

МОЩНЫЕ СИНИЕ СВЕТОДИОДЫ InGaN – ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Д.А.Закгейм^{1,2*}, А.С.Павлюченко^{1,2}, Д.А.Бауман²

¹ Физико-Технический Институт им.А.Ф. Иоффе РАН,

Политехническая ул. 26, 194021 Санкт-Петербург, e-mail: mitya@quantum.ioffe.ru

² ЗАО “ЭПИ-Центр”, пр.Энгельса, д.27, 194156 Санкт-Петербург

На настоящий момент внутренняя квантовая эффективность светодиодных гетероструктур на основе InGaN синего спектрального диапазона на малых токах накачки у всех ведущих мировых производителей приближается к 100%. Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что при понижении температуры эффективность светодиодов практически не возрастает [1]. Однако, два основных фактора все еще лимитируют возможности создания на основе таких светодиодов высокоэффективных мощных источников света:

- Эффект полного внутреннего отражения на границе GaN/подложка и подложка/окружающая среда не позволяет достичь высоких (близких к 100%) значений эффективности вывода света из светодиодного кристалла.
- Эффект падения эффективности с ростом тока накачки (т.н. “efficiency droop”) ограничивает диапазон рабочих токов светодиодов и, тем самым, диапазон выходных оптических мощностей.

На преодоление этих проблем направлены в настоящее время основные усилия исследовательских коллективов во всем мире. Так, предложено множество способов повышения эффективности вывода света из светодиодного кристалла путем создания на одном или нескольких интерфейсах микрорельефа, рассеивающего свет и, тем самым, позволяющего в той или иной степени преодолеть эффект полного внутреннего отражения. Как правило, эти способы (рост на профилированных подложках, lift-off подложек с последующим химическим травлением, создание фотонных кристаллов) используют дополнительные пре- или пост-ростовые операции в технологической цепочке создания светодиодного кристалла. В своей работе мы предлагаем для этих целей использование специальных пористых слоев, выращиваемых на сапфировой подложке непосредственно в MOCVD процессе роста самой гетероструктуры [2]. Применение разработанной технологии позволяет на 20-25% увеличить эффективность вывода света из светодиодного кристалла флип-чип конструкции.

Относительно причины падения эффективности InGaN светодиодных гетероструктур с ростом тока накачки в мире до сих пор идут споры. В то же время, наиболее убедительной на данный момент нам представляется предположение о лимитирующей роли Оже-рекомбинации, чей вклад в общую скорость рекомбинации начинает преобладать при высоких концентрациях носителей в активной области, впервые предложенное исследователями из Phillips-Lumileds. В той же работе для решения этой проблемы ими предлагалось использовать в качестве активной области светодиодных гетероструктур относительно толстые слои InGaN вместо квантовых ям. Однако, такое решение сопряжено с серьезными технологическими трудностями – из-за большого рассогласования постоянных решетки вырастить достаточно толстый низкодефектный слой InGaN на GaN не удастся. Вместо этого, мы в своей работе предлагаем использование с той же целью короткопериодных решеток InGaN/GaN. Применение таких решеток с толщиной барьеров порядка толщины самих квантовых ям позволило существенно уменьшить падение квантовой эффективности гетероструктуры с ростом накачки. При такой толщине барьеров, носители успевают туннелировать из квантовой ямы, ближайшей к p-n переходу в нижележащие ямы и, тем самым, их концентрация при той же плотности тока накачки оказывается ниже, чем в “традиционных” многоямных структурах, где барьеры туннельно не прозрачны.

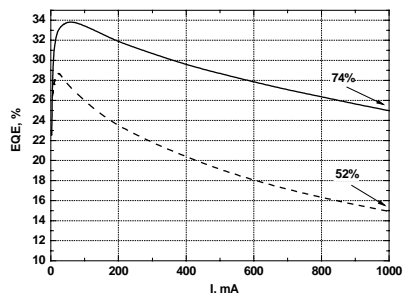


Рис.1. Зависимость внешней квантовой эффективности для светодиодов на основе модифицированной (сплошная линия) и стандартной (пунктир) гетероструктур.

