



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ**

---



**ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА  
И ТЕХНОЛОГИИ**

**Катедра „Микроелектроника“**

**маг. инж. Николай Вакрилов Вакрилов**

**МОДЕЛИРАНЕ, СИМУЛАЦИИ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА  
ТОПЛООБМЕНА В СВЕТОДИОДНИ МОДУЛИ**

**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: *“Технология на електронното  
производство”*

**научен ръководител: проф. д-р Анна Влагова Стойнова**

София, 2018 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 25.09.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 29.01.2019 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-10 / 09.10.2018г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Мария Александрова-Пандиева – председател
2. Проф. д-р инж. Анна Стойнова – научен секретар
3. Проф. д-р Иван Евстатиев
4. Проф. д-р инж. Анатолий Александров
5. Проф. д.ф.н. Катя Вутова

Рецензенти:

1. Доц. д-р инж. Мария Александрова-Пандиева
2. Проф. д-р Иван Евстатиев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по Електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1355, а също и в катедра Микроелектроника, кабинет № 1000В.

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

Автор: маг. инж. Николай Вакрилов

Заглавие: „Моделиране, симулации и изследване на топлообмена в светодиодни модули“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Актуалност на проблема**

Тенденцията за непрекъснато увеличаване на мощността и намаляване на размера на опаковката при съвременните светодиоди и особено високата плътност на опаковката при мулти-чипните COB модули превръща разсейването на топлината в предизвикателство за инженерите занимаващи се с топлинно управление. Топлинно управление е един от най-важните аспекти при проектирането на светодиодни системи, защото високата температурата създава много проблеми свързани с оптичните характеристики, намаляване на живота чрез повишена деградация и влияе негативно върху надеждността. Това обуславя използването на иновативни технически средства при проектирането и анализ на решения за топлинно управление, насочени към намаляване на въздействието на топлинните стресове чрез по-ефективни пътища за топлоотвеждане и понижаване на температурата на прехода на светодиодите.

### **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

Целта на дисертационния труд е изследването и прогнозирането на топлообмена в светодиодни модули и системи чрез числено моделиране и симулации на топлофизичните процеси за решаване на проблеми свързани с топлинното управление и повишаване на надеждността.

Основните задачи за постигане на поставена цел са:

1. Да се създадат числени топлинни модели на ниво корпусиран елемент за решаване на проблеми в топлинното проектиране на светодиодни приложения и да се предложи методология за експериментална оценка на възможностите им за прогнозиране на температурата.
2. Да се изследват и анализират средства за оптимизиране на топлинното управление на светодиодни масиви, реализирани на FR4 платки. Да се предложи методика за подобряване на топлинната ефективност на светодиоден масив.
3. Да се разработи практически подход за прогнозиране на топлообмена в платки с метална основа (MCPCBs) при различно конструктивно-технологично изпълнение на платката.
4. Да се създаде методика за проектиране и оптимизиране на радиатор за охлаждане на светодиоден модул работещ в условията на естествена конвекция.
5. Да се разработи методика за оптимално топлинно проектиране на мулти-чипен модул COB LED модул по отношение на различни конструктивно-технологични решения.
6. Да се създаде подход за подобряване на топлинните анализи на светодиоди.

При провеждане на топлинните анализи са използвани, както утвърдени (съвременни софтуерни продукти за CFD симулации), така и иновативни подходи за многофакторно изследване (със средствата на метода за планиране на експеримента), с цел задълбочено проучване на стратегиите за оптимизация на топлинно управление и намаляване на разходите за проектиране.

За проверка на точността на числените модели, които служат за термично параметризиране на светодиодните модули и анализ на приложените технически решения за топлинно управление бяха използвани на два експериментални метода – контактно измерване на температурата чрез термодвойки и безконтактна инфрачервена термография.

### **Научна новост**

Днес, в условията на висока конкуренция и постоянно развиваща се технологична среда производителите на светодиоди имат необходимост от по-кратки срокове за развитие на нови продукти с висока надеждност и ниска цена, за да си осигурят предимство на пазара. Постоянното нарастване на сложността на съвременните осветителни системи не позволява използването на емпирично-базирани корелации и аналитични изчисления в топлинното проектиране, защото са приложими само за стандартни силно опростени канонични случаи.

По тази причина настоящото изследване е фокусирано върху анализа на процесите свързани с топлоотвеждането в светодиодни приложения чрез иновативни средства за топлинно управление приложени в различните етапи на топлинно проектиране чрез комбинираното прилагане на виртуални-симулационни инструменти за анализ и експериментални подходи за валидиране на резултатите. За решаване на проблемите свързани с топлинното управление на светодиоди са създадени топлинни модели чрез специализирания софтуер Flotherm<sup>®</sup>, който използва изчислителна динамика на флуидите (CFD) за прогнозиране на температурата, изясняване на комплексните взаимодействия свързани с преноса на топлина, както и изследването и анализирането на последиците от влиянието на различни параметри (на материали, конструкцията и околната среда).

### **Приложение в практиката**

- Резултатите от извършените задълбочени анализи и моделиране на процесите на топлообмен в светодиодни устройства и системи дават възможност за количествена оценка на различни конструктивно-технологични параметри в процеса на проектиране, тяхното систематизиране и класификация, което позволява създаването на база данни с технически спецификации за лесно прилагане в инженерната практика.
- Симулациите на топлообмена позволяват да се прогнозира топлинното поведение и причините за прегряване на всяко светодиодно устройство, както и оценката на възможните технически решения за подобряване на топлинното управление, което значително може да съкрати времето и разходите за проектиране.
- Чрез симулации могат да се локализируют важни топлинни ефекти в етапа на проектиране, чрез които да се разберат необясними експериментални резултати, което да помогне за намиране на нови подходи за оптимизиране на конструкцията на LED системи.

### **Апробация**

Изследванията в дисертационния труд, както и приложението на основните резултатите са свързани със следните научноизследователски проекти:

- Проект за подпомагане на докторанти – 2014 г. на тема: *„3D топлинни симулации за оптимизиране ефективността на светодиодни модули чрез многофакторно изследване влиянието на различни ефекти“* по дог. № 142ПД0057-03 с ръководител: доц. д-р Анна Андонова.
- Проект – 2017 г. на тема: *„Оптимизиране на активни методи за инфрачервена образна диагностика и неразрушаващ контрол“*, по дог. № DN 17/16 с ръководител проф. д-р Анна Стойнова.

## Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 10 научни статии, от които 1 самостоятелна, а на 6 автора е на първо място. Пет от публикациите са в реферирани списания, като 2 от тях са с Impact Factor: Bulgarian Chemical Communications (IF:0.238), Elektronika ir Elektrotechnika (IF:0.859). 4 от публикации са представени под формата на доклади на научни конференции с международно участие (ISSE, Electronics), индексирани в Scopus и 1 на национална конференция. Забелязани са общо 7 цитирания на 4 от статиите.

## Структура на дисертационния труд

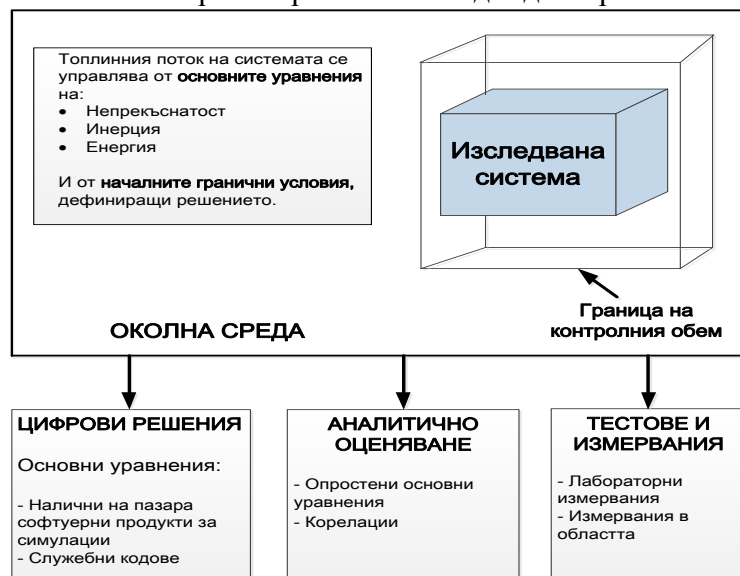
Дисертационният труд е в обем от 184 страници, като включва увод, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък с публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 161 литературни източници, всички на латиница (49 броя са издадени след 2012 г.), от тях 9 са интернет адреси. Работата включва общо 89 фигури и 38 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Глава 1. ПРЕГЛЕД НА СЪВРЕМЕННИТЕ ПОДХОДИ ЗА ТОПЛИННО ПРОЕКТИРАНЕ. ОСНОВНИ ЗАДАЧИ В ТОПЛИННОТО ПРОЕКТИРАНЕ НА СВЕТОДИОДНИ МОДУЛИ

Топлинното проектиране(дизайн) на електронна апаратура е един от най-важните аспекти от проектирането на даден продукт, който оказва значително влияние върху надеждността и експлоатационните характеристики. Топлинният дизайн е тясно свързан с конструктивния дизайн и с надеждността в условията на околната среда. Топлинното проектиране на електронна апаратура се базира на разбирането на процесите за пренос на топлина и изясняване на комплексните взаимодействия, свързани с охлаждането между отделните компоненти и възли, които са част от конструкцията.

Обобщената блок диаграма на фиг. 1.1 показва процедурата за решаване на задачата, свързана с топлинното проектиране на светодиодни приложения.



**Фиг. 1.1.** Обобщена блок диаграма, която показва процедурата за решаване на проблемите, свързани с топлинното проектиране на светодиодни приложения

Процедурата по решаване на проблемите свързани с топлинното проектиране на светодиодни приложения преминава през три етапа на анализ: аналитични изчисления, цифров анализ (чрез CFD или друг цифров-симулационен код) и емпирични измервания.

В таблица 1.1 е дадено сравнение на нивото на доверие на различните методи за решаване на задачите свързани с топлообмена и охлаждането на светодиодни модули и системи.

**Таблица 1.1. Ниво на доверие при различните видове топлинни анализи**

| Вид анализ      | Ниво на доверие | Особености                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Аналитичен      | 80%             | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Основава се на неизвестни (пълни данни за топлинните x-ки на компонентите) и не достатъчно известни корелации (температурна зависимост на много физични с-ва);</li> <li>– Правят се допускания за анализа;</li> <li>– Анализът позволява бързото получаване на резултати;</li> <li>– Анализът е приложим на ниво компонент, платка и на ниво система;</li> <li>– Получените резултати са със средна точност.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                      |
| Цифров          | 80% ÷ 85%       | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Неизвестни и предположения, за да се направи анализа;</li> <li>– Недостатъци в софтуера;</li> <li>– Относително лесна реализация;</li> <li>– Използват се за оценка на аналитичните резултати;</li> <li>– За получаването на точен резултат е необходимо много входни данни по отношение на материалите и размерите;</li> <li>– Изискват специализиран софтуер и бърз компютър.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Експериментален | 90%             | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Правилен избор на измервателни точки и характеристики свързани с топлинния дизайн (например, температурно разпределение, мощност, въздушен поток, излъчване от повърхностите);</li> <li>– Източници на измервателни грешки (например, неправилно поставяне на термодвойките, различни работни условия);</li> <li>– Грешки в резултатите вследствие на некоректно калибриране и/или избор на неподходяща измервателната апаратура за целите на заданието;</li> <li>– Грешки при отчитането на консумираната мощност;</li> <li>– Изисква специализирана измервателна апаратура и познания;</li> <li>– Получените резултати са с най-висока точност.</li> </ul> |

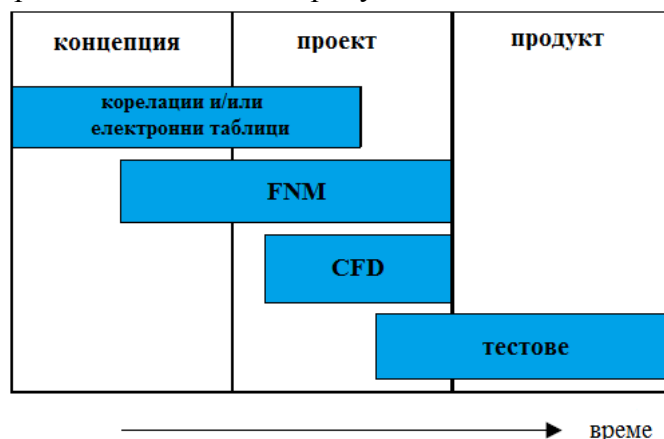
Компактни топлинни модели (Compact Thermal Models) или КТМ, позволяват достатъчно точно предсказване на топлинното поведение на компонент, но с много по-малко изчислителни ресурси за желаните нива на абстракция.

КТМ премахват необходимостта от детайлно моделиране на геометрията и материалните характеристики на компонента. КТМ се използват за симулиране и предсказване на температурата на пакета на електронен компонент, но само на някои критични точки – прехода, корпуса или контактите. Голяма част от подходите за създаване на КТМ се базират на мрежи от топлинни съпротивления, обикновено състоящи се от няколко възела, които могат да бъдат решени бързо и ефективно с малко изчислителни ресурси. В момента компактните модели, които намират най-

широко приложение в електронната индустрия са двурезистивния (2R) и DELPHI модела.

