УДК 621.382.032.21

Т.И. Данилина, А.А. Попов

Моделирование коэффициента оптического вывода светодиода на основе GaN при наличии микрорельефа на световыводящей поверхности

Представлены результаты моделирования микрорельефа различной конфигурации на слое *n*-GaN в светодиодной гетероструктуре на основе GaN/InGaN. Определена оптимальная геометрия микроострие, позволяющая увеличить коэффициент оптического вывода в 2 раза по сравнению с плоской световыводящей поверхностью.

Ключевые слова: микрорельеф, микроострия, полусферы, коэффициент оптического вывода.

В настоящее время одной из основных задач в исследовании полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов является увеличение внешнего квантового выхода светодиода.

Внешний квантовый выход излучения светодиодного кристалла определяется двумя основными параметрами – внутренним квантовым выходом η_{int} и коэффициентом оптического вывода h_{extract} [1]:

$$\eta_{\text{ext}} = \eta_{\text{int}} \cdot h_{\text{extract}}.$$

Эффект полного внутреннего отражения на границе материала с высокой оптической плотностью (полупроводника) и материала с низкой оптической плотностью (сапфировой подложки и (или) воздуха) является ключевым фактором, ограничивающим эффективность вывода света. Для светодиодных кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур критический угол составляет $\sim 23°$ (показатели преломления GaN и сапфира соответственно 2,5 и 1,6). Таким образом, лишь малая часть фотонов, падающих на границу раздела под углом, лежащим в диапазоне $0 \div 23°$, способна покинуть кристалл [2].

Несмотря на то, что огромное количество работ направлено на исследование методов повышения внешнего квантового выхода [3, 4], наиболее эффективными способами решения этой проблемы являются формирование микрорельефа на световыводящей поверхности и использование просветляющих оптических покрытий.

Для создания микрорельефных поверхностей используются различные методы травления GaN. Наиболее подходящим методом для травления нитрида галлия является плазменный метод, поскольку он обеспечивает высокую скорость травления. Однако взаимодействие с плазмой приводит к созданию в материале поверхностных дефектов, таких как вакансии, атомы примесей и остатки от процесса травления. С другой стороны, использование жидкостного метода позволяет избежать формирования дефектов в процессе травления. Так как скорость травления GaN жидкостным методом невелика, то применяют дополнительное УФ-освещение для увеличения скорости [5].

Целью данной работы является исследование влияния микрорельефа различной конфигурации, сформированного на световыводящей поверхности светодиода, на коэффициент оптического вывода.

Программный продукт, разработанный на кафедре физической электроники ТУСУРа LED-SimuLight [6], позволяет моделировать распространение светового луча в гетероструктурах с разным показателем преломления слоёв, а также исследовать влияние микрорельефа на коэффициент оптического вывода светодиода.

В качестве исходной была выбрана структура флип-чип светодиода на гетероструктуре GaN/InGaN. Световыводящей поверхностью является слой *n*-GaN (рис. 1).

При проведении эксперимента нижняя и боковые части гетероструктуры были закрыты отражающим материалом. В таком случае фотоны, генерируемые в слое *i*-GaN (нелегированном), могут выйти из кристалла только через световыводящую поверхность *n*-GaN. Следовательно, сравнивая значения коэффициента оптического вывода для плоской структуры и при наличии микрорельефа, можно исследовать влияние поверхности на долю фотонов, покинувших кристалл. При моделировании данной структуры было получено значение коэффициента оптического вывода, равное

$h_{\text{extract}} = 0{,}23$. Следовательно, из кристалла вышло только 23% всех фотонов, рождённых в активной области структуры.

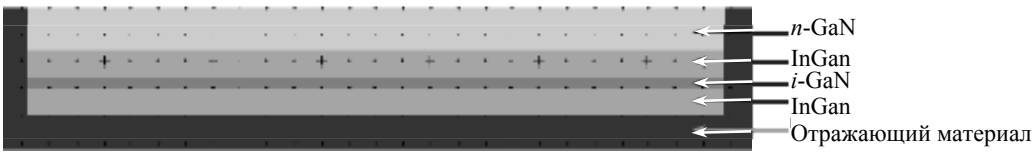
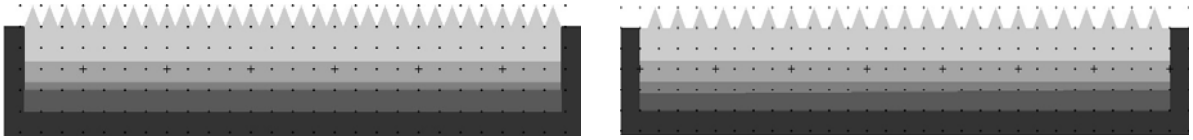


Рис. 1. Исследуемая структура GaN/InGaN

В процессе моделирования была исследована геометрия рельефа в виде микроострие и полусфер. При проведении эксперимента изменялось соотношение ширины и высоты микроострия (200×100; 200×200; 200×300 нм), а также расстояние между остриями (50; 100; 200 нм). На рис. 2 показаны варианты моделируемых структур.



а *б*

Рис. 2. Варианты моделируемых структур с различной конфигурацией микрорельефа (ширина и высота остриев 200 нм): *а* – сплошной микрорельеф в виде остриев; *б* – микрорельеф в виде остриев с расстоянием между ними 100 нм

При исследовании влияния расстояния между остриями на коэффициент оптического вывода ширина и высота основания составляли 200 нм.

