

## ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЧИПОВ НА ЭКСТРАКЦИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХЯРКИХ СВЕТОДИОДОВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $\text{InGaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$

В.И. Осинский, Т.И. Гончаренко, Н.Н. Ляхова

Центр оптоэлектронных технологий, НИИ Микроприборов, (Киев, Украина)

Поступила в редакцию 25.02.2003

Рассмотрены проблемы экстракции излучения чипов сверхярких GaN светодиодов на сапфировых подложках при различных методах обработки поверхности. Разработаны процессы полировки сапфира по приемлемой для светодиодов методике, существенно не увеличивающей их стоимости. Определены оптимальные условия обработки поверхности сапфира в процессе создания из него элементов микрооптики, в частности, эллиптических и сферических линз в составе чипов светодиодов. Установленная нижняя граница шероховатости характеризуется среднеарифметическим отклонением профиля  $R_a = 20\text{Å}$  и максимальной высотой микронеровностей  $R_{\text{max}} = 220\text{Å}$

### ВВЕДЕНИЕ

Светодиоды на основе гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  последнее время находят все более широкое применение. Высокий внутренний квантовый выход излучения, близкий к 100 % в синей и зеленой областях спектра, обуславливает их использование в информационных экранах и дисплеях, для повышения плотности оптической записи и считывания информации, в различных сигнальных устройствах и медицинских приборах. На основе излучающих гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  в настоящее время решается проблема создания источника белого света, по эффективности и сроку службы превышающего в сотни раз обычные лампы накаливания. Наряду с тройными широко используются многокомпонентные твердые растворы, которые особенно эффективны для создания квантово-размерных структур, обеспечивающих высокий внутренний квантовый выход излучения [1]. Гетероструктуры  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  обычно выращиваются методами МОС-гидридной эпитаксии на подложках сапфира диаметром 2" или 3" толщиной 400 мкм, с ориентацией плоскости роста (0001).

Из пластин на основе сапфира методами микротехнологий вырезаются чипы размерами  $300 \times 300 \times 400$  мкм, к светодиодным слоям которых подводятся токовые контакты (рис. 1). Вывод излучения происходит через сапфировую подложку, прозрачную во всем диапазоне видимого света. Однако значительная разница

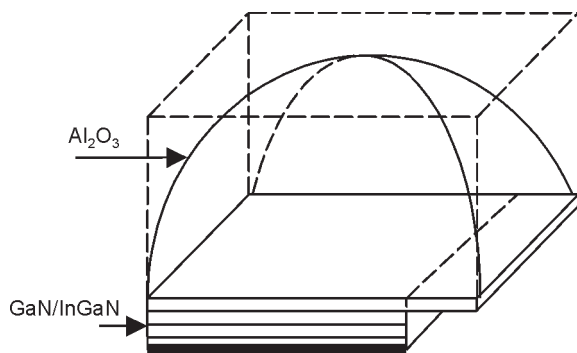


Рис. 1. Конструкция чипа  $\text{InGaN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  светодиода с микрولينзой

в показателях преломления сапфира ( $n_c = 1,78$ ) и воздуха приводит к значительным обратным отражениям на гранях параллелепипеда из сапфира. Известно, что в светодиодах на основе арсенида галлия и фосфида галлия эффективный вывод излучения осуществляется с помощью линзовых систем [2]. При этом выход из-

лучения можно увеличить в 5 – 8 раз по сравнению с его выводом через грани параллелепипеда. Создание элементов микрооптики на основе сапфира затрудняется его высокой твердостью.

В настоящей работе исследована экстракция излучения из чипов сверхярких светодиодов на основе сапфира/нитрида галлия при различных обработках поверхности и геометрии. Разработаны процессы полировки сапфира по приемлемой для светодиодов методике, существенно не увеличивающей стоимость светодиодов.

Цель настоящего исследования – определение оптимальных условий обработки поверхности сапфира в процессах создания из него элементов микрооптики, в частности, эллиптических и сферических линз в составе чипов светодиодов.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения актуальной задачи экстракции излучения из гетероструктур на основе сапфира необходимо разработать процессы формирования поверхности элементов микронных размеров путем механических, химических, плазменных, радиационных, температурных и других воздействий.