През последните две десетилетия практиката показва, че в процес на топлинно проектиране, ползите от емпирично-базираните корелации са силно ограничени и има нужда от много аналитични изчисления, за да се преодолеят тези ограничения и за по-пълно интегриране на решенията и оценка на анализите в процеса на топлинно проектиране се прилагат софтуерни решения, които се базират на различни числени техники, като например CFD анализа за решаване на проблемите с топлообмена.

На фигура 1.9 е показана схема на приложението на CFD анализите използвани в топлинния дизайн при създаване на нов продукт.



**Фиг. 1.9.** Употреба на CFD техниките в процеса на разработка на електронно изделие

При CFD анализа трябва да се вземат под внимание множество фактори, които оказват влияние върху точността на прогнозиране и ефективността като: избрания метод за дискретизация, недобре изучени физични свойства на материалите в зависимост от температурата, геометричното представяне на реални обекти в процеса на моделиране, неточности в определянето на граничните условия, изчислителните ограничения, турбулентното моделиране и др. За преодоляване на ограниченията и повишаване на точността в топлинните анализи е необходимо умелото съчетание на експериментални с цифрови данни, като измерванията са важни за проверка на критичните граничните условия, които са необходими за калибриране на цифровите модели и повишаване на прогнозиращите им способности.

## **Глава 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОЦЕНКА НА ТОПЛИННИ МОДЕЛИ НА НИВО КОРПУСИРАН ЕЛЕМЕНТ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА ПРЕХОДА НА СВЕТОДИОДНИ МОДУЛИ**

### **2.1 Състояние на проблема**

Комплексният характер на съвременните осветителни светодиодни продукти, съставени от множество светодиодни модули с висока плътност на мощността, са също голямо предизвикателство, защото тяхното топлинно поведение е трудно за описание. Следователно възниква необходимостта от решения за бързо и точно определяне на топлинните параметри на дизайна на създадените проекти. Създаването на детайлните топлинни модели отнема много време и изчислителни ресурси, ето защо се използват компактни топлинни модели (КТМ).

На практика се оказва, че топлинното параметризиране на светодиодни компактни модели не е лесна задача и все още съществуват редица предизвикателства

по отношение на оценката на прогнозиращите им способности за решаване на реалистични проблеми в процеса на проектиране.

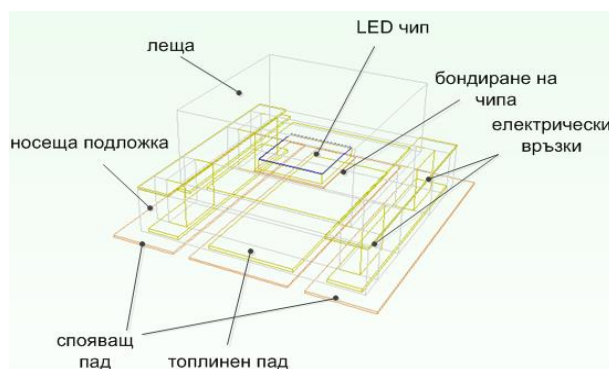
## 2.2 Постановка на изследване

### 2.2.1 Детайлно моделиране

Първата стъпка в изследването е създаване на детайлен топлинен модел (ДТМ) на светодиода Cree XP-E, базиран на керамичен корпус. ДТМ ще се използва за прогнозиране на температурата на светодиода и извличане на топлинните параметри в определени части на конструкцията, а също и за дефиниране на граничните условия.

Геометрията на корпуса е създадена с помощта на инструментите на софтуера за симулации Flotherm<sup>®</sup>. При проектирането трябва да се обърне особено внимание на представянето на физическата геометрия на модела за правилното взаимодействие между създадения модел и въздушен поток в областта на решение.

На фигура 2.2 е показан ДТМ на светодиод Cree XP-E в средата на софтуера Flotherm.



Фиг. 2.2. Модел на керамичния корпус на Cree XP-E във Flotherm

### 2.2.2 Методика за прилагане на компактно моделиране

При създаването на компактни топлинни модели (КТМ) се използва статистически метод за извличане на топлинни параметри, който е подробно описан от Aranyosi, като са въведени и техники за намаляване на грешките и повишаване на точността на моделите.

При този подход от топлинната реакция на детайлния модел се генерират данни за получаване на компактни топлинни модели, като се използват определени гранични условия. От ДТМ са генерирани два типа компактни модели, представящи преноса на топлина в конструкцията на корпуса на светодиода с различно ниво на опростяване.

#### а) Двурезистивен (2R) компактен модел

Двурезистивният (2R) модел представя геометрията на корпуса на светодиода много общо и включва само две топлинни съпротивления.

#### б) DELPHI тип компактен модел с топлинно резистивна мрежа тип „звезда“

DELPHI моделът трябва да представя точно контура на корпуса, неговата височина и ширина, за да може моделът на корпуса да пресъздаде същия ефект върху заобикалящия го въздушен поток както при детайлния модел.

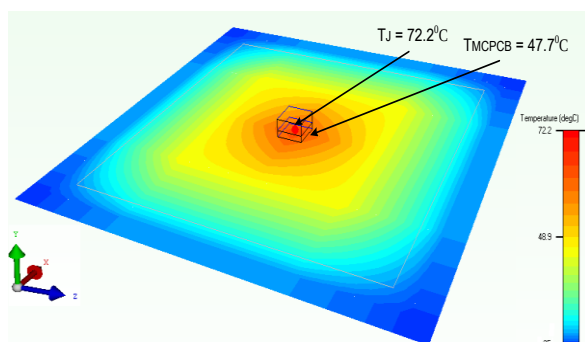
### 2.2.3 Резултати от топлинни симулации

Фигурите 2.7 и 2.8 показват топлинното разпределение в равнината на платката по осите x и z получени в симулациите с двурезистивния модел и с компактният модел тип „звезда“.

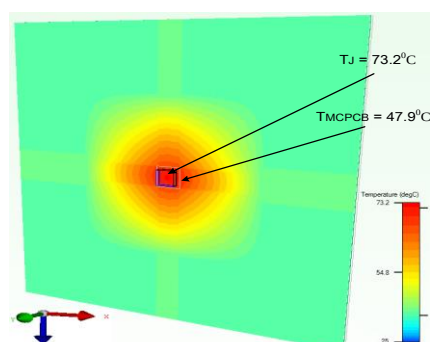
В таблица 2.3 са показани резултатите за изчисленото топлинно съпротивление  $R_{j-sp}$ , описващо преноса на топлина от прехода на светодиода до мястото на спояване за



трите числени топлинни модели от данни, получени в симулациите, сравнени с типична стойност на светодиода Cree XP-E, взета от техническата документация.



**Фиг. 2.7.** Топлинно разпределение на повърхността на платката в симулацията с 2R модел



**Фиг. 2.8.** Топлинното разпределение в платката в симулацията на модела със съпротивителна мрежа тип „звезда“

**Табл. 2.3.** Топлинно съпротивление на пакета за трите топлинни модели

| Топлинно съпротивление | 2R модел  | Модел тип „звезда“ | Детайлен модел | Типична стойност* |
|------------------------|-----------|--------------------|----------------|-------------------|
| $R_{j-sp}$             | 9.04 °C/W | 9.28 °C/W          | 9.64 °C/W      | 10.00 °C/W        |

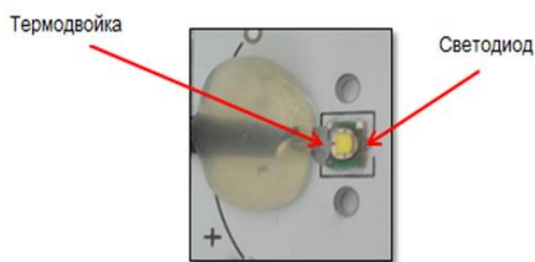
Резултатите за  $R_{j-sp}$  доказват коректността на числовото моделиране и неговата приложимост в топлинното проектиране на светодиодни осветителни приложения.

## 2.2.4 Постановка за провеждане на експериментални измервания

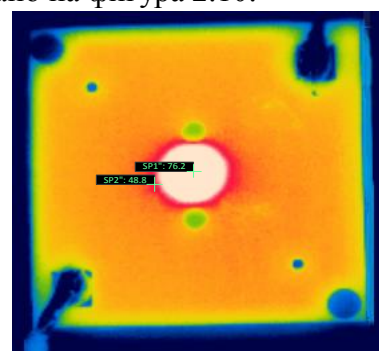
### 2.4.4.1 Измерване на температурата с термодвойка

За измерване на температурата се използва К-тип термодвойка с малка контактна площ, за да се сведе до минимум локалното охлаждане, което води до грешки в измерването. Данните постъпващи от термодвойката се обработват от апаратура за събиране на данни на фирмата UNI-T модел UT803, която е предварително калибрирана.

Мястото на термодвойката в измерването е показано на фигура 2.10.



**Фиг. 2.10.** Място на термодвойката по време на измерване на температурата на светодиода Cree XP-E



**Фиг. 2.13.** Реално взаимодействие компонент-платка

Температурата в точката на спояване се стабилизира при стойност от 63.6°C и след заместване на всички параметри в уравнение (2.5) получаваме, че температурата на прехода  $T_j = 63.6^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C/W} \times 1.12\text{W} = 74.8^{\circ}\text{C}$ . Тази стойност е доста близка до стойността на  $T_j = 74.4^{\circ}\text{C}$  получената в симулацията с детайлния компонентен модел, което затвърждава доверието в детайлната моделираща методология.

#### 2.2.4.2 Методика за безконтактно измерване на температурата чрез инфрачервена термография

Тези измервания имат за цел да потвърдят установените закономерности, получени чрез цифрови техники за провеждане на експерименти, и да се докажат техните качества като технически средства за прогнозиране на топлинните параметри на мощни светодиодни модули.

Безконтактно измерване на температурата се извършва с инфрачервена камера ThermalCam SC640 с резолюция 640 x 480 пиксела. Инфрачервеното заснемане е направено при температура на околната среда от 24.7°C, влажност на въздуха от 40.4% и измерена излъчвателна способност от повърхността на платката от 0.96.

Допълнително обработено инфрачервено изображение (показано на фиг. 2.13) на светодиодната конструкция със софтуера Flir Tools дава как изглежда топлинното разпределение на физическия прототип и показва, че числовото моделиране като цяло правилно отразява топлинното разпределение от светодиода по цялото протежение на платката.

#### 2.2.5 Анализ и оценка на числовото моделиране спрямо експериментални данни

##### а) Оценка на точността на топлинно-резистивната мрежа на компактните модели

Точността на мрежата на компактните компонентни модели при прилагането на едни и същи гранични условия са дадени в таблица 2.4.

**Табл. 2.4. Сравнение на температурите в различните числови модели**

| Параметри   | Детайлен модел | Модел тип „звезда“ | 2R модел |
|-------------|----------------|--------------------|----------|
| $T_j$       | 74.4°C         | 73.2°C             | 72.2°C   |
| Грешка      | -              | 2.42%              | 4.45%    |
| $T_{sp}$    | 66.3°C         | 65.4°C             | 64.6°C   |
| Грешка      | -              | 2.17%              | 4.11%    |
| $T_{mcpcb}$ | 48°C           | 47.9°C             | 47.7°C   |
| Грешка      | -              | 0.43%              | 1.3%     |

##### б) Оценка на точността на прогнозиране на числовите топлинни модели по отношение на експерименталните измервания

В таблица 2.5 са обобщени всички резултати за измерената температурата на прехода от симулациите извършени с детайлния модел, компактните модели и реалното експериментално измерване на температурата – с термодвойка и чрез инфрачервена термография.

**Табл. 2.5. Сравнение на измерените и прогнозираните температури на прехода**

| Параметър           | Детайлен модел | 2R модел | Модел тип звезда | ИЧТ измерване | Измерване с термодвойка |
|---------------------|----------------|----------|------------------|---------------|-------------------------|
| $T_j$               | 74.4°C         | 72.2°C   | 73.2°C           | 76.2°C        | 74.8°C                  |
| Грешка <sub>1</sub> | 3.49%          | 7.76%    | 5.82%            | -             | -                       |
| Грешка <sub>2</sub> | 0.80%          | 5.22%    | 3.21%            | -             | -                       |

Очаквано, относителната грешка е най-ниска при детайлния топлинен модел (3.49%), характеризиращ се с висока точност на прогнозите, а най-голяма е грешката при 2R модела (7.76%). Топлинният модел тип „звезда“ показва много добра производителност (с грешка 5.82%) в прогнозирането на температурата. Това се дължи на по-големия брой изчислителни възли, които спомагат за по-доброто описание на свързаните с топлината ефекти в пакета на светодиода.

