

Армин Фейтл (Armin Veitl), к. т. н. | armin.veitl@altair.de  
Перевод: Андрей Новиков | andrej.novikov@uni-rostock.de

# Технологии сборки

## Эффективный теплоотвод с помощью керамических подложек

Успех применения светодиодов ограничен их небольшой допустимой температурной нагрузкой. Новые разработки чаще всего направлены на оптимизацию теплоотводов и редко — на оптимизацию слоев между теплоотводом и светодиодами. Новые концепции и другие материалы имеют значительный потенциал для оптимизации, упрощения и повышения надежности. При использовании керамики в качестве теплоотвода, носителя электронных модулей и элемента дизайна необходима определенная смелость и открытость для новых решений. Метод моделирования, базирующийся на вычислительной гидродинамике (Computational Fluid Dynamics), дополняет оптимизацию теплоотвода и технический дизайн продукта. Автор статьи объясняет новый метод, описывает концепцию и показывает, каким образом можно достичь улучшений и каких именно.

### Что означает высокая температура?

Светодиоды известны как эффективные, небольшие источники света. При этом они действительно небольшие до тех пор, пока не учитывается их система теплоотвода. Лампы накаливания работают при температуре до 2500 °С. Светодиоды значительно холоднее, и многие удивляются тому, что тепло может представлять собой такую большую проблему. Не в последнюю очередь из-за использования технологии полупроводников они выдерживают максимально около 100 °С. Согласно закону сохранения энергии тепло должно переходить на окружающие компоненты. Имеется лишь небольшой перепад температур между максимальной температурой в 100 °С и температурой окружающей среды 25 °С для того, чтобы отдать теплоэнергию. В связи с этим необходима большая поверхность и оптимальная система распределения тепла.

### Группы оптимизации

В группу 1 входят сами светодиоды. (Эта группа не будет затронута в последующем

рассуждении.) Ее главными элементами являются кристалл и теплоотвод — медная подложка, которая связывает кристалл с нижней стороной светодиода. Термически этот метод прямого соединения кристалла светодиода с теплоотводом идеален. По причине массового производства такая концепция неосуществима с коммерческой точки зрения, в связи с чем светодиод рассматривается тут как стандартизированное, не поддающееся изменениям изделие из каталога.

К группе 2 относится теплоотвод, который отводит энергию от источника тепла к теплоотводу (окружающие элементы/воздух). Чем лучше свойства используемого материала, тем меньше необходимость его ламинирования и тем эффективнее работает система охлаждения. Некоторые производители уже используют материалы, которые они целенаправленно выбирают и применяют, основываясь на их дизайне.

Группа 3 механически объединяет названные модули, электрически изолирует и служит отводу тепла. Это кажется противоречивым, так как большинство материалов с хорошей теплопроводностью имеют и хорошую электро-

проводность. И наоборот, практически любой электрически изолированный материал является тепловым барьером. В большинстве случаев светодиод припаивается на печатную плату, после чего на него приклеивается металлический теплоотвод. Таким образом, можно сохранить изначальную функцию печатной платы. Хотя существуют печатные платы с разной теплопроводностью, они являются препятствием для отвода тепла.

Три группы представляют собой систему распределения тепла и будут исследованы на предмет наличия потенциала для оптимизации (рис. 1). Возможной оптимизацией может быть исключение группы 3.

### Сопоставимость систем — термическое суммарное сопротивление $R_{tt}$

Термическое сопротивление светодиодов (вплоть до теплораспределителя) и теплоотводов указывается производителем. К сожалению, часто при анализе не учитывается значительное влияние группы 3, то есть промежуточных слоев. Если сложить все термические сопротивления, начиная с распределителя светодиода и заканчивая окружающими компонентами, то образуется термическое суммарное сопротивление  $R_{tt}$  (рис. 2).  $R_{tt}$  позволяет получить правильное сравнение решений управления теплом с первой оценкой эффективности.

