

Фотоэлектрические свойства гетеропереходов GaN/GaP

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

Государственный университет Молдовы,
MD 2009 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 1 апреля 1998 г. Принята к печати 3 апреля 1998 г.)

Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе выращены тонкие интерференционные слои n -GaN на подложках n - и p -GaP с ориентациями (100) и (111). Изучены спектры fotocувствительности анизотипных и изотипных гетеропереходов при наклонном падении линейно поляризованного излучения со стороны широкозонной компоненты. Обнаружена наведенная поляризационная fotocувствительность и обсуждаются ее особенности, обусловленные интерференцией излучения в слое нитрида галлия.

Создание эпитаксиальных слоев нитрида галлия и гетероструктур на их основе представляет большой интерес для развития коротковолновой полупроводниковой оптоэлектроники, что вызвано удачным сочетанием фундаментальных параметров этого материала [1–4]. Отметим, что фотоэлектрические свойства GaN и приборных структур на его основе исследованы недостаточно, причем эти работы выполнялись лишь с применением неполяризованного излучения. В настоящей работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических явлений в гетеропереходах (ГП), созданных путем осаждения слоев GaN на монокристаллические пластины фосфида галлия n - и p -типа проводимости.

1. Гетеропереходы p^+ -GaP/ n^+ -GaN и n^+ -GaP/ n^+ -GaN были получены следующим образом. Монокристаллические пластины GaP n - и p -типа проводимости, с концентрацией свободных носителей заряда $(5 \div 10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ K}$, толщиной 0.4 мм и ориентацией (100) или (111) травилась в насыщенном водном растворе $\text{HCl} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}$ в течение 10 мин, а затем промывались в деионизованной воде, сушились в парах изопропилового спирта и помещались в реактор для выращивания слоев нитрида галлия. Рост GaN проводился в открытой газотранспортной системе Ga–HCl–NH₃–H₂. Температура в зоне осаждения составляла 900°C. В этих условиях на подложках GaP формируются тонкие ($\approx 0.5 \text{ мкм}$) однородно окрашенные слои нитрида галлия с меняющимся в зависимости от условий роста от красного до темно-лилового цветом. Слои обнаруживают высокую адгезию по отношению к подложке и имеют концентрацию свободных электронов $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ K}$. Следует также отметить, что развитый метод роста независимо от ориентации подложек привел к образованию зеркально-гладких слоев нитрида галлия. Созданные гетеропереходы GaP/GaN имели средние размеры $10 \times 10 \text{ мм}$ и для проведения поляризационных исследований fotocувствительности монтировались на столике Федорова, который позволял изменять угловые координаты приемной плоскости с точностью не хуже $30'$. Монохроматическое линейно поляризованное

излучение (ЛПИ) получалось с помощью монохроматора SPM-2 с призмой SiO₂ и набора поляризационных фильтров.

2. Как следует из измерений стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ), все полученные по указанной выше методике изо- и анизотипные гетеропереходы обнаруживают четкое выпрямление. Типичная ВАХ одного из ГП приведена на рис. 1. Прямое смещение в подавляющем большинстве полученных ГП отвечает положительной полярности внешнего смещения на слое n -GaN. При прямых смещениях $U > U_0$ ток в исследованных ГП растет с напряжением по линейному закону

$$I = \frac{1}{R_0} (U - U_0),$$

где R_0 — остаточное сопротивление. Для полученных ГП значение R_0 изменялось в широких пределах (от 10^3 до 10^7 Ом), а напряжение отсечки находилось при этом в интервале $0.7 \div 2.0 \text{ В}$ (возрастая с увеличением R_0). В области малых прямых токов ВАХ созданных ГП

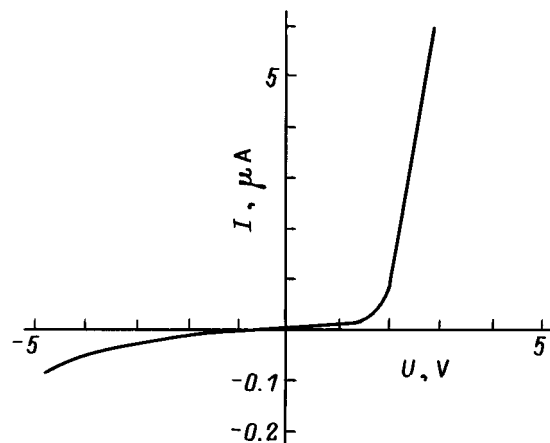


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетеропереходов GaN/ n -GaP при $T = 300 \text{ K}$. (Пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на слое GaN, образец 107-3n.)

