

Евгений Луценко | e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by

Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов и светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа

Различными методами, используя длинноволновый сдвиг спектра электролюминесценции и падение напряжения прямого смещения, была определена температура перегрева активной области коммерческих светодиодов и светодиодов с активным жидкостным охлаждением светодиодного чипа, а также теплосопrotивление светодиодного чипа и его монтажа. Показано, что при прямом активном жидкостном охлаждении светодиодного чипа можно добиться малого теплового сопротивления — около 2 К/Вт.

Перегрев активной области и плотность тока инжекции являются основными эксплуатационными факторами, от которых зависят эффективность излучения и срок службы светодиода. Поэтому определение их пороговых значений исключительно важно как для прогнозирования времени работы светодиодов, так и для разработки конкретной конструкции светоизлучающих приборов на их основе.

Эксперимент и обсуждение результатов

Температура перегрева активной области светодиодов, излучающих в ультрафиолетовой, синей и зеленой областях спектра, оценивалась двумя способами:

- с использованием температурного сдвига спектров излучения (или напряжения прямого смещения) при постоянном токе инжекции по отношению к положению спектров (или напряжению прямого смещения) при импульсном возбуждении;
- с использованием кинетики длинноволнового сдвига спектра излучения (температурного падения напряжения смещения) при постоянном токе инжекции [1].

Оба метода основаны на изменении ширины запрещенной зоны активного слоя InGaN при нагревании светодиода, что проявляется в длинноволновом смещении спектра электролюминесценции и падении напряжения прямого смещения.

Первый метод основан на сравнении положения спектра электролюминесценции при постоянном токе инжекции (или напряжения прямого смещения, когда температура полностью стабилизировалась) с положением спектров электролюминесценции (с напряжением) при возбуждении короткими импульсами, когда перегревом активной области можно пренебречь [2]. На рис. 1 представлен перегрев активной области в зависимости от тока инжекции ультрафиолетового светодиода Nichia NSHU550B. Температура определялась по величине смещения доминирующей длины волны электролюминесценции при одинаковом токе инжекции импульсного (рис. 1, вставка 1) и непрерывного (рис. 1, вставка 2)

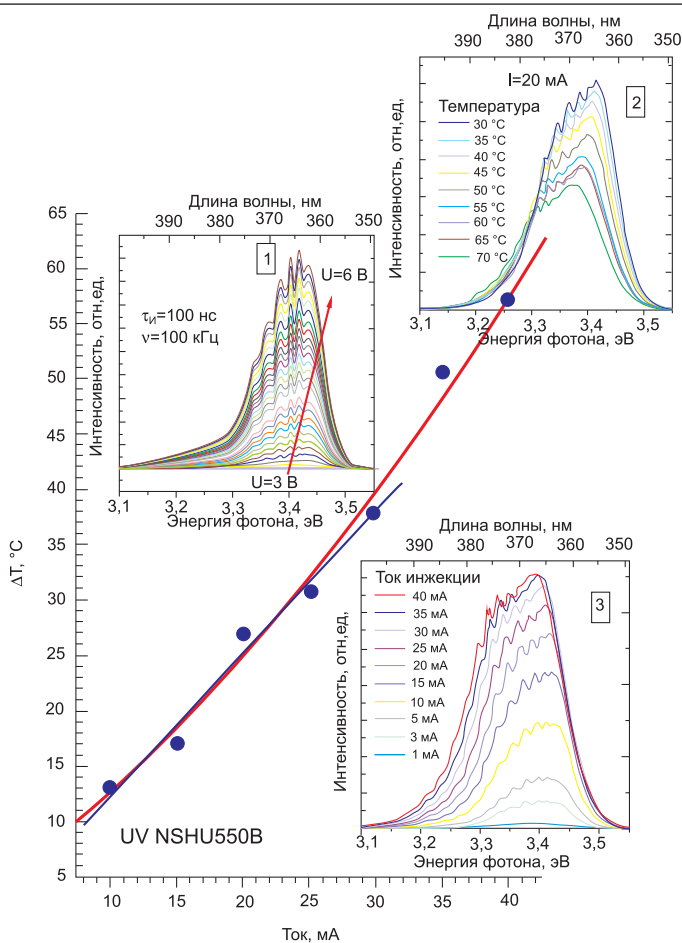


Рис. 1. Перегрев активной области ультрафиолетового светодиода Nichia NSHU550B в зависимости от тока инжекции. Вставки: 1. Спектры электролюминесценции при возбуждении короткими импульсами напряжения различной величины; 2. Спектры электролюминесценции при постоянном токе инжекции (20 мА) и различной температуре корпуса светодиода; 3. Спектры электролюминесценции при различных токах инжекции после наступления теплового равновесия

