

# Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов

© А.А. Ефремов\*,<sup>†</sup>, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер

\* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
194251 Санкт-Петербург, Россия  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 сентября 2005 г. Принята к печати 10 октября 2005 г.)

Рассмотрена тепловая модель светодиода с InGaN/GaN-квантовой ямой в активной области. Исследовано влияние температуры и рабочих токов светодиода, а также размера и материала радиатора на выход света и эффективность голубого светодиода. Показано, что при оптимальном теплоотводе уменьшение эффективности светодиода с ростом тока накачки до 100 мА связано с влиянием электрического поля на эффективность инжекции носителей заряда в квантовую яму. При дальнейшем росте тока до 400 мА причиной снижения эффективности является джоулев нагрев. Показано, что рабочие токи светодиодов можно увеличить в 5–7 раз при оптимальном отводе тепла. Даны рекомендации по охлаждению светодиодов в зависимости от их мощности.

PACS: 85.60.Jb, 85.35.Be, 78.67.De

## 1. Введение

Эффективность преобразования электричества в свет — основная проблема при создании ламп высокой яркости на основе светодиодов. Эффективность лучших промышленных светодиодов на основе GaN достигает 15–35%, и, следовательно, 65–85% электроэнергии уходит в тепло [1]. Увеличение рабочего тока с целью повысить яркость светодиодной лампы приводит к увеличению тепловыделения и, как следствие, к повышению температуры активной области светодиодной структуры. Перегрев светодиода уменьшает квантовый выход света и ограничивает максимальную оптическую мощность и срок службы [2].

Приборы на основе нитрида галлия являются перспективными для создания осветительных ламп благодаря большой ширине запрещенной зоны и высокой теплопроводности. Эти свойства обеспечивают возможность повышения рабочих токов, допустимой рабочей температуры светодиодных структур и получение большой яркости света. Для решения этой задачи необходимо дальнейшее улучшение качества материала, и прежде всего уменьшение плотности дислокаций и точечных дефектов в GaN [3]. В то же время грамотно сконструированный теплоотвод позволяет уже на настоящем уровне технологии увеличить рабочий ток и выход света обычных коммерческих светодиодов.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с увеличением рабочих токов и отвода тепла от индикаторных InGaN/GaN-светодиодов. Предлагается классификация светодиодов по мощности в зависимости от способа охлаждения и обращается внимание на необходимость разработки приборов, способных работать при высоких температурах 200–300°С.

## 2. Методика проведения эксперимента

Исследовались неупакованные светодиодные структуры (чипы) и маломощные индикаторные светодиоды (потребляемая мощность  $W = 80$  мВт) с InGaN/GaN-квантовой ямой шириной  $30 \text{ \AA}$ , выращенные методом MOCVD на сапфировых подложках и люминесцирующие на длине волны 465 нм. Детали структуры светодиода приведены в [4,5]. Размеры светодиодной структуры  $340 \times 340$  мкм.

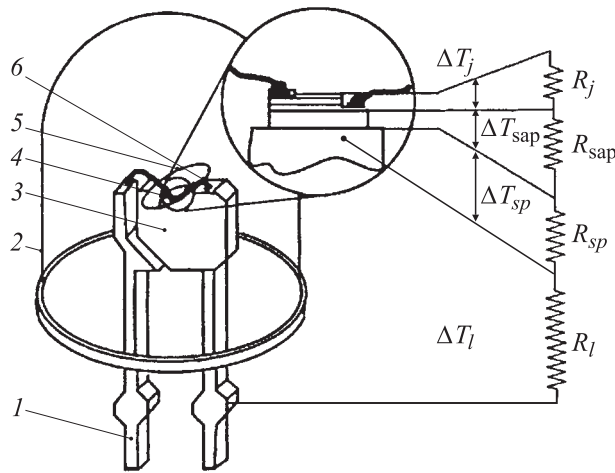
Измерения токов и напряжений проводились с помощью прибора Keithley 238. Мощность излучения светодиодных структур измерялась кремниевым фотодиодом ФДУК. При измерениях светодиодные структуры выдерживались достаточное время для установления теплового равновесия между светодиодным чипом, радиатором и окружающей средой. Температура окружающей среды составляла 24°С.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Тепловая модель светодиода

На рис. 1 показаны устройство стандартного индикаторного светодиода и его тепловая модель, а также обозначены перепады температур между основными элементами конструкции светодиода. Основным каналом отвода тепла от светодиодной структуры является катодный вывод. Тепло, выделяемое в активной области светодиодной структуры  $p$ -GaN/InGaN/ $n$ -GaN, отводится в окружающую среду через последовательные тепловые сопротивления  $p$ - $n$ -перехода  $R_j$ , сапфировой подложки  $R_{\text{sap}}$ , теплового контакта подложка-монтажное основание  $R_{sp}$  и сопротивление между выводом и окружающей средой  $R_{l-a}$ , которое складывается из теплового сопротивления вывода (от основания до радиатора)  $R_l$  и теплового сопротивления передачи тепла от радиатора

<sup>†</sup> E-mail: eartm@mail.ru



**Рис. 1.** Конструкция и тепловая модель индикаторного InGaN/GaN-светодиода. 1 — анодный вывод светодиода, 2 — эпоксидный корпус, 3 — монтажное основание светодиода с катодным выводом, 4 — светодиодный чип, 5 — отражающая чашка катодного вывода, 6 — контактные провода.

