

Мухаммед Али | Дмитрий Артемьев | Владислав Бугров | Иван Ивукин | Алексей Ковш  
Владимир Николаев | Максим Одноблюдов | Алексей Романов | Мария Швалева

# Структурированные светодиодные подложки GaN/сапфир

## Введение

В светодиодной промышленности широко используются пленки нитрида галлия (GaN), выращенные в специальном реакторе методами газофазной эпитаксии на подложке из сапфира. Хорошо известно, что рассогласование кристаллических решеток сапфира и GaN составляет порядка 14%, что приводит к высокой плотности линейных дефектов — дислокаций в объеме выросшей пленки. Наличие дислокаций негативно сказывается на оптоэлектрических свойствах светодиодных гетероструктур (дислокации служат центрами безызлучательной рекомбинации [1, 2]) и, в конечном счете, на качестве излучения светодиодов (СИД). Кроме того, вследствие значительного различия коэффициентов термического расширения нитрида галлия и сапфира, в процессе роста в реакторе и последующего охлаждения в пленке возникают термические напряжения, высокий уровень которых может привести к появлению трещин, что снижает выход годных.

Уменьшение термических напряжений, возникающих в структурах GaN/сапфир, является важной задачей для получения качественных подложек и последующего производства высокоэффективных светодиодов.

Существует несколько подходов к решению данной проблемы. Первый способ заключается в подборе материала подложки для уменьшения рассогласования параметров кристаллической решетки пленки GaN и подложки. Идеальным подложечным материалом является объемный (bulk) нитрид галлия, который в промышленных масштабах пока не используется из-за высокой цены. Второй способ состоит в выборе «неродной» подложки (сапфир, кремний и т. д.) и выращивании промежуточных слоев нитридов элементов III группы: AlN, InN, GaN [3, 4]. Данные слои могут влиять на плотность проникающих дислокаций, кроме того, уменьшать механические напряжения в системе пленка/подложка. Минусом метода являются сложность процесса и большие затраты времени на производство. Третье направление — формирование упорядоченной пористой структуры, когда в результате нанесения масок (паттернов)

из специальных материалов последующим травлением и определенным образом организованным ростом структуры получается массив упорядоченных пор, который впоследствии зарастивается.

В настоящей статье обсуждается способ уменьшения напряжений в пленках GaN на сапфире за счет образования упорядоченной пористой структуры GaN, предложенной ранее в работе [5]. Также приводится анализ зависимости термических напряжений от геометрических параметров пористой структуры и рассматривается влияние пористой структуры на возможность зарождения трещин на границе GaN/сапфир, приводящих к самоотделению пленки от подложки.

## Метод получения упорядоченной пористой структуры в пленках GaN на сапфире

Для получения пористой структуры наиболее часто применяется метод, основанный на травлении подложки через маску и последующем эпитаксиальном латеральном зарастивании полученных пор.

Для получения высококачественных подложек сотрудниками группы компаний «Оптоган» была использована технология, основанная на латеральном зарастивании нитрида галлия с вытравленными отверстиями [5].

Для получения гексагональных пор на поверхности слоя GaN был применен метод фотолитографии. На начальном этапе была нанесена на исследуемую подложку GaN пленка Ni, поверх которой был осажден фоторезист в виде маски. Далее проходило травление методом индукционно связанного плазменного реактивного ионного травления (ICP-RIE) через маску. Условия травления были следующими: скорость потока хлора ( $Cl_2$ )  $15 \text{ см}^3/\text{с}$ ; скорость потока аргона (Ar)  $2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ ; общее давление в системе  $4 \text{ мТорр}$ . Заключительным этапом получения пористой структуры подложки GaN было удаление слоя Ni с использованием газов  $HCl:HNO_3$  (3:1) и чистка поверхности с помощью ацетона, 2-пропанола и  $H_2SO_4:H_2O_2$  (3:1).

На рис. 1 представлено изображение вытравленных пористых структур с диаметром гексагональных пор 2 и 3 мкм соответственно, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) [5].

