

06

Мощные кремниевые светодиоды с краевой люминесценцией

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru; nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2007 г.

Из кремниевого солнечного элемента с текстурированной поверхностью площадью 21 cm^2 путем резки изготовлены светодиоды с максимальной внешней квантовой эффективностью краевой электролюминесценции при комнатной температуре $\sim 0.8\%$, в которых при импульсном токе 18 А и площади излучающей поверхности около 3 cm^2 достигнута рекордная мощность краевой электролюминесценции $\sim 46 \text{ mW}$ при внешней квантовой эффективности $\sim 0.18\%$. Исследованы зависимости параметров светодиодов от величины тока и распределение излучения по площади структуры.

PACS: 78.60.Fi, 78.60.-b, 78.55.Ap

Вероятности излучательной межзонной рекомбинации в непрямозонных полупроводниках, к которым относится и монокристаллический кремний (*c*-Si), значительно меньше, чем в прямозонных. Поэтому *c*-Si многие годы считался бесперспективным для создания достаточно эффективных источников зона-зонной (краевой) люминесценции. Но в работах [1,2] было экспериментально показано, что, если обеспечить достаточно малую концентрацию центров безызлучательной рекомбинации, квантовая эффективность краевой люминесценции в *c*-Si становится сопоставимой с квантовой эффективностью краевой люминесценции в прямозонных полупроводниках. Например, в работе [1] при комнатной температуре была достигнута внешняя квантовая эффективность (η_{ext}) краевой электролюминесценции (ЭЛ) в *c*-Si около 1%, а в работе [2] — η_{ext} фотолюминесценции около 6%. Такие высокие значения η_{ext} обеспечивались не только низкой концентрацией центров безызлучательной рекомбинации, но и за счет специального текстурирования поверхности *c*-Si для значительного (по оценкам авторов [1] примерно на порядок) увеличения отношения внешнего квантового выхода к внутреннему. В работе [1] исследовался высокоэффективный Si-светодиод (солнечный

элемент), площадью 4 cm^2 , при максимальном прямом токе $\sim 0.2 \text{ A}$. Это, по нашим оценкам, обеспечивало достижение излучаемой мощности до $W \approx 1.8 \text{ mW}$. Практический и научный интерес представляет ответ на вопрос, как будут изменяться W и η_{ext} Si-светодиода с указанной максимальной η_{ext} при значительном увеличении тока. Известно, что при достаточно больших плотностях тока и соответственно достаточно больших концентрациях свободных носителей заряда в c -Si доминирующей может стать Оже-рекомбинация, которая значительно уменьшит квантовую эффективность краевой ЭЛ. Получению ответа на указанный вопрос в основном и посвящена настоящая работа.

Для создания светодиодов использовался кремниевый солнечный элемент с размерами 3.5 cm на 6 cm , изготовленный на монокристаллической пластине p -Si. Его конструкция и технология описаны в работе [1]. Они обеспечивали сочетание малой плотности центров безызлучательной рекомбинации и описанное в [1] текстурирование поверхности для увеличения отношения внешнего квантового выхода ЭЛ к внутреннему. Помимо текстурирования и антиотражающего покрытия лицевая сторона Si-пластины содержала сформированные с шагом около 1 mm параллельно меньшей стороне солнечного элемента тонкие (шириной менее 0.1 mm) сильнолегированные n^+ -полосы. Сверху эти полосы были металлизированы и по краю пластины соединены между собой металлической шиной. Светодиоды были изготовлены путем резки солнечного элемента таким образом, чтобы удалить указанную металлическую шину и не уменьшить существенно η_{ext} . Резка позволила значительно уменьшить площадь $n^+ - p$ -переходов и обеспечить, следовательно, значительно большие плотности прямого тока и соответственно большие концентрации носителей заряда в излучающем объеме полупроводника. Исследования выполнены на структуре прямоугольной формы, площадью $S = 12 \text{ cm}^2$, с гранями, параллельными или перпендикулярными длинным сторонам металлизированных $n^+ - p$ -переходов, длиной 3 cm , не соединенных между собой металлической шиной. Выбор такой большой длины $n^+ - p$ -переходов позволил свести к минимуму влияние центров безызлучательной рекомбинации, образовавшихся вблизи линий разреза. Для практического исключения влияния центров безызлучательной рекомбинации вблизи параллельных длинным сторонам металлизированных n^+ -слоев линий разреза образца измерения проводились на $n^+ - p$ -переходах, расположенных на расстоянии более 1.5 cm от этих линий.

При измерениях спектров ЭЛ излучение с текстурированной поверхности фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора и на его выходе регистрировалось InGaAs неохлаждаемым диодом. Спектры были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и всего оптического тракта. Кинетика ЭЛ измерялась с применением работающего при комнатной температуре Ge-фотоприемника, обеспечивающего постоянную времени реакции на прямоугольный световой импульс $\sim 1 \mu\text{s}$. Для возбуждения ЭЛ к диоду прикладывалось импульсное напряжение с частотой 32 Hz. Импульсы имели прямоугольную форму при длительности 0.5–5 ms и временах нарастания и спада $< 1 \mu\text{s}$. Максимальная величина импульсного прямого тока достигала 18 А.