к окружающему воздуху  $R_{\text{rad}} : R_{l-a} = R_l + R_{\text{rad}}$ . Отвод тепла через корпус, выполненный из эпоксидной смолы, и проволочные контакты незначителен (по оценкам, < 1%) и не учитывается. Перегрев активной области  $\Delta T_{j-a}$  определяется полным тепловым сопротивлением между активной областью и охлаждающей средой  $R_{j-a}$ :

$$T_j - T_a \equiv \Delta T_{j-a} = (1 - \eta_{\text{eff}})WR_{j-a},$$

где  $T_j$  и  $T_a$  — температура  $p$ - $n$ -перехода и окружающей среды соответственно,  $W$  — потребляемая светодиодом электрическая мощность,  $\eta_{\text{eff}}$  — эффективность светодиода,  $R_{j-a} = R_j + R_{\text{sap}} + R_{\text{sp}} + R_{l-a}$ ,  $\Delta T_{j-a} = \Delta T_j + \Delta T_{\text{sap}} + \Delta T_{\text{sp}} + \Delta T_{l-a}$  — температурные перепады на тепловых сопротивлениях  $R_j$ ,  $R_{\text{sap}}$ ,  $R_{\text{sp}}$  и  $R_{l-a}$  соответственно.

Внутреннее тепловое сопротивление светодиода с площадью активной области  $S_j = 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$  может быть определено как  $R_{\text{int}} = R_j + R_{\text{sap}} + R_{\text{sp}}$ . Оценки показывают, что вследствие малой толщины слоев GaN и высокой теплопроводности GaN (коэффициент теплопроводности  $k_{\text{GaN}} = 1.3 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ) тепловое сопротивление  $p$ - $n$ -перехода мало, составляя при толщине слоев GaN 2–3 мкм  $R_j \approx 0.26$ – $0.38 \text{ К/Вт}$ . Тепловое сопротивление сапфировой подложки может быть оценено по формуле  $R_{\text{sap}} = d_{\text{sap}} / (k_{\text{sap}} S)$  и при типичной для индикаторных светодиодов толщине подложки  $d_{\text{sap}} = 100 \text{ мкм}$ , при  $S = 1.16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$  и  $k_{\text{sap}} = 0.35 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  составляет  $\sim 25 \text{ К/Вт}$ . Тепловое сопротивление растекания  $R_{\text{sp}}$  определяется теплопроводностью материала монтажного основания, на котором закреплен чип. При  $S_{\text{sp}} \gg S$  и  $d_{\text{sp}} \gg a$ , где  $S_{\text{sp}}$  и  $d_{\text{sp}}$  — площадь и толщина монтажного основания,  $a \equiv (S)^{1/2}$  — линейный размер чипа светодиода,  $R_{\text{sp}}$  может быть оценено в соответствии с формулой  $R_{\text{sp}} \approx (a\pi^{1/2}k_{\text{sp}})^{-1}$  [6], где  $k_{\text{sp}}$  — коэффи-

циент теплопроводности материала монтажного основания. Так, при закреплении чипа на Al (или Cu) пластине  $R_{\text{sp}} \approx 10 \text{ К/Вт}$  (5 К/Вт), а на стеклянной пластине —  $R_{\text{sp}} \approx 2000 \text{ К/Вт}$ . Таким образом, при оптимальном теплоотводе достижимый минимальный перегрев активной области ограничивается тепловым сопротивлением сапфировой подложки. Внутреннее тепловое сопротивление индикаторного светодиода может быть уменьшено до  $R_{\text{min}} \approx 30 \text{ К/Вт}$ .

## 3.2. Влияние температуры на выход света и эффективность светодиода

### 3.2.1. Влияние температуры на выход света и деградацию.

Для изучения влияния температуры на оптическую мощность светодиода было проведено исследование работы чипа светодиода в условиях фиксированной температуры материала радиатора. Светодиодная структура закреплялась на алюминиевой пластине-радиаторе сапфировой подложкой вниз. Алюминиевая пластина в свою очередь приклеивалась с помощью термопасты АлСил-3 на элемент Пельтье. Элемент Пельтье нагревался (или охлаждался) до фиксированной температуры в диапазоне 25–75°C. Измеренные в этих условиях зависимости интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) от тока  $L(I)$  приведены на рис. 2, а кривые 1–3. Для сравнения на рисунке приведена также зависимость  $L(I)$  для этой же светодиодной структуры, установленной на стеклянной пластине (кривая 4). Этот случай может считаться грубым приближением отсутствия дополнительного теплоотвода от чипа.