Преимуществом данного метода является возможность контроля различных геометрических параметров пор, таких как: отношение высоты к диаметру пор; шаг между порами; угол наклона стенок в процессе латерального зарастивания.

Сформированная структура с открытыми гексагональными порами снова помещалась в реактор для процесса латерального зарастивания, который обеспечивается соотношением молярных долей реагентов V и III группы соответственно равным 1440, при температуре  $+1030 \text{ }^\circ\text{C}$ . В зависимости от диаметра пор и шага периодичности пористой структуры

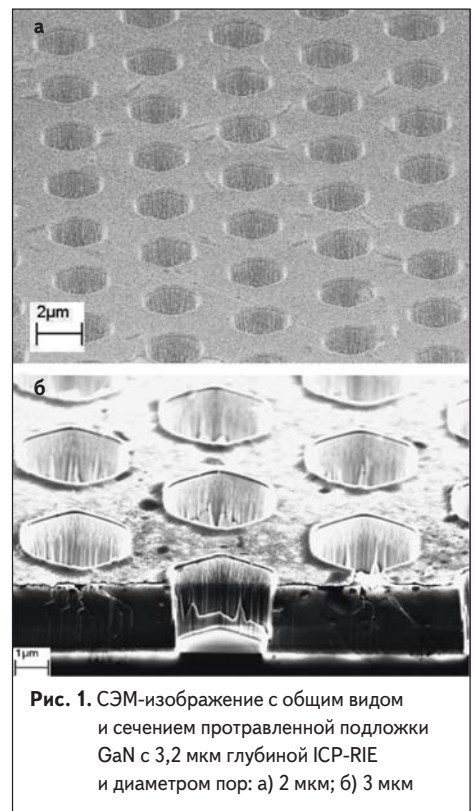
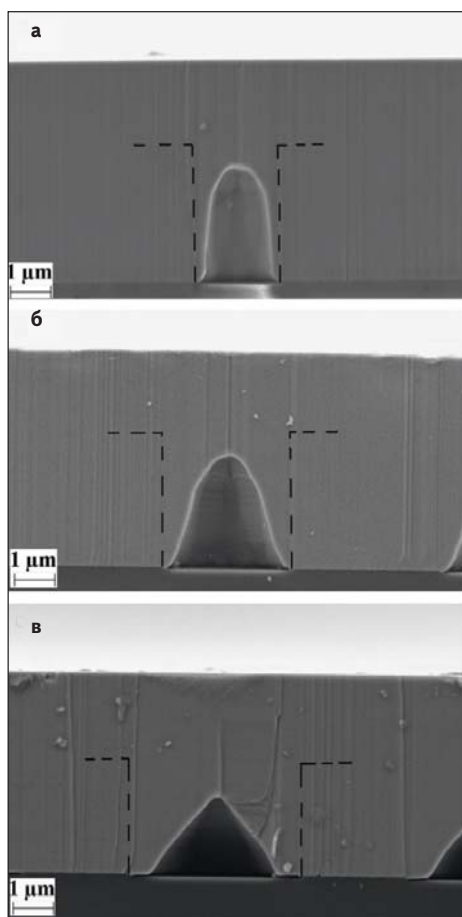
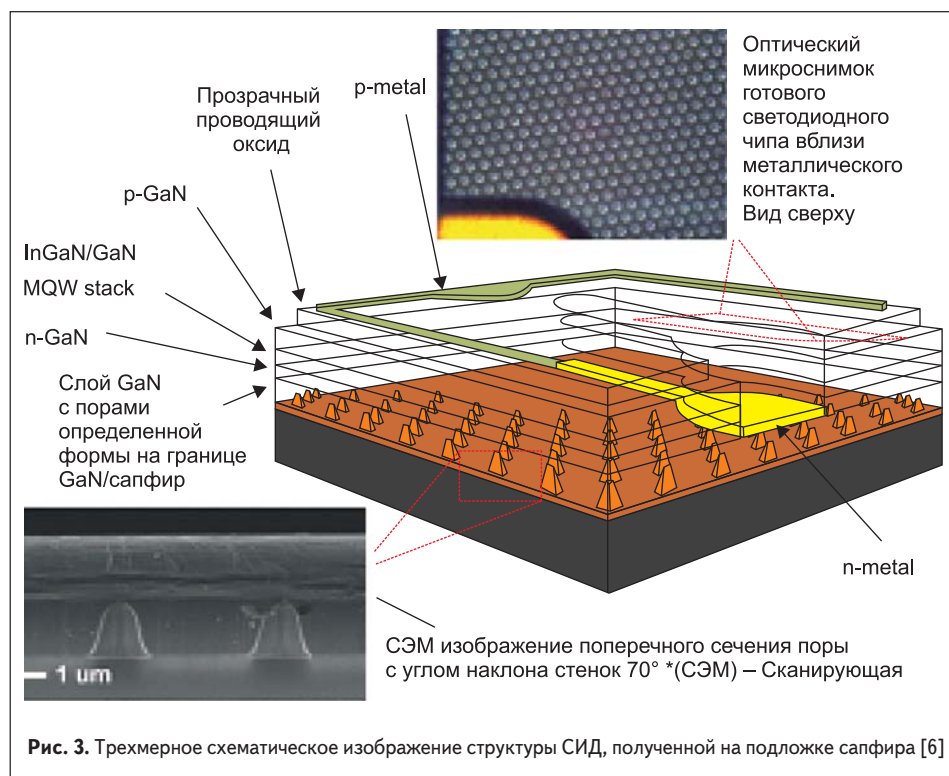