следует известному диодному уравнению

$$I = I_s \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right),$$

а фактор идеальности принимает достаточно высокое значение $n = 4 \div 5$, что, по-видимому, обусловлено влиянием достаточно высокого последовательного сопротивления. Для лучших ГП величина обратного тока при комнатной температуре составляет $2 \cdot 10^{-9}$ А при напряжении $U_{rev} = 2$ В. Следует также отметить, что ориентация подложек GaP практически не сказывается на обнаруженных закономерностях ВАХ полученных структур.

3. При освещении ГП неполяризованным излучением наблюдался фотовольтаический эффект, обусловленный разделением неравновесных носителей заряда единственной активной областью, которая возникает на контакте GaP с GaN. Это заключение основано на том, что фотонапряжение не обнаруживает смены знака при любых изменениях локализации светового зонда и длины волны возбуждающего излучения. Для всех ГП было также характерно соответствие знака фотонапряжения и пропускного направления гипотетической зонной диаграммы гетероконтакта. Максимальная вольтовая фоточувствительность в ГП наблюдается при их освещении со стороны широкозонного слоя и для лучших образцов достигает 10^3 В/Вт при $T = 300$ К. На рис. 2 приведены типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η , рассчитанной как отношение фототока короткого замыкания i к числу падающих фотонов естественного излучения. Из данных рис. 2 следует, что η при освещении ГП со стороны слоя GaN наблюдается в широкой спектральной области $0.8 \div 3.5$ эВ, изменяясь при этом в пределах 6–7 порядков. Сопоставление приводимых для ГП спектральных зависимостей η (рис. 2) с аналогичными зависимостями для поверхностно-барьерных структур на основе GaP [5–7] позволяет связать длинноволновую часть этих зависимостей (при энергии фотонов $\hbar\omega < 3$ эВ) с фотоактивным поглощением в узкозонной компоненте ГП. Фоточувствительность в области полосы $\hbar\omega < 2.2$ эВ, как видно из рис. 2, сильно меняется от образца к образцу, что может быть связано с различием концентраций и типов дефектов в материале подложки. Эти различия могут быть обусловлены как специфической исходных параметров подложек, так и влиянием условий роста слоев нитрида галлия. Рост η начиная с $\hbar\omega > 2.25$ эВ и перегибы при 2.70 и 2.80 эВ хорошо воспроизводились в спектрах фоточувствительности всех полученных ГП и обусловлены непрямыми и прямыми межзонными оптическими переходами в энергетическом спектре узкозонной компоненты [6].

Максимальная фоточувствительность полученных ГП, как видно из рис. 2, наблюдается в интервале между ширинами запрещенных зон контактирующих полупроводников GaN и GaP. Если в поверхностно-барьерных структурах на основе GaP удастся эффективно подавлять

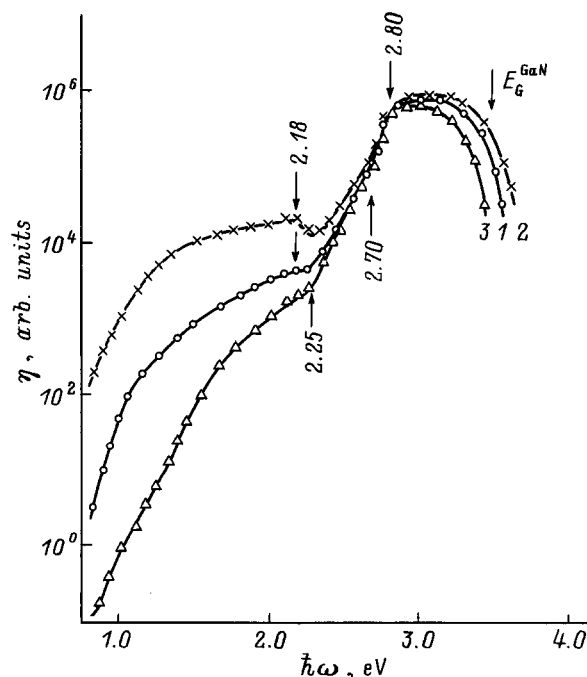


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η гетеропереходов GaN/GaP в неполяризованном излучении при $T = 300$ К. (1 — GaN/n-GaP, образец 107-3n; 2 — GaN/p-GaP, образец 106-1p; 3 — GaN/p-GaP, образец 107-1p, освещение со стороны GaN вдоль нормали к поверхности слоя).

