

06:07

## **Синтез светодиодной структуры на гранях (11 $\bar{2}$ 0) и (0001) мезаполосков, выращенных методом селективной эпитаксии**

© М.М. Рожавская, В.В. Лундин, А.В. Сахаров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Mrozhavskaya@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 августа 2013 г.

Исследовано влияние типа несущего газа на характер формирования слоев  $p$ -GaN на гранях (0001), (11 $\bar{2}$ 0) и (11 $\bar{2}$ 2) мезаполосковой структуры, сформированной с использованием метода селективной эпитаксии. На гранях (0001) и (11 $\bar{2}$ 0) мезаполосковой структуры прямоугольного сечения сформирована светодиодная структура с активной областью на основе квантовых ям InGaN/GaN. Созданы прототипы светодиодов на свободных полосках GaN, отделенных от подложки.

Нитриды третьей группы и их твердые растворы благодаря прямозонности оптических переходов и ширине запрещенной зоны, перекрывающей весь видимый оптический диапазон, являются крайне интересной системой материалов для применения в оптоэлектронных приборах. При этом существенной проблемой являются встроенные пьезоэлектрические поля, возникающие из-за низкой симметрии и рассогласования параметров кристаллической решетки бинарных соединений, что приводит к пространственному разделению волновых функций электрона и дырки и снижению эффективности излучения в случае расположения активной области перпендикулярно направлению пьезополя. Особенно заметным этот эффект становится при увеличении длины волны излучения, что требует увеличения содержания индия в квантовой яме, в результате чего возрастают механические напряжения в активной области структуры [1]. Использование отличных от полярного [0001] направлений роста позволяет избежать встроенных пьезоэлектрических полей и их влияния на эффективность излучения [2,3].

Так как неполярные и полуполярные подложки нитрида галлия по-прежнему коммерчески недоступны, а качество неполярных и полуполярных слоев GaN, выращенных на инородных подложках, невысоко, возможным решением является использование неполярных и полуполярных граней мезаструктур, сформированных методами селективной эпитаксии [4]. В данной работе мы представляем исследование формирования  $p$ -типа GaN на различных кристаллографических плоскостях мезаполосков, а также создание светодиодной структуры на боковых гранях  $(11\bar{2}0)$  мезаполоска, ориентированного вдоль направления  $[1\bar{1}00]$ .

Исследуемые образцы были выращены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на модифицированной установке Epiqip. В качестве соединений-источников использовались триметилгаллий, триметилиндий, силан, бисциклопентадиенил магния и аммиак, в качестве несущего газа — азот или водород. Эпитаксиальный рост происходил на сапфировых подложках ориентации  $[0001]$  с предварительно осажденным слоем нитрида галлия, на которых стандартными фотолитографическими методами была сформирована диэлектрическая маска SiN с полосковыми окнами, ориентированными вдоль направления  $[1\bar{1}00]$ . Выращенные структуры исследовались растровой электронной микроскопией (РЭМ) и спектроскопией электролюминесценции. Формирование  $p$ - $n$ -перехода (а значит,  $p$ -типа проводимости) идентифицировалось по контрасту на РЭМ-изображениях во вторичных электронах.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние атмосферы реактора на формирование GaN  $p$ -типа на различных гранях легированных кремнием GaN-мезаполосков. Как было установлено ранее, изменяя соотношение аммиака и водорода, можно получать полоски с вертикальными  $(11\bar{2}0)$  или наклонными  $(11\bar{2}2)$  боковыми гранями. Таким образом, ориентация полосков вдоль направления  $[1\bar{1}00]$  позволяет изучать формирование  $p$ -GaN на трех различных плоскостях:  $(0001)$ ,  $(11\bar{2}0)$  и  $(11\bar{2}2)$ . Кроме того, как было установлено ранее, формирование  $p$ -GaN на боковых гранях полосков сильно зависит от типа несущего газа [5]. Всего в данной серии были выращены 4 структуры, условия роста  $p$ -типа GaN для этих структур, а также кристаллографическая ориентация боковых граней перечислены в таблице. На первом этапе эпитаксиального роста во всех структурах были выращены полоски  $n$ -типа проводимости, при этом в первых двух из

