

УДК 628.9.041; 628.95; 628.932

А.А. Астахов, Д.Д. Каримбаев, А.О. Мисюнас, В.Г. Христюков

Оптимизация тепловых режимов в конструкциях световых приборов на полупроводниковых источниках света

У светодиодов порядка 75% подводимой энергии приходится на тепловые потери, поэтому для увеличения квантового выхода световых приборов необходимо наличие эффективных теплоотводящих конструкций. В статье рассмотрены материалы, используемые для изготовления конструкций печатных плат с повышенным теплоотводом. Представлены результаты моделирования Metal Core PCB (MCPCB) конструкций на основе стеклоэпоксидных, полиимидных и керамических теплопроводящих диэлектриков.

Ключевые слова: светодиод, печатная плата, материал, теплопроводность.

Задачи оптимизации тепловых режимов в конструкциях световых приборов. Разнообразие исполнений современных LED устройств, их применение для широкого спектра задач, необходимость отвода большого количества тепла, работа в жестких условиях эксплуатации – все это обуславливает поиск уникальных конструкторских решений. Для их реализации необходимы специальные материалы, обладающие высокой технологичностью и оправданной себестоимостью при обеспечении требуемых эксплуатационных характеристик изделия.

Перспективы глобального рынка освещения на ближайшие десятилетия просматриваются как полная замена традиционного освещения на светодиодный свет (led light). Одной из наиболее важных конструктивных задач в светодиодной системе освещения является способность системы отводить тепло от $p-n$ -перехода. Высокие рабочие температуры на $p-n$ -переходе отрицательно влияют на характеристики светодиодов, что приводит к снижению светового потока (светоотдачи) и срока службы [1, 5].

Как правило, у светодиодов в свет преобразуется 25% подводимой энергии, остальная приходится на тепловые потери в изделии. Для увеличения квантового выхода в конструкции светового прибора необходимо наличие эффективных теплоотводящих элементов или даже принудительного охлаждения. Поэтому управление тепловым режимом светодиодов приобретает особую значимость [2].

Используемые материалы в конструкциях печатных плат. Наряду с широко известными традиционными материалами для изготовления печатных плат используются комбинированные структуры MC PCB (Metal Core PCB) и композитные структуры DBC (Direct Bonded Copper) и DPC (Direct Plated Copper).

Комбинированная структура MC PCB – это структура, состоящая из теплоотводящего основания, например из алюминия, меди или их сплавов, на котором расположен теплопроводящий диэлектрический слой с высокой электрической прочностью, ламинированный, например, медной фольгой (рис. 1). В конструкции плат с металлическим основанием, где коэффициент температурного расширения (КТР) критичен, используют материалы с основанием из низкоуглеродистой стали с малым КТР.

Большинство технологических процессов изготовления печатных плат с металлическим основанием, таких как травление, нанесение защитной маски и защитного металлического покрытия (HASL), маркировка, аналогичны процессам изготовления печатных плат из традиционных материалов (например, FR-4) и отличаются только режимами механической обработки контура и сверловки.

Экологически нейтральные керамические материалы DBC с медными шинами, нанесенными методом диффузионного сращивания, могут быть выполнены на керамике Al_2O_3 (теплопроводность 24 Вт/м·К) или на высоколегированной оксидной керамике AlN с улучшенной механической прочностью (теплопроводность 170 Вт/м·К).

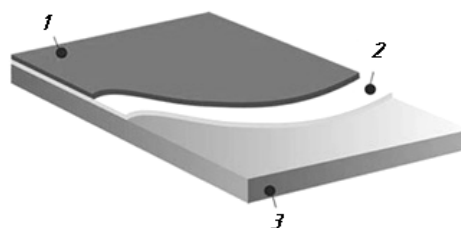


Рис. 1. Комбинированная структура MCPCB:

1 – медная фольга (35–350 мкм);

2 – диэлектрик (17–150 мкм);

3 – металлическое основание

(0,5–3,2 мм)