поверхностную рекомбинацию и практически исключить коротковолновый спад η [6], то в случае всех полученных в данной работе ГП спад фоточувствительности начинает проявляться уже начиная в $\hbar\omega > 3 \div 3.2$ эВ для разных образцов и становится резким вблизи ширины запрещенной зоны GaN $E_g \approx 3.5$ эВ. Это связано в первую очередь с наступлением сильного поглощения излучения широкозонным слоем и рекомбинацией носителей в активной области таких ГП, на что указывает величина фактора их неидеальности $n > 2$. Широкополосность фоточувствительности ГП по отношению к интенсивности излучения характеризуется полушириной спектров η на их полувысоте, которая лежит в диапазоне $\delta_{1/2} = 0.5 - 0.7$ эВ для разных образцов.

4. Как показали исследования с применением линейно поляризованного излучения, в случае, когда угол падения ЛПИ $\Theta = 0^\circ$, во всей области фоточувствительности для всех ГП не обнаруживается какой-либо чувствительности фототока к изменениям в положении вектора электрического поля световой волны \mathbf{E} относительно главных кристаллографических осей подложки. Это обстоятельство позволяет заключить, что данное направление распространения ЛПИ для полученных ГП является фотоизотропным и, следовательно, естественный фотоэффект равен нулю [8]. Как только угол падения ЛПИ становится отличным от 0° , начинает возникать различие между фототоками для случая, ко-

гда \mathbf{E} лежит в плоскости падения (ПП) излучения $-i^p$ и $\mathbf{E} \perp$ ПП $-i^s$. Причем это неравенство имеет вид $i^p > i^s$ во всей области fotocувствительности ГП. Пример угловых зависимостей $i^p(\Theta)$ и $i^s(\Theta)$ дан на рис. 3 при освещении излучением с энергией фотонов вблизи E_g^{GaN} . Аналогичные угловые зависимости фототоков оказались характерными для всей области fotocувствительности. Видно, что в отличие от поверхностно-барьерных структур и гетеропереходов GaP/Si [5-7,9-12] для обеих поляризаций излучения фототок вначале увеличивается с ростом Θ , проходит через максимум и только после этого начинает падать. Эта закономерность позволяет считать, что для обеих поляризаций излучения увеличение Θ сопровождается устранением потерь на отражение. С учетом [13,14] такая закономерность может быть связана с интерференционными эффектами в широкозонном слое GaN. Очевидно, что эффект просветления максимален, если наступает сближение фототоков $i^s \rightarrow i^p$, в результате чего коэффициент наведенного фотоплекроизма $P_1 \rightarrow 0$. Увеличение угла падения, как видно из рис. 3 (кривые 3 и 4), сопровождается увеличением $P_1 \sim \Theta^2$, как и в отсутствие интерференции [5-7].

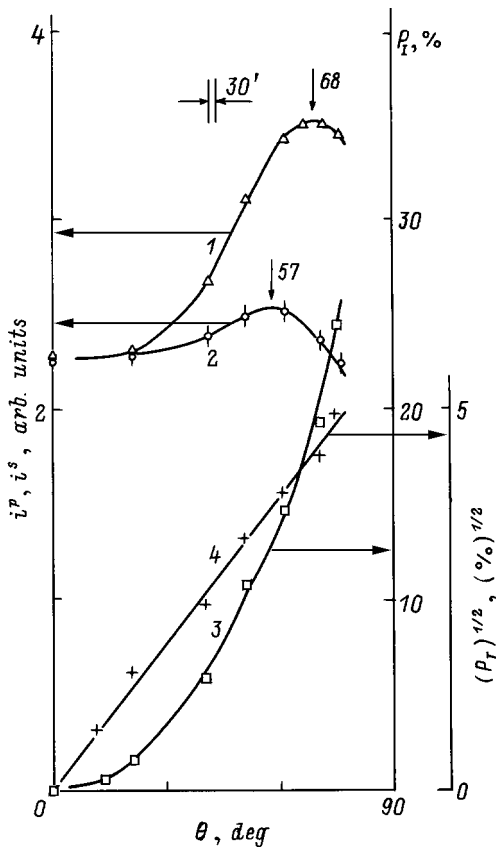


Рис. 3. Зависимости фототока короткого замыкания (1 — i^p , 2 — i^s) и коэффициента наведенного фотоплекроизма (3, 4) гетероперехода GaN/p-GaP от углов падения линейно поляризованного излучения на плоскость GaN при $T = 300$ К. (Образец 106-1p, $\lambda = 0.355$ мкм.)