**Механическая шлифовка.** На этом этапе формируется заданная форма микрولينзы путем снятия выступов и острых углов. Для этого после разделения пластины на чипы микропараллелепипед подвергается абразивной обработке, являющейся в технологии промежуточной операцией, которая обеспечивает совершенство формы. Приклеенные или закрепленные вакуумным присасыванием чипы обрабатываются последовательно тремя алмазными шлифовальными инструментами, которые позволяют провести черновую, полустивую и чистовую обработку поверхности. В зону контакта шлифовального инструмента с чипами подается охлаждающая жидкость.

Последовательно производится шлифовка чипов связанным абразивом с принудительной и гравитационной подачей инструмента. Первое обеспечивает большую производительность, меньшую шероховатость и меньшую глубину нарушенного поверхностного слоя. Благодаря принудительной подаче, удается снимать с чипа слой любой толщины. При этом имеется возможность снимать заданный слой в несколько этапов, что повышает качество обрабатываемых чипов. Толщина съема определяется глубиной нарушенного поверхностного слоя. Суммарная толщина съема должна быть на несколько микрометров больше глубины

нарушенного слоя, а также учитывать отклонение формы чипов от заданной. Обычно этот слой снимается в два этапа черновой и чистовой обработкой, что позволяет получать лучшее качество поверхности и формы чипов и меньшую глубину нарушенного поверхностного слоя. Глубина нарушенного поверхностного слоя  $H$  чипов, обработанных шлифовкой связанным абразивом, зависит от зернистости шлифовального инструмента, его скорости и скорости съема.

Исследовалось также шлифование чипов свободным абразивом, которое обеспечивает более однородную структуру поверхности. Прощедшие обработку свободным абразивом чипы имеют ровную матовую поверхность, без следов направлений обработки. Шлифовка свободным абразивом является более производительной и обеспечивает лучшее качество поверхности. В первую очередь это обусловлено отсутствием необходимости в жестком креплении чипов, их приклеивания, которое вызывает возникновение напряжений в чипах.

Инструмент для шлифования свободным абразивом изготовлялся из стали. В качестве шлифующих материалов применялись водные абразивные суспензии с использованием микропорошков 14 – 63 мкм и тонких микропорошков зернистостью 5 – 10 мкм. Перед приготовлением суспензии абразивные порошки отмучивались, что улучшает их гранулометрический состав. Соотношение твердых и жидких компонентов в такой суспензии  $T : Ж = 1 : (1-5)$ . Для повышения вязкости в суспензию вводился этилен-гликоль или глицерин.

Механическая полировка обеспечивает получение зеркальной поверхности без нарушения геометрии. Для удаления нарушенного слоя и получения поверхности с  $R_a \leq 2,5 \cdot 10^{-2}$  мкм необходимо снять общий слой чипа, в 2 – 3 раза превышающий глубину нарушенного слоя на предыдущей операции шлифовки. Известно, что механическая полировка алмазной пастой, содержащей микропорошок субмикронной зернистости АСМ 0,5, оставляет нарушенный слой глубиной в несколько микрометров, возрастающий с уменьшением твердости материала и неровности высотой  $(5-10) \cdot 10^{-2}$  мкм. Поэтому финишную полировку выполняли химико-механическим методом, оставляющим нарушенный слой минимальной глубины и высоту неровностей менее 1 мкм.

Исследования показали, что для формирования микролинз из сапфировой подложки чипов необходимо применять последовательно полировку механическую, химико-механическую и химическую. Первая применяется на операции предварительной полировки. Для этого на полирующий инструмент наклеивается замша, войлок, фетр, фильтровальная ткань или батист. В качестве полирующих веществ используется алмазные пасты и суспензии.

Перед полировкой алмазная паста наносится на ткань полировочного инструмента, втирается в ткань полировального инструмента в течение 15 – 20 мин. В процессе полирования в рабочую зону непрерывно по каплям подается алмазная суспензия. На протяжении операции полирования скорость съема уменьшается в результате износа алмазных зерен и понижения их абразивной способности.

Механическая полировка при этом фактически представляет собой супертонкое шлифование. Размер

микроцарапин после механического полирования соответствует зернистости полирующего алмазного микропорошка. В результате такой обработки нарушенный слой полностью не снимается, но может быть сколь угодно малым. Поэтому финишная операция полировки проводится химико-механическим методом. Суть этого метода заключается в механическом удалении продуктов химического взаимодействия материала чипа с полирующим составом.

