

06

InGaAlN гетероструктуры для светодиодов, выращенные на профилированных сапфировых подложках

© В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.А. Синицын, А.Е. Николаев,
Е.Ю. Лундина, А.В. Сахаров, С.И. Трошков, А.Ф. Цацульников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 марта 2008 г.

Одной из основных причин, лимитирующих предельно достижимую эффективность InGaAlN светодиодов, выращенных на стандартных сапфировых подложках, является низкая эффективность вывода света из прибора. Перспективным методом решения данной проблемы является использование профилированных сапфировых подложек. В работе описан метод формирования микрорельефа на поверхности сапфировых подложек и свойства выращенных на них эпитаксиальных слоев GaN и светодиодных гетероструктур InGaAlN.

PACS: 85.60.Jb, 81.65.Cf, 81.15.Gh, 81.05.Ea, 81.05.Je, 81.16.Dn, 68.55.ag, 68.55.aj

Появившиеся в настоящее время коммерчески доступные GaN и экспериментальные AlN подложки открыли новые возможности в технологии сложных, дорогостоящих III–N приборов, но, в силу высокой стоимости, никак не изменили ситуацию в массовом производстве. Подавляющее большинство производимых в настоящее время в мире эпитаксиальных структур для III–N светодиодов выращивается на сапфировых подложках, что связано в первую очередь с их низкой стоимостью. Однако присутствие обычной сапфировой подложки в структуре III–N светодиода существенно ограничивает максимально достижимую эффективность прибора. Если III–N эпитаксиальная гетероструктура имеет плоскую верхнюю поверхность и выращена на плоской сапфировой подложке, вся совокупность III–N слоев образует волновод с довольно высоким оптическим ограничением, в котором только относительно малая часть света попадает в конус вывода. Все современные III–N светодиоды, имеющие высокую эффективность, содержат в своей конструкции решения, позволяющие повысить эффек-

тивность вывода света: особенности дизайна светодиода кристалла, позволяющие вывести свет из торцов волновода [1]; профилирование верхней поверхности III–N слоев (*p*-GaN) или во время роста, или пост-ростовой обработкой поверхности структуры [2]; отделение III–N слоев от подложки (lift-off) с последующим матированием нижней поверхности кристалла [3]; использование SiC подложек с последующей огранкой кристалла. Более полный анализ этих методов приведен в [4]. В то же время, очень перспективным представляется использование сапфировых подложек с профилированной поверхностью, на которой производится эпитаксиальный рост приборной структуры. В такой структуре рельефный (с амплитудой 0.2–3 μm) интерфейс сапфир–GaN существенно увеличивает эффективность вывода света из III–N слоев в подложку. В зависимости от высоты и профиля элементов рельефа можно говорить о рассеянии, или об отражении света под углами, попадающими в конус вывода, или о микропризменном вводе света в объем сапфира. Близость показателей преломления сапфира и полимерного компаунда и отсутствие потерь в объеме сапфира способствует дальнейшему беспрепятственному выходу света из кристалла. К сожалению, профилированные подложки пока коммерчески недоступны, каждый производитель светодиодных эпитаксиальных структур формирует рельеф на поверхности плоских сапфировых подложек в рамках собственного технологического цикла.

Формирование рельефа на поверхности сапфировой подложки затруднено как его высокой химической стойкостью, так и очевидным требованием к возможности реализации эпитаксиального роста на профилированной поверхности. За последние годы предложено несколько способов формирования рельефа. Чаще всего используется сухое травление в индуктивно связанной плазме (ICP) через сформированную фотолитографией маску [5]. При этом ни режимы травления, ни материал маски не сообщаются. Можно только предполагать, что высокая химическая стойкость сапфира вызывает необходимость использования предельных для оборудования режимов травления, снижающих его ресурс, и специальных (вероятно, многослойных) масок. Использование дорогостоящего оборудования и сложных технологических приемов делает методы данной группы неоптимальными для массового производства.