Рис. 1. СЭМ-изображение с общим видом и сечением протравленной подложки GaN с 3,2 мкм глубиной ICP-RIE и диаметром пор: а) 2 мкм; б) 3 мкм



**Рис. 2.** СЭМ-изображения поперечного сечения подложек GaN с порами различного диаметра и углами наклона стенок после латерального зарощивания: а) угол наклона стенок 85°, диаметр поры 2 мкм; б) угол наклона 70°, диаметр поры 3 мкм; в) угол наклона стенки 60°, диаметр поры 4,5 мкм [5]



**Рис. 3.** Трехмерное схематическое изображение структуры СИД, полученной на подложке сапфира [6]

после зарощивания получают поры с углом наклона стенок, варьирующимся от практически вертикального до сильно наклонного, как показано на рис. 2а–в.

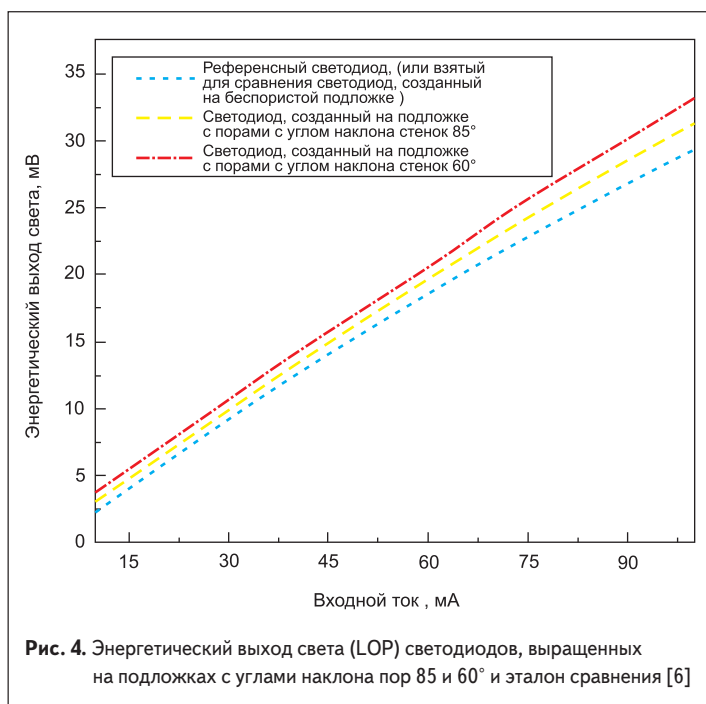
Схема структуры СИД, полученной на основе выращенной подложки, показана на рис. 3.

