

Сверхслабое свечение и нестабильности микротоков в синих GaN-светодиодах при разных стадиях деградации*С. Г. Еханин, А. А. Томашевич*

Установлено, что сверхслабое свечение, наблюдающееся в режиме нано- и микротоков в синих GaN-светодиодах с множественными квантовыми ямами, обусловлено туннельно-рекомбинационными процессами с участием дефектных состояний и локальных потенциальных ям различной глубины, возникающих вследствие планарных флуктуаций индия в слоях InGaN активной области. Получены цифровые фотографии и проанализированы картины сверхслабого свечения поверхности кристаллов светодиодов. Показано, что картины свечения наряду с вольтамперной характеристикой демонстрируют значительные изменения после испытаний еще на начальных этапах деградации, что указывает на высокую чувствительность этих параметров к деградационным процессам и на возможность их использования в методах диагностики и неразрушающего контроля.

Ключевые слова: нитрид галлия, светодиодная гетероструктура, туннельно-рекомбинационные процессы, механизмы деградации, нестабильность тока.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-74-82

Введение

В работе [1] представлены картины инжекционной электролюминесценции (ЭЛ), демонстрирующие неоднородность свечения и протекания тока по площади кристалла светящихся диодов (СИД), где планарная неоднородность инжекции носителей заряда в InGaN-квантовую яму после оптической деградации связывается с диффузией и электромиграцией ионов металла и остаточной примеси вдоль дефектных трубок [1]. Кроме того, при длительном протекании в СИД токов большой плотности происходят процессы формирования новых дефектов [2]. Деградационные изменения в структуре СИД особен-

но явно проявляются на начальных участках ВАХ, в области малых токов [3].

Инжекционная ЭЛ в СИД на основе GaN возникает при напряжении более 2,5 В (когда начинает открываться $p-n$ -переход) [4]. При более низких напряжениях при практически закрытом $p-n$ -переходе в СИД можно наблюдать туннельно-рекомбинационные процессы, сопровождаемые слабым свечением [2, 5]. В работах [2, 5, 6], спектры наблюдаемого свечения описываются теорией туннельной излучательной рекомбинации. Процессы туннелирования обусловлены сильными электрическими полями с напряженностью $E = (0,3-1,0) \times 10^6$ В/см, возникающими в активной области СИД в этих условиях [5-7]. Изучение спектров туннельно-рекомбинационного излучения показало, что они структурно чувствительны и их изменения связаны с увеличением концентрации точечных дефектов в процессе испытаний [2].

Таким образом, процессы электрической деградации можно контролировать по изменениям электрооптических и спектральных характеристик туннельно-рекомбинационного излучения.

Еханин Сергей Георгиевич, профессор, д.ф.-м.н.
E-mail: ekhaninsergej@gmail.com

Томашевич Александр Александрович, аспирант.
E-mail: tom.alex@mail.ru

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 12 октября 2021 г.

Однако исследования спектров туннельно-рекомбинационного излучения были проведены в основном для СИД с одной КЯ. В СИД с множественными квантовыми ямами (МКЯ) туннельная компонента свечения на 3–4 порядка меньше, чем в диодах с одной квантовой ямой [6, 7]. Поэтому это слабое свечение невозможно не только увидеть, но и зарегистрировать стандартной аппаратурой. А для измерения спектра потребуется еще более чувствительная аппаратура. Тем не менее, установленная связь интенсивности туннельно-рекомбинационного свечения с изменениями дефектной структуры СИД вызывает большой научный и практический интерес.

В связи с этим, разработка методик проведения исследований электрических, оптических и спектральных характеристик туннельно-рекомбинационных процессов в СИД с МКЯ в зависимости от режимов и времени испытаний весьма актуальна.

Методика эксперимента

В работе исследовались светодиоды SL-V-B24AD малой и SL-V-B45AK повышенной мощности на основе гетероструктуры AlGaIn/InGaIn/GaN с МКЯ фирмы SemiLEDs, изготовленные по технологии lift-off, а также СИД на основе GaN с пятью квантовыми ямами, изготовленные по флип-чип технологии. Все образцы СИД были представлены АО НИИ ПП г. Томск в корпусе без люминофора.