$R_{tt}$  передает термическое суммарное сопротивление от теплораспределителя светодиода окружающим компонентам. Конкретная величина облегчает сравнение систем охлаждения и их эффективности.

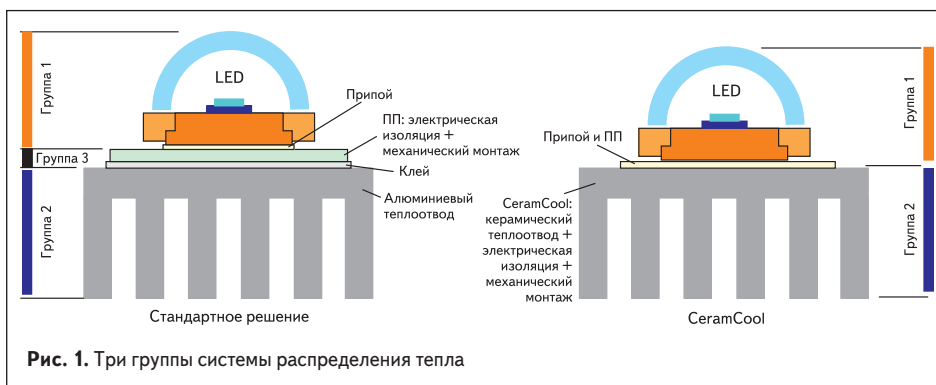


Рис. 1. Три группы системы распределения тепла

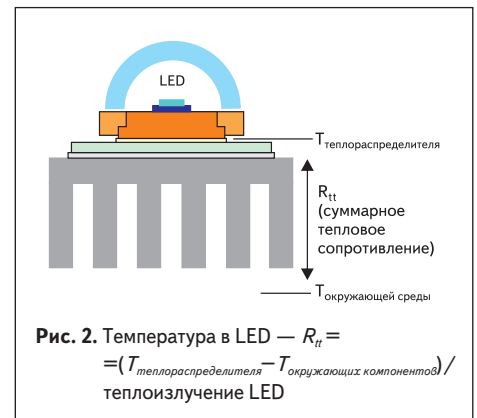
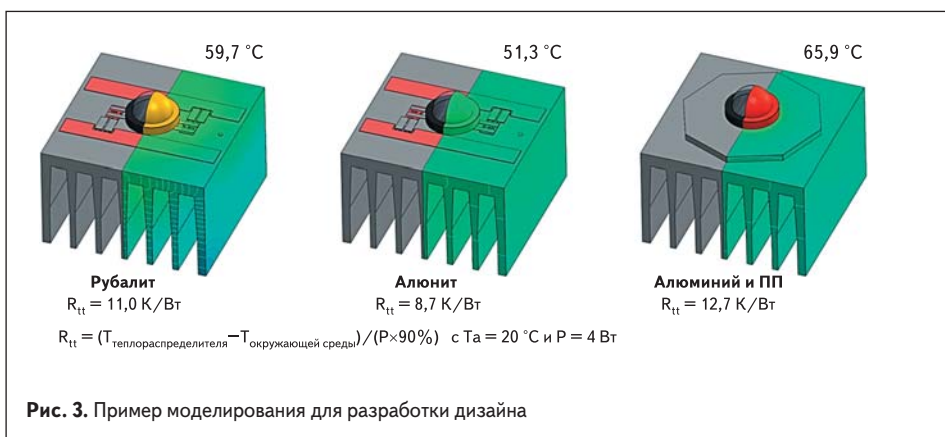


Рис. 2. Температура в LED —  $R_{tt} = (T_{\text{теплораспределителя}} - T_{\text{окружающих компонентов}}) / \text{теплоизлучение LED}$



### Керамика: два в одном

Оптимизация теплоотвода является общепринятой на рынке. Доступны сотни различных конструкций, в основном из алюминия. Но для заслуживающего внимания улучшения работы теплоотвода необходимо оптимизировать группу 3 или полностью ее исключить. Электрическая изоляция должна быть создана самим теплоотводом благодаря использованию других материалов. Решением является керамика. Керамика, например рубалит ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или алюминит (AlN), объединяет в себе решающие характеристики: хорошую электрическую изоляцию и теплопроводность. Рубалит обладает меньшей, алюминит приблизительно такой же теплопроводностью, как и алюминий.