Рис.1 иллюстрирует эффект применения 4-х ямной активной области с туннельно-прозрачными барьерами в сравнении с реперной активной областью, состоящей из 5 квантовых ям, разделенных барьерами 8 нм. Представленные на рисунке зависимости измерены на светодиодах, изготовленных из кристаллов типа МК-24 с площадью активной области $\sim 1\text{мм}^2$ [4]. Длина волны излучения светодиодов составляет 450 нм. Как видно из рисунка, падение эффективности к току 1А ($\sim 100\text{ А/см}^2$) в модифицированной структуре составляет 26% от максимальной величины против 48% в стандартной структуре. При этом максимальное значение внешней квантовой эффективности в светодиодах на основе гетероструктуры с туннельно-прозрачными барьерами (34%) также заметно превосходит максимум эффективности стандартных образцов (28.5%).

Таким образом, использование предложенных в работе модификаций InGaN светодиодной гетероструктуры позволило создать мощные синие (450 нм) светодиоды с внешней квантовой эффективностью более 30% на рабочем токе 350 мА.

- [1] А.С.Павлюченко, И.В.Рожанский, Д.А.Закгейм, ФТП **43**(10), 1391(2009)
 [2] D.A. Zakheim, A.S.Pavluchenko, D.A.Bauman, Abstracts of 8-th International Conference on Nitride Semiconductors, October 18-23, 2009, ICC Jeju, Korea, p.1389 (2009)
 [3] C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames APL **91**, 141101 (2007)
 [4] Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, С.А.Гуревич, М.М.Кулагина, Е.М.Аракчеева, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон. ФТП, **39** (7), 885 (2005).

HIGH-POWER BLUE InGaN LEDs – WAYS TO INCREASE EFFICIENCY

D.A.Zakheim^{1,2}, A.S.Pavluchenko^{1,2}, D.A.Bauman²*

¹A.F.Ioffe Physico-Technical Institute,

Polytechnicheskaya 26, 194021 Saint-Petersburg, e-mail: mitva@quantum.ioffe.ru

²Joint-Stock Company “Epi-Center”, Engelsa 27, 194156 Saint-Petersburg

In this work two main approaches improving external quantum efficiency of high-power blue InGaN LEDs are proposed. First, we suggest using thin barriers between QW in the active region to enable carrier tunneling between QWs, thus decreasing carrier concentration at given pumping. This leads to the minimization of the impact of non-radiative Auger-recombination on the device efficiency. Another suggestion is the modification of the MOCVD growth technique so as to produce submicron size air pores at the substrate/semiconductor interface. The porous layer scatters the generated light and increases the light extraction efficiency up to 20-25%. Utilizing these modifications, 450 nm LEDs having external efficiency >30% at 350mA were demonstrated.

ТУННЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ПАДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ В GaN-СВЕТОДИОДАХ

***Н.И. Бочкарев¹, В.В. Вороненков², Р.И. Горбунов¹, А.С. Зубрилов¹,
Ю.С. Леликов¹, Ф.Е. Латышев³, Ю.Т. Ребане¹, А.И. Цюк², Ю.Г. Шретер^{1*}.***

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Политехническая ул., 26,
194021, Санкт-Петербург, +7(921)9606185, e-mail: shreter@peterlink.ru ;

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Политехническая ул., 29, 195251, Санкт-Петербург

³НИИ Физики им. В.А. Фока Физического факультета СПбГУ.
Ульяновская ул., 1, 198504, Санкт-Петербург

Ключевая проблема мощных светодиодов – падение квантовой эффективности с ростом плотности тока выше $j = 0.4 - 4 \text{ А/см}^2$. Несмотря на то, что в течение последнего десятилетия этот эффект привлекает к себе внимание, единый взгляд на его механизм в литературе отсутствует.

Цель работы состояла в выяснении механизма падения внешней квантовой эффективности с ростом тока в коммерческих светодиодных структурах с AlGaIn/InGaIn/GaN квантовыми ямами. Квантовая эффективность голубых светодиодов фирмы Nichia с одиночной квантовой ямой Al_{0.2}Ga_{0.8}N/In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN исследовалась в области температур 77 - 300 К.