Светодиоды малой и повышенной мощности имеют номинальную величину рабочего тока 150 мА и 350 мА при реальной площади кристалла СИД равной 0,5 мм² и 1 мм² соответственно. Кристаллы светодиодов размещены на теплоотводы с площадью, рекомендованной производителем. Измерения ВАХ проводились на нескольких десятках образцов до и после испытаний.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в работе [8] и дополненной цифровой фотокамерой с дистанционно работающей ртутной фотовспышкой со снятым рассеивателем (для получения ультрафиолетового излучения).

Методика исследования заключалась в измерении вольтамперных характеристик СИД с помощью прецизионного измерителя Keysight B2902A и фотографировании картин

сверхслабого излучения. Поскольку в режиме реализации туннельно-рекомбинационного механизма свечение очень слабое, для получения картин свечения использовалась цифровая фотокамера высокого разрешения с возможностью длительной экспозиции фотографирования. При длительной экспозиции затвор объектива открыт в течение десятков секунд и ПЗС-матрица накапливает достаточный для получения цветной фотографии заряд, возникающий от слабого свечения. Кроме картин свечения, возникающих при электрическом возбуждении, фотографировалась и фотолюминесценция поверхности кристалла СИД от импульсного воздействия УФ-излучения лампы вспышки. Далее проводились испытания СИД и цикл повторялся.

В некоторых случаях кроме электрического воздействия на образец осуществлялось воздействие импульсным ультрафиолетовым излучением для получения картин фотолюминесценции поверхности образца, как и в работе [9].

Испытания проводились при комнатной температуре при номинальном рабочем токе в течение времени от нескольких дней до нескольких месяцев непрерывно. Температура кристалла СИД контролировалась во время испытаний с помощью тепловизора Testo 876 и не превышала 50 °С.

Полученные результаты

Как показали экспериментальные исследования, при напряжениях 2,0–2,3 В и протекании через гетероструктуру СИД с МКЯ нано- и микротоков наблюдается еле заметное свечение (при использовании максимально чувствительных режимов фотографирования с временем экспозицией до 30 секунд). Результат получения таких изображений на образцах СИД малой мощности SL-V-B24AD Semileds показан на рис. 1.

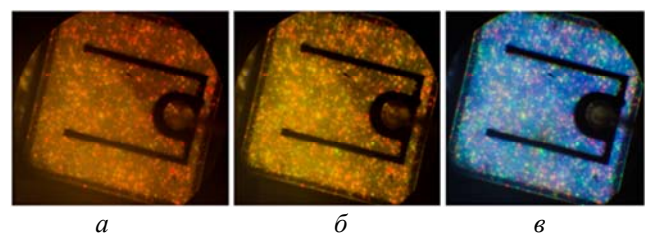


Рис. 1. Фотографии картин свечения СИД в зависимости от напряжения и тока: а – $U = 2,1 \text{ В}$, $I = 0,2 \text{ мкА}$; б – $U = 2,2 \text{ В}$, $I = 0,9 \text{ мкА}$; в – $U = 2,3 \text{ В}$, $I = 6,5 \text{ мкА}$.

Из рис. 1 видно, что наблюдаемое свечение неоднородно и имеет сплошную и точечную структуру. Судя по тому, что цвет сплошной составляющей меняется с увеличением приложенного напряжения можно предположить, что наблюдаемое свечение имеет туннельно-рекомбинационную природу, как и в случае СИД с одной квантовой ямой, в которых максимум спектра сдвигался с увеличением напряжения в область больших энергий [5, 6]. По-видимому, туннельно-рекомбинационные процессы в этом случае проходят с участием хвостов плотности состояний под квантовыми ямами [10]. Анализ точечной составляющей свечения показал, что с увеличением напряжения увеличивается количество светящихся точек, причем вначале появляются точки красного цвета, потом по мере увеличения напряжения последовательно добавляются точки других цветов: оранжевого, желтого, зеленого. После появления цвет и площадь отдельных точек этой компоненты свечения от напряжения не меняются. По-видимому, точечная составляющая связана с туннельно-рекомбинационными процессами через квантовые ямы. Расположение точек свечения отражает флуктуации стехиометрического состава пленки по площади, и цвет излучения точек связан с рекомбинационными процессами в участках пленки с различной глубиной потенциальных ям. В работе [11] это связывают с флуктуациями концентрации индия.

На рис. 2 представлены фотографии картин туннельно-рекомбинационного излучения светодиодов малой мощности до и после нескольких десятков часов испытаний.

