

Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN

Статья посвящена исследованиям деградационных явлений в излучающих кристаллах светодиодов. Рассмотрены причины возникновения деградации светового потока, изменения спектрального состава излучения со временем наработки. На основе представленных результатов измерений и теоретических расчетов разработана система оценки потенциальной степени изменения основных параметров светодиодов на производстве. Материал может быть полезен для производителей светодиодов, разработчиков и исследователей характеристик излучающих гетероструктур на основе твердых растворов AlGaInN.

Причины разработки метода

Стремительное развитие технологии производства излучающих структур в последние годы привело к значительным успехам в области повышения качества приборов на их основе. Существенно увеличилось число различных конструкций и типов серийно производимых кристаллов, изготовленных на основе эпитаксиальных гетероструктур твердых растворов AlGaInN, позволяющих создавать источники излучения с любыми необходимыми характеристиками для различных сфер применения. Однако имеет место ряд проблем при изготовлении как самих гетероструктур, так и светодиодов на их основе, которые до сих пор недостаточно исследованы, а отсутствие методов их комплексного решения на стадии производства излучающих кристаллов и технологии их сборки в светодиодах существенно ограничивает применение готовых приборов в большинстве устройств специальной сигнализации (светофоры, световая сигнализация), в устройствах ответственного применения с повышенной степенью надежности (судовое, шахтное и аварийное освещение) и в устройствах стратегического назначения (военная и космическая техника). Наиболее значимой является проблема изменения (деградации) всего комплекса первоначальных параметров излучающих структур и светодиодов в целом. Изучение механизмов деградации в сложившихся условиях массового производства кристаллов и светодиодов на их основе является очень актуальным. Результаты исследований выходят за рамки чисто научных программ и становятся востребованными не-

посредственно на производстве, где уже сейчас все больше требуется достоверная оценка не только параметров произведенных светодиодов, но и прогнозирования их надежности и срока службы.

Установление связи между скоростью деградации важнейших параметров светодиодов в процессе наработки с величинами этих параметров до наработки в перспективе дает возможность количественно предсказывать срок службы светодиодов еще на стадии производства.

Актуальность совершенствования методик

Основным параметром, взятым для исследования светодиодов, является световой поток Φ . Детальное наблюдение за его изменением в процессе длительной наработки именно с целью сопоставления с физикой работы структур не производилось ранее из-за относительной «непоказательности» этой зависимости для пользователя, чтобы объяснить картину происходящих изменений в светотехнических параметрах, к которым привязаны большинство спецификаций на светодиодах. «Интегральность» этого параметра не позволяет проследить за изменениями угловых характеристик и значений силы света на разных участках диаграммы. Однако именно световой поток является наиболее корректной величиной с точки зрения физики работы излучающей структуры [1]. Это позволяет сделать изучение причин деградации более частным и предоставляющим возможность дифференцировать причины, относящиеся только к энергетиче-

ским. В то же время при необходимости можно легко перейти к характеристикам мощности излучения, используя данные измерений спектрального состава этой мощности [2]. Следует также отметить, что предположение о том, что в процессе наработки изменяется значение силы света в определенных точках диаграмма углового распределения излучения структуры, но не изменяется значение светового потока при этом, а только лишь перераспределяется его плотность в пространстве диаграммы распределения, обязано именно изучению поведения светового потока. При этом важно иметь в виду, что перераспределение мощности в описанном случае может быть совсем другим, не таким, как перераспределение потока (поскольку возможно пропорциональное этому изменению спектра излучения по объему диаграмма углового распределения), что подчеркивает уже совсем иной эффект [3–5]. Поэтому существующие в настоящее время результаты исследования деградации по методу фиксации значения силы света в определенной точке индикатрисы излучения, спектрального распределения или измерения мощности излучения не отражают всей картины происходящих в излучающей структуре изменений в процессе наработки.

