

УДК 666.1.056

Ю.С. Гончарова

Просветляющие и отражающие наноразмерные покрытия для полупроводниковых источников света

Представлены результаты исследований наноразмерных просветляющих и отражающих покрытий для кристаллов GaN с целью повышения внешней квантовой эффективности источников белого света.

Ключевые слова: квантовая эффективность, гетероструктуры, просветляющие покрытия.

Излучающие полупроводниковые диоды синего света с центральной длиной волны излучения около 455–460 нм являются основным элементом современных энергосберегающих осветительных систем. Наиболее перспективной для освоения в производстве является конструкция кристалла на гетероструктурах GaN и его твердых растворах. Область излучения в этом кристалле сосредоточена в слое $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$, состоящего из множества квантовых ям. Внутренняя квантовая эффективность подобных структур очень высока и достигает 90%, в то же время внешняя эффективность существенно ниже и составляет в настоящее время 35%. Причин снижения внешней эффективности много, но Ж.И. Алферов выделяет из них основные – это температура активного слоя излучающего диода и эффективность вывода света из кристалла, а также эффективность преобразования с помощью люминофора синего цвета в белый. Эффективность вывода света из кристалла определяется как его геометрией, так и оптическими характеристиками материала, такими как показатель преломления и показатель поглощения. Так как показатель преломления GaN достаточно высок и имеет величину порядка 2,4, то на границе раздела с окружающей средой коэффициент внутреннего отражения может достигать 17%, что существенно снижает внешнюю квантовую эффективность излучающего диода. Кроме того, при использовании люминофора, преобразующего синий спектр излучения в белый, возникает проблема потерь мощности излучения за счет поглощения белого света, переизлученного из люминофора, обратно в объем кристалла.

Повышение внешней квантовой эффективности полупроводниковых источников излучения может быть достигнуто за счет нанесения на излучающую поверхность кристалла просветляющего покрытия, обладающего высоким пропусканием в узкой полосе спектра излучения кристалла 455–460 нм и высоким коэффициентом отражения в остальной области спектра. Для этих целей в данной работе использовались тонкие слои как диоксида ($n_1=1,46$), так и оксида кремния ($n_1=1,96$) полученные магнетронным или термическим распылением. Выбор этого типа покрытия объясняется его дешевизной и высокой степенью технологичности процесса получения. Известно, что для получения максимального эффекта просветления (в случае однослойного покрытия) должно выполняться следующее условие: $n_1^2 = n_s$, где n_s – показатель преломления материала кристалла. Одновременно должно выполняться условие, что толщина просветляющего покрытия d должна быть равна четверти длины волны излучаемой кристаллом, т.е. $d = \lambda/4n_1$. Из этого соотношения следует, что эффект просветления в большей степени проявляется лишь в узкой области спектра, и минимальная толщина просветляющего покрытия из SiO_2 на длине волны 455 нм должна иметь 78 нм, а из SiO – 60 нм.

Если свет падает на материал нормально, через один прозрачный слой, то амплитуда отраженного света характеризуется коэффициентом отражения

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\varphi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\varphi_1}} \quad \text{где, } i = \sqrt{-1} \quad \text{и } \varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda, \quad (1)$$

где n_1 – показатель преломления материала просветляющего покрытия, а λ – длина волны.

Теоретический расчет коэффициента отражения разрабатываемых покрытий производился по методу, описанному в [1]. При расчете коэффициента отражения необходим учет оптического поглощения кристалла из GaN ($k_s \approx 0,018$) в исследуемом диапазоне спектра излучения. При этом оптимальная толщина просветляющего покрытия равна

$$d = (\lambda / 4\pi n_1) \left[\operatorname{tg} \frac{2n_1 k_s}{n_1 - n_s^2 - k_s^2} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Минимальное отражение можно вычислить по формуле

$$R = \left[\frac{n_1^2 - n_0 n_s}{n_1^2 + n_0 n_s} \right]^2. \quad (3)$$

Из проведенных выше расчетов [1] следует, что коэффициент отражения на границе раздела кристалл–окружающая среда, с использованием однослойного покрытия возможно уменьшить с 17 до 4%. Более эффективно использование двухслойных покрытий, четвертьволновой толщины, например композиции SiO–SiO₂. В этом случае минимальное отражение вычисляется по формуле [1]

$$R = \left[\frac{n_1^2 n_s - n_0^2 n_0}{n_1^2 n_s + n_0^2 n_0} \right]^2. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета исследуемых в данной работе просветляющих покрытий, нанесенных на поверхность кристалла излучающего диода.