возбуждения, деленной на величину удельного температурного дрейфа спектра излучения при токе инжекции 20 мА (рис. 1, вставка 3). Естественно, данное приближение можно использовать только в том случае, если величина температурного дрейфа положения спектра электролюминесценции незначительно зависит от величины тока инжекции. В противном случае величину температурного дрейфа необходимо определять для каждого значения тока инжекции. Следует отметить, что в данном случае зависимость положения полосы электролюминесценции от тока инжекции при импульсном возбуждении интерполировалась из импульсных вольт-амперных характеристик. Все измерения были реализованы при термостабилизации теплоотвода светодиода элементом Пельтье с автоматической стабилизацией температуры.

Как видно на рис. 1, температура активной области светодиода нелинейно зависит от тока инжекции, что связано, в первую очередь, с уменьшением квантовой эффективности излучательной рекомбинации с повышением тока (т. е. с увеличением электрической мощности, преобразуемой в тепло), а также с незначительным температурным уменьшением теплопроводности различных компонент светодиода. Значения температуры перегрева активной области значительны особенно для ультрафиолетовых светодиодов — вследствие малой эффективности их излучения. Это указывает на необходимость тщательного изучения перегрева и поиска путей его снижения с целью избежать понижения оптической мощности (КПД) и сокращения срока службы светодиодов.

Другая возможность оценки перегрева активной области светодиодов при непрерывном возбуждении (постоянном токе) состоит в отслеживании во времени положения спектра электролюминесценции или напряжения прямого смещения. Кинетика доминирующей длины волны спектра электролюминесценции или напряжения прямого смещения на светодиоде дает кинетику температуры, когда температурная зависимость известна или заранее исследована.

На рис. 2а представлены результаты измерений кинетики положения спектров электролюминесценции светодиода с чипом Bridgelux

при токе инжекции 350 мА (положение начальной точки берется из импульсных измерений). На вставке рисунка показана зависимость положения спектра ЭЛ от температуры при импульсном токе $I_{II} = 350$ мА длительностью 1 мкс и скважности 1000. Видно, что 1 нм сдвига спектра электролюминесценции соответствует 30 °С перегрева. Примерно через 80 с работы светодиода наступает стабилизация температуры активной области (спектр перестает смещаться), при этом полный сдвиг составляет 0,62 нм, что соответствует величине перегрева 18,6 °С.

Однако корректное определение температуры перегрева в люминесцентных измерениях в некоторых случаях, например для белых светодиодов, может быть затруднено из-за разницы температур активной области и фосфора, а также частичного перекрытия их спектров излучения. В этом случае измерение кинетики падения напряжения для определения температуры перегрева активной области является более предпочтительным, поскольку дает возможность достаточно просто выделить быстрые компоненты, обусловленные перегревом светодиодного чипа. Такой подход позволяет определить величину теплового сопротивления светодиодных чипов (гетероструктуры и ее монтажа) отдельно от корпуса светодиода.

На рис. 2б представлены результаты измерений кинетики напряжения прямого смещения того же светодиода. Видно, что через 80–120 с после включения тока инжекции происходит стабилизация температуры p - n -перехода (это проявляется в стабилизации напряжения прямого смещения). На вставке показана зависимость напряжения от температуры при тех же условиях возбуждения. Видно, что 1 °С перегрева приводит к примерно 2 мВ уменьшения напряжения. Следовательно, температура перегрева в 21,5 °С получается из величины падения напряжения после 3 мин. протекания тока величиной 350 мА.

Сравнение величин перегрева показывает, что оба метода дают сопоставимые результаты. Наблюдаемая разница значений температур, возможно, вызвана воздействием на напряжение прямого смещения разогрева областей вблизи дислокаций, температурных зависи-

моостей сопротивления пассивных областей (p - и n - GaN) и контактов, на что опосредованно указывает несколько затянутая кинетика напряжения прямого смещения. Таким образом, определение температуры перегрева активной области возможно путем измерения как кинетики напряжения прямого смещения, так и кинетики спектрального положения электролюминесценции.

