

Фоточувствительные гетеропереходы Oх/GaAs: создание и свойства

© В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь*[¶], Е.И. Теруков*, Т.Н. Ушакова*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195257 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 22 ноября 2011 г. Принята к печати 28 ноября 2011 г.)

Предложен метод безвакуумного термического окисления кристаллов арсенида галлия в воздушной атмосфере и созданы первые фоточувствительные гетеропереходы Oх/*n*-GaAs. (Oх — естественный окисел). Исследованы стационарные вольт-амперные характеристики и спектры относительной квантовой эффективности новых структур. Обсуждаются особенности спектров фотоактивного поглощения полученных гетеропереходов. Установлены возможности применения безвакуумного термического окисления кристаллов GaAs в воздушной атмосфере для создания на их основе широкополосных гетерофотопреобразователей оптических излучений.

Широко используемые в современной полупроводниковой электронике гетеропереходы (ГП) на основе кристаллов и тонких пленок GaAs до сих пор создаются только в условиях вакуума методами жидкостной, газофазной и молекулярно-пучковой эпитаксии [1,2]. В последние годы на группе алмазоподобных полупроводников были проведены специальные исследования их термического взаимодействия с воздушной атмосферой и обнаружено замещение кислородом воздуха собственных атомов полупроводниковых соединений различных классов, которое приводит к образованию в их приповерхностной области ГП [3–6]. Важно выделить тот факт, что „вынос“ процесса формирования гетерограницы из вакуумируемого реактора на воздух открыл новые пути упрощения и соответственно замены еще применяемых в настоящий период вакуумных технологий на предложенные в данной работе безвакуумные, что становится все более важным в условиях перехода к крупномасштабному выпуску ГП на арсениде галлия и других алмазоподобных полупроводниках.

В этой связи актуальность развития безвакуумных технологий формирования новых ГП на основе GaAs непрерывно возрастает. Данная работа принадлежит к этому важному направлению и касается создания, а также первых исследований фотоэлектрических свойств новых ГП на основе гомогенных объемных кристаллов арсенида галлия.

Для получения ГП применялись ориентированные в кристаллографических плоскостях (100) и (111) пластины *n*- и *p*-GaAs с концентрацией свободных дырок $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и электронов $\sim 10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$. Гомогенные монокристаллы GaAs, использованные при создании ГП, выращивались методом направленной кристаллизации и методом Чохральского из близких к стехиометрии этого соединения расплавов.

Проведенные нами физико-технологические исследования дали возможность установить, что термообработка пластин в нормальной воздушной атмосфере воспроизводимо вызывает образование на их поверхности однородно окрашенных пленок естественного окисла (Oх) от

темно-лилового до желтого цвета с высоким удельным сопротивлением $\rho \approx 10^8 - 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$. Окраска и толщина пленок Oх контролируются температурой и временем термообработки пластин GaAs, причем изменение типа проводимости подложек GaAs не сказывалось на типе проводимости пленок Oх, которые получались всегда *p*-типа.

С целью понимания и совершенствования процесса создания ГП специально проводились два различных сопоставительных типа опытов по термообработке пластин *n*- и *p*-GaAs в воздушной атмосфере и вакууме ($\sim 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$). Эти эксперименты дали возможность показать, что термообработка GaAs в вакууме не вызывает образования на их поверхности интерференционных пленок Oх. Такие пленки появляются только после термообработки пластин GaAs, как *n*-, так и *p*-типа проводимости в воздушной атмосфере. Этот результат дает основания считать, что возникающие в приповерхностной области пластин GaAs интерференционные пленки являются продуктом взаимодействия GaAs с входящим в состав воздушной атмосферы кислородом и последующим образованием на подложке полупроводникового соединения GaAs тонкой пленки ($t_1 \approx 1 \text{ мкм}$) собственного окисла Ga₂O₃ [7].

Вполне очевидно, что такой самоорганизованный процесс окисления достаточно технологичен, поскольку не требует наличия вакуума во время проведения термообработки и контролируется только температурой и временем термообработки в постоянной окружающей Землю атмосфере, причем какие-либо ограничения на площадь исходных гомогенных пластин полупроводника вообще не возникают.

