

НАЦИОНАЛЕН ФОРУМ

**ЕЛЕКТРОНИКА 2015**  
**ELECTRONICA 2015**

**ДОКЛАДИ**

14-15 май 2015

Национален дом на науката и техниката

гр. София, ул. Раковски №108

**50 СЕЕС**  
ГОДИНИ

## **ТЕМАТИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ:**

- **Електроника и обучение по електроника.**
- **Електронни технологии и материали.**
- **Индустриална електроника.**
- **Комуникационни технологии.**



**ISSN 1314-8605**

**А Д Р Е С   З А   К О Р Е С П О Н Д Е Н Ц И Я**  
Съюз по електроника, електротехника и съобщения,  
1000 София, ул. Г. С. Раковски №108, ст.506,  
тел. 029879767  
e-mail: [forum2015@ecad.tu-sofia.bg](mailto:forum2015@ecad.tu-sofia.bg)  
website: <http://ecad.tu-sofia.bg/e-conf/index.php?r=82>

<b>Николай ВАКРИЛОВ, Анна АНДОНОВА и Борислав БОНЕВ</b> МЕТОДОЛОГИЯ ЗА 3D ЦИФРОВО МОДЕЛИРАНЕ И ИНФРАЧЕРВЕНА ОБРАЗНА ДИАГНОСТИКА НА ЕЛЕКТРОННИ МОДУЛИ .....	89
<b>Dimo KOLEV, Svetoslav KAMENOV and Velimira TODOROVA</b> TACTILE SENSOR ARRAYS IMPLEMENTATIONS IN SOME OF ROBOTIC EFFECTORS.....	95
<b>Mila ILIEVA-OBRETENOVA</b> THERMAL DIODES AND THEIR APPLICATION IN MINING.....	99
<b>Vladimir DIMITROV</b> ANALYSIS OF A POWER MOSFET SWITCHING PROCESS.....	103
<b>Николай БАНКОВ, Александър ВУЧЕВ</b> АНАЛИЗ НА РЕВЕРСИВЕН РЕЗОНАНСЕН DC/DC ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ.....	110
<b>Катя АСПАРУХОВА, Тодор ДЖАМИЙКОВ и Иван СПАСОВ</b> УСТРОЙСТВО И АЛГОРИТЪМ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА СОЛАРНИ ПАНЕЛИ СПОРЕД МЕСТОПОЛОЖЕНИЕТО НА СЛЪНЦЕТО.....	116
<b>Lilyana KOLEVA, Elena KOLEVA</b> PARAMETER OPTIMIZATION OF ELECTRON BEAM WELDING BY NEURAL AND REGRESSION MODELS.....	121
<b>Николай РАНГЕЛОВ и Николай ХИНОВ</b> КОМПЮТЪРНО-БАЗИРАНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА КВАЗИРЕЗОНАНСНИ ЕДНОТРАНЗИСТОРНИ ПОСТОЯННОТОКОВИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ С МЕКИ КОМУТАЦИИ ПО НАПРЕЖЕНИЕ.....	127
<b>Elena KOLEVA, Volodya DZHAROV and Marin KARDJIEV</b> AUTOMATION OF ELECTRON BEAM WELDING INSTALLATION.....	133
<b>Димитър АРНАУДОВ, Николай ХИНОВ и Иван НЕДЯЛКОВ</b> ИЗСЛЕДВАНЕ НА СХЕМА ЗА ЗАРЯД И ИЗРАВНЯВАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЯТА ВЪРХУ ПОСЛЕДОВАТЕЛНО СВЪРЗАНИ ЕЛЕМЕНТИ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ.....	139
<b>Димитър АРНАУДОВ, Николай ХИНОВ и Иван НЕДЯЛКОВ</b> ИЗСЛЕДВАНЕ НА СХЕМА С ОГРАНИЧЕНИЕ ВЪРХУ КОМУТИРАЩИТЕ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ЗАРЯД НА ПОСЛЕДОВАТЕЛНО СВЪРЗАНИ ЕЛЕМЕНТИ ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ.....	147
<b>Георги ПЕТРОВ, Мартин ИВАНОВ</b> ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЛУЧАЕН ТЕСТОВ СИГНАЛ, ГЕНЕРИРАН ЗА ЦЕЛИТЕ НА КРИПТОГРАФИЯТА.....	154
<b>Йордан НЕШЕВ</b> ПРЕВЕНЦИЯ НА ЗЛОУПОТРЕБИ С ПРИХВАНАТИ РАЗГОВОРИ В GSM ТЕЛЕФОННИ МРЕЖИ.....	158
<b>Екатерина ОЦЕТОВА – ДУДИН, Елена ИВАНОВА и Димитър РАДЕВ</b> ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАБОТНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ШИРОКОЛЕНТОВ ХЕНДОВЪР, РЕАЛИЗИРАН СЪС СХЕМА С ОБЩИ ПРИОРИТЕТИ.....	163
<b>Иван ИВАНОВ и Стела ВЕТОВА</b> ОЦЕНКА ЗА УСТОЙЧИВОСТ НА КРИПТОГРАФСКАТА ЗАЩИТА.....	169
<b>Петър АПОСТОЛОВ</b> ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА КОМПРЕСИРАНИ КОСИНУСИ ЗА СИНТЕЗ НА ЛИНЕЙНО- ФАЗОВИ ЦИФРОВИ ФИЛТРИ С МИНИМИЗАЦИЯ НА АПРОКСИМАЦИОННАТА ГРЕШКА.....	173
<b>Сеферин МИРЧЕВ, Гергана ДИНОВСКА и Георги ГЕОРГИЕВ</b> ОЦЕНКА НА КАЧЕСТВОТО НА ОБСЛУЖВАНЕ ПРИ ПРЕДОСТАВЯНЕ НА УСЛУГАТА VOIP.....	177

