

Фрактальная природа светоизлучающих структур на основе III-N наноматериалов и связанные с ней явления

© В.Н. Петров*, В.Г. Сидоров⁺, Н.А. Тальнишних[■], А.Е. Черняков[■], Е.И. Шабунина*, Н.М. Шмидт*, А.С. Усиков*, Н. Helava*, Ю.Н. Макаров**

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

[■] НТЦ микроэлектроники Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

• Nitride Crystals Inc., 181 E Industry Ct., NY 11729, USA

♦ Группа компаний „Нитридные кристаллы“, 194156 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Natalia.Smidt@mail.ioffe.ru

(Получена 9 марта 2016 г. Принята к печати 15 марта 2016 г.)

Показано, что в наноматериалах светоизлучающих InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-структур в проводящих протяженных дефектах и локальных неоднородностях состава твердых растворов формируется трехмерная фрактально-перколяционная система, которая определяет электрофизические свойства светодиодов, изготовленных на основе этих структур. Геометрия и свойства этой системы нелинейно зависят от степени разупорядоченности наноматериала структур, величины инжекционного тока и скорости выращивания твердых растворов.

1. Введение

Слои III-нитридов и приборные гетероструктуры на их основе, в том числе светоизлучающие структуры InGaIn/GaN и AlGaIn/GaN, интенсивно изучаются с конца прошлого века. Несмотря на впечатляющие успехи в технологии InGaIn/GaN-светодиодов, ряд явлений в этих светодиодах, таких как падение внешней квантовой эффективности при больших плотностях тока и волнообразное развитие деградации при старении, не получили общепринятой интерпретации. По-прежнему не выяснены причины на порядки более низких значений эффективности и срока службы AlGaIn/GaN-светодиодов. Механизмы транспорта носителей заряда в светодиодах, роль протяженных дефектов и флуктуаций состава твердых растворов до сих пор остаются предметом дискуссий. Создавшееся положение во многом обусловлено сложной внутренней организацией наноматериала в слоях и приборных гетероструктурах, которая имеет множество форм существования от плохо сросшихся доменов до совершенных квазиэпитаксиальных слоев, текстурированных дислокационными и дилатационными границами. Система протяженных дефектов, пронизывающая светоизлучающие структуры, содержит прорастающие дислокации различного типа, в том числе дислокации с открытым ядром (V-дефекты), скопления дислокаций, дислокационные стенки, а также дефекты упаковки [1]. Свойства отдельных элементов этой системы существенно различаются по проводимости [2,3], а слои твердых растворов содержат локальные микро- и нанообласти с флуктуациями состава [4,5], зависящими от скорости роста [6] и морфологии поверхности, на

которой формируется твердый раствор. Сложная внутренняя организация наноматериала проявляется в различных нарушениях слоевого роста, в сосуществовании микро- и нанообластей двумерного и трехмерного характера роста в одной структуре, в случайных флуктуациях состава твердого раствора, в релаксации внутренних механических напряжений не только путем изгиба структуры, но и в локальных областях протяженных дефектов. Все это приводит к разупорядоченности наноматериала, встроенного в квантово-размерную структуру активной области светоизлучающих приборов. Такая сложная организация наноматериала с точки зрения материаловедения удовлетворяет одному из основных свойств фрактальных систем, а именно стохастическому самоподобию между собой частей (фрактальных агрегатов) неоднородной неупорядоченной системы на различных масштабных уровнях [7,8], и является источником нелинейных свойств структур и приборов на их основе.

Как известно, для систем с фрактальным типом структурной организации наблюдаются следующие типичные особенности: корреляция механических, электрических и оптических свойств с характером внутренней организации фрактальных агрегатов в целом и пороговое изменение этих свойств; формирование локальных каналов протекания для носителей заряда, т.е. перколяционные явления, и, как следствие, неоднородное распределение тока по площади структуры [9].

В статье сделана попытка выяснить, в какой мере перечисленные свойства фрактальных систем характерны для светоизлучающих InGaIn/GaN- и AlGaIn/GaN-гетероструктур и сколь велик их вклад в особенности электрических и оптических свойств светодиодов.

Поставленная задача решалась путем сравнения транспортных и оптических свойств светоизлучающих структур, различающихся по характеру организации наноматериала. Светоизлучающие структуры и светодиоды классифицировались по степени разупорядоченности их наноматериалов. Управление степенью разупорядоченности осуществлялось изменением условий роста зародышевого и буферного слоев гетероструктур.

