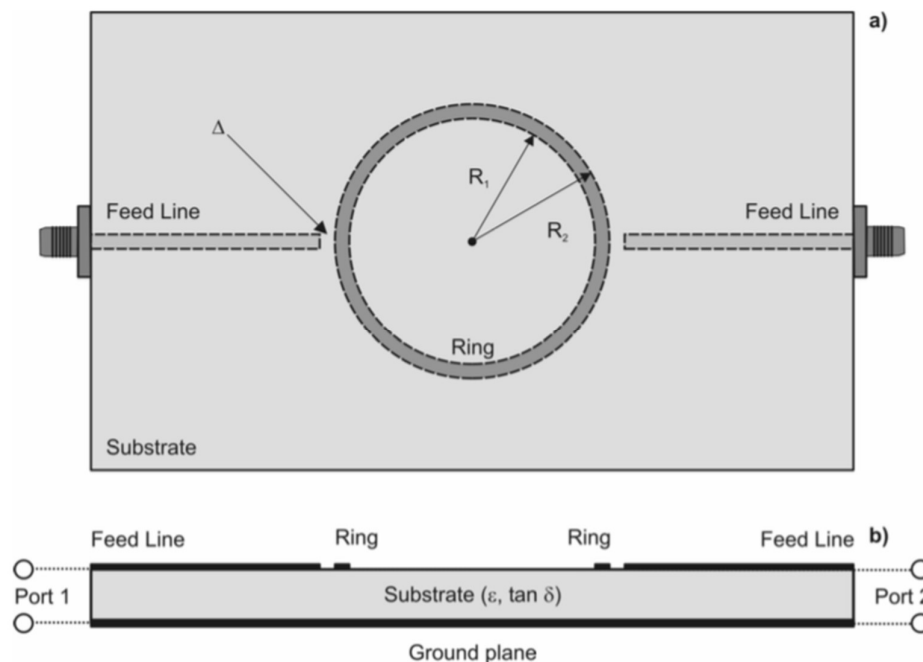
ГЛАВА 2. Изследване на диелектричната проникваемост на аноден алуминиев оксид за приложението му в мултичипни модули

Целта на работата в тази глава е изследване и определяне на методология за измерване на диелектричната проникваемост и качествения фактор на анодния алуминиев оксид за приложението му като носител в мултичипни модули. За изпълнение на поставената цел са изпълнени следните задачи:

- разработване на експериментални модели / прототипи със слоеста структура Al / Al₂O₃ и Al / Al₂O₃ / Ni / Cu;
- проектиране на топологична структура, подходяща за измерване на диелектричната проникваемост и качествения фактор на ААО;
- използване на избраната методология за извършване на измервания на създадени прототипи за оценка на диелектричната проникваемост и качествения фактор на ААО.

Структурата на резониращия пръстен (ринг), нанесен върху електронния носител, може да се използва за измерване на диелектричната константа и качествения фактор на материала на носителя.

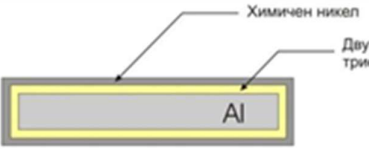
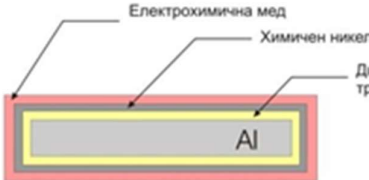
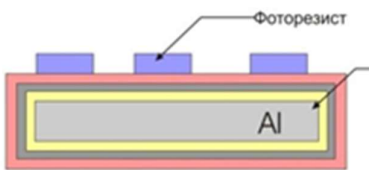
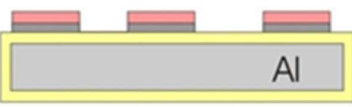
Използва се двуслойна платка с един диелектричен слой, както е показано на фиг. 2.11. На фиг. 2.11а) е показана позицията на ринга и линиите отгоре, а на фиг. 2.11б) е показан разрез на платката. Линиите и ринга са проводящите елементи, като тяхната ширина е избрана така, че импедансът да е 50Ω. Трябва да има малък процеп между линиите и пръстена. SMA конекторите се използват за връзка с мрежовия анализатор за измерване.



Фиг. 2.11. Схема за измерване по метод резониращ ринг.

За експерименталната реализация на структурите е използван технологичният ред, представен в таблица 2.1. В лявата част от таблицата са описани отделните етапи, а в дясната част схематично е показан резултатът от всеки етап:

Таблица 2.1. Технологични етапи

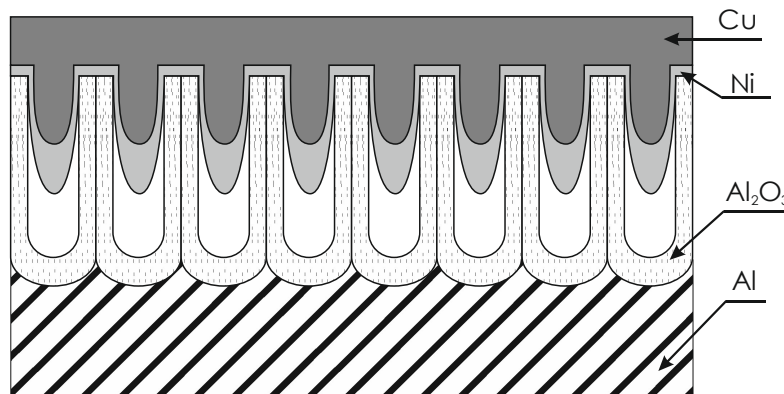
1. Тотално анодиране на алуминиева подложка	
2. Химично никелиране	
3. Електрохимично помедняване	
4. Фотолитография за реализиране на топология на проводящия слой	
5. Ецване на металните слоеве и сваляне на фоторезиста	

Метализирането на изолиращия аноден слой е извършено в два етапа – химично никелиране и електрохимично помедняване. Използването на никел като подслой се налага поради това, че разтворите за химично никелиране са щадящи към слоя от Al_2O_3 , докато медните разтвори са силно алкални и имат разрушаващо действие върху оксида. В последната стъпка от технологичния ред, при ецването на структурите е използван разтвор на основата на Натриев персулфат.

За да се изработят тестовите образци за настоящето изследване, се използват първоначални листове от алуминий с чистота 99,99% и дебелина 100 μm с работна площ $S=8 \times 8 \times 2=128 cm^2=1.28 dm^2$. За да се обезмасли повърхността преди анодизацията, алуминиевата подложка се обработва в 4% разтвор на NaOH в продължение на 1 минута и се изплаква с дестилирана вода. След това се прави второ обезмасляване в ацетон и се промива с дестилирана вода.