При увеличении тока мощность излучения светодиода выходит на насыщение, а затем начинает падать. При дальнейшем увеличении тока на 10–50 мА происходит катастрофическая деградация структуры. Уменьшение яркости структуры с ростом тока служило сигналом для прекращения эксперимента.

Эти эксперименты демонстрируют возможность увеличения яркости индикаторного светодиода за счет увеличения рабочего тока от 20 до  $\sim 350 \text{ мА}$  при оптимальном теплоотводе. Как видно из рис. 2, а при температуре материала теплоотвода 25°C (кривая 1) интенсивность света увеличивается с током вплоть до  $I = 350 \text{ мА}$  ( $W = 2.5 \text{ Вт}$ ). Оценка температурного перегрева активной области, учитывая величину  $R_{\text{min}} \approx 30 \text{ К/Вт}$ , составит  $\Delta T_{j-a} = R_{\text{min}}W \approx 75^\circ\text{C}$ , при этом  $T_j \approx 100^\circ\text{C}$ .

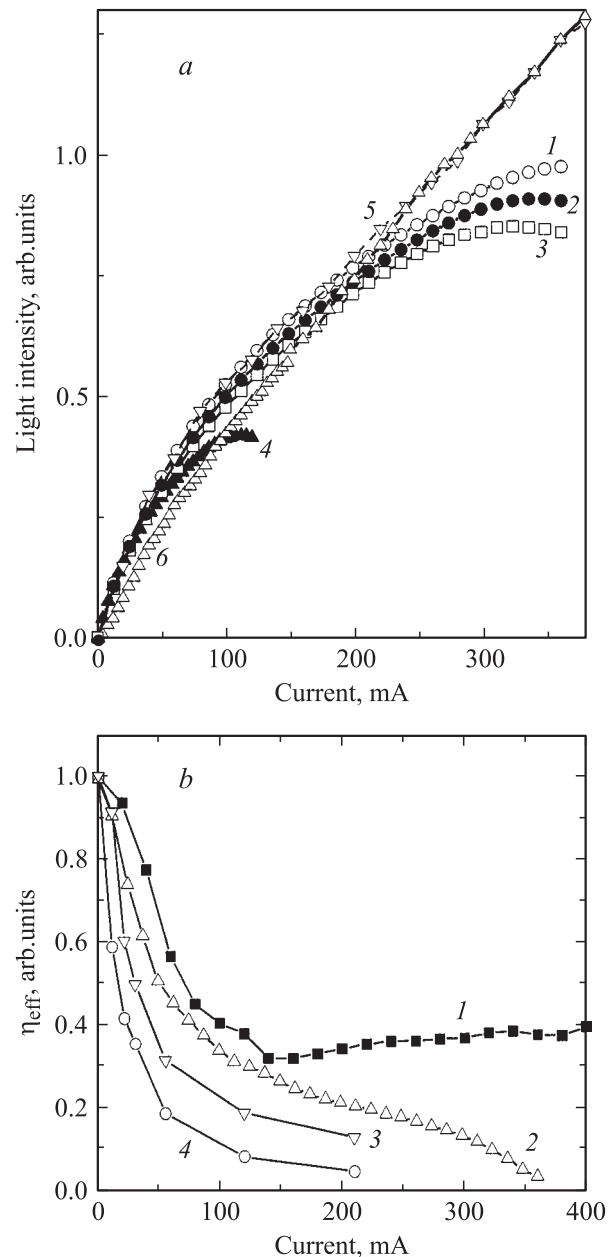
Как следует из кривой 3, даже в нагретой до 75°C светодиодной структуре с отводом тепла алюминиевой пластиной падение мощности излучения начинается при токе  $I \approx 300 \text{ мА}$  ( $W = 2 \text{ Вт}$ ), значительно большем, чем ток, при котором падает мощность структуры, установленной на стеклянной пластине ( $I \approx 80 \text{ мА}$ ). Эти данные позволяют оценить максимально допустимую температуру активной области:  $T_{\text{max}} = R_{\text{min}}W + T_a \approx 135^\circ\text{C}$ . Таким образом, достаточный теплоотвод позволяет избежать катастрофической деградации светодиода при увеличении рабочего тока до 300 мА.