2. Методы и объекты исследования

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ), зависимости спектральной плотности низкочастотного шума и квантовой эффективности от плотности тока светодиодов, изготовленных из светоизлучающих InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-гетероструктур, выращенных на буферных слоях, сформированных в различных режимах. Выполнена классификация светодиодов по степени разупорядоченности их наноматериалов. Метод классификации основан на том, что разупорядоченность наноматериала находит свое отражение в морфологии поверхности слоев и светоизлучающих структур. В работе [8] установлено, что обработка математического множества, соответствующего изображению поверхности слоя или структуры в атомно-силовом микроскопе, методами мультифрактального анализа позволяет количественно охарактеризовать степень нарушения локальной симметрии в исследуемом наноматериале, т.е. степень его разупорядоченности с помощью мультифрактального параметра Δ_p . Увеличение значений параметра Δ_p по абсолютной величине коррелирует с увеличением разупорядоченности наноматериала и проявляется в усложнении морфологии поверхности структур, в увеличении числа выделений металлической фазы в твердых растворах, в увеличении протяженности дислокационных стенок и количества скоплений дислокаций с одновременным увеличением неоднородности их распределения, хотя увеличения общей плотности одиночных дислокаций при этом может не наблюдаться [8,10]. При этом наноматериал слоев и структур III-нитридов имеет дробную размерность, типичную для фрактальных объектов, а показатель Реньи равен 1.50–1.90 [7,8].

Светоизлучающие InGaIn/GaN-гетероструктуры на длины волн 450–460 нм выращены на сапфировых подложках ориентации (0001) методом эпитаксии из металлорганических соединений. Светодиоды, изготовленные из этих структур, площадью 980×980 мкм имели внешнюю квантовую эффективность от 10 до 45%. Исследованы коммерческие светодиоды от разных производителей на те же длины волн, с такой же площадью, аналогичной сборкой и эффективностью 30–45%. Классификация по степени разупорядоченности материала в коммерческих светодиодах выполнена по величине токов утечки светодиодов в соответствии с ранее установленной корреляцией между значениями Δ_p и величиной токов утечки [11].

Светодиодные AlGaIn/GaN-гетероструктуры на длины волн 360–365 нм выращены методом хлоридно-гидридной эпитаксии на сапфировых подложках ориентации (0001). Методами фотолитографии сформированы мезоструктуры и изготовлены чипы светодиодов размером 1000×1000 мкм с выводом света через фронтальную поверхность [12]. Внешний квантовый выход AlGaIn/GaN-светодиодов составлял 0.7–1.8%. Наиболее полные результаты получены для мощных синих InGaIn/GaN-светодиодов, часть из них была опубликована ранее [11,13].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Транспорт носителей заряда в светодиодах

Фрактальная природа наноматериала светоизлучающих структур должна проявляться в особенностях транспорта носителей заряда по каналам протекания, т.е. в перколяционных явлениях и, как следствие, в особенностях ВАХ светодиодов.

Нестандартный вид ВАХ и большие избыточные токи при малых смещениях для InGaIn/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодов — хорошо известный экспериментальный факт. Принято считать, что слабая температурная зависимость избыточных токов определяется туннелированием носителей заряда через область объемного заряда (ООЗ) $p-n$ -перехода, но механизмы туннелирования до сих пор остаются предметом дискуссий [4,5,11,14–16].

На рис. 1 представлены ВАХ InGaIn/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодов, изготовленных из светоизлучающих структур с различной степенью разупорядоченности наноматериала. С увеличением параметра Δ_p увеличиваются избыточные токи как в прямом, так и обратном направлениях, а также увеличивается уровень шунтирования $p-n$ -переходов. О шунтировании свидетельствует симметричность ветвей ВАХ при малых напряжениях. Единообразный рост туннельных составляющих тока и уровней шунтирования $p-n$ -переходов с увеличением Δ_p позволяет предположить, что эти процессы локализуются преимущественно в системе протяженных дефектов [11]. При этом величина токов утечки при малых смещениях интегрально характеризует в большей мере свойства, а не количество протяженных дефектов в структурах. Данное предположение согласуется с результатами работ [2,3], в которых экспериментально показано путем прямых измерений ВАХ на протяженных дефектах, что уровень избыточных токов при малых напряжениях коррелирует с плотностью V -дефектов.

В ряде работ экспериментально, а также при моделировании по методу Монте-Карло [4,5] показано, что возможен вертикальный транспорт носителей заряда по локальным областям с неоднородностями состава твердого раствора. Наши исследования показали, что