Было установлено, что наибольшим коэффициентом оптического вывода обладают структуры со сплошным микрорельефом, где основание острия больше его высоты (200×100 нм соответственно). При увеличении расстояния между остриями коэффициент оптического вывода уменьшается, поскольку уменьшается число микроострие на единице площади поверхности. На рис. 3 представлены вариант структуры с коэффициентом оптического вывода $h_{\text{extract}} = 0{,}46$, а также траектория фотона в кристалле.

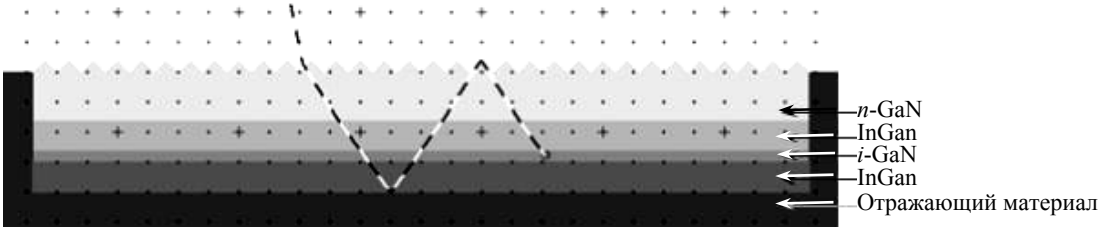


Рис. 3. Ход луча света в кристалле при наличии микрорельефа в виде микроострие

Из рис. 3 видно, что при отражении от микроострия фотон меняет свою траекторию и при последующем отражении в объёме также может попасть на поверхность под другим углом, что способствует выходу фотона из кристалла.

Другим вариантом микрорельефа на световыводящей поверхности светодиода для увеличения значения коэффициента оптического вывода является формирование полусфер из диоксида кремния. SiO_2 обладает показателем преломления, значение которого является промежуточным между воздухом $n = 1$ и нитридом галлия $n = 2{,}43$. Следовательно, полусферы из диоксида кремния должны рассеивать кванты света, возникающие в активной области, изменяя их траекторию и увеличивая вероятность выхода света из кристалла. В процессе моделирования микрорельефа в виде полусфер из SiO_2 исследовалось влияние диаметра полусфер на коэффициент оптического вывода. Диаметр полусфер изменялся от 200 до 400 нм.

Было установлено, что структуры с микрорельефом в виде полусфер из SiO_2 обладают меньшим коэффициентом оптического вывода по сравнению с со структурами с микрорельефом в виде микроострие. При увеличении диаметра полусфер коэффициент оптического вывода изменяется незначительно (0,5–1%). На рис. 4 представлены вариант структуры с диаметром полусфер 400 нм, обладающей коэффициентом оптического вывода $h_{\text{extract}} = 0{,}35$, а также траектория фотона в кристалле.

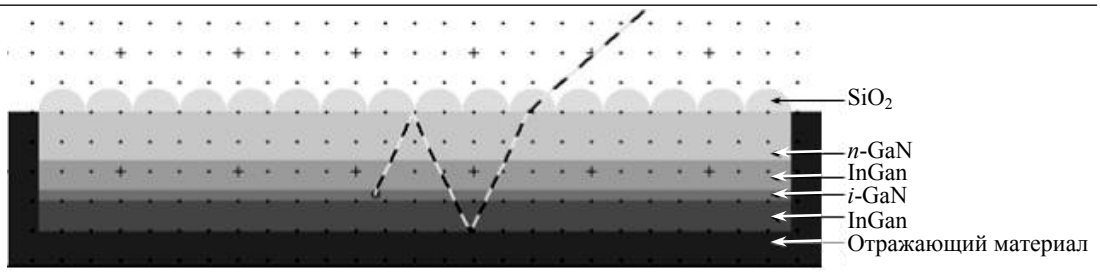


Рис. 4. Ход луча света в кристалле при наличии микрорельефа в виде полусфер

Из рис. 4 видно, что подобная конфигурация микрорельефа также увеличивает вероятность выхода фотона из кристалла, однако значение коэффициента оптического вывода для такой структуры меньше, чем для структуры с микрорельефом в виде остриев.

В работе показаны возможности моделирования гетероструктур и микрорельефных поверхностей в программном продукте LEDSimuLight. Исследовано влияние световыводящей поверхности с микрорельефом различной конфигурации на коэффициент оптического вывода светодиода, а также установлено, что наибольшим коэффициентом оптического вывода $(h_{\text{extract}} = 0{,}46)$ обладают структуры с микроостриями, у которых ширина основания больше их высоты.

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

2. Данилина Т.И. Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. № 2(24). – С. 64–67.

3. 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.

4. 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.

5. Efficient wet etching of GaN and p-GaN assisted with chopped UV source / J.M. Hwang, K.Y. Ho, Z.H. Hwang, W.H. Hung et al. // Superlattices and Microstructures. – 2004. – Vol. 45, P. 45–47.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616575. NEMO LED / Р.А. Мухамадеев, Т.И. Данилина. – Заявка №2015613948. Дата поступления 17 апреля 2015 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15 июня 2015 г.

Данилина Тамара Ивановна
Канд. техн. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-960-971-27-43
Эл. почта: danti123@mail.ru

Попов Артем Александрович
Студент ТУСУРа
Тел.: +7-913-880-78-12
Эл. почта: part.94@yandex.ru

Danilina T.I., Popov A.A.

Simulation of light extraction efficiency of GaN-based LED with micro-relief on a light output surface

This work is devoted to investigation of influence of micro-relief formed on a light output surface of LED produced on optical output coefficient. Simulation results of microrelief on n-GaN layer of GaN/InGaN-based heterostructures of light emitting diode are presented. Optimal geometry of microedges allowing to increase optical output coefficient twofold in comparison to flat light output surface was identified.
Keywords: micro-relief, microedges, optical output coefficient.