

Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC

© И.П. Смирнова[†], Л.К. Марков⁺, Е.М. Аракчеева⁺, А.С. Павлюченко^{+,*},
Д.А. Закгейм⁺, М.М. Кулагина⁺

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} ЗАО „Эпицентр“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 23 сентября 2009 г. Принята к печати 29 сентября 2009 г.)

Работа посвящена развитию метода создания рассеивающего свет микрорельефа на внешней стороне подложек SiC для уменьшения потерь при выводе света из светодиодного кристалла, связанных с эффектом полного внутреннего отражения в структурах AlGaIn/GaN. Предложено использовать тонкие слои фоторезиста в качестве случайных масок для процесса реактивного ионного травления подложки из карбида кремния. Оптимизацией режимов травления на поверхности подложки SiC получен микрорельеф с требуемыми параметрами, что привело к увеличению внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов более чем на 25%.

1. Введение

В настоящее время основная часть коммерческих светодиодов синего и ультрафиолетового диапазонов производится на подложках из сапфира или карбида кремния. Технология получения лейкосапфировых подложек хорошо отработана и экономически оправдана, поэтому большинство производителей светодиодов, особенно низкой и средней эффективности, используют ее для эпитаксиального роста. В то же время применение подложек SiC для гетероструктур AlGaIn/GaN имеет ряд преимуществ. Одно из них состоит в высокой по сравнению с сапфиром теплопроводности материала SiC, что обеспечивает эффективный отвод тепла из активной области кристалла при работе на высоких плотностях тока накачки. С другой стороны, для гетероструктур, выращенных на сапфировых подложках, основным эффектом, ограничивающим эффективность вывода света из светоизлучающего кристалла, является захват излучения в волновод, образуемый эпитаксиальными слоями нитрида галлия, расположенными между подложкой и верхним металлическим контактом, с последующим его поглощением в материале волновода. Применение подложек SiC с высоким коэффициентом преломления, близким к коэффициенту преломления GaN, позволяет избавиться от явления полного внутреннего отражения (ПВО) на границе подложка–гетероструктура. В результате излучение практически свободно распространяется в подложку, однако в этом случае особую актуальность приобретает проблема вывода света с внешней границы кристалла. Для кристаллов конструкции флип-чип, неоднократно рассматриваемой в работах [1,2], основная доля излучения выводится через подложку и в силу сказанного выше главные усилия по преодолению эффекта ПВО переносятся на границу подложка–окружающая среда.

Среди эффективных способов борьбы с поглощением излучения в кристаллах светодиодов AlGaInN можно выделить создание рассеивающих свет поверхностей [3], выращивание гетероструктур на профилированных сапфировых подложках [4–6], использование фотонного кристалла [7], создание микрорезонатора внутри активной области [8]. Ранее нами была показана возможность повышения квантового выхода светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN с помощью создания рассеивающего свет микрорельефа на поверхности слоя *n*-GaIn после удаления сапфировой подложки [9], а также путем создания рассеивающего контакта к слою *p*-GaIn [10]. В случае применения карбида кремния необходимый микрорельеф также может быть получен с помощью травления подложки. В связи с ограниченными возможностями химического травления материала SiC наиболее перспективным методом получения рассеивающих свет поверхностей можно считать реактивное ионное травление. При этом для максимального вывода света необходимо оптимизировать параметры получаемого рельефа, что может быть достигнуто путем подбора режимов реактивного ионного травления.

В настоящей работе исследовалась возможность создания рассеивающего свет микрорельефа на внешней поверхности подложек SiC методом реактивного ионного травления с целью увеличения внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов AlGaInN.