Для оценки качества СИД были получены графики зависимости светового выхода от входного тока и нормированного внешнего квантового выхода (EQE) светодиода от плотности тока в зависимости от типа зарощенных пор [6].

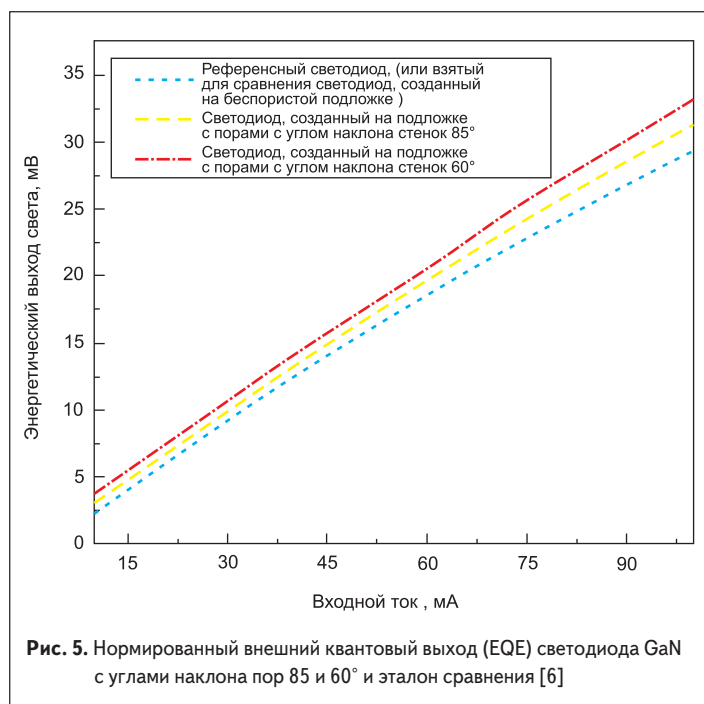
На рис. 4 представлены графики энергетического выхода света (LOP) подложек GaN при различных углах наклона стенок пор.

В первую очередь стоит отметить линейный характер зависимости выхода света от подаваемого на электроды тока. При инжекционном токе 20 мА выход света увеличивается примерно на 20% при уменьшении угла наклона грани поры от 85 до 60° и составляет 6,7 и 7,2 мВт соответственно. На основе полученных данных можно утверждать, что наличие упорядоченной пористой структуры GaN улучшает энергетический выход света, что, в свою очередь, приводит к увеличению мощности светодиода.

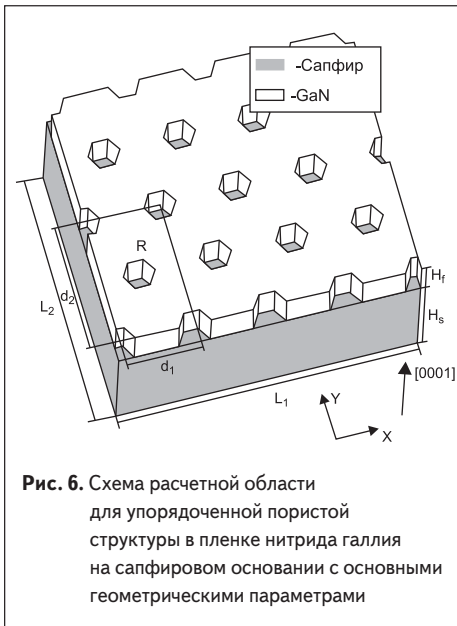
На рис. 5 представлен график зависимости нормированного внешнего квантового выхода светодиода от типа пористой структуры