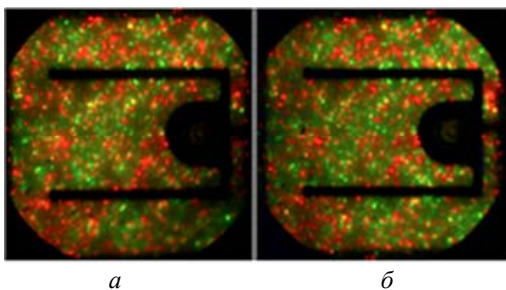


Рис. 2. Картины свечения СИД до (а) и после (б) 80 часов испытаний.

На рис. 2 можно увидеть некоторые изменения картин свечения после испытаний.

Однако анализ таких картин свечения невооруженным глазом крайне затруднителен. Для автоматизированного цветового анализа

полученных фотографий (построения спектра излучения) была разработана специальная программа, определяющая количество пикселей определенного цвета. Спектр излучения связан с типом электронных состояний дефектов в кристалле СИД.

Обработка фотографий, представленных на рис. 2, показала, что после испытаний в течение нескольких десятков часов при номинальном токе наблюдается увеличение площади сплошной составляющей желто-зеленого спектра более чем в 3 раза, а изменение цвета свечения точечной составляющей и диаметров точек не прослеживается.

Это согласуется с результатами работы [2], где показано, что при испытаниях в гетероструктуре СИД образуется большое количество точечных дефектов, включающих вакансии азота и дающих свечение в желто-зеленой области спектра при возбуждении люминесценции кристалла СИД электрическим полем (электролюминесценция) или УФ-излучением (фотолюминесценция).

Аналогичные эксперименты были проведены на светодиодах повышенной мощности SL-V-B45AK Semileds. При исследовании «свежих» образцов свечение туннельно-рекомбинационной природы СИД также было зафиксировано в диапазоне 2–2,4 В, но значительно слабее по интенсивности, требующее при его фотографировании существенно большей фотоэкспозиции (от 10 до 30 минут).

Аналогичные результаты были получены и на образцах, изготовленных по технологии flip-chip.

Для увеличения информативности таких картин свечения было проведено дополнительное возбуждение кристалла ультрафиолетовым (УФ) излучением.

На рис. 3 представлены фотографии свечения СИД повышенной мощности при комбинированном воздействии (электрическое и УФ возбуждение).

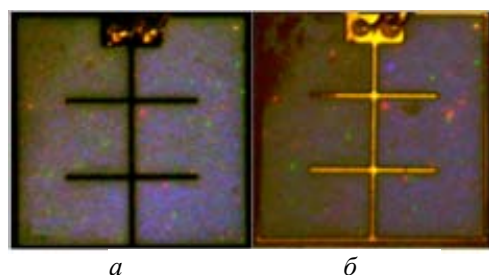


Рис. 3. Фотографии свечения СИД до (а) и после (б) испытаний.

Как видно из рис. 3, характер картин свечения по сравнению со свечением СИД малой мощности (рис. 2) почти не изменился, но значительно (на несколько порядков) уменьшилось количество ярких цветных точек и интенсивность свечения сплошной составляющей. Также видно, что наиболее дефектные участки кристалла фотолюминесцируют в зеленой области спектра.

На рис. 4 приведена фотография картины свечения СИД повышенной мощности после нескольких сотен часов испытаний и кратковременного термостресса (испытания, при котором температура превышала предельную рабочую температуру) [12].

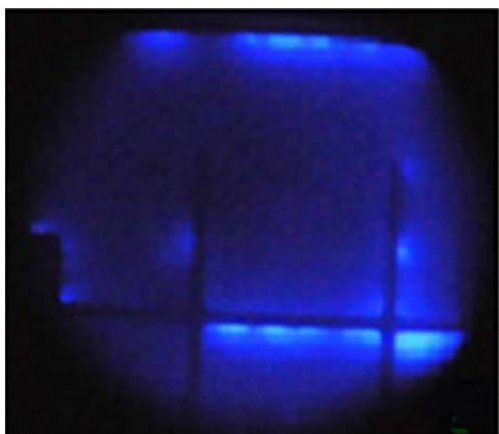


Рис. 4. Фотографии картин свечения СИД повышенной мощности при напряжении 2,0 В после термостресса.