2. Эксперимент

В работе исследовались гетероструктуры AlGaInN/GaN с 5 квантовыми ямами InGaIn в активной области, выращенные на подложках SiC методом MOCVD (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). Для травления структур использовалась установка реактивного ионного травления в радиочастотной плаз-

[†] E-mail: irina@quantum.ioffe.ru

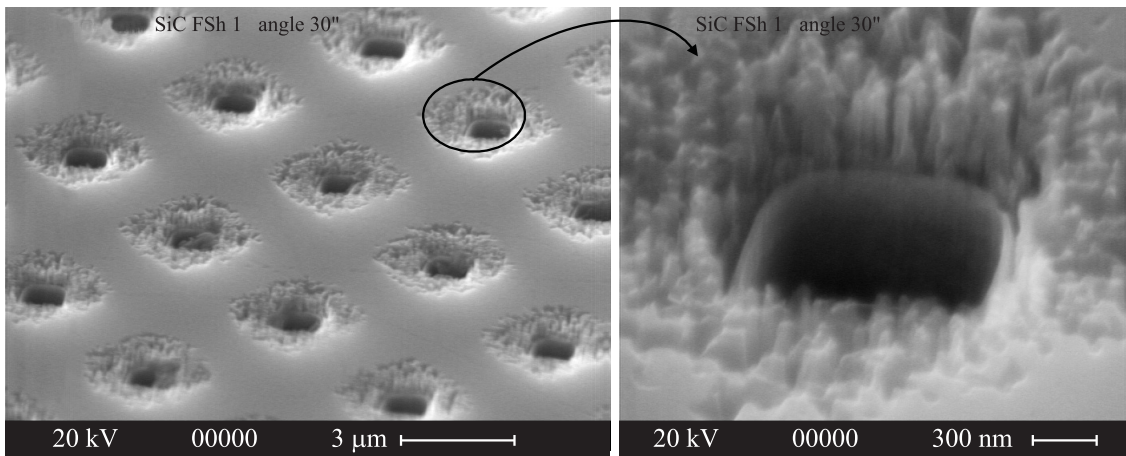


Рис. 1. Микрофотографии рельефа, возникающего при травлении подложек SiC. Слева — общий вид травленной поверхности, справа — фрагмент поверхности в увеличенном масштабе.

ме RDE-300 производства фирмы „Alcatel“ (Франция). Подбор и оптимизация режимов травления включают в себя выбор газовой смеси, ее давления в рабочей камере мощности разряда, а также времени процесса. Проводилось исследование влияния режимов реактивного ионного травления обратной стороны подложки SiC на характер микрорельефа поверхности.

Реактивное ионное травление SiC обычно проводится в хлорсодержащих и фторсодержащих газах, например, в Cl_2 , SF_6 и CCl_2F_2 . На начальном этапе использовались смеси на основе $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$ и SF_6 . Изучалось несколько режимов травления в смеси $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3 : \text{Ar}$ при мощности разряда 40 и 60 Вт, а также при различных соотношениях газовых потоков Cl_2 и BCl_3 . Было обнаружено, что в хлорсодержащей плазме благодаря небольшой летучести продуктов травления SiCl_4 травление карбида кремния происходит только за счет бомбардировки ионами поверхности образца, т.е. происходит так называемое физическое распыление материала, что приводит к низкой скорости травления SiC. Потому в дальнейших экспериментах была использована газовая смесь на основе SF_6 . В этом случае за счет химических реакций на поверхности образуется летучее соединение SiF_4 , что приводит к комбинации физического и химического механизмов травления материала и значительно большей скорости травления SiC. Скорость травления SiC возрастает как при увеличении мощности разряда, так и при увеличении процентного содержания газа SF_6 в смеси SF_6/Ar .

В работе создавался микрорельеф двух типов. Регулярный микрорельеф на полированной поверхности SiC был получен с помощью реактивного ионного травления через фоторезистивную маску при мощности разряда 40 Вт. Полученный рельеф представлял собой периодическую решетку, состоящую из отверстий с характерным размером ~ 1 мкм, периодом 4,5 мкм. Как видно из рис. 1, дно травления гладкое, и образующиеся стенки мезы практически вертикальные. При этом по краям ме-

зы, где слой резиста тоньше, и его недостаточно, чтобы полностью защитить материал во время травления, на поверхности SiC образовался характерный микрорельеф с параметрами, близкими к полученным нами в работе [9]. Подобный микрорельеф на поверхности *n*-GaN имел размеры, сравнимые с длиной волны излучения в кристалле, приводил к эффективному рассеянию и, следовательно, к увеличению вывода света из кристалла. Последующие эксперименты показали, что характер микрорельефа зависит от мощности разряда.