Изчислена е относителната грешка (отбелязана като грешка<sub>1</sub> в таблицата) между измерената с инфрачервена термография и предсказаната температура в симулациите с различните числени модели при температура на околната среда  $T_{amb} = 24.7^{\circ}\text{C}$  по време на измерването като се използва формулата:

$$error1_{T_j} = \left[ \frac{T_{IR} - T_{SIM}}{T_{IR} - T_{amb}} \right] \times 100 = [\%]. \quad (2.6)$$

Относителната грешка (отбелязана като грешка<sub>2</sub> в таблицата) между изчислената с помощта на измервания с термодвойка и предсказаната температурата на прехода в симулации с различните числови топлинни модели е изчислена с формулата:

$$error2_{T_j} = \left[ \frac{T_{TC} - T_{SIM}}{T_{TC} - T_{amb}} \right] \times 100 = [\%]. \quad (2.7)$$

## **2.3 Алтернативен подход за подобряване на топлинните анализи на светодиоди**

В настоящото изследване е използван друг подход за оценка на количеството топлина, генерирана от светодиоди. При него чрез топлинни анализи, проведени при различни работни режими, топлинната мощност се оценява на базата на коефициента на разсейване на топлина. По този начин може да се оцени ефективността на енергийно-топлинното преобразуване и да се установи оптималният работен режим на всеки светодиод.

### **2.3.1 Методика за анализ и оценка**

Основните стъпки на предложения подход са:

- Провеждане на CFD симулации при различни стойности на коефициента на топлинно разсейване;
- Измерване на температурата чрез инфрачервена (ИЧ) камера;
- В зависимост от конструктивните особености на светодиодните модули са избрани координатите на контролните точки (съответно от 1 до 3), съответно за горната и долната страна на образца. Тези точки са избрани за сравнение на температурите, съответно при физически измервания и такива, получени при топлинни симулации. Изчислена е средна стойност, измерена за минимум три повторения на измерването;
- Определено е какво е съответствието между стойността на коефициента на топлинно разсейване, с която е извършена симулацията, и тази на търсената стойност.

#### **а) План за провеждане на физическото измерване**

Избраният в изследването светодиоден източник е базиран на Luxeon REBEL White с мощност 1W. Светодиодът е монтиран на специализирана тънка керамична конструкция и има керамична подложка с размери 4.61mm x 3.17mm x 0.63mm.

#### ***Инфрачервена образна диагностика***

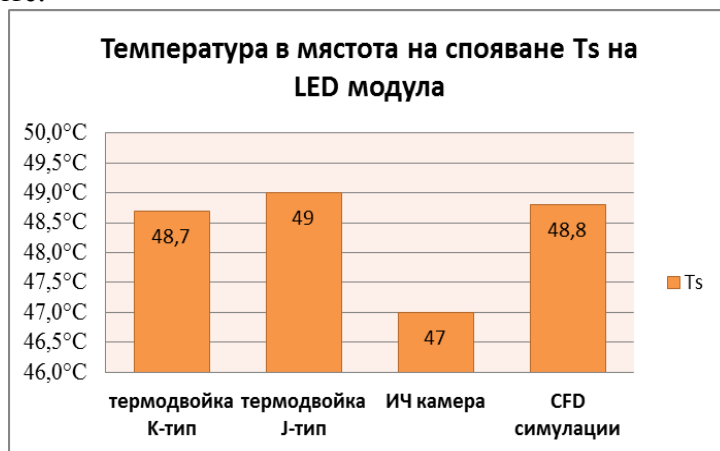
Температурата на избрания за изследването светодиод е измерена безконтактно с инфрачервена камера ThermoCAM SC640 за оценка на топлинна ефективност. Камерата за заснемане на топлинната картина има топлинна чувствителност, по-малка от  $0.05^{\circ}\text{C}$ . Инфрачервената резолюция на камерата е 640 x 480 пиксела. Изображенията на светодиода са заснети с 30 кадъра за секунда(fps), когато диодът е в стабилно състояние след 10 минути постоянна работа.

По време на измерването светодиодният модул е поставен в термостатична контролирана кутия за максимално компенсиране на ефектите от околната среда върху инфрачервеното изображение.

#### ***Измерване на температурата с термодвойки***

По време на контактното физическо измерване на температурата се използва термодвойка с малък диаметър (използват се K и J-тип термодвойки с клас 2 на точност), за да се сведе до минимум локалното охлаждане в областта на контакт.

На фигура 2.15 са показани резултати за температурата  $T_s$  в мястото на спояване на един от изследваните светодиодни модули след измерването с термодвойки за проверка на резултатите получени чрез безконтактно измерване с инфрачервена камера и CFD симулациите.



**Фиг. 2.15.** Сравнение на резултатите за температурата  $T_s$  в проведените физически измервания и CFD симулации при еднакви работни режими и температура на околната среда  $T_a = 22^\circ\text{C}$

#### б) Топлинно CFD моделиране

За оценка на топлинната ефективност на светодиода Luxeon REBEL White е създаден компактен топлинен модел в средата на Flotherm.

Направени са CFD симулации, за да се определи по-точно каква част от постъпващата входна мощност се разсейва под формата на топлина. Проведени са няколко симулации с различни стойности на коефициентът на топлинно разсейване (от 0.65 до 1.0).

Коефициентът на топлинно разсейване,  $K_h$  определя каква част от общото количество постъпваща към светодиода електрическа енергия се разсейва като топлина. Тази зависимост може да се изрази по следния начин:

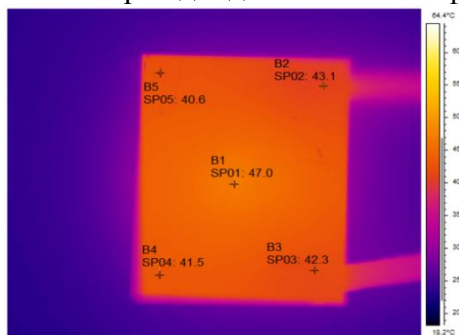
$$K_h = \frac{P_h}{P_e} = \frac{(P_e - P_o)}{P_e} = 1 - \eta_{WPE}. \quad (2.8)$$

Тъй като  $K_h$  може да бъде получено на базата на термографска процедура, излъчвателната ефективност  $\eta_{WPE}$  може да бъде изчислена с намирането на  $K_h$  чрез уравнение (2.8).

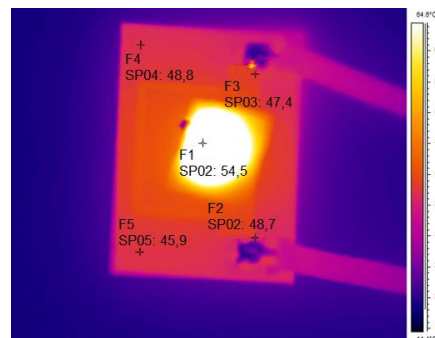
#### 2.3.2 Резултати от топлинните анализи

##### а) Резултати от измерванията с инфрачервената камера

Изображение от инфрачервената камера на подложения на изследване светодиоден модул измерващо температурата в долната страна на платката, върху която е монтиран диода е показан на фигура 2.16.



**Фиг. 2.16.** ИЧ изображение на светодиодния модул (поглед отдолу)



**Фиг. 2.17.** ИЧ изображение на светодиодния модул (поглед отгоре)

Върху термичното изображение са избрани пет точки (маркирани с означения от B1 до B5) за верификация на резултатите от топлинната симулация и са показани техните температурни нива.

#### б) Резултати от топлинни симулации

В таблица 2.7 са дадени обобщени резултати на предсказаните температури получени при симулациите на светодиодната конструкция за различни стойности на  $K_h$  в контролните точки при топлинните анализи.

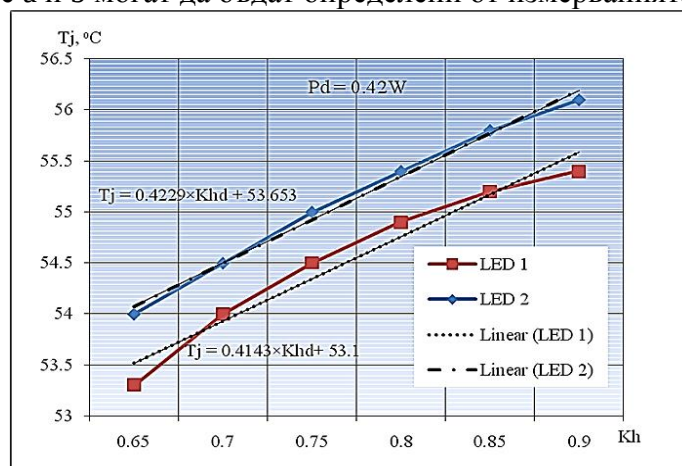
**Таблица 2.7.** Резултати от симулациите на модула в стабилно състояние

| точка<br>$K_h$ | B1 (°C) | B2 (°C) | B3 (°C) | F1 (°C) | F2 (°C) | F3 (°C) |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.65           | 44.9    | 42.7    | 42.6    | 46.9    | 44.3    | 42.9    |
| 0.70           | 45.7    | 43.7    | 43.5    | 48.6    | 45.8    | 44.4    |
| 0.75           | 46.5    | 44.6    | 44.4    | 50.3    | 47.3    | 45.7    |
| 0.80           | 47.5    | 45.5    | 45.3    | 52.0    | 48.7    | 47.1    |
| 0.85           | 48.1    | 46.4    | 46.2    | 53.6    | 50.2    | 48.5    |
| 0.90           | 48.8    | 47.3    | 47.1    | 55.3    | 51.7    | 49.8    |
| 0.95           | 49.4    | 48.1    | 47.8    | 57.4    | 52.8    | 50.8    |
| 1.00           | 50      | 48.8    | 48.5    | 58.5    | 53.0    | 51.6    |

В практическите работни условия на експлоатация, връзката между коефициента на топлинно разсейване  $K_h$  и температурата на прехода  $T_j$  на светодиод при постоянно  $P_{d \text{ const}}$  съществува почти линейна зависимост. Ето защо, може лесно да изчислим  $K_h$  като линейна зависимост на коефициентите  $a$  и  $b$ , намиращи се в дясната страна на формула (2.13), които могат да се изчислят за постоянно  $P_{d \text{ const}}$ :

$$K_h(T_j; P_d) = a \cdot T_j + b. \quad (2.13)$$

Константите  $a$  и  $b$  могат да бъдат определени от измерванията на фигура 2.22.



**Фиг. 2.22.** Графики за  $T_j$  и  $K_h$  след CFD симулации с линейните приближения

## 2.4 Заключение и резюме на получените данни

Извършените експериментални измервания доказват превъзходството на детайлната моделираща техника за точното прогнозиране на температурата на прехода при сравнение с двата типа компактни компонентни модели – съответно двурезистивен и DELPHI модел тип “звезда”.

Представеният алтернативен подход за оценка на топлинната ефективност на светодиодни модули при зададени работни условия доказва, че има пряка връзка между оптичната мощност, коефициента на разсейване на топлина  $K_h$  и температурата на прехода  $T_j$  на светодиодни модули. Анализите в изследването показват следните установени зависимости:

- Когато  $K_h$  започне да нараства, с него започва да се увеличава и температурата на прехода  $T_j$  при постоянна мощност  $P_{d\text{ const}}$  на светодиода.
- Оптималните работни условия за подложения на тест светодиоден модул се намират в диапазона от 65% (0.273W) до 90% (0.378W).
- Корпусът на светодиода е оптимизиран за непрекъсната и надеждна работа на модула до 90% от номиналната си мощност дори при значително по-високи температури на околната среда.

Накрая можем да заключим, че предложеният подход може успешно да използва коефициента на разсейване на топлина  $K_h$  в зависимост от температурата на прехода  $T_j$  като допълнителен инструмент за оценка на топлинната ефективност в процеса на проектиране на светодиодни приложения.

### Глава 3. ОПТИМИЗАЦИЯ НА FR4 БАЗИРАНА ПЛАТКА ЧРЕЗ ТОПЛИННИ ОТВОРИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ТОПЛИННА ЕФЕКТИВНОСТ НА СВЕТОДИОДЕН МАСИВ

#### 3.1 Актуално състояние на проблема

Мощните светодиоди намират все по-широко разпространение, покривайки изискванията на все повече осветителни приложения. Всяка година производството им се увеличава и наред с утвърдени производители на пазара се появяват много нови. Голямата конкуренция на пазара води до големи инвестиции за подобряване на характеристиките на новите продукти и въпреки използването на нови материали и внедряването на нови технологии все още остават актуални проблемите, свързани с топлинното управление и подобряване на топлинната ефективност.

#### 3.2 Цифров експеримент за прогнозиране на топлообмена в светодиодни модули

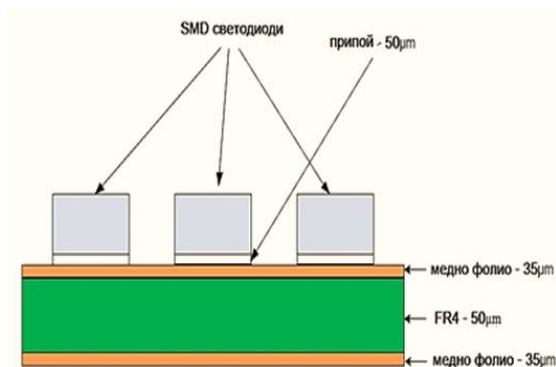
За решаване на проблемите с топлинно управление на ниво платка е използван цифров експеримент. При него е създаден виртуален 3D прототип на базата на специално избран светодиоден масив с достатъчно данни относно геометричните размери, електрическите и материални характеристики на конструкцията му. Те се използват като входни данни при цифровото моделиране.