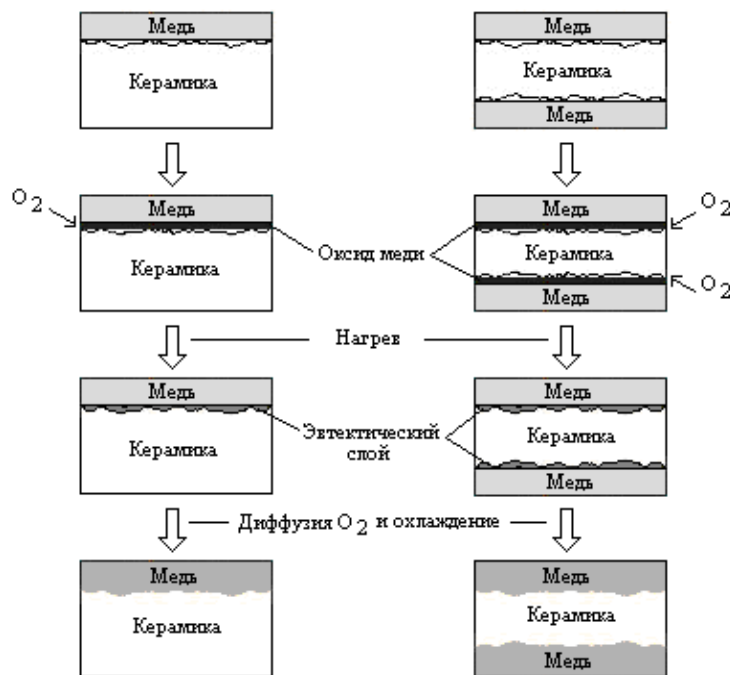


Рис. 2. Процесс получения DBC керамики из Al_2O_3 с односторонней и двухсторонней металлизацией

Высокая по сравнению с другими изоляционными материалами теплопроводность оксида и нитрида алюминия делает DBC керамику незаменимым материалом для конструкций, требующих хорошей теплоотвод [3]. Такие конструкции (рис. 2) отводят примерно в 2 раза больше тепла по сравнению с МС РСВ [2].

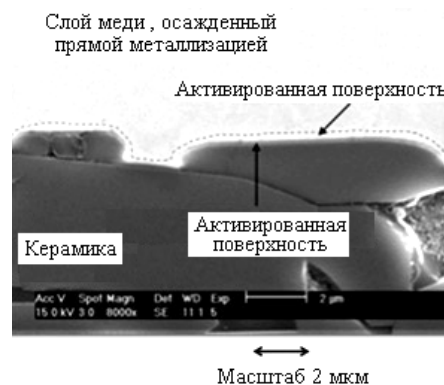


Рис. 3. Структура керамической подложки DPC [4]

Фирмой TongHsingElectronic Ind. предложен новый вариант изготовления плат на керамическом основании с прямой металлизацией меди DPC (рис. 3). Он был создан для замены DBC плат, поскольку DPC платы имеют ряд преимуществ: лучшие электрические, тепловые и механические характеристики, температурную стабильность до 340°C и более низкую стоимость [4].

Отвод тепла от полупроводниковых источников света. Эффективность передачи тепла характеризуется тепловым сопротивлением многослойных конструкций. Чем ниже тепловое сопротивление, тем лучше отвод тепла. На практике распределение тепла внутри устройства никогда не бывает равномерным, всегда имеются так называемые «горячие» точки. Например, если источником тепла является кристалл, то передача тепла от него в окружающую среду осуществляется по конусообразному каналу (конической тепловой трубе, рис. 4) аналогично тому, как распространяются звуковые волны или свет [6].

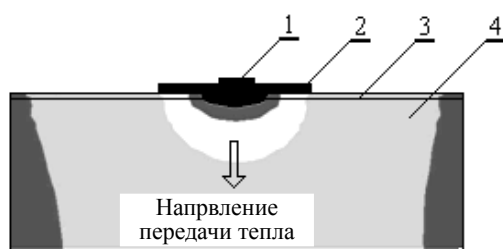


Рис. 4. Распределение тепла в конструкции МСРСВ:
1 – полупроводниковый кристалл; 2 – контактная площадка;
3 – диэлектрический теплопроводящий слой;
4 – металлическое основание

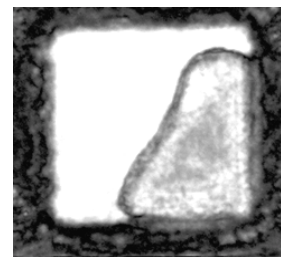


Рис. 5. Акустическое изображение дефекта в области приклейки кристалла [7]

Тепловое сопротивление многослойной структуры (см. рис. 4), соответственно эффективность передачи тепла от кристалла в окружающую среду, зависит от качества контакта (площади касания) материалов структуры. На рис. 5 [7] представлено изображение дефекта монтажа кристалла. Серые области свидетельствуют о хорошем контакте кристалла с контактной площадкой, а белые – об отсутствии соединения, что привело к образованию теплового барьера за счет воздушной пробки, которая снижает теплообмен и может привести к перегреву кристалла.

Для оценки эффективности отвода тепла чаще всего используют упрощенную модель (табл. 1) и тепловое сопротивление рассчитывают как последовательное соединение сопротивлений слоев конструкции (рис. 6).