С другой стороны, рубалит дешевле алюминита. Их термический коэффициент расширения соотношен с коэффициентом расширения полупроводников, они имеют фиксированную форму, устойчивы к коррозии и соответствуют директиве RoHS. Являясь полностью неактивным, это компонент системы, который последним выходит из строя. Упрощенная структура (без клея, изоляционных слоев) в сочетании с прямым и длительным соединением между High-Power-LED и CeramCool создает оптимизированные условия эксплуатации для всей конструкции. Простыми словами: то, чего нет в наличии, не может устаревать, а материалы, которые одинаково расширяются, не отсоединяются друг от друга. В результате чего возникает долговременная стабильность, надежное распределение тепла и необычайно высокая надежность. Был заявлен патент, и концепция получила название CeramCool.

### Теоретические основы

Керамический теплоотвод CeramCool, по словам изготовителя, является эффективным сочетанием платы-носителя и керамического теплоотвода, который обеспечивает надежный отвод тепла с термически чувствительных компонентов и схем.

Он обеспечивает прямое и прочное соединение компонентов. К тому же керамика является электроизолирующим материалом, и на ней могут быть созданы контактные площадки в виде площадок металлизации. Также возможна печать с индивидуальным дизайном проводников, при необходимости и в 3D. Для применений в сило-

вой электронике и при большой величине тока возможно использование технологии DBC (Direct Copper Bonding) — прямой медной металлизации. Теплоотвод является в таком случае элементом-носителем модуля, и на нем могут быть монтированы светодиоды или другие компоненты, как и в случае с обычной печатной платой. Система напрямую отводит тепло без каких-либо термических барьеров.

### Приемочные испытания и контроль

Для проверки были проведены контрольные испытания образцов, которые базировались на многочисленных примерах моделирования. Для того чтобы спрогнозировать термическое поведение теплоотвода различных конструкций, был разработан метод моделирования, основанный на вычислительной гидродинамике (CFD). Теплоотвод был оптимизирован для 4-Вт отвода избыточного тепла и служил в качестве основы для сравнения. Оптимизированная геометрия позволяет при использовании CeramCool эксплуатацию 4-Вт LED с максимальной температурой, не превышающей 60 °C. Результаты моделирования были подтверждены измерениями. Конструкция теплоотвода представляет собой квадрат (38×38×24 мм) и состоит из длинных тонких пластин, находящихся на большом расстоянии друг от друга. Такая же структура из алюминия с 4-Вт LED на печатной плате дает значительно более высокие значения. В зависимости от тепловой проводимости (от  $\lambda = 4$  Вт/мК до  $\lambda = 1,5$  Вт/мК) печатной платы температура увеличивается с 6 до 28 К (рис. 3, 4).

Разница в 6 К означает значительную нагрузку критических компонентов. Термическое суммарное сопротивление керамической структуры с рубалитом по крайней мере на 13% лучше, чем с алюминием. При использовании алюминита можно также достичь улучшения более чем на 31%. Если основываться на разнице температур в 28 К, результаты будут намного лучше.

