

## Поляризационная фоточувствительность гетеропереходов GaN/Si

© В.М. Ботнарюк, В.В. Бельков\*, Ю.В. Жилиев\*, С.Д. Раевский, В.Ю. Рудь†, Ю.В. Рудь\*, Л.М. Федоров\*

Государственный университет Молдовы,  
МД 20009 Кишинев, Молдавия\*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия†Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 20 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Разработана технология получения гетеропереходов  $n$ -GaN/Si, включающая химическое осаждение слоев GaN с толщинами до 20 мкм на подложки Si в открытой газотранспортной системе. Исследованы фотоэлектрические свойства изо- и анизотипных гетеропереходов в естественном и линейно поляризованном излучении. Обнаружена поляризационная фоточувствительность, возникающая при наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность слоев GaN. Коэффициент наведенного фотоплеохроизма увеличивается с углом падения  $\theta$  по квадратичному закону и при  $\theta \cong 75^\circ$  достигает 20%. Сделан вывод о возможности использования гетеропереходов GaN/Si в качестве широкополосных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения.

Нитрид галлия входит в круг полупроводниковых материалов, которые в настоящий период изучаются наиболее интенсивно. Благодаря существенному прогрессу в технологии этого широкозонного полупроводника ( $E_G \cong 3.4$  эВ при  $T = 300$  К) определены перспективы его использования в коротковолновой и высокотемпературной оптоэлектронике, фотопреобразователях и т.п. [1–4]. Особый интерес вызывает также решение проблем интеграции GaN с Si, что может открыть возможности применения кремния не только для выращивания пластин GaN большой площади, но и реального совмещения уникальных функциональных способностей этих материалов. Настоящая работа принадлежит этому направлению и посвящена первым исследованиям фотоэлектрических явлений в полученных формированием слоев GaN на кремниевых подложках гетеропереходов (ГП) в линейно поляризованном излучении (ЛПИ).

1. Для получения слоев GaN применялся метод химического осаждения из паровой фазы в открытой газотранспортной системе  $H_2-HCl-NH_3-Ga$ . В качестве материала подложек использованы пластины кремния  $n$ - и  $p$ -типа проводимости с концентрацией свободных носителей заряда  $\cong 10^{16}$  см $^{-3}$  при  $T = 300$  К и толщиной  $\cong 0.3$  мм. Непосредственно перед нанесением слоев поверхность подложек подвергалась тщательной очистке: обезжиривание в толуоле, обработка в кипящем изопропиловом спирте (до 10 мин), травление в растворе  $1HF:5H_2O$  (до 1 мин), промывание в деионизованной воде и высушивание в нагретых парах изопропилового спирта. Рост слоев осуществлялся в реакторе при температурах в зонах источника Ga  $T_s \cong 850^\circ C$  и осаждения  $T_0 \cong 890-910^\circ C$ . Для получения наиболее совершенных слоев, как установлено в результате комплексных физико-технологических исследований, вначале на поверхности кремния необходимо было сформировать тонкий буферный слой GaN ( $d_B \cong 0.5$  мкм). Этот рост происходил при  $T_0 \cong 550-565^\circ C$  в течение  $\cong 2$  мин. Для последующего роста температура осаждения по-

вышалась до  $T_0 \cong 890-910^\circ C$  и за время осаждения  $t_3 \cong 20-30$  мин воспроизводимо формировались слои GaN с толщинами  $d_l \cong 10-20$  мкм. Полученные слои GaN имеют мелкокристаллическую структуру с параметрами кристаллической решетки, соответствующими известным из литературы [5]. Согласно рентгеновским измерениям, ширины кривой качания в лучших из полученных нами слоев составляют  $\theta \cong 5-6^\circ$  при  $d_l \cong 20$  мкм, что сопоставимо со значениями  $\theta$ , характерными для полученных другими методами слоев GaN и, в том числе, молекулярно-пучковой эпитаксией, но при  $d_l \leq 1$  мкм [6]. Полученные на ориентированных в плоскостях (111) и (100) подложках Si слои GaN обнаруживают, как правило, высокие адгезию и сплошность. Слои GaN имеют однородную окраску,