После завершения изотермической обработки и охлаждения пластин GaAs до комнатной температуры в воздушной среде путем механической шлифовки и последующей химической обработки слой окисла удалялся со всех сторон пластин, за исключением одной плоскости GaAs с наиболее совершенной пленкой Oх. В качестве омического контакта к пленке Oх использовался серебряный контактол, а к *n*-GaAs — чистый индий. Важно также отметить, что созданные на поверхности GaAs

[¶] E-mail: yuryrud@mail.ioffe.ru

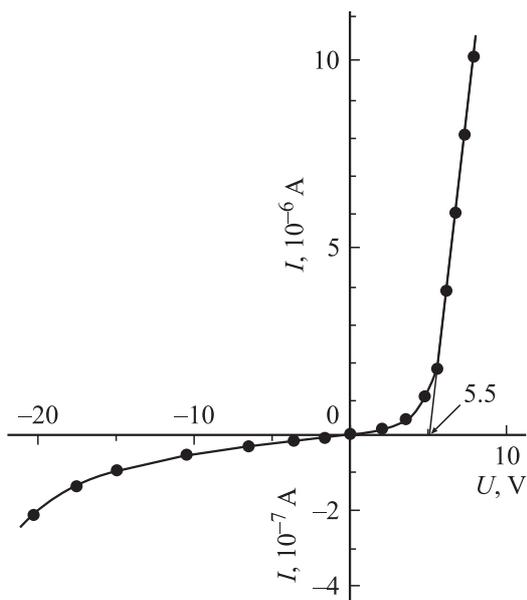


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода Oх/n-GaAs. T = 300 К. Образец 25.

пленки Oх воспроизводимо обнаруживают высокую адгезию по отношению к сколотым или химически полированным поверхностям пластин GaAs. Средние размеры полученных ГП составили ~ 5 × 5 × 0.2 мм.

Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) анизотипных ГП Oх/n-GaAs обнаружили выпрямление, характеризуемое значением коэффициента выпрямления K ≈ 10²–10³ при напряжениях смещения U = 10–20 В. На рис. 1 приведена типичная ВАХ одного из первых ГП Oх/n-GaAs, для которых пропускное направление отвечает отрицательной полярности внешнего смещения на подложке n-GaAs. В области напряжений прямого смещения U ≤ 15 В прямой ток Oх/n-GaAs подчиняется известному диодному уравнению с фактором неидеальности ~ 50. Эта особенность дает основания высказать предположение о том, что прямой ток в полученных ГП определяется туннельно-рекомбинационными процессами в активной области гетероструктур [6]. При U > 5 В (рис. 1) прямая ветвь ВАХ (рис. 1) следует соотношению

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

где напряжение отсечки U₀ ≈ 5.5 В оказывается близким к ширине запрещенной зоны пленки Ga₂O₃, возникающей вследствие взаимодействия GaAs с воздушной атмосферой, приводящего в конечном счете к замещению атомов мышьяка на кислород. Обратный ток в ГП Oх/n-GaAs подчиняется степенному закону I ∝ U^γ, где равенство γ ≈ 1 дает основания сделать предположение о несовершенстве периферии полученных ГП.

Освещение созданных ГП, как правило, сопровождается возникновением фотонапряжения и при этом

подложка n-GaAs заряжается отрицательно, что отвечает направлению выпрямления в этих ГП, и для лучших из них вольтовая фоточувствительность достигает S_V^m ≈ 1300 В/Вт, а токовая S_I^m ≈ 0.6 мА/Вт при T = 300 К. Приведенные значения параметров фоточувствительности ГП оказались достаточно хорошо воспроизводимыми и, что важно подчеркнуть, не обнаружили явных признаков деградации. Следует также указать и на то, что знак фототока в исследованных структурах не инвертировался при изменениях локализации светового зонда (диаметр ~ 0.5 мм), энергии фотонов и интенсивности вызывающего фототок излучения. Эти закономерности позволяют связать обнаруженную фоточувствительность новых ГП с существованием в них единственной активной области на гетерогранице Oх/n-GaAs.

На рис. 2 приведена типичная для новых ГП спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования η(ħω) при их освещении со стороны пленки окисла (кривая 1), а также со стороны кристалла подложки (кривая 2).