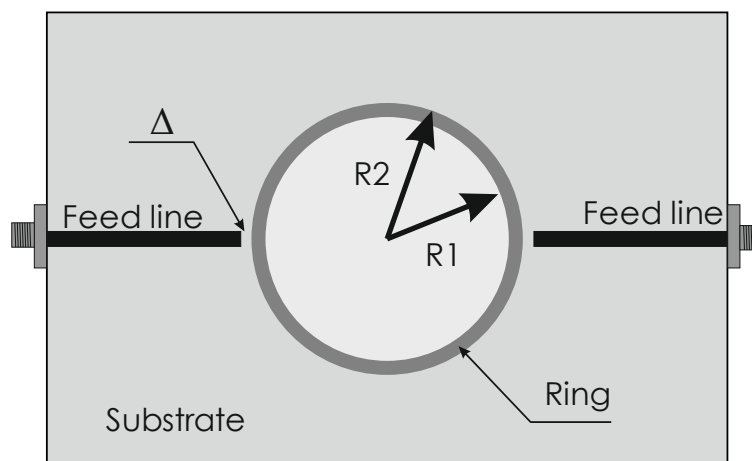
Анодният оксиден слой се получава чрез електрохимичен анодизационен процес, изпълнен в електролит от 5% оксалова киселина. Следващите стъпки в технологичния процес за тестовата пластина са повърхностната метализация и фотолитографските процеси за структуриране на резонансните рингове.

Фигура 2.13. показва структурата на напречното сечение на разработената тестова подложка.



Фиг. 2.13. Структура на напречното сечение на разработената тестова подложка.

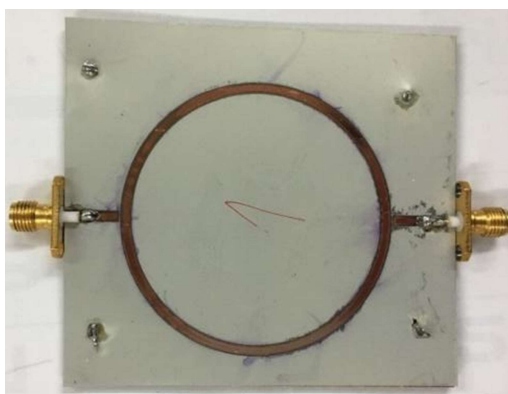
Захранващите линии и ринг резонатора са изградени с широчина избрана за $50\ \Omega$ характеристичен импеданс. Между ринга и всяка захранваща линия е включена малка междина Δ ; тази междина се реализира, за да се отдели резонансното поведение на ринга от захранващите линии и има размер от 0,1 до 1,0 пъти по-голяма от ширината на захранващата линия. Използват се два SMA конектора за свързване на устройството към мрежов анализатор за измерване. Структурата на устройството, разработена за това изследване, е показана на фигура 2.14.



Фиг. 2.14. Структура на тестовия субстрат.

За определяне на диелектричната проникваемост на подложката на платката беше използвано измерване на параметъра S_{21} на двупортовия ринг резонатор. Измерванията на параметъра S_{21} се извършват на векторния мрежов

анализатор E5072A на Agilent Technologies. Той позволява измервания в честотния диапазон до 8.5 GHz.



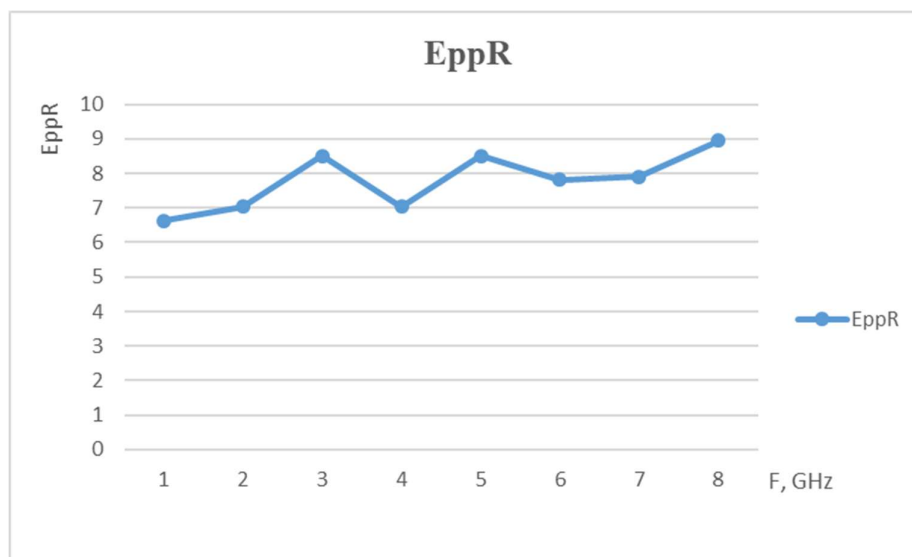
Фиг. 2.16. Снимка на тестовата структура алуминий.

Резултатите, получени след измерванията, са показани в таблица 2.2.

Таблица 2.2. Резултати от измерванията

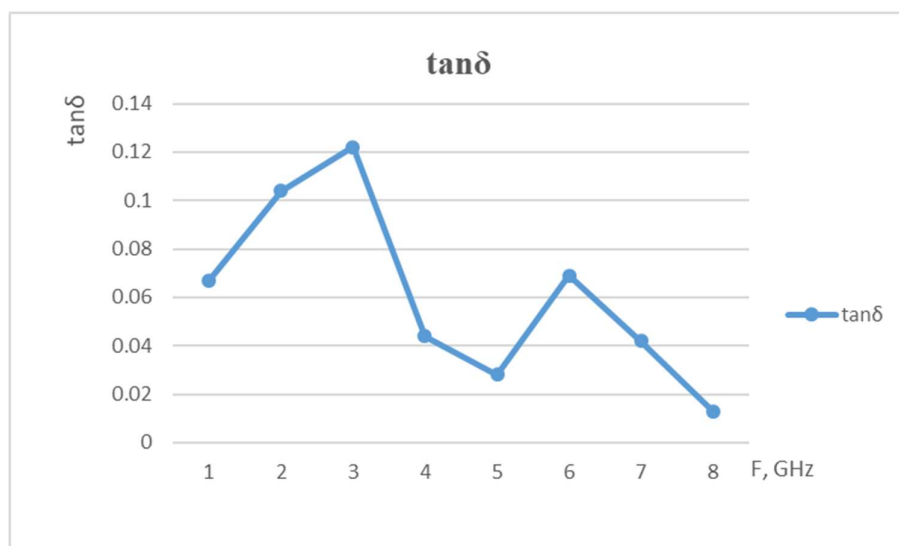
F, GHz	0.722	1.40	1.91	2.81	3.19	3.99	4.63	4.97
ϵ_r	6.62	7.03	8.51	7.03	8.51	7.81	7.90	8.95
$\tan \delta$	0.067	0.104	0.122	0.044	0.028	0.069	0.042	0.013

Резултатите от диелектричната проникателност на ААО подложка, изчислени след измерванията, са показани на фигура 2.17.



Фиг. 2.17. Резултати от измерената диелектрична проникателност на ААО подложка.

Резултатите от качествения фактор на ААО образца, изчислени след измерванията, са показани на фигура 2.18.



Фиг. 2.18. Резултати за качествения фактор на ААО субстрата.

Заклучение

В тази глава е представено изследване за методология за измерване на диелектричната проникваемост и качествения фактор на анодния алуминиев оксид за приложението му като носител в мултичипни модули.

Методът на ринг резонатора, предложен в тази работа, би могъл да бъде оценен като много удобен за измерване на диелектричната проникваемост на тънки ААО слоеве. Резултатите, получени при измерването показват, че диелектричната константа варира в диапазона от 6.6 до 9 в зависимост от честотата на сигнала.