**3.2.2. Влияние температуры на эффективность светодиода.** Из сравнения кривых 1 и 4 рис. 2, *a* также следует, что до тока  $I \approx 20$  мА яркость светодиода практически не зависит от режима теплоотвода. При токах  $I > 20$  мА дифференциальная эффективность светодиода, определяемая из наклона кривой  $L(I)$ ,  $\eta_{\text{eff}} \equiv dL/dI$ , уменьшается с ростом тока тем сильнее, чем хуже теплоотвод. Тем не менее из рис. 2, *a* видно, что падение эффективности с ростом тока начинается уже при малых токах, и в этой области уменьшение эффективности не связано с ростом температуры активной области. Отметим, что в стационарном режиме работы максимальная эффективность наблюдается у светодиодов на основе GaN при малых токах  $I = 0.1-1$  мА [7]. Падение эффективности с ростом тока до номинального значения  $I = 20$  мА связывается с протеканием электронов „над“ квантовой ямой [7] или туннелированием электронов „под“ квантовой ямой и их безызлучательной рекомбинацией с дырками на гетерограницах InGaN/GaN [5].

Для того чтобы разделить инжекционные потери в отсутствие джоулевого разогрева активной области протекающим прямым током и потери, вызванные джоулевым разогревом, было проведено сравнение вольт-яркостных характеристик в импульсном и стационарном режимах работы светодиода. В случае, если длительность и частота следования токовых импульсов таковы, что активная область успевает нагреваться во время импульса тока и не успевает охлаждаться в промежутках между импульсами, перегрев структуры определяется средней рассеиваемой мощностью. Характерные времена адиабатического нагрева слоев GaN,  $\tau_{\text{GaN}}$ , и сапфировой подложки,  $\tau_{\text{sap}}$ , оцененные по формуле  $\tau = c\rho d^2/k$  (где  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность,  $d$  — толщина и  $k$  — коэффициент теплопроводности соответствующего слоя структуры), составляют  $\tau_{\text{GaN}} = 10^{-7}$  с и  $\tau_{\text{sap}} = 10^{-3}$  с. Так как характерное время охлаждения структуры превышает  $\tau_{\text{sap}}$ , то при  $t_p > 10^{-7}$  с и  $f^{-1} > 10^{-3}$  с перегрев структуры определяется средней рассеиваемой мощностью  $W_p = t_p f W$  и при  $t_p f = \text{const}$  и заданной амплитуде импульса температура активной области не зависит от длительности импульса.

На рис. 2, *a* (кривые 5, 6) приведены зависимости интенсивности ЭЛ от тока светодиода, измеренные в импульсном режиме при токах в импульсе до 400 мА и длительности импульсов  $t_p = 0.3$  и 3 мкс при частоте следования  $f = 1000$  и 100 Гц соответственно. При этом рассеиваемая мощность составляет менее 0.03% мощности, рассеиваемой при протекании постоянного тока, равного амплитуде импульсного тока. Это позволяет считать, что перегрев активной области практически отсутствует ( $W_p < 1.3$  мВт). Как видно из сравнения кривых 5 и 6 рис. 2, *a*, при уменьшении длительности токового импульса от 3 до 0.3 мкс и постоянной средней рассеиваемой мощности при токах  $I > 200$  мА эффективность практически не зависит от длительности импульса. Некоторое уменьшение эффективности

при  $t_p = 0.3$  мкс, наблюдающееся при токах  $I < 200$  мА, по-видимому, обусловлено переходными процессами, связанными с туннелированием электронов на состояния гетерограниц InGaN/GaN [5].



**Рис. 2.** *a* — зависимости интенсивности света от тока для InGaN/GaN-светодиодной структуры (1–4), установленной на элементе Пельтье (1–3) или на стеклянной пластине (4), в стационарном режиме и для светодиода в импульсном режиме (5, 6). Температура теплоотвода, °C: — 1, 4 — 25, 2 — 50, 3 — 75. Длительность импульса, мкс: 5 — 3, 6 — 0.3. Частота следования, Гц: 5 — 100, 6 — 1000. *b* — токовые зависимости дифференциальной квантовой эффективности светодиода в импульсном режиме (1), светодиодной структуры, установленной на элементе Пельтье (2) при температуре теплоотвода 25°C, и светодиода фирмы Nichia вблизи *n*-контакта (3) и *p*-контакта (4).  $t_p$ , мкс: 1 — 3;  $f$ , Гц: 1 — 100.