Поэтому для получения нерегулярного микрорельефа на обратной стороне подложек SiC было предложено использовать фоторезист в качестве естественной маски. Для этого на подложку вначале наносился сплошной слой фоторезиста толщиной ~ 1 мкм, который затем задубливался при температуре 150°C . Далее осуществлялось травление образцов в различных режимах. Варьировались мощность разряда в диапазоне 25–60 Вт, давление газового потока (1, 5 Па), а также время травления. Сравнение полученных результатов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа. Уменьшение мощности до 25 Вт, а также увеличение давления до 5 Па приводили к тому, что характерный размер рельефа становился значительно меньше длины волны излучения. При мощности 60 Вт происходила планаризация поверхности. Наилучший результат наблюдался при травлении образцов при мощности разряда 40 Вт, давлении 1 Па, времени травления 60 мин (рис. 2а). Для проверки необходимости применения фоторезиста в качестве случайной маски была проведена серия экспериментов по травлению образцов без слоя фоторезиста. На рис. 2 показаны микрорельефы, полученные при травлении в одном режиме с применением фоторезистивной маски и без нее.

Для оценки рассеивающей способности созданных микрорельефов образцы, показанные на рис. 2, исследовались на установке измерения пространственного распределения интенсивности излучения IS-LI производ-

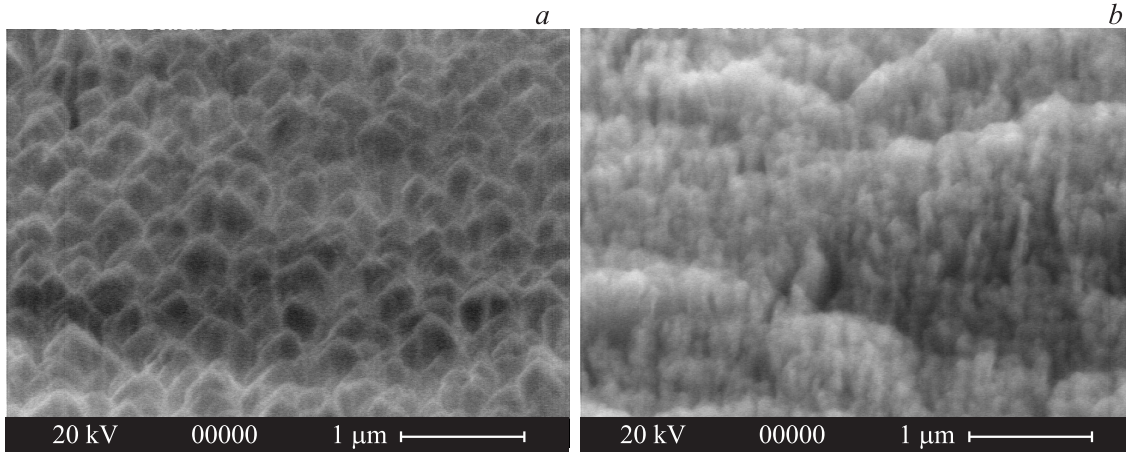


Рис. 2. Микрофотографии образцов, полученных при травлении в режиме 40 Вт, 1 Па, 60 мин с фоторезистной маской (а) и без нее (b).

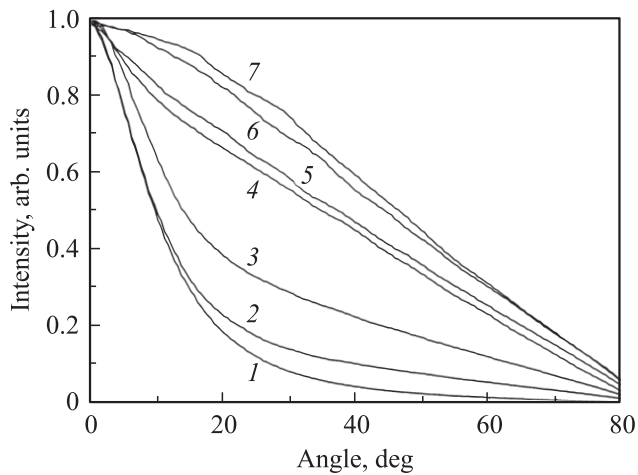


Рис. 3. Угловые диаграммы рассеяния света исходного образца (1) и образцов, протравленных без маски (2, 3 5) и через тонкий слой фоторезиста (4, 6, 7). Время травления, мин: 2 — 20, 3 — 40, 5 — 60; 4 — 20, 6 — 40, 7 — 60.