Чрез метода на ринг резонатора е установена методология за измерване на диелектричната проникваемост и качествения фактор на диелектричен слой от аноден алуминиев оксид за приложението му в МЧМ. Този факт доказва приложимостта на метода за измерване. Методът позволява измерването на тези параметри на реални структури във вида, в който те биха били използвани като носители за МЧМ. Методологията на измерването е приложима и за други видове тънкослойни диелектрици.

ГЛАВА 3. Методи за реализиране на проходни отвори в многослойни структури

Целта на разработката представена в тази глава е изследване на различни методи за метализирането на проходните отвори в многослойните структури на мултичипни модули.

За целите на експериментите в настоящата част от работата са използвани три метода за метализиране на отвори – на основата на паладий, на основата на въглерод и на базата на меден хипофосфит, който е сравнително нов метод.

Метализиране на проходни отвори на основата на паладий е метод за метализиране чрез колоидната система за активиране на базата на паладий, която е подобна на традиционния метод за химично медно покритие, тъй като използваният активатор е отново Pd/Sn.

В настоящото изследване метализирането на проходните отвори на РСВ на основата на паладиево активиране е извършено в следната последователност:

- 1) Пробиване и почистване на отворите
- 2) Обезмасляване и байцване
- 3) Активиране и акселериране
- 4) Химично помедняване

Вторият активиращ разтвор, използван за експериментите, е на въглеродна основа. Експериментите са проведени с Активатор 310 от “LPKF Laser & Electronics AG”. За да се постигнат електропроводими характеристики, активаторът се прилага по следния начин:

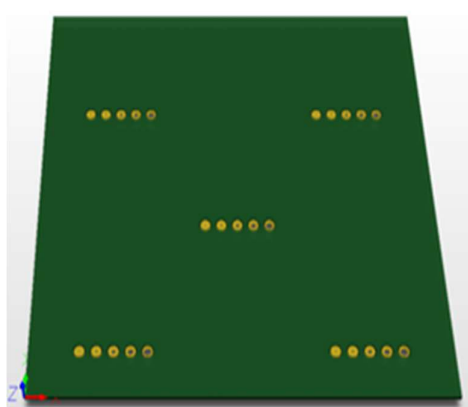
- 1) тестваната подложка се потапя в активаторния разтвор за 15 минути;
- 2) сушене и стабилизиране при 60°C в продължение на 15 минути. Образува се черен проводим слой от въглерод и може да се приложи директно галванизация.

За изследванията беше използван трети активиращ разтвор. Състои се от меден хипофосфит, амониев хидроксид и овлажняващ агент. Медният хипофосфит, използван в изследването, е синтезиран в катедра „Микроелектроника” непосредствено преди разтварянето му в амоняк. Използвана е нетрадиционна рецепта, комбинираща две евтини и разпространени химични съставки – меден сулфат и натриев хипофосфит. При комбинация на двата химикала, разтворени във вода, при контролирана температура (18 – 20°C) след определено време се получава утайка, която всъщност е медния хипофосфит.

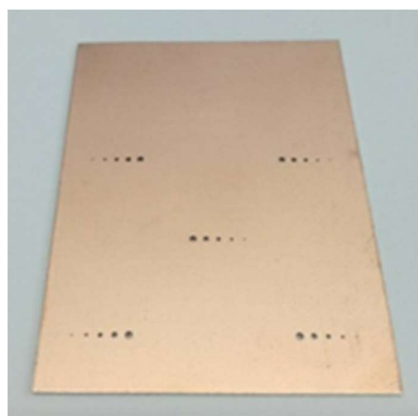
За да се изследва способността на диелектричната активация на трите химични метода, цитирани по-горе, са подготвени тестови образци и тяхната топология е показана на фигура 3.8. Пробите са с размер 5x5 cm и имат различна дебелина на диелектричната сърцевина. В нашите изследвания са използвани 0.5 Oz двустранен FR4 с дебелина 0.80 mm на диелектрика, 0.5 Oz двустранен FR4 с 1.5 mm на диелектрика и 0.5 Oz двустранен Rogers 4003 с

дебелина на диелектрика 0.508 мм. Докато диелектричната сърцевина на FR4 е стъклотекстолит, сърцевината на Роджърс е на базата на въглеродород-керамика. Видовете платков материал не са избрани случайно, а с цел да се изследват възможностите за метализиране на отворите при различни видове диелектрик, както и метализирането при различно съотношение на диаметър към дълбочина на отвора. Както може да се види на фигурата, отворите, пробити в тестовите проби, се състоят от 5 групи по 5 отвора с диаметър 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 и 1 mm. Изборът на конфигурацията от отвори е с цел проследяване качеството на метализиране на отвори, геометрично разположени в различни участъци от образца.

Топологията на проекта за тестови образци е проектирана в CAD системата на Altium Designer 13, а за пробиване на отворите е използвана машината LPKF ProtoMat S103.



а)



б)

Фиг. 3.8. Тестови структури: а) проектирана топология; б) тестова структура от платков материал FR4

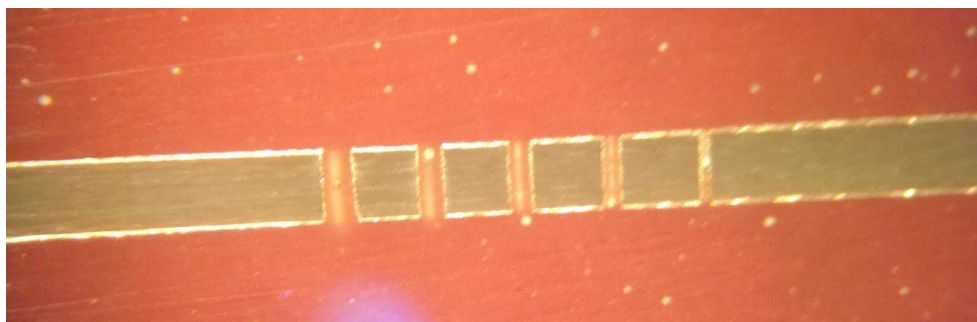
Метализираните проходни отвори са показани на фиг. 3.9.



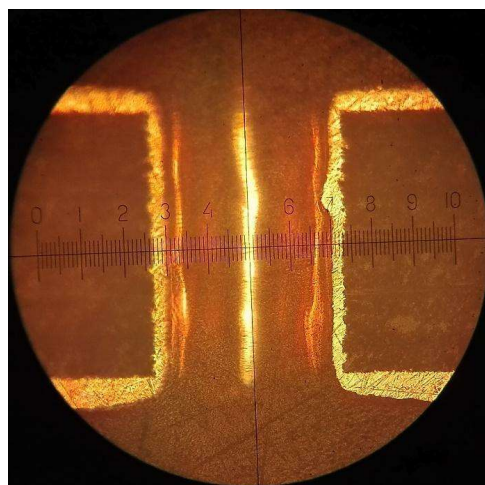
Фиг. 3.9. Метализирани проходни отвори

За да бъде изследвано качеството на металното покритие бяха направени шлифове на метализираните отвори. С помощта на микроскоп МІК 4 беше наблюдавана равномерността на отложената мед вътре в проходните

отвори и беше измерена дебелината на медта, както е показано на фигура 3.11а) и фигура 3.11б).