# Методология за 3D цифрово моделиране и инфрачервена образна диагностика на електронни модули

Николай ВАКРИЛОВ, Анна АНДОНОВА и Борислав БОНЕВ

Технически Университет София, Факултет по Електроника, София 100, България,  
бул. „Кл. Охридски“ 8, бл. 1, e-mail: ava@ecad.tu-sofia.bg

*Резюме.* В статията се предлага методология за 3D цифрово топлинно моделиране и верификация на моделите с инфрачервена образна диагностика. За демонстриране възможностите на предлаганата методология са изследвани проблеми при топлинно проектиране на LED модули. Демонстрирани са възможности за оптимизиране на топлинното управление, като е изследвано влиянието на конструктивно-технологични фактори върху топлинното поведение на светодиодни конструкции. Предложени са решения за подобряване на топлообмена и са представени резултати от топлинни симулации с CFD софтуер и инфрачервени образи. Тествани са възможностите на инфрачервената термография за измерване на температурното разпределение на повърхността на модулите за валидиране на резултатите, получени от компютърни симулации.

*3D digital modelling and infrared imaging methodology for thermal design of electronic modules (Nikolay Vakrilov, Anna Andonova, Borislav Bonev).* 3D digital thermal modelling and validation by infrared imaging methodology is presented. Some problems of LED modules' thermal design are studied to demonstrate capabilities of the presented approach for thermal management optimization by studying the structural and technological factors on LED modules thermal behaviour. Some decisions for enhancement thermal conductivity are presented and results of the thermal simulation are presented using CFD software and infrared images. The ability of the infrared thermography as non-destructive method for the surface temperature distribution measurements on the modules as well as the computer simulated results validation are tested.

## Увод

Независимо от бързите темпове на развитие на електронната индустрия, откриването на нови материали и внедряването на нови технологии все още остават актуални проблемите свързани с топлинното управление при проектирането на електронни модули и системи [1]. В световен мащаб се наблюдава непрекъснато покачване на разходите за технологии за топлинно управление в електрониката, като отговор на тенденциите за миниатюризация на компонентите, нарастване на сложността на модулите и повишеното разсейване на топлина в резултат на по-голямата консумирана мощност [2].