**Рис. 4.** Энергетический выход света (LOP) светодиодов, выращенных на подложках с углами наклона пор 85° и 60° и эталон сравнения [6]



**Рис. 5.** Нормированный внешний квантовый выход (EQE) светодиода GaN с углами наклона пор 85° и 60° и эталон сравнения [6]



**Рис. 6.** Схема расчетной области для упорядоченной пористой структуры в пленке нитрида галлия на сапфировом основании с основными геометрическими параметрами

(поры с вертикальными или наклонными стенками); точками показана референсная кривая для СИД, созданного на беспористой подложке.

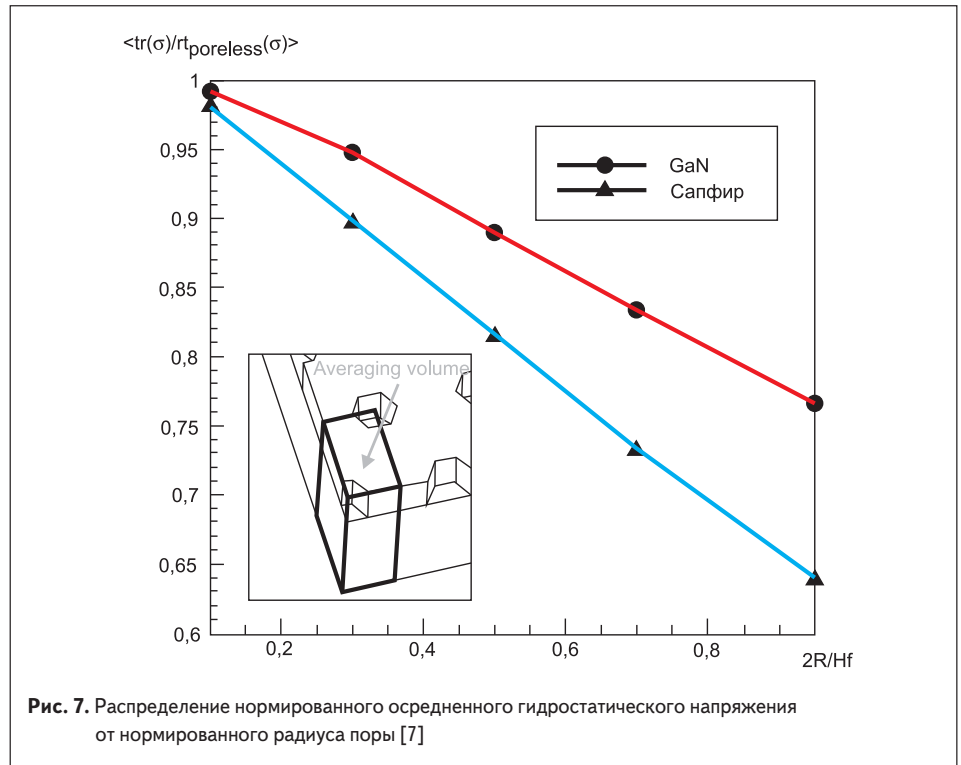
Из полученных данных можно сделать вывод, что наличие пор в подложке приводит к увеличению внешнего квантового выхода, что приводит к увеличению интенсивности светового излучения. Данный эффект объясняется тем, что присутствие пор уменьшает средний путь лучей света в СИД-структуре и, таким образом, сокращает внутренние оптические потери. При этом структура с наклонными стенками пор приводит к усилению указанного эффекта.

### Анализ влияния гексагональной пористой структуры в пленках GaN на сапфире на напряжения

В научном отделе группы компаний «Оптоган» было проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния в подложках GaN/сапфир с пористыми структурами с целью оценки степени релаксации термических напряжений открытой пористой структуры в пленке нитрида галлия. Было проведено параметрическое исследование влияния геометрических размеров открытых пор на степень релаксации. Также проводилась оценка возможности самоотделения пленки нитрида галлия от сапфировой подложки при охлаждении.