Химическая полировка чипов проводилась в условиях ламинарного потока травителя относительно поверхности чипа. Для этого чипы помещались на находящуюся в сосуде с травителем подставку, в центральную часть которой непрерывно подавался поток травителя. Под его воздействием удаляется нарушенный слой чипов. Это обеспечивает полировку по всей сферической или эллипсоидальной поверхности, способствует переносу веществ в растворе, ускоряет и стабилизирует процесс травления, улучшает качество обрабатываемой поверхности. Такая химико-динамическая полировка является последней стадией механической модификации поверхности.

После промывки чипов в деионизованной воде поверхность их стабилизировалась в фиксирующих растворах, в качестве которых применялись, например, сульфид натрия, этилендиаминтетрауксусная кислота или растворы ее солей. Затем чипы сушились в токе чистого сухого воздуха центрифугированием или нагревом инфракрасным излучением.

Сапфир является химически малоактивным окислом, поэтому его химическая и химико-механическая полировка затруднена. Для полирующего травления механически полированных сапфировых чипов были опробованы следующие высокотемпературные травители: ортофосфорная кислота  $H_3PO_4$  (400 – 500°C); расплав буры  $Na_2B_4O_7$  (1000°C); расплав фтористого свинца  $PbF_2$  (850°C); расплав бисульфата калия (450°C).

Кроме рассмотренных методов перспективно газовое полирующее травление сапфира. Для определения режимов обработок чипов исследованы процессы обработки пластин сапфира, которые применяются в качестве подложек для МОС – гидридной эпитаксии гетероструктур  $InGaN/GaN/Al_2O_3$ . Известно, что рабочую поверхность сапфира, на которую проводится эпитаксия нитридов, необходимо обрабатывать до получения очень малой шероховатости, меньше 3 Å, что существенно удорожает пластины. Обратную, нерабочую, поверхность можно обрабатывать с большей шероховатостью, которая определяется определенными условиями экстракции излучения из чипов.

В качестве полирующего травителя был исследован целый ряд сложных соединений типа  $SiHCl_3 + H_2$ , различные фтористые соединения серы, хлортрифлюорометан ( $CClF_3$ ) и др.

$CClF_3$  является наилучшим полирующим травителем для плоскостей сапфира (1012), (1120), (0001) и (1014), поскольку обеспечивает наилучшее качество поверхности с одновременным удалением загрязнений. Температуры травления лежат в диапазоне 1400 – 1500°C [4]. Максимальная скорость травления – 0,6 мкм/мин при 1500°C.

Однако наиболее распространенным из-за простоты и технологичности является процесс травления сапфира потоком водорода в диапазоне температур 1300 – 1400 и 1100–1200°C. Скорость травления сапфира в

потоке водорода является логарифмической функцией температуры (рис. 2).

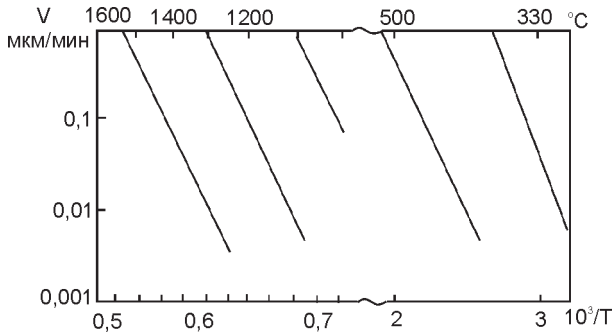


Рис. 2. Зависимость скорости травления сапфира V от температуры T в потоке чистого водорода.

Недостатками этого способа являются: селективность травления, высокая температура процесса, затрудняющая его проведение в эпитаксиальной установке, неприемлемость для обработки чипов. Для снижения температуры травления применяется ионизация газовой среды.

При реактивном ионно-плазменном травлении температуры процессов понижаются до 200 – 500° С, что приемлемо для травления чипов.

По сравнению с обычными методами жидкостной химической обработки метод плазмохимического травления обладает рядом преимуществ: ПХТ процесс сухой и менее опасный, т.к. используемые реактивные газы безвредные, невоспламеняемые и дешевые; ПХТ обеспечивает более высокую разрешающую способность и меньшую степень бокового подтравливания. При ПХТ появляется возможность совместить в одном вакуумном объеме ряд последовательно выполняемых операций травления, сократить технологический процесс обработки и уменьшить вероятность загрязнения или повреждения чипов или подложек.