Голямата конкуренция в производството на електроника налага необходимостта от намаляване на себестойността и времето за разработка на крайните изделия, което води до внедряването на техники за подпомагане на процеса на топлинно

проектиране. При топлинното проектиране в електрониката предизвикателството е да се намалят топлинните стресове, които могат да предизвикат прегряване и повреда на критичните компоненти чрез подходящи техники за охлаждане [3], [4].

Един от начините за бързо и надеждно топлинно проектиране е чрез използването на виртуални прототипи и средства за прогнозиране на топло-обменните процеси и различните фактори оказващи влияние върху температурната ефективност.

Изследвани са различни технически решения с използване на топлинни симулации на топлообмена в електронни модули, но методическо описание на пълния процес на топлинно симулиране, валидиране на получените резултати и изграждането на топлинен модел на оптимизиран дизайн не са коментирани [5, 6, 7].

В момента съществуват много технически

решения за подпомагане на топлинното проектиране FDM, FEM, BEM, FVM, но един от най-популярните методи за симулиране и предсказване на топлообмена в електронни системи си остават CFD (Computational Fluid Dynamics) базираните кодове [8]. Чрез тях точно може да се предскаже топлинното поведение на електронните модули при правилно въвеждане на входните параметри (геометрични и топлинни параметри, разсейвани мощности, топлинни модели, топлинни съпротивления) и точно определяне на граничните условия (условия на околната среда, активно или пасивно топлоотвеждане, 3D CAD модел). След определяне на температурното разпределение при установено състояние може да се изчисли температурният стрес. Може да се определят температурни съпротивления преход-околна среда, а получената максимална температура на горната повърхност на чипа се приема, че е температурата на прехода.

Компютърно моделираните прототипи и резултатите от топлинни симулации обикновено се верифицират с различни реални топлинни измервания (електрически, топлинни, оптични), за да се оцени достоверността и коректността на получените данни [9, 10, 11]. Използването на един или друг подход има своите предимства и недостатъци основно свързани с точността, техническо изпълнение, обем на получаваните експериментални данни.

Един от методи за температурни измервания, напоследък намиращ по-широко приложение в електрониката е инфрачервената термография (ИЧТ) [12]. Снимките от инфрачервена камера се преобразуват във видими образи чрез определяне на цвета на всяко инфрачервен ниво на енергия. Резултатът представлява псевдо-цветно изображение наричано термограма. ИЧТ има много предимства пред други технологии [13, 14]. ИЧТ е много ефективно не само за измерване на температурата, но и на други променливи, като стрес [15]. ИЧТ силно зависи от условията на работа, като например околната температура, скорост на въздушния поток или влажност, следователно трябва да се използва в контролирана среда.

В статията се представя опростена методика за топлинно моделиране и оптимизиране на топлоотвеждането при проектиране на светодиодни модули. Дискутират се някои основни моменти при оптимизиране на топлинни съпротивления посредством цифрово три-дименсионално симулиране в средата на Flotherm. Резултатите от симулациите са валидирани чрез

сравнение с експериментално получени данни от проведени термографски температурни измервания.

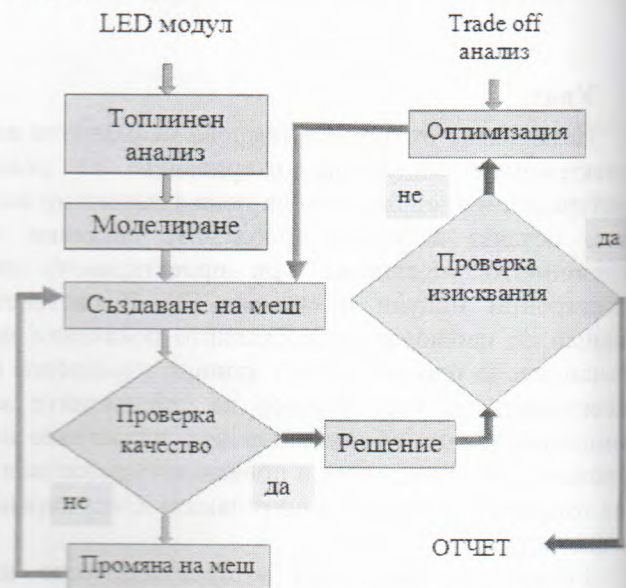
### Топлинно моделиране и симулации на електронни модули

Основните принципи на топлинната симулация са подобни на електрическите симулации, особено за топлопроводимостта в електронните модули.