а)



б)

Фиг. 3.11. Наблюдаване на отложената мед с микроскоп МІК 4; а) полирани шлифове на метализирани проходни отвори с различен диаметър; б) микроскопска снимка на равномерността на метализацията

Измерената дебелина на медта от изпитваните проби е представена в таблици 3.2, 3.3 и 3.4. В таблица 3.2 са дадени стойностите на дебелината на пробите, обработени в класическата система за активиране с паладий, таблица 3.3 показва същите стойности на пробите активирани с въглерод и таблица 3.4 - на проби активирани с меден хипофосфит.

Таблица 3.2. Класическата система за активиране с паладий

<i>Материал</i>	<i>RO4003</i>	<i>FR4 0.8</i>	<i>FR4 1.5</i>
<i>Диаметър на отвор</i>	<i>Дебелина на</i>	<i>медното покритие</i>	<i>на отворите, μm</i>
<i>1</i>	<i>22-24</i>	<i>24-26</i>	<i>16-18</i>
<i>0.8</i>	<i>22-24</i>	<i>24-26</i>	<i>16-18</i>
<i>0.6</i>	<i>22-24</i>	<i>24-26</i>	<i>16-18</i>
<i>0.4</i>	<i>22-24</i>	<i>24-26</i>	<i>16-18</i>

0.2	22-24	24-26	16-18
-----	-------	-------	-------

Таблица 3.3. Въглерод-активирани проби

<i>Материал</i>	<i>RO4003</i>	<i>FR4 0.8</i>	<i>FR4 1.5</i>
<i>Диаметър на вия</i>	<i>Дебелина на</i>	<i>медното покритие</i>	<i>на проходни отворите, μm</i>
<i>1</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>14-16</i>
<i>0.8</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>14-16</i>
<i>0.6</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>14-16</i>
<i>0.4</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>14-16</i>
<i>0.2</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>14-16</i>

Таблица 3.4. Активиране с меден хипофосфит

<i>Материал</i>	<i>RO4003</i>	<i>FR4 0.8</i>	<i>FR4 1.5</i>
<i>Диаметър на вия</i>	<i>Дебелина на</i>	<i>медното покритие</i>	<i>на проходни отворите, μm</i>
<i>1</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>12-14</i>
<i>0.8</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>12-14</i>
<i>0.6</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>12-14</i>
<i>0.4</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>12-14</i>
<i>0.2</i>	<i>20-22</i>	<i>16-18</i>	<i>12-14</i>

Заклучение

В тази глава са представени резултатите от изследване на различни методи за метализирането на проходните отвори в многослойните структури на мултичипни модули.

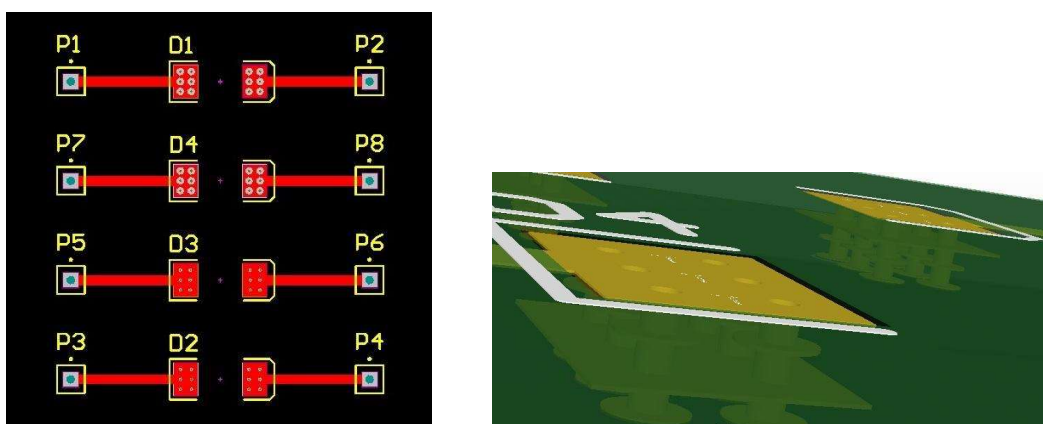
Трите метода дадоха много добри резултати по отношение на качество на метализирането в проходните отвори на образците. Методът, при който се прилага термолиза на меден хипофосфит не отстъпва на останалите два метода и същевременно е икономически многократно по-изгоден. Методът с нестабилния меден хипофосфит е най-нов и има реално приложение в индустрията. Установен е нов метод за получаването на меден хипофосфит и съответно активиращ разтвор.

ГЛАВА 4. Многослойни подложки за мултичипни модули – реализиране и изследване

Целта на работата представена в тази глава е реализирането и изследването на многослойни подложки за МЧМ от различни материали и изследване на топлоотдаването.

За постигането на тази цел е извършено проектиране на многослойни подложки, реализиране на топология, съвместяването им в един общ пакет и измерване на топлоотдаването на различни части от структурите при съответен електрически товар.

За изпълнение на задачите са проектирани с Altium Designer многослойните структури, показани на фигури 4.3 и 4.4. Представените структури съдържат 4 нива на опроводяване и са с размер 50мм x 50мм.

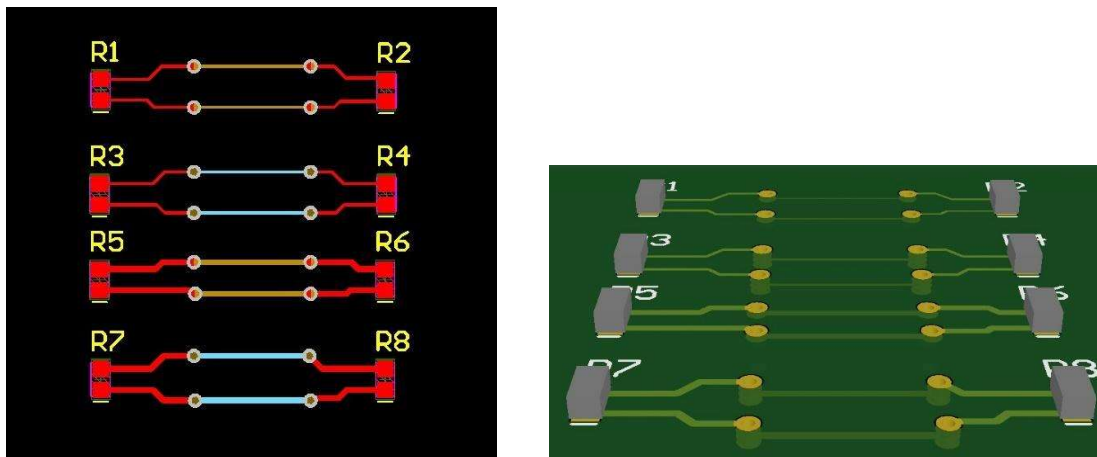


Фиг. 4.3 Многослойни структури, реализирани с контактни площадки за относително мощен диод за SMD монтаж

Проектираната топология на фиг. 4.3 съдържа четири комплекта проводници, като те свързват контактните площадки на диод (MBRS360T3G) за SMD монтаж. Във вътрешността на структурата контактните площадки са дублирани и са свързани с горните с по 6 броя термични проходни отвори с различен диаметър (0,2мм и 0,3мм). При тази топология целта е да се определи разпределението на топлината, отделена от елемента по повърхността и във вътрешността на носителя.

