

УДК 536.241

И. А. Хорунжий, кандидат физико-математических наук, доцент (БНТУ)**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В МОЩНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРИБОРЕ**

Рассмотрена компьютерная модель процессов теплообмена внутри мощного четырехкристального светодиода. Показано, что значительную часть в общее тепловое сопротивление прибора вносит тепловое сопротивление слоя посадки полупроводникового чипа. Отмечено, что дополнительное тепловое сопротивление, создаваемое слоем посадки, приводит к существенному повышению максимального перегрева светодиодных чипов (почти в 3 раза по сравнению с перегревами, которые могли бы иметь место в отсутствие теплового сопротивления этого слоя).

The computer model of processes of heat exchange in a powerful four-crystal light-emitting diode is considered. It is shown that the considerable part in the general thermal resistance of the device is brought by thermal resistance of a layer of landing of the semi-conductor chip. It is noticed that the additional thermal resistance created by a layer of landing leads to essential increase of the maximum overheat of light-emitting diode chips (almost three times in comparison with overheats which could take place for lack of thermal resistance of this layer).

Введение. В последние годы наблюдается бурное развитие светоизлучающих диодов (СД), которые теперь используются не только в устройствах индикации, но и в качестве полноценных источников света. При этом светодиоды обладают множеством преимуществ по сравнению с лампами накаливания, так как характеризуются более высокой энергетической эффективностью, экологической безопасностью, компактностью, простотой регулировки, надежностью и долговечностью [1].

Надежность полупроводниковых приборов сильно зависит от тепловых режимов, при которых они функционируют [2]. Разогрев прибора во время работы вызывает изменение его электрических параметров, изменение циркулирующих токов, а это может приводить к еще большему локальному повышению температуры и выходу прибора из строя. Таким образом, срок службы светодиода в значительной степени определяется режимом эксплуатации и, прежде всего, температурой *p-n*-перехода на кристалле. При разработке светодиода для оптимизации охлаждения *p-n*-перехода необходимо изучить охлаждение теплообмена внутри прибора. Компьютерное моделирование позволяет быстро провести такое исследование и найти оптимальную конструкцию прибора.

Основная часть. В данной работе приведены некоторые результаты компьютерного моделирования процессов теплообмена в мощном четырехкристальном светодиоде. В качестве прототипа компьютерной модели взят мощный четырехкристальный светодиод фирмы CREE (США) [3, 4]. В настоящее время эта компания выпускает сверхъяркие светодиоды семейства MC-E серии XLAMP, которые позиционируются этой фирмой как светодиоды светотехнического класса, причем отмечается, что чипы этих

светодиодов имеют рекордно низкое тепловое сопротивление, равное $3^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ [3, 4].

Светодиоды семейства MC-E представляют собой четырехкристальные сборки, помещенные в миниатюрный (площадью $7 \times 9 \text{ мм}^2$) корпус. Все четыре кристалла СД электрически не связаны между собой и соединены с отдельными выводами. При питании каждого встроенного кристалла током 700 мА суммарный световой поток на выходе достигает 500 лм. При этом у СД MC-E в несколько раз по сравнению с СД XR-E (однокристалльный светодиод, изготавливаемый с использованием таких же полупроводниковых чипов) увеличивается и рассеиваемая тепловая мощность. Производимые компанией CREE светодиодные чипы выращиваются на подложках из карбида кремния. В соответствии с информацией фирмы CREE [5] теплопроводность монокристаллических пластин SiC, используемых при производстве светодиодных чипов, лежит в интервале 370–420 Вт/(м · К). При проведении компьютерных расчетов использовалось наименьшее из приведенных значение теплопроводности – 370 Вт/(м · К), чтобы оценить максимальное тепловое сопротивление прибора.

В светодиодах семейства MC-E устанавливаются производимые компанией CREE светодиодные чипы семейства EZBright Gen II, модели EZ1000 Gen II LED [5], размер которых составляет $980 \times 980 \text{ мкм}^2$ и толщина 100 мкм [5]. При установке чипа в корпус светодиода его прикрепляют к теплоотводу либо с помощью специального токопроводящего эпоксидного клея, либо посредством специальных припоев. При компьютерном моделировании точно учесть влияние слоя посадки на теплообмен не представляется возможным, так как информации о теплофизических параметрах припоев или клея,

а также о толщине и качестве слоя посадки нет. В работе [6] проведено экспериментальное определение теплового сопротивления слоя посадки для светодиодов разных изготовителей и показано, что для светодиодов, производимых ведущими фирмами, величина теплового сопротивления слоя посадки составляет, как правило, несколько градусов на каждый ватт мощности. Поэтому сначала проведем компьютерное моделирование без учета слоя посадки, а затем сделаем оценки возможного влияния на теплообмен слоя посадки.

