

УДК 621.382.032.21

Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова

Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN

Работа посвящена исследованию возможности формирования микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях, нанесенных на GaN. В работе предложено использовать в качестве просветляющих покрытий на GaN пленки SiO₂, в которых формировалась микрорельефная поверхность с регулярной структурой с помощью электронно-лучевой литографии. С помощью электронно-лучевой литографии получен микрорельеф в виде nanoострий с расстоянием между ними 500 нм с диаметром основания 284 нм, что соответствует плотности nanoострий $1,4 \cdot 10^7$ шт./см².

Ключевые слова: просветляющие покрытия, микрорельеф, электронно-лучевая литография, nanoострия.

В настоящее время разработка высокоэффективных мощных светодиодных кристаллов, излучающих в синем диапазоне, является одной из основных задач в исследовании полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия и его твердых растворов.

Внешняя квантовая эффективность светодиодного кристалла определяется двумя основными величинами – внутренней эффективностью полупроводниковой гетероструктуры и эффективностью вывода света из светодиодного кристалла. Основным физическим эффектом, ограничивающим эффективность вывода света, является эффект полного внутреннего отражения на границе материала с высокой оптической плотностью (полупроводника) и материала с низкой оптической плотностью (сапфировой подложки и (или) воздуха). Для светодиодных кристаллов на основе InGaN-гетероструктур критический угол составляет $\sim 23^\circ$ (показатели преломления GaN и сапфира соответственно 2,5 и 1,6), и, следовательно, вывод света с поверхности кристалла не превышает 5%.

Несмотря на большое количество работ, направленных на повышение внешнего квантового выхода излучения, наиболее эффективными способами преодоления этой проблемы представляются создание рассеивающих свет поверхностей и использование просветляющих оптических покрытий [1–4]. С целью создания микрорельефных поверхностей используются различные методы травления GaN, позволяющие увеличить внешнюю квантовую эффективность светодиодного кристалла до 20%. Недостатком этих методов является невозможность получения глубокого микрорельефа малых размеров на всей площади кристалла в силу ограниченности толщины слоев *n*-GaN (3–4 мкм) и *p*-GaN (0,15–0,2 мкм).

Целью данной работы является исследование возможности формирования микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях, нанесенных на GaN, для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов.

Для решения поставленной задачи было осуществлено моделирование и экспериментальное исследование оптических характеристик просветляющих покрытий на различных подложках.

Для получения максимального эффекта просветления для однослойных покрытий должно выполняться следующее условие:

$$n_1^2 = n_0 \cdot n_s,$$

где n_s – показатель преломления материала кристалла; n_1 – показатель преломления пленки, нанесенной на поверхность кристалла; n_0 – показатель преломления окружающей среды. С другой стороны оптическая толщина просветляющего покрытия nd должна быть равна четверти длины волны, излучаемой кристаллом GaN, т.е. $n_1 d = \lambda/4$, где $\lambda = 455$ нм.

При моделировании оптических характеристик просветляющих покрытий в качестве материала подложек были выбраны стекло с показателем преломления равным 1,51, и ниобат лития (LiNbO₃) с показателем преломления, равным 2,4, близкими по оптическим характеристикам к GaN.

Результаты моделирования оптических характеристик просветляющих покрытий представлены на рис. 1 и 2.

Для подложек из стекла оптическая толщина пленок с низким показателем преломления SiO_2 ($n = 1,41$) и $\text{SiO}_2 + \text{C}$ ($n = 1,2$) равна $\lambda/4$, а для пленок с высоким показателем преломления Ta_2O_5 ($n = 1,76$), TiO_2 ($n = 1,97$) и SiO_x ($n = 1,9$) оптическая толщина равна $\lambda/2$.