В качестве травящих газов могут использоваться аргон, фторсодержащие соединения CF<sub>3</sub>, CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>, CHF<sub>3</sub> (при пороговых значениях бомбардирующих ионов 10 – 20 эВ) (рис.3), углеродсодержащие соединения СО, СО<sub>2</sub> (при давлении 60 – 80 Па и при температурах выше 2000 К скорость травления Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) составляет 10<sup>-5</sup> – 4·10<sup>-4</sup> см/с), а также ВСl<sub>3</sub>, ВВr<sub>3</sub> (скорость травления 1,5 нм/с при 40°С и ВЧ мощности 0,31 Вт/см<sup>2</sup>) [4].

**Ионный и радиационный отжиг.** Высокого кристаллического совершенства поверхности подложек и чипов можно добиться не только химическим травлением нарушенного слоя, но и с помощью ионного или радиационного отжига.

Основным фактором, улучшающим структуру поверхности при отжиге, является процесс рекристаллизации нарушенного слоя, активно протекающий при ионном и радиационном отжиге. Рекристаллизация нарушенного слоя сопровождается снятием внутренних напряжений вокруг дефектов, внесенных механической обработкой. Этот эффект отчетливо фиксируется методом рентгеновской топографии, весьма чувствительным к напряженному состоянию поверхности образца. В местах с локальными напряжениями, например, вблизи царапин, до отжига наблюдается до-

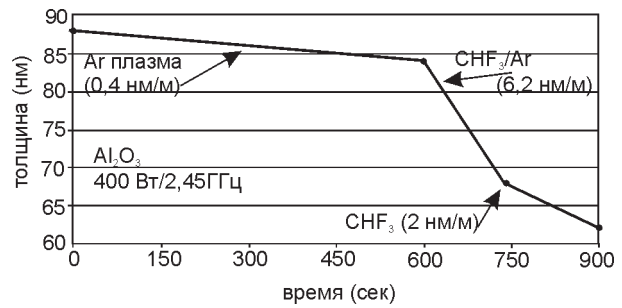


Рис. 3. Зависимость толщины травленного слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, измеренной эллипсометрическим методом, от времени воздействия ионов Ar, CHF<sub>3</sub> и их смесей [4].

полнительный контраст, исчезающий после отжига, хотя сами царапины хорошо видны в оптическом микроскопе на отожженной поверхности образца.

На стадиях химической (химико-механической) обработки, а также на операциях очистки чипов контролируют чистоту технологических сред (различные органические растворители, составы для травления и полировки, воду и др.).

Качественный контроль загрязнений, рисок, пятен, подтеков и сколов на поверхности подложек и чипов осуществлялся визуально, с использованием оптических микроскопов, лазерными интерферометрами, с помощью профилометра.

Для сравнения было снято распределение шероховатости на участке длиной 400 мкм для поверхности, обработанной нами (рис. 4), и покупной (импортной) (рис. 5) пластин сапфира. На рис. 6 показана профилограмма шероховатости и микроструктура (рис. 7) нерабочей поверхности. Видно, что механическая полировка заметно снижает шероховатость и улучшает микрооднородность поверхности (рис. 8). Однако глубина нарушенного слоя все же остается значительной (рис. 4, 6), а поэтому финишную операцию полировки необходимо проводить химико-механическим или плазмохимическим методами.

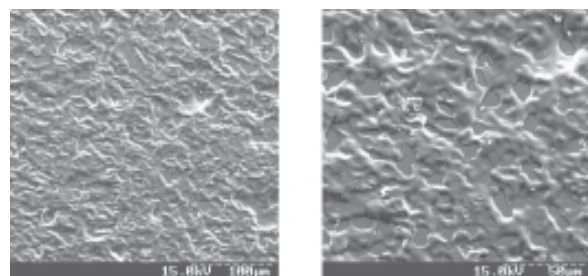


Рис. 7. Нерабочая сторона подложки сапфира после механической полировки

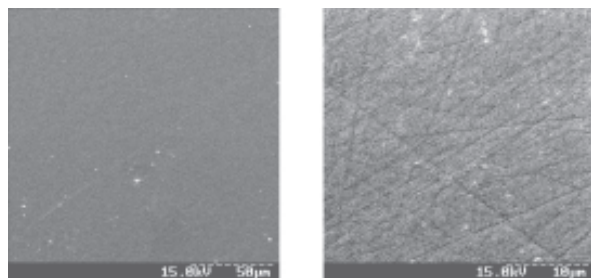


Рис. 8. Рабочая сторона подложки сапфира после механической полировки.