Электрическая система		Термическая система	
	Напряжение U (В)	Температуры T ($^{\circ}\text{C}$)	
	Ток I (А)	Тепловая мощность Φ (Вт)	
	Сопротивление R (Ом)	Тепловое сопротивление R_T (К/Вт)	
	$R = \frac{U_1 - U_2}{I}$	$R_T = \frac{T_1 - T_2}{P}$	
	$P = U \cdot I$		

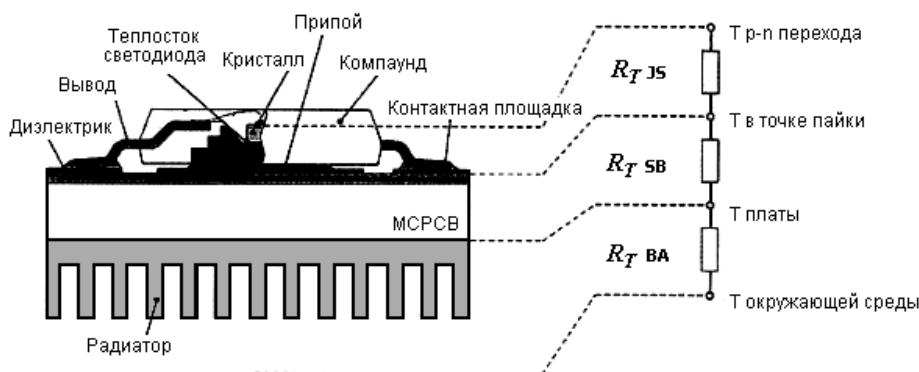


Рис. 6. Конструктивная схема светодиода на печатной плате, установленной на радиатор и цепь его тепловых сопротивлений [7]

На рис. 7 схематически изображены тепловые потоки от полупроводникового кристалла. В конструкции с дискретным элементом между теплоотводящим радиатором и медным основанием корпусного элемента используется изолятор из слюды. В конструкции DBC-керамика припаяна к радиатору.

Из рис. 7 видно, что в конструкции с DBC-керамикой тепло, выделяемое кристаллом, первоначально распределяется в верхнем слое металлизированной керамики, равномерно распределяется по всей толщине изолирующей теплопроводящей подложки, проходит через нижний слой металлизации и передается в металлическое основание. Таким образом, конус тепловой трубы становится шире и, следовательно, снижается тепловое сопротивление [8]. Это означает, что простое увеличение площади керамической подложки может обеспечить более эффективный отвод тепла, чем использование сложного радиатора с вентилятором.

Для мощных светодиодов могут использоваться различные конструктивные методы охлаждения за счет конвекции. Например, охлаждающие пластины радиатора, разработанные фирмой Hauber&Graf, термически друг от друга изолированы [2]. Отвод тепла от светодиодной платы на пластины осуществляют цилиндрические шипы, что увеличивает площадь отвода тепла от радиатора в целом за счет конвекции (рис. 8).



Рис. 8. Система охлаждения фирмы Hauber&Graf [2]

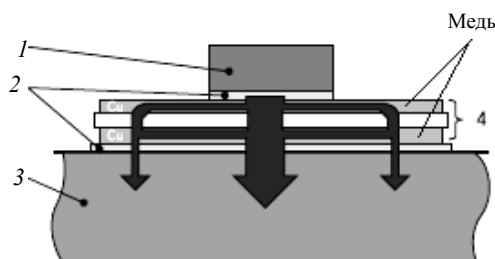
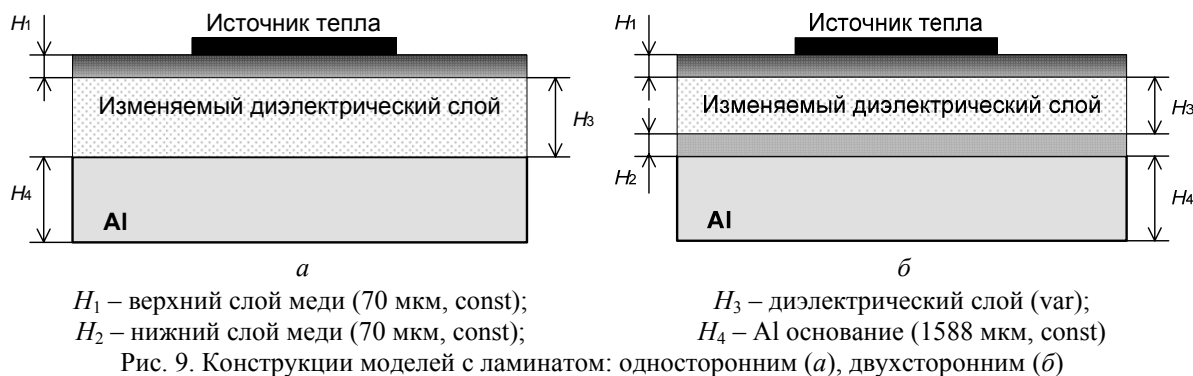