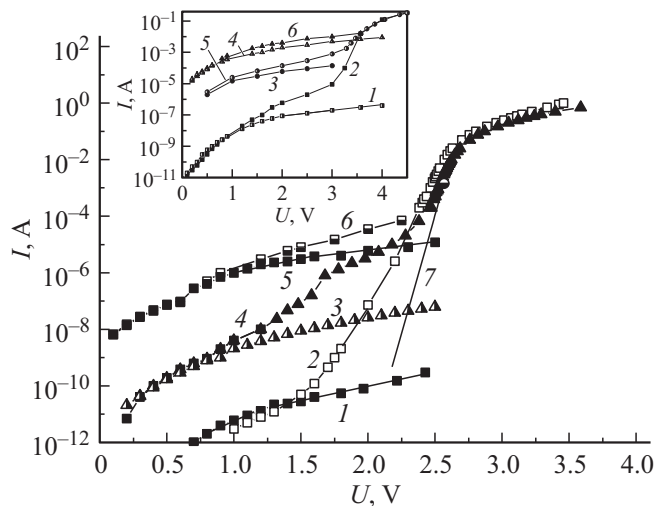


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики InGaN/GaN и AlGaIn/GaN (на вставке) светодиодов (I , 3, 5 — обратные и 2, 4, 6 — прямые ветви), изготовленных из светоизлучающих структур с различной степенью разупорядоченности их наноматериалов, Δ_p : InGaN/GaN (I — 0.330, 3 — 0.346, 5 — 0.355); AlGaIn/GaN (I — 0.348, 3 — 0.370, 5 — 0.390). Кривая 7 — расчет в рамках модели Шокли-Рида-Холла, $I \propto \exp(dV/\beta KT)$.

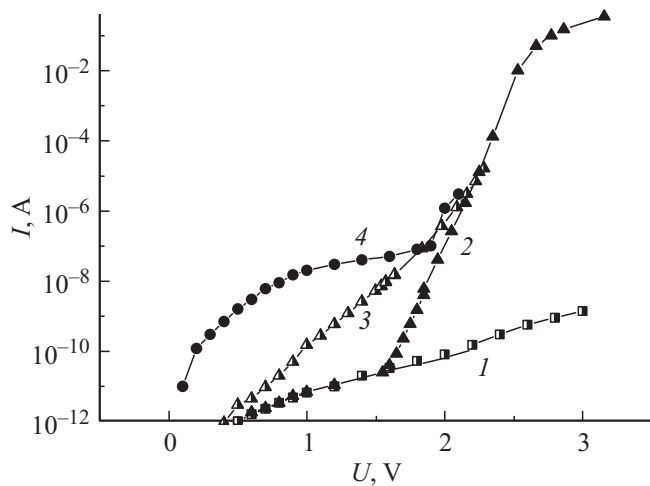


Рис. 2. ВАХ InGaN/GaN-светодиодов из одной партии с близкой обратной ветвью (кривая 1) и различными вариантами искажения прямой ветви (кривые 3, 4). Кривая 2 — типичная прямая ветвь ВАХ для большей части светодиодов из этой партии.

такой транспорт можно ожидать в светодиодах с искаженной прямой ветвью ВАХ. Действительно, на некоторых InGaN/GaN-светодиодах, сформированных из гетероструктур с хорошо упорядоченным наноматериалом и обратными ветвями ВАХ, близкими или совпадающими с кривой 1 на рис. 1, наблюдаются искажения прямых ветвей ВАХ (рис. 2, кривые 3, 4) по сравнению с типичной для таких светодиодов прямой ветвью ВАХ (кривые 2 на рис. 1 и 2). Подобные особенности ВАХ

указывают на присутствие в активных областях светодиодов локальных микрообластей с пониженной высотой потенциальных барьеров и площадью, меньшей площади всего светодиода [17]. В InGaN/GaN-светодиодах существование таких областей может быть вызвано избыточным индием в случайных неоднородностях состава твердого раствора InGaN [4]. Состав твердого раствора в таких микрообластях может быть регулярным, и они становятся источниками излучения при более низких напряжениях, чем напряжения, соответствующие генерации излучения на основной длине волны. Этот эффект преждевременного включения хорошо известен для синих InGaN/GaN-светодиодов [4]. Нерегулярный состав твердого раствора в локальных областях приводит, как показано в [18], к непредсказуемому выходу светодиодов из строя. По мере увеличения разупорядоченности наноматериала увеличивается доля светодиодов с искаженными прямыми ветвями, указывающими на присутствие микрообластей с пониженными барьерами, которые отвечают за локальный транспорт носителей заряда.

Для всех исследованных AlGaIn/GaN-светодиодов наблюдаются аналогичные корреляции ВАХ с величиной параметра Δ_p , но характерным для них является более сильное искажение прямых ветвей ВАХ и более высокий уровень шунтирования p - n -переходов (см. вставку на рис. 1).

Таким образом, в InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодах при малых смещениях транспорт носителей заряда определяется перколяционными явлениями в деформированных областях протяженных дефектов и локальных неоднородностях состава, что приводит к неоднородному протеканию тока по площади p - n -перехода. При этом не все протяженные дефекты и локальные неоднородности состава участвуют в перколяционных явлениях. Эти явления проявляются тем сильнее, чем выше степень разупорядоченности наноматериала светоизлучающих структур. В общем случае формируется трехмерная перколяционная сетка, встроенная в квантово-размерную гетероструктуру, т.е. реализуется случай существенно более сложный, чем модели, рассмотренные ранее для традиционных полупроводников [19].