Наши исследования показали, что внешняя квантовая эффективность как функция тока $\eta(J)$ имеет максимум во всем исследованном температурном диапазоне. При понижении температуры максимум сдвигается в область малых токов, а максимальная эффективность увеличивается. Обнаружено, что падение эффективности начинается практически при одном и том же напряжении $U_{max} \approx 2.9 \text{ В}$ при различных температурах (рис. 1 (а)). Это позволяет сделать важный вывод, что падение эффективности определяется не током, а напряжением, приложенным к структуре.

При напряжении U_{max} разность электронного и дырочного квазиуровней Ферми, равная $\Delta F = qU_{max} \approx 2.9 \text{ эВ}$, близка к эффективной ширине запрещенной зоны ($E_{g,InGaIn}$) или порогу подвижности (E_{me}) в активном слое In_{0.2}Ga_{0.8}N квантовой ямы, составляющих $E_{me} \equiv E_{g,InGaIn} = 2.89 \text{ эВ}$. Вблизи этого же напряжения $U_{max} \approx 2.9 \text{ В}$ наблюдается также уменьшение наклона $\log I-V$ -характеристик. Так, при комнатной температуре фактор идеальности, определенный с учетом резистивных потерь, при $U > U_{max}$ увеличивается от $n = 1.4-2$, характерного для термоактивационного механизма прохождения тока, до $n = 4.4$, характерного для туннельного механизма. Отсюда следует, что падение эффективности наблюдается при напряжениях, когда транспорт носителей через структуру определяется туннелированием, а не тепловой диффузией. Полученные результаты трудно связать с Оже-рекомбинацией или “перелетом” электронов “над” квантовой ямой и их инжекцией в p -область структуры.

Нами будет представлена туннельная модель транспорта носителей в структурах с квантовой ямой, позволяющая описать наблюдаемые $I-V$ -характеристики и понять механизм падения квантовой эффективности при напряжениях $U > U_{max}$. Модель учитывает влияние на внутреннюю квантовую эффективность туннельных переходов носителей из квантовой ямы на глубокие дефектные состояния в барьерах с последующей безизлучательной рекомбинацией на этих центрах. Модель учитывает также влияние на эффективность инжекции в квантовую яму (при $U > U_{max}$) “избыточного” туннельного тока утечки “под” квантовой ямой через глубокие состояния в барьерных слоях n -GaIn и p -AlGaIn.

Согласно предлагаемой модели, при $U > U_{max}$ время жизни носителей, локализованных в хвостах плотности состояний активного слоя InGaIn, зависит не только от энергии локализации, но и от приложенного напряжения. Когда мы прикладываем напряжение, изменяя квазиуровни Ферми и спрямляя зоны в структуре, дно зоны проводимости квантовой ямы сканирует плотность глубоких состояний в барьере p -AlGaIn от более глубоких состояний при малых напряжениях к более мелким состояниям при больших напряжениях. Из-за более высокой плотности более мелких состояний вероятность туннелирования из квантовой ямы возрастает. При этом время жизни локализованных носителей и внутренняя квантовая эффективность уменьшаются с напряжением.

Для проверки этой модели нами проведены измерения квантовой эффективности для различных участков спектра. Рис. 1 (б) иллюстрирует поведение эффективности излучения фотонов с энергией $h\nu$ при повышении напряжения. При этом $\eta_{h\nu}(U) \equiv I_{h\nu}(U)/J(U)$ можно определить как спектральную эффективность, равную числу излучаемых фотонов с энергией $h\nu$ при протекании во внешней цепи одного электрона ($I_{h\nu}$ – интенсивность излучения фотонов с энергией $h\nu$). Зависимости $\eta_{h\nu}(U)$ получены из серии спектров электролюминесценции при прямых смещениях.