Рис. 7. Распределение тепла в конструкции с кристаллами и DBC-керамикой [8]: 1 – полупроводниковый кристалл; 2 – слой припоя; 3 – металлическое основание; 4 – DBC-керамика (состоит из трех слоев)

Моделирование базовых несущих конструкций (БНК). Основная задача моделирования – выбор оптимальных материалов конструкции и сравнение их по эффективности теплоотвода. Полупроводниковые источники света могут состоять

из n -го количества светодиодных излучателей, при этом на каждый излучающий элемент предусмотрено определенное количество площади и объема на базовой несущей конструкции. Для упрощения задачи определения эффективности используемых материалов в БНК будем рассматривать систему с одним излучающим элементом. При этом примем условие, что кристалл (источник тепла) посажен на электронейтральную теплоотводящую площадку через термоинтерфейс с тепловым сопротивлением, равным нулю (рис. 9). Таким образом, все выделяемое тепло с излучающего элемента без потерь передается теплоотводящей контактной площадке H_1 .



Примем толщины верхнего слоя меди H_1 и алюминиевого теплоотводящего основания H_4 постоянными во всех рассматриваемых моделях (см. рис. 9, *a*). Варьируемые факторы – толщина и природа диэлектрического материала H_3 , через который необходимо отвести тепло от кристалла. При передаче тепла верхнему слою H_1 , вследствие малой его толщины, тепло практически мгновенно распространится на всю площадь теплоотводящей площадки ($15 \times 15 \text{ мм} = 225 \text{ мм}^2$). Данная модель является частным случаем, когда источник тепла (кристалл) смонтирован к теплоотводящей площадке идеально, без дополнительных тепловых барьеров. Максимальная температура источника тепла является постоянной во времени и равна 80°C . Все условия и ограничения, принятые для модели (см. рис. 9, *a*) распространяются на приведенные модели с двухсторонним ламинатом (см. рис. 9, *б*).

Тепловое сопротивление слоя R_T (К/Вт) рассчитывается:

$$R_T = \frac{H}{\lambda \cdot S}, \quad (1)$$

где S – поперечное сечение тепловой цепи, м^2 ; H – длина участка тепловой цепи (толщина слоя), м; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$.

Модель 1. Двухсторонний фольгированный материал FR-4. На рис. 10 изображена двухсторонняя ПП из FR-4 на теплоотводящем алюминиевом основании.

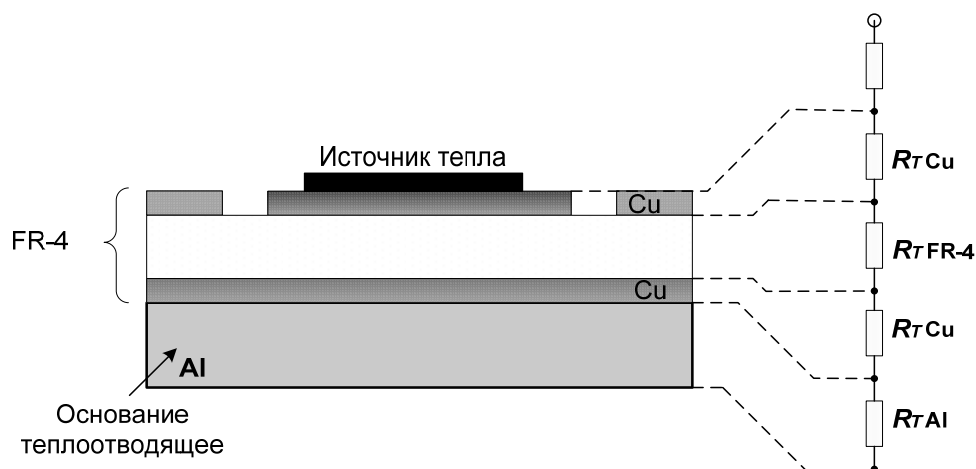


Рис. 10. Плата из двухстороннего FR-4 и эквивалентная схема теплового сопротивления

Теплопроводность слоев платы из двухстороннего FR-4

Слой / материал	Толщина, мкм	Теплопроводность Вт/м·К
Верхний слой Cu	70	398
Диэлектрический слой FR-4	360	0,2
	100	0,2
Нижний слой Cu	70	398
Алюминиевое основание Al	1588	150