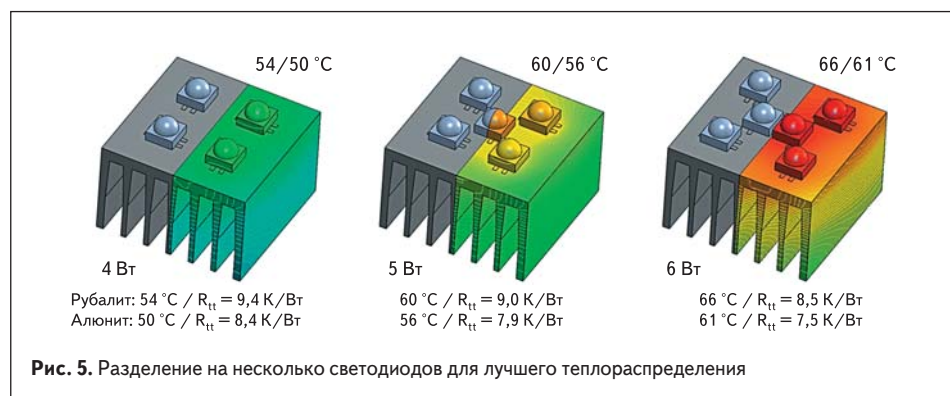
Для разработки дизайна был представлен еще один пример моделирования. Измерения на испытательных образцах были использованы для подтверждения результатов.

### Гибкость концепции

Концепция и задачи оптимизации гибкие. Светодиод может работать при оптимальной температуре, что продлевает его срок службы, или же может эксплуатироваться более жестко, производить больше лм/Вт при более высокой температуре и выходить из строя раньше. Диапазон от 50 до 110 °C является нормой. Для более высокой световой мощности 4-Вт теплоотвод может также эксплуатироваться с 5- или 6-Вт светодиодами. Разделение на большее количество 1-Вт светодиодов улучшает распределение тепла, результатом чего являются 65 °C с 5-Вт светодиодами и 70 °C с 6-Вт светодиодами (рис. 5).

### Компактный теплоотвод с плотным монтажом

Из-за прямого и прочного интерметаллического соединения с электрически изолированным CeramCool керамический теплоотвод



принимает больше тепла и становится горячее. Он разгружает светодиоды и делает именно то, для чего он и предназначен: охлаждает критические компоненты. Уменьшенная температура кристалла делает возможной меньшую поверхность. Теплоотвод может быть уменьшен. Или на него крепятся индивидуально разработанные структуры проводников, и на теплоотводе плотно устанавливаются электронные компоненты.

#### Средство для активного охлаждения лишь в 1,5 мм от источника тепла

При высокой удельной мощности воздушное охлаждение не справляется со своими функциями, это означает, что необходимо жидкостное охлаждение. Возможно использование жидкостного охлаждения CeramCool, преимущества которого в том, что керамика инертна и устойчива к соли, кислоте и щелочи. Таким образом, электрокоррозия не происходит. Охлаждающие вещества, например деминерализованная вода, могут быть без проблем использованы. Концепция жидкостного охлаждения функционирует по такому же принципу, как и охлаждение при естественной конвекции: как можно более короткие пути между источником тепла и теплоотводом. В данном аспекте керамика вне конкуренции: жидкостное охлаждение расположено лишь в 1,5 мм от точки нагрева (Hotspot). При применении других концепций невозможно достигнуть этого при таком же сроке службы. При этом возможна печать трехмерных электрических печатных проводников непосредственно на керамику без образования термических барьеров (рис. 6).

#### Пример моделирования для специальных решений «под заказчика»

Так как применение CeramCool в большинстве случаев связано с особенностями изделий для разных заказчиков, важно проверить работу новой концепции до того, как будут созданы дорогие прототипы. При помощи обширных исследований была создана симуляционная модель и проведено сравнение ее результатов