Цялостната точност на симулираните топлинни модели, зависи от много фактори, които могат да се обобщат в следните по-важни групи: несигурни входни данни; неподходящ математически модел на реални физични явления; неподходяща форма на представяне на модела; неправилна софтуерна имплементация.

В изследването на електронни модули съществува комплексно взаимодействие между топлинният поток и топлинните характеристики на елементите, изграждащи модула, затова се изисква предварителен внимателен анализ на физичните им параметри и геометричните им размери. Обектите, които не могат да се представят с подробни детайли за изчисления в CFD анализа (като корпуси на чипове, топлинни тръби, вентилатори и др.) трябва да се моделират отделно - коректно и надеждно.

Прилагането на методиката за робастно топлинно проектиране се реализира на базата на процеса на топлинното управление, показан на Фиг.1.



Фиг.1. Процес на топлинно симулиране при проектиране на електронни модули

Трите най-важни изисквания за вземане на

решения са: познаване на веригата за топлинен пренос; идентифициране на еквивалентен топлинен модел за точно имитиране на модела; проектиране диаграма на процеса, с цел намаляване на грешките в модела и бързо получаване на резултати.

Светодиодните модули като всеки друг електронен модул, генерират топлина при своята работа. Обикновено в мощните светодиодни модули между 70 ÷ 80% от електрическата мощност се превръща в топлина. Продължителното излагане на високи температури може да съкрати значително срока на експлоатация и да доведе до повреда на светодиодния модул.

Топлинното проектиране на светодиодни модули може да се раздели на няколко нива – на ниво модул, на ниво платка и на ниво система.

Топлинното проектиране на ниво модул се осигурява от производителя на светодиодни устройства.

Тъй като голяма част от топлината генерирана в светодиодите модули се разсейва през печатната платка, изборът конструкция на печатна платка е от решаващо значение за правилното топлинно проектиране. Обикновено мощните светодиоди се монтират на MCPCB (Metal Core Printed Circuit Board) платки, но чрез използването на топлинни отвори в по-евтините FR4 платки значително могат да се подобрят топлинни характеристики с което да се разшири тяхното приложение.

На ниво система трябва да се вземе в предвид цялостното отвеждане на топлината от прехода на светодиода до околната среда. Между платката и радиатора трябва да има ефективна топлинна връзка, която се осъществява чрез подходящ избор на топлинен интерфейсен материал.

Радиатор се поставя на светодиодни модули, които разсейват голямо количество топлина. Ефективността на радиатора зависи от фактори като материал, брой ребра, дебелина на ребрата и тяхното разположение, дебелина на основата на радиатора и др.

Големият брой фактори, които оказват влияние при топлинното управление налагат използването на компютърно базирани методи за симулация на топлинните процеси.

### Експериментални резултати при използване от симулации и термографско валидиране на топлинни модели

В настоящата статия е предложена методология за топлинно проектиране на светодиодни модули

чрез използване на CFD код, който дава възможност за получаване на резултати с висока времева и пространствена резолюция. CFD моделиране може да се извърши с персонален компютър или лаптоп. Първата фаза на работа с кода е свързана с разработката на геометричен модел, при което се налага апроксимиране на сложните конфигурации с по-прости, което изисква значителни умения. Работата в тази фаза силно влияе на точността на крайния резултат, независимо колко стриктно се изпълнява последващия анализ. CFD пакет Flotherm е използван за въвеждане геометрията на проектираните модули. Извършено е топлинно проектиране на различни светодиодни конструкции и изследване на възможните решения за подобряване на топлообмена.

### • Топлинно моделиране на конструкция от светодиод и FR4 платка

В първия етап на изследването симулираме поведението на реална светодиодна конструкция с известни физически и работни параметри и се изготвя 3D топлинен модел.

Топлинният модел се състои от светодиод, който е монтиран на стандартна FR4 печатна платка. Конструктивните параметри на FR4 платката, използвани при топлинното проектиране за разгледания пример, са показани в таблица 1.