Используя данные, приведенные в табл. 2, и формулу (1), рассчитаем теплопроводность материалов конструкции (см. рис. 10), например, для толщины H_3 , равной 360 мкм:

$$R_{T\text{ FR4PCB}} = R_{T\text{ Cu}} + R_{T\text{ FR4}} + R_{T\text{ Al}} = 8,048 \text{ K/Вт}.$$

В данной модели основную составляющую теплового сопротивления вносит диэлектрический слой FR-4 (H_3), значения которого составляют 8,048 К/Вт при толщине слоя 360 мкм и 2,22 К/Вт при толщине слоя 100 мкм.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что использование одностороннего и двухстороннего фольгированного FR-4 с толщиной диэлектрического слоя, равной 360 мкм, малоэффективно. Снижение теплового сопротивления, возможно при уменьшении толщины диэлектрического слоя (рис. 11, б). На рис. 11, а представлено распределение тепла в конструкции, промоделированное при помощи CAD-Ansys.

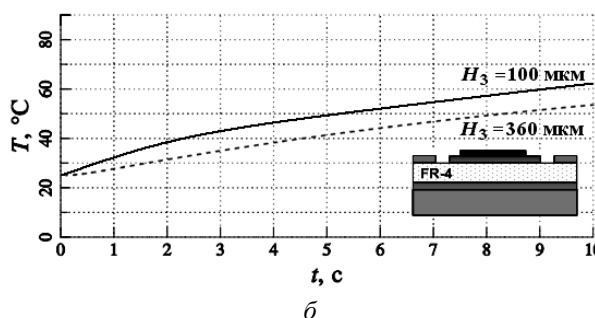
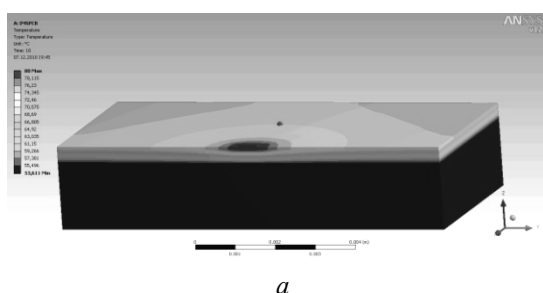


Рис. 11. Распределение тепла в плате из двухстороннего FR-4 (а) и зависимость температуры нагрева нижней грани основания от времени (б)

Основное распределение тепла в конструкции происходит только в верхнем слое меди (см. рис. 11, а) и лишь небольшая часть переходит в алюминиевое основание.

Для сравнения всех моделей, рассчитанных в CAD-Ansys, по эффективности перехода тепла в алюминиевое основание принято время равное 5 с. Например, при температуре чипа 80 °С и H_3 , равной 360 мкм, алюминиевое основание за 5 с нагреется до 42 °С, при H_3 , равной 100 мкм, – до 50 °С (см. рис. 11, б).

Модель 2. DBC-керамика из оксида алюминия. На рис. 12 изображена двухсторонняя ПП на DBC-керамике из Al_2O_3 с теплоотводящим алюминиевым основанием.



Рис. 12. Платы из двухсторонней DBC-керамики и эквивалентная схема теплового сопротивления

Теплопроводность слоев платы из DBC-керамики Al_2O_3

Слой / Материал	Толщина, мкм	Теплопроводность Вт/м \cdot °K
Верхний слой Cu	70	398
DBC керамика Al_2O_3 (оксид алюминия)	360	27
Нижний слой Cu	70	398
Алюминиевое основание Al	1588	150

Используя данные, приведенные в табл. 3, и формулу (1), рассчитаем теплопроводность материалов конструкции (рис. 12):

$$R_{T \text{ DBCPCB}} = R_{T \text{ Cu}} + R_{T \text{ DBC}} + R_{T \text{ Cu}} + R_{T \text{ Al}} = 108 \cdot 10^{-3} \text{ K/Вт}.$$

Эффективность использования DBC-керамики Al_2O_3 иллюстрируют отношения тепловых сопротивлений модели 1 при H_3 , равной 360, и 100 мкм к модели 2, дают уменьшение теплового сопротивления соответственно в 74 и 20,5 раза.

На рис. 13, а представлено распределение тепла в конструкции, промоделированное при помощи CAD-Ansys.