Компьютерное моделирование проводилось методом конечных элементов. Вертикальный разрез компьютерной модели светодиода семейства MC-E компании CREE показан на рис. 1. В соответствии с приведенными в [3] данными электрические мощности светодиодных чипов разных цветов различаются и при силе тока 700 мА, текущем через каждый светодиодный чип, составляют для светодиода красного света – 3,08 Вт, зеленого – 4,76 Вт, синего – 4,48 Вт и белого – 4,48 Вт. Как отмечается в [5], квантовый выход светодиодов CREE составляет более 50%, поэтому при моделировании полагалось, что 50% мощности, потребляемой каждым светодиодным чипом, расходуется на излучение, остальные 50% представляют собой тепловую мощность, выделяемую в основном в p - n -переходе светодиода. Температура нижней наружной поверхности корпуса светодиода, устанавливаемой на тепловой радиатор, полагалась постоянной и равной 30°C, расчеты проводились для стационарного режима.

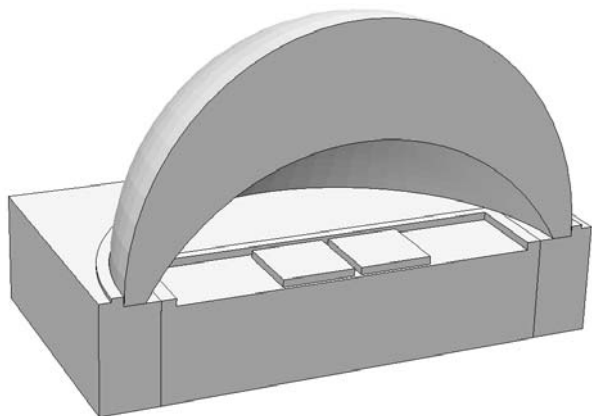


Рис. 1. Вертикальный разрез компьютерной модели светодиода MC-E компании CREE [3]

На рис. 2 представлен график распределения температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через центр зеленого (наиболее горячего) светодиодного чипа, по направлению от p - n -перехода к наружной поверхности прибора (тепловому радиатору).

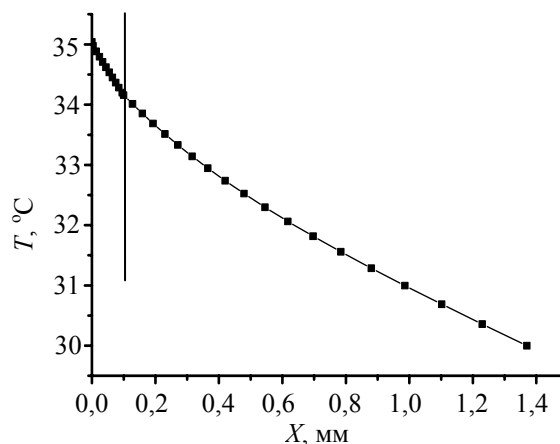


Рис. 2. Полученное методом компьютерного моделирования распределение температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через центр зеленого чипа (вертикальной линией отмечена граница чип – теплоотвод); слой посадки не учитывался

Из приведенных результатов моделирования видно, что максимальная разность температур между p - n -переходом светодиодного чипа и внешней поверхностью корпуса прибора составляет 5,15°C. При тепловой мощности зеленого чипа 2,38 Вт тепловое сопротивление прибора равно 2,16°C/Вт. Разность температур между областью p - n -перехода и нижней стороной чипа в приведенном варианте расчета составляет примерно 1°C и соответствует тепловому сопротивлению 0,42°C/Вт. Данное значение теплового сопротивления существенно ниже теплового сопротивления 3°C/Вт, указанного в документации компании CREE для чипов, изготовленных на подложке из карбида кремния. Напомним, что обсуждаемые результаты получены без учета в компьютерной модели слоя посадки и при использовании условия идеального теплового контакта между чипом и медным теплоотводом. Поскольку использованные в расчетах значения теплопроводности карбида кремния SiC (370 Вт/(м · К)) и меди (400 Вт/(м · К)) близки между собой, то на рис. 2 практически отсутствует излом графика на границе между чипом и теплоотводом (граница обозначена вертикальным пунктиром), т. е. практически отсутствует скачок градиента температуры.

Величину теплового сопротивления чипа в 3°C/Вт, приведенную компанией CREE, можно объяснить, если предположить, что тепловое сопротивление чипа определялось с учетом слоя посадки, т. е. слоя клея или припоя между чипом и теплоотводом. Тепловое сопротивление слоя клея должно в этом случае составлять около 2,6°C/Вт. Данное значение хорошо согласуется с оценкой теплового сопротивления слоя

посадки, сделанной на основе экспериментальных исследований в работе [6].