Недавно было сообщено об использовании для профилирования сапфира травления в смеси кислот $H_2SO_4:H_3PO_4$ с использованием SiO_2 маски, сформированной травлением в стандартном буферном

травителе [6]. Исходный рисунок на поверхности нанесенного на сапфир слоя SiO_2 формировался или стандартной фотолитографией (для получения элементов микрорельефа микронных размеров), или отжигом напыленного слоя никеля, приводящего к формированию субмикронных островков, служивших маской при травлении SiO_2 . Эффективность светодиодов, выращенных на полученных данными методами профилированных подложках, в 1.5–2 раза выше по сравнению со случаем плоского сапфира. Использование жидкостного травления вместо сухого упрощает технологию. Данные два родственных метода, вероятно, самые простые и пригодные к использованию в массовом производстве. Однако, нами независимо разработана еще более простая технология формирования профилированного сапфира, пригодного для последующего эпитаксиального роста InGaN/GaN/AlGaN светодиодных структур, которой и посвящена настоящая статья.

Травление сапфировых подложек ориентации (0001) производилось в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4), которая, согласно [7], является полирующим травителем для грани (0001) сапфира. Маской при травлении являлись квазиупорядоченные полусферические капли золота размером 0.5–3 μm , сформированные контролируемым образом на поверхности сапфира при нагреве напыленного сплошного слоя золота выше температуры его плавления. Следует подчеркнуть уникальность золота как материала маски для данной технологии — золото является единственным элементарным металлом, сочетающим необходимую химическую стойкость с достаточно низкой температурой плавления. На рис. 1, *a* представлено изображение поверхности сапфира, полученное методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме вторичных электронов, после формирования оптимизированного для получения большой высоты рельефа маскирующего массива микрокапель золота и последующего травления. Элементы рельефа имеют вид треугольных пирамид, образованных плоскостями (10–12) сапфира (*R*-плоскости). Высота элементов рельефа и их плотность на поверхности могут существенно варьироваться в зависимости от параметров процесса. Поверхность сапфира между элементами рельефа плоская, что и необходимо для дальнейшего эпитаксиального роста GaN.

Эпитаксиальный рост слоев GaN и светодиодных гетероструктур InAlGaN на полученных профилированных подложках производился методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Режимы эпитаксиального роста GaN на вышеописанных профилированных подложках мало отличаются от стандартных, разработанных

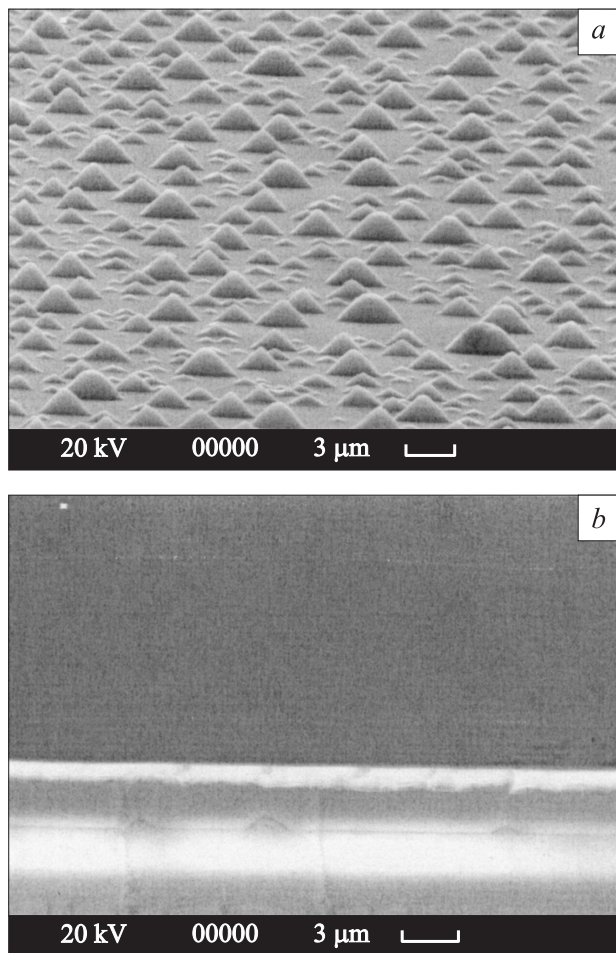


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности профилированной сапфировой подложки (а) и скола эпитаксиальной структуры GaN/профилированный сапфир (b).