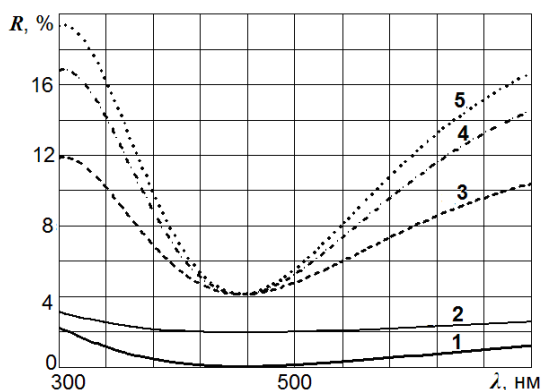


Рис. 1. Спектр отражения для подложки из стекла с различными просветляющими покрытиями:
1 – $\text{SiO}_2 + \text{C}$; 2 – SiO_2 ; 3 – Ta_2O_5 ; 4 – SiO_x ; 5 – TiO_2

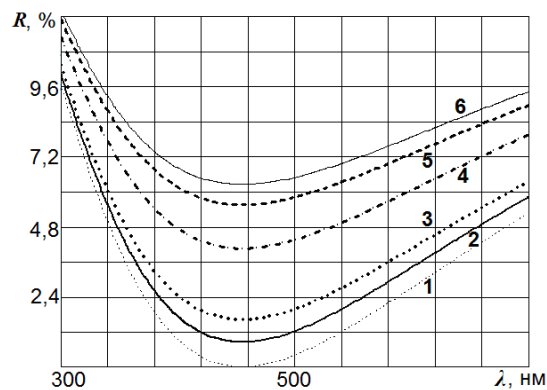


Рис. 2. Спектр отражения для подложки из LiNbO_3 с различными просветляющими покрытиями:
1 – $n = 1,55$; 2 – SiO_2 ; 3 – Ta_2O_5 ; 4 – SiO_x ;
5 – TiO_2 ; 6 – $\text{SiO}_2 + \text{C}$

Лучшим просветляющим покрытием для подложки из стекла является $\text{SiO}_2 + \text{C}$ ($R = 0\%$). Коэффициент отражения пленки SiO_2 равен 2%. Для всех пленок с высоким показателем преломления коэффициент отражения $R = 4,2\%$.

Для подложек из ниобата лития все пленки имели оптическую толщину $\lambda/4$. Согласно расчетам для подложки из ниобата лития нулевое отражение достигается при выборе слоев с показателями преломления $n_0 = 1$, $n_1 = 1,55$, $n_s = 2,4$. Получение пленок со строго заданным показателем преломления $n_1 = 1,55$ представляет собой определенные трудности, поэтому с точки зрения практической реализации лучшим просветляющим покрытием для подложки из ниобата лития является SiO_2 ($R = 0,8\%$).

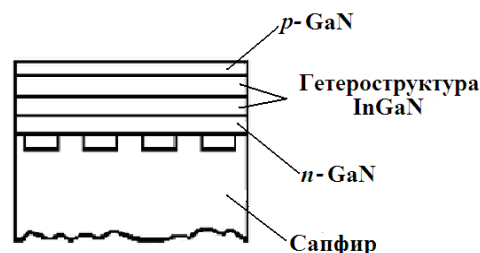
Для проведения экспериментов исследуемые пленки были получены магнетронным распылением соответствующих мишеней в различных средах: Si в среде Ar (SiO_x), Si, Ta, Ti в смеси $\text{Ar} + \text{O}_2$ (SiO_2 , Ta_2O_5 , TiO_2), сложная мишень из Si и углерода в среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ ($\text{SiO}_2 + \text{C}$). Толщину пленок и показатели преломления определяли с помощью лазерной эллипсометрии, спектры пропускания были получены с помощью электронно-оптического спектрометра USB2000.

Из полученных спектров пропускания следует, что максимальная эффективность просветления на подложках из стекла достигается для пленок SiO_2 (коэффициент пропускания 99%). Коэффициент пропускания $\text{SiO}_2 + \text{C}$ на подложке из стекла при $\lambda = 455$ нм равен 89%, что меньше, чем для SiO_2 . Это не соответствует проведенным расчетам и может быть обусловлено сложностью технологии получения этих пленок.

Экспериментально было показано, что из всех исследованных покрытий (SiO_x , SiO_2 , Ta_2O_5 , TiO_2 , $\text{SiO}_2 + \text{C}$) на подложках из ниобата лития наиболее значительный эффект просветления наблюдается для пленок SiO_2 .

В работе исследовались гетероструктуры InGaN на GaN для синего светодиода, выращенные на сапфировых подложках толщиной 150 мкм (рис. 3). На верхнюю поверхность p -GaN осаждалась пленка SiO_2 с оптической толщиной, соответствующей $5\lambda/4$, т.е. 400 нм для $\lambda = 455$ нм.