Структурата на фиг. 4.4. съдържа 4 комплекта проводящи шини, започващи от най-горно ниво и преминаващи през вътрешните нива на платката. За целите на изследването върху структурата са проектирани различни комбинации като дебелина на проводниците, диаметър на проходните отвори, ширина на проводниците. Първите две двойки писти са проектирана с дебелина 0,245 μm , като при първата двойка пистите започват от най-горното ниво, преминавайки през втория слой на структурата, а при втората двойка пистите започват отново от най-горното ниво, преминавайки през третия слой на структурата. Аналогично са проектирани и другите две двойки писти, но с дебелина 0,470 μm . Проходните отвори са с диаметър 0,5

mm и са метализирани за време 60 min (електрохимично удебеляване) и по този начин дебелината на медното покритие в отворите е около 25 μm . Предвидено е чрез тази топология да бъде изследвано температурното разпределение на повърхността и във вътрешността на многослойната структура, както и температурата в проходните отвори.



Фиг. 4.4. Многослойни структури с 4 комплекта проводящи шини

С така проектираните топологии и технологичните файлове от CAD системата са изготвени необходимите за изработването на структурите фотошаблони за всяко отделно проводящо ниво.

Технологичният ред за изработка на структурите включва следните стъпки:

1. разкрояване на изходния материал;
2. пробиване на отвори за съвместяване;
3. реализиране на вътрешните проводникови слоеве;
4. ламиниране на горен и долен проводников слой;
5. пробиване на проходни отвори;
6. метализиране на проходните отвори;
7. формиране на горно и долно проводящи нива.

За целите на ламинирането на слоевете и поради спецификата на температурния профил беше извършена работа по конструиране и изработване на нова хидравлична преса, с цел по-прецизен контрол на налягането. Снимка на пресата е показана на фиг. 4.7.



а)



б)

Фигура 4.7. а) Преса за ламиниране на FR4 и LTCC; б) електронна схема за температурен контрол

С тази конструкция пресата е приложима както за ламиниране на материали от стъклотекстолит, така и за многослойни структури от нискотемпературна керамика.

Изготвени са образци на многослойни носители от органичен материал (МСМ-Л), показани на фиг. 4.9, създадени за изследване на топлинните процеси в структурите. Структурата на фиг. 4.9а) съдържа 4 комплекта проводящи шини, започващи от най-горно ниво и преминаващи през вътрешните нива на платката. Предвидено е чрез тази топология да бъде изследвано температурното разпределение на повърхността и във вътрешността на многослойната структура, както и в самите проходни отвори при различните комбинации. Образците от фиг. 4.9б) съдържат четири комплекта проводници, като този път те свързват контактните площадки на диод за SMD монтаж. Целта при изследването на тази структура е да се определи разпределението на топлината, отделена от елемента по повърхността и във вътрешността на носителя. Всички образци се състоят от 4 проводящи слоя, като са вариани ширината на проводниците, дебелината на проводниците, диаметъра на проходните отвори, дебелината на метализацията в проходните отвори, площта на термичните контактни площадки на повърхността и във вътрешността на структурите.

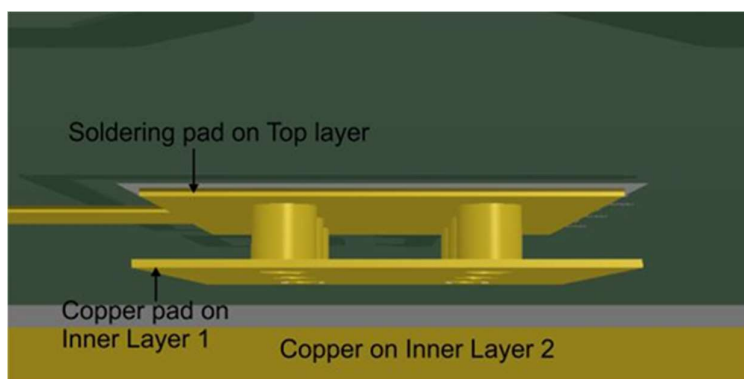


а)

б)

Фиг. 4.9. Образци на многослойни носители от органичен материал (MCM-L)

Разработени са четири различни комбинации от контактни подложки за запояване, термо-проходни отвори и медни подложки във вътрешния слой. Съгласно спецификацията на MBRS360T3G, площадките за запояване на горния слой са проектирани съответно с дължина и ширина 2.8 x 3.8 мм, чиито размери съответстват на контактите на SMC корпуса. Медните площадки на вътрешния слой 1 на тестваните структури имат 2 различни размера - на тестовите структури 1 и 2 те са точно като площадките за запояване от горния слой, а на тестови структури 3 и 4 медните площадки на вътрешния слой са проектирани съответно с дължина и ширина 4.3 x 5.2 мм, което удвоява площта им, в сравнение с площадките на горния слой. Проходните отвори започват от Top layer и завършват на Inner layer 1, те не преминават през цялата 4-слойна структура. Това може ясно да се види на фигура 4.13, където е показан 3D изглед на вътрешните слоеве. Параметрите на всички тестови структури са изброени в таблица 4.1.



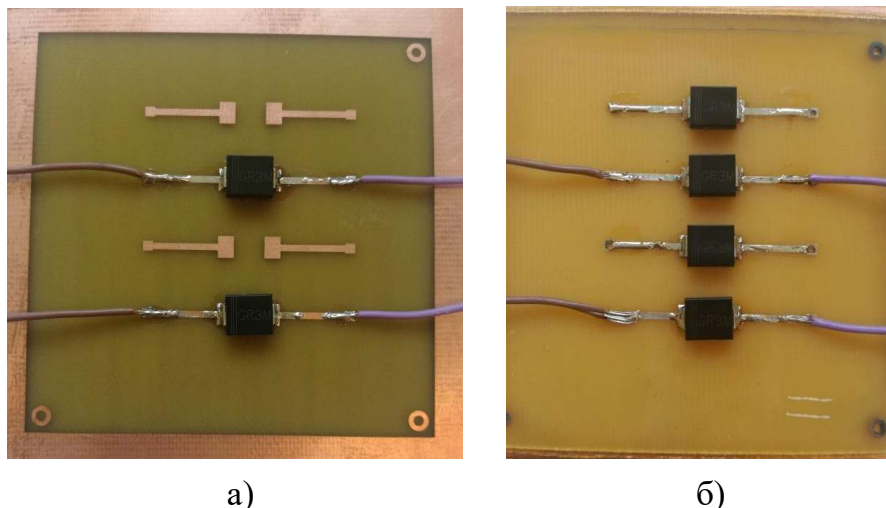
Фиг. 4.13. "Вътрешен" 3D изглед на най-горен слой, вътрешни слой 1, подложки и термо-проходни отвори