##### а) Цифрово моделиране на референтния светодиоден масив

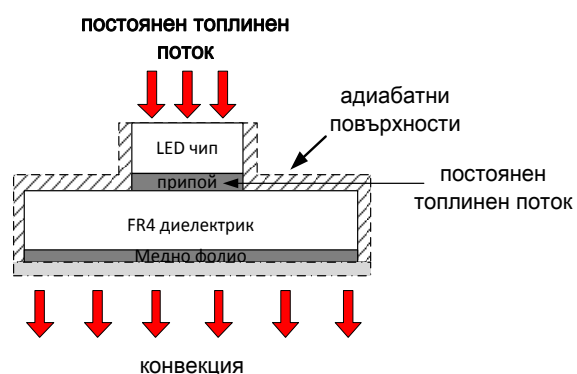
1. Моделирането на светодиодния масив започва с описание на геометричните и материални характеристики на компонентите част от конструкцията му

На фиг. 3.2 е показан напречен разрез на цялата конструкция на светодиодния масив.

За представяне на всеки от 12-те светодиода в масива е създаден техен механичен CAD модел с ниво на опростяване на конструкцията 50%.



Фиг. 3.2. Напречен разрез на конструкцията на светодиодния масив



Фиг. 3.4. Гранични условия използвани в моделирането



## 2. Аналитичен модел за изследване на топлинния режим на базовия светодиоден масив. Еквивалентен топлинен модел на светодиоден масив

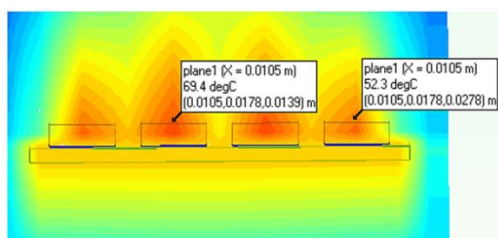
Всеки светодиод в масива се моделира като самостоятелен топлинен източник и разсейва топлинна мощност,  $P_{led} = 0,13W$ . Топлинното поле, което се създава в прехода на чипове се разсейва основно през печатната платка чрез проводимост (>90% от общия пренос на топлина).

Граничните условия използвани при моделиране на всеки светодиод в масива са показани на фигура 3.4.

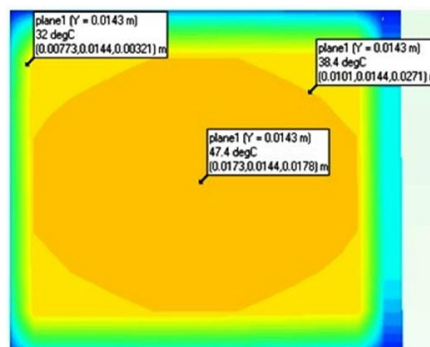
Топлинният път на масива от светодиоди в този случай може да се представи чрез проста резистивна мрежа по подобие на закона на Ом за провеждането на ток в електрическите вериги. Топлинното съпротивление в резистивната мрежа е аналог на съпротивлението, топлинния поток на електрическия ток, а разликата в температурите в рамките на конструкцията съответстват на електрическото напрежение.

### б) Симулации и анализ на топлинния режим на светодиодния масив

Резултатите от топлинни симулации направени на масив в средата на Flotherm<sup>®</sup> с инструмента Visual Editor са показани на фигура 3.6 и 3.7.



**Фиг. 3.6.** Разпределение на топлината в конструкцията на светодиодния масив



**Фиг. 3.7.** Разпределение на топлината в долната страна на платката

С оглед на резултатите от симулациите на масива и анализа на данните от техническата документация на светодиодите показват, че масива работи при доста висока температура и се нуждае от оптимизация на конструкцията на платката за по-добро топлинно управление.

### 3.3 Оптимизация на топлообмена на модела на светодиоден масив чрез топлинни отвори във FR4 базирана платката

Един от начините за подобряване на топлообмена в стандартните FR4 печатни платки е чрез пробиването на топлинни отвори (обикновено с диаметър от 0.5mm) в слоевете на платката. По този начин топлината се провежда през платката чрез подобряване на вертикалното топлинно съпротивление на FR4 диелектричния материал целенасочено и локализирано в проблемни области с високо топлинно натоварване.

Изследванията включват различни конфигурации на топлинни отвори в платка. Анализира се въздействието върху топлообмена на платка с 4, 5 и 9 броя топлинни отвори моделирани под всеки светодиод в масива. Разстоянието между два съседни отвора в топлинния пад на платката е 2.5mm при варианта с 4 топлинни отвора и съответно 1.25mm при вариантите с 5 и 9 топлинни отвора.

### в) Симулации и оценка на топлинната ефективност на различните конфигурации топлинни отвори в платката

В таблица 3.4 са обобщени резултатите от всички проведени симулации за 4, 5 и 9 топлинни отвора.  $T_{led}$  е температурата на светодиода в близост до центъра на конструкцията на масива, а  $T_{pcb}$  - температурата в центъра на долната повърхност на

платката – там, където топлинният стрес е голям и възможността за възникване на отказ е висока.

**Таблица 3.4.** Температури, получени в симулациите с различните конфигурации топлинни отвори

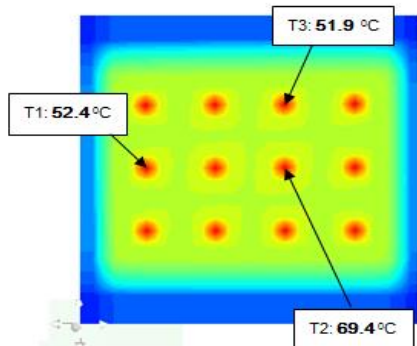
| Конфигурация на платката | Топлинни отвори без запълващ материал |                       | Топлинни отвори, запълнени с мед |                       | Топлинни отвори, запълнени с SnAgCu |                       |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|                          | $T_{led} (^{\circ}C)$                 | $T_{pcb} (^{\circ}C)$ | $T_{led} (^{\circ}C)$            | $T_{pcb} (^{\circ}C)$ | $T_{led} (^{\circ}C)$               | $T_{pcb} (^{\circ}C)$ |
| 4 отвора                 | 59,5                                  | 41,7                  | 57,5                             | 40                    | 58,6                                | 40,9                  |
| 5 отвора                 | 57,5                                  | 41,2                  | 55,6                             | 39,7                  | 56,3                                | 40,2                  |
| 9 отвора                 | 56,3                                  | 40,9                  | 52,7                             | 38,3                  | 55,4                                | 39,2                  |

### 3.4 Верификация на получените резултатите

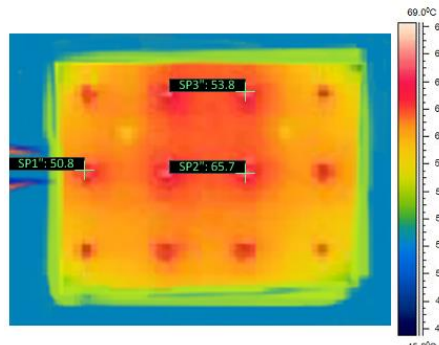
За оценка на точността от цифровото моделиране и достоверността на резултати получени от симулациите са направени инфрачервени термографски изображения на работния режим на масив от 12 светодиода, използван за създаване на цифровия модел.

На фиг. 3.17 е показана симулация на масива от светодиоди погледнат отгоре, за да се види топлинното разпределение в конструкцията.

На фиг. 3.18 е показана една от инфрачервените снимки на физическия масив от 12 светодиода разположени в матрица 4 x 3. Върху снимката са поставени маркери с номерация от SP1 до SP3 показващи температурата на диодите в контролните точки. Снимките са направени с инфрачервена камера ThermoCAM<sup>®</sup> SC640 на фирмата Flir и са обработени със специализиран софтуер за обработка на термограми Researcher 2.9. Изображенията са заснети при температура на околната среда  $T_a = 25,8^{\circ}C$  и влажност на въздуха от 55,6%.



**Фиг. 3.17.** Резултати от симулациите на конструкцията на масива при  $T_a = 25^{\circ}C$  (поглед отгоре)



**Фиг. 3.18.** Инфрачервена снимка на масива (заснет отгоре)

В таблица 3.5 са показани сравнителни резултати на температурите в контролните точки получени при симулации (фиг. 3.17) и тези получени чрез инфрачервената термография (фиг. 3.18) при същите гранични условия.

**Таблица 3.5.** Сравнение на резултатите и получената относителна грешка

| Контролни точки | Температура при симулации | Контролни точки | Температура от ИЧТ  | Грешка |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------|--------|
| T1              | 52,4 <sup>o</sup> C       | SP1             | 50,8 <sup>o</sup> C | 3,14%  |
| T2              | 69,4 <sup>o</sup> C       | SP2             | 66,7 <sup>o</sup> C | 4%     |
| T3              | 51,9 <sup>o</sup> C       | SP3             | 53,8 <sup>o</sup> C | 3,53%  |



Относителната грешка между симулираната и температурата измерена с инфрачервената термография в съответните контролни точки е изчислена по формула:

$$\delta = \left[ \frac{T_{\text{сим}} - T_{\text{изм}}}{T_{\text{изм}}} \right] \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

където:

$\delta$  – е относителната грешка;

$T_{\text{сим}}$  – е температурата получена при симулации;

$T_{\text{изм}}$  – е измерената температура при термографския анализ.

### 3.5 Заключение и резюме на получените резултати

В заключение, резултати показват, че предложената методика за подобряване на топлообмена на светодиодния масив доведе до значително намаляване на температурата на светодиодите. Отчетливо намаляване на температурата на светодиодите се наблюдава във варианта с 9 топлинни отвора запълнени с мед.

## Глава 4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА КОНСТРУКТИВНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ПЛАТКА С МЕТАЛНА ОСНОВА (МСРСВ) ВЪРХУ РАЗСЕЙВАНЕТО НА ТОПЛИННИЯ ПОТОК НА МОЩНА LED СИСТЕМА

### 4.1 Въведение в проблема

Печатната платка играе много важна роля при топлинното проектиране на мощни светодиодни приложения.

Платките, базирани на МСРСВ технологията, основно се използват при мощни светодиоди, тъй като осигуряват значително по-високо топлоотвеждане (8-9 пъти) от различните FR4 базирани платки.

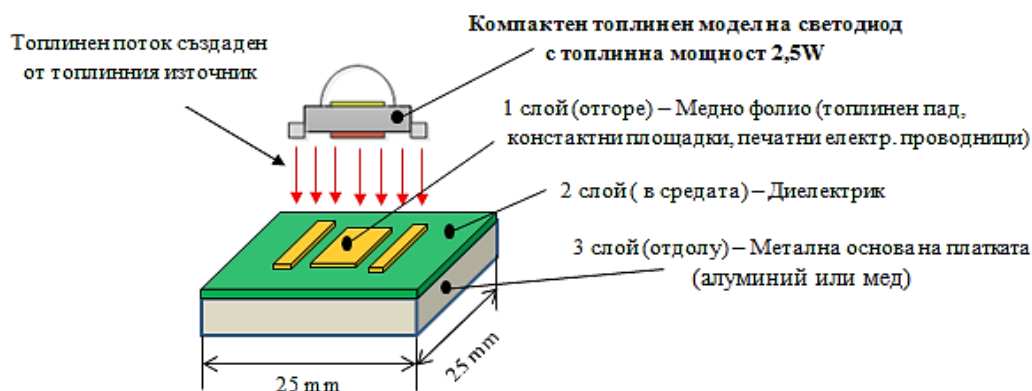
Топлинното съпротивление на корпуса на светодиод е постоянна величина, затова платката е единственият начин за по-добро отвеждане на топлината и намиране на най-кратките пътища до околната среда. Ето защо от конструктивните параметри на платката до голяма степен зависи температурата на светодиода.

### 4.2 Определяне на топлинни характеристики на МСРСВ

В настоящото изследване се използва по-точен, подобрен детайлен моделиращ подход, при който всеки слой на платката се представя като отделен триизмерен елемент със съответната топлопроводимост.

### 4.3 Компютърно моделиране и методика за изследване на топлинното поведение на различни МСРСВ

За решаване на проблемите с конструктивно-технологични параметри при топлинното проектиране на платки с метална основа, предназначени за мощни светодиоди, е създаден виртуален симулационен модел. Структурата на модела е показана на фигура 4.3.



Фиг. 4.3. Цифров тестов модел на топлинния източник и платката

В таблица 4.3 са дадени стойностите на конструктивните параметри на МСРСВ платките при различните конфигурации, използвани за създаването на техните компютърни модели.