Извлечение из этих измерений быстрой компоненты кинетики температуры перегрева позволяет определить термическое сопротивление светодиода чипа и его монтажа. Однако это требует наносекундного разрешения, поскольку теплоемкость светодиодного чипа, как правило, мала. В общем случае для этих целей желательно быстродействующее (с временным разрешением не хуже десятков наносекунд) оборудование для измерения мгновенных спектров электролюминесценции (стрик-камера или специальная быстрая ПЗС-камера). Необходимо отметить, что в литературе часто встречаются заниженные результаты перегрева активной области, что обусловлено использованием достаточно медленной аппаратуры. Даже использование мультиметров со скоростью 20–50 тыс. измерений в секунду не позволяет корректно определить быструю компоненту кинетики перегрева. Кроме того, формирование ступеньки стабилизированного тока с фронтом менее сотни наносекунд и последующей низкоамплитудной быстро затухающей осцилляцией является отдельной нетривиальной задачей.

Далее рассмотрим метод оценки теплового сопротивления светодиодных чипов на основе измерения кинетики спектрального положения электролюминесценции. При возбуждении светодиода импульсом тока амплитудой I с коротким фронтом мгновенные спектры электролюминесценции измеряются в зависимости от времени t . Температура окружающей среды предполагается равной T_0 . При этом длительность импульса τ должна существенно превышать время быстрого сдвига спектра излучения, соответствующее нагреву чипа (более медленное последующее смещение спектра соответствует нагреву корпуса светодиода).

Чтобы определить взаимосвязь между положением спектра излучения и температурой активной области, измерялась зависимость положения спектра излучения от температуры $\lambda_{эл}(T)$ при возбуждении короткими импульсами тока. Чтобы избежать значительного саморазогрева активной области, длительность импульса должна быть достаточно мала, а скважность достаточно велика. Зная зависимость $\lambda_{эл}(T)$ и $\lambda_{эл}(t)$, можно получить кинетику температуры активной области $T(t)$.

Предполагая небольшой теплоемкостью монтажа светодиодного чипа, $\Delta T(t)$ можно аппроксимировать в первом приближении двухэкспоненциальным выражением:

$$\Delta T(t) = \Delta T_1 \times (1 - e^{-t/\tau_1}) + \Delta T_2 \times (1 - e^{-t/\tau_2}), \quad (1)$$

где ΔT_1 — разность эффективных температур активной области и плоскости монтажа светодиодного чипа на корпусе светодиода; τ_1 — подгоночный параметр, характеризующий

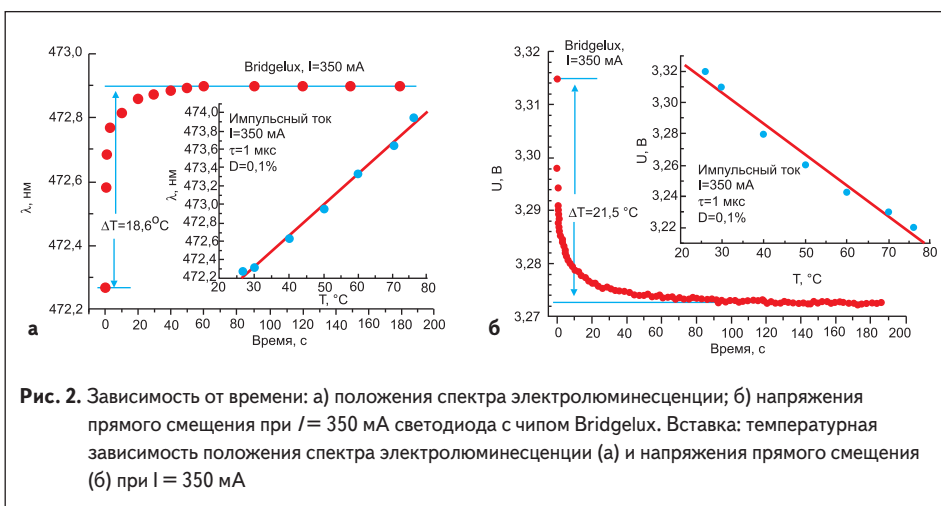


Рис. 2. Зависимость от времени: а) положения спектра электролюминесценции; б) напряжения прямого смещения при $I = 350$ мА светодиода с чипом Bridgelux. Вставка: температурная зависимость положения спектра электролюминесценции (а) и напряжения прямого смещения (б) при $I = 350$ мА

скорость нагрева чипа светодиода, т. е. теплоемкость и теплопроводность светодиодного чипа и его посадочного материала; ΔT_2 — разность эффективных температур плоскости монтажа светодиодного чипа на корпусе светодиода и плоскости теплоотвода; t_2 — подгоночный параметр, характеризующий скорость нагрева корпуса светодиода, т. е. теплоемкость и теплопроводность корпуса светодиода и материала его монтажа на теплоотвод.