После таких испытаний туннельно-рекомбинационное излучение возникло в виде синего пятна при значительно меньшем напряжении, начиная от 0,7 В. При увеличении напряжения до 1,3 В и более площадь и яркость свечения увеличивается. Становится видно, что оно возникает вблизи электродов (рис. 4).

Для более полного понимания происходящих процессов рассмотрим изменение зависимости ВАХ СИД после испытаний. На рис. 5 представлены ВАХ одного из образцов СИД, изготовленных по flip-chip технологии до и после непрерывного испытания в течение трех месяцев.

ВАХ построены в диапазоне напряжений от 0 до 3 В в полулогарифмическом масштабе, поэтому значения тока отрицательной величины, наблюдаемые при малых напряжениях

до испытаний, не отображены, кривая 1. Отрицательные токи при малых напряжениях обусловлены, по-видимому, встроенными внутрикристаллическими полями [13].

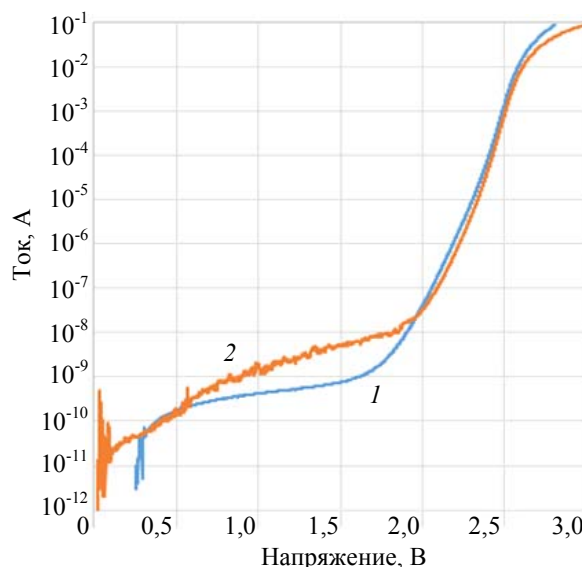


Рис. 5. ВАХ СИД до (1) и после (2) испытаний.

Если рассмотреть ВАХ СИД, измеренную до испытаний, то по ее виду можно сказать, что она имеет паразитные параллельное и последовательное сопротивления [4]. В данной ВАХ (рис. 5, кривая 1) в диапазоне напряжений от 0,5 до 1,5 В наблюдается участок с небольшим наклоном в полулогарифмическом масштабе. Причем величина тока на этом участке должна примерно совпадать по величине с обратным током насыщения [4]. Ток на этом участке объясняется утечками, обусловленными внутренними дефектами, имеющимися еще до испытаний. Наибольшие изменения после испытаний наблюдаются на начальном участке ВАХ в диапазоне напряжений от нуля до примерно 2,0 В. Участок с отрицательными токами (кривая 2), обусловленный внутрикристаллическими полями, практически исчез.

Сравнивая ВАХ СИД после долговременных испытаний с первоначальной, можно сказать, что после испытаний ток утечки, обусловленный внутренними дефектами, возрос примерно на порядок, что согласуется с выводами многих авторов, что в процессе протекания через СИД тока большой плотности в гетероструктуре образуются дополнительные дефекты [3, 14, 15].

Следует отметить, что после длительных испытаний появились изменения и на участках ВАХ при больших напряжениях, что свидетельствует об изменении не только паразитного параллельного, но и паразитного последовательного сопротивления, которое и ограничивает ток через гетероструктуру.

Вернемся к описанию изменений начальных участков ВАХ СИД. Как видно из рис. 5 (кривая 2), на начальных участках ВАХ в диапазонах напряжений от 0 до 2 В появилась нестабильность тока.

Поскольку начальные участки ВАХ в полулогарифмическом масштабе не выявляются полностью, рассмотрим ВАХ в обычном (линейном) масштабе, как изображено на рис. 6.

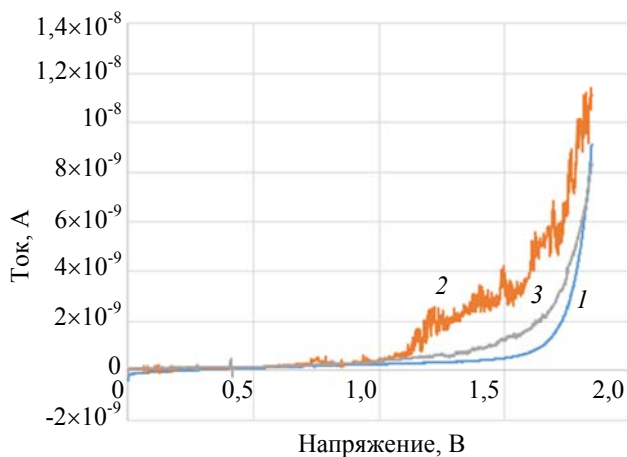


Рис. 6. Начальные участки ВАХ СИД до испытаний (1), после испытаний (2) и спустя месяц отдыха после испытаний (3).