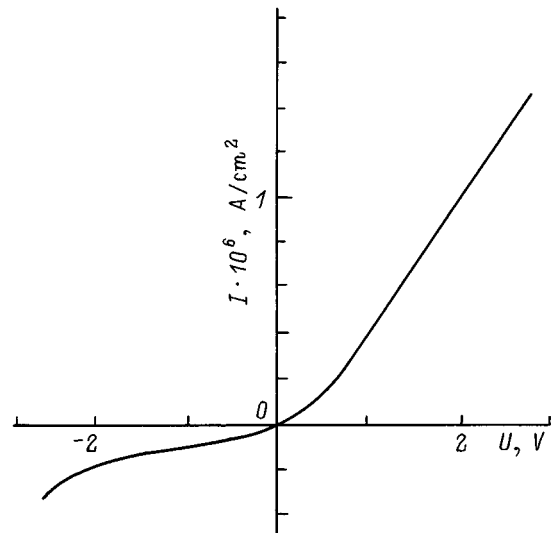
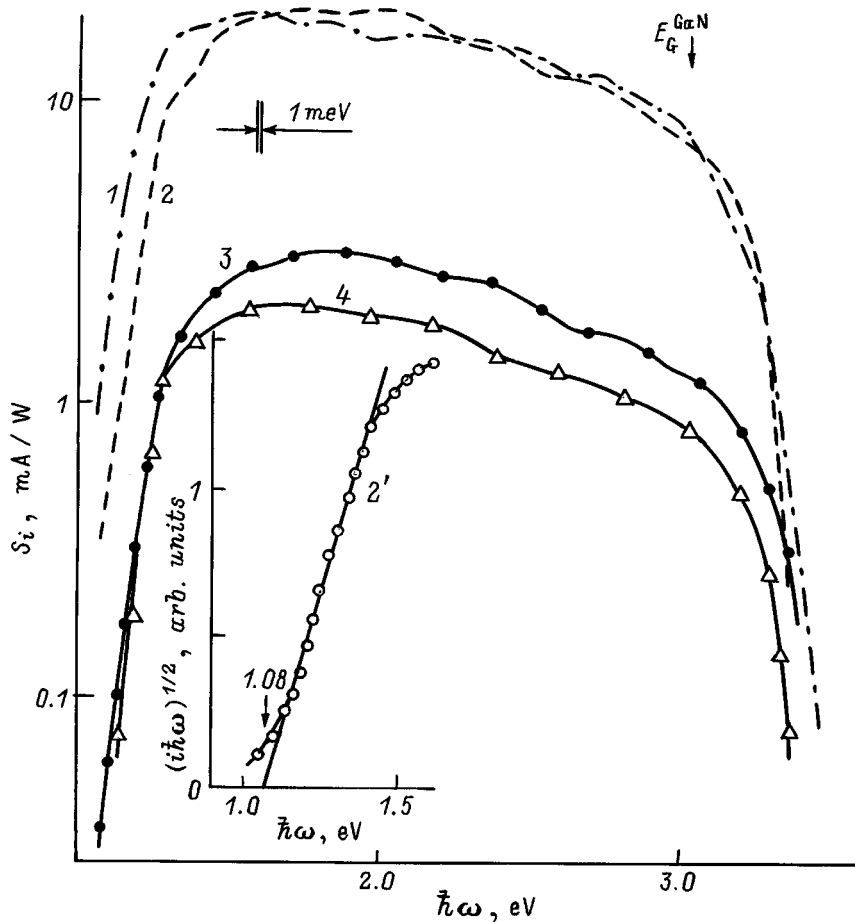


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода  $n$ -GaN/ $p$ -Si при  $T = 300$  К. (Образец № 59.1.1. Пропускное направление соответствует положительной поляризации напряжения внешнего смещения на Si).



**Рис. 2.** Спектральные зависимости фоточувствительности гетеропереходов  $n\text{-GaN}/p\text{-Si}$  при  $T = 300\text{ K}$  в естественном излучении. (№ образцов: 1 — 60.1.2; 2, 2' — 59.1.1; 3 — 59.2.1; 4 — 60.2.2. Освещение гетеропереходов вдоль нормали к плоскости GaN).

изменяющуюся от черного до светло-желтого цвета в зависимости от их толщины, а наружная поверхность обычно обладает рельефом, структура которого определяется технологическими условиями осаждения. Все полученные слои GaN обнаруживают электронный тип проводимости, характеризуются концентрацией свободных электронов  $\cong 10^{19}\text{ см}^{-3}$  и холловской подвижностью  $\cong 10\text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T \cong 300\text{ K}$ .