Условия эпитаксиального роста структур 1–4

Структура	Боковые грани полоска <i>n</i> -типа	Тип несущего газа во время роста GaN:Mg
1	(11 $\bar{2}2$ )	N <sub>2</sub>
2	(11 $\bar{2}2$ )	H <sub>2</sub>
3	(11 $\bar{2}0$ )	N <sub>2</sub>
4	(11 $\bar{2}0$ )	H <sub>2</sub>

них полоски имели трапециевидное сечение с боковыми гранями (11 $\bar{2}2$ ) и верхней гранью (0001), в третьей и четвертой структуре полоски огранились вертикальными боковыми гранями (11 $\bar{2}0$ ) и верхней гранью (0001). Далее слой *p*-GaN в структурах 1 и 3 растился с использованием азота в качестве несущего газа, а в структуре 2 и 4 в качестве несущего газа использовался водород. На рис. 1 приведены РЭМ-изображения исследуемых структур. Из них видно, что при росте в атмосфере азот-аммиака на всех исследуемых гранях (11 $\bar{2}0$ ), (11 $\bar{2}2$ ) и (0001) формируется GaN *p*-типа, однако на верхней грани (0001) при этом возникают дефекты морфологии. Если же в качестве несущего газа использовался водород, то *p*-тип удавалось сформировать только на гранях (0001) и (11 $\bar{2}0$ ). При этом изменением других параметров, таких как поток триметилгаллия, поток аммиака, температура подложкодержателя, не удалось подавить образование *v*-дефектов на верхней (0001) грани при росте в атмосфере азот-аммиака. Таким образом, в случае трапециевидного полоска *n*-типа не удастся подобрать режим роста, позволяющий сформировать *p*-тип проводимости одновременно на верхней и боковой гранях. Отличие от результатов работы [5] связано с существенно большей шириной маски между окнами. Поэтому далее для реализации светодиодной структуры были выбраны полоски с вертикальными боковыми стенками.

В следующем эксперименте был выращен прототип светодиодной структуры на свободных полосках GaN. При синтезе светодиодных структур на гранях мезаполосков существенную трудность представляет вывод *n*-контактов, так как вся свободная поверхность полоска оказывается покрыта активной областью и слоем *p*-GaN. Для решения этой проблемы был разработан специальный фотошаблон, в котором окна в маске располагались попарно, с расстоянием между окнами

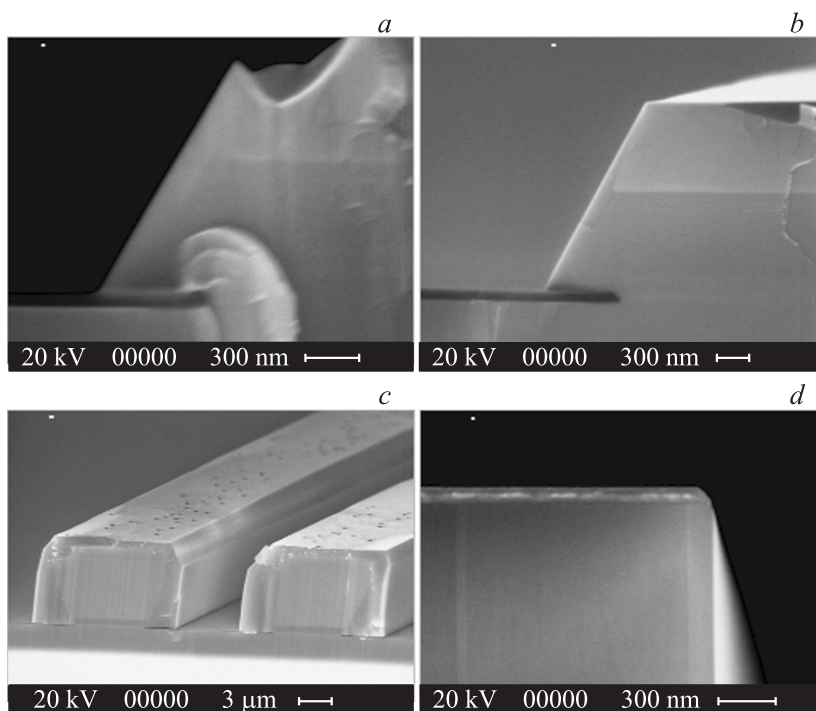
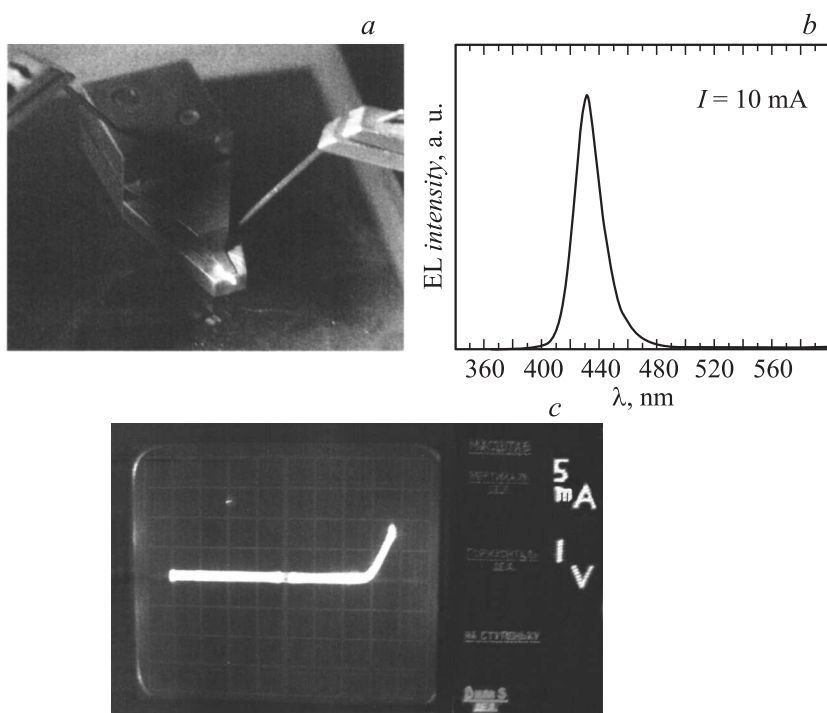