Физические механизмы деградации параметров

Исходя из модели построения площади излучающей структуры в виде большого числа площадей отдельных p - n -переходов с различными характеристиками, включенными параллельно (рис. 1) и имеющими функцию распределения по площади, можно установить связь между изменениями суммарных характеристик всей структуры и отдельных ее составляющих. Это утверждение хорошо объясняет факт именно перераспределения энергетических параметров излучения, а не их количественного изменения. Если принять также, что отдельные участки пространства заряда имеют, помимо отличающихся значений прямого напряжения, еще

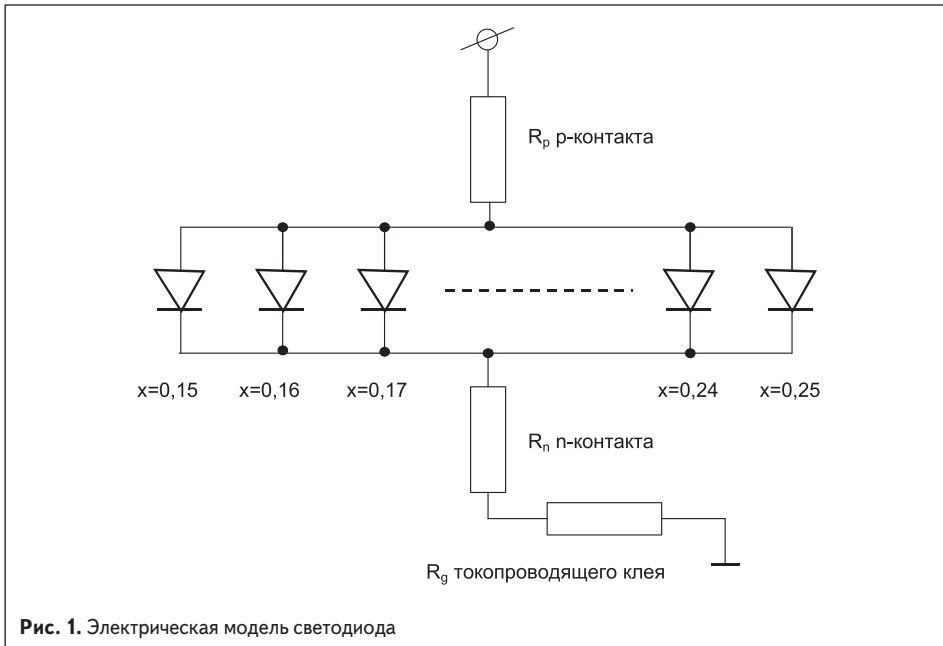


Рис. 1. Электрическая модель светодиода

и различные значения ширины запрещенной зоны E_g , то можно предположить, что изменение суммарного Uf вызовет изменение эффективной E_g , а функция распределения сегментов с отличными Uf будет соответствовать функции распределения E_g . Это, в свою очередь, и показывает диаграмма относительного спектрального распределения мощности излучения структуры, которая определяется формулой (1) и пропорциональна плотности состояния заполнения в зоне проводимости и свободных состояний в валентной зоне в соответствии с законом распределения Ферми — Дирака для электронов и дырок:

$$I(h\nu) \sim \nu^2 \times (h\nu - g)^{1/2} \times \exp[-(h\nu - E_g)kT], \quad (1)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны; $h\nu$ — энергия фотона.

Более развернутая пропорциональность $I(h\nu) \sim E_g$ для гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN подробно описана в [6] с применением модели рекомбинации в хвостах 2D плотности

состояний. Вероятно также, что размеры площадей микро- p - n -переходов определяются флуктуациями содержания индия в активном слое.

В некоторых публикациях [7, 8] было высказано предположение, что многие экспериментальные данные по свойствам синих светодиодов, таких как ширина спектрального распределения, сдвиг максимума излучения в коротковолновую область при увеличении плотности прямого тока в отсутствие нагрева активной области (например, при питании в импульсном режиме), вольт-амперные характеристики и т. д., могут быть рассмотрены на основе модели неравномерного распределения состава $In_xGa_{1-x}N$ в активной области кристалла. При этом предлагалось рассматривать модель кристалла и светодиода, изображенную на рис 1.