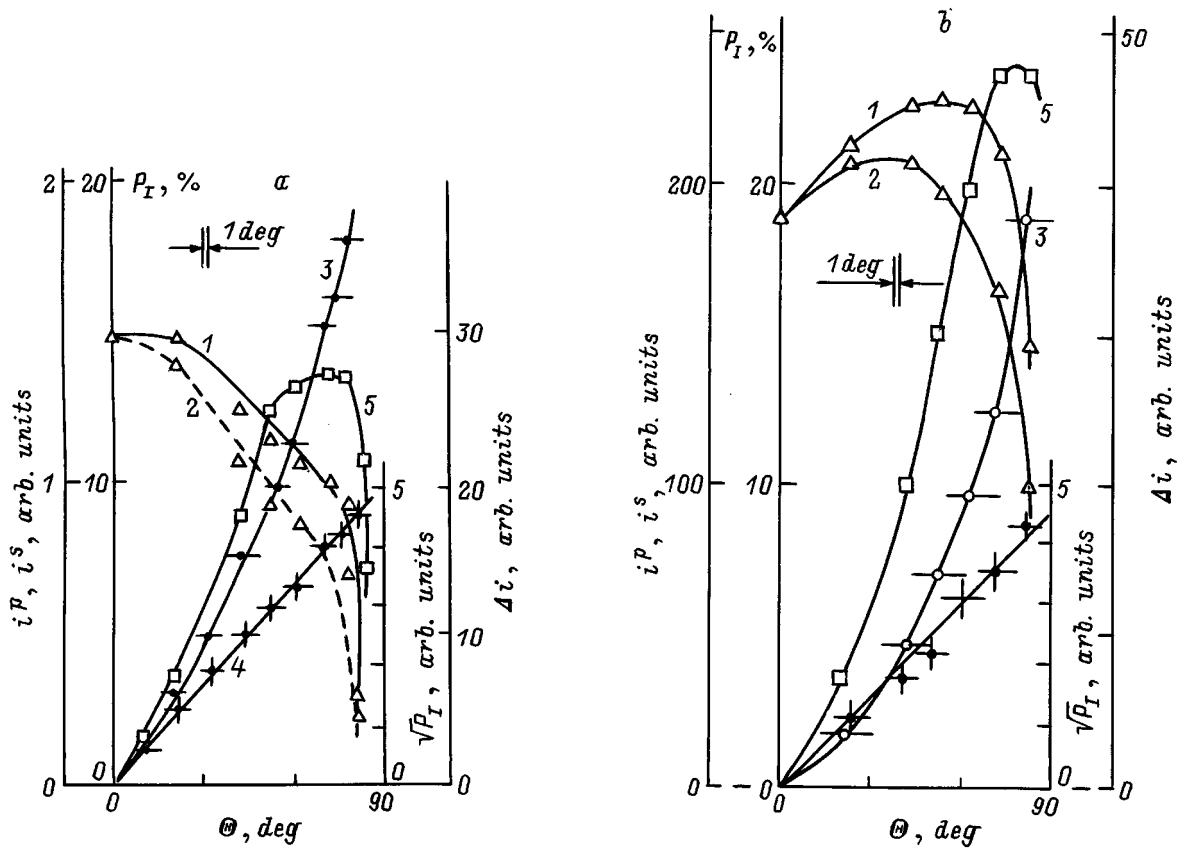
В проведенных технологических процессах получены анизотипные  $n\text{-GaN}/p\text{-Si}$  и изотипные  $n\text{-GaN}/n\text{-Si}$  ГП. Формирование слоев GaN осуществлялось на плоскостях (100) и (111) кремния с естественным окислом (несколько монослоев), а также специально покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной  $d_0 \cong 0.6\text{--}0.8\text{ мкм}$ . Согласно этим экспериментам можно показать, что изменения кристаллографической ориентации и присутствие слоя  $\text{SiO}_2$  на Si не отражается существенным образом на структуре полученных слоев GaN.

Развитый метод позволил получить ГП с площадью до  $50 \times 50\text{ мм}$  и, в принципе, не имеет ограничений по этому параметру. Для исследования фотоэлектрических свойств полученных ГП крепились на столике Федорова, который дает возможность контролировать угол падения

$\theta$ -излучения на приемную плоскость с точностью не ниже  $30'$ . Освещение ГП осуществлялось со стороны широкозонного слоя GaN ЛПИ с постоянной степенью поляризации до 100% во всей области фоточувствительности.