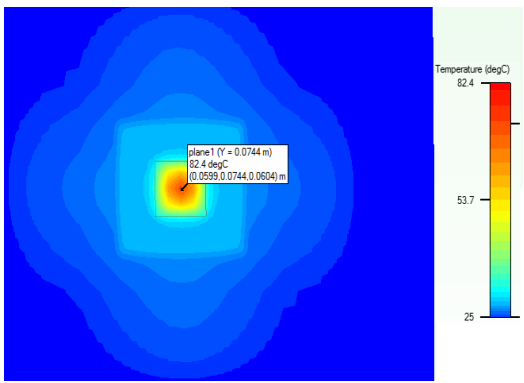
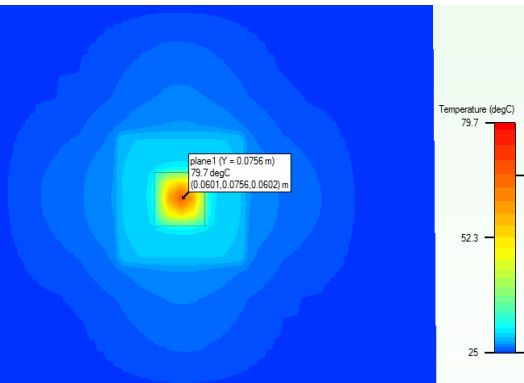
**Таблица 4.3. Различните конфигурации параметри на МСРСВ платките**

| Материал на металната основа |          | Диелектрик                            | Медно фолио                                      |
|------------------------------|----------|---------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Вид                          | Дебелина | Дебелина                              | Дебелина                                         |
| Алиминий                     | 1.5 mm   | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |
|                              | 2 mm     | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |
|                              | 3 mm     | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |
| Мед                          | 1.5 mm   | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |
|                              | 2 mm     | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |
|                              | 3 mm     | 75 $\mu$ m , 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m | 50 $\mu$ m, 75 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 150 $\mu$ m |

#### 4.4 Симулации на топлинното поведение на светодиодната система при различните конфигурации на базовите параметри на МСРСВ

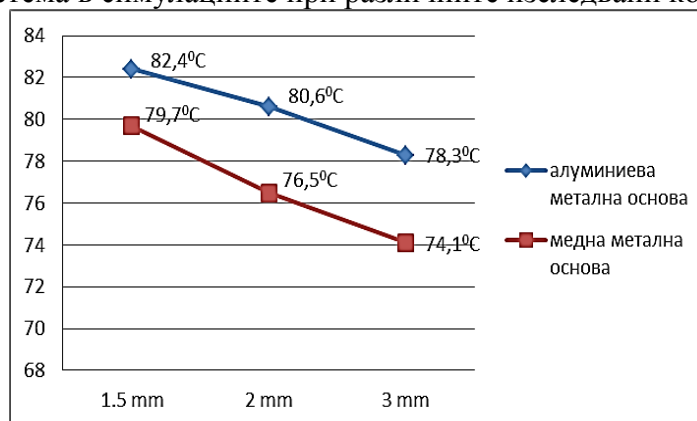
##### а) Изследване на топлинните ефекти в МСРСВ платка по отношение на материала и дебелината на металната основа

На фиг. 4.6 (а) и (б) са показани резултатите от топлинните симулации показващи топлинното разпределение в платка (погледната отгоре) и пакета на светодиод по отношение на материала на металната основа на платката при дебелина на основата от 1.5 mm.

| Случай | Температурно разпределение в симулацията                                            | Конструктивни параметри на платката                                                                                                            |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.     | 2.                                                                                  | 3.                                                                                                                                             |
| а)     |  | <b>Алуминиева основа:</b> 1.5 mm<br><br>Диелектричен слой: 100 $\mu$ m<br>Медно фолио: 50 $\mu$ m<br>Максимална температура: 82.4 $^{\circ}$ C |
| б)     |  | <b>Медна основа:</b> 1.5 mm<br><br>Диелектричен слой: 100 $\mu$ m<br>Медно фолио: 50 $\mu$ m<br>Максимална температура: 79.7 $^{\circ}$ C      |

**Фиг. 4.6. Температурно разпределение в структурата на МСРСВ платка с дебелина 1.5 mm и различен материал на металната основа**

На фигура 4.7 са показани графичните зависимости за температурата на чипа на светодиодната система в симулациите при различните изследвани конфигурации.



**Фиг. 4.7.** Температура на чипа на светодиода в симулациите с различна дебелина и материал на металната основа на платката

#### **Изводи от проведеното изследване:**

Направените топлинни симулации потвърждават известни факти, като:

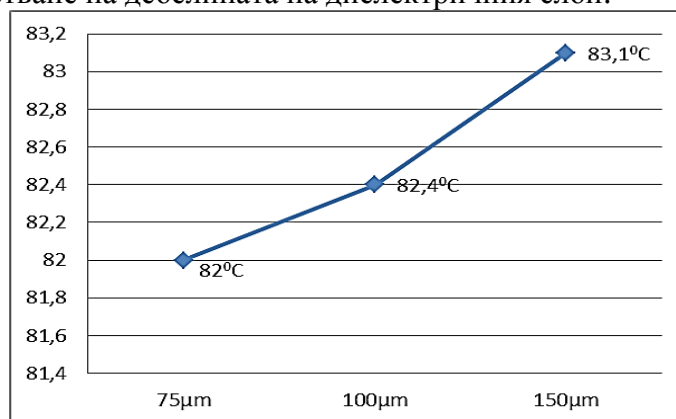
- Материала на метална основа е от съществено значение за топлоотдаването на платката.
- Платките с медна основа се характеризират с най-висока топлинна ефективност, което ги прави отличен избор за приложения с високо топлинно натоварване.
- Дебелината на металната основа, влияе на топлопреноса, но в по-малка степен от материала.
- Дебелината на металната основа, трябва да се избере в зависимост от цялостните конструктивни и монтажни особености на осветителното тяло.

Това дава основание да се направи заключението, че решението е сходимо и избрания моделиращ подход е правилен.

#### **б) Изследване на топлинните ефекти в МСРСВ платка с промяна на дебелината и топлопроводимостта на диелектричния слой**

В това изследване топлопроводимостта и материала на диелектричния слой не се променя, дебелината на металната сърцевина е 1.5 mm, а на медното фолио е 50  $\mu\text{m}$ , за да се оценят само топлинните ефекти в конструкцията на платката и отражението им върху температурата на прехода на чипа на светодиода породени от различната дебелина на диелектричния слой.

На фигура 4.9 е показано графично, как се изменя на температурата на чипа на светодиода с нарастване на дебелината на диелектричния слой.



**Фиг. 4.9.** Температура на LED чипа с изменение на дебелина на диелектрика

### **Изводи от проведеното изследване:**

Резултатите в симулациите потвърдиха, че:

- Дебелината на диелектричния слой е от решаващо значение за преноса на топлина през платката.
- Дебелината на диелектричния слой играе важна роля в намаляване на общото топлинно съпротивление на платката и се отразява пряко на температурата на източника на топлина.
- С увеличаване на дебелината на диелектричния слой се наблюдава повишаване на температурата на източника на топлина и обратното.

Тези резултати доказват, че анализът е сходим.

В таблица 4.6 са представени обобщени резултатите от симулациите, за да се направи количествена оценка на влиянието на топлопроводимостта на диелектричния слой на платката върху разсейването на топлина от светодиодното устройство изразено чрез изменението на температурата на прехода спрямо тази на базова конфигурация от предходното изследване – със зададена топлопроводимост на диелектричния слой от 1 W/m·K и температурата на прехода 82°C.

**Таблица 4.6.** Сравнение на ефективността на LED уст-во изразено чрез температурата на прехода с нарастване топлопроводимостта на диелектрика

| №  | Топлопроводимост (W/m·K) | Температура на прехода на светодиодното у-во (°C) | Спад на температурата в различните случаи (°C) |
|----|--------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. | 1                        | 82°C                                              | -                                              |
| 2. | 1.5                      | 81.2°C                                            | 0.8°C                                          |
| 3. | 2                        | 80.4°C                                            | 1.6°C                                          |
| 4. | 2.5                      | 79.5°C                                            | 2.5°C                                          |
| 5. | 3                        | 78.7°C                                            | 3.3°C                                          |

### **Изводи от проведеното изследване:**

Резултати потвърждават известни факти, че:

- Теплопроводимостта на диелектричния слой е от решаващо значение за преноса на топлина през конструкцията на платките с метална основа.
- С повишаване на топлопроводимостта на диелектричния слой, се наблюдава повишаване на топлинната ефективност на платката и спад в температурата на топлинния източник.

Тези резултати доказват, че приложените модели са подходящи за изследване на топлинното поведение на платки с метална основа.

#### ***в) Изследване на топлинните ефекти в МРСВ платка при промяна на дебелината на медното фолио и материала на металната основа***

За по-задълбочено изследване на влиянието на дебелината на медното фолио върху топлообмена на платката с метална основа са разгледани осем различни конфигурации на базовите параметри на платката с метална основа.

В таблица 4.8 са показани резултатите от симулациите с всички изследвани конфигурации параметри на платката и отражението им върху температурата на прехода на чипа на светодиодното устройство.

**Таблица 4.8.** Температура на прехода на чипа в симулациите по отношение на дебелината на медното фолио и материала на металната основа

| Материал | 50µm   | 75µm   | 100µm  | 150µm  |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| Алуминий | 82.4°C | 82.3°C | 82.2°C | 82.1°C |
| Мед      | 79.7°C | 79.5°C | 79.3°C | 78.9°C |

### Изводи от проведеното изследване:

Проведените симулации доказват следните факти:

- Дебелината на медното фолио не оказва влияние върху преноса на топлина на платка с метална основа.
- Медното фолио е основен фактор за добро разпределение на топлината във вертикално направление от топлинния източник в конструкцията на платката.
- Провеждането на топлина през платката като цяло зависи от топлинното съпротивление на всички слоеве на платката.
- Най-добра топлинна ефективност се наблюдава при варианта с дебелината на медното фолио 150  $\mu\text{m}$  в комбинация с медна основа.

### **4.5 Използване на термографски измервания за оценка на резултати от топлинно моделиране и симулации на платки с метална основа**

За този експеримент са подготвени прототипни платки с алуминиева (Al) метална основа с дебелина (t) - 1 mm, 1.5 mm и 2 mm. На базата на материалните характеристики и геометричните размери на прототипните платки са създадени техни цифрови топлинни модели за прогнозиране на топлообмена и решаване на проблеми, свързани с топлинното управление на светодиодни модули.

В таблица 4.10 са обобщени прогнозираните в симулираните и експериментално измерените температури в конструкцията на светодиодните модули и е оценена точността на получените резултати.

**Таблица 4.10.** Сравнение на данните от симулации и инфрачервено изображение

| Метод за измерване                           | Случай |  | МСРСВ <sub>1</sub> (t = 1 mm) |                      | МСРСВ <sub>2</sub> (t = 1.5 mm) |                      | МСРСВ <sub>3</sub> (t = 2 mm) |                      |
|----------------------------------------------|--------|--|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
|                                              |        |  | Т <sub>чип1</sub>             | Т <sub>платка1</sub> | Т <sub>чип2</sub>               | Т <sub>платка2</sub> | Т <sub>чип3</sub>             | Т <sub>платка3</sub> |
| Температурата измерена с ИЧТ, (°C)           |        |  | 70.9°C                        | 44.5°C               | 69.4°C                          | 43.3°C               | 68.5°C                        | 42.6°C               |
| Температурата получена в CFD симулации, (°C) |        |  | 68.8°C                        | 44.6°C               | 67.8°C                          | 43.9°C               | 67°C                          | 43.3°C               |
| Относителна грешка, (%)                      |        |  | 4.33%                         | 0.45%                | 3.41%                           | 2.88%                | 3.26%                         | 3.48%                |

Тези резултати доказват, че цифровото моделиране и симулации представят топлинното поведение на платката и процесите на топлообмен с достатъчно висока точност и са надежден инструмент при избора на средства за топлинно управление на светодиодни модули или предварителна оценка на термичния дизайн на осветителните тела.

## **Глава 5. ИЗПОЛЗВАНЕ НА CFD СИМУЛАЦИИ В ПРОЕКТИРАНЕТО И ИЗБОРА НА ОПТИМАЛЕН РАДИАТОР ЗА МОЩНИ СВЕТОДИОДНИ ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **5.1 Проблеми свързани с проектирането и избора на радиатор за LED приложения**

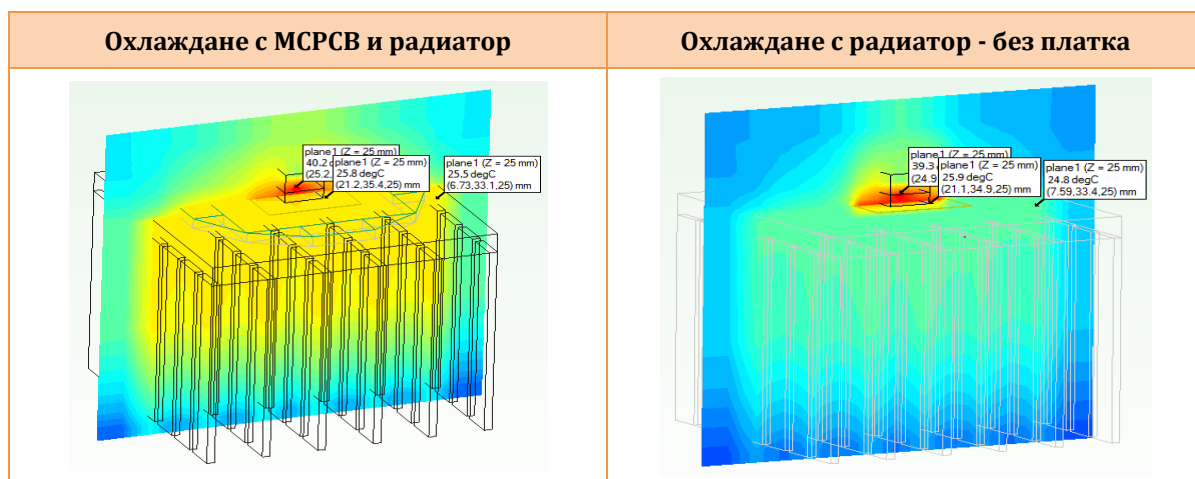
За охлаждането на светодиодните приложения са разработени множество технологични решения, но един от най-използваните начини за контрол на температурата е чрез правилния избор на радиатор.