Согласно этой модели, светодиод представляет собой совокупность параллельно включенных микродиодов, имеющих одинаковые параметры широкозонных GaN-эмиттеров

n - и p -типа, но отличающихся друг от друга содержанием индия в квантовых ямах. Последовательно с этой совокупностью микродиодов включено общее сопротивление контактов. Площади микродиодов (секторов, площадок) $S(x)$ с различным содержанием индия (x) в квантовых ямах в первом приближении могут быть описаны гауссовским распределением относительно средних значений $x = 0,4$ для зеленых светодиодов и $x = 0,2$ для синих. Поэтому был принят следующий вид распределения (2):

$$S(x) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} \times \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2 \times \sigma^2}\right] = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi} \times 0,0167} \times \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2 \times 0,0167^2}\right], \quad (2)$$

где S_0 — полная площадь кристалла светодиода, величина x изменяется дискретно в пределах 0,15–0,25 с шагом $dx = 0,01$, а величина $x_0 = 0,2$.

По многим экспериментальным данным, величина x_0 является типичной для синих светодиодов. Распределение и величины $S(x)/S_0$ для различных значений x показаны на рис. 2. Здесь S_0 — полная площадь кристалла светодиода. Величина $\sigma = 0,0167$ выбрана из необходимости соблюдения условия (3):

$$(x_{\min} - x_0) = (x_{\max} - x_0) = 3\sigma. \quad (3)$$

Таким образом, необходимо рассчитать ВАХ каждого микродиода со своим значением x и своей величиной площади, а затем, учитывая их параллельное соединение при заданной величине прямого напряжения, рассчитать вольт-амперную характеристику светодиода в целом.

Моделирование вольт-амперных характеристик светодиодов с различной величиной состава x в квантовых ямах проведено в диапазоне прямых напряжений между GaN-эмиттерами n - и p -типа $U_{p-n} = 1-4$ В.

В результате моделирования определено, что при значениях $x = 0,15...0,17$ (более мелкие квантовые ямы) плотность тока значительно больше, чем при значениях $x = 0,18...0,25$ (рис. 3).

Моделирование спектра излучения было основано на расчетах суммарной скорости излучательной рекомбинации в наборе квантовых ям (UBB) и полного числа квантов, излучаемых в наборе ям ($UBB \times S \times d$) при различных значениях состава x [9].

Соответствие полученных различными способом характеристик позволяет использовать рассчитанные данные для обоснования закономерностей в изменениях характеристик синих светодиодов, наблюдающихся при их длительной наработке.

$$\Phi(t) = \Phi(0h) \times \exp(-J \times \alpha \times t), \quad (4)$$

где J — плотность тока (A/cm^2); t — время наработки (ч); α — коэффициент, описываю-