Таблица 4.1 Параметрите на тестовите структури

Параметър	Тестова структура 1	Тестова структура 2	Тестова структура 3	Тестова структура 4
Контактна площадка на горния слой $\times 2$ (mm ²)	21,28	21,28	21,28	21,28
Медна площадка на вътрешен слой 1 $\times 2$ (mm ²)	21,28	21,28	44,72	44,72
Обща площ на медния слой (mm ²)	42,56	42,56	66	66
Диаметър на термо-проходните отвори	0,2	0,3	0,2	0,3
Брой слоеве	4	4	4	4
Брой проходни отвори	6	6	6	6

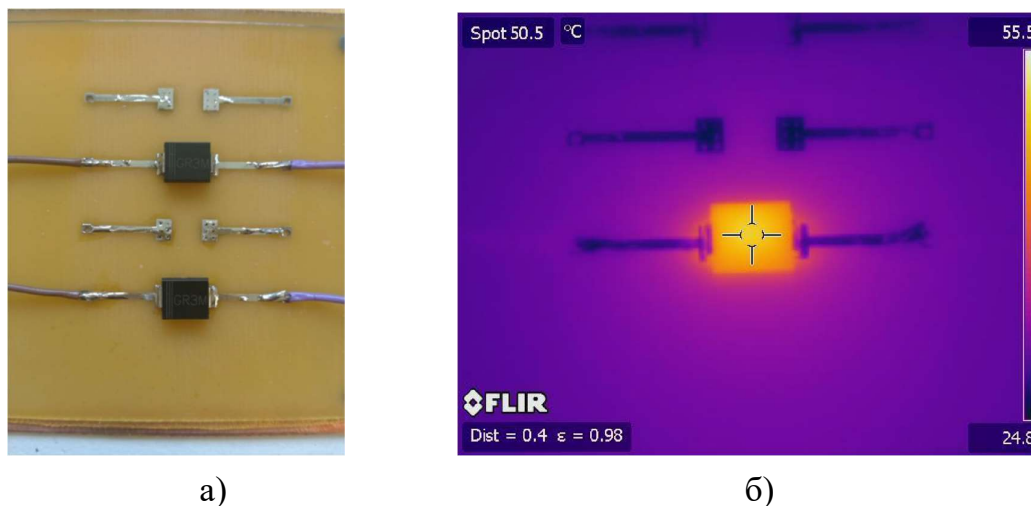
Тестовите проби се състоят от две отделни FR4 подложки, които след процеса на ламиниране образуват четиристойната структура. Два листа от Prepreg 1080 бяха използвани за етапа на ламиниране. Измерва се общата дебелина на всяка тестова проба и тя е 1.63 mm. Диодите MBRS360T3G са запоени на всяка контактна площадка.

Приготвена е друга тестова структура, но този път тя е двуслойна от FR4 с дебелина 0,80 mm. На горния слой е същата топология както на фигура 4.14а), което означава стандартна препоръчана контактна площадка за SMA корпус на един слой без термични проходни отвори. Тази проба е разработена, за да се сравни поведението на MBRS360T3G с останалите четири четирислойни тестови проби. На фигура 4.14б) са представени снимки на приготвените тестови структури.

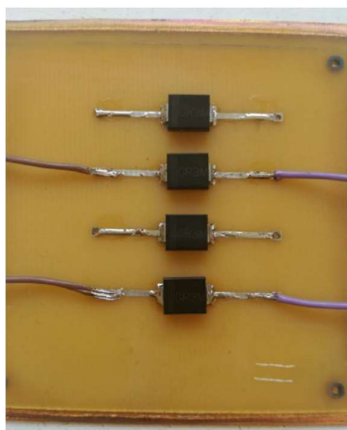


Фиг. 4.14 Тестови образци за термични измервания. а) двуслойна структура б) четирислойна структура с термо-проходни отвори и медни площадки на втори проводящ слой.

За измерване на температурата на корпуса на диодите беше използвана термокамера FLIR P640. Всички измервания се провеждат при стайна температура.



Фиг. 4.18 Тестова структура. а) четирислойна структура с дебелина на метализацията на отворите 13 μm ; б) Термографска снимка с диаметър на отворите 0,3 mm при ток 500 mA



а)



б)

Фиг. 4.19 Тестова структура. а) четиристайна структура с дебелина на метализацията на отворите 25 μm ; б) Термографска снимка с диаметър на отворите 0,3 mm при ток 500 mA

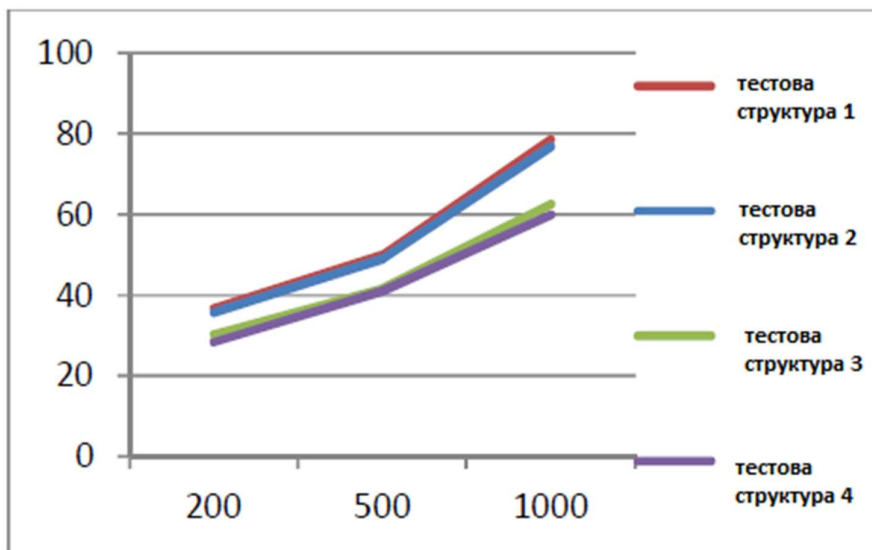
В таблица 4.2 са представени резултатите от работата на диода на различните тестови проби. На диодите за измервания бяха приложени три текущи режима - 0.2 A, 0.5 A и 1 A.

Таблица 4.2. Резултатите от работата на диода

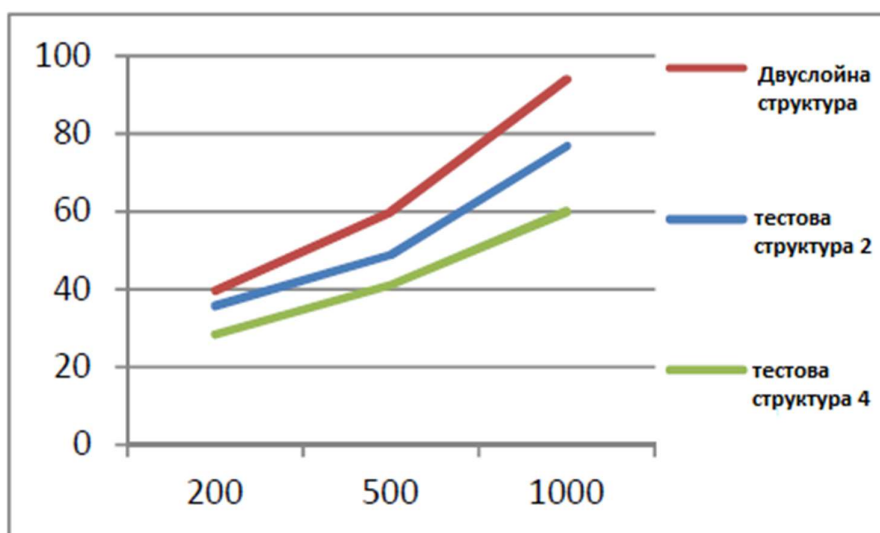
<i>№ тестов образец</i>	<i>Ток (A)</i>	<i>Температура на диода (°C)</i>
1	0,2	36,8
	0,5	49,7
	1	78,6
2	0,2	35,9
	0,5	48,8
	1	76,8
3	0,2	30,3
	0,5	41,5
	1	62,6
4	0,2	28,4
	0,5	41,1
	1	60
Двуслойна структура	0,2	39,7
	0,5	60
	1	94