#### **5.3.1 Избор на оптимален радиатор по отношение на материала за изработване и типа на монтажа на охлаждащата конструкция**

Огромният избор от материали за радиатори поставя пред инженерите на осветителни тела въпроса кой е най-подходящият за тяхното приложение? Обикновено изборът е продиктуван от съображения, свързани с разходите за производство, а не само от топлинните характеристики на материала.

За термична оценка в изследването са избрани чисти метали (алуминий и мед), както и някои техни сплави със значително по-ниска цена и разходи за производство – алуминий 5052, алуминий 6061 и месинг (CuZn38Pb2). Проведени са симулации и са анализирани възможностите на някои иновативни материали и конструктивни решения: топлопроводима пластмаса на PolyOne® и керамики Rubalit® 710 (99.6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), които позволяват реализирането на нови концепции за подобряване на термичната ефективност чрез прилагане на технологиите MID (Molded Interconnect Device) за полимерите и CeramCool® за керамиките.

На фигура 5.5а и б са показани симулациите с цифровите модели на светодиодната осветителна система направени с радиатор от чист алуминий с анодирана повърхност и охлаждащ радиатор от керамика Rubalit® 710.



**Фиг. 5.5а.** Симулация с радиатор от чист алуминий с анодирана повърхност

**Фиг. 5.5б.** Симулация с радиатор от керамика Rubalit® 710 (99.6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

В таблица 5.3 са представени всички данни за измерените температури в контролните точки поставени на светодиодната осветителна система и топлинните характеристики на използваните материали в симулациите.

**Таблица 5.3.** Температури в симулациите с различен материал на радиатора

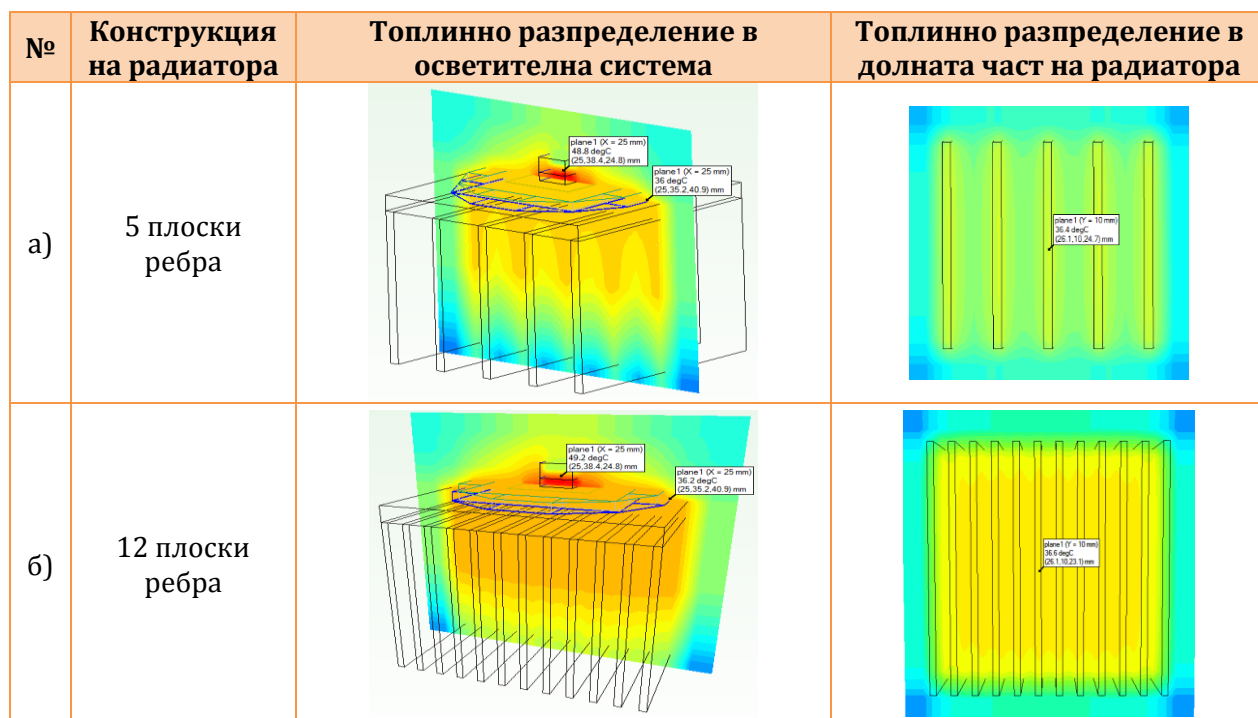
| №  | Материал на радиатора                                        | Топлопроводимост (W/m·K) | Температура в контрол. точки, (°C) |                 |                 |
|----|--------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|
|    |                                                              |                          | T <sub>LED</sub>                   | T <sub>sp</sub> | T <sub>hs</sub> |
| 1. | Алуминий с анодирана повърхност                              | 201                      | 40.2                               | 25.8            | 25.5            |
| 2. | Алуминий 5052 (сплав) с анодирана повърхност                 | 137                      | 40.4                               | 27.8            | 25.8            |
| 3. | Алуминий 6061(сплав) с анодирана повърхност                  | 180                      | 40.4                               | 27.8            | 25.8            |
| 4. | Мед                                                          | 385                      | 39.7                               | 25.7            | 25.5            |
| 5. | Месинг CuZn38Pb2                                             | 110                      | 40.5                               | 27.8            | 25.8            |
| 6. | Термо-пластмаса PolyOne                                      | 20                       | 44.3                               | 28.7            | 26.1            |
| 7. | Керамика Rubalit 710 (99.6% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 28                       | 39.3                               | 25.9            | 24.8            |

**Извод:** Резултатите от анализите проведени с радиатори от чисти метали и техни сплави показват, че най-подходящ избор за материал е медта, тъй като измерените температури във всички контролни точки на конструкцията са много ниски.

Резултатите на радиаторите от керамика Rubalit® 710 и топлопроводяща пластмаса PolyOne® демонстрират отлични термични качества, въпреки значително по-ниската си топлопроводимост в сравнение с другите анализирани материали.

### 5.3.2 Избор на оптимален радиатор по отношение на вида и броя на ребрата

Резултатите от симулациите на радиатори с 5 и с 12 плоски ребра на осветителната система са показани на фигура 5.8а и б.



**Фиг. 5.8.** Симулации на радиатори с различен брой плоски ребра

В таблица 5.4 са показани температурите измерени в контролните точки на осветителната система с всички симулирани радиатори с плоски ребра при установен режим на работа на светодиода и зададена температура на околната среда,  $T_a = 35^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 5.4.** Температури в контролните точки на радиаторите с плоски ребра

| №  | Конструкция на радиатора | Температура на повърхността на светодиода ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Температура в основата на МСРСВ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Температура на радиатора под източника на топлина ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----|--------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1. | 5 плоски ребра           | 48.8                                                             | 36                                                     | 36.4                                                                     |
| 2. | 7 плоски ребра           | 49                                                               | 36.1                                                   | 36.4                                                                     |
| 3. | 9 плоски ребра           | 49                                                               | 36.1                                                   | 36.5                                                                     |
| 4. | 12 плоски ребра          | 49.2                                                             | 36.2                                                   | 36.6                                                                     |

Данните от симулациите на осветителната система базирана на радиатори с плоски ребра показват, че най-ниски температури ( $T_{\text{LED}_5\text{плоски\_ребра}} = 48.8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{мсрsv}_5\text{плоски\_ребра}} = 36^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{hs}_5\text{плоски\_ребра}} = 36.4^{\circ}\text{C}$ ) в контролните точки са измерени в случая с 5 плоски ребра.

Данните с температурите в контролните точки от всички изследвани случаи с радиатори базирани на ребра-щифтове са представени в таблица 5.5.



**Табл. 5.5. Температури в контролните точки на радиаторите с ребра-щифтове**

| №  | Конструкция на радиатора                  | Брой ребра | Температури измерени в контролните точки |                          |                        |                        |
|----|-------------------------------------------|------------|------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
|    |                                           |            | $T_{LED}, (^{\circ}C)$                   | $T_{mcpcb}, (^{\circ}C)$ | $T_{hs1}, (^{\circ}C)$ | $T_{hs2}, (^{\circ}C)$ |
| 1. | ребра-щифтове разположени на една равнина | 9          | 49.3                                     | 36.2                     | 36.4                   | 33                     |
| 2. |                                           | 16         | 49.2                                     | 36                       | 35.5                   | 33.5                   |
| 3. |                                           | 20         | 49.3                                     | 36                       | 35.4                   | 34                     |
| 4. |                                           | 24         | 49.5                                     | 36                       | 35.4                   | 34.4                   |
| 5. | ребра-щифтове разположени шахматно        | 8          | 49.3                                     | 36.3                     | 36.8                   | 32.9                   |
| 6. |                                           | 13         | 49.3                                     | 36.1                     | 35.8                   | 33.4                   |
| 7. |                                           | 25         | 49.3                                     | 36                       | 35.6                   | 35.1                   |
| 8. |                                           | 32         | 49.4                                     | 35.9                     | 35.9                   | 35.5                   |

Данни получени за радиаторите с ребра-щифтове подредени шахматно показват, че оптималния вариант е радиатора с 25 щифта.

#### **5.4 Същност на техниките за планиране на експерименти (DOE)**

Един от методите, намерили широка популярност за оптимизация на проектните параметри и оценка на свързаните с тях ефекти, е чрез т. нар. техники за планиране на експерименти (Design of Experiments).

##### **5.4.2 Методология за оптимизация на радиатор**

###### **а) Избор на конструкция**

Извършените предварителни изследвания в предходните точки показаха, че конструкцията на радиатора с ребра щифтове е много подходяща за оптимизация.

###### **б) Топлинно моделиране и създаване на концептуален модел**

Размерите на радиаторната конструкция са ограничени от проектните параметри на системата. Ето защо, при създаването на геометричния модел на различните варианти на радиаторната конструкция – дължината  $L$ , ширината  $W$  и дебелината на основата не се променят. Радиаторът е моделиран с дължина  $L = 40 \text{ mm}$ , ширина  $W = 40 \text{ mm}$  и дебелина на основата  $T = 3 \text{ mm}$ .

###### **в) Използване на DOE анализи при оптимизацията на радиаторна конструкция**

Геометричните фактори на конструкцията на радиатора, които са избрани за проектни параметри и трябва да бъдат определени оптимално са: височината на ребрата ( $A$ ), диаметра на ребрата ( $B$ ) и броя на ребрата ( $C$ ). При оптимизирането, за да се гарантира поместването на радиатора в обема на системата (понеже в светодиодните осветителни тела се предпочитат радиатори с голям брой, къси ребра) в DOE анализите са наложени ограничения и по отношение на тези проектни параметри.

В DOE анализите се използва пълен факторен експеримент (Full Factorial Experiment) за трите проектни фактора на две нива (обхват на проектните стойности).

В таблица 5.7 е показан обхвата на стойностите на трите проектни параметъра, чието влияние ще бъде анализирано.

**Табл. 5.7. Обхват на проектните параметри**

| Фактор                   | Факторна дефиниция | Обхват    |           |
|--------------------------|--------------------|-----------|-----------|
|                          |                    | Min ст-ст | Max ст-ст |
| Височина на ребрата [mm] | A                  | 15        | 30        |
| Диаметър на ребрата [mm] | B                  | 3         | 4         |
| Брой ребра               | C                  | 24        | 42        |

### г) Анализ и дискусии на получените резултати

Топлинните ефекти отчетени с различните конфигурации проектни параметри на радиатора върху максималната температура са представени в таблица 5.10.