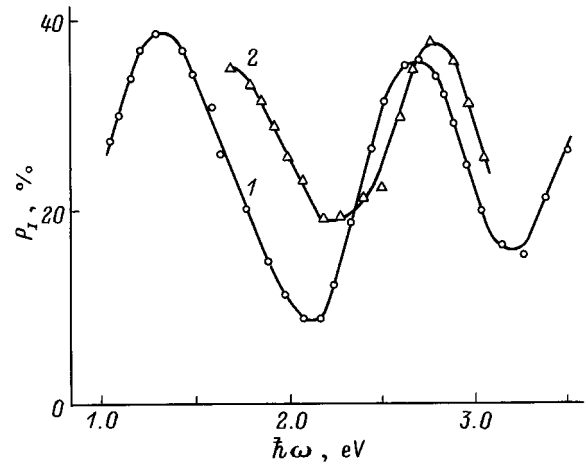


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма гетеропереходов GaN/GaP при $T = 300$ К. (1 — образец 106-1p, 2 — образец 107-2n, $\Theta = 75^\circ$).

На рис. 4 приведены спектральные зависимости P_1 для двух различных ГП при $\Theta = \text{const}$. Видно, что в случае полученных ГП коэффициент наведенного фотоплекроизма испытывает осцилляции, которые обусловлены интерференцией. Характерно, что энергетическое положение минимума и максимума P_1 двух различных ГП различно. Это связано с различиями в параметрах слоев GaN, вызывающими соответствующие изменения в спектре $P_1(\hbar\omega)$. Оценка толщины слоя на основании спектрального положения ближайших максимумов P_1 (рис. 4, кривая 1) и показателя преломления GaN [15] дает значение $d_c \approx 0.3$ мкм, что находится в соответствии с измеренным значением толщины слоя GaN.

Таким образом, обнаружение осцилляций P_1 характеризует выращенные слои GaN как достаточно совершенные и однородные. С другой стороны, наблюдаемые осцилляции P_1 позволяют сделать вывод о том, что создание ГП с тонкими интерференционными слоями может найти применение для получения перестраиваемых селективных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения.

Список литературы

- [1] S. Nakamura, M. Sench, N. Iwasa, S. Nagahawa, T. Yamada, T. Mukai. Jpn. J. Appl. Phys., Pt. 2, **34**, L1332 (1995).
- [2] S. Nakamura, M. Sench, Y. Nagahawa, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoko, Y. Sugimoto. Appl. Phys. Lett., **68**, 3269 (1996).
- [3] Y.C. Yeo, T.C. Chong, M.F. Li. J. Appl. Phys., **83**, 1429 (1998).
- [4] J.C. Carrano, T. Li, P.A. Greedwski, C.J. Eiting, R.D. Dupuis, J.C. Campbell. Appl. Phys. Lett., **72**, 542 (1998).
- [5] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов, С. Тилевов, Ж. Ханов. Письма в ЖТФ, **18**, № 24, 11 (1992).
- [6] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, А. Берклиев, М.Г. Дурдымурадова, О.В. Корнякова. Письма в ЖТФ, **19**, 57 (1993).

- [7] S.G. Konnikov, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', D. Melebaev, A. Berkeliev, M. Serginov, S. Tilevov. Jpn. J. Appl. Phys., **32**, Suppl. 32–3, 545 (1993).
- [8] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 1921 (1996).
- [9] В.Ю. Рудь, М. Сергинов, С. Тилевов. Письма в ЖТФ, **18**, 50 (1992).
- [10] С.Г. Конников, Д. Малобаев, В.Ю. Рудь, Л.М. Федоров. Письма в ЖТФ, **18**, 11 (1992).
- [11] Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров. ФТП, **27**, 1611 (1993).
- [12] А. Беркелиев, Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **28**, 14 (1994).
- [13] Т. Вальтер, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Г.В. Шок. ФТП, **31**, 806 (1997).
- [14] В.М. Ботнарюк, А.В. Коваль, А.В. Симашкевич, Д.А. Щербан, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 800 (1997).
- [15] *Selected Topics in Electronics and Systems*, v. 4. *Compound Semiconductor Electronics: The Age of Maturity*, ed. by M. Shur (World Scientific, 1996).

Редактор В.В. Чалдышев

Photoelectrical properties of GaN/GaP heterostructures

V.M. Botnaryuk, V.V. Bel'kov*, Yu.V. Zhilyaev*, S.D. Raevsky, V.Yu. Rud'[†], Yu.V. Rud'* , L.M. Fedorov*

State University of Moldova,
MD2009 Kishinev, Moldova

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

* A.F. Ioffe Physico-Technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Thin *n*-GaN layers were grown on *n*- and *p*-GaP substrates of (100) and (111) orientation by vapour phase epitaxy in an open chloride system. Photosensitivity spectra of isotype and anisotype heterojunctions under linear polarized illumination from GaN side were studied. Induced polarized photosensitivity has been observed. Its peculiarities caused by light interference in gallium nitride layers are being discussed.