Както може да се види в таблица 4.2, тестовите структури 1 и 2 имат много близки резултати, отнасящи се до температурата на корпуса на диода. Тестваната структура 1 има по-малък диаметър на проходните отвори (0.2 mm) и може да е причина за неговата малко по-висока температура, в сравнение с тестовата структура 2 (0.3 mm диаметър на проходните отвори). Същата

разлика се наблюдава при измерените температури на тестовите структури 3 и 4. Дiodът върху тестовата структура 4 има най-добрата температурна характеристика, което означава, че по-доброто отвеждане на топлина зависи най-вече от по-голямата площ на медна подложка, поставена на вътрешния слой 1 на структура. В сравнение с двуслойната структура, тестовата структура 4 показва по-добро разсейване на топлината на устройството с повече от 30%. Фигури 4.20 и 4.21 показват температурните криви, получени от всички измервания. На тези графики може да се види по-добро сравнение на резултата.



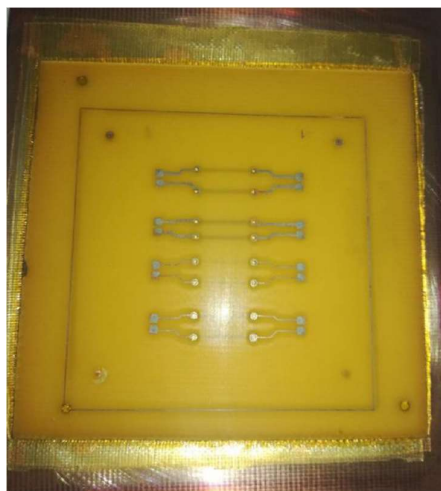
Фиг. 4.20 Температурна графика на тестови образци 1, 2, 3 и 4



Фиг. 4.21 Температурна графика на тестови образци 2, 4 и двуслойна структура

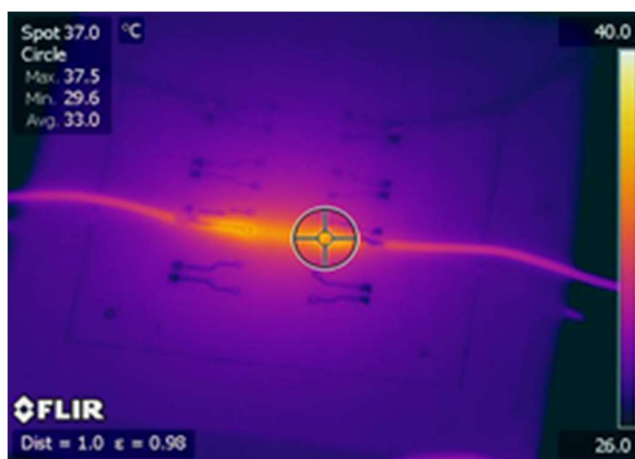
Резултатите показват повече от 30% по-добро температурно разсейване на диодите, запоени върху 4-слойни структури на подложки с допълнителна медна повърхност във вътрешния слой, в сравнение с двуслойна структура със стандартни спойващи подложки. Също се наблюдава, че при наличието на по-дебела метализация на термо-проходните отвори има по-добро топлоотдаване.

Беше изследвано и нагряването на метализирани проходни отвори с различен диаметър при проводящи писти с различна ширина в многослойните структури. Примерна такава тестова структура е показана на фиг. 4.22.



Фиг. 4.22. Метализирани проходни отвори с диаметър 0,5 mm при проводящи писти с ширина 0,245 μm и 0,470 μm .

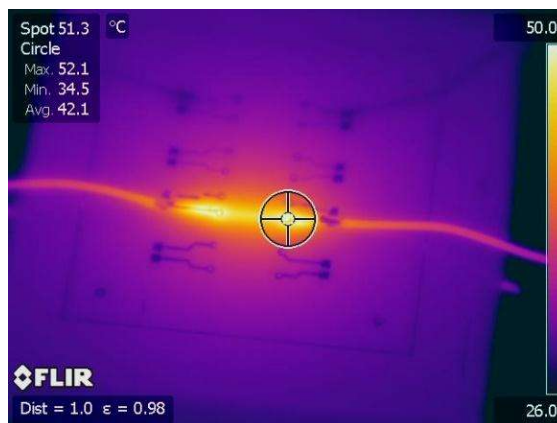
Структурата на фиг. 4.22 е четирислойна, като проводящите шини са разположени на първо и второ ниво. Първите две двойки писти са проектирани с дебелина 0,245 μm , като при първата двойка пистите започват от най-горното ниво, преминавайки през втория слой на структурата, а при втората двойка пистите започват отново от най-горното ниво, преминавайки през третия слой на структурата. Аналогично са проектирани и другите две двойки писти, но с дебелина 0,470 μm . Проходните отвори са метализирани по посочената по-горе технология за време 60 min и по този начин дебелината на медното покритие в отворите е около 25 μm . Температурното натоварване е осъществено с различен ток от стабилизирани генератор, а температурата в различни точки от структурата е снета отново с помощта на инфрачервена термокамера FLIR P640. Термографска снимка от изследването е показана на фиг. 4.23.



Фиг. 4.23. Термографска снимка на проходен отвор.



Фиг. 4.24. Термографски снимки на метализираните отвори при писта с ширина 0,245 μm



Фиг. 4.25. Термографски снимки на метализираните отвори при писта с ширина 0,470 μm