Токовые зависимости дифференциальной эффективности  $\eta_{\text{eff}}(I)$  светодиода в импульсном режиме и светодиодной структуры, установленной на элементе Пельтье, в стационарном режиме при температуре теплоотвода  $25^\circ\text{C}$  представлены на рис. 2, *b*, кривые 1 и 2 соответственно. В импульсном режиме, в отсутствие джоулевого разогрева, эффективность падает с ростом тока до  $\sim 100$  мА, оставаясь постоянной при дальнейшем росте тока до 400 мА. Из сравнения кривых 1 и 2 следует, что в условиях эффективного теплоотвода перегрев структуры не влияет на эффективность вплоть до токов  $\sim 180$  мА (при этом  $W = 1$  Вт и  $T_j = 55^\circ\text{C}$ ), почти на порядок превышающих номинальный ток светодиода для индикаторных светодиодов. При дальнейшем росте тока эффективность падает из-за перегрева структуры.

Следует отметить, что рассмотренная выше тепловая модель светодиода предполагает однородность плотности тока по площади светодиода. В то же время неоднородность инжекции по площади должна приводить и к неоднородности температуры. Локальное тепловое сопротивление  $r$  участка структуры с повышенной плотностью тока определяется тепловым контактом этого участка с сапфировой подложкой и увеличивается с уменьшением площади этого участка  $s$  как  $r \propto k_{\text{sap}}^{-1}(\pi s)^{-1/2}$ . В результате перегрев активной области на этом участке может превысить допустимую температуру, приводя к тепловому пробую уже при небольшом токе светодиода. На рис. 2, *b* приведены токовые зависимости эффективности локальной электролюминесценции для светодиода фирмы Nichia в стационарном режиме (кривые 3–4). Зависимости получены с помощью цифровых микрофотографий. Эти измерения показали, что эффективность вблизи  $p$ -контакта падает с током значительно быстрее, чем на остальной площади светодиода (кривые 4 и 3 соответственно). Быстрое насыщение интенсивности света вблизи  $p$ -контакта с током является косвенным свидетельством повышенной температуры активной области в окрестности  $p$ -контакта.

Проведенные эксперименты показывают, что оптимальный теплоотвод позволяет увеличить рабочие токи до 350 мА и соответственно мощность до 2.5 Вт. При этом, согласно проведенным оценкам, температура активной области составляет  $T_j = 100^\circ\text{C}$ , тогда как максимально допустимая рабочая температура составляет  $T_{\text{max}} = 135^\circ\text{C}$ .

### 3.3. Джоулев разогрев и теплоотвод в маломощных светодиодах

Нами исследовалась величина перегрева рабочей области промышленных светодиодов, изготовленных на основе структур, которые использовались в предыдущем эксперименте, но заключенных в стандартный корпус.

Существует много различных бесконтактных методов определения температуры активной области светодиодов на основе GaN в условиях джоулевого разогрева. Эти

методы используют температурные изменения напряжения на  $p$ - $n$ -переходе [8], максимума или коротковолнового края спектра излучения [9], микро-рамановского рассеяния [10], рубиновой линии фотолюминесценции сапфира [11]. Точность определения температуры активной области бесконтактными методами не превышает нескольких градусов [8–11].

При прямом определении температуры перехода термодпары обычно располагают в точке выхода катодного вывода из корпуса светодиода или в точке контакта вывода с монтажной печатной платой, что понижает точность определения  $T_j$ . Так как точность определения температуры  $T_j$  повышается при приближении точки контакта термодпары к активной области структуры, мы для определения температуры активной области провели измерения с помощью термодпары, помещенной в непосредственной близости к контакту сапфировой подложки с монтажным основанием.

Была исследована температура рабочей области светодиода, выводы которого были изготовлены из малоуглеродистой стали, применяемой для выводов красных светодиодов на основе AlInGaP. Сбоку через эпоксидный корпус в монтажное основание светодиода просверливалось отверстие  $\varnothing 0.2$  мм, в которое помещалась термодпара хромель-константан. При рабочем токе 20 мА температура в точке касания составила  $49^\circ\text{C}$  и соответственно перепад температур между основанием и окружающей средой составил  $\Delta T_{sp-a} = 25^\circ\text{C}$ . Соответственно тепловое сопротивление  $R_{l-a} = \Delta T_{sp-a} / (1 - \eta_{\text{eff}})W$  при  $I = 20$  мА,  $V = 3.6$  В и  $\eta_{\text{eff}} = 0.1$  составило  $R_{l-a} = 350$  К/Вт.