Таблица 1

Конструкция на FR4 платката при топлинното моделиране

Слой	Дебелина [µm]
Медно фолио (отгоре)	35
FR4	1000
Медно фолио (отдолу)	35

При топлинното моделиране на светодиода трябва предварително да се изчисли неговата топлинна мощност. Топлинната мощност разсейвана от светодиода се определя по формулата:

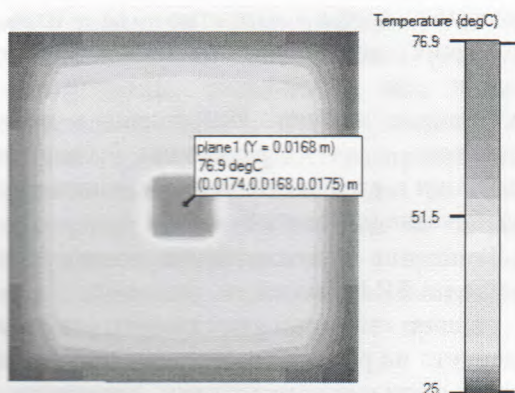
$$(1) P_{th} = V_f \cdot I_f \cdot H$$

където  $P_{th}$  е топлинната мощност, разсеяна от прехода на светодиода,  $V_f$  е напрежението в права посока,  $I_f$  е токът през светодиода, а  $H$  е процентът от мощността, която се превръща в топлина.

Замествайки във формула (1) за максимална разсейвана мощност на светодиод получаваме  $P_{th} = 0.83W$  (при  $I_f = 350\mu A$ ).

На фиг. 2 е показано топлинното разпределение в платката и температурата на прехода  $T_j$  на светодиода. При симулацията температурата на околната среда е  $25^\circ C$ , а при измерването  $23,4^\circ C$ .

Топлинният анализ на светодиодната конструкция показва, че топлината генерирана в светодиода не може да се разсее ефективно в околното пространство. Това до голяма степен се дължи на ниската топлопроводимост  $\lambda$  на FR4 слоя ( $0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Температурата на прехода  $T_j$  е доста висока  $76.8^\circ\text{C}$  (измерената с камера е  $75,1^\circ\text{C}$ ) и при повишаване на околната температура може да се влошат работните характеристики.



Фиг.2. Топлинно разпределение в платката

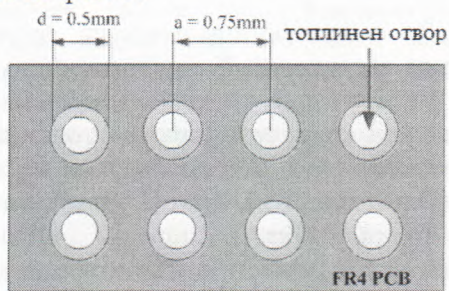
Тъй като по-голяма част от топлината се разсейва през платката, нейното влияние трябва да се анализира внимателно за намирането на оптимален вариант.

• **Топлинно моделиране на конструкция с топлинни отвори**

Едно от решенията, което се използва в топлинно управление за подобряване на топлообмена е формирането на топлинни отвори. Топлинните отвори могат да бъдат отворени (без запълващ материал) или запълнени с материал с висока топлопроводимост.

За подобряване на разсейването на топлина от FR4 платката в компютърно моделирания модел се добавят 8 топлинни отвора, непосредствено под светодиода.

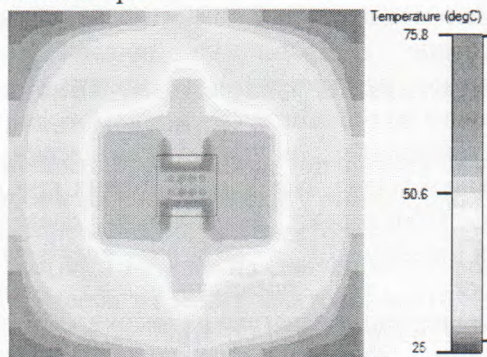
Конфигурацията на топлинните отвори е показана на фиг. 3.