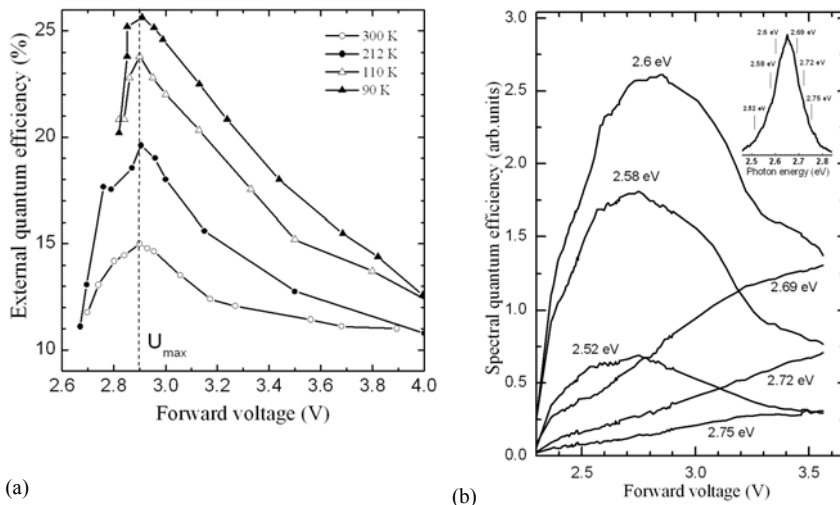


Рис.1. Зависимости внешней квантовой эффективности от напряжения в температурном диапазоне 90-300 K (a); Зависимости спектральной эффективности электролюминесценции (η_{hv}) от напряжения. На вставке: спектр излучения при напряжении $U = 3.6$ В и токе $J=20$ мА (b).

Пример спектра, использованного для расчета зависимостей $\eta_{hv}(U)$, представлен на вставке. Анализ зависимостей $\eta_{hv}(U)$ позволил сделать вывод, что причиной падения эффективности с напряжением являются как туннельные переходы носителей из квантовой ямы на глубокие состояния в барьерах, так и уменьшение эффективности инжекции носителей в квантовую яму в результате роста “избыточного” туннельного тока утечки “под” квантовой ямой через дефектные состояния в барьерах.

TUNNELING MECHANISM OF EFFICIENCY DROOP IN GaN LIGHT-EMITTING DIODES

N.I. Bochkareva¹, V.V. Voronenkov², R.I. Gorbunov¹, A.S. Zubrilov¹, Y.S. Lelikov¹, F.E. Latyshev³, Y.T.Rebane¹, A.I. Tsuk², Y.G. Shreter^{1}*

¹A.F.Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Polytechnicheskaya st., 26, 194021, St. Petersburg, phone +7 (921) 9606185, e-mail: shreter@peterlink.ru ;

² St.-Petersburg State Polytechnical University, Polytechnicheskaya st., 29, 195251, St. Petersburg

³V.F.Fock Institute of Physics St.Petersburg State University, Uljanovskaya st., 1, 198504, St. Petersburg

The quantum efficiency of GaN-based light-emitting diode structures is investigated at temperatures 77-300 K. It is found that mechanism of efficiency drop is not related with value of current through LED structure, but is determined by applied voltage. Efficiency starts to drop practically at the same voltage value $U_{max} \approx 2.9$ V at different temperatures, when electron and hole quasi-Fermi levels reach the bottom of conduction band and the top of valence band in QW respectively. It is shown that external quantum efficiency droop is related to reduction of internal quantum efficiency due to tunneling leakage of carriers from quantum well to defect states in barriers, and reduction of injection efficiency due to shunting of QW by “excess” tunneling current under quantum well through deep defect states in barriers.

ВКЛАД ОЖЕ-РЕКОМБИНАЦИИ В ПАДЕНИЕ ВНЕШНЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИНИХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ЯМ InGaN

Е.В. Богданова¹, Б.Я. Бер¹, А.А. Грешинов^{1}, А.Л. Закгейм¹, Г.Г. Зегря¹, Д.Ю. Казанцев¹, З.Н. Соколова¹, А.С. Павлюченко¹, А.Е. Черняков¹, Н.М. Шмидт¹, Е.Б. Якимов²*

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе. Политехническая ул., 26, 194021, Санкт-Петербург, тел. +7(812)4567890, e-mail: a_greshnov@hotmail.com;

² Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов. Институтская, 6, 142432, Черноголовка.