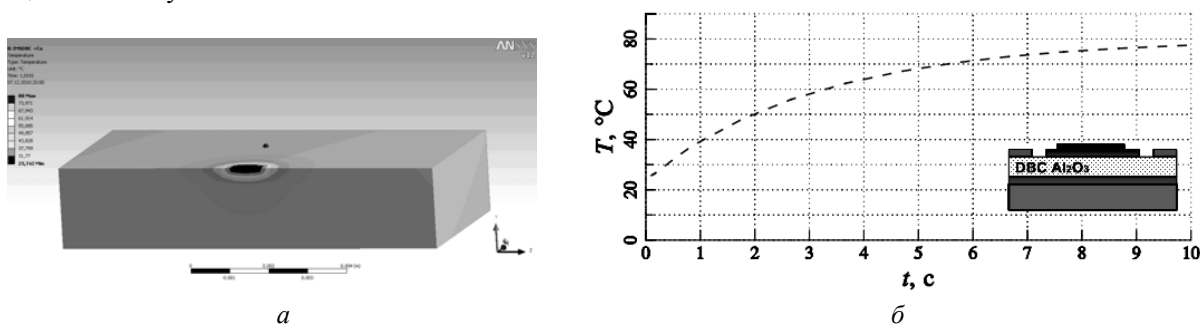


Рис. 13. Распределение тепла в плате из DBC-керамики Al_2O_3 (а) и зависимость температуры нагрева нижней грани основания от времени (б)

Основное распределение тепла в конструкции происходит в верхнем слое меди (см. рис. 13, а). Переход тепла в алюминиевое основание значительно эффективнее по сравнению с моделью 1. При температуре чипа 80 °C за 5 с алюминиевое основание нагреется до 67 °C (см. рис. 13, б), т.е. эффективность теплоотвода модели 2, по сравнению с моделью 1, выше на 25 °C.

Модель 3. DBC-керамика из нитрида алюминия. Для получения керамики из AlN поверхность нитрида алюминия должна быть преобразована в оксид алюминия. Следовательно, в конструкции рис. 14, будут присутствовать тонкие слои оксида алюминия, и соответственно в эквивалентной схеме появятся два дополнительных тепловых сопротивления R_T технологического слоя оксида алюминия.

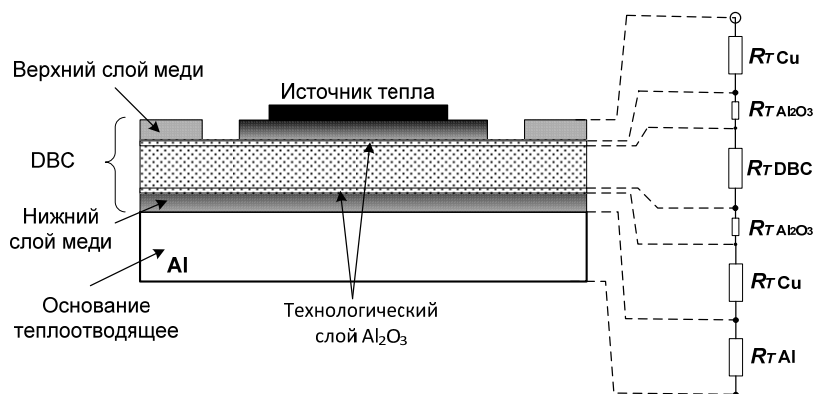


Рис. 14. Платы из двухсторонней DBC-керамики и эквивалентная схема теплового сопротивления

Используя данные, приведенные в табл. 4, и формулу (1), рассчитаем теплопроводность материалов конструкции (см. рис. 14) печатной платы на DBC-керамике из нитрида алюминия:

$$R_{T \text{ DBCPCB}} = R_{T \text{ Cu}} + R_{T \text{ Al}_2\text{O}_3} + R_{T \text{ DBC}} + R_{T \text{ Al}_2\text{O}_3} + R_{T \text{ Cu}} + R_{T \text{ Al}} = 58,027 \cdot 10^{-3} \text{ K/Вт}.$$

Теплопроводность слоев платы из DBC-керамики AlN

Слой / материал	Толщина, мкм	Теплопроводность Вт/м·К
Верхний слой Cu	70	398
Технологический слой Al ₂ O ₃	2–5	27
DBC-керамика AlN (нитрид алюминия)	360	170
Технологический слой Al ₂ O ₃	2–5	27
Нижний слой Cu	70	398
Алюминиевое основание	1588	150

Из расчетов видно, что использование керамики из нитрида алюминия практически в два раза эффективней, чем из оксида алюминия (модель 2). На рис. 15 представлено распределение тепла в конструкции, промоделированное при помощи CAD-Ansys.