Фиг.3. Конфигурация на топлинните отвори

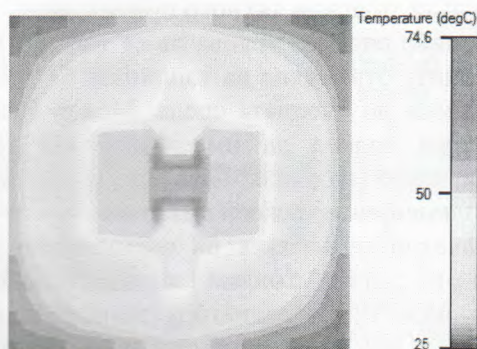
На фиг. 4а и б е показано температурното

разпределение от страна платка при наличие на топлинни отвори.



Фиг.4а. Топлинен профил на FR4 платка с топлинни отвори (без запълващ материал)

Симулациите на конструкциите с топлинни отвори показват значително намаляване на температурата на прехода  $T_j$ . При проектиране с топлинни отвори без запълващ материал, тя е  $75.8^\circ\text{C}$  (измерената е  $73^\circ\text{C}$ ), а при запълнени с мед топлинни отвори  $T_j$  е  $74.6^\circ\text{C}$  (измерената е  $72,1^\circ\text{C}$ ). В топлинното разпределение от страна платка се забелязва по-добро разсейване на топлината към периферията на платка. В конструкциите се забелязват топлинни стресове в контактите на светодиода с платката. Високите температури в тези области могат да доведат до отказ и са предпоставка за допълнителни техники за топлинно управление.



Фиг.4б. Топлинен профил на FR4 платка с топлинни отвори (със запълващ материал мед)

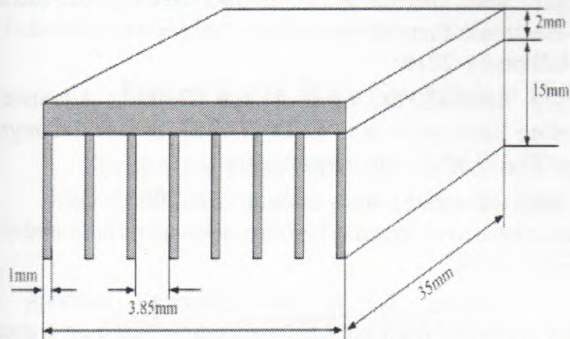
• **Топлинно моделиране на конструкция с различни радиатори**

Температурата на  $T_j$  може допълнително да се понижи чрез използването на радиатор.

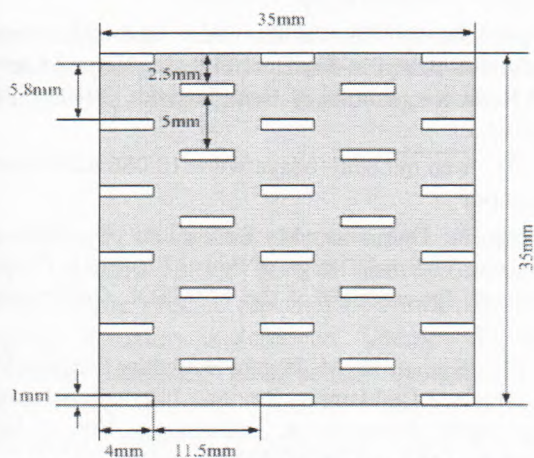
За целите на топлинното оптимизиране е изследвано въздействието на различни видове радиатори. Конструкциите на тези радиатори са показани на фиг. 5а и б.

За материал на радиаторите и на двете изследвани конструкции е зададен алуминий с

топлопроводимост,  $\lambda = 150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Топлинните разпределения в горната част на FR4 платката с различните радиатори, получени при симулациите, са показани на фиг. 6а и б.