Если учесть тепловые сопротивления сапфировой подложки ( $R_{\text{sap}} = 25$  К/Вт) и ее теплового контакта с основанием катодного вывода  $R_{sp}$ , то можно оценить температуру активной области светодиодной структуры. Тепловое контактное сопротивление  $R_{sp}$ , оцененное в соответствии с формулой  $R_{sp} \approx (a\pi^{1/2}k_{sp})^{-1}$  [6] при  $k_{sp} = 0.456$  Вт/см (коэффициент теплопроводности малоуглеродистой стали), составило  $\sim 44$  К/Вт. Эти тепловые сопротивления приводят к перепаду температуры между активной областью и монтажным основанием  $\sim 5^\circ\text{C}$ . В результате для перегрева активной области относительно окружающей среды получаем  $\Delta T_{j-a} \approx 30^\circ\text{C}$ , а для температуры активной области  $T_j = 54^\circ\text{C}$ . Отметим, что перегрев активной области красных светодиодов на основе AlInGaP с тем же номинальным током ( $I = 20$  мА), что и у голубых светодиодов на основе InGaN ( $V = 3.6$  В), из-за более низкого рабочего напряжения ( $V = 2$  В) составляет  $< 18^\circ\text{C}$  [12]. Оценка полного теплового сопротивления светодиода  $R_{j-a}$  с учетом экспериментально определенного значения  $R_{l-a} = 350$  К/Вт дает  $R_{j-a} = 420$  К/Вт.

В области токов  $I > 20$  мА ток светодиода ограничивается последовательным сопротивлением  $R_s$  и  $I$ - $V$ -характеристика может быть аппроксимирована линейной функцией. Тогда потребляемая мощность  $W = IV = I(V_0 + IR_s)$  ( $V_0$  — напряжение отсечки), и

температура активной области сверхлинейно растет с током. Увеличение рабочего тока до 80 мА является критическим для светодиодной структуры в данном виде упаковки. Увеличение сечения катодного вывода позволило улучшить отвод тепла от светодиодной структуры, уменьшив тепловое сопротивление  $R_{j-a}$  до 170 К/Вт. При этом перегрев монтажного основания катодного вывода составил 10°C, а температура рабочей области светодиода соответственно уменьшилась до 40°C. Такой же температурный перегрев монтажного основания (10°C) определен нами для коммерческих индикаторных светодиодов фирмы Nichia ( $\varnothing 5$  мм) с выводами из медного сплава.

### 3.4. Джоулев разогрев и теплоотвод в мощных светодиодах

Существует много вариантов организации теплоотвода и упаковки мощных светодиодов [13]. Один из вариантов упаковки, в виде „алюминиевого болта“ с боковым разъемом для подвода питания, разработанный нами, показан на рис. 3.

Данный вид упаковки значительно упрощает крепление светодиодной лампы на стенах и элементах конструкций, поскольку лампа непосредственно ввинчивается в стену, а питание к светодиодам подается сбоку, в головку болта. Кроме того, такое крепление способно отвести до 250 мВт тепловой мощности без радиатора, если лампа, например, вкручена в пластик или дерево. Для отвода большей мощности требуется дополнительный радиатор, размер которого определяется материалом стен или конструкций.

Рассчитаем необходимую площадь поверхности радиатора для отвода тепла с помощью естественной конвекции. Основной проблемой является передача тепла от радиатора воздуху. В условиях естественной конвекции (без использования вентиляторов) можно воспользоваться следующей феноменологической формулой для



Рис. 3. Конструкция мощного светодиода (1–10 Вт) в виде „алюминиевого болта“.

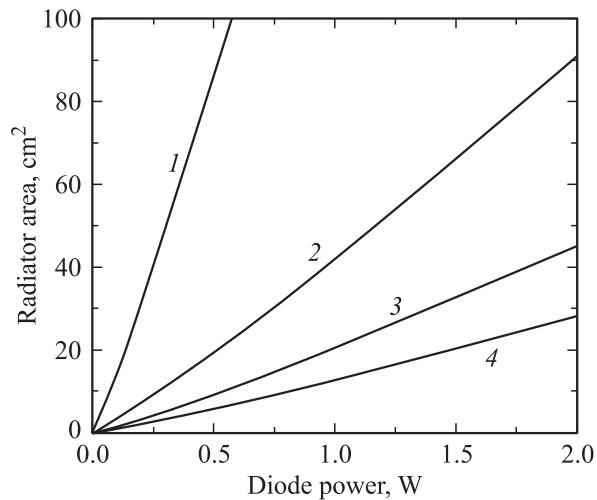


Рис. 4. Зависимость необходимой площади алюминиевого радиатора от электрической мощности при различных допустимых температурах перегрева  $\Delta T_{\text{rad}}$ .  $\Delta T_{\text{rad}}$ , °C: 1 — 10, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 70.

коэффициента передачи тепла от радиатора к воздуху  $h_{NC}$  [14]:

$$h_{NC} = C \left( \frac{T_{\text{rad}} - T_a}{L} \right)^{1/4} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{К}^{-1},$$

где  $T_{\text{rad}}$  — температура поверхности радиатора,  $L$  — характерный размер радиатора,  $C$  — коэффициент, зависящий от ориентации радиатора. Мы будем рассматривать плоскую квадратную пластину, тогда:

—  $C = 1.42 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3/4} \text{К}^{-5/4}$ , если пластина закреплена вертикально;

—  $C = 1.32 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3/4} \text{К}^{-5/4}$ , если пластина закреплена горизонтально, охлаждающей стороной вверх;

—  $C = 0.59 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3/4} \text{К}^{-5/4}$ , если пластина закреплена горизонтально, охлаждающей стороной вниз.