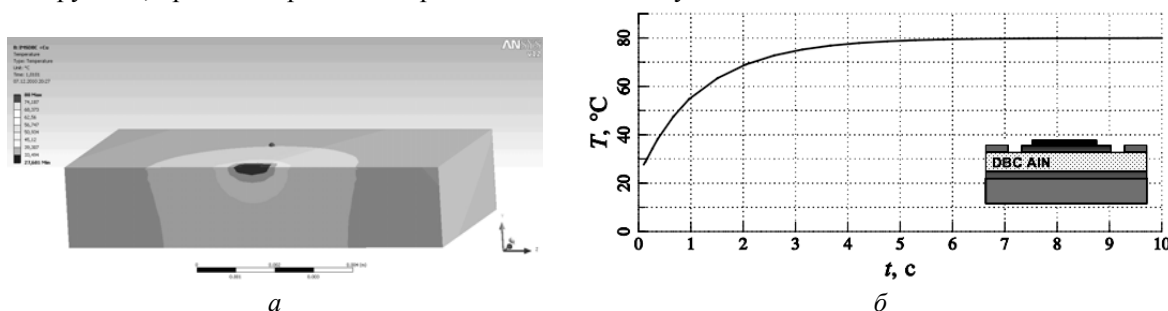


Рис. 15. Распределение тепла в плате из DBC-керамики AlN (а) и зависимость температуры нагрева нижней грани основания от времени (б)

При распределении тепловой энергии от верхних слоев к алюминиевому основанию образуется усеченный конус (тепловая труба, см. рис. 15, а) с малой разностью по основаниям. Перенос тепла в конструкции происходит от верхнего слоя меди в алюминиевое основание, при этом тонкие слои оксида алюминия не являются препятствием для переноса тепла. При температуре чипа 80 °С алюминиевое основание за 5 с нагреется до 78 °С (см. рис. 15, б), т.е. эффективность теплоотвода модели 3 по сравнению с моделью 2 выше на 11 °С.

Модель 4. БНК на основе материала компании DUPONT

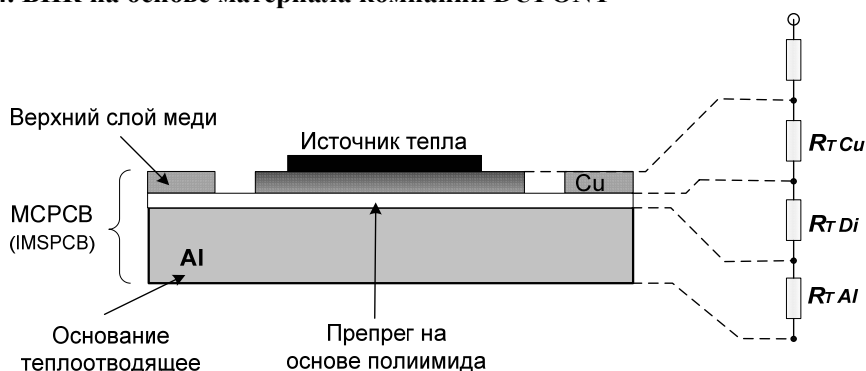


Рис. 16. Плата из материала компании DUPONT и её эквивалентная схема теплового сопротивления

Используя данные табл. 5 и формулу (1) вычислим тепловое сопротивление платы.

$$R_T \text{ МСРСВ} = R_T \text{ Cu} + R_T \text{ Di} + R_T \text{ Al} = 0,36 \text{ K/Вт}$$

Теплопроводность слоев платы МСРСВ из материала компании DUPONT

Слой / материал	Толщина, мкм	Теплопроводность Вт/м·К
Верхний слой Cu	70	398
Диэлектрический слой (препрег)	17	0,24
Алюминиевое основание	1588	150

Из расчета можно сделать вывод, что тепловое сопротивление платы из материала компании DUPONT много ниже, чем в модели 1. На рис. 17 представлено распределение тепла в конструкции, промоделированное при помощи CAD-Ansys.