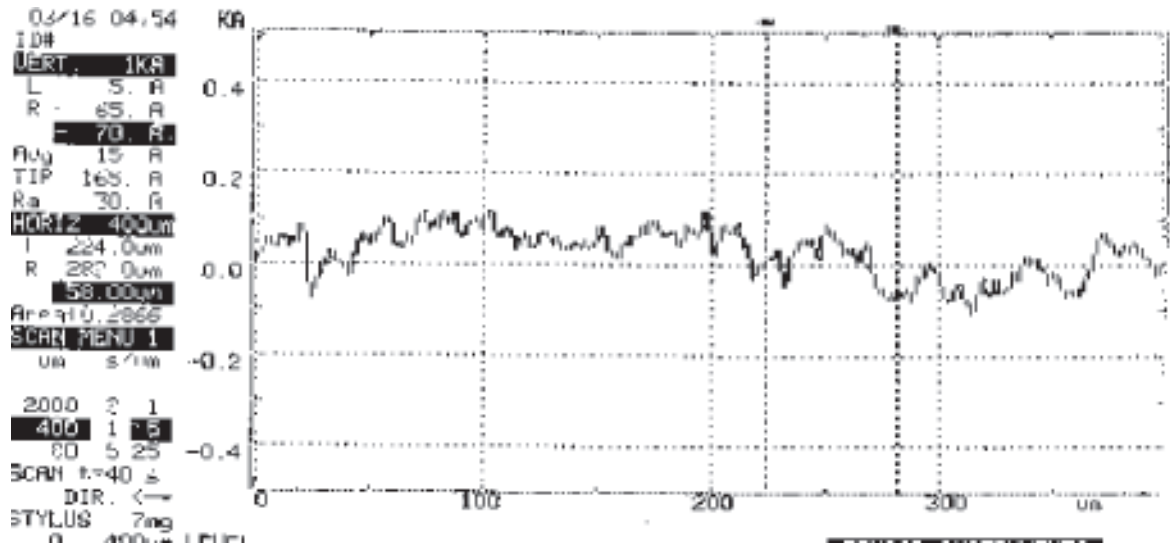


Рис.4. Шероховатость оптически отполированной поверхности сапфира, среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a = 20 \text{ \AA}$ , наибольшая высота микронеровностей  $R_{max} = 220 \text{ \AA}$ .

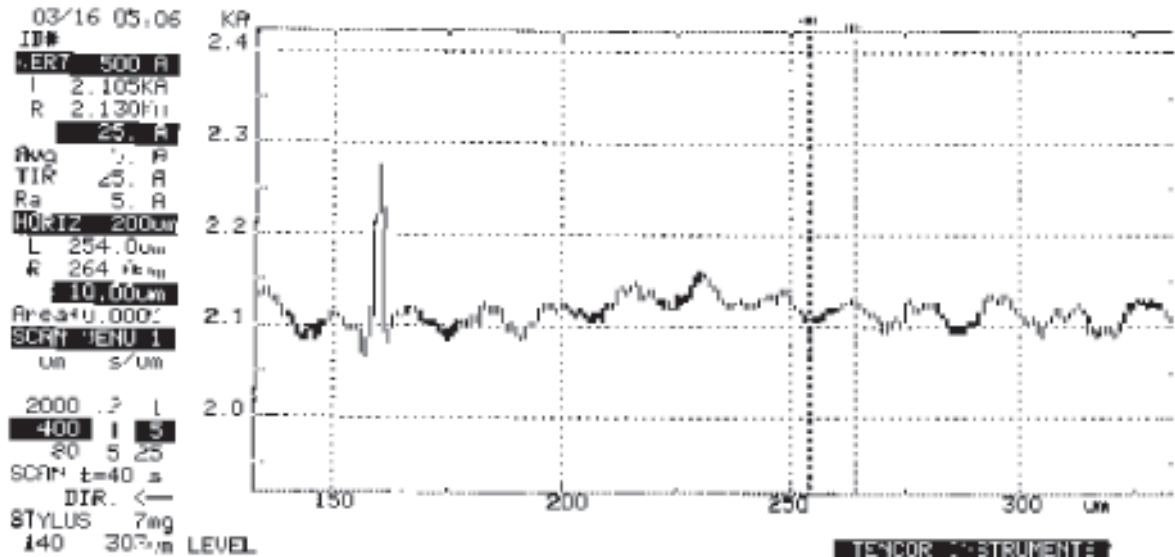


Рис.5. Шероховатость рабочей стороны подложки сапфира (зарубежного производства),  $R_{max} = 225 \text{ \AA}$ ,  $R_a = 17 \text{ \AA}$