Для численного моделирования применялся программный комплекс COMSOL, использующий метод конечных элементов, при этом была выбрана линейно-упругая модель материалов, обладающая анизотропными свойствами.

На рис. 6 представлена геометрическая модель расчетной области, представляющая собой упорядоченный массив открытых пор в пленке нитрида галлия, расположенных в гексагональном порядке.



**Рис. 7.** Распределение нормированного осредненного гидростатического напряжения от нормированного радиуса поры [7]

На рис. 6 помимо основных геометрических параметров пленки [7] указана и кристаллографическая ориентация слоя нитрида галлия, а также выделена исследуемая расчетная область, представляющая собой упорядоченный массив элементарных блоков в виде параллелепипедов с основаниями площадью  $d_1 \times d_2$  ( $d_2/d_1 = \sqrt{3}$ ). Для получения более гладких расчетных распределений напряжений исходная геометрическая модель была разбита на конечные элементы неструктурированной тетраэдрической сеткой, имеющей измельчение вблизи центральной поры.

Для расчетов использованы следующие геометрические параметры:  $A$  — нормированный радиус вписанной в шестиугольник поры окружности,  $M$  — нормированный шаг пористой структуры.

В качестве представительного значения для оценки степени релаксации напряжений рассматривался след тензора напряжений (гидростатическое давление), т. к. данная величина является инвариантной относительно изменения системы координат.

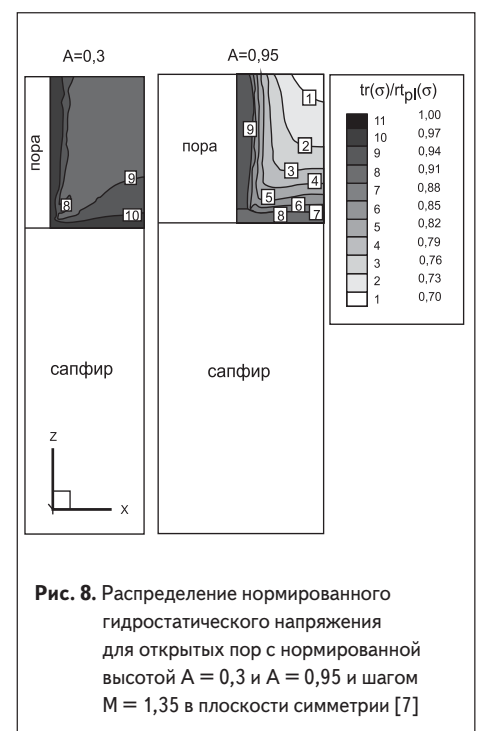
На рис. 7 представлены зависимости нормированного осредненного гидростатического напряжения от нормированного радиуса поры с фиксированным шагом  $M = 1,35$ .

По полученным данным можно сделать вывод о том, что полученная зависимость имеет практически линейный характер: увеличение нормированного радиуса поры приводит к уменьшению нормированного осредненного гидростатического напряжения.

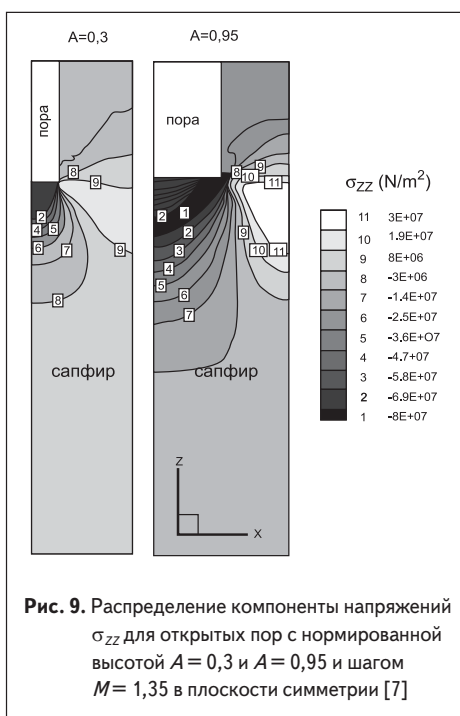
Были также проведены расчеты по исследованию зависимости нормированного осредненного гидростатического давления от нормированного радиуса  $A$ . На рис. 8 представлены полученные распределения.