Из рис. 6 видно, что ВАХ до испытаний (кривая 1) имеет гладкий (без нестабильностей) вид. Небольшая в линейном масштабе нестабильность наблюдается только в диапазоне существования отрицательных токов. Нарастание тока (кривая 1) плавное и наблюдается, начиная с напряжения примерно 1,75 В.

После продолжительных испытаний начальный участок ВАХ существенно изменяется: уменьшается напряжение при котором начинается увеличение тока (преждевременное включение) и появляется нестабильность (скачки) тока (рис. 6, кривая 2).

После отдыха образца в течение месяца ВАХ частично релаксирует, возвращаясь к первоначальному положению: увеличивается напряжение включения и существенно

уменьшается амплитуда нестабильности, см. рис. 6, кривая 3.

Обсуждение результатов

Как известно, нитриды $A^{III}B^V$, обладающие структурой вюрцита, имеют макроскопическую поляризацию (сумма спонтанной и пьезоэлектрической). Наличие такой поляризации и приводит к возникновению на гетерограницах нитридных соединений встроенного электрического поля [5–7, 13], что и наблюдается на участке ВАХ в диапазоне 0–0,5 В. В процессе испытаний при протекании через гетероструктуру токов большой плотности, на гетерограницах могут накапливаться объемные заряды [16], компенсирующие эти встроенные электрические поля.

Для диодов с большой концентрацией дефектов характерно преждевременное включение [4], что и наблюдается в данном случае (см. рис. 6). Механизм возрастания тока от напряжения на этом участке ВАХ обусловлен туннелированием носителей через треугольный барьер на границе с *n*-областью [17], так как при малых напряжениях надбарьерный инжекционный ток практически отсутствует. Характер изменения тока от напряжения на этом участке будет зависеть от проницаемости этого барьера. При нарастании концентрации дефектов во время испытаний вследствие протекания токов большой плотности прозрачность треугольного барьера на границе с *n*-GaN будет увеличиваться.

Туннелирование носителей происходит с участием локализованных состояний дефектов [16] посредством туннельных прыжков между этими состояниями. В стационарном состоянии электроны, находящиеся на уровнях под квантовой ямой, могут рекомбинировать (излучательно или безызлучательно) с аналогично расположенными дырками. Именно на этой стадии наблюдается сверхслабое свечение СИД. Этот процесс наиболее ярко иллюстрируется в образцах малой мощности.

Возникает вопрос, почему картина свечения при малых напряжениях в образцах большей мощности так резко изменилась. Ранее было подозрение, что наличие данного свечения обусловлено в первую очередь тем, что по технологии lift-off производится отстрел лазером кристалла СИД. Возможно, что

при такой технологии создавались дефекты, которые могли обуславливать наблюдаемое свечение. Но, в работе [18] показано, что технология lift-off не приводит к формированию значительного количества дефектов. Как известно [4], в более мощных СИД для увеличения эффективности используются более толстые слои InGaN и буферные прослойки, что приводит к увеличению толщины активной области гетероструктуры, а значит, к меньшей напряженности поля и интенсивности свечения в том же диапазоне напряжений.

Как показали эксперименты, туннельно-рекомбинационное свечение, несущее информацию о планарном распределении дефектов в гетероструктуре, наблюдается и в СИД, изготовленных по флип-чип технологии, с теми же особенностями, которые продемонстрированы рис. 3 для более мощных СИД.

По-видимому, в более мощных СИД (независимо от архитектуры и технологии изготовления кристаллов СИД) при фотографировании сверхслабого туннельно-рекомбинационного свечения в режиме микрофотоизлучения только одной квантовой ямы (первой), в отличие от свечения СИД малой мощности (с меньшей толщиной квантовых ям), где может наблюдаться свечение нескольких квантовых ям, накладываясь друг на друга и создающее более яркую и насыщенную цветную картину.