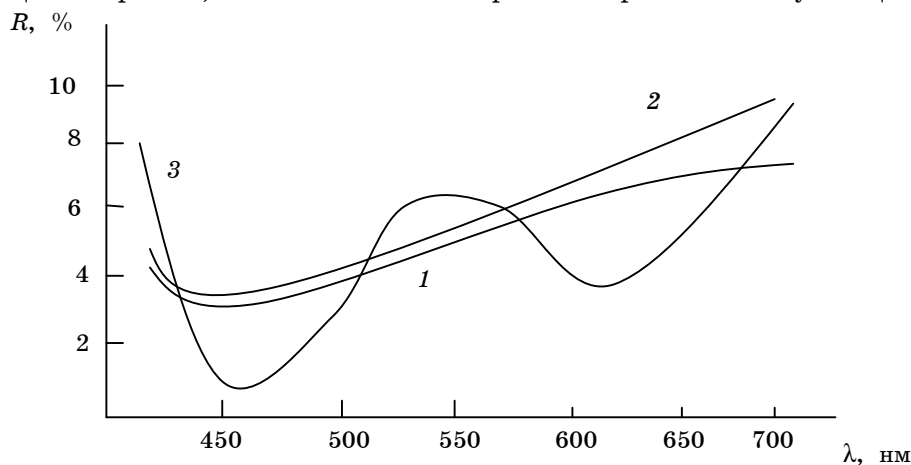


Рис. 1. Результаты расчета коэффициента отражения покрытий на кристалле из GaN ($n_s = 2,4$):
1 – SiO₂ ($d = 78$ нм); 2 – SiO ($d = 60$ нм); 3 – SiO–SiO₂ ($d_{\text{SiO}} = 60$ нм и $d_{\text{SiO}_2} = 78$ нм)

Экспериментальные исследования проводились на GaN (показатель преломления 2,49) и представлены на рис. 2.

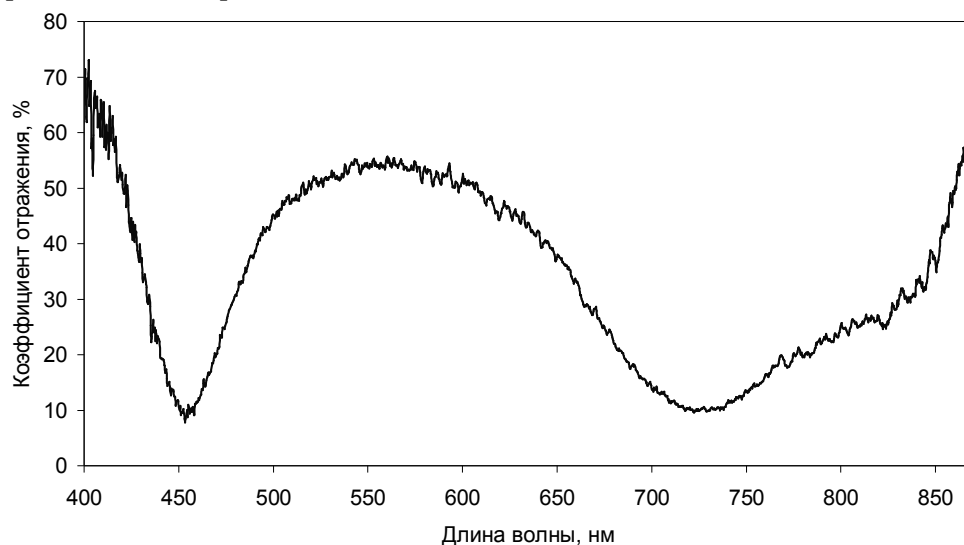


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения SiO–SiO₂ ($d_{\text{SiO}} = 60$ нм и $d_{\text{SiO}_2} = 78$ нм) на поверхности кристалла GaN от длины волны

Тонкие слои диоксида и оксида кремния наносились методом магнетронного распыления на постоянном токе в смеси аргона и кислорода из компактной мишени из монокристаллического кремния в лабораторных условиях кафедры физической электроники ТУСУРа. Показатель преломления полученных пленок регулировался путем управления соотношением давлений газовой смеси и изменялся от 1,46 до 1,65 и контролировался с помощью лазерной эллипсометрии на приборе ЛЭМ-3. Толщина и коэффициент отражения полученных просветляющих покрытий контролировались в поляризованном свете с помощью системы Avantes (Нидерланды).

Проведенные расчеты и эксперименты показывают, что просветляющие покрытия на основе диоксида и оксида кремния нанометровой толщины позволяют существенно увеличить внешнюю квантовую эффективность (с 15 до 25%) полупроводниковых излучателей голубого света. Данные покрытия могут также использоваться для повышения эффективности полупроводниковых солнечных элементов на кремнии и арсениде галлия [2].

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. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
2. Гончарова Ю.С. Получение и свойства тонких пленок оксида тантала / Ю.С. Гончарова, В.А. Литвинова // Наука и инновации агропромышленного комплекса: труды междунар. конф. – Кемерово, 2007. – С. 202–204.

Гончарова Юлия Сергеевна

Студентка факультета систем управления ТУСУРа

Тел.: 8-913-816-06-90

Эл. почта: Xel9I@mail.ru

Goncharova J.S.

Clarifying and reflecting nanodimension coverings for semiconductor light sources

The research results of nanodimension clarifying and reflecting coverings for crystals GaN, which are intended for increase of external quantum efficiency of white light sources, are presented.

Keywords: quantum efficiency, heterostructures, clarifying coverings.