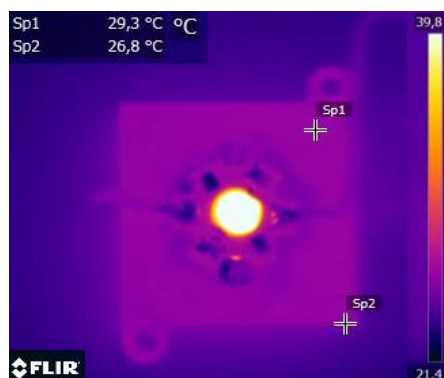
**Табл. 5.10. Максимална температурата на светодиода в симулациите**

| №  | Височина на ребрата (mm) | Диаметър на ребрата (mm) | Брой ребра | Максимална температура на светодиода (°C) |
|----|--------------------------|--------------------------|------------|-------------------------------------------|
| 1. | 15                       | 3                        | 24         | 47.9                                      |
| 2. | 15                       | 3                        | 42         | 47.1                                      |
| 3. | 15                       | 4                        | 24         | 49                                        |
| 4. | 15                       | 4                        | 42         | 51.9                                      |
| 5. | 30                       | 3                        | 24         | 45.4                                      |
| 6. | 30                       | 3                        | 42         | 45.7                                      |
| 7. | 30                       | 4                        | 24         | 46.1                                      |
| 8. | 30                       | 4                        | 42         | 50.4                                      |

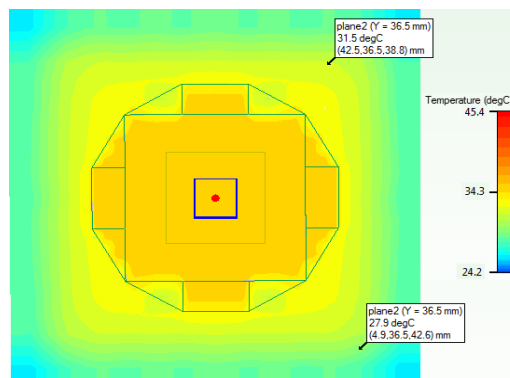
Извършените анализи показват, че оптималните проектни параметри на радиатора са – височина на ребрата 30 mm, диаметър на ребрата 3 mm и 24 ребра.

### 5.5 Проверка на резултатите от цифровото моделиране на радиатори

На фигура 5.24 е показана термограма на светодиодната система, а на фигура 5.25 температурното разпределение в равнината на радиатора на системата получено в симулации за сравнение на температурите в определени контролни точки.



**Фиг. 5.24. Термограма на LED система (снимка отгоре)**



**Фиг. 5.25. Температурно разпределение в равнината на радиатора в симулациите**

В таблица 5.12 са показани сравнителни данни между прогнозираните и измерените температури и относителната грешка в определена контролна точка на радиатора.

**Табл. 5.12. Сравнение на резултатите получени чрез термография и симулация**

| Метод на измерване              | Контролна точка <sub>1</sub> | Контролна точка <sub>2</sub> |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Температура получена чрез ИЧТ   | 29.3°C                       | 26.8°C                       |
| Температурата получена чрез CFD | 31.5°C                       | 27.9°C                       |
| Относителна грешка, $\delta$    | 7.5 %                        | 4.1 %                        |

Получената максимална грешка от 7.5% между прогнозираните и експерименталните топлинни измервания на радиатора потвърждават, че цифровите модели и симулации представят топлообмена с достатъчна точност, за да се използват като подпомагащ инструмент при проектирането на радиатори.

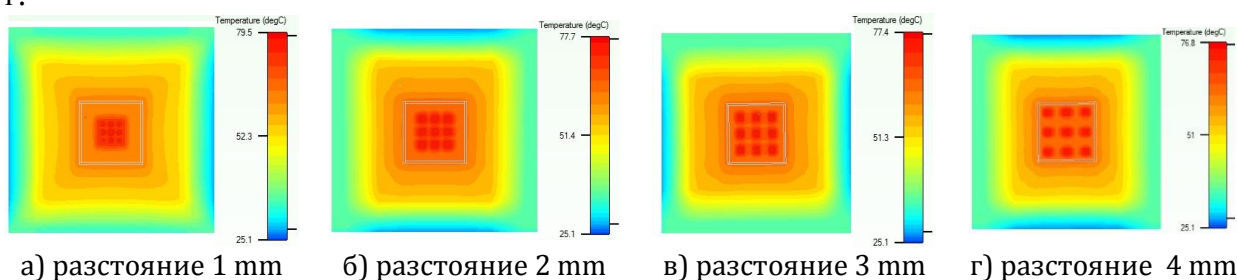
## Глава 6. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА РАЗСТОЯНИЕТО И РАЗПОЛОЖЕНИЕТО НА ЧИПОВЕТЕ ВЪРХУ ТОПЛИННА ЕФЕКТИВНОСТ НА COB (Chip on Board) LED МОДУЛИ

### 6.1 Проблеми свързани с топлинното проектиране на COB модули

Днес съвременните тенденции в осветителните системи са фокусирани върху създаването на компактни мулти-чипни COB LED устройства с все по-високи изисквания по отношение на топлинните характеристики и качеството на излъчената светлина, които масивите съставени от отделни светодиоди не могат да изпълнят.

### 6.3 Топлинни симулации на милти-чипен LED модул за намиране на оптимални топлинни характеристики по отношение на разстоянието между чиповете

Резултатите от проведените топлинни симулации на вариантите на мулти-чипния LED модул с различно разстояние от чип до чип в екстремн работен режим при максимална топлинна мощност  $P_{\text{топлинно}} = 8.45\text{W}$  са показани на фигура 6.5а, б, в и г.



**Фиг. 6.5.** Температурно разпределение в мулти-чипния LED модул със зададено  $P_{\text{топлинно}} = 8.45\text{W}$  и различно разстояние между чиповете

В табл. 6.2 са дадени температурите на прехода  $T_j$  на чиповете в областта на изследване прогнозиран в симулациите на мулти-чипния LED модул при различно разстояние от чип до чип.

**Табл. 6.2.** Прогнозирани температури на прехода на чиповете на LED модула в симулациите с различно разстояние от чип до чип при  $P_{\text{топлинно}} = 8.45\text{W}$

| Разстояние | Температура на прехода на LED чиповете |        |        |        |
|------------|----------------------------------------|--------|--------|--------|
|            | $T_1$                                  | $T_2$  | $T_3$  | $T_4$  |
| 1 mm       | 78.9°C                                 | 79.5°C | 78.3°C | 78.8°C |
| 2 mm       | 77.2°C                                 | 77.7°C | 76.9°C | 77.4°C |
| 3 mm       | 77.2°C                                 | 77.4°C | 77.1°C | 77.2°C |
| 4 mm       | 76.7°C                                 | 76.8°C | 76.7°C | 76.7°C |

В таблица 6.3 са показани данни от топлинните симулации на мулти-чипния LED модул получени с различно разстояние от чип до чип в нормален работен режим при номинална топлинна мощност  $P_{\text{топлинно}} = 7.71\text{W}$ .

**Табл. 6.3.** Прогнозирани температури на прехода на чиповете на LED модула в симулациите с различно разстояние от чип до чип при  $P_{\text{топлинно}} = 7.71\text{W}$

| Разстояние | Температура на прехода на LED чиповете |        |        |        |
|------------|----------------------------------------|--------|--------|--------|
|            | $T_1$                                  | $T_2$  | $T_3$  | $T_4$  |
| 1 mm       | 75.5°C                                 | 76.1°C | 74.9°C | 75.4°C |
| 2 mm       | 73.9°C                                 | 74.4°C | 73.7°C | 74.1°C |
| 3 mm       | 73.9°C                                 | 74.1°C | 73.8°C | 74°C   |
| 4 mm       | 73.5°C                                 | 73.6°C | 73.5°C | 73.6°C |

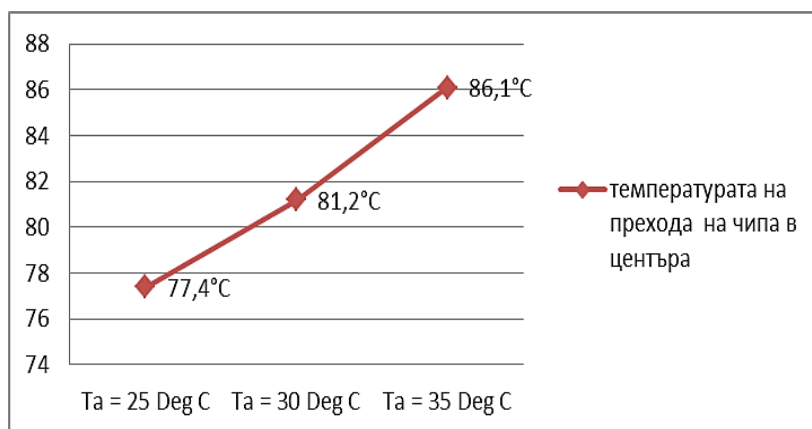
### **Изводи от проведеното изследване:**

Резултатите от топлинните симулации, проведени с цифрови модели на мулти-чипен COB LED модул, показват, че:

- С нарастване на разстоянието между отделните чипове тяхната температура на прехода започва да намалява (независимо от приложеното топлинно натоварване);
- Колкото по-близо се намират чиповете един от друг, толкова по-висока е тяхната температура на прехода, което се дължи на взаимното влияние на отделните топлинни потоци и намаляване на скоростта им;
- Въпреки че някои от чиповете са симетрично разположени спрямо този в центъра (означен като  $T_2$ ) и са на едно и също разстояние, температурите им се различават, което може да се дължи на сложни топлинни взаимодействия и топлинното съпротивление между чиповете;
- При варианта с разстояние между чиповете 4 mm се наблюдава най-малко изменение на температурата на отделните чипове  $\Delta T = 0.1^{\circ}\text{C}$  (независимо от приложеното топлинно натоварване), което го прави оптимален избор по отношение на топлинните характеристики на LED модула;
- Вариантът с разстояние между чиповете 3 mm обаче предлага най-балансирано топлинно поведение и възможност за създаване на компактни опаковки с висока плътност на интеграция на чиповете с достатъчно добри топлинни характеристики.

### **6.4 Изследване на мулти-чипен LED модул при различни условия на околната среда**

На фигура 6.9 е показано графично покачването на температурата на прехода  $T_j$  на чипа в центъра на мулти-чипния LED модул с покачване на температурата на околната среда  $T_a$ .

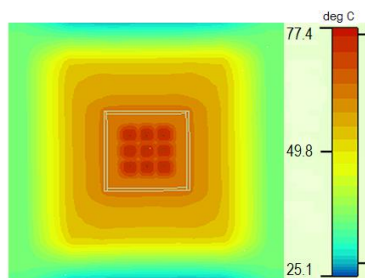


**Фиг. 6.9.** Графично представяне на получената температура на прехода на чипа в центъра на LED модул с нарастване с температурата на околната среда

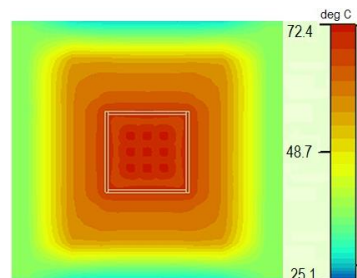
Въпреки, че температурата на чипа в центъра при  $T_a = 35^{\circ}\text{C}$  се покачва до  $86.1^{\circ}\text{C}$  тази температура е значително по-ниска от критичните стойности указани в каталожната брошура на повечето светодиоди от  $125^{\circ}\text{C} \div 150^{\circ}\text{C}$ . Това показва, че проектираната конструкция се характеризира с достатъчно добра ефективност.

### **6.5 Оптимизиране на топлинните характеристики на мулти-чипен LED модул чрез използване на термично ефективни керамични подложки**

Симулации на проектираният мулти-чипен COB LED модул с две от термично изследваните керамични подложки направени от – от Alumina (типичен  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и алуминиев нитрид (AlN) при разстояние между чиповете 2 mm и топлинна мощност  $P_{\text{топлинно}} = 7.71\text{W}$  са показани на фигура 6.11 а и б.



а) с подложка от типичен  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
(топлопроводимост =  $16\text{W/m}\cdot\text{K}$ )



б) с подложка от  $\text{AlN}$   
(топлопроводимост =  $170\text{W/m}\cdot\text{K}$ )

**Фиг. 6.11.** Температурно разпределение в COB LED модула с подложки изработени от различни материали при  $P_{\text{топлинно}} = 7.71\text{W}$

**Табл. 6.4.** Резултати от симулациите на COB модула получени с различен материал на подложката и разстоянието между чиповете при  $P_{\text{топлинно}} = 7.71\text{W}$

| №  | Подложка                               | Разстояние м/у чиповете | Температура на прехода, $T_j$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Топл. съпротивление, $R_{j-a}$ ( $^{\circ}\text{C/W}$ ) |
|----|----------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1. | Alumina (типичен)                      | 1 mm                    | 76.1                                                 | 6.62                                                    |
|    |                                        | 2 mm                    | 74.4                                                 | 6.40                                                    |
|    |                                        | 3 mm                    | 74.1                                                 | 6.36                                                    |
|    |                                        | 4 mm                    | 73.6                                                 | 6.30                                                    |
| 2. | Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 94%) | 1 mm                    | 75.9                                                 | 6.60                                                    |
|    |                                        | 2 mm                    | 74.2                                                 | 6.38                                                    |
|    |                                        | 3 mm                    | 73.9                                                 | 6.34                                                    |
|    |                                        | 4 mm                    | 73.4                                                 | 6.27                                                    |
| 3. | Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 96%) | 1 mm                    | 75.3                                                 | 6.52                                                    |
|    |                                        | 2 mm                    | 73.7                                                 | 6.31                                                    |
|    |                                        | 3 mm                    | 73.5                                                 | 6.29                                                    |
|    |                                        | 4 mm                    | 73                                                   | 6.22                                                    |
| 4. | $\text{AlN}$                           | 1 mm                    | 73.6                                                 | 6.30                                                    |
|    |                                        | 2 mm                    | 72.4                                                 | 6.14                                                    |
|    |                                        | 3 mm                    | 72.3                                                 | 6.13                                                    |
|    |                                        | 4 mm                    | 71.9                                                 | 6.08                                                    |