С ростом смещения прямые ветви ВАХ всех светодиодов приближаются к прямой ветви, рассчитанной по модели Шокли-Рида-Холла (ШРХ) с коэффициентом идеальности $\beta = 2$ (рис. 1, кривая 7). Причем, чем выше разупорядоченность наноматериала, тем при большей плотности инжекционного тока наблюдается выход на расчетную по ШРХ прямую ветвь. Однако это не означает, что происходит пороговый переход от преимущественного транспорта носителей заряда по перколяционной системе (т.е. неоднородного распределения тока) к однородному транспорту по всей площади p - n -перехода, и соответственно перколяционными явлениями при рабочих напряжениях на светодиоде можно пренебречь. На это указывают температурные

зависимости тока при фиксированных смещениях, соответствующих переходу к расчетной прямой ветви ШРХ, которые не подчиняются этой модели [20]. Это позволяет считать, что каналы протекания при больших прямых смещениях не перекрываются полностью, и фрактально-перколяционная система при рабочих напряжениях светодиодов продолжает работать.

3.2. Внешняя квантовая эффективность светодиодов

Внешний квантовый выход InGaN/GaN-светодиодов резко уменьшается в зависимости от степени разупорядоченности наноматериала при значениях параметра Δ_p , превышающих 0.345 (см. вставку *a* на рис. 3 [13]). В этом экспериментальном факте проявляется одно из основных свойств фрактально-перколяционных систем — пороговый характер изменения параметров системы в зависимости от характера ее внутренней организации.

С увеличением степени разупорядоченности наноматериала в InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодах наблюдается не только общее уменьшение их внешнего квантового выхода, но и смещение максимума эффективности к более высоким плотностям тока (см. кривые 3 на рис. 3 и вставку *b*). Данный результат отражает нелинейность свойств каналов протекания в структурах, а уменьшение эффективности светодиодов вызвано уходом носителей заряда из активных областей по трансформированным и(или) вновь возникающим под действием увеличивающегося тока каналам протекания.

Следует отметить, что уход носителей заряда по шунтирующим каналам, локализованным в системе протяженных дефектов, наблюдали в ряде работ методами время-разрешенной фото- и электролюминесценции в объемном GaN [21], в светодиодах InGaN/GaN [22] и AlGaIn/GaN [23].

Таким образом, в пороговом поведении внешнего квантового выхода светодиодов с изменением степени разупорядоченности наноматериала, а также в уменьшении квантового выхода при трансформации каналов протекания носителей заряда с изменением величины инжекционного тока проявляются характерные свойства фрактально-перколяционных систем. При этом могут изменяться как свойства отдельных каналов, так и геометрия перколяционной сетки.

3.3. Низкочастотные шумы в светодиодах

Для всех исследованных InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодов частотная зависимость спектральной плотности шума подчиняется закону $1/f$ вплоть до $f = 50$ кГц. Спектральные плотности токового шума $S_I(j)$ и флуктуаций напряжения $S_V(j)$ в зависимости от плотности тока через светодиоды анализировались на частоте 1.22 Гц, когда шумы максимальны. На более высоких частотах все особенности зависимостей сохранялись. Интенсивность шумов всегда увеличивалась с уве-

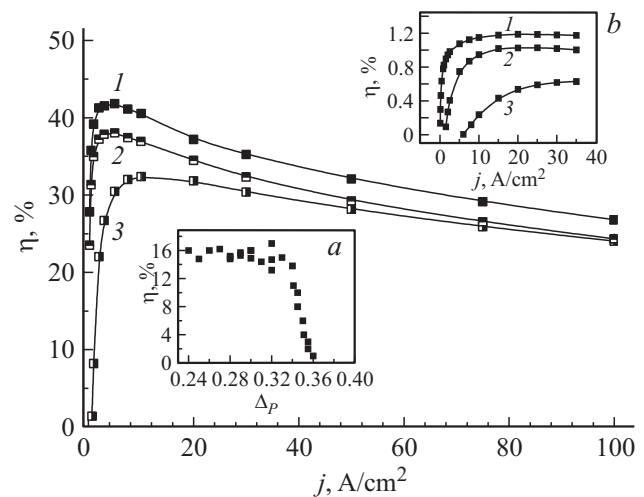


Рис. 3. Внешняя квантовая эффективность InGaN/GaN и AlGaIn/GaN (на вставке *b*) светодиодов, изготовленных из светоизлучающих структур с различной степенью разупорядоченности наноматериала, Δ_p : InGaN/GaN (1 — 0.330, 2 — 0.340, 3 — 0.346); AlGaIn/GaN (1 — 0.348, 2 — 0.370, 3 — 0.90). На вставке *a* представлена зависимость внешней квантовой эффективности InGaN/GaN-светодиодов от степени разупорядоченности наноматериала.