Рис. 3. Схематическое изображение гетероструктуры InGaN/GaN



На рис. 4 представлен спектр отражения гетероструктуры InGaN на GaN с нанесенным покрытием из SiO₂.

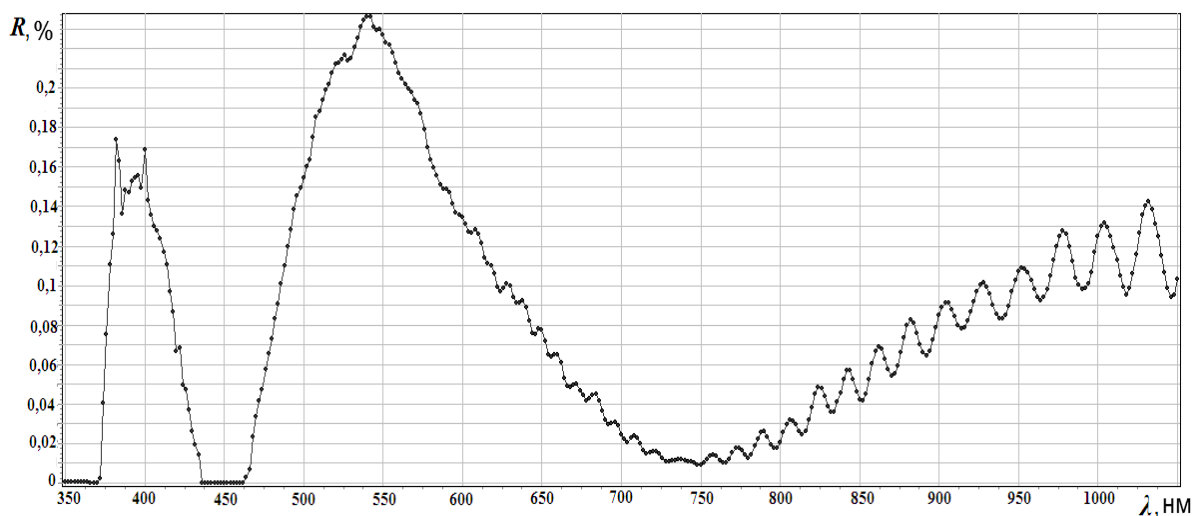


Рис. 4. Спектр отражения гетероструктуры InGaN/GaN с пленкой SiO₂

Как видно из рис. 4, минимальный коэффициент отражения ($R = 0,5\%$) получен для длины волны $\lambda = 455$ нм. На этой же длине волны установлено максимальное пропускание для данных гетероструктур.