Величина ΔT_1 характеризует тепловое сопротивление чипа и его монтажа на корпус светодиода. Тепловое сопротивление чипа и его монтажа может быть рассчитано по формуле:

$$R_{T, \text{чип}} = \Delta T_1 / P_Q \quad (2)$$

где $P_Q = U \times I - I_{\text{эл}}$ — часть электрической мощности, пошедшей на нагрев светодиода, U и I — напряжение и ток светодиода, $I_{\text{эл}}$ — оптическая мощность электролюминесценции.

Чтобы обойтись без дорогих приборов, подобных стрик-камере, сигнал электролюминесценции измерялся на отдельных длинах волн с использованием монохроматора, ФЭУ и цифрового осциллографа. Длительность импульса возбуждения составляла 50 мс. Амплитуда тока импульса была установлена равной 2 А с целью определения температуры

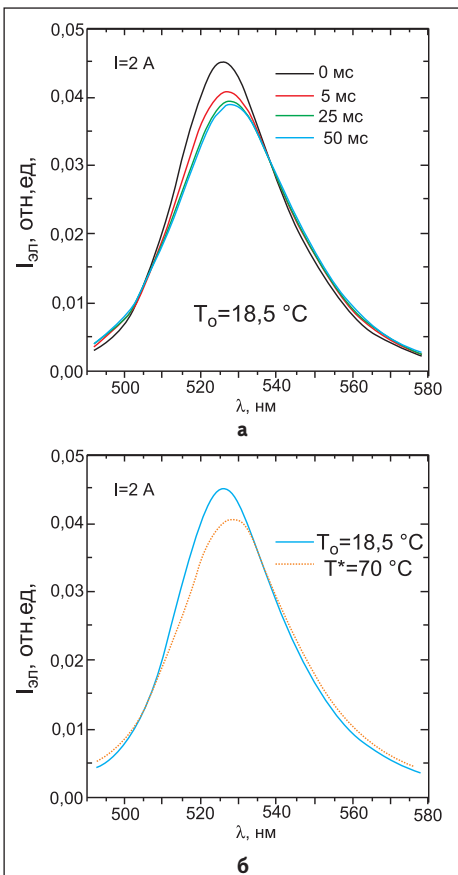


Рис. 3. Спектры электролюминесценции «зеленого» светодиода REBEL: а) в различные моменты времени; б) при различной температуре теплоотвода при возбуждении 2 А

активной области при высоком уровне возбуждения. Измерения были реализованы для температур теплоотвода 18,5 и 70 °С. Мгновенные спектры электролюминесценции были определены из измеренных кинетик на отдельных длинах волн.

На рис. 3 представлены спектры электролюминесценции коммерческого светодиода типа REBEL (Lumileds, LXML-PM01-0080) в отдельные моменты времени после включения импульса тока. Видно, что интенсивность электролюминесценции немного уменьшается со временем, а спектр излучения смещается в длинноволновую сторону и уширяется. Все эти изменения вызваны нагревом активной области светодиодных чипов. Как показано на рисунке, быстрые изменения в спектре электролюминесценции в основном заканчиваются уже в первые 5 мс.

Малая величина изменения как интенсивности, так и спектрального положения электролюминесценции может быть объяснена высокой температурной стабильностью характеристик InGaN (материал активной области светодиода) и не может служить показателем низкой величины нагрева. Об этом свидетельствует также рис. 3б, который представляет спектры электролюминесценции, соответствующие самому началу импульса возбуждения и измеренные при температурах, отличающихся более чем на 50 °С.