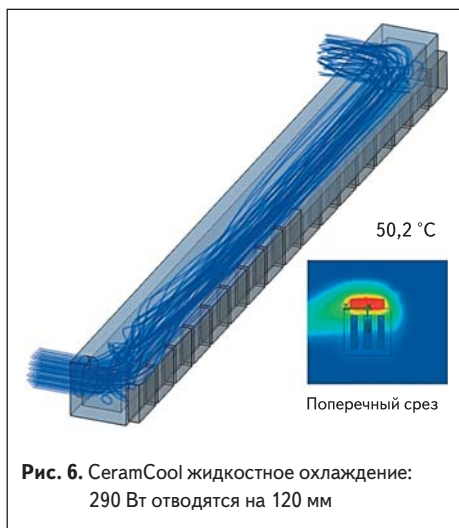


Рис. 6. CeramCool жидкостное охлаждение: 290 Вт отводятся на 120 мм

с результатами различных физических испытаний. Соотношение надежно. Основываясь на полученных результатах, можно быстро и просто оценить новые концепции. В чем заключается термическое преимущество распределения одного 5-Вт светодиода на 5 LED, каждый из которых имеет мощность 1 Вт? В чем состоит преимущество встроенного в конструкцию модуля распределителя тепла?

#### Модифицированные лампы (ретрофит) и изоляция

Проблема модифицированных ламп заключается прежде всего в изоляции. Любая модифицированная лампа должна соответствовать защитному классу II, так как заземление не может быть обеспечено. Это означает, что каждая открытая металлическая часть должна быть изолирована от электропитания при помощи двойной усиленной изоляции. Часто модифицированные лампы не соответствуют этим предписаниям, таким как большие расстояния (например, зазор 6 мм) или двойная изоляция, которые негативно сказываются на эффективности теплоотвода. Для интегрированного драйвера питания GU10-LED очень мало места, что представляет собой определенную трудность. При использовании керамического теплоотвода электрический ток не проходит через теплоотвод даже в том случае, если драйвер полностью выходит из строя. Продукт является безопасным.

Цоколь и отражатель светодиода GU10-Spot в большинстве случаев сделаны из разных материалов. В LED-GU10-Spot оба компонента могут быть сделаны из одного материала — высококачественной керамики. В данном случае

подложка функционирует в качестве теплоотвода. Соединение с кристаллом является инертным металлическим, а управление распределением тепла значительно улучшено. В модели 4-Вт GU10 светодиода максимальная температура кристалла составляет 60 °C. Контролируемый отвод тепла повышает срок службы и улучшает световую мощность. В представленном здесь теплоотводе CeramCool сочетание материалов сокращается, демонстрируя все преимущества керамики: электроизоляцию, высокую механическую и химическую стабильность. Используемая везде керамика и красивое непрямоое распределение света в керамическом отражателе придают ему большую ценность. Цоколь и отражатель сделаны из керамики, в связи с чем несложно было достичь изоляции защитного класса II (рис. 7, 8).

#### Концепция

Применения в силовой электронике, особенно вне помещений, также выигрывают благодаря характеристикам CeramCool. Линия круглых по форме продуктов находится в разработке и будет соответствовать требованиям различных мощностей светодиодов. Концепция соединяет эффективную по стоимости продукцию с большой гибкостью для пользователя (рис. 9, 10). Литой керамический теплоотвод соединяет управление распределением тепла, механическую структуру и печатную плату. Снова исчезает разница между лампой и светильником.

*Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2010. № 2. Германия).*



Рис. 7. CeramCool LED Spot GU10 с высоковольтным 4-Вт LED

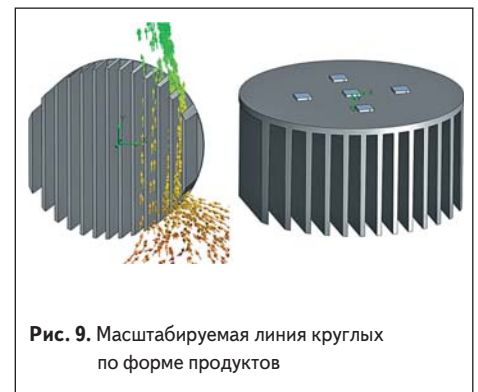


Рис. 9. Масштабируемая линия круглых по форме продуктов



Рис. 8. CeramCool LED Spot GU10



Рис. 10. CeramCool для линейных применений