2. Полученные ГП обладают выпрямляющими свойствами. Типичная стационарная вольт-амперная характеристика для одного из анизотипных ГП приведена на рис. 1. Пропускное выпрямление в этих ГП отвечает отрицательной полярности внешнего смещения на слое  $n\text{-GaN}$ , тогда как в изотипных оно реализуется при положительном потенциале на  $n\text{-GaN}$ . Следует также отметить, что выпрямление в изотипных структурах, как правило, оказывается существенно хуже, чем в анизотипных. Обратные ветви вольт-амперных характеристик ГП при небольших напряжениях имеют степенную зависимость, которая близка к линейной, что свидетельствует о несовершенствах полученных ГП.

3. Изотипные и анизотипные ГП обнаруживают фотовольтаический эффект, знак которого не зависит от энергии падающих фотонов в пределах всей спектральной области фоточувствительности и изменений в локализации светового зонда (диаметр  $\cong 0.2\text{ мм}$ ) вдоль



**Рис. 3.** Зависимости фототоков короткого замыкания (1, 2), коэффициента наведенного фотоплекроизма,  $P_I$  (3, 4) и поляризационной разности фототоков (5) от угла падения линейно поляризованного излучения на плоскости ГП GaN/Si при  $T = 300$  К. *a* — образец 59.1.1,  $\hbar\omega = 1.97$  эВ, *b* — образец 60.1.2.1,  $\hbar\omega = 2.34$  эВ.

поверхности структур. Это обстоятельство позволяет считать, что разделение фотогенерированных пар осуществляется единственной активной областью в таких ГП, возникающей в результате формирования контакта GaN с подложкой *n*- или *p*-Si.

Фоточувствительность всех полученных ГП доминирует при их освещении со стороны широкозонного слоя. В этом случае спектральные зависимости фоточувствительности изо- и анизотипных ГП, как правило, широкополосные. На рис. 2 приведены характерные спектральные зависимости токовой фоточувствительности  $S_i$  для нескольких ГП при  $T = 300$  К в естественном излучении. В них четко проявляется характерный для резких идеальных ГА "эффект окна" [7], когда высокая фоточувствительность реализуется в диапазоне между ширинами запрещенных зон контактирующих материалов. Длинноволновая граница фоточувствительности отвечает началу межзонного поглощения в материале подложки этих ГП. В координатах  $(i\hbar\omega)^{1/2} - \hbar\omega$ , где  $i$  — ток, (рис. 2, кривая 2') для всех ГП она спрямляется, и экстраполяция ее к  $\hbar\omega = 0$  согласуется с шириной запрещенной зоны Si, тогда как коротковолновая граница фоточувствительности полученных ГП обусловлена поглощением излучения в слоях GaN [5]. Начало коротковолнового спада  $S_i$ , как видно из рис. 2, начинается с энергией

фотонов 1.8–2.4 эВ у разных ГП и контролируется в основном толщиной слоев GaN. Кроме того, в спектральных зависимостях фоточувствительности в области максимальных значений  $S_i$  для ряда ГП можно видеть слабую модуляцию фотоответа (рис. 2, кривые 1–3). Однако глубина этой модуляции недостаточна для того, чтобы с уверенностью определить положение максимумов и минимумов  $S_i$  и соответственно оценить их связь с возможной интерференцией излучения в широкозонных слоях.

Анализ взаимосвязи фотоэлектрических параметров ГП с условиями получения позволяет сделать следующие выводы. Использованный развитый метод выращивания воспроизводимо обеспечивает получение ГП с максимальной вольтовой  $S_u \cong 20$  В/Вт и токовой  $S_i = 150$  мА/Вт фоточувствительностью при  $T = 300$  К при осаждении слоев GaN на пластины *n*- и *p*-Si, ориентированные в плоскости (111). При переходе к пластинам с ориентацией (100) фоточувствительность ГП, как правило, падает на 2–4 порядка относительно структур на пластинах с ориентацией (111), что указывает на зависимость качества интерфейсной области от ориентации подложек. В то же время следует отметить, что параметры ГП не обнаружили явной зависимости от толщины слоя окисла на пластинах Si. Полная ширина