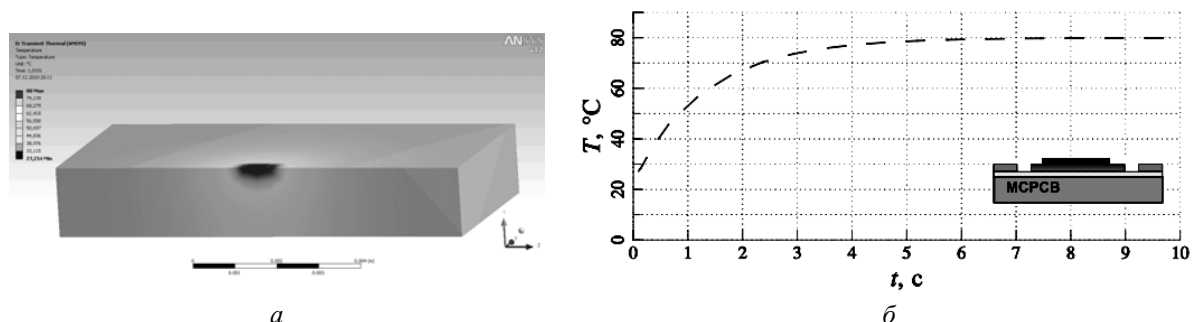


Рис. 17. Распределение тепла в плате из материала компании DUPONT (а) и зависимость температуры нагрева нижней грани основания от времени (б)

При распределении тепла в конструкции образуется явно выраженный тепловой конус (см. рис. 17, а). При температуре чипа 80 °С алюминиевое основание за 5 с нагреется до 79 °С (см. рис. 17, б), т.е. модель 4 по эффективности теплоотвода значительно превышает рассмотренную модель 1 и сравнима с конструкциями на DBC-керамике.

Повышение эффективности теплоотвода при использовании материала компании DUPONT можно объяснить наличием тонкого диэлектрического теплопроводящего слоя, равного 17 мкм.

Заключение. Анализ рассмотренных конструктивных решений позволяет сделать следующие выводы:

- Платы из DBC-керамики являются эффективным способом отвода тепла, однако использование её являются дорогостоящим техническим решением.
- Результаты, полученные для конструкций из материала компании DUPONT, перспективны для разработки БНК на их основе.
- Использование стеклотекстолита FR-4 на металлическом основании, в качестве конструкций ПП может быть рекомендовано для изготовления световых приборов на основе маломощных полупроводниковых источников света.

Данная работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, по договору с ОАО «НИИПП», г. Томск, «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства» в рамках Государственного контракта Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Cree® XLamp® Long-Term Lumen Maintenance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cree.com/products/pdf/XLampXR-E_lumen_maintenance.pdf, свободный (дата обращения: 24.09.2011).
2. Peter Marx. LED-Anwendungstechnik // Licht. – 2009. – №3. – С. 184-188.
3. Юрген Шульц-Хардер (Shulz-Harder J.) Медно-керамические подложки DBC: новые возможности, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники / пер. Валева Сергей // Компоненты и технологии. – 2005. – №3. – С. 129–132.
4. DPC (Direct Plated Copper) Metallized Substrate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metallized-ceramic.ready-online.com/dpc.html>, свободный (дата обращения: 10.11.2010).
5. Светодиодное освещение: справочник / Philips [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lighting.philips.ru/pwc_li/ru_ru/connect/assets/LED%20lighting%20explained.pdf свободный (дата обращения: 10.11.2010).
6. Исламгазина Л. Применение различных материалов в системах охлаждения силовых полупроводниковых приборов, в том числе силовых модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. – 2005. – №3. – С. 96–99.
7. Бармашов И.С. Ультразвук контролирует качество теплоотводов // Печатный монтаж. – 2009. – №6. – С. 28–31.

8. Исламгазина Л. Особенности сборки силовых модулей в условиях перехода к бессвинцовым технологиям // Компоненты и технологии. – 2006. – №9.

9. Лотар Ноэль (Lothar Noelle). Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – №3. – С. 13–15.

Астахов Алексей Анатольевич

Техник I кат. СКБ «Смена» ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 53-00-53

Эл. почта: lexa_kltn@bk.ru

Каримбаев Дамир Джималитдинович

Начальник лаборатории солнечных элементов ОАО «НИИПП»

Тел.: 8 (382-2) 48-82-00

Эл. почта: karimbdd@mail.ru

Мисюнас Альгис Олегович

Начальник СКБ «Смена» ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 53-00-53

Эл. почта: m1985@sibmail.com

Христюков Владимир Григорьевич

Доцент каф. радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) ТУСУРа

Тел.: 8-961-890-25-85

Эл. почта: m1985@sibmail.com

Astakhov A.A., Karimbaev D.D., Misunas A.O., Hristyukov V.G.

Optimization of thermal conditions in the construction of optical devices based on semiconductor light sources

LEDs have about 75% of input energy, due to thermal losses, and therefore to increase the quantum yield of light devices, the presence of effective heat-removing constructions is necessary. The article deals with the materials, which are used to design printed circuit boards with high heat dissipation. Here are the results of modeling of the constructions based on Metal Core PCB (MCPCB) FR-4, polyimide and heat-conducting ceramic insulators.

Keywords: LED, PCB, material, thermal conductivity.