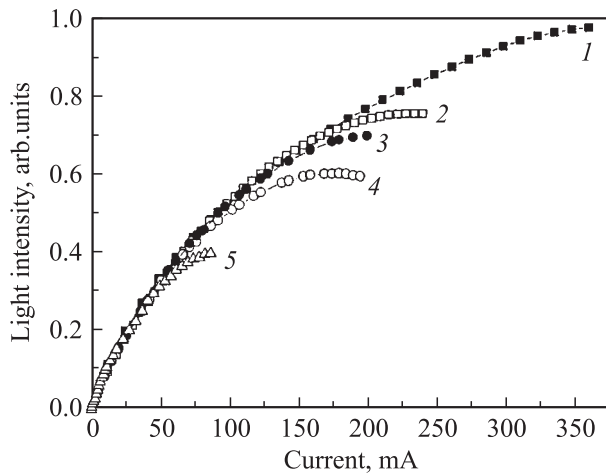
Другим каналом передачи тепла окружающей среде является излучение. Коэффициент передачи тепла излучением  $h_{RAD}$  равен:

$$h_{RAD} = \sigma \varepsilon (T_{\text{rad}}^2 + T_a^2) (T_{\text{rad}} + T_a),$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{К}^{-4}$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $\varepsilon$  — коэффициент излучения (0.2 для типичных металлов). Тепловое сопротивление  $R_{\text{rad}}$  может быть посчитано из коэффициентов передачи тепла:

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{(h_{NC} + h_{RAD})L^2}.$$

Так как коэффициенты передачи тепла зависят от температуры активного слоя  $T_j$ , для теплового сопротивления  $R_{\text{rad}}$  имеем нелинейное уравнение. На рис. 4 представлена зависимость площади радиатора, необходимой для поддержания фиксированной температуры перегрева



**Рис. 5.** Токовые зависимости интенсивности света для InGaN/GaN-светодиодной структуры при различных вариантах теплоотвода (1–4): 1 — элемент Пельтье при  $T = 25^\circ\text{C}$ ; 2 — „алюминиевый болт“, вкрученный в железную пластину; 3 — „алюминиевый болт“ с алюминиевым радиатором, вкрученный в деревянную пластину; 4 — „алюминиевый болт“, вкрученный в деревянную пластину, и для индикаторного светодиода в стандартном корпусе (5).

радиатора относительно окружающей среды ( $\Delta T_{\text{rad}}$ ) от потребляемой светодиодом мощности:

$$\Delta T_{\text{rad}} = T_{\text{rad}} - T_a = R_{\text{rad}} W.$$

Как видно из рис. 4, размер радиатора можно сильно уменьшить при повышении  $\Delta T_{\text{rad}}$ . Отсюда мы можем сделать важный вывод о необходимости разработки новых структур с активным слоем, способным работать при высокой температуре 200–300°C. Такие приборы будут очень перспективны для ярких светодиодных ламп, работающих при мощностях больше 10 Вт и не требующих радиаторов большой площади.

Были проведены эксперименты с новым видом упаковки голубых светодиодов. На рис. 5 приведены зависимости интенсивности ЭЛ от тока. Светодиодная структура помещалась на отшлифованную шляпку алюминиевого болта. Болт крепился в деревянной или стальной пластине большой площади. Так как дерево имеет низкий коэффициент теплопроводности ( $k \approx 0.2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}$ ), можно считать, что радиатором является алюминиевый болт. Как видно из рис. 5, он способен обеспечить теплоотвод для мощностей до 400 мВт (кривая 4: болт + дерево). Для увеличения рассеиваемой мощности необходимо добавить радиатор. В качестве радиатора использовалась алюминиевая квадратная пластина  $70 \times 70$  мм толщиной 1 мм, прижимаемая болтом к деревянному основанию (кривая 3: болт + радиатор + дерево). В случае со стальной пластиной можно считать, что использовался радиатор бесконечно большой площади (кривая 2: болт + стальная пластина). Для сравнения приведены зависимости интенсивности света от тока для светодиодной структуры,

установленной на элементе Пельтье (кривая 1) при  $T = 25^\circ\text{C}$ , и индикаторного светодиода в стандартном корпусе (кривая 5).