При определении η_{ext} использовалась идея метода, изложенная нам В.В. Кведером в частном сообщении. Она была нами доработана для учета неизотропного распределения излучения текстурированной поверхности. При измерениях мощности излучения светодиода применялся Ge-фотодиод (Hamamatsu B5170-50), имеющий в исследованной области спектра чувствительность K и площадь фотоприемной площадки S_{ph} . Он помещался на расстоянии $L = 25 \text{ cm}$ ($L \gg S_{ph}^{0.5}$) от излучающей поверхности светодиода в направлении, проходящем через излучающую поверхность и перпендикулярном плоскости образца. Измерялся фототок Y_{ph} Ge-фотодиода, и W определялась по формуле:

$$W = 2\pi L^2 Y_{ph} / K S_{ph} M. \quad (1)$$

Введенный нами коэффициент $M = 1.7$ учитывает неизотропное распределение излучения в полусфере на расстоянии L от светодиода. Его величина была определена из результатов исследования зависимости Y_{ph} от величины угла между нормалью к плоской поверхности образца и направлением на фотоприемную площадку Ge-фотодиода. Величина η_{ext} вычислялась как отношение количества квантов (N_w), излучаемых диодом в единицу времени ($N_w = W/h\nu$, где $h\nu$ — энергия квантов в максимуме их распределения по энергиям), к количеству (N_{inj}) инжектируемых в единицу времени в базу неосновных носителей заряда ($N_{inj} = Y/g$, где Y — величина прямого тока, а q — элементарный заряд). Все экспериментальные результаты получены при 300 К. При измерениях распределения интенсивности излучения по площади образца помещались в поле зрения микроскопа. Диаметр поля зрения микроскопа на излучающей площади составлял 0.5 mm. Германиевый фотодиод помещался перед окуляром микроскопа.

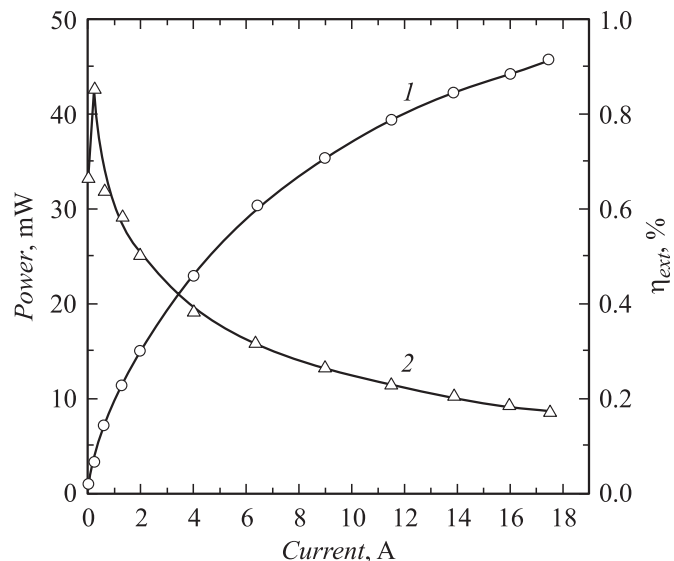


Рис. 1. Зависимость мощности излучения (1) и внешней квантовой эффективности (2) *c*-Si светодиода от амплитуды импульсного тока.

Нормированные на интенсивность в максимуме распределения по длинам волн спектры ЭЛ диодов, измеренные при токах 0.2 и 5 А, практически не различались и по форме соответствовали ранее опубликованным в [1]. Анализ длинноволновой части спектров, подобный описанному в работе [3], указывает на доминирующую роль излучательной рекомбинации через экситоны. На рис. 1 приведены зависимости излучаемой Si-светодиодом мощности и внешней квантовой эффективности от тока. Кривую 1 можно описать тремя участками: начальным нелинейным, линейным и сублинейным. Начало сублинейного участка соответствует началу спадающего участка зависимости от тока величиной η_{ext} . Наличие этих участков не объясняется изменением механизма излучательной рекомбинации, так как соответствующих изменений в спектре ЭЛ не происходит. Максимальная внешняя квантовая эффективность в исследованных диодах составляла $\sim 0.8\%$ и несущественно отличалась от максимальной η_{ext} исходного солнечного элемента ($\sim 0.85\%$). При максимальном токе 18 А мощность краевой

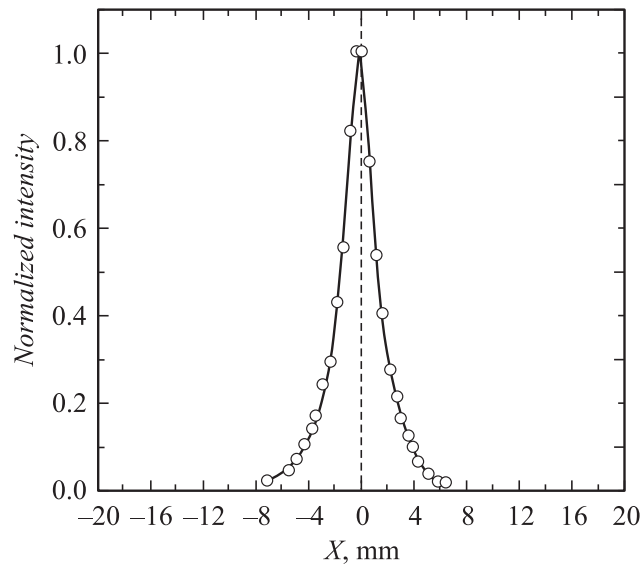


Рис. 2. Нормированное распределение интенсивности ЭЛ по направлению, перпендикулярному длинной стороне $n^+ - p$ -перехода. Начало координат соответствует положению короткой стороны исследованного $n^+ - p$ -перехода.