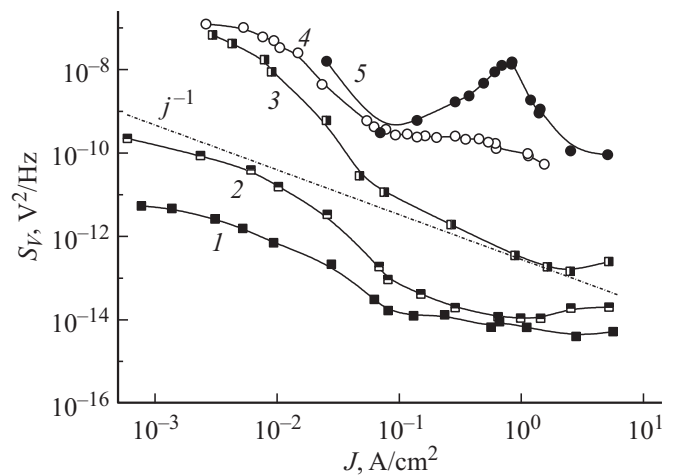


Рис. 4. Флуктуации напряжения на частоте 1 Гц в InGaN/GaN (кривые 1, 2, 3) и AlGaIn/GaN (кривые 4, 5) светодиодах, изготовленных из светоизлучающих структур с различной степенью разупорядоченности наноматериала, Δ_p : 1 — 0.330, 2 — 0.346, 3 — 0.355, 4 — 0.348, 5 — 0.370. Пунктирная прямая соответствует однородному распределению тока в $p-n$ -переходе.

личением степени разупорядоченности наноматериала светодиодов.

На рис. 4 представлены спектральные плотности низкочастотных флуктуаций напряжения $S_V(j)$ в InGaN/GaN- и AlGaIn/GaN-светодиодах. Зависимость $S_V \propto 1/j$ (пунктирная прямая на рисунке) соответствует равномерному распределению тока по площади

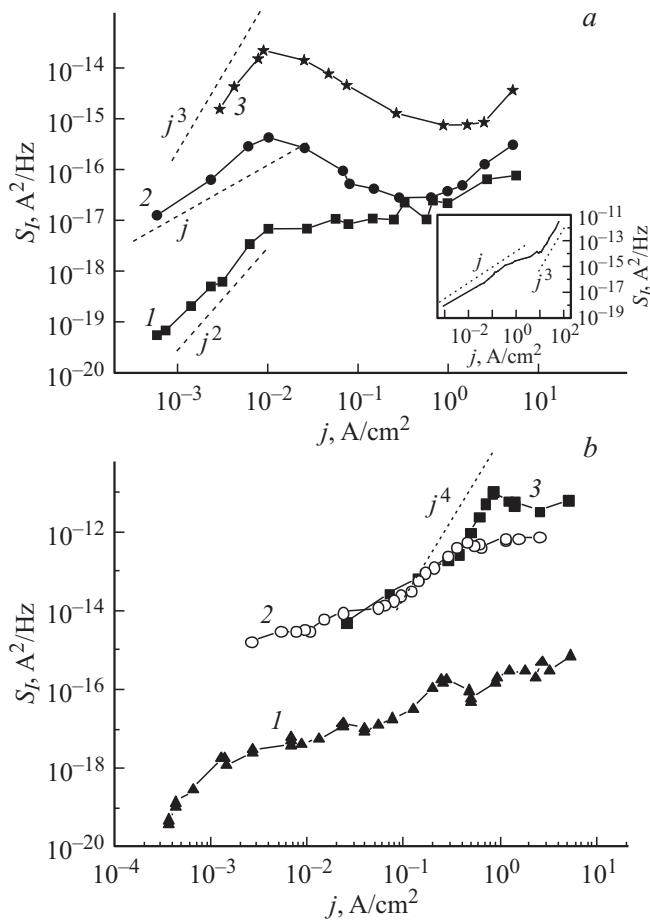


Рис. 5. Спектральная плотность низкочастотного токового шума для InGaN/GaN (a) и AlGaIn/GaN (b) светодиодов, изготовленных из светоизлучающих структур с различной степенью разупорядоченности наноматериала, Δ_p : a) 1 — 0.330, 2 — 0.346, 3 — 0.355; b) 1 — 0.348, 2 — 0.370, 3 — 0.390. На вставке — типичная зависимость $S_I(j)$ для InGaN/GaN-светодиодов с излучающей площадью 300×300 мкм.

p - n -перехода [24,25]. Видно, что с увеличением степени разупорядоченности (Δ_p) материалов в светодиодах увеличивается не только интенсивность флуктуаций напряжения, но и степень отклонения зависимостей от закона $S_V \propto 1/j$, а значит, увеличивается и неоднородность распределения тока в p - n -переходах. При этом характер неоднородности токопрохождения изменяется с изменением плотности тока, что отражает нелинейные свойства фрактально-перколяционной системы, в том числе и в области рабочих напряжений светодиодов.

В AlGaIn/GaN-светодиодах флуктуации напряжения и неоднородности транспорта носителей заряда выше, в них выше и степень разупорядоченности материала по сравнению с InGaN/GaN-светодиодами.