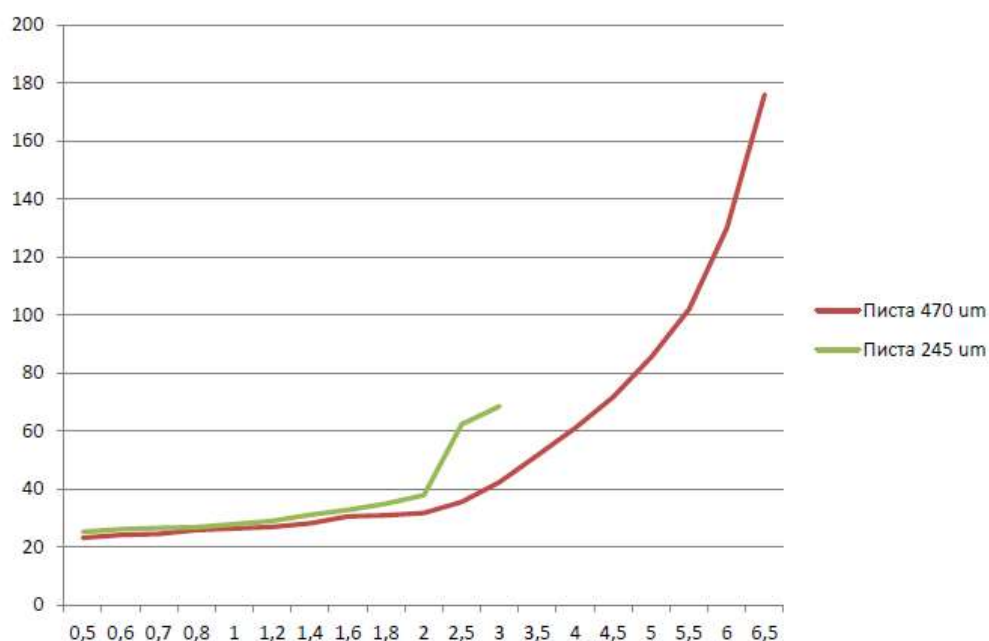
В таблица 4.3 са показани снетите температурни стойности при различен ток през структурите.

Таблица 4.3. Снети температурни стойности при различен ток

<i>Точка на измерване</i>	<i>Температура на писта 1 (470 μm) (°C)</i>	<i>Температура на писта 2 (245 μm) (°C)</i>	<i>Ток (А)</i>
<i>Горна писта</i>	<i>31,3</i>	<i>34,2</i>	<i>2</i>
<i>Долна писта</i>	<i>31</i>	<i>35,9</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>31,8</i>	<i>41,5</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>35,2</i>	<i>42</i>	<i>2,5</i>
<i>Долна писта</i>	<i>34,6</i>	<i>43</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>35,6</i>	<i>50</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>41,1</i>	<i>51,2</i>	<i>3</i>
<i>Долна писта</i>	<i>40</i>	<i>52,6</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>42,5</i>	<i>68,4</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>49,2</i>	<i>68,1</i>	<i>3,5</i>
<i>Долна писта</i>	<i>47,7</i>	<i>68,8</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>51,7</i>	<i>92,3</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>58,1</i>	<i>84,6</i>	<i>4</i>
<i>Долна писта</i>	<i>55,2</i>	<i>86,5</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>61,1</i>	<i>130</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>67,8</i>	<i>-</i>	<i>4,5</i>
<i>Долна писта</i>	<i>64</i>	<i>-</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>71,8</i>	<i>-</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>79,7</i>	<i>-</i>	<i>5</i>
<i>Долна писта</i>	<i>75</i>	<i>-</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>85,5</i>	<i>-</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>94,9</i>	<i>-</i>	<i>5,5</i>
<i>Долна писта</i>	<i>86,9</i>	<i>-</i>	
<i>Метализиран отвор</i>	<i>102</i>	<i>-</i>	
<i>Горна писта</i>	<i>119</i>	<i>-</i>	<i>6</i>
<i>Долна писта</i>	<i>109</i>	<i>-</i>	

Метализиран отвор	130	-	
Горна писта	167	-	6,5
Долна писта	134	-	
Метализиран отвор	176	-	
Горна писта	187	-	7
Долна писта	161	-	
Метализиран отвор	237	-	

Графиката на нагряването на проходните отвори е дадена на фиг. 4.26.



Фигура 4.26. Температурна зависимост на проходни отвори 0,5 mm от тока през проводника.

Заклучение

В тази глава са изследвани технологичните параметри за надежден топлинен режим на медни проводящи шини и метализирани проходни отвори. Разработена и изследвана е методология за ефективна конфигурация на термоотвори за подобряване на топлоотвеждането.

Измерванията показват, че проводящите писти с ширина 245 μm се загряват повече от пистите с ширина 470 μm , което е логично, поради по-малкото сечение на първите. Опитно е установено, че по-тънките писти могат да понесат натоварване до 4 А, без това да предизвика разрушаване на структурата. При пистите с ширина 470 μm се запалва проходния отвор при 7А, но пистите издържат на това натоварване. При проходните отвори се

наблюдава по-висока температура при всички измервания. Това означава, че е необходима по-дебела метализация и дори запълване на отворите с метал или използването на такива с по-голям диаметър.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Изследвани са диелектричните параметри на аноден алуминиев окис за приложението му в МЧМ и е установена методология за измерване диелектричната проникваемост на аноден алуминиев окис. Методологията е приложима за различни тънкослойни диелектрични слоеве.

2. Установена е методология за опроводяване на проходни отвори на многослойни МЧМ структури по метода на директна метализация чрез активиране с меден хипофосфит, която има икономическо значение и реално приложение в индустрията.

3. Изследвани са технологичните параметри за надежден топлинен режим в МЧМ и е създадена нова конструкция на медни проводящи шини и метализация на проходни отвори.

4. Създадена е методология за ефективна конфигурация на термоотвори за подобряване на топлоотвеждането.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Andreev, S., Spasova, N., “Investigation of the Dielectric Permittivity of Anodic Aluminum Oxide Substrates for Multi-chip Modules”, 2017, 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2017

2. Andreev, S., Spasova, N., Chikurtev, D., „Investigations on Heat Extraction in Multilayer PCB Structures“, 2018, 27th International Scientific Conference Electronics

3. Andreev, S., Tzanova, S., Spasova, N., „Three Methods for PCB Via Metallization-Investigation and Discussion“, 2018, 9th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2018

4. Spasova N., „Optimization of Thermal Management of MCM”, “Problems of Engineering Cybernetics and Robotics”, BAN

SUMMARY

The title of the thesis is “Investigation of multichip modules - assembling and heat evacuation ” by Nina Rumenova Spasova.

This thesis is dedicated to processes of optimization and manufacturing of multichip modules. The problems such as multilayer commutation between different technologies in MCM are considered, as well as parasitic capacitances and resistance, the dissipation of more power over a smaller area which lead to bad thermal transfer. New method for via metallization is proposed. The properties of multilayer substrates from different materials for improving heat evacuation are investigated by applying different methods for via realization.

Chapter two is devoted to the study of dielectric parameters of AAO and are determined. The Methodology for measuring the dielectric permittivity and the quality factor of anodic aluminum oxide for a multichip module with the ring resonator method. The method has proved to be very suitable for measuring the dielectric permittivity of thin AAO layers.

Chapter three presents the results of the investigation of via metallization. The purpose of the high-quality metallization of through holes is to provide a good electrical connection between the conductive layers, but also to ensure good heat transfer. Samples designed and manufactured by 3 methods are presented together with the results of the analysis of heat transfer in structures. The three methods insure good quality of via metallization. Our method with the application of copper hypophosphite is so good as the other two methods but it is economically more profitable.

The study objectives of this thesis contributed to the implementation and investigation of the multilayer MCM structure. In chapter 4 is devoted to the experiments with the designed multilayer substrates, realization of different topologies, their combination in one common package and the measurement of the heat evacuation of the structures in depending electrical load. The created methodology for efficient configuration and of thermal vias for optimize of heat transfer is described.