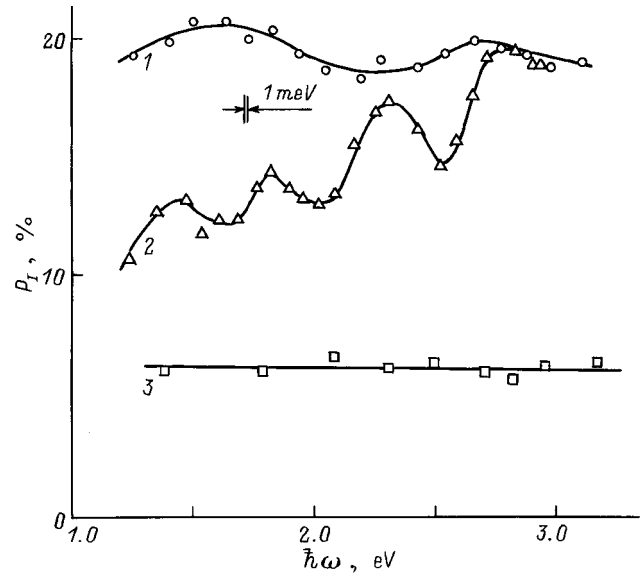
спектров fotocувствительности ГП на полувысоте  $\delta_{1/2}$  при их освещении со стороны GaN в лучших структурах достигает  $\cong 1.8$  эВ и обнаруживает тенденцию к понижению с увеличением толщины слоев  $d_l$  в диапазоне 10 ÷ 20 мкм.

При освещении ГП со стороны подложек спектры  $S_i$  становятся узкополосными ( $\delta_{1/2} \cong 0.1-0.2$  эВ), что отражает особенности поглощения излучения в Si.

4. Поляризационные измерения fotocувствительности ГП GaN/Si в условиях их освещения вдоль нормали как со стороны слоя, так и со стороны подложек не обнаружили какой-либо зависимости фототока короткого замыкания  $i$  от азимутального угла  $\varphi$ , определяющего положение электрического вектора световой волны  $\mathbf{E}$  относительно кристаллографических осей в Si-подложках. Этот результат связан с поликристаллическостью слоев GaN и с изотропным характером фотоактивного поглощения в Si. С переходом к наклонному падению ЛПИ на поверхность слоев GaN при углах падения  $\theta > 0^\circ$  обнаруживается периодическая зависимость фототока  $i_\varphi$  от азимута поляризации ЛПИ. Фототок короткого замыкания во всех полученных ГП при  $\theta > 0^\circ$  и совмещении плоскости поляризации излучения с плоскостью падения (ПП) —  $\mathbf{E} \parallel$  ПП оказался более высоким, чем для поляризации  $\mathbf{E} \perp$  ПП, т.е.  $i^p > i^s$ . Это неравенство выполняется для всей области fotocувствительности исследованных ГП. Типичные для полученных ГП зависимости фототоков короткого замыкания от угла падения  $i^p(\theta)$  и  $i^s(\theta)$  приведены на рис. 3. Для случая ГП с шероховатой наружной поверхности слоев GaN (рис. 3, а) фототоки с ростом угла падения  $\theta > 0^\circ$  сразу начинают понижаться, хотя при этом и сохраняется поляризационное неравенство  $i^p > i^s$ . Аналогичная особенность ранее наблюдалась в гетеропереходах GaP/Si и объяснялась несовершенствами поверхности слоев GaP [8].

Другой тип угловых зависимостей  $i^p(\theta)$  и  $i^s(\theta)$  представлен на рис. 3, б. Для таких ГП наружная поверхность слоев GaN имеет существенно лучшее качество. Из рис. 3, б следует, что в таких ГП для обеих поляризаций фототоки при  $\theta > 0^\circ$  вначале увеличиваются, проходят через максимум и только затем обнаруживают спад. Такая особенность угловых зависимостей фототоков  $i^p$  и  $i^s$  позволяет считать, что для обеих поляризаций излучения рост угла падения вызывает понижение потерь на отражение, вследствие чего и наступает увеличение  $i^p$  и  $i^s$ . С учетом [9,10] одновременный рост  $i^p$  и  $i^s$  может указывать на проявление интерференции падающего излучения в достаточно совершенных слоях GaN. Следовательно, поляризационные изменения fotocувствительности могут найти применение для экспрессной диагностики качества получаемых слоев GaN в готовых ГП.

Из экспериментальных угловых зависимостей коэффициента наведенного фотоплекроизма  $P_l$  в гетеропереходах GaN/Si (рис. 3) следует, что увеличение угла падения вызывает рост поляризационной fotocувствительности по квадратичному закону  $P_l \sim \theta^2$ . Важно отметить, что



**Рис. 4.** Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма ГП GaN/Si при наклонном падении ЛПИ на приемную плоскость GaN при  $T = 300$  К.  $\theta = 75^\circ$ . 1 — образец 59.1.1, 2 — образец 60.1.2.1, 3 — образец 60.1.2.

для всех ГП при  $\theta = 0^\circ$  величина  $P_l = 0$  в пределах всей области fotocувствительности. Это обстоятельство позволяет считать, что естественная анизотропия фотоактивного поглощения GaN маскируется поликристаллическостью слоев.

