

Отделение слабо легированных пленок *n*-GaN микронной толщины от подложек, основанное на эффекте поглощения ИК излучения в сапфире

© В.В. Вороненков¹, М.В. Вирко², В.С. Коготков², А.А. Леонидов², А.В. Пинчук²,
А.С. Зубрилов¹, Р.И. Горбунов¹, Ф.Е. Латышев¹, Н.И. Бочкарева¹, Ю.С. Леликов¹,
Д.В. Тархин¹, А.Н. Смирнов¹, В.Ю. Давыдов¹, И.А. Шеремет³, Ю.Г. Шретер^{1,¶}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ Финансовый университет при правительстве Российской Федерации,
125993 Москва, Россия

¶ E-mail: y.shreter@mail.ioffe.ru

(Получена 11 мая 2016 г. Принята к печати 18 мая 2016 г.)

Сильное поглощение излучения CO₂-лазера в сапфире использовано для отделения пленок GaN от темплейтов GaN на сапфире. Лазерное сканирование сапфировой подложки приводило к термической диссоциации GaN на интерфейсе GaN/сапфир и отделению пленки GaN от сапфира. Пороговая плотность энергии лазерного излучения, при которой начиналась диссоциация *n*-GaN, составила 1.6 ± 0.5 Дж/см². Изучено распределение механических напряжений и поверхностная морфология пленок GaN и сапфировых подложек до и после лазерного отделения методами рамановской спектроскопии, атомно-силовой микроскопии и растровой электронной микроскопии. Образец вертикального диода Шоттки с величиной плотности прямого тока 100 А/см² при напряжении 2 В и максимальным обратным напряжением 150 В изготовлен на основе отделенной пленки *n*-GaN толщиной 9 мкм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.01.44006.8325

1. Введение

Нитрид галлия является одним из наиболее перспективных материалов силовой электроники благодаря сочетанию таких свойств, как высокая подвижность электронов и большая критическая напряженность электрического поля, большая скорость насыщения и высокая теплопроводность. Эти свойства GaN могут быть реализованы в полной мере в вертикальных структурах, выращиваемых на объемных кристаллах GaN с низкой плотностью дислокаций и дефектов.

Решением проблем, связанных с производством GaN подложек, может стать срезание (slicing) тонкой пленки GaN с объемного кристалла GaN при малой ширине реза, параллельного ростовой поверхности пленки. Это позволит существенно удешевить стоимость конечного прибора или подложки GaN за счет повторного использования объемного кристалла для выращивания на нем новых пленок [1].

Отделение тонкой пленки GaN с выращенной на ней вертикальной приборной структурой от изолирующей ростовой сапфировой подложки позволяет перенести структуру на проводящую подложку с высокой теплопроводностью [2,3]. При изготовлении приборов на основе GaN часто используется метод лазерного отделения пленки GaN от сапфировой подложки (Laser Lift-Off) с использованием ультрафиолетового (УФ) лазера [4,5]. В этом методе используется излучение с энергией кванта, большей, чем ширина запрещенной зоны GaN

(3.42 эВ), но меньшей, чем ширина запрещенной зоны сапфира (9.5 эВ), облучение осуществляется со стороны сапфировой подложки. Лазерное излучение поглощается в тонком слое GaN на границе с сапфиром, в результате чего происходит его термическое разложение и отделение пленки GaN.

В работе [1] нами был предложен и опробован метод лазерного отделения слабо легированных пленок *n*-GaN (концентрация электронов $n \sim 10^{17}$ см⁻³) с использованием выращенных жертвенных сильно легированных слоев *n*⁺-GaN ($n \sim 10^{19}$ см⁻³), основанный на поглощении инфракрасного (ИК) излучения свободными носителями заряда в GaN. В данной работе мы расширяем границы применения предложенного нами метода для использования его в качестве альтернативы методу Laser Lift-Off. Для этого проведено изучение возможности использования поглощения излучения ИК лазера в сапфире для локального разогрева сапфировой подложки на границе GaN/сапфир и термического разложения приграничного слоя GaN с целью отделения пленки GaN от сапфировой подложки.

2. Энергетический порог диссоциации GaN на границе GaN/сапфир при поглощении ИК излучения в сапфире

Сапфир достаточно сильно поглощает инфракрасное излучение (рис. 1), что дает возможность отделить слабо

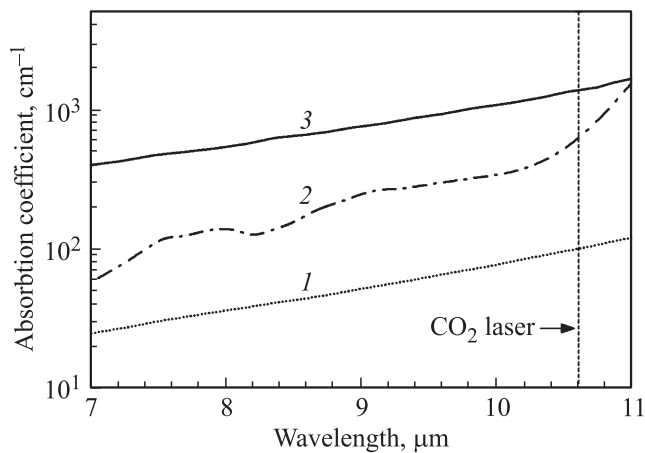


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента поглощения для сапфира (2) [6] и GaN *n*-типа с различными уровнями легирования (1, 3) [1]. Концентрация электронов, см⁻³: 1 — 10¹⁷, 3 — 10¹⁸.