ства фирмы „Radiant“. Угловые диаграммы рассеяния света после прохождения излучения через подложку приведены на рис. 3, где для удобства изображены кривые, нормированные на свои максимальные значения. Как и ожидалось, наиболее эффективное рассеяние обеспечивает поверхность образцов, протравленных через слой тонкого фоторезиста. На рисунке также показаны угловые диаграммы рассеяния для разных времен травления в диапазоне от 20 до 60 мин. Как видно из рисунка, результат воздействия зависит от времени, постепенно приходя к насыщению. Увеличение времени травления до 80 мин не приводит к дальнейшему изменению рассеивающей способности образца.

Увеличить рассеивающую способность поверхности можно также при помощи ее механической обработки. Сравнение разных образцов — необработанного, шли-

фованного алмазными порошками с размером частиц 28 и 40 мкм и протравленного через тонкий резист в выбранном выше режиме в течение 60 мин — показало, что рассеяние света на последнем образце оказалось наиболее эффективным. Образец с регулярным рельефом на поверхности при облучении гелий-неоновым лазером в отражении показывал дифракционную картину с четко выраженными максимумами. Однако оптимальный геометрический масштаб микрорельефа для достижения эффективного рассеяния света должен быть сопоставим с длиной волны излучения в полупроводниковом материале, т.е. составлять $\sim (0.1-0.2)$ мкм, а оптическая фотолитография не позволяет получить такие размеры.

Для оценки влияния микрорельефа, полученного на обратной стороне подложки SiC, на величину внеш-

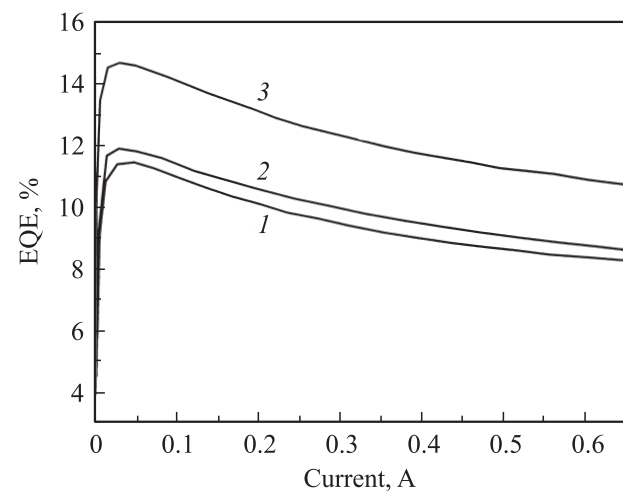


Рис. 4. Зависимость квантовой эффективности EQE кристалла от тока накачки: 1 — исходный кристалл, 2 — реактивное ионное травление обратной стороны подложки SiC через тонкий резист в плазме SF₆ в течение 20 мин, 3 — травление в том же режиме в течение 60 мин.

ней квантовой эффективности светодиодов, были изготовлены флип-чип светодиоды. Кристаллы изготавливались по технологии, представленной в работе [2], затем на обратную сторону образцов наносился тонкий фоторезист, задубленный при 150°C, и они были протравлены в несколько этапов длительностью 20 мин каждый в следующем режиме: мощность 40 Вт, давление 1 Па, поток SF₆ 20 сссм. На каждом этапе измерялась внешняя квантовая эффективность кристаллов. Как показали эксперименты, внешняя квантовая эффективность (EQE) светоизлучающего кристалла возрастает с увеличением времени травления. Максимальный ее прирост (более чем 25%) наблюдается при времени травления 60 мин (рис. 4), при этом увеличение времени травления до 80 мин не приводит к изменению квантовой эффективности прибора. Полученные результаты качественно согласуются с данными по измерению рассеивающей способности образцов в процессе травления (рис. 3), что дает основание использовать угловые диаграммы рассеяния создаваемых поверхностей в качестве экспресс-оценки эффективности приборов.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена методика создания микрорельефа на поверхности SiC с использованием масок из тонкого фоторезиста. Варьирование параметров режима реактивного ионного травления позволяет получать микрорельеф различного характера.