Температурный коэффициент сдвига электролюминесценции (нм/К) определялся в предположении линейной зависимости положения доминирующей длины волны электролюминесценции от температуры и задавался выражением:

$$\nu_{T\lambda} = (\lambda_{EL}(T) - \lambda_{EL}(T_0)) / (T - T_0) = 1,96 \cdot 10^{-2}. \quad (3)$$

Кинетика температуры перегрева активной области исследованного светодиода, полученная из кинетики положения доминирующей длины волны и ее пересчета на температурный коэффициент сдвига, а также аппроксимация в соответствии с выражением (1) показаны на рис. 4. Видно, что тепловое равновесие между светодиодным чипом и корпусом светодиода наступает менее чем через 1 мс. Именно поэтому для надежной

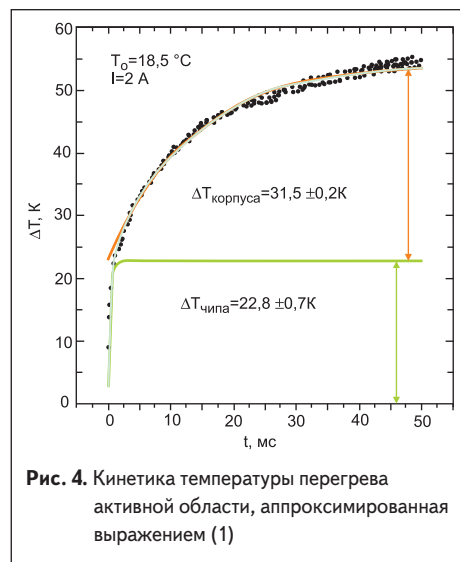


Рис. 4. Кинетика температуры перегрева активной области, аппроксимированная выражением (1)

оценки перегрева активной области важно осуществлять его измерения с субмикросекундным временным разрешением.

Мощность, подаваемая на светодиод, была определена из электрических параметров импульса и ее величина составила 5,3 Вт. При разнице температур между активной областью и поверхностью корпуса светодиода $\Delta T_{\text{чип}} = 23$ °С тепловое сопротивление чипа и его монтажа может быть оценено как 4,3 К/Вт. Поправка на то, что около 20% электрической мощности (измерения в оптической интегрирующей сфере показали оптическую мощность около 0,9 Вт при токе 2 А) пошло на создание светового потока, дает уточненное значение теплового сопротивления по формуле (3) 5,2 К/Вт. Подобным образом, исходя из полной температуры перегрева активной области (по отношению к теплоотводу), тепловое сопротивление светодиода как целого (чипа, монтажа чипа, корпуса светодиода и монтажа корпуса светодиода) может быть оценено примерно как 13 К/Вт.

Для многих приложений, таких как накачка активных лазерных сред [3–5], систем проекционного светодиодного телевидения, фототерапии и др., требуется высокая плотность оптической мощности. Ее трудно достичь с использованием обычных методов монтажа светодиодов с типичными значением теплового сопротивления 8–10 К/Вт. Поэтому представляют интерес новые перспективные технологии охлаждения светодиодного чипа. Одна из них — технология жидкостного охлаждения. Как показал поиск, существуют запатентованные конструкции с прямым жидкостным охлаждением светодиодных чипов [6].

Для исследования возможности данной технологии была предложена новая конструкция светодиода с прямым жидкостным охлаждением светодиодного чипа на основе стандартного светодиодного корпуса. Охлаждение в этом случае осуществлялось как через корпус светодиода, так и через верхнюю поверхность светодиодного чипа за счет потока жидкости в камере между поверхностью чипа и куполообразной линзой (рис. 5б). В предложенной конструкции использовался светодиодный чип Bridgelux, а в качестве теплоносителя — деионизованная вода.

Для определения температуры перегрева активной области таких светодиодов была измерена зависимость напряжения прямого смещения на чипе Bridgelux от температуры при импульсном возбуждении ($\tau_i = 1$ мкс, $I_i = 350$ мА, $D = 0,001$) в отсутствие жидкости. Зависимость была близка к линейной и имела наклон 2 мВ/К. Следует отметить, что для корректных измерений важно использование импульсного и постоянного тока того же значения, чтобы обеспечить одинаковые условия для заполнения энергетических состояний неравновесными носителями в активной области.

На рис. 6 точками представлены значения напряжения прямого смещения на светодиоде с активным жидкостным охлаждением чипа при постоянном токе $I = 350$ мА в течение первой минуты работы. Сплошная линия обозначает величину напряжения для импульсного возбуждения при комнатной температуре.