Поляризационная разность фототоков  $\Delta i = i^p - i^s$  в полученных ГП, как видно из рис. 3 (кривые 5), увеличивается с ростом  $\theta$  и для полученных ГП достигает максимума вблизи  $70-75^\circ$ . Этот параметр считается важным для оценки максимальной поляризационной fotocувствительности ГП и, следовательно, определяет диапазон углов падения, при которых фотодетектор будет проявлять максимальную чувствительность к ЛПИ.

Спектральные зависимости  $i^p$  и  $i^s$  при наклонном падении ЛПИ оказываются подобными. С ростом  $\theta$  увеличивается лишь зазор между кривыми  $i^p$  и  $i^s$ . На рис. 4 представлены спектральные зависимости  $P_l$  для нескольких ГП. Из них следует, что при наклонном падении ЛПИ на полученные ГП со стороны GaN коэффициент наведенного фотоплекроизма становится отличным от нуля и, следовательно, такие ГП становятся поляризационно-чувствительными. Согласно теоретическим расчетам, наведенный фотоплекроизм при заданном угле падения определяется величиной показателя преломления [11]. Если следовать таким оценкам, коэффициент наведенного фотоплекроизма в полученных ГП в условиях освещения со стороны GaN при  $\theta \cong 75^\circ$  должен достигать  $\cong 35\%$ . Выполненные исследования показывают, что величина  $P_l$  изменяется от образца к образцу и для изученных структур заполняет интервал 5–20% (рис. 4), причем в ряде ГП фотоплекроизм испытывает осцилляции и, следовательно, зависит от энергии падающих фотонов. Подобные закономерности

ранее были обнаружены на других структурах и связываются с понижением потерь на отражение вследствие интерференции [9,10]. Можно полагать, что и в полученных ГП также вследствие изменений в технологических условиях могут возникать подобные явления, которые приводят к понижению экспериментальных величин  $P_I$  относительно ожидаемого значения  $P_I \cong 35\%$  в условиях отсутствия интерференции. Не исключено также, что такое понижение  $P_I$  может быть вызвано и изменениями в структуре поверхности слоев GaN.

В заключение укажем, что обнаруженный наведенный фотоплетохроизм гетеропереходов GaN/Si позволяет сделать вывод о возможности их использования в качестве широкодиапазонных (1.2–3.4 эВ) фотоанализаторов ЛПИ с максимальной азимутальной фоточувствительностью  $\Phi_I \cong 8\text{--}10 \text{ мА/Вт} \cdot \text{град}$  при  $T = 300 \text{ К}$ , тогда как установленная зависимость величины  $P_I$  от условий формирования слоев может использоваться в целях экспрессной диагностики качества слоев GaN и соответственно оптимизации технологии.

## Список литературы

- [1] X.H. Yang, T.J. Schmidt, W. Shan, J.J. Song, B. Goldeudery. Appl. Phys. Lett., **66**, 1 (1995).
- [2] S.J. Pearton, C. Kuo. MRS Bulletin (February, 1997) p. 17.
- [3] S. Nakamura. MRS Bulletin (February, 1997) p. 29.
- [4] M.S. Shur, M.A. Khun. MRS Bulletin (February, 1997) p. 44.
- [5] *Физико-химические свойства полупроводников*. Справочник (М., Наука, 1979).
- [6] G.A. Martin, B.N. Sverdlov, A. Botchkarev, N. Markoc, D.J. Smith, S.Y. Then, W.N. Thompson, M.H. Nayfez. Mater. Res. Soc., **395**, 67 (1996).
- [7] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., 1975).
- [8] Ю.В. Жилияев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Назаров. ФТП, **27**, 161 (1993).
- [9] V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', T. Walter, H.W. Schock. Inst. Phys. Conf. Ser. № 152 (IOP Publishing Ltd., 1998) p. 971.
- [10] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 245 (1997).
- [11] G.A. Medvedkin, Y.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).

Редактор В.В. Чалдышев

## Polarization photosensitivity of GaN/Si heterojunctions

V.M. Botnaruk, V.V. Belkov\*, Yu.V. Zhilyaev\*,  
S.D. Raevsky, V.Yu. Rud', YU.V. Rud\*, L.M. Fedorov\*

Moldova State University,  
MD 20009 Kishinev, Moldova

\* A.F. Ioffe Physicothechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

† St. Petersburg State Technical University,  
195251 St. Petersburg, Russia