Разработанная методика получения рассеивающего свет микрорельефа на обратной стороне подложки SiC приводит к существенному увеличению внешней квантовой эффективности светодиодов (более чем на 25%).

Авторы выражают благодарность М.В. Кукушкину за сотрудничество и обсуждение полученных результатов, а также С.И. Трошкову и В.М. Бусову за исследование образцов методом сканирующей электронной микроскопии.

Список литературы

- [1] J.J. Wierer, D.A. Steigerwald, M.R. Krames, J.J. O'Shea, M.J. Ludowise, G. Christenson, Y.-C. Shen, C. Lowery, P.S. Martin, S. Subramanya, W. Gotz, N.F. Gardner, R.S. Kern, S.A. Stockman. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3379 (2001).
- [2] D.A. Zakheim, I.P. Smirnova, E.M. Arakcheeva, M.M. Kulagina, S.A. Gurevich, I.V. Rozhansky, V.W. Lundin, A.F. Tsatsulnikov, A.V. Sakharov, A.V. Fomin, A.L. Zakheim, E.D. Vasil'eva, G.V. Itkinson. *Phys. Status Solidi C*, **1**, 2401 (2004).
- [3] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E.L. Hu, S.P. Den Baars, S. Nakamura. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 855 (2004).
- [4] K. Tadatomo, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato, T. Taguchi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L583 (2001).
- [5] Y.P. Hsu, S.J. Chang, Y.K. Su, J.K. Sheu, C.T. Lee, T.C. Wen, L.W. Wu, C.H. Kuo, C.S. Chang, S.C. Shei. *J. Cryst. Growth*, **261**, 466 (2004).
- [6] Y.J. Lee, T.C. Hsu, H.C. Kuo, S.C. Wang, Y.L. Yang, S.N. Yen, Y.T. Chu, Y.J. Shen, M.H. Hsieh, M.J. Jou, B.J. Lee. *Mater. Sci. Engin. B*, **122**, 184 (2005).
- [7] J.J. Wierer, M.R. Krames, J.E. Epler, N.F. Gardner, M.G. Craford, J.R. Wendt, J.A. Simmons, M. Sigalas. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3885 (2004).
- [8] Y.C. Shen, J.J. Wierer, M.R. Krames, M.J. Ludowise, M.S. Misra, F. Ahmed, A.V. Kim, G.O. Mueller, J.C. Bhat, S.A. Stockman, P.S. Martin. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2221 (2003).
- [9] И.П. Смирнова, Л.К. Марков, Д.А. Закгейм, Е.М. Аракчева, М.Р. Рымалис. *ФТП*, **40**, 1397 (2006).
- [10] И.П. Смирнова, Д.А. Закгейм, М.М. Кулагина, Л.К. Марков. *Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы. Тез. докл. 4-й Всеросс. конф. (Санкт-Петербург, 2005)* с. 134.

Редактор Л.В. Шаронова

Increase of the flip-chip AlGaInN LEDs quantum efficiency by means of SiC substrate outer face reactive ion etching

I.P. Smirnova⁺, L.K. Markov⁺, E.M. Arakcheeva⁺, A.S. Pavluchenko⁺, D.A. Zakgeim⁺, M.M. Kulagina⁺

⁺ Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

* ZAO Epi-Center, 194156 St. Petersburg, Russia

Abstract The work is dedicated to development of the technique to produce a light scattering microrelief on the SiC substrate outer face with the aim to decrease light extraction losses caused by the total internal reflection in the AlGaInN LED chips. Thin photoresist layers are offered to be used as a random mask during the reactive ion etching of SiC substrate. A proper choice of the etching regimes resulted in the microrelief with the required parameters and, hence, a growth of the LED chips external quantum efficiency by more than 25%.