Зависимости спектральной плотности токового шума $S_I(j)$ в светодиодах (рис. 5) позволяют получить дополнительную информацию о свойствах фрактально-перколяционной системы. Для всех светодиодов

наблюдается сложная динамика изменения интенсивности шума S_I в зависимости от плотности тока, наиболее ярко выраженная для InGaN/GaN-светодиодов (рис. 5, a). В спектрах $S_I(j)$ можно выделить четыре характерных диапазона.

При малых токах $j \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ А/см² интенсивность шума всегда увеличивается с увеличением Δ_p . Зависимости $S_I(j)$ для большинства светодиодов являются суперпозицией функций $S_I(j) \propto j$ и $S_I(j) \propto j^2$ и определяются процессами безызлучательной рекомбинации (БР). Для светодиодов с более упорядоченной структурой ($\Delta_p < 0.345$, рис. 5, a, кривая 1) наблюдаются зависимости, близкие к $S_I(j) \propto j^2$, характерные генерационно-рекомбинационного шума в p - n -переходах для традиционных A^{III}B^V при БР через одиночные центры по механизму ШРХ. Однако для этих светодиодов на частотных зависимостях $S_I(f)$ отсутствуют лоренцианы, типичные для механизма ШРХ. Отсюда следует, что данный механизм не реализуется в InGaN/GaN-светодиодах. Это согласуется с аналогичным выводом, полученным при исследовании ВАХ (см. разд. 3.1). С увеличением степени разупорядочения наноматериала вид зависимостей приближается к $S_I(j) \propto j$, которые часто трактуются как результат БР через близко расположенные энергетические уровни. Можно предположить, что эти уровни принадлежат флукуторам, расположенным в трехмерной сетке протяженных дефектов, где и происходят перколяционные явления при изменении плотности тока.

В диапазоне токов $j \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ А/см² наблюдается подавление БР, вызванное реабсорбцией слабого длинноволнового излучения из областей с повышенным содержанием индия в локальных областях с нерегулярным составом [11]. Характер падающего участка на зависимостях $S_I(j)$ в этом диапазоне единообразный для всех светодиодов и не соответствует зависимости $S_I(j) \propto j^2$, обычно наблюдаемой при заполнении носителями заряда уровней, создаваемых в запрещенной зоне полупроводника единичными центрами. Этот результат также позволяет предполагать, что БР подавляется в основном в перколяционной сетке. Благодаря этому процессу при дальнейшем увеличении плотности тока $j \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ А/см² уровень шума стабилизируется, а большая часть инжектируемых носителей заряда поступает в более совершенные области наноматериала, где они рекомбинируют излучательно на основной длине волны. Наблюдаемый диапазон стабилизации уровня шума, как правило, соответствует токам, при которых начинает преобладать излучательная рекомбинация, и квантовый выход приобретает максимальные значения (рис. 3). Для светодиодов с $\Delta_p < 0.345$ стабилизация уровня шума и излучательная рекомбинация включаются при меньших плотностях тока (рис. 3, кривые 1, 2; рис. 5, a, кривая 1). Для светодиодов с $\Delta_p > 0.345$ стабилизация низкочастотного шума наступает при больших плотностях тока, стабилизированные значения шума существенно выше, а значения внешнего квантового

выхода ниже. Это согласуется с пороговой зависимостью эффективности от степени разупорядоченности наноматериала и сдвигом максимума эффективности к большим токам. Таким образом, существует диапазон токов, в котором вклад перколяционной системы в проводимость структуры подавлен.

Начиная с плотностей тока $1-3 \text{ А/см}^2$ вновь наблюдается увеличение плотности низкочастотного токового шума. При этом проследить за особенностями в зависимостях $S_I(j)$ до больших плотностей тока $\sim 50 \text{ А/см}^2$ удается только на светодиодах малой площади, $\leq 300 \times 300 \text{ мкм}$ (см. вставку на рис. 5). В этом диапазоне токов на зависимостях наблюдаются участки $S_I(j) \propto j^3$, характеризующие обратимую перестройку свойств перколяционной системы под действием инжекционного тока. В светодиодах с высокой степенью разупорядоченности наноматериала в спектрах шума уже при малых токах появляются участки $S_I(j) \propto j^3$ (рис. 5, а, кривая 3), которые свидетельствуют о начинающейся перестройке дефектной структуры под действием инжекционного тока. Наблюдаемое пороговое изменение плотности токового шума $S_I(j)$ с увеличением инжекционного тока является одним из типичных свойств фрактально-перколяционных систем [9].