По полученным расчетным данным можно заключить, что открытые поры приводят к уменьшению гидростатических напряжений в своей окрестности. Также стоит отметить, что существует значительная концентрация напряжений на границе поры и слоя нитрида галлия. Эффект локализации напряжения усиливается с увеличением нормированного радиуса пор.

На рис. 9 представлено распределение компоненты растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$  для открытых пор на границе GaN/сапфир. Данные напряжения могут способствовать



**Рис. 8.** Распределение нормированного гидростатического напряжения для открытых пор с нормированной высотой  $A = 0,3$  и  $A = 0,95$  и шагом  $M = 1,35$  в плоскости симметрии [7]



формированию трещин нормального раскрытия в исследуемой области.

На основе полученных расчетов можно сказать, что  $\sigma_{zz}$  на границе GaN/сапфир повышается с увеличением нормированного радиуса пор [7].

## Заключение

В результате проведенных исследований можно прийти к выводу, что наличие пор в пленках GaN на сапфире приводит к перераспределению напряжений в структуре, наблюдается релаксация напряжений: пористая структура приводит к более чем 20%-ному падению осредненного гидростатического напряжения в пленке нитрида галлия. Анализ термических напряжений показал зависимость напряженно-деформированного состояния от геометрических параметров пористой структуры: увеличение нормированного радиуса приводит к уменьшению осредненного гидростатического напряжения в пленке нитрида галлия. Вследствие наличия вблизи пор концентрации компоненты растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$  возможно зарождение трещин на границе GaN/сапфир, с последующим отделением сапфировой подложки.

Наличие пористой структуры с наклонными стенками приводит к уменьшению внутренних оптических потерь в светодиодной структуре, что в итоге приводит к увеличению внешнего квантового выхода и к увеличению интенсивности светового излучения.

## Литература

1. Northrup J. E.. Screw dislocations in GaN: The Ga-filled core model // Applied Physics Letters. 2001.
2. Sugahara T., Sato H., Hao M., Naoi Y., Kurai S., Tottori S., Yamashita K., Nishino K., Romano L. T., Sakai S. Direct Evidence that Dislocations are Non-Radiative Recombination Centers in GaN // Physical Review. 1998.
3. Hageman P. R., Haffouz S., Kirilyuk V. et al. High Quality GaN Layers on Si(111) Substrates: AlN Buffer Layer Optimisation and Insertion of a SiN Intermediate Layer // Physica Status Solidi A. 2001.
4. Damilano B., Natali F., Brault J., Hault T., Lefebvre D., Tauk R., Frayssinet E., Moreno J.-C., Cordier Y., Semond F., Chenot S., Massies J. Blue (Ga,In)N/GaN Light Emitting Diodes on Si(110) Substrate // Applied Physics Express. 2008.
5. Ali M., Romanov A. E., Suihkonen S., Svensk O., Törmä P. T., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M. A., Bougrov V. E. Void shape control in GaN re-grown on hexagonally patterned, mask-less GaN // Journal of Crystal Growth. 2011.
6. Ali M., Svensk O., Riuttanen L., Kruse M., Suihkonen S., Romanov A. E., Törmä P. T., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M. A., Bougrov V. E. Enhancement of near-UV GaN LED light extraction efficiency by GaN/sapphire template patterning // Semiconductor Science and Technology. 2012. № 27.
7. Ивукин И. Н., Артемьев Д. М., Бугров В. Е., Оdnoblyudov M. A., Романов А. Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных пленках нитрида галлия на сапфировых подложках // Физика твердого тела. 2012 (в печати).