Возникающий при длительных испытаниях СИД туннельный прыжковый транспорт через область объемного заряда приводит не только к увеличению прозрачности энергетического барьера и избыточному стационарному току, но и обуславливает переходные процессы с широким диапазоном времен релаксации [17]. Наличие широкого диапазона релаксации, связанного с туннелированием по состояниям дефектов в области объемного заряда, должно отражаться в спектре и уровне шумов (высокочастотной нестабильности токов) СИД [12].

Действительно, как показано на рис. 6, после длительных испытаний ВАХ (кривая 2) существенно изменилась по сравнению с первоначальной. Во-первых, значительно уменьшилось напряжение преждевременного включения СИД, что свидетельствует об увеличении прозрачности энергетического

барьера на границе с гетероструктурой. Во-вторых, резко усилилась нестабильность тока на участке преждевременного включения (роста тока).

Все это свидетельствует о том, что после длительных испытаний при рабочем токе большой плотности в гетероструктуре образуется большое количество дефектов (вероятнее всего точечных). Вследствие этого увеличивается вероятность прыжкового туннелирования в области объемного заряда, а сам этот процесс и создает «шумовую» компоненту на ВАХ.

После отдыха образца в течение месяца существенная часть дефектов диффундирует из областей их скопления (рассасывается), что и приводит к релаксации (см. рис. 6, кривая 3).

Наблюдая за изменениями электрических характеристик в области нано- и микрофотоизлучения можно заметить следующее общее для всех исследуемых образцов поведение: с увеличением времени испытаний наблюдается увеличение туннельных токов, а в случае «релаксации», то есть когда испытание светодиода приостанавливается на некоторое время, происходит некоторое «восстановление» (уменьшение тока утечки), уменьшение влияния электрических диполей, увеличение напряжения участка роста обратной ВАХ.

При длительных испытаниях, когда светодиоды находятся под напряжением при непрерывном токе большой плотности формируются каналы предпочтительного зарядопереноса вдоль протяженных дефектов [19]. При этом за счет механизмов подпороговой генерации вокруг протяженных дефектов возникает атмосфера из точечных дефектов [7], включающих вакансии азота. Вероятность туннелирования носителей становится выше, что приводит к увеличению прямых и обратных нано- и микрофотоизлучений. По этому, с увеличением времени испытаний дальнейшее развитие процесса деградации может быть связано с диффузией металла из электрода в «шнур», что придает ему омическую электропроводность, при этом часть «шнура» будет являться продолжением электрода.

При развитии этих процессов электропроводящий шнур с омической электропроводностью «прокалывает» часть гетероструктуры, повышается напряженность поля в

оставшихся квантовых ямах и увеличивается вероятность туннелирования в них носителей заряда (в режиме туннельно-рекомбинационного излучения). При этом туннельное свечение синего цвета возникает при напряжениях менее 2,0 В (даже при напряжении 0,7 В).

Процесс деградации протекает более интенсивно под электродами, чем на периферии (в отдалении от электродов), вследствие процесса «растекания» тока». Приведенные результаты (рис. 4) подтверждают этот вывод.

Заключение

Таким образом, было показано, что в светодиодах с гетероструктуров InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами при напряжениях менее 2,3 В наблюдается сверхслабое свечение, которое имеет сплошную и точечную составляющие. Цвет сплошной составляющей соответствует энергии кванта света $h\nu \sim eU$ при изменении напряжения, что объясняется туннелированием носителей сквозь барьер с последующей излучательной рекомбинацией. Цвет точечных составляющих обусловлен туннельно-рекомбинационными процессами с участием локальных потенциальных ям различной глубины, обусловленных планарными флуктуациями индия в слоях InGaN активной области.

Была отмечена зависимость картин сверхслабого свечения от степени деградации структуры и распределения дефектов по поверхности кристалла.

Исследование вольтамперных характеристик в диапазоне нано- и микротоков, когда и наблюдается данное сверхслабое свечение, свидетельствуют о том, что в процессе испытаний под действием прямого тока большой плотности в СИД происходит генерация дополнительных дефектов и формируются дефектные состояния в запрещенной зоне слоев активной области [2]. Вероятность туннелирования носителей с участием локализованных состояний дефектов (прыжковая проводимость [17]) становится выше, что приводит к увеличению прозрачности барьера и наблюдаемым изменениям ВАХ на начальном участке (рис. 5, 6).