легированные пленки GaN от сапфировых подложек в результате импульсного лазерного нагрева интерфейса GaN/сапфир при облучении сапфировой подложки со стороны пленки GaN. Благодаря низкой теплопроводности сапфира температурный профиль в нем во время лазерного импульса соответствует распределению поглощаемой энергии ИК излучения. Для отделения пленки GaN от подложки передача тепла в приграничную область пленки GaN за счет теплопроводности должна обеспечивать быстрый нагрев и термическое разложение GaN на границе GaN/сапфир.

Оценим пороговую энергию лазерного излучения, необходимую для отделения пленки GaN от сапфировой подложки. Облучение осуществляется импульсом лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм с наносекундной длительностью τ .

Характерную длину термодиффузии в GaN и сапфире можно оценить по формуле

$$L = \sqrt{D \cdot \tau}, \quad (1)$$

где $D = k/(c \cdot \rho)$ — коэффициент термодиффузии, k — коэффициент теплопроводности, c — удельная теплоемкость и ρ — плотность. Учитывая, что для сапфира и GaN эти коэффициенты равны $k_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.35$ Вт/(см · К) и $k_{\text{GaN}} = 1.3$ Вт/(см · К), $c_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.76$ Дж/(г · К) и $c_{\text{GaN}} = 0.63$ Дж/(г · К), $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3.98$ г/см³ и $\rho_{\text{GaN}} = 6.15$ г/см³ соответственно, получаем при длительности лазерного импульса $\tau = 60$ нс: $D_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.08$ см²/с, $L_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.83$ мкм и $D_{\text{GaN}} = 0.43$ см²/с, $L_{\text{GaN}} = 1.41$ мкм.

Коэффициент поглощения сапфира на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм при комнатной температуре равен $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 7 \cdot 10^2$ см⁻¹ [6]. Так как $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} < 1$, то энергию E , поглощенную в слое сапфира $L_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, можно оценить по формуле

$$E = \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} L_{\text{Al}_2\text{O}_3} E_0, \quad (2)$$

где E_0 — энергия лазерного излучения на границе GaN/сапфир.

Оценивая температуру вблизи границы GaN/сапфир как отношение энергии, поглощенной в слое сапфира $L_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ к общей теплоемкости приграничных слоев сапфира и GaN, получаем

$$T = W \frac{\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{c_{\text{Al}_2\text{O}_3} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \left(1 + \left(\frac{k_{\text{GaN}} c_{\text{GaN}} \rho_{\text{GaN}}}{k_{\text{Al}_2\text{O}_3} c_{\text{Al}_2\text{O}_3} \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} \right)^{1/2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где $W = E_0/(\pi d^2/4)$ — плотность энергии лазерного излучения на интерфейсе GaN/сапфир, d — диаметр лазерного пятна. Для пленки GaN с концентрацией электронов $n = 10^{17}$ см⁻³ коэффициент поглощения на длине волны $\lambda = 10.6$ мкм при комнатной температуре равен $\alpha_{\text{GaN}} = 10^2$ см⁻¹ [1]. При толщине пленки $l = 10$ мкм энергия излучения на интерфейсе GaN/сапфир, согласно закону Бугера–Ламберта–Бера, составит 90% энергии излучения лазера. При воздействии импульса лазерного излучения с энергией в импульсе 100 мкДж, сфокусированном в пятно диаметром $d = 20$ мкм, температура вблизи границы GaN/сапфир составит $T = 2090$ К. Данное значение температуры превосходит температуру диссоциации GaN $T_{\text{GaN}} = 1162.5$ К [7], следовательно, приграничный участок пленки GaN диссоциирует на Ga и газообразный N₂ с образованием полости диаметром 20 мкм, находящейся под давлением газообразного азота $P > 10^5$ бар [1]. Заполнение отделяемого участка пленки близко расположенными полостями, как показано на рис. 2, ослабляет тонкий приграничный слой *n*-GaN без разрушения вышележащей пленки, что дает возможность полностью отделить пленку GaN от подложки сапфира.

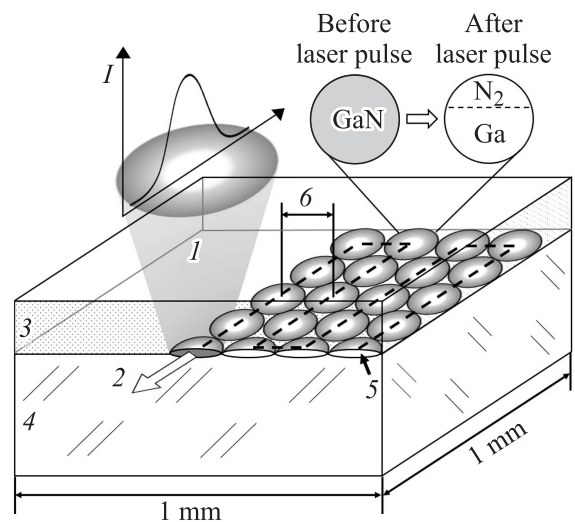


Рис. 2. Схема отделения пленок *n*-GaN: 1 — излучение импульсного CO₂-лазера; 2 — траектория и направление движения лазерного луча; 3 — слабо легированный слой *n*-GaN; 4 — подложка сапфира; 5 — полость, образовавшаяся в результате диссоциации GaN; 6 — расстояние между центрами полостей.