Падение внешней квантовой эффективности светодиодов на основе квантовых ям In_xGa_{1-x}N/GaN при плотностях тока инжекции $j > 10$ А/см² является одной из основных причин, тормозящих их применение для решения проблемы энергосберегающего освещения. Было предложено несколько механизмов падения эффективности с током, однако единой точки зрения до сих пор не выработано [1]. В данной работе выполнено экспериментальное и теоретическое исследование физических процессов, приводящих к падению внешней квантовой эффективности InGaN светодиодов. Для выяснения общих закономерностей были проведены комплексные исследования нескольких партий синих ($\lambda \sim 450$ -460nm, $x \sim 0.2$) светодиодов, изготовленных ЗАО “Светлана-Оптоэлектроника” и коммерческих светодиодов фирмы Cree, включавшие анализ спектров электро- и фотолуминесценции, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик в диапазоне температур от 100 до 400К. Исследуемые светодиоды имели максимальную эффективность от 15 до 40%. Было выполнено исследование профилей распределения компонент твердого раствора InGaN и легирующих примесей методом вторичной ионной масс-спектрометрии.

Проведенный анализ позволил исключить ведущую роль большинства из предполагаемых причин падения внешней квантовой эффективности с током, таких как безызлучательная рекомбинация с участием точечных дефектов, локальные перегревы и встроенные пьезоэлектрические поля. Наиболее подходящим кандидатом для объяснения спада эффективности является согласно работе [2] механизм безызлучательной Оже-рекомбинации. В этом случае должен наблюдаться спад квантовой эффективности по закону $\eta(j) \sim j^{-b}$, $b=1$. На рис.1 представлены зависимости внешней квантовой эффективности от плотности тока, из которых видно, что для всех исследованных светодиодов $0.2 < b < 0.3$. Для теоретической оценки времен Оже-рекомбинации в светоизлучающих структурах с квантовыми ямами InGaN мы использовали стандартное выражение [3], для простоты пренебрегая обменным вкладом:

$$R = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{1,2,3,4} f_1 f_2 (1 - f_3) (1 - f_4) \left| \langle 12 | \frac{e^2}{\epsilon r} | 34 \rangle \right|^2 \delta(E_1 + E_2 - E_3 - E_4)$$

Выполненная нами оценка темпа Оже-рекомбинации в модели однородных квантовых ям In_{0.2}Ga_{0.8}N показывает, что при плотностях тока накачки $j \sim (10-100)$ А/см² время $\tau_{\text{Аже}} > 10^{-8}$ с, т.е. как минимум на порядок больше времени излучательной рекомбинации. Такое соотношение времен обусловлено сильной зависимостью темпа Оже-рекомбинации R от ширины запрещенной зоны материала активных слоев, а именно $R_{2D} \sim E_g^{-6}$. Таким образом, стандартные механизмы Оже-рекомбинации в квантовых ямах [4] (пороговый, квазипороговый и беспороговый каналы Оже-рекомбинации) не годятся для объяснения падения с током квантовой эффективности нитридных светоизлучающих структур.

Хорошо известно, что латеральная структура нитридных слоев является сильно неоднородной с большим количеством флуктуаций состава твердого раствора и протяженных дефектов [5]. При этом типичная плотность дислокаций на 5 порядков выше, чем в традиционных материалах типа GaAs. Очевидно, что зонная структура вблизи системы протяженных дефектов сильно деформирована, и можно предполагать наличие большого числа узкозонных нановключений, например наноостровков материала InN, запрещенная зона которого составляет 0.7eV. В этом случае (типичный) темп Оже-рекомбинации усиливается на 2-3 порядка благодаря двум факторам: более сильному (“нульмерному”) пространственному ограничению (что приводит к зависимости $R \sim E_g^{-4.5}$) и узкозонности материала. Оценка показывает, что потери на безызлучательную рекомбинацию сравниваются с излучаемой мощностью, когда доля узкозонных нановключений ($E_g \sim 0.7$ eV, $d \sim 5$ nm) становится порядка 0.1%. Учитывая, что локальные времена Оже-рекомбинации на таких нановключениях на два порядка меньше, чем излучательные, в спектрах электролюминесценции эти области могут проявляться с весом $\sim 10^{-5}$, что находится за пределами точности типичных спектральных измерений.