Рассмотрим некоторые результаты компьютерного моделирования, проведенного с помощью измененной модели, отличающейся от ранее рассмотренной наличием тонкого (толщиной 2 мкм) слоя клея с величиной теплового сопротивления $2,6^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. При выбранной толщине, для обеспечения указанного теплового сопротивления, теплопроводность клея должна составлять $7,31 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Такая теплопроводность сопоставима с теплопроводностью современных термопаст, например термопаста марки ARCTIC MX-4 фирмы Arctic (Швейцария) имеет теплопроводность $8,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [7]. Отметим еще раз, что толщина и теплопроводность слоя клея взяты оценочно и подобраны таким образом, чтобы тепловое сопротивление этого слоя составило $2,6^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. На рис. 3 приведено распределение температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через центр зеленого светодиода чипа, по направлению от p - n -перехода к наружной поверхности прибора для модели, учитывающей слой клея.

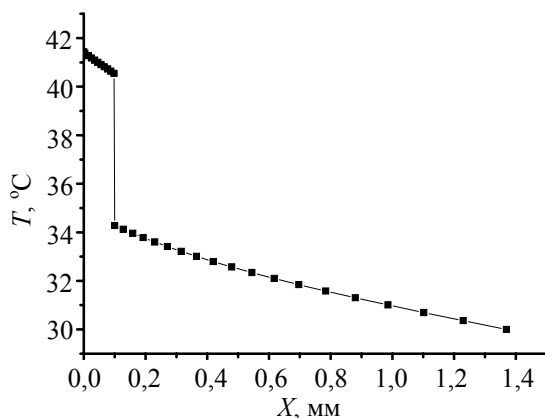


Рис. 3. Полученное методом компьютерного моделирования распределение температуры вдоль вертикальной оси, проходящей через центр зеленого чипа при учете слоя посадки

Поскольку слой клея имеет заметное тепловое сопротивление, то, с одной стороны, появился заметный скачок температуры между нижней поверхностью теплоотвода в корпусе светодиода и поверхностью радиатора, на которую светодиод установлен, а с другой стороны, максимальный перегрев активного слоя стал заметно выше. Максимальный перегрев $11,45^{\circ}\text{C}$ имеет место на поверхности зеленого чипа, в котором выделяется максимальная тепловая

мощность. В то же время перегрев наименее нагретого красного чипа составляет $8,26^{\circ}\text{C}$, т. е. разница в температурах нагрева разных чипов достигает примерно $3,2^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Слой посадки, т. е. клея или припоя, играет важную роль в процессе теплообмена внутри корпуса светодиода. Дополнительное тепловое сопротивление, создаваемое слоем посадки, приводит к существенному повышению максимального перегрева светодиодных чипов (почти в 3 раза по сравнению с перегревами, которые могли бы иметь место в отсутствие теплового сопротивления этого слоя), следовательно, при отработке технологии сборки светодиодов особое внимание следует уделить отработке посадки светодиодных чипов на теплоотвод.

Литература

1. Трофимов, Ю. В. Полупроводниковые светодиоды – новые сферы применения и тенденции развития рынка / Ю. В. Трофимов // Электронные компоненты. – 2003. – № 3. – С. 31–35.
2. Буряков, А. А. Влияние режимов работы светодиодов на срок их службы / А. А. Буряков // Светодиодное освещение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zers-leds.ru/e107_plugins/content/content.php?content.56. – Дата доступа: 21.02.2012.
3. Староверов, К. С. Новые светодиоды XLAMP компании CREE / К. С. Староверов // Новости электроники. – 2009. – № 9. – С. 19–22.
4. XLamp® MC-E LED: Data Sheet [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.cree.com/products/xlamp_mce.asp#xrcdocs. – Date of access: 20.02.2012.
5. ProSoft Components: Свойства и характеристики SiC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.prochip.ru/products/brands/cree/362515/362988>. – Дата доступа: 21.02.2012.
6. Обобщенный тепловой анализ мощных светодиодов и гетеролазеров / Ю. А. Бумай [и др.] // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: сб. ст. 7-го Белорусско-российского семинара / под ред. В. З. Зубелевича, В. К. Кононенко, Г. П. Яблонского. – Минск: ИФ НАН Б. – 2009. – С. 149–152.
7. Arctic MX_4. Thermal Compound for All Coolers [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.arctic.ac/en/p/cooling/thermal-compound/30/arctic-mx-4-4g-und-20g.html?c=2291>. – Date of access: 25.02.2012.

Поступила 27.02.2012