Рис. 1. *a–d*: РЭМ-изображения структур 1–4 соответственно.

в паре  $10\ \mu\text{m}$  и расстоянием между соседними парами окон  $50\ \mu\text{m}$ . При достаточной высоте начальных полосков *n*-GaN прямоугольного сечения между парными полосками формировалась щель субмикронной ширины. Диффузионная доставка материала их газовой фазы в эту щель была крайне мала, что препятствовало ее зарастанию. При последующем росте активной области и слоя GaN *p*-типа светодиодная структура формировалась только на внешней поверхности пары полосков, внутренние, обращенные к щели грани полосков при этом имели *n*-тип проводимости. После напыления под углом металлического контакта на внешнюю поверхность полоски механически отделялись от подложки. В результате получались „чипы“ светодиодов на свободных полосках *n*-GaN длиной до 2–4 мм. Электрический контакт с *n*-GaN



**Рис. 2.** *a* — фотография светодиодного „чипа“ на свободном полоске GaN при поданном напряжении (длина полоска  $\sim 3$  mm); *b* — спектр электролюминесценции; *c* — VAX структуры.

не напылялся. Использовался игольчатый зонд или металлический держатель (рис. 2). Несмотря на точечность контакта, благодаря высокой проводимости  $n$ -GaN и его большой толщине ток равномерно растекался по всей площади  $p$ - $n$ -перехода. Оптическая фотография „светящегося полоска“, его спектр электролюминесценции и вольт-амперная характеристика приведены на рис. 2.

Таким образом, проведенное исследование позволило определить условия роста, а также геометрию полосковой структуры, позволяющие синтезировать  $p$ - $n$ -переходы на всей свободной поверхности полоска. С использованием полученных результатов на гранях (11 $\bar{2}$ 0) и

(0001) была синтезирована светодиодная структура, измерены ее вольт-амперная характеристика и спектр электролюминесценции.

## Список литературы

- [1] *Stephan Lutgern, Dimitri Dini, Ines Pietzonka et al.* // Proc. SPIE. 2011. V. 7953. P. 79530G-1.
- [2] *Kwang-Choong Kim, Mathev C., Schmidt, Hitoshi Sato et al.* // Phys. Status Solidi. 2007. RRL 1(3). P. 125–127.
- [3] *Mitsuru Funato, Masaya Ueda, Yoichi Kawakami et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2006. V. 45 (26). L659–L662.
- [4] *Nishizuka K., Funato M., Kawakami Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85(15). P. 3122.
- [5] *Лундин В.В., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф.* // ФТП. 2008. Т. 42(2). С. 233.