3. Образцы и методика проведения эксперимента

3.1. Образцы

В экспериментах использовались темплеты: пленки *n*-GaN толщиной 6 и 9 мкм, выращенные методом MOCVD на подложках сапфира с ориентацией ростовой поверхности (0001). Толщина подложки сапфира равна 300 мкм, диаметр 50 мм. Концентрация кислорода и кремния в пленках *n*-GaN по данным вторичной ионной масс-спектропии, составляла $(4-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и менее $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

3.2. Подготовка образцов перед лазерным отделением

На пленки GaN, выращенные на подложках сапфира, действуют сжимающие напряжения. Разделение пленки на отдельные области позволяет частично уменьшить напряжения, что снижает вероятность возникновения трещин в объеме облучаемого участка пленки в процессе лазерного сканирования [8]. Поэтому до этапа лазерного сканирования пленка *n*-GaN с помощью непрерывного CO₂-лазера мощностью 7 Вт разделялась на квадратные области размером 1 × 1 мм. Канавки, разделяющие пленку, достигали подложки сапфира и служили для отвода газообразного N₂ [1]. Ширина канавок составляла 50 мкм.

4. Лазерное сканирование

Под воздействием импульсного лазерного излучения с наносекундной длительностью импульсов из-за диссоциации GaN на границе GaN/сапфир возникают полости с избыточным давлением N₂. Сила, с которой газообразный N₂ действует на пленку, пропорциональна диаметру полости. Поэтому, чтобы уменьшить вероятность растрескивания пленки в результате единичного выстрела, необходимо фокусировать лазерный луч в пятно с минимально возможным диаметром [1]. В наших экспериментах лазерное излучение с помощью асферического мениска из селенида цинка с числовой апертурой $NA = 0.35$ фокусировалось на границе раздела *n*-GaN/сапфир в пятно с диаметром, равным ~ 20 мкм.

Двумерное лазерное сканирование участка пленки *n*-GaN размером 1 × 1 мм производилось лучом импульсного CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$, максимальной мощностью в импульсе, равной 60 мДж, и длительностью импульса ~ 60 нс. Выходная мощность лазера контролировалась с помощью автоматизированного поляризационного аттенюатора с точностью $\pm 0.03^\circ$. Перемещение образца в процессе лазерного сканирования осуществлялось трехкоординатным моторизованным столиком с точностью позиционирования $\pm 2.5 \text{ мкм}$ по двум горизонтальным осям и $\pm 0.75 \text{ мкм}$ по

вертикальной оси. Для того чтобы обеспечить равномерный выход газообразного N₂ через подготовленные канавки, лазерное облучение отделяемого участка пленки начиналось с одного из углов и проводилось вдоль одной из канавок с постепенным смещением в перпендикулярном направлении. Схематичное изображение процесса лазерного облучения показано на рис. 2.

4.1. Отделение облученного участка пленки от ростовой подложки

На квадратный участок пленки *n*-GaN размером 1 × 1 мм, облученный лазером, с Ga-полярной стороны наносился клей на основе цианакрилата. После этого образец прижимался к временной технологической подложке из стекла. Для равномерного прижима образца к стеклянной подложке со стороны сапфировой подложки прикладывалось механическое давление, действующее до полного высыхания клея. Затем образец механически закреплялся на подготовленном стенде, а к стеклянной подложке прикладывалось небольшое механическое усилие, направленное по нормали от сапфировой подложки. В результате пленка *n*-GaN размером 1 × 1 мм отделялась от ростовой сапфировой подложки и переносилась на стеклянную подложку. Далее пленка отделялась от стеклянной подложки и переносилась на базовую подложку.

4.2. Исследование отделенных пленок GaN и сапфировых подложек после отделения GaN

Отделенные пленки *n*-GaN и сапфировые подложки, после отделения от них пленки GaN, были исследованы с помощью микрорамановской спектроскопии. Измерения проводились при комнатной температуре в геометрии „обратного рассеяния“ на спектрометрической установке Horiba Jobin-Yvon T64000, укомплектованной конфокальным микроскопом. В качестве источника возбуждения использовался YAG:Nd ($\lambda = 532 \text{ нм}$) лазер, луч которого фокусировался в пятно диаметром ~ 1 мкм.

Исследование поверхностной морфологии пленок *n*-GaN и сапфировых подложек проводилось с помощью оптического микроскопа, а также методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

5. Экспериментальные результаты и их обсуждение

5.1. Отделенные пленки GaN и сапфировые подложки

В ходе исследования процесса отделения пленок *n*-GaN от подложек сапфира было выяснено, что при достижении минимального порога энергии излучения в 80 мкДж происходила диссоциация тонкого слоя *n*-GaN