Такие процессы происходят локально [1], особенно в местах формирования шнуров повышенной электропроводности [19, 20].

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет проводить прецизионные измерения ВАХ и изучать картины распределения интенсивности и цветовые оттенки слабого свечения при напряжениях менее 2,3 В по поверхности светоизлучающего диода на основе гетероструктуры AlGaIn/InGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами, что дает возможность анализировать локальные изменения его спектральных характеристик, обусловленных дефектообразованием в процессе испытаний, с помощью пиксельного анализа цифровых фотографий.

Таким образом, наблюдение за изменениями туннельно-рекомбинационным свечения наряду с контролем изменений туннельных микро- и нанотоков может предоставить важную информацию о начальном состоянии гетероструктуры СИД и кинетики накопления дефектов. В связи с этим данный метод наряду с предложенными в [21], можно применять для входного контроля кристаллов СИД и ранней диагностики будущих катастрофических изменений, которые приведут к существенной потере яркости и выходу СИД из строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарева Н. И., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т., Горбунов Р. И., Клочков А. В., Шретер Ю. Г. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 1. С. 122.
2. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э. // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 2. С. 224.
3. Huang L., Yu T., Chen Z., Qin Z., Yang Z., Zhang G. // Journal of Luminescence. 2009. Vol. 129. P. 1981.
4. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. Изд. 2-е. – М.: Физматлит, 2008.
5. Кудряшов В. Е., Золин К. Г., Туркин А. Н., Юнович А. Э., Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 11. С. 1304.
6. Кудряшов В. Е., Юнович А. Э. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2003. Т. 124. № 5. С. 1133.
7. Авакянц Л. П., Асланян А. Э., Боков П. Ю., Волков В. В., Матешев И. С., Туркин А. Н., Червяков А. В., Юнович А. Э. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2016. № 3. С. 163401-1.
8. Ekhanin S., Tomashevich A., Ermolaev A., Loschilov A. / International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings 2016. P. 7491776. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491776
9. Tomashevich A., Ekhanin S., Yunusov I. / AIP Conference Proceedings of the XIV International Confer-

ence of Students and Young Scientists. 2017. P. 060005. DOI: 10.1063/1.5009876

10. Бочкарева Н. И., Вороненков В. В., Горбунов Р. И., Латышев Ф. Е., Леликов Ю. С., Ребане Ю. Т., Цюк А. И., Шретер Ю. Г. // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 1. С. 129.

11. Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г. // ФТП. 2014. Т. 48. № 8. С. 1107.

12. Кудряшов В. Е., Туркин А. Н., Юнович А. Э., Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И. // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. Вып. 4. С. 445.

13. Супрядкина И. А., Абгарян К. К., Бажанов Д. И., Мутигуллин И. В. // ФТП. 2013. Т. 47. № 12. С. 1647.

14. Закгейм А. Л., Левинштейн М. Е., Петров В. П., Черняков А. Е., Шабунина Е. И., Шмидт Н. М. // ФТП. 2012. Т. 46. № 2. С. 219.

15. Jianzheng Hu, Lianqiao Yang, Moo Whan Shin. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 41. № 3. P. 035107.

16. Бочкарева Н. И., Иванов А. М., Клочков А. В. и др. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 6. С. 847.

17. Бочкарева Н. И., Zhirnov E. A., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т., Горбунов Р. И., Шретер Ю. Г. // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 5. С. 627.

18. Bornemann S., Yulianto N., Spende H., Herbani Y., Prades J. D., Wasisto H. S., Waag A. // Adv. Eng. Mater. 2020. Vol. 22. P. 1901192.

<https://doi.org/10.1002/adem.201901192>

19. Еханин С. Г., Романовский М. Н., Томашевич А. А. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-1 (26). С. 57.

20. Васильева Е. Д., Закгейм А. Л., Снегов Ф. М., Черняков А. Е., Шмидт Н. М., Якимов Е. Б. // Светотехника. 2007. № 5. С. 30.

21. Полищук А. Г., Туркин А. Н. // Компоненты и технологии. 2008. № 2. С. 25.