ЭЛ, излучаемая светодионом, составила рекордную величину в 46 mW при $\eta_{ext} = 0.18\%$.

Распределение интенсивности краевой ЭЛ по направлению, перпендикулярному длинной стороне $n^+ - p$ -перехода, представлено на рис. 2. Выбранное направление проходило через геометрический центр структуры. Значительно большая, чем ширина полосы $n^+ - p$ -перехода, ширина излучающей площадки обусловлена процессами диффузии носителей заряда вдоль поверхности структуры. Из рис. 2 видно, что основная часть краевой ЭЛ излучается в полосе шириной ~ 1 см. Исследования распределения интенсивности ЭЛ вдоль длинной стороны $n^+ - p$ -перехода показали, что спад интенсивности ЭЛ начинается на расстоянии ~ 0.3 см от края структуры и максимальное уменьшение интенсивности к краю структуры составляет $\sim 30\%$. Такие показатели и обусловили незначительное уменьшение η_{ext} после резки солнечного элемента.

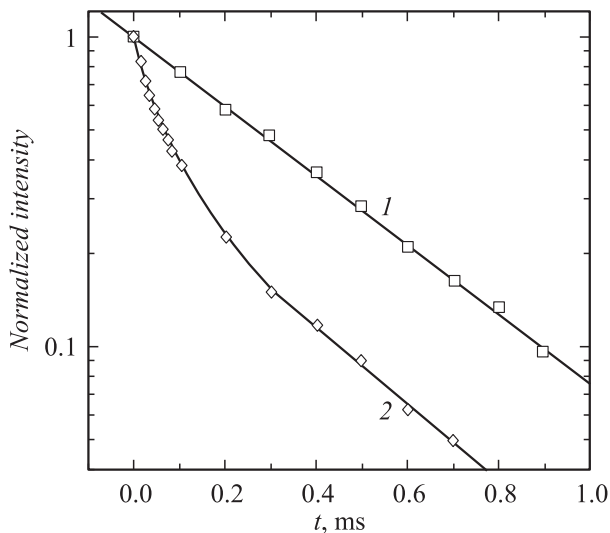


Рис. 3. Измеренная при токах 0.26 А (1) и 6.6 А (2) кинетика спада нормированной интенсивности ЭЛ.

Как и при исследованиях значительно менее эффективных Si-светодиодов [4], мы связываем спадающий участок зависимости η_{ext} от тока на рис. 1 с существенным вкладом на этом участке в безызлучательную рекомбинацию механизма Оже-рекомбинации в добавление к механизму Шокли–Рида–Холла (Shockley–Read–Hall). Это подтверждают и результаты исследований кинетики спада ЭЛ при различных токах, представленные на рис. 3. При максимальных η_{ext} спад ЭЛ на порядок величины хорошо описывался экспонентой с постоянной времени $\tau_d \approx 380 \mu s$ (кривая 1 на рис. 3). На спадающем участке зависимости η_{ext} от тока кинетика спада описывалась экспонентой с той же τ_d , только после начального более быстрого участка спада (кривая 2 на рис. 3), т.е. после уменьшения концентрации носителей заряда до величины, когда Оже-рекомбинация становится несущественной.

Таким образом, в работе достигнута рекордная мощность краевой ЭЛ кремниевого светодиода, которая более чем в 25 раз превышает полученную в работе [1]. Согласно опубликованным в [5] теоретическим оценкам и результатам работы [1], выходная мощность Si-светодиодов

может быть еще увеличена до ~ 3 раз, если вместо текстурирования использовать более эффективные конструктивные решения для вывода излучения из *c*-Si.

Авторы благодарят М.А. Грина (M.A. Green) за предоставление солнечного элемента большой площади и Е.Г. Гук за помощь при подготовке структур для измерений.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты 04-02-16935 и 07-02-01462).

Список литературы

- [1] *Green M.A., Zhao J., Wang A. et al. // Nature. 2001. V. 412. С. 805–808.*
- [2] *Trupke Th., Zhao J., Wang A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. N 18. P. 2996–2998.*
- [3] *Емельянов А.М. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 22. С. 75–81.*
- [4] *Емельянов А.М., Забродский В.В., Забродская Н.В. и др. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 7. С. 882–885.*
- [5] *Берг А., Дин П. Светодиоды. М.: Наука, 1979. С. 586. (Bergh A.A., Dean P.G. Light-emitting diodes. Oxford: Clarendon Press, 1976).*