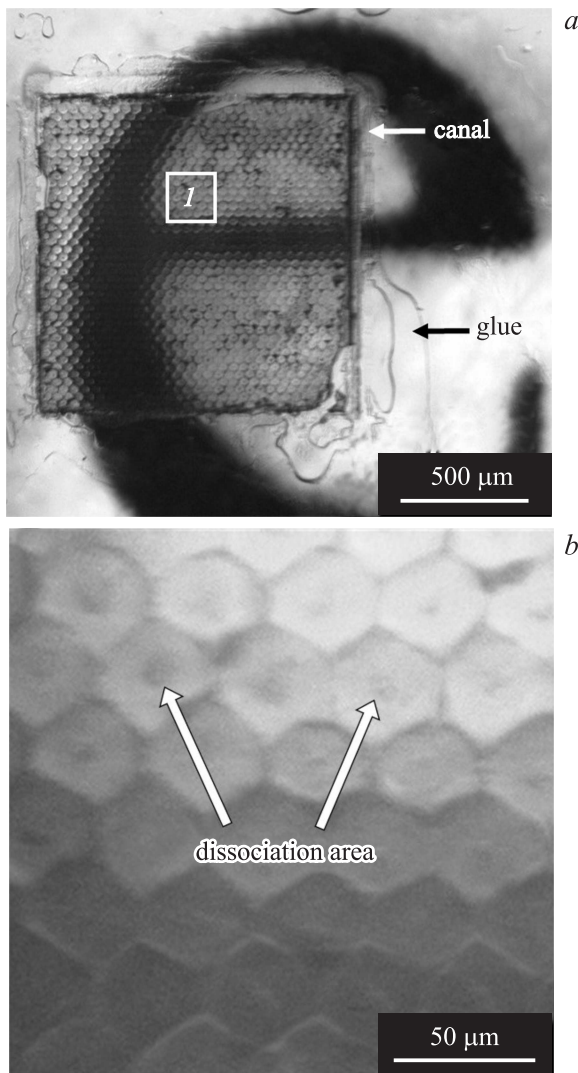


Рис. 3. *a* — оптическая микрофотография Ga-полярной стороны пленки *n*-GaN толщиной 6 мкм на технологической подложке из стекла на фоне части распечатанного текста; *b* — увеличенная оптическая микрофотография области „1“ Ga-полярной стороны пленки *n*-GaN. Вокруг пленки видны следы клея, с помощью которого она была приклеена к стеклянной подложке. Непрозрачная окантовка по краям пленки представляет собой поврежденный GaN, образовавшийся в результате прорезания канавок.

с образованием полости диаметром 15–20 мкм на границе GaN/сапфир. Дальнейшее повышение энергии излучения до 140 мкДж сопровождалось увеличением диаметра полости до 90 мкм без разрушения поверхности пленки. При увеличении энергии излучения до 160 мкДж диаметр полости увеличивался до 110 мкм также без разрушения поверхности пленки. При энергии излучения, большей 160 мкДж, происходило образование трещин, пронизывающих пленку *n*-GaN от N-полярной до Ga-полярной стороны. При этом образование трещин зачастую приводило к выкалыванию области пленки, под-

вергшейся воздействию лазерного излучения. Полагая, что диаметр лазерного пятна на границе *n*-GaN/сапфир приблизительно равен наибольшему наблюдаемому диаметру полости, можно грубо оценить пороговую плотность энергии, необходимую для диссоциации слоя *n*-GaN и образования полости. Рассчитанная пороговая плотность энергии составила 1.6 ± 0.5 Дж/см². Полученное значение пороговой плотности энергии превышает значение 0.6 Дж/см², полученное в работах, посвященных лазерному отделению GaN от подложек сапфира с помощью УФ лазера [5,7,9].

Микрофотография N-полярной стороны пленки GaN толщиной 6 мкм, перенесенной на стеклянную подложку на фоне распечатанного текста, показана на рис. 3, *a*. Размер отделенного участка пленки равен 1 × 1 мм. Темные пятна на пленке — следы Ga, возникшего при диссоциации GaN. Пленка имеет периодическую неоднородную поверхность в виде шестигранников, возникшую в результате лазерного сканирования. Отметим, что N-полярная сторона отделенной GaN-пленки получается профилированной в виде матрицы из близко расположенных микролинз и оптически искажает текст, находящийся под ней (рис. 3, *b*).

Исследование СЭМ- и АСМ-изображений N-полярной стороны, отделенных пленок *n*-GaN (рис. 4, *a* и *b*) показало, что неровности, возникшие в результате лазерного сканирования, имеют выпуклую форму в виде микролинз. Расстояние между центрами неровностей составляет 30–35 мкм (рис. 2). В центре каждой неровности присутствует область диаметром 15–20 мкм, в которой происходила диссоциация GaN. На рис. 3, *b* эти области видны в виде небольших темных точек в центре шестигранников. На пленке присутствуют капли Ga, оставшиеся после сканирования импульсным лазером (рис. 4, *a*). Вокруг каждой области диссоциации образовывалась микротрещина протяженностью 10–15 мкм, распространяющаяся вдоль интерфейса *n*-GaN/сапфир и в глубь пленки. Угол к поверхности подложки, под которым уходят микротрещины, составлял 2.4 и 1.2° для пленок толщиной 6 и 9 мкм соответственно (рис. 4, *b*). Значения максимальной шероховатости при этом равнялись 0.45 и 0.21 мкм соответственно. Отметим также, что при лазерном сканировании пленок толщиной менее 6 мкм возрастала вероятность выкалывания пленки.