для плоского сапфира ориентации (0001). На рис. 1, b представлена РЭМ фотография интерфейса GaN/профилированный сапфир. Видно, что интерфейс сплошной, без микрополостей, описанных в [6]. По

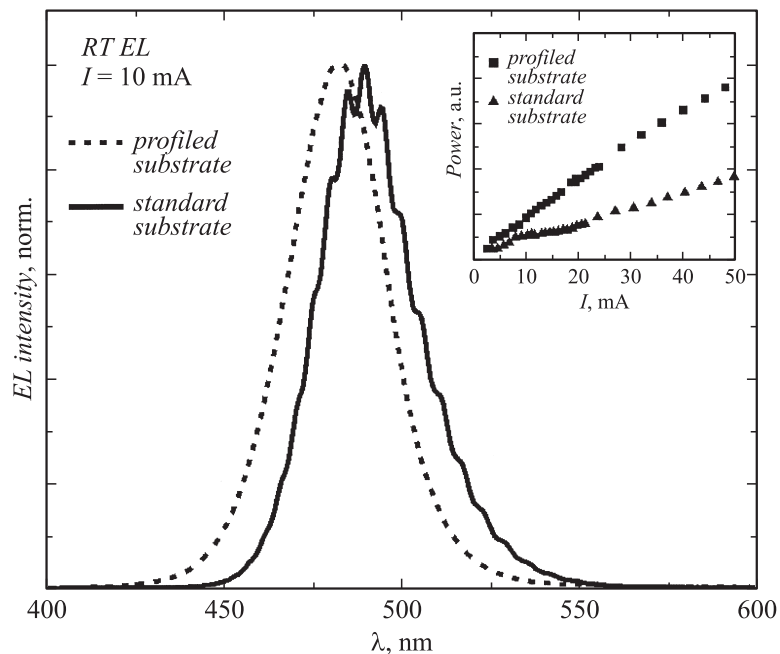


Рис. 2. Спектры электролюминесценции светодиодных структур, выращенных на стандартной и профилированной сапфировых подложках. На вставке для этих же структур показаны зависимости интенсивности излучения от тока.

всей видимости начальное зародышеобразование при эпитаксиальном росте происходит только на плоской поверхности сапфира, имеющей ориентацию (0001). Соответственно, и эпитаксиальный слой имеет ту же ориентацию. В случае формирования начальных зародышей также и на боковых гранях (элементов микрорельефа) микропирамид, имеющих ориентацию (10–12), в эпитаксиальном слое наблюдались бы дополнительные фазы, в которых ось (0001) была бы параллельна боковым граням микропирамид.

Выращенные на полученных профилированных подложках эпитаксиальные слои GaN имеют гладкую, по данным РЭМ и атомно-силовой микроскопии (АСМ), поверхность. Однако, АСМ исследования показали влияние элементов микрорельефа на распределение межблочных границ. Этот эффект будет исследоваться в дальнейшем.