Таким образом, Оже-рекомбинация вблизи характерных для нитридов пространственных неоднородностей и системы протяженных дефектов является достаточно вероятным механизмом потерь, снижающих эффективность работы светодиодов синего спектрального диапазона. При этом относительно слабый характер падения квантовой эффективности с током, $\eta(j) \sim j^{-b}$, $b=0.2-0.3$, объясняется, по-видимому, неквазиравновесным заполнением носителями флуктуаций состава твердого раствора InGaN. Конечно, нельзя исключать и существенную роль других механизмов, например инжекционных потерь.

- [1] X. Ni et al.. Appl. Phys. Lett., **93**, 171113 (2008).
 [2] Y.C. Shen et al.. Appl. Phys. Lett., **91**, 141101 (2007).
 [3] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясневич. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. - С. Петербург: Издательство ПИЯФ РАН, 1997.
 [4] Г.Г. Зегря, А.С. Полковников. ЖЭТФ, **113**, 1491 (1998).
 [5] А.Е. Chernyakov, М.М. Sobolev, V.V. Ratnikov, N.M. Shmidt, E.B. Yakimov. Superlat. Microstr., **45**, 301 (2009).

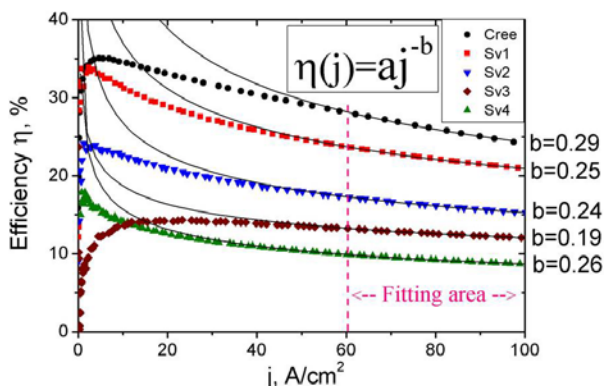


Рис.1. Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока накачки для пяти светоизлучающих структур и их степенная аппроксимация.

AUGER RECOMBINATION CONTRIBUTION TO THE EFFICIENCY DROOP OF BLUE InGaN MQW BASED LEDS

B.Ya. Ber¹, A.A. Greshnov^{1}, A.L. Zakgeim¹, G.G. Zegrya¹, D.Yu. Kazanzev¹, Z.N. Sokolova¹, A.S. Pavluchenko¹, A.E. Chernyakov¹, N.M. Shmidt¹, E.B. Yakimov²*

¹A.F. Ioffe Physico-Technical Institute. Polytechnicheskaya, 26, 194021, St Petersburg, phone. +7(812)2927367, e-mail: a_greshnov@hotmail.com;

² Institute of Microelectronics Technology. Institutskaya, 6, 142432, Chernogolovka.

The effect of efficiency droop with injection current in InGaN blue LEDs is studied using a complex of different experimental techniques and theoretical analysis. A series of MQW InGaN samples grown by ZAO "Svetlana-Optoelectronics" have shown the peak efficiencies close to the values of the leading companies. We have fitted $\eta(j)$ curves presented in Fig.1 by power law and deduced the index b which was between 0.2 and 0.3. Also we have estimated Auger recombination rate assuming the model of the homogenous InGaN and deduced characteristic time τ_{Auger} to be greater than 10^{-8} s, i.e. an order of magnitude higher than radiative recombination time. However, taking into account numerous lateral inhomogeneties typical for the nitrides changes this ratio dramatically. Namely, assuming only 0.1% of the area to be filled by the narrow-bandgap nanoislands ($E_g \sim 0.7\text{eV}$, $d \sim 5\text{nm}$) we obtain the comparable values of the effective radiative and non-radiative rates (i.e. $\eta \sim 50\%$). In conclusion, we consider Auger recombination in the vicinity of the lateral inhomogeneties and extended defect system as a probable mechanism behind the efficiency droop.