На СЭМ- и АСМ-изображениях (рис. 5, *a* и *b*) подложки сапфира после отделения пленки GaN наблюдается картина, аналогичная наблюдаемой на N-полярной стороне отделенной пленки. Из рис. 5, *a* видно, что после отделения пленки на поверхности сапфира остаются лунки, в центре которых наблюдаются темные участки диаметром 15–20 мкм. Исследование с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показало, что в данных областях наравне с атомами Ga и N присутствуют в больших количествах Al и O. Таким образом, темные участки представляют собой сапфир, в котором произошло поглощение излучения CO₂-лазера. Вокруг областей диссоциации присутствуют островки

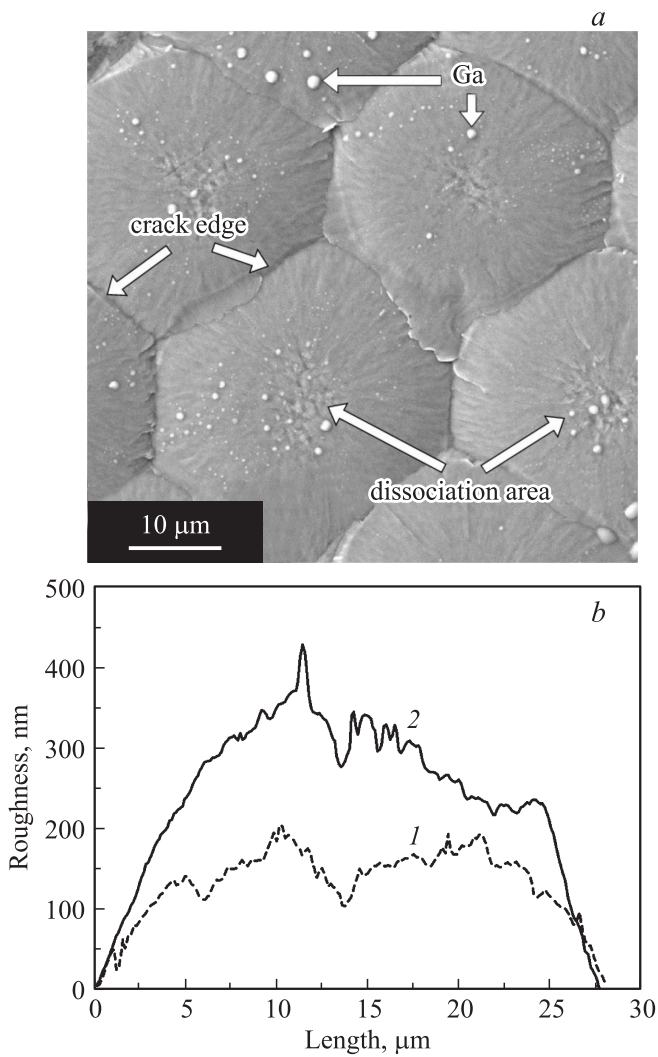


Рис. 4. СЭМ-изображение N-полярной стороны отделенной от сапфировой подложки пленки n-GaN толщиной 6 мкм (a) и профиль поверхности N-полярной стороны отделенных пленок n-GaN (b). Толщина пленок, мкм: 1 — 9, 2 — 6.

GaN, оставшиеся после отделения пленки. Из рис. 5, a и b видно, что после зоны диссоциации появляется трещина, имеющая как латеральную, так и вертикальную составляющую, из-за которой трещина уходит в глубь пленки [7,9]. Близкое расположение полостей ограничивает распространение трещин, что приводит к формированию шестигранных лунок на подложке и микролинз на отделенной пленке (рис. 3, b и 4, a).

Поляризованные спектры рамановского рассеяния ростовой подложки сапфира после отделения от нее пленки GaN толщиной 9 мкм показаны на рис. 6. Спектры измерены в шести равноудаленных друг от друга точках. Первая точка (p.1) была выбрана на границе между двумя соседними лунками, а последняя точка (p.6) совпадала с центром лунки (рис. 5, a и b). Для удобства анализа каждый спектр сдвинут по вертикальной шкале, и его интенсивность увеличена в соответствии с коэф-

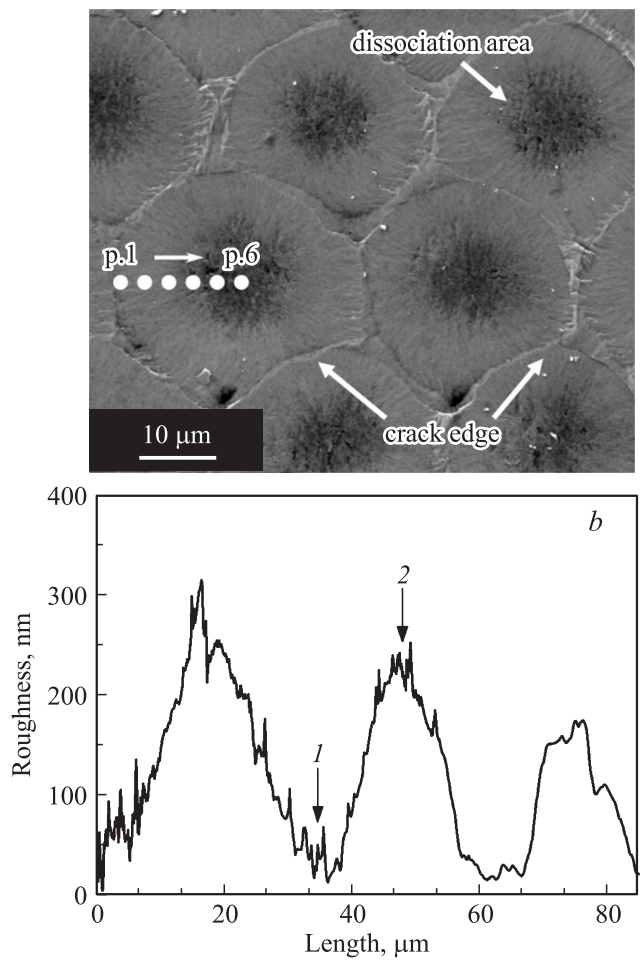


Рис. 5. СЭМ-изображение (a) и АСМ-изображение (b) профиля поверхности подложки сапфира после отделения пленки n-GaN толщиной 9 мкм. a — точками отмечены места исследования рамановского рассеяния. b — точками отмечены край и центр лунки: 1 — p. 1, 2 — p. 6.