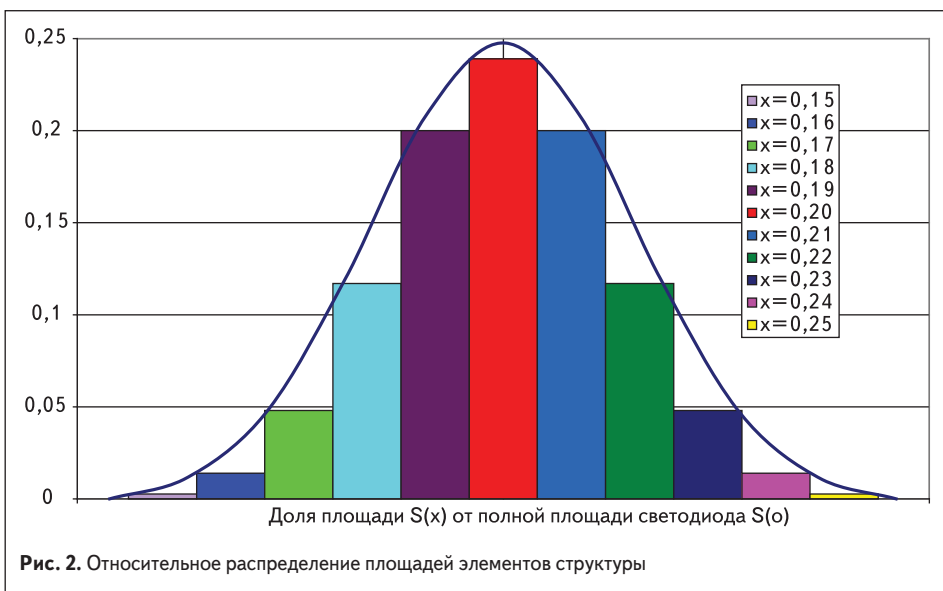


Рис. 2. Относительное распределение площадей элементов структуры

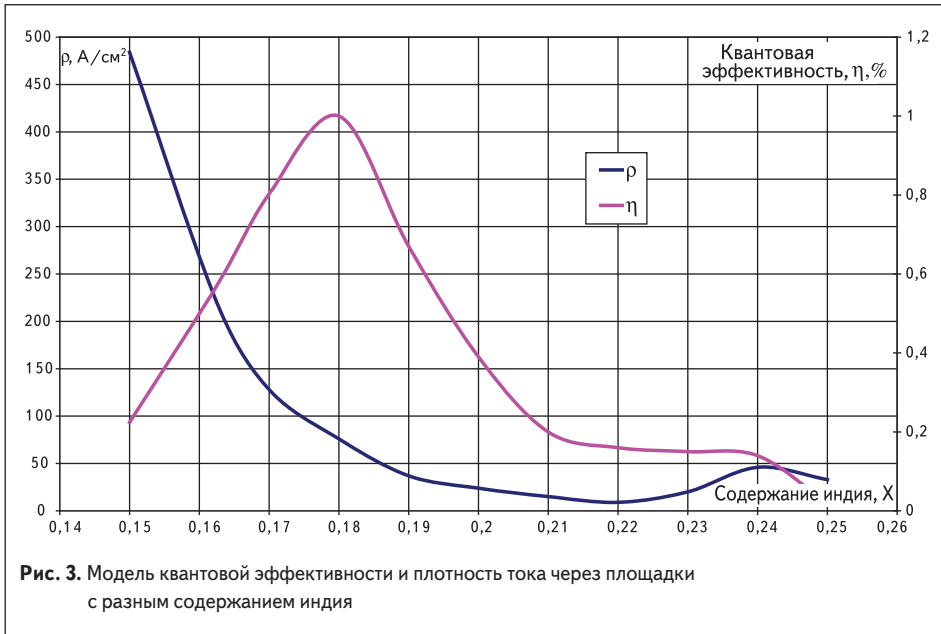


Рис. 3. Модель квантовой эффективности и плотность тока через площадки с разным содержанием индия

щий скорость деградации ($\text{см}^2 \times \text{А}^{-1} \times \text{ч}^{-1}$); $\Phi(t)$ — световой поток через время наработки t ; $\Phi(0h)$ — начальный световой поток (лм).

Поскольку деградация величины светового потока экспоненциально зависит от плотности тока (4), то в большей степени деградации подвержены области структуры с малыми значениями $x = 0,15...0,17$, через которые протекают токи с большой плотностью (рис. 3). Вследствие этого спектры излучения в процессе наработки смещаются в длинноволновую сторону, поскольку более коротковолновая часть спектрального распределения деградирует быстрее. Таким образом, можно рассчитать фактор деградации светового потока α и значение светового потока в любой момент времени наработки t_n относительно начального $\Phi(0h)$ или установившегося периода стабилизации параметров (1000–3000 ч), что может служить долгосрочным прогнозом поведения этой важной характеристики.

Определено, что расчетная кривая практически совпадает с усредненной ВАХ для образцов, имеющих наибольшее начальное прямое напряжение, однако также установлено, что ВАХ светодиодов с наименьшим $U_f(0h)$ отличается крутизной характеристики как на самых малых токах, так и при самых больших плотностях, в некоторой части (при средних значениях тока) пересекая расчетную кривую (рис. 4).

На рис. 4 видно отличие крутизны характеристик на самых малых и самых больших токах, свидетельствующее о большом содержании дефектов, которые отсутствуют как в образцах с большим U_f , так и в расчетной ВАХ. Предполагается, что в процессе деградации распределение общей площади фрагментов с различным содержанием индия будет тяготеть к преобладанию сегментов с более высоким его содержанием, что будет соответствовать увеличению суммарного прямого напряжения при больших плотностях тока и увеличению максимальной длины волны излучения. В то время как при малых плот-

ностях тока прямое напряжение, наоборот, уменьшается. Хорошо доказывает это предположение подробное рассмотрение ВАХ, показавшее, что при малых токах (до 10 мА, где последовательное сопротивление оказывает минимальное влияние на ход ВАХ) в начальный момент имеются существенные расхождения в крутизне характеристик с кривыми, снятыми на последующих стадиях наработки. Это происходит из-за наличия шунтирующих центров безызлучательной рекомбинации, самое большое содержание которых заметно при самых низких прямых напряжениях в начале наработки (изменение наклона кривой ВАХ происходит при меньших напряжениях смещения, она становится линейной гораздо раньше, стремясь к характеристике линейного сопротивления).