PACS: 72.80.Ey, 71.55.Eq

Ultra-weak emission and microcurrents instabilities in blue GaN LEDs at different stages of degradation

S. G. Ekhanin and A. A. Tomashevich

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

40 Lenina Prospect, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: ekhaninsergej@gmail.com

Received October 12, 2021

It is found that the ultra-weak luminescence observed in microcurrents mode in blue GaN LEDs with multiple quantum wells is due to tunnel-recombination processes with the participation of defect states and local potential wells of various depths, which arise as a result of planar fluctuations of indium in the InGaN layers of the active region. Digital photographs were obtained and patterns of ultra-weak luminescence of the surface of LED crystals were analyzed. It is shown that the patterns of luminescence, along with the current-voltage characteristic, demonstrate significant changes after testing even at the initial stages of degradation, which indicates a high sensitivity of these parameters to degradation processes and the possibility of their use in diagnostic and non-destructive testing methods.

Keywords: gallium nitride, LED heterostructure, tunnel-recombination process, degradation mechanisms, current instability.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-74-82

REFERENCES

1. N. I. Bochkareva, A. A. Efremov, Y. T. Rebane, et al., Semiconductors **40**, 118 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1063782606010210>

2. A. N. Kovalev, F. I. Manyakhin, V. E. Kudryashov, et al., *Semiconductors* **33**, 192 (1999).
<https://doi.org/10.1134/1.1187669>
3. L. Huang, T. Yu, Z. Chen, Z. Qin, Z. Yang, and G. Zhang, *Journal Of Luminescence* **129**, 1981 (2009).
4. F. Schubert, *LEDs (2nd edition): Translated from English / Ed. by A. E. Yunovich*. (Fizmatlit, Moscow, 2008).
5. V. E. Kudryashov, K. G. Zolin, A. N. Turkin, et al., *Semiconductors* **31** (11), 1304 (1997).
6. V. E. Kudryashov and A. E. Yunovich, *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **97** (5), 1015 (2003).
7. L. P. Avakyants, A. E. Aslanyan, P. Yu. Bokov, et al., *Scientific letters of physical faculty*, No. 3, 163401-1 (2016).
8. S. Ekhanin, A. Tomashevich, A. Ermolaev, and A. Loschilov, in *Proc. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016*. P. 7491776. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491776
9. A. Tomashevich, S. Ekhanin, and I. Yunusov, *AIP Conference Proceedings of the XIV International Conference of Students and Young Scientists*. 2017. P. 060005. DOI: 10.1063/1.5009876
10. N. I. Bochkareva, V. V. Voronkov, R. I. Gorbunov, et al., *Semiconductors* **47**, 127 (2013).
<https://doi.org/10.1134/S1063782613010089>
11. N. I. Bochkareva, Y. T. Rebane, and Y. G. Shreter, *Semiconductors* **48**, 1079 (2014).
<https://doi.org/10.1134/S1063782614080065>
12. V. E. Kudryashov, A. N. Turkin, A. E. Yunovich, et al., *Semiconductors* **33** (4), 445 (1999).
13. I. A. Supryadkina, K. K. Abgaryan, D. I. Bazhanov, et al., *Semiconductors* **47**, 1621 (2013).
<https://doi.org/10.1134/S106378261312018X>
14. A. L. Zakheim, M. E. Levinshtein, V. P. Petrov, et al., *Semiconductors* **46**, 208 (2012).
<https://doi.org/10.1134/S106378261202025X>
15. Jianzheng Hu, Lianqiao Yang, and Moo Whan Shin., *Journal of Physics D: Applied Physics* **41** (3), 035107 (2008).
16. N. I. Bochkareva, A. M. Ivanov, A. V. Klochkov, et al., *Semiconductors* **49**, 827 (2015).
<https://doi.org/10.1134/S1063782615060056>
17. N. I. Bochkareva, E. A. Zhirnov, A. A. Efremov, et al., *Semiconductors* **39**, 594 (2005).
<https://doi.org/10.1134/1.1923571>
18. S. Bornemann, N. Yulianto, H. Spende, Y. Herbani, J. D. Prades, H. S. Wasisto, and A. Waag A., *Adv. Eng. Mater.* **22**, 1901192 (2020). <https://doi.org/10.1002/adem.201901192>
19. S. G. Ekhanin, M. N. Romanovsky, and A. A. Tomashevich, *Proceedings of TUSUR University*, No. 2-1 (26), 57 (2012).
20. E. D. Vasilyeva, A. L. Zakheim, F. M. Chernyakov, et al., *Svetotechnika*, No. 5, 30 (2007).
21. A. Polischuk and A. Turkin, *Components and techniques*, No. 2, 25 (2008).