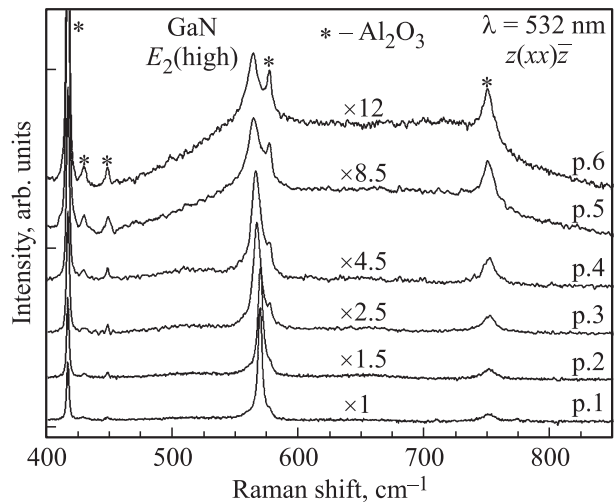


Рис. 6. Поляризованные рамановские спектры, измеренные в шести равноудаленных друг от друга точках подложки сапфира после отделения от нее пленки GaN толщиной 9 мкм. Звездочками отмечены линии сапфировой подложки.

фициентом, указанным рядом со спектром. В спектре, измеренном в точке р. 1, кроме линий сапфира (они отмечены на рисунке знаком „звездочка“) регистрируется также линия на частоте $\omega = 569.3 \text{ см}^{-1}$. Эту линию следует отнести к фоновой моде GaN симметрии E_2 (high), наблюдение которой в рамановском спектре этого материала разрешено правилами отбора для используемой геометрии рассеяния [10]. Регистрация фоновой моды GaN в этом спектре, свидетельствует о сохранении слоя GaN на границе между двумя соседними лунками. Однако, как можно заключить из анализа отношения интенсивности линии сапфировой подложки на частоте $\omega = 417 \text{ см}^{-1}$ к интенсивности фоновой моды GaN на частоте $\omega = 569.3 \text{ см}^{-1}$, толщина слоя GaN по мере приближения к центру лунки существенно уменьшается. Об этом же свидетельствуют масштабирующие множители для спектров, полученных в точках р.1–р.6. Качественно наше заключение, полученное из анализа рамановских спектров, хорошо коррелирует с данными, полученными методом атомно-силовой микроскопии, представленными на рис. 4, *a* и *b*.

Можно отметить, что по мере приближения к центру лунки в рамановских спектрах наблюдается низкочастотный сдвиг положения максимума фоновой линии E_2 (high). Так, для точки р.1 эта линия находится на частоте $\omega = 569.3 \text{ см}^{-1}$, а в точке р.6 она регистрируется уже на частоте $\omega = 564.2 \text{ см}^{-1}$. Известно, что значение частоты фонона симметрии E_2 (high) очень чувствительно к величине и знаку механических напряжений в плоскости слоя GaN. При этом высокочастотный сдвиг этой моды по отношению к ее положению в объемном недеформированном GaN ($\omega = 567.8 \text{ см}^{-1}$) указывает на наличие сжимающих напряжений, а низкочастотный сдвиг свидетельствует о присутствии растягивающих напряжений. С использованием констант деформационных потенциалов фононных мод GaN, полученных в работе [10], мы выполнили оценки величин напряжений в плоскости в точках р.1–р.6 для оставшегося на подложке слоя *n*-GaN. Для точек р.1 и р.2 эти оценки дают близкие значения (σ_{xx}) = -0.59 ГПа, причем знак этих напряжений указывает на сжатие слоя GaN, что типично для роста этого материала на подложке сапфира. Однако, начиная с точки р. 3, знак напряжений меняется, что говорит о наличии деформации растяжения в точках р.3–р.6. Оценки показывают, что величина растягивающих напряжений в точке р.3 составляет (σ_{xx}) = +0.33 ГПа и затем монотонно увеличивается к центру лунки, достигая в точке р.6 значительного значения (σ_{xx}) = +1.33 ГПа.

Наряду с изменением знака напряжений по направлению к центру лунки можно отметить также монотонное увеличение ширины на половине высоты фоновой линии (FWHM) E_2 (high). Так, если для точки р.1 значение FWHM = 4.0 см^{-1} , то в точке р.6 значение этого параметра составляет уже FWHM = 13.0 см^{-1} . Кроме того, для точек р.5 и р.6 в спектрах кроме уширенной

линии E_2 (high) наблюдается широкая спектральная полоса, простирающаяся от 500 до 750 см^{-1} . Эта полоса коррелирует с областью дисперсии высокочастотных оптических фононов и воспроизводит плотность фононных состояний в дефектных кристаллах GaN [11]. Несомненно, что отмеченные выше особенности спектров свидетельствуют о наличии большого количества структурных дефектов в слое *n*-GaN, который примыкает непосредственно к подложке. Нетипичный для роста GaN на сапфире растягивающий характер напряжения указывает на сильный эффект воздействия лазерного излучения на слой *n*-GaN, что и привело к возникновению микротрещин и последующему отделению пленки.