В AlGaIn/GaN-светодиодах при малых токах, как правило, наблюдаются зависимости $S_I(j) \propto j$ и интенсивность шума выше, так как уровень шунтирования и степень разупорядоченности материала в этих светодиодах выше, чем в InGaIn/GaN-светодиодах. В AlGaIn/GaN-светодиодах, изготовленных из структур с высокой степенью разупорядоченности, в спектрах шума наблюдаются участки $S_I(j) \propto j^3$, отвечающие за перестройку или генерацию дефектов, а также участки $S_I(j) \propto j^4$ (рис. 5, б, кривая 3), указывающие на возникновение в $p-n$ -переходах локальных перегревов. Можно предполагать, что высокая степень разупорядоченности наноматериала в AlGaIn/GaN-светодиодах и значительные случайные неоднородности состава твердого раствора, т.е. особенности фрактальной организации наноматериала, являются причинами низких сроков службы и малых значений внешней квантовой эффективности AlGaIn/GaN-светодиодов.

Результаты теоретических и экспериментальных работ последних лет [4,18] показали, что процессы, происходящие в случайных трехмерных неоднородностях состава твердого раствора и в протяженных дефектах, т.е. в фрактально-перколяционной системе, могут быть одной из основных причин падения внешней квантовой эффективности [4] и нестандартного волнообразного течения деградации эффективности в светодиодах на основе III-нитридов [18,26].

4. Заключение

Показано, что фрактально-перколяционная система, формирующаяся в протяженных дефектах и локальных

неоднородностях состава твердых растворов, встроенная в квантово-размерные светоизлучающие InGaIn/GaN- и AlGaIn/GaN-гетероструктуры, выявляется при малых смещениях в особенностях ВАХ. При рабочих напряжениях на светодиодах присутствие этой системы проявляется в неоднородном распределении тока по площади $p-n$ -переходов, в пороговых зависимостях внешней квантовой эффективности светодиодов от степени разупорядоченности наноматериала и пороговых зависимостях спектральной плотности низкочастотного токового шума от плотности инжекционного тока. Геометрия и свойства этой системы зависят от степени разупорядоченности наноматериала и величины инжекционного тока. Вклад этой системы в транспорт носителей заряда, безызлучательную и излучательную рекомбинацию изменяется нелинейно в зависимости от величины инжекционного тока. Существование этой системы вносит ограничение на применение ABC модели при анализе и моделировании тепловых процессов в светодиодах, при расчете потерь излучаемой мощности с увеличением плотности тока, при интерпретации механизмов деградации внешней квантовой эффективности светодиодов в процессе их старения. Медленные процессы, развивающиеся в этой системе, мало изучены, особенно в светоизлучающих AlGaIn/GaN-структурах, хотя именно они могут быть ответственны за низкие сроки службы и низкую эффективность AlGaIn/GaN-светодиодов. Фрактальная природа наноматериала светоизлучающих структур порождает многообразие их свойств, в том числе и при одинаковом дизайне активной области. Кроме того, она является основной причиной противоречивых экспериментальных данных и выводов, имеющих в научной литературе для этих материалов, а также причиной безуспешных многолетних усилий по созданию общепринятых моделей падения внешней квантовой эффективности и волнообразной деградации эффективности светодиодов в процессе их эксплуатации.

Авторы выражают благодарность М.Е. Левинштейну за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке гранта президиума РАН „Новые материалы“ 9С374.

Список литературы

- [1] L. Lymparakis, J. Neugebauer, M. Albrecht, T. Remmele, H.P. Strunk. Phys. Rev. Lett., **93**, 196 401 (2004).
- [2] L.C. Le, D.G. Zhao, D.S. Jiang, L. Li, L.L. Wu, P. Chen, Z.S. Liu, J. Yang, X.J. Li, X.G. He, J.J. Zhu, H. Wang, S.M. Zhang, H. Yang. J. Appl. Phys., **114**, 143 706 (2013).
- [3] S.-H. Han, D.-Y. Lee, H.-W. Shim, J.W. Lee, D.-J. Kim, S. Yoon, Y.S. Kim, S.-T. Kim. Appl. Phys. Lett., **102**, 251 123 (2013).
- [4] Y.-R. Wu, R. Shivaraman, K.-C. Wang, J.S. Speck. Appl. Phys. Lett., **101**, 083 505 (2012).
- [5] D.N. Nath, Z.C. Yang, C.-Y. Lee, P.S. Park, Y.-R. Wu, S. Rajan. Appl. Phys. Lett., **103**, 022 102 (2013).