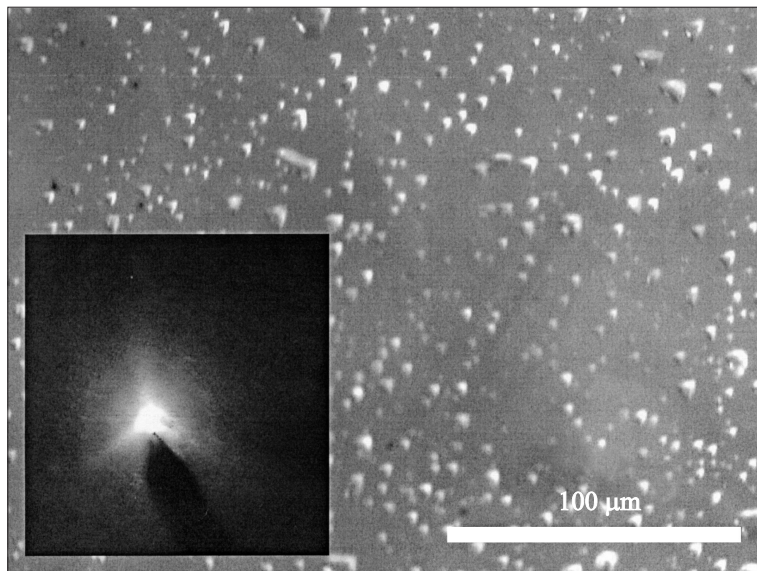


Рис. 3. Оптическая микрофотография электролюминесценции светодиодной структуры, выращенной на профилированной сапфировой подложке. Снимок сделан на оптическом микроскопе со стороны эпитаксиальных слоев, вблизи p -контакта, при протекании тока. На вставке приведена картина рассеяния света в светодиодной структуре, выращенной на профилированной подложке.

Предварительные исследования InAlGaN светодиодных гетероструктур, выращенных на полученных профилированных сапфировых подложках, проведенные с использованием индиевых контактов на неразделенных пластинах, продемонстрировали эффективное влияние профилирования на оптические свойства структур. При этом не было выявлено ухудшения вольт-амперных характеристик, которое могло бы наблюдаться в случае формирования дефектных областей над элементами микрорельефа, где развитие начальных стадий эпитаксиального роста существенно отличается от случая плоского сапфира.

Нарушение планарности сапфира привело к сильному подавлению модуляции спектров электролюминесценции (ЭЛ), связанной с интерференцией в вертикальном Фабри–Перро резонаторе, образованном контактом и интерфейсом GaN/сапфир, и увеличению интенсивно-

сти ЭЛ до 1.5–2 раз по сравнению со структурами, выращенными на стандартных плоских сапфировых подложках (рис. 2). Рассеяние и переотражение излучения светодиодной структуры на элементах микрорельефа, приводящее к увеличению эффективности вывода, хорошо заметно при наблюдении пластины как при малом, так и при большом увеличении. Яркие треугольные области на рис. 3 — элементы рельефа, на которых происходит переотражение света. При этом невооруженным глазом на поверхности видны три ярких луча (рис. 3, на вставке).

Таким образом, нами предложен и проверен новый метод создания профилированных сапфировых подложек, на которых были выращены InAlGaN светодиодные гетероструктуры. Предварительные исследования непроцессированных структур показали эффективность разработанной технологии. Ее дальнейшая оптимизация должна производиться с использованием полного приборного построения процессирования и сборки совместно с оптимизацией геометрии прибора.

Список литературы

- [1] Гуревич С.А., Закгейм Д.А., Смирнова И.П., Аракчеева Е.М., Танклевская Е.М. Тез. докл. 2-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, С. Петербург, 3–4 февраля 2003. С. 116.
- [2] Ja-Yeno Kim, Min-Ki Kwon, Ki-Sung Lee, Seong-Ju Park, Sang Hoon Kim, Ki-Dong Lee. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 9. P. 181109.
- [3] Kai-Ming Uang, Shui-Jinn Wang, Shiue-Lung Chen, Yu-Cheng Yang, Tron-Min Chen, Bor-Wen Liou // Jpn. J. Appl. Phys. 2006. V. 45. P. 3436.
- [4] Лундин В.В., Николаев А.Е., Заварин Е.Е., Сеницын М.А., Сахаров А.В., Усов С.О., Цацульников А.Ф. Тез. докл. 5-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, Москва, 31 января–2 февраля 2007. С. 14.
- [5] Jae-Chul Song, Seon-Ho Lee, In-Hwan Lee, Kyeong-Won Seol, Santhakumar Kannappan, Cheul-Ro Lee // J. Cryst. Growth. 2007. V. 308. P. 321.
- [6] Gao H., Yan F., Zhang Y., Li J., Zeng Y., Wang G. // Jour. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 014314.
- [7] Классен-Неклюдова М.В., Багдасарова Х.С. Рубин и сапфир. М.: Наука, 1974. С. 69.