На основе вышеприведенных результатов может быть сделан вывод о том, что при облучении образца большая часть поглощенного лазерного излучения нагревала сапфир, что приводило к разогреву слоя *n*-GaN, прилегающего к сапфиру. При достаточном разогреве GaN происходила его диссоциация на Ga и газообразный N_2 и как следствие между пленкой *n*-GaN и подложкой сапфира образовывалась полость с избыточным давлением N_2 и капельками Ga. Величина давления в момент образования полости могла достигать значений более 10^5 бар при температурах 2090 К и выше [1,4,7,12]. При достаточно близком расположении полостей происходило их объединение, что приводило к практически полному отделению облученного участка пленки.

5.2. Изготовление и тестирование образца вертикального диода Шоттки

Для изготовления тестового образца вертикального диода Шоттки пленка *n*-GaN размером 1×1 мм и толщиной 9 мкм полностью отделялась от технологической подложки из стекла путем термического разложения клея. Полученная свободная монокристаллическая пленка *n*-GaN приклеивалась N-полярной стороной на базовую медную подложку с помощью токопроводящей пасты с мелкодисперсным серебром. Затем на Ga-полярную сторону пленки *n*-GaN через маску методом вакуумного напыления наносились барьерные контакты из Ni. Площадь каждого выпрямляющего контакта равна $S = (1-2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. Проведено исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) диода, измеренных в диапазоне прикладываемых напряжений (-150)–(+2.4) В и величин измеряемых токов 10^{-11} – 10^{-2} А.

На рис. 7 представлена ВАХ полученного прибора, измеренная при комнатной температуре. Максимальное обратное напряжение на структуре составило 150 В при токе 0.8 мкА. Максимальная величина плотности прямого тока составила 100 А/см² при напряжении 2 В. Анализ характеристик Шоттки диодов вертикального типа показывает, что в настоящее время рабочие характеристики диодов Шоттки на основе GaN площадью $S = 9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ следующие: обратное напряжение 790 В,

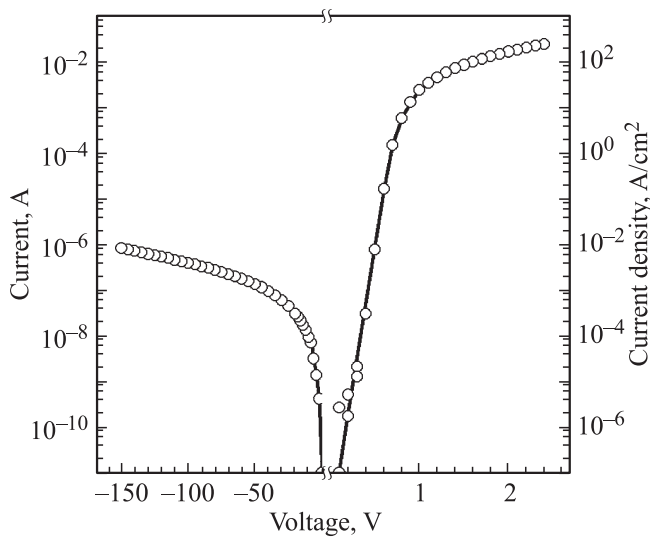


Рис. 7. ВАХ Шоттки диода площадью $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, полученного вакуумным напылением Ni на пленку *n*-GaN толщиной 9 мкм, на медной подложке.

обратный ток 900 мкА; прямое напряжение 2.3 В, плотность прямого тока 550 А/см^2 [13,14]. Таким образом, изготовленный нами тестовый образец демонстрирует рабочие характеристики, приемлемые для его использования при коммутации больших мощностей. Данный результат показывает, что, несмотря на то что предлагаемый метод отделения требует дополнительной доработки, уже сейчас он представляется перспективным не только для отделения тонких пленок и создания подложек GaN, но и изготовления вертикальных полупроводников приборов на основе GaN.

6. Заключение

Тонкие пленки нитрида галлия толщиной 6 и 9 мкм и размером $1 \times 1 \text{ мм}$ отделены импульсным излучением CO_2 -лазера от подложек сапфира. Отделение происходило путем последовательного облучения границы *n*-GaN/сапфир со стороны GaN импульсным CO_2 -лазером с длиной волны $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$. В результате каждого импульса лазера на границе *n*-GaN/сапфир происходило поглощение сапфиром энергии излучения, вызывая нагрев слоя *n*-GaN с N-полярной стороны. Этот нагрев приводил к диссоциации GaN на газообразный азот и галлий. Исследование рамановских спектров подложки сапфира после отделения пленки показало, что в области диссоциации GaN присутствуют растягивающие напряжения. Диссоциация GaN сопровождалась образованием полости на границе *n*-GaN/сапфир. Совокупность вышеперечисленных явлений позволяет отделить пленку *n*-GaN от подложки сапфира. Полученная шероховатость отделенной пленки зависит от ее толщины. Значения шероховатости для пленок толщиной 6 и 9 мкм равны 0.45 и 0.21 мкм соответственно. Отметим, что

N-полярная сторона отделенной GaN-пленки получается профилированной в виде матрицы из близко расположенных микролинз. Использование такой поверхности при изготовлении светодиодов приведет к увеличению экстракции света из прибора.

Проведена экспериментальная оценка пороговой плотности энергии, необходимой для диссоциации пленок *n*-GaN толщиной 6 и 9 мкм, выращенных методом MOCVD на подложках сапфира. Ее значение варьируется в пределах от 1.1 до 2.1 Дж/см².