## 4. Заключение

Исследования вольт-яркостных характеристик голубых светодиодов в импульсном и стационарном режимах показали, что при оптимальном теплоотводе уменьшение эффективности светодиода с ростом тока накачки до 100 мА связано с влиянием электрического поля на эффективность инжекции носителей заряда в InGaN/GaN-квантовую яму. При дальнейшем росте тока до 400 мА причиной снижения эффективности является джоулев нагрев. Приведенные эксперименты показывают, что при обеспечении эффективного отвода тепла рабочие токи обычных InGaN/GaN-светодиодов могут быть в 5–7 раз больше с соответственным увеличением выхода света. Кроме того, предлагается классифицировать светодиоды по мощности в зависимости от способа их охлаждения.

— До 80 мВт — индикаторные светодиоды.

Для отвода тепла достаточно закрепить светодиодную структуру на выводе сечением  $0.3 \text{ мм}^2$ , изготовленном из меди.

— До 250 мВт — лампы средней мощности.

Необходим более массивный вывод, обеспечивающий лучший отвод тепла, например в виде болта М6–М8, выполненный из алюминиевого сплава.

— До 10 Вт — лампы повышенной мощности.

В дополнение к массивному выводу требуется радиатор в виде обычной плоской металлической пластины. Например, для рассеяния 1 Вт необходима алюминиевая пластина площадью около  $100 \text{ см}^2$ .

— Более 10 Вт — лампы высокой мощности.

Требуют специальных многопластинчатых радиаторов с площадью более  $100 \text{ см}^2$  или принудительного охлаждения.

Поскольку большой перепад температуры активный слой–окружающая среда позволяет значительно уменьшить размеры радиатора, необходимы разработки новых структур с активным слоем, способным работать при высокой температуре 200–300°C. Такие структуры будут перспективны для разработки ярких светодиодных ламп, работающих при мощностях больше 10 Вт и не требующих радиаторов большой площади.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ НШ-2223.2003.2.

## Список литературы

- [1] M. Yamada, T. Mitani, Y. Nurukawa, S. Shioji, I. Niki, S. Sonobe, K. Deguchi, M. Sano, T. Mukai. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, L 1431 (2002).

- [2] *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes*, ed. by S. Nakamura, S.F. Chichibu (London–N.Y.: Taylor & Francis, 2000).
- [3] Ю.Г. Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, И.Г. Сидоров. *Широкозонные полупроводники* (СПб., Наука, 2001).
- [4] Y.T. Rebane, N.I. Bochkareva, V.E. Bougrov, D.V. Tarkhin, Y.G. Shreter, E.A. Girnov, S.I. Stepanov, W.N. Wang, P.T. Chang, P.J. Wang. *Proceedings of SPIE*, **4996**, 113 (2003).
- [5] Н.И. Бочкарева, Е.А. Зhirnov, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **39**, 627 (2005).
- [6] S. Lee, S. Song, V. Au, K.P. Moran. *Proceedings of ASME/JSME Thermal Engin. Conf.*, **4**, 199 (1995).
- [7] T. Mukai, M. Yamada, S. Nakamura. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3976 (1999).
- [8] Y. Xi, E.F. Schubert. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2163 (2004).
- [9] Y. Xi, J.-Q. Xi, Th. Gessmann, J.M. Shah, J.K. Kim, E.F. Schubert, A.J. Fisher, M.H. Crawford, K.H.A. Bogart, A.A. Allerman. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 031 907 (2005).
- [10] M. Kuball, S. Pajasingam, A. Sarua, M.J. Uren, T. Martin, B.T. Hughes, K.P. Hilton, R.S. Balmer. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 124 (2003).
- [11] C. Winniesser, J. Schneider. *J. Appl. Phys.*, **89**, 3091 (2001).
- [12] <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-8097E.pdf>
- [13] D.A. Steigerwald, J.C. Bhat, D. Collins, R.M. Fletcher, M.O. Holcomb, M.J. Ludowise, P.S. Martin, S.L. Rudas. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **8**, 310 (2002).
- [14] F.P. Incropera, D.P. De Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (John Wiley & Sons, New York, NY, 1990).

Редактор Л.В. Беляков

## **Influence of Joule heating on quantum efficiency and heat regime options of high power blue InGaN/GaN light-emitting diodes**

A.A. Efremov\*, N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov,  
D.A. Lavrinovich, Y.T. Rebane, D.V. Tarkhin,  
Y.G. Shreter

\* St.-Petersburg State Polytechnical University,  
194251 St.-Petersburg, Russia  
Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The heat model of light-emitting diode (LED) with InGaN/GaN quantum well in the active region is considered. Effects of the temperature and drive currents, as well as of the radiator size and material on light output and efficiency of blue LED are studied. It is shown that in the case of optimal heat sink a decrease of efficiency with current increase up to 100 mA is due to electric field effect on injection efficiency of charge carriers in the quantum well. Joule heating causes the efficiency decrease at further current increase up to 400 mA. It is shown that operating currents of LEDs can be increased up to 5–7 times under of optimal heat sinking. Recommendations on the cooling of LEDs depending on their power are given.