При больших плотностях тока доминирующее влияние на ход ВАХ будет оказывать

уже последовательное сопротивление светодиода, и шунтирующее действие дефектов будет не столь различимо на среднем участке этой характеристики, оказываясь вновь заметным лишь на самых больших допустимых плотностях тока, где оно становится причиной существенно большей крутизны характеристики. Именно этот участок ВАХ и выбран для применения при сортировке светодиодов на производстве.

Изменение спектрального состава излучения со временем наработки указывает на тенденцию увеличения числа длинноволновых составляющих спектра, которые соответствуют увеличению площади сегментов с более низким (по сравнению с исходным) U_f , что хорошо объясняет существенно меньший градиент увеличения напряжения при наработке у светодиодов с небольшой степенью деградации светового потока. Динамика изменения спектрального состава состоит в том, что центральная длина волны не только всегда больше максимальной, но и еще больше увеличивается относительно нее в процессе наработки, что происходит также на фоне растущей ширины спектра. Однако увеличение значения интеграла спектра за счет длинноволновой части должно привести к пропорциональному увеличению светового потока из-за большей световой эффективности излучения на большей длине волны. Этот подъем и наблюдается практически во всех типах светодиодов при достижении наработки 1000–3000 ч, и это всегда означает окончание периода стабилизации параметров.

Далее динамика изменения параметров значительно уменьшается, что подтверждается высокой стабильностью суммарного светового потока (изменение не более 3–5%), сохраняя лишь его перераспределение (изменение максимальной силы света — до 10%), а рост прямого напряжения уже практически полностью становится зависимым от описанных факторов. Последующее очень медленное

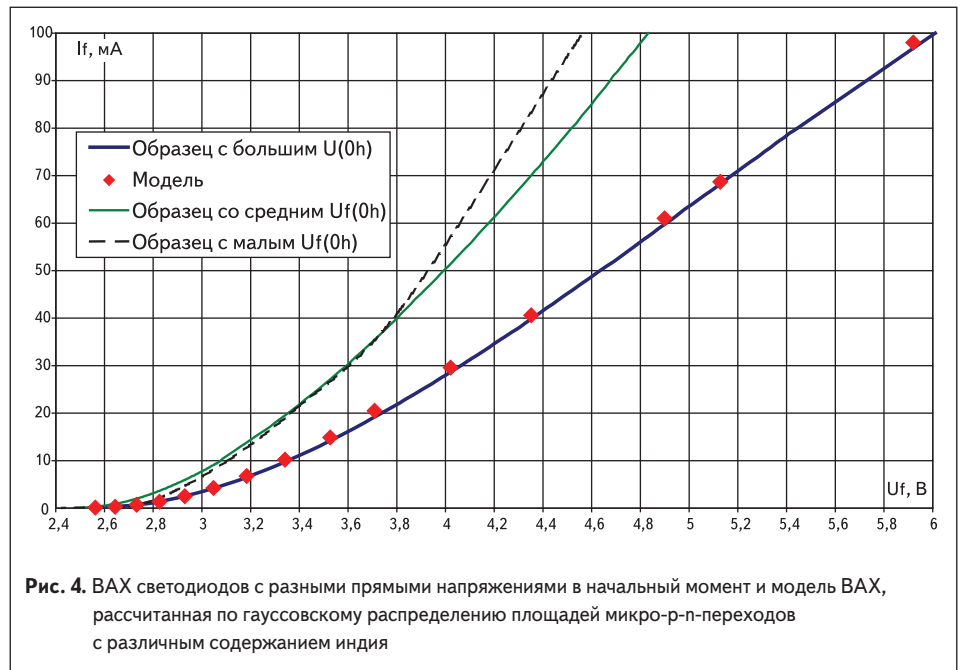


Рис. 4. ВАХ светодиодов с разными прямыми напряжениями в начальный момент и модель ВАХ, рассчитанная по гауссовскому распределению площадей микро-р-п-переходов с различным содержанием индия