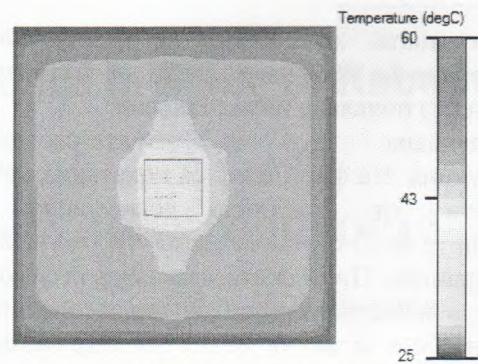
Фиг. 5а. Конструкция на радиатор с 8 плоски ребра



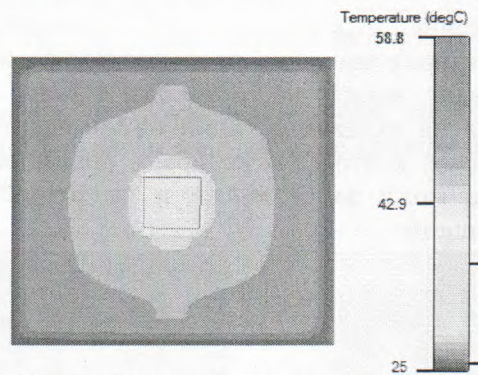
Фиг. 5б. Конструкция на радиатор с ребра тип – щифтове

Симулациите показват, че температурата на светодиода, охлаждан с радиатор с ребра тип щифтове е по-ниска – 58.°C (измерената е 57,3 °C) от температурата на конструкцията с плоски ребра, която е 60 °C (измерената е 69,1 °C). Това показва, че радиаторът с ребра тип щифтове разсейва топлината по-ефективно от този с плоски ребра. От показаното топлинно разпределение се вижда, че температурата в областта под електрическите контакти значително е намалела, от 76 °C (измерената е 75,3 °C) на 42°C (измерената е 40,8 °C).

Приложените техники за топлинно управление са достатъчно ефективни за намаляване на риска от топлинни стресове, дори и при по-високи температури на околната среда, с което се намаляват факторите за възникване на откази и се увеличава надеждността. Резултатите от симулациите показват, че дори при температура на околната среда 40°C, температурата не прехода не превишава 80°C (измерената е 79,2 °C).



Фиг. 6а. Топлинно разпределение от страна платка при наличие на радиатор с 8 плоски ребра



Фиг. 6б. Топлинно разпределение от страна платка при наличие на радиатор с ребра тип щифтове

#### • Термографски температурни измервания за валидиране на резултати от симулации

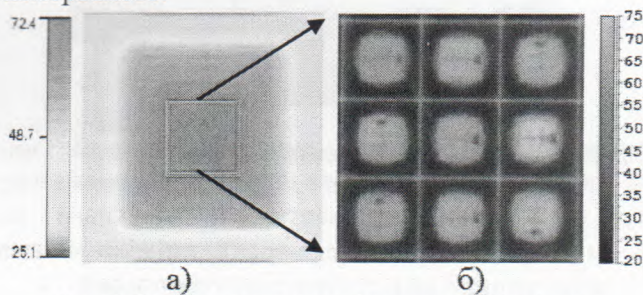
Компютърно моделираните прототипи и резултатите от топлинни симулации се верифицират с измерване на температурата с инфрачервена камера, за да се оцени достоверността и коректността на получените данни.

Два различни подхода се използват в ИЧТ: пасивен и активен [16]. В пасивната ИЧТ, радиацията, идваща от обекта-цел се измерва без никаква външна топлина стимулация. Тази информация може да се използва за измерване на температурата. Термографският подход може да се използва и за измерване температурата на прехода и за определяне на топлинни съпротивления. Пасивна ИЧТ се използва при контрола на качеството, но може да се използва и при верификация на резултатите от топлинни симулации. Изчисляване на температура от инфрачервени изображения е не само въз основа на измерената радиация, но също така зависи от калибрирането на камерата, както и от излъчвателната способност на повърхността на изследвания обект. Измервания са извършвани с камера SC640, като компенсиране влиянието на



излъчвателната способност е извършвано с построяване на емисивни карти на изследваните образци без подаване на захранване.