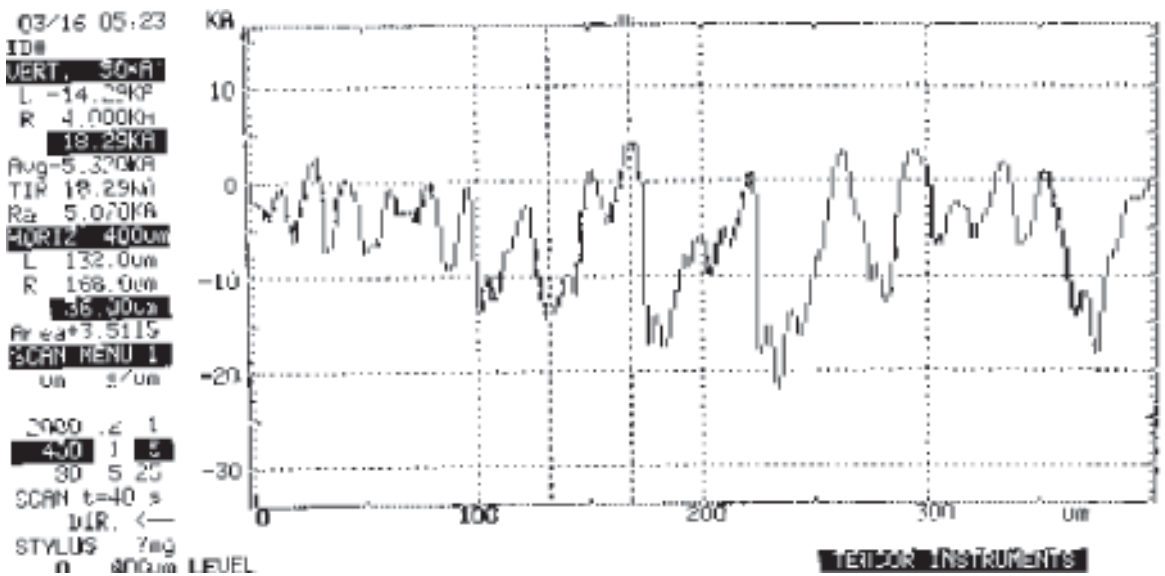


Рис. 6. Шероховатость нерабочей стороны подложки сапфира  $R_{max} = 22,8 \text{ к\AA}$ ,  $R_a = 5 \text{ к\AA}$ .

Полученное максимальное значение высоты микронеровностей  $R_{max} = 220 \text{ \AA}$  существенно меньше длины волны излучения светодиодов, составляющей 430 – 500 нм.

Оптимальные условия получения элементов микрооптики с экономической оценкой приведены в табл.1.

Таблица 1

Оптимальные условия получения элементов микрооптики с экономической оценкой.

Вид технологического процесса	Преимущества и недостатки метода	Целесообразность использования метода
Механическая полировка	Высокая производительность является предварительной операцией полирования, а поэтому оставляет нарушенный слой до нескольких мкм	Необходимо последующее использование методов жидкостного либо ПХ травления
Химико-механическая полировка	Высокое качество поверхности, малая шероховатость, возможность формирования микролинз	Имеются преимущества перед механической полировкой, может быть окончательной стадией обработки.
Плазмохимическое травление	ПХТ процесс сухой и менее опасный, обеспечивает более высокое качество, уменьшается кол-во побочных продуктов по сравнению с методами жидкостного химического травления	Широкое применение в технологии обработки подложек. Ограниченное применение для микрооптики чипов.

На рис. 9 показан ход зависимости интенсивности излучения  $\Phi = f(1/R)$  для InGaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> гетеросветодиода со сферической линзой от шероховатости R (кривая 1) и ход токовой зависимости интенсивности излучения  $\Phi = f(I)$  параллелепипедообразных чипов (кривая 2) и чипов со сферической микролинзой (кривая 3). Анализ зависимостей показывает, что интенсивность излучения практически не увеличивается при шероховатости менее 1000 Å.