уменьшение светового потока при незначительном росте U_f и продолжающемся сдвиге спектрального распределения в область длинных волн, тем не менее, может быть связано с перераспределением и миграцией дефектов структуры в виде центров безызлучательной рекомбинации с малым сопротивлением (являющихся каналами утечки), которые также оказываются параллельно включенными во всю структуру в виде элементарных площадок со своими E_g и U_f , шунтирующих соседние сегменты, в которых происходит излучательная рекомбинация и прямое смещение которых существенно выше. Другими словами, растекание токов утечки вызывает значительное падение напряжения на соседних участках, интенсивность излучения которых становится менее эффективной вследствие недостаточности внешнего приложенного к ним электрического поля для полноценной инжекции носителей заряда, чем тех, что удалены от дефекта. При этом перераспределении суммарное прямое напряжение структуры изменяется незначительно (общая площадь каналов утечки остается постоянной: изменяется только их дислокация), а шунтирующее действие этих площадок существенно увеличивается, уменьшая суммарный световой поток. Такое предположение также хорошо объясняет и значительное перераспределение светового потока по объему излучающей структуры, увеличивающееся с деградацией.

Однако выявлено также, что при производстве пластин кристаллов всегда существует некоторая их часть, изначально содержащая в себе такое распределение центров безызлучательной рекомбинации и такую функцию распределения площадок с различными характеристиками, которые будут существенно доминировать при наработке и приводить к значительной деградации параметров относительно остальной массы образцов. Причем все характеристики, свойственные исправным светодиодам на осно-

ве этих кристаллов, будут присутствовать в начальный момент, и такие светодиоды будут признаны годными на производстве [10].

Этот факт вызвал необходимость разработки новой методики сортировки светодиодов на производстве еще и по той причине, что существующая сортировка проводится при одном значении плотности тока в диапазоне 30–40 А/см². Однако значения прямого напряжения на этом токе не имеют достаточно большого разброса для разделения светодиодов на группы из-за специфического хода ВАХ, и, как уже говорилось, существенное отличие может быть замечено лишь при больших плотностях тока. Выявление данного факта стало возможным благодаря исследованию по предложенной методике большого числа светодиодов. Это обнаруживает очень важный недостаток в принятой мировой практикой производства системе сортировки готовых светодиодов и объясняет причину появления потенциально дефектных приборов в общей массе признанных годными.

Выводы

Таким образом, обосновано, что критерии сортировки должны быть рассчитаны при больших плотностях тока через кристалл, что подтвердила серия выполненных сортировок по так называемой «пятиточечной» схеме — измерения параметров в пяти точках при разном прямом токе (в диапазоне плотности 0–100 А/см²) в импульсном режиме. Установлено, что предложенная методика такой сортировки позволяет также сделать достоверный прогноз качества произведенных светодиодов (выявить более 95% потенциально негодных приборов) и мобильно скорректировать необходимые технологические операции для устранения возможного брака на выходе. Показано также, что предложенные методы сортировки

на производстве не несут дополнительных затрат ни времени, ни оборудования, ни энергии, ни трудозатрат персонала. ●

Литература

1. Measurement of LED's // Technical report CIE127-1997.
2. Котюк А. Ф. Основы оптической радиометрии М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003.
3. Никифоров С. Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
4. Агафонов Д. Р., Аникин П. П., Никифоров С. Г. Вопросы конструирования и производства светоизлучающих диодов и систем на их основе // Светотехника. 2002. № 6.
5. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Сушков В. П., Шишов А. В. Особенности конструирования мощных белых светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2003. № 1, 2.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Том 1, 2. М.: Мир. 1984.
7. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1, 2.
8. Кудряшов В. Е., Мамакин С. С., Туркин А. Н., Юнович А. Э., Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И. Спектры и квантовый выход излучения светодиодов с квантовыми ямами на основе гетероструктур из GaN — зависимость от тока и напряжения // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 7.
9. Рабинович О. И. Моделирование электрических и оптических характеристик светоизлучающих диодов на основе многокомпонентных гетероструктур AlInGaN: Дис. на соискание ученой степени канд. ф.-м. наук. Москва, МИСиС, 2008.
10. Ермаков О. Н., Сушков В. П. Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы. М.: Радио и связь. 1990.