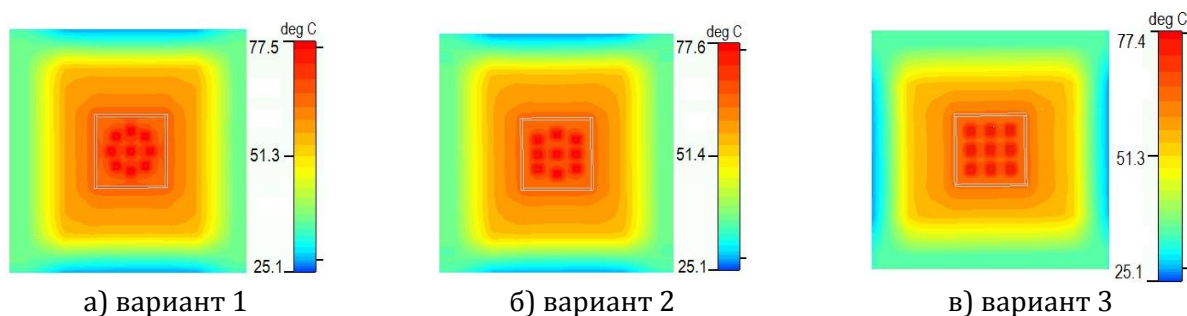
#### **Изводи от проведеното изследване:**

Направените симулации на топлообмена на COB LED модула с различни керамични подложки показват, че:

- Материала на подложката оказва съществено значение върху топлообмените процеси протичащи в COB LED модули;
- Подложката изработена от  $\text{AlN}$  разсейва топлината с най-ефективно и осигурява оптимални топлинни характеристики на COB модула във всички изследвани случаи;
- Оптимална топлинна ефективност показва варианта на COB модула с материал на подложка от  $\text{AlN}$  и разстояние между чиповете 4 mm;

#### **6.6 Оптимизиране на топлинните характеристики на мулти-чипен LED модул по отношение на подреждането на чиповете в масива**

На фигура 6.13а, б и в е показано температурното разпределение получено в симулациите с трите анализирани варианта на мулти-чипната LED конструкция по отношение на подреждането на чиповете изграждащи масива.



а) вариант 1 б) вариант 2 в) вариант 3  
**Фиг. 6.13.** Температурно разпределение в мулти-чипната LED конструкция с различно подреждане на чиповете

Топлинните симулации са проведени при зададена температура на околната среда  $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ , топлинна мощност  $P_{\text{топлинно}} = 6.9\text{W}$ .

#### **Изводи от проведеното изследване:**

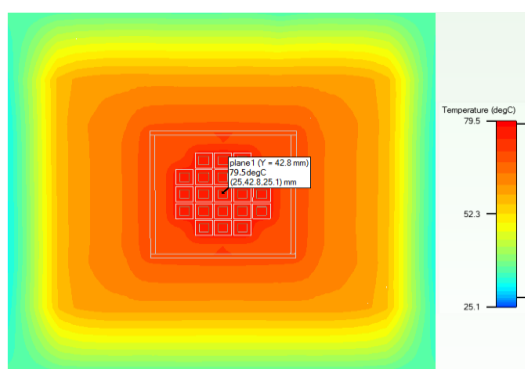
Направените симулации на топлообмена на COB LED конструкция по отношение на подреждането на чиповете в масива показват, че:

- Подреждането на чиповете в масива не влияе съществено върху процесите на топлообмен и следователно на топлинните характеристики;
- Подреждането на чиповете, обаче оказва влияние на плътността на чиповете в масива, а оттам и на плътността на чиповете в опаковката следователно и върху изходната мощност;
- Подреждането на чиповете в квадратен масив е оптималният вариант по отношение топлинните характеристики и плътност на чиповете в опаковката.

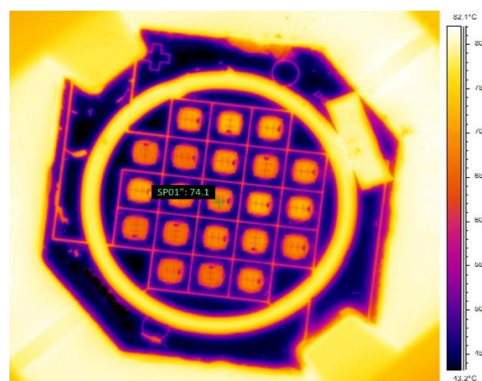
#### **6.7 Проверка на резултатите постигнати с цифрови инструменти за топлинно проектиране на COB LED модули**

На фигура 6.15 са показани симулации с проектиран цифров модел на COB модул с масив от 21 LED чипа при зададена температура на околната среда  $T_a = 25^{\circ}\text{C}$ . Чиповете в масива се намират на едно и също разстояние (1 mm) един от друг и всеки е със зададена топлинна мощност  $P_{\text{топлинно}} = 0.53\text{W}$ .

Инфрачервена снимка на реална тестова COB конструкция със същото разположение и разстояние между чиповете е показана на фигура 6.16.



**Фиг. 6.15.** Прогнозирана температура в симулациите на COB модула



**Фиг. 6.16.** Инфрачервена снимка с температура на тестовия COB модул

Температурата на повърхността на чипа в центъра на масива прогнозирана в симулациите е  $79.5^{\circ}\text{C}$ . Измерената чрез инфрачервена термография температура на повърхността на този чип при същите гранични условия е  $74.1^{\circ}\text{C}$ .

По този начин относителната грешка  $\delta$  между прогнозираната в симулациите и измерената чрез инфрачервена термография температура е равна на:



$$\delta = \left| \frac{T_{\text{прогнозирана}} - T_{\text{измерена}}}{T_{\text{измерена}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{79.5^{\circ}\text{C} - 74.1^{\circ}\text{C}}{74.1^{\circ}\text{C}} \right| \times 100\% = 7.28\% . \quad (6.2)$$

## 6.8 Заключение и резюме на получените резултати

Проектиран е топлинен модел на COB LED модул с охладителна система за оценка на топлинното поведение и подобряване на топлинната ефективност чрез:

- Намиране на оптимални топлинни характеристики по отношение на разстоянието между чиповете в масива.
- Намиране на оптимални работни условия при зададен работен режим.
- Намиране на оптималния вариант на COB конструкция по отношение на материала на подложката и разстоянието между чиповете.
- Намиране на оптималната конфигурация за подреждане на чиповете в масива.

Направените измервания чрез инфрачервена термография показва, че прогнозирането в симулациите резултати са с достатъчно точност и могат да послужат като база за развитие на нови, усъвършенствани мулти-чипни COB LED устройства.

## НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ:

В настоящия дисертационен труд са разгледани научно-приложни и приложни приноси в областта на проектирането, моделирането и топлинните анализи на решения свързани с топлинно управление на светодиодни устройства и системи, както и на методи за верификация на резултатите.

**Основните приноси** с инженерно практическо значение са обобщени в следващите точки:

1. Разработен е подход за детайлно 3D моделиране на геометрията на светодиодни корпуси в средата на софтуера за топлинни симулации Flotherm. Предложена е методика за създаване на компактни компонентни модели. Разработени са процедури за оценка на точността на предложените топлинните модели. Предложен е подход за подобряване на топлинните анализи на светодиоди чрез коефициента за разсейване на топлина  $K_h$ .
2. Предложена е методика за оптимизиране на топлинната ефективност на FR4 платка чрез топлинни отвори. Анализирани са различни конструктивни фактори на топлинните отвори, оказващи влияние на топлинното проектиране на платка.
3. Разработена е методика за оценка на конструктивните и топлофизичните параметри на платки с метална основа (MCPCBs). Подробно е анализирано влиянието на различни фактори, влияещи на топлоотдаването на платките, като материална на основата, топлопроводимостта на диелектрика и неговата дебелина, дебелина на медното фолио за ускоряване на процеса на топлинно проектиране на ниво платка.
4. Предложена е методика за проектиране и оптимизиране на радиатор за охлаждане на конкретен светодиоден модул по отношение на използвания за изработката му материал, вида на охлаждащата конструкция, вида и броя на ребра. Предложен е подход за допълнителна оптимизация на радиатор, когато в проектното задание са наложени ограничения по отношение на геометричните размери.
5. Предложена е методология за топлинно проектиране на мулти-чипен COB LED модул. Направени са многофакторни анализи на топлообмена за подобряване на топлинната ефективност на конструкцията на топлинно моделирания мулти-чипен COB LED модул.



## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Вакрилов Н.**, Андонова А., Бонев Б., *Методология за 3D цифрово моделиране и инфрачервена образна диагностика на електронни модули*, Национален Форум „Електроника 2015“, 14-15 май 2015, София, България, стр. 89-94, ISSN:1314-8605.
2. **N. Vakilov**, A. Stoyanova, N. Kafadarova, "Application of CFD modeling to solve problems in thermal design of LED applications in the initial project phase", 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2017), 10-15 May, Sofia, Bulgaria, Electronic ISSN: 2161-2536, DOI: 10.1109/ISSE.2017.8000902.
3. **N. Vakilov**, A. Andonova, „Innovative Heat Transfer Analysis of LED Modules by Thermal Simulations“, Bulgarian Chemical Communications, Volume 47, Special Issue B, pp. 519-527 (2015). IF: 0.238(2018), Брой цитирания: 1
4. **Vakilov N.**, A. Andonova, „CFD simulation to study the influence of the design parameters of the MCPCB-LED system of heat flux“, Journal CAx Technologies, Issue 2, November 2014, pp. 12-15, ISSN: 13-14-9628.
5. Andonova A., **N. Vakilov**, „Heat sink design for high LED power applications“, International Journal of Advanced Technology & Engineering Research, Volume 4, Issue 6, Nov. 2014, pp. 10-16, ISSN No: 2250-3536. Брой цитирания: 1
1. **Vakilov N.**, A. Stoyanova, „Thermal design of LED by DOE“, Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ), Vol 4, No 4, 2015, pp.1-10, DOI : 10.14810/elelij.2015.4401, ISSN: 2200-5846. Брой цитирания: 1
2. **N. Vakilov**, „Using CFD simulations for the thermal evaluation of new solutions in the thermal management of high power LEDs“, Proc. XXVII International Scientific Conference Electronics - ET2018, September 13 - 15, 2018, Sozopol, Bulgaria.
6. **Vakilov N.**, A. Andonova, N. Kafadarova, „Study of high power COB LED modules with respect to topology of chips“, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015), 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 108-113, doi: 10.1109/ISSE.2015.7248002, INSPEC Accession Number: 15439105, Publisher: IEEE. Брой цитирания: 4
3. Andonova A., V. Georgieva, N. Kim, **N. Vakilov**, B. Bonev, „Quality control of chip on board LED packaging by transient thermography“, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015), 6-10 May 2015, Eger, Hungary, pp. 261-266, doi: 10.1109/ISSE.2015.7248002.
4. Andonova A., N. Kim, **N. Vakilov**, „Estimation the amount of heat generated by LEDs under different operating conditions“, Elektronika ir elektrotechnika, Vol. 22, №2, pp. 49-53, ISSN 1392–1215.(2016), <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.22.2.8522>. IF: 0.859 (2016)

## RESUME

This thesis is focused on the implementation and optimization of CFD analysis in the thermal design of LED modules and systems ranging from choosing the appropriate means for heat dissipation to comprehensive strategies for improving the cooling and the thermal design by predicting temperature, clarifying the complex interactions related to fluid mechanics and heat transfer, as well as analysis of the thermal behavior of various structural parameters (such as the thermo-physical properties of material, the geometry of the structure and the environmental conditions).

In-depth approaches to the thermal design of electronics and tasks related to the thermal control of LED lighting applications have been thoroughly studied. The paper describes the existing problems and the limitations, as well as the level of confidence in the various methods of thermal analysis. In depth, numerical modeling strategies at different levels have been described and explored to qualify the thermal efficiency of LED systems. The CFD analyzes in the process of designing LED devices, as well as a comprehensive methodology for solving a contingency engineering problem, the principles and the application of experimental verification techniques are outlined.

The main problems that are solved in the research are as follows:

1. Creation, thermal parameterization and experimental verification of detailed and compact thermal models at the package level for accurate temperature prediction of LED. Create an alternative approach to improve thermal analysis by using different thermal efficiency evaluation techniques based on Wall-Plug Efficiency (WPE) and  $K_h$ -temperature dissipation coefficient depending on the junction temperature  $T_j$ .
2. Improving the thermal efficiency of an LED multi-chip array based on the FR4 board through various configurations of thermal vias in the PCB structure.
3. Creating an approach for thermal qualification of structural and material thermal-physical parameters of metal core printed circuit boards (MCPCBs) through CFD simulations and methodology for experimental evaluation of results.
4. Creating a methodology for design and selection an optimal heat sink, as well as optimizing an existing heat sink construction while imposing certain design constraints.
5. Creating a methodology for studying the effect of the distance and chip position on the thermal efficiency of multi-chip COB LED modules as well as the possibilities of further optimizing the thermal characteristics by selecting a suitable ceramic substrate.