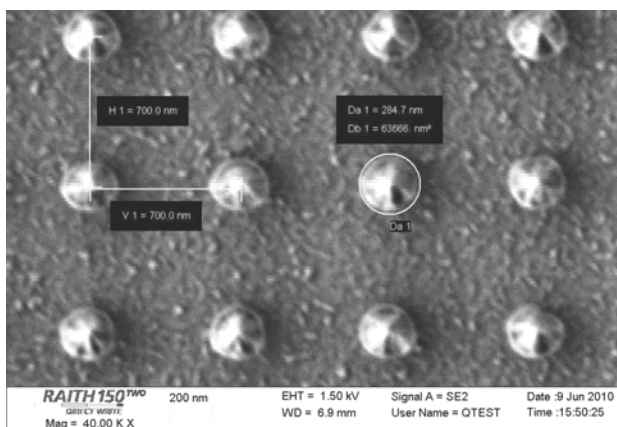


Рис. 5. Изображение поверхности с наноструктурами

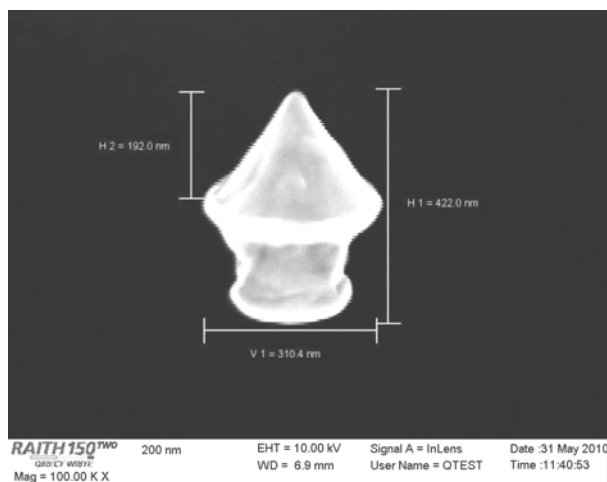


Рис. 6. Микрофотография одиночного наноструктуры

Интерес представляет использование просветляющих оптических покрытий, имеющих микрорельеф в виде упорядоченной структуры. Из литературы известно, что оптимальный геометрический масштаб микрорельефа для достижения эффективного рассеяния света должен быть сопоставим с длиной волны излучения в полупроводниковом материале [5].

В работе исследована возможность создание микрорельефной поверхности регулярной структуры в виде нанострий в просветляющих покрытиях из SiO₂. На рис. 5 представлено изображение поверхности с наностриями, выращенными с помощью электронно-лучевой литографии на установке Raith 150^{TWO}. Расстояние между наностриями 500 нм, диаметр основания острия 284 нм, что соответствует плотности нанострий $1,4 \cdot 10^7$ шт./см².

Микрофотография одиночного нанострия представлена на рис. 6. Высота нанострий определяется толщиной пленки SiO₂, которая должна быть кратной $\lambda/4$.

Разработанная технология позволяет создавать микрорельеф как на слоях *n*-Ga_{0.5}N, так и на тонких слоях *p*-Ga_{0.5}N без ухудшения параметров гетероструктуры. В этом случае повышение внешней квантовой эффективности происходит в результате уменьшения полного внутреннего отражения вследствие наличия микрорельефа в просветляющем оптическом покрытии из SiO₂.

Эксперименты показывают целесообразность включения процесса выращивания наноострий на просветляющих покрытиях SiO_2 в технологический маршрут изготовления синего светодиода с целью создания рассеивающей свет поверхности.

Результаты моделирования и экспериментальные исследования показали целесообразность использования в качестве просветляющих оптических покрытий на GaN слоя SiO_2 , в котором сформирована микрорельефная поверхность с помощью электронно-лучевой литографии. Формирование микрорельефа в слое SiO_2 позволит повысить внешнюю квантовую эффективность синих светодиодов при выводе света как через слой $n\text{-GaInN}$, так и через тонкий слой $p\text{-GaInN}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 73/10 от 15.07.2010 в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN с удаленной сапфировой подложкой / И.П. Смирнова, Л.К. Марков, Д.А. Закгейм и др. // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 11. – С. 1397–1401.
2. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening / T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma et al. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84, N 6. – P. 855–857.
3. High internal and external quantum efficiency InGaInN/GaN solar cells / E. Matioli, C. Neufeld, M. Iza et al. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – P. 021102/1–021102/3.
4. GaN-based light-emitting diode with textured indium tin oxide transparent layer coated with Al_2O_3 powder / T.K. Kim, S.H. Kim, S.S. Yang et al. // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94, N 16. – P. 161107/1–161107/3.
5. Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC / И.П. Смирнова, Л.К. Марков, Е.М. Аракчеева и др. // ФТП. – 2010. – Т. 44, № 5. – С. 684–687.

Данилина Тамара Ивановна

Канд. техн. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-960-971-27-43
Эл. почта: danti@ms.tusur.ru

Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-913-110-22-11
Эл. почта: tpe@ms.tusur.ru

Чистоедова Инна Анатольевна

Канд. техн. наук, доцент каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-913-810-44-25

Danilina T.I., Trojan P.E., Chistoedova I.A.

Fabrication of micro-relief surfaces in anti-reflection coatings in order to enhance the external quantum efficiency of dark blue light-emitting diodes based on GaN

This work is devoted to research of the opportunity of surfaces micro-relief formation in anti-reflection coatings deposited on GaN substrates. It is offered to use SiO_2 films as anti-reflection coatings in which the micro-relief surface with regular structure is formed by means of electron beam lithograph. Using electron beam lithograph the micro-relief in the form of nanoedges with distance between them of 500 nanometers and the basis diameter of 284 nanometers. Thus the nanoedges density of $1,4 \cdot 10^7 \text{ obj}/\text{sm}^2$ is received.

Keywords: clarifying coverings, micro-relief, electron beam lithograph, nanoedges.