Изготовлен тестовый образец диода Шоттки площадью $S = (1-2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ с контактом металл-полупроводник. Максимальная величина плотности прямого тока составила 100 А/см^2 при напряжении 2 В, максимальное обратное напряжение 150 В и обратный ток 0.8 мкА.

Так как в описанном в настоящей работе методе лазерное сканирование производится со стороны отделяемой пленки, то он может быть использован для отделения пленок GaN и полупроводниковых структур на его основе не только от сапфира, но и от других подложек, непрозрачных для излучения ближнего ИК диапазона [15]. Несмотря на необходимость проведения дополнительных исследований и оптимизации, методика отделения тонких пленок GaN, основанная на поглощении подложкой ИК излучения, является перспективной и может быть рассмотрена в качестве альтернативы или дополнения методу Laser Lift-Off в гибридной технологии отделения тонких пленок и полупроводниковых приборов.

Список литературы

- [1] М.В. Вирко, В.С. Коготков, А.А. Леонидов, В.В. Вороненков, Ю.Т. Ребане, А.С. Зубрилов, Р.И. Горбунов, Ф.Е. Латышев, Н.И. Бочкарева, Ю.С. Леликов, Д.В. Тархин, А.Н. Смирнов, В.Ю. Давыдов, Ю.Г. Шретер. ФТП, **50** (5), 711 (2016).
- [2] H. Goto, S.W. Lee, H.J. Lee, H.-J. Lee, J.S. Ha, M.W. Cho, T. Yao. Phys. Status Solidi C, **5** (6), 1659 (2008).
- [3] X.A. Cao, S.D. Arthur. Appl. Phys. Lett., **85** (12), 3971 (2004).
- [4] M.K. Kelly, O. Ambacher, R. Dimitrov, R. Handschuh, M. Stutzmann. Phys. Status Solidi A, **159** (1), R3 (1997).
- [5] W.S. Wong, T. Sands, N.W. Cheung. Appl. Phys. Lett., **72** (5), 599 (1998).
- [6] M.E. Whitson. *Handbook of the infrared optical properties of Al₂O₃, carbon, MgO and ZrO₂* (California, Aerospace Corporation, 1975) v. 1, chap. I-1, p. I.
- [7] P.R. Tavernier, D.R. Clarke. J. Appl. Phys., **89** (3), 1527 (2001).
- [8] V. Voronkov, R. Gorbunov, A. Tsyuk, P. Latyshev, Y. Lelikov, Y. Rebane, A. Zubrilov, N. Bochkareva, Y. Shreter. ECS Trans., **35** (6), 91 (2011).
- [9] X.J. Su, K. Xu, Y. Xu, G.Q. Ren, J.C. Zhang, J.F. Wang, H. Yang. J. Phys. D: Appl. Phys., **46**, 205103 (2013).
- [10] V.Yu. Davydov, N.S. Averkiev, I.N. Goncharuk, D.K. Nelson, I.P. Nikitina, A.S. Polkovnikov, A.N. Smirnov, M.A. Jacobson, O.K. Semchinova. J. Appl. Phys., **82** (10), 5097 (1997).

- [11] V.Yu. Davydov, Yu.E. Kitaev, I.N. Goncharuk, A.N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, D. Uffmann, M.B. Smirnov, A.P. Mirgorodsky, R.A. Evarestov. *Phys. Rev. B*, **58** (19), 12899 (1998).
- [12] N. Przhevalskii, S.Yu. Karpov, Yu.N. Makarov. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **3**, 30 (1998).
- [13] N. Tanaka, K. Hasegawa, K. Yasunishi, N. Murakami, T. Oka. *Appl. Phys. Express*, **8**, 071001 (2015).
- [14] M. Ueno, S. Yoshimoto, K. Ishihara, M. Okada, K. Sumiyoshi, H. Hirano, F. Mitsuhashi, Y. Yoshizumi, T. Ishizuka, M. Kiyama. *Proc. 26th IEEE ISPSD Conf.* (Waikoloa, USA, 2014) p. 309.
- [15] Yu.G. Shreter, Yu.T. Rebane, A.V. Mironov. US Patent Application № 20140206178, 2014.

Редактор А.Н. Смирнов

Laser lift-off unintentionally doped micron thickness *n*-GaN films from substrates based on absorption of IR-radiation in sapphire

V.V. Voronenkov¹, M.V. Virko², V.S. Kogotkov²,
A.A. Leonidov², A.V. Pinchuk¹, A.S. Zubrilov¹,
R.I. Gorbunov¹, F.E. Latishev¹, N.I. Bochkhareva¹,
Y.S. Lelikov¹, D.V. Tarkhin¹, A.N. Smirnov¹,
V.Y. Davydov¹, I.A. Sheremet³, Y.G. Shreter¹

¹ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

³ Financial University under the Government
of the Russian Federation,
125993 Moscow, Russia

Abstract Strong absorption of CO₂ laser radiation in sapphire was used to separate the GaN films from templates — GaN on sapphire. Scanning the sapphire substrate by the laser led to the thermal dissociation of GaN at the interface GaN/sapphire and the separation of GaN films from sapphire. Threshold density of laser energy to dissociate ion *n*-GaN was $1.6 \pm 0.5 \text{ J/cm}^2$. The distribution of the mechanical stresses and the surface morphology of the GaN films and sapphire substrates before and after the laser separation was studied with Raman spectroscopy, atomic force microscopy and scanning electron microscopy. Sample of the vertical Schottky diode was made on the separated *n*-GaN film with a forward current density is 100 A/cm^2 at a voltage of 2 V and maximum reverse voltage 150 V.