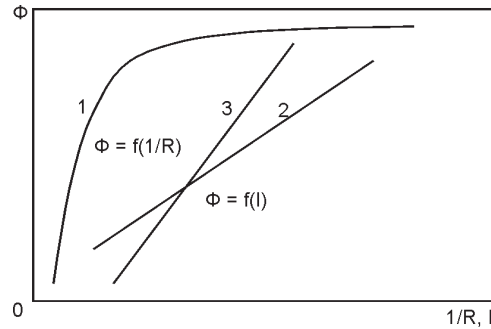


Рис. 9. Ход зависимости интенсивности излучения  $\Phi = f(1/R)$ , где R – высота микронеровностей светодиода с микролинзой в виде сферы (кривая 1), и  $\Phi = f(I)$ , где I – прямой ток через светодиод с прямоугольной формой чипа (2) и (3) – со сферической микролинзой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование процессов формирования элементов микрооптики на чипах гетероструктур светодиодов GaInN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показывает, что для максимальной экстракции излучения экономически обоснованным является создание оптически совершенной поверхности микролинз с шероховатостью, характеризуемой среднеарифметическим отклонением профиля  $R_a = 20 \text{ \AA}$  и максимальной высотой микронеровностей  $R_{max} = 220 \text{ \AA}$ .

После достижения этих параметров обработки поверхности дальнейшее дорогостоящее уменьшение шероховатости существенно не увеличивает эффективности вывода излучения.

Принципиальная новизна предложенного нами подхода состоит в том, что он базируется на реальных примерах без трудоемких технологий, применяемых обычно при подготовке поверхности сапфира для эпитаксиального выращивания гетероструктур. Дальнейшее исследование целесообразно продолжить в направлении оптимизации показателя преломления оптической среды, в которую выводится излучение с поверхности сапфира.

### ЛИТЕРАТУРА

- Осинский В.И., Привалов В.И., Тихоненко О.Я. Оптоэлектронные структуры на многокомпонентных полупроводниках. – Минск: Наука и техника, 1981. – 208 с.
- Берг А., Дин П. Светодиоды. – М.: Мир, 1979. – С. 550 – 563.
- Нашельский А. Я. Технология полупроводниковых материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 334 с.
- Manasevit H. M. Gas – phase etching of sapphire// J. Electrochem. Soc.– 1974. – Vol. 121, № 2. – P.293.
- Вербичский В.Г. Ионные нанотехнологии в электронике. – К.: “МП Леся”, 2002. – 376 с.

### ВПЛИВ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ЧІПІВ НА ЕКСТРАКЦІЮ ВИПРОМІНЮВАННЯ НАДЯСКРАВІХ СВІТЛОДІОДІВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InGaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

V.I. Osinsky, T.I. Goncharenko, N.N. Lyahova

Розглянуті проблеми екстракції світла, випромінюваного чіпами надяскравих GaN світлодіодів на сапфіровій підкладинці в залежності від технологій обробки поверхні. Розроблено технологію процесів полірування сапфіру, яка узгоджується з технологією виготовлення світлодіодів. Визначені оптимальні умови обробки поверхні сапфіру в процесі створення з нього елементів мікрооптики, а саме еліптичних і сферичних лінз у складі чіпів світлодіодів. Встановлено нижню границю шершавості, що характеризується середньоарифметичним відхиленням профелю  $R_a = 20 \text{ \AA}$  та максимальною висотою микронеровностей  $R_{max} = 220 \text{ \AA}$ .

### INFLUENCING OF SURFACING CHIPS ON EXTRACTION OF RADIATION OF SUPERBRIGHT LIGHT EMITTING DIODES ON HETEROSTRUCTURES InGaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

V.I. Osinsky, T.I. Goncharenko, N.N. Lyahova

The light extraction problems for high brightness GaN LED on a sapphire substrate were discussed under consideration of different surface treatments. Inexpensive sapphire polishing technique compatible with LED production technology has been developed with optimization of sapphire surface treatment during the formation of sapphire micro optic lens of elliptic and spherical geometry. Permissible value of surface roughness has been determined as standard deviation of section,  $R_a = 20 \text{ \AA}$ , and maximum height of surface roughness,  $R_{max} = 220 \text{ \AA}$ .