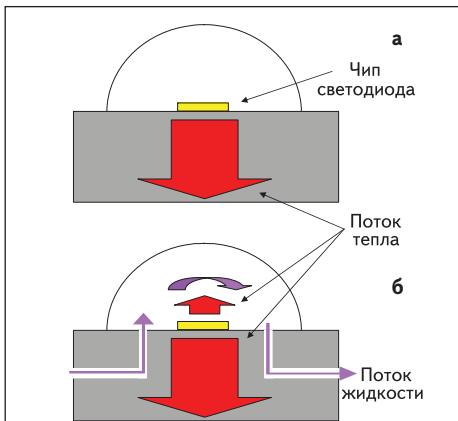


Рис. 5. Схема перемещения тепла:
а) в обыкновенном светодиоде;
б) в светодиоде с прямым жидкостным охлаждением чипа.

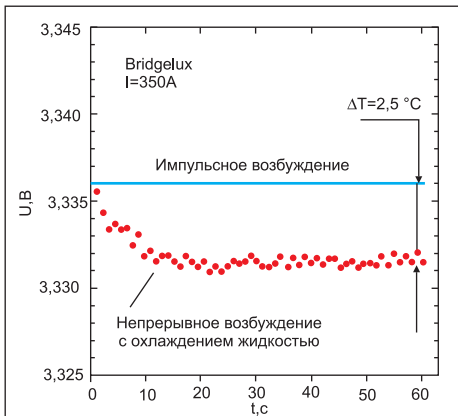


Рис. 6. Кинетика напряжения прямого смещения при постоянном токе инжекции 350 мА светодиода с активным жидкостным охлаждением чипа

Падение напряжения (по отношению к значению при импульсном возбуждении) наблюдается только в течение первых 10–20 с работы. Установившаяся температура перегрева для активного охлаждения светодиодного чипа достигает значений 1,7–2,5 °C, что значительно ниже, чем для пассивного охлаждения (~18 °C).

Таким образом, тепловое сопротивление данного светодиода составляет примерно 2 К/Вт.

Такое низкое значение теплового сопротивления позволяет использовать значительно большие плотности тока инжекции с сохранением срока службы светодиода. При непосредственном жидкостном охлаждении чипа Bridgelux исследуемых светодиодов оптическая мощность достигала почти 1 Вт при величине тока около 1 А, тогда как величина рабочего тока, определенная производителем только 350 мА. При жидкостном охлаждении чипов необходимо обратить внимание на устойчивость металлизации и материала чипа к воздействию хладагента.

Заключение

Показано, что тепловое сопротивление светодиодного чипа и его монтажа, а также всей структуры светодиода, включая корпус и монтаж корпуса, можно корректно оценить с помощью кинетики спектров электролюминесценции. Для мощных коммерческих зеленых светодиодов REBEL эти значения оцениваются как 5,2 К/Вт и 13 К/Вт соответственно.

Показано, что новый метод непосредственного активного жидкостного охлаждения светодиодного чипа позволяет снизить тепловое сопротивление светодиода до 2 К/Вт. Несмотря на большой рабочий ток, низкое тепловое сопротивление позволяет обеспечить долгий срок службы светодиода и уменьшить падение квантовой эффективности, вызванное перегревом. Светодиоды или светодиодные массивы с активным жидкостным охлаждением чипов являются перспективными для создания больших световых потоков, которые необходимы, например, для накачки активных сред лазеров. ●

Литература

1. Schubert E. Fred. Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press. 2006.
2. Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N., Zubialevich V. Z. et al. Growth, Stimulated Emission, Photo- and Electroluminescence of InGaN/GaN EL-Test Heterostructures // Phys. stat. sol. Vol.0, № 1. (2002). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssc.200390041/pdf>.
3. US Patent H002161
4. US Patent 6845114
5. US Patent 7136408
6. Патент US007235878B2

Статья подготовлена на основе ранее опубликованных работ:

1. Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N., Danilchuk A. V., Rzhetski M. V., Vainilovich A. G., Zubialevich V. Z., Muravitskaya A. V., Yablonskii G. P.. Determination of active region overheating temperature of GaN-based light emitting diodes promising for laser media pumping // IEEE 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers. Ukraine. 2010. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5634204.
2. Lutsenko E. V., Danilchuk A. V., Rzhetski M. V., Pavlovskii V. N., Yablonskii G. P. Active region overheating temperature of commercial and active liquid cooled LEDs // Annual proceedings the technical university of Varna 2010. International Scientific and Applied Conference Opto-Nano Electronics and Renewable Energy Sources. Varna, Bulgaria. 2010.

Автор благодарит соавторов этих работ за экспериментальные измерения и обсуждение материала.