Изследвана е и мулти-светодиодна конструкция. На фиг. 7а и б са показани съответно резултати от топлинна симулация, като измерените за  $T_j$  стойности са с 4°C по-високи от симулирането. По-ниските измерени стойности се дължат в известна степен на апроксимацията на детайлния с компактия модел на модула, показан на фиг.7а, когато е пренебрегнато наличието на топлинния интерфейс материал. Процентът на грешката, обаче е приемлива за индустриални приложения. Фактът, че симулираната температура е по-висока от измерената показва, че цифровият модел не може да обясни някои явления на охлаждане. Един от източниците на охлаждане, който се игнорира, е радиация. Тази разлика може да се дължи и на точността на измерването.



Фиг. 7. Конструкция на радиатор с ребра тип - цифтове

### Заклучение

Използването на предложената методика, чрез експериментално изследване на различни светодиодни конструкции показва, че техниката за CFD моделиране може да се използва за симулиране на електронни модули. Резултатите от валидиране с термографски температурни измервания показват съответствие с топлинното разпределение при детайлни и компактни модели.

CFD е добър инструмент за подпомагане на топлинното управление за реални приложения, а в съчетание с термографско валидиране на резултатите води до постигане на висока разрешаваща способност и точност.

### Благодарности

Изследванията са подпомогнати от изследователски договор 142 PD 0057-03 към НИС при ТУС и „Mentor Graphics лаборатория за автоматизирано проектиране на електронни системи“.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] [www.hcltech.com/sites/default/files/Thermal\\_Management\\_in\\_Electronic\\_Equipment\\_01FEB10\\_V1\\_0.pdf](http://www.hcltech.com/sites/default/files/Thermal_Management_in_Electronic_Equipment_01FEB10_V1_0.pdf)
- [2] [www.thermalnews.com/main/news/global-market-for-electronic-thermal-management-expected-to-reach-56-billion-by-2018/](http://www.thermalnews.com/main/news/global-market-for-electronic-thermal-management-expected-to-reach-56-billion-by-2018/)
- [3] Tatchell, D., Parry, J., and Clark, I., *Advances in Cooling Electronics with CFD*, NAFEMS World Congress, June 10-12, 2013, Salzburg, Austria .
- [4] [www.electronics-cooling.com/2005/05/cfd-simulations-in-electronic-systems-a-lot-of-pitfalls-and-a-few-remedies/](http://www.electronics-cooling.com/2005/05/cfd-simulations-in-electronic-systems-a-lot-of-pitfalls-and-a-few-remedies/)
- [5] Cheng, T., et al., Thermal analysis and optimization of multiple LED packaging based on a general analytical solution. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(1), pp. 196-201
- [6] Sahray, D., et al., Study and Optimization of Horizontal-Base Pin-Fin Heat Sinks in Natural Convection and Radiation, *Journal of Heat Transfer*, 2010, 132(1), pp. 012503-13
- [7] [web.mit.edu/~bdaya/www/18.086%20Project%20Paper.pdf](http://web.mit.edu/~bdaya/www/18.086%20Project%20Paper.pdf)
- [8] N. Delmonte, M. Bernardoni, P. Cova and R. Menozzi, *Thermal Design of Power Electronic Devices and Modules*, Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Milan, p. 7.
- [9] Kumar, R., M. Jagath, *Boundary Element Methods for Thermal Problems – Review*, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 2 Issue 10, October – 2013, pp.2486-2496.
- [10] Lasance, C., *The Conceivable Accuracy of Experimental and Numerical Thermal Analyses of Electronic Systems*, *IEEE CPT* 25, 2002, pp. 366-382.
- [11] Fishburne, R., *IR thermography for electronic assembly design verification*, *InfraMation 2000*, Infrared Training Center, p.7.
- [12] [http://s3.mentor.com/public\\_documents/datasheet/products/mechanical/products/flotherm.pdf](http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/flotherm.pdf)
- [13] Gade, R., T. Moeslund, *Thermal cameras and applications: A survey*, *Mach. Vision Appl.*, 2014, 25, pp. 245–262.
- [14] Usamentlaga, et all, *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, *Sensors* 2014, 14, pp. 12305-12348.
- [15] La Rosa, G., A. Risitano, *Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*. *Int. J. Fatigue* 2000, 22, pp. 65–73.
- [16] Wiecek, B., *Review on thermal image processing for passive and active thermography*, *27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, Shanghai, China, 1–4 September 2005, pp. 686–689.