- [6] K.K. Leung, W.K. Fong, P.K.L. Chan, C. Surya. *J. Appl. Phys.*, **107**, 0731103 (2010).
- [7] A.I. Besyulkin, A.P. Kartashova, A.G. Kolmakov, W.V. Lundin, N.M. Shmidt, M.M. Mezdrogina, A.V. Sakharov, A.A. Sitnikova, A.L. Zakheim, E.E. Zavarin, R.V. Zolotareva, N.M. Shmidt. *Phys. Status Solidi C*, **2**, 837 (2005).
- [8] N.M. Shmidt, V.V. Emtsev, A.G. Kolmakov, A.G. Kryzhanovsky, W.V. Lundin, D.S. Poloskin, V.V. Ratnikov, A.N. Titkov, E.E. Zavarin. *Nanotechnology*, **12**, 471 (2001).
- [9] A.E. Морозовский, А.А. Снарский. *ЖЭТФ*, **95**, 1844 (1989).
- [10] A.V. Ankudinov, A.I. Besyulkin, A.G. Kolmakov, W.V. Lundin, V.V. Ratnikov, A.A. Sitnikova, A.N. Titkov, A.S. Usikov, E.B. Yakimov, E.E. Zavarin, R.V. Zolotareva, N.M. Shmidt. *Physica B*, **340–342**, 462 (2003).
- [11] E.I. Shabunina, N.S. Averkiev, A.E. Chernyakov, M.E. Levinshstein, P.V. Petrov, N.M. Shmidt. *Phys. Status Solidi C*, **10**, 335 (2013).
- [12] S. Kurin, A. Antipov, I. Barash, A. Roenkov, A. Usikov, H. Helava, V. Ratnikov, N. Shmidt, A. Sakharov, S. Tarasov, E. Menkovich, I. Lamkin, B. Papchenko, Yu. Makarov. *Phys. Status Solidi C*, **11**, 813 (2014).
- [13] Б.Я. Бер, Е.В. Богданова, А.А. Грешнов, А.Л. Закейм, Д.Ю. Казанцев, А.П. Карташова, А.С. Павлюченко, А.Е. Черняков, Е.И. Шабунина, Н.М. Шmidt, Е.Б. Якимов. *ФТП*, **45**, 425 (2011).
- [14] P.G. Eliseev, P. Perlin, J. Furioli, Ph. Sartori, J.M.M. Osinski. *Electron. Mater.*, **26**, 311 (1997).
- [15] В.Е. Кудряшов, К.Г. Золина, А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *ФТП*, **31**, 1304 (1997).
- [16] D. Yan, H. Lu, D. Chen, R. Zhang, Y. Zheng. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 083504 (2010).
- [17] Ф.Е. Шуберт. *Светодиоды*, пер. под ред. А.Э. Юновича (М., Физматлит, 2008).
- [18] A.E. Chernyakov, M.E. Levinshstein, P.V. Petrov, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina, A.L. Zakheim. *Microelectronics Reliab.*, **52**, 2180 (2012).
- [19] Б.Л. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1975).
- [20] A.E. Chernyakov, M.M. Sobolev, V.V. Ratnikov, N.M. Shmidt, E.B. Yakimov. *Super. Microstruct.*, **45**, 301 (2009).
- [21] C.A. Hurni, A. David, M.J. Cich, R.I. Aldaz, B. Ellis, K. Huang, A. Tyagi, R.A. DeLille, M.D. Craven, F.M. Stranaka, M.R. Krames. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 031101 (2015).
- [22] M.W. Moseley, A.A. Allerman, M.H. Crawford, J.J. Wierer, jr., M.L. Smith, A.M. Armstrong. *J. Appl. Phys.*, **117**, 095301 (2015).
- [23] A. Pinos, S. Marcinkevičius, M.S. Shur. *J. Appl. Phys.*, **109**, 103108 (2011).
- [24] N.V. Dyakonova, M.E. Levinshstein, S. Contreras, W. Knap, B. Beaumont, P. Gibart. *Phys. Semicond. Dev.*, **32**(3), 285 (1998).
- [25] N. Shmidt, A. Usikov, E. Shabunina, A. Chernyakov, A. Sakharov, S. Kurin, A. Antipov, I. Barash, A. Roenkov, H. Helava, Yu. Makarov. *Phys. Status Solidi C*, **12**, 349 (2015).
- [26] N. Shmidt, A. Greshnov, A. Chernyakov, M. Levinshstein, A. Zakheim, E. Shabunina. *Phys. Status Solidi C*, **10**, 332 (2013).

Редактор Г.А. Оганесян

Fractal nature of light-emitting structures based on III-N nanomaterials and related phenomena

V.N. Petrov*, V.G. Sidorov⁺, N.A. Talnishnih[■],
A.E. Chernyakov[■], E.I. Shabunina*, N.M. Smidt*,
A.S. Usikov[•], H. Helava[•], Yu.N. Makarov^{♦♦}

* Ioffe Institute,

194021v St. Petersburg, Russia

+ Peter the Great Saint-Petersburg

Polytechnic University,

195251 St. Petersburg, Russia

■ Submicron Heterostructures for Microelectronics

Research and Engineering Center,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

• Nitride Crystals Inc., 181 E Industry Ct.,

NY 11729, USA

♦ Nitride Crystals Group,

194156 St. Petersburg Russia

Abstract It was shown that in nanomaterials of InGaN/GaN and AlGaIn/GaN light-emitting structure 3D fractal-percolation system determining electrophysical properties of LEDs based on these structures forms in extended defects and local non-uniformities in solid solution composition. The geometry and properties of this system depend non-linearly on the degree of nanomaterial disorder, injection current values, and growth rates of solid solution.