Главные закономерности спектральных зависимостей относительной квантовой эффективности фотоактивного поглощения новых ГП сводятся к следующему. При освещении ГП со стороны тонких пленок Oх (t₁ ≤ 1 мкм) длинноволновый край η(ħω) следует экспоненциальному закону и характеризуется высокой крутизной S = δ(ln η)/δ(ħω) ≈ 80–100 эВ⁻¹, что отмечается в фотоактивном поглощении для ГП на прямозонных алмазоподобных полупроводниках и в точности соответствует спектрам η(ħω) ГП на основе GaAs [8]. Переход от экспоненциальной зависимости в спек-

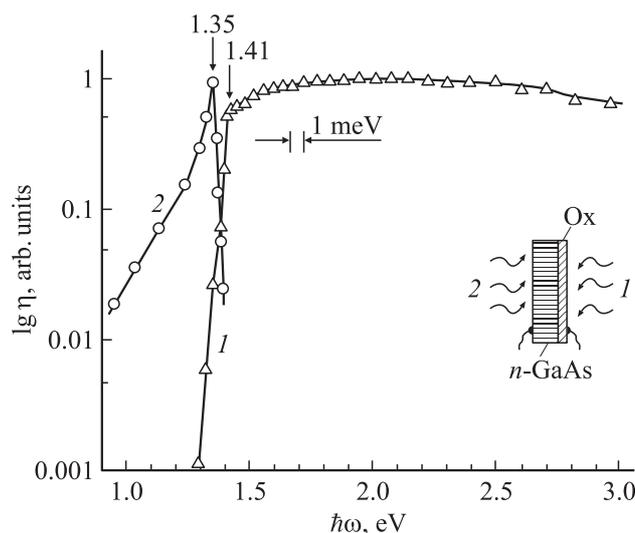


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования для гетероперехода Oх/n-GaAs (образец 24) при освещении гетероперехода со стороны пленки Oх (кривая 1) и со стороны подложки n-GaAs (кривая 2). T = 300 К. На вставке показаны использованные при измерениях спектров η(ħω) геометрии освещения гетероперехода.

трах $\eta(\hbar\omega)$ к насыщению во всех полученных ГП Ох/*n*-GaAs (рис. 2, кривая 1), причем, как и для других типов ГП из GaAs [8], наблюдается, как правило, при практически совпадающей энергии фотонов $\hbar\omega_0 \approx 1.41$ эВ при $T = 300$ К, что согласуется со значением ширины запрещенной зоны GaAs [8,9].

Из рис. 2 (кривая 1) также видно, что в области $\hbar\omega > E_G$ фоточувствительность достигает максимальной величины и остается на высоком уровне. Следовательно, в новых ГП проявился типичный для идеальных ГП эффект окна, в результате чего значение η сохраняется на высоком уровне в диапазоне между ширинами запрещенных зон контактирующих материалов [1,10,11]. Этот факт дает основания полагать, что концентрация дефектов рассогласования на впервые созданной гетерогранице Ох/*n*-GaAs оказывается достаточно низкой, из-за чего коротковолновый спад η в полученных ГП фактически подавляется (рис. 2, кривая 1).

Резкий коротковолновый спад η для полученных ГП Ох/*n*-GaAs возникает с переходом к их освещению со стороны подложек (рис. 2, кривая 2). Этот спад η по своему энергетическому положению отвечает области экспоненциального нарастания квантовой эффективности при $\hbar\omega \geq 1.3$ эВ и связан с наступлением прямых межзонных переходов в ГП Ох/*n*-GaAs при освещении со стороны тонкой пленки собственного окисла, что в конечном счете и обеспечивает быстрый рост концентрации фотогенерированных пар. В случае же освещения этого ГП со стороны подложки *n*-GaAs с ростом энергии падающих фотонов слой фотогенерированных пар все сильнее прижимается к освещаемой поверхности подложки и одновременно удаляется от активной области ГП на расстояния, превышающие длину диффузионного смещения неравновесных носителей заряда. Именно поэтому, начиная с некоторых энергий падающих фотонов, фотогенерированные при $\hbar\omega > 1.35$ эВ пары перестают достигать активной области ГП и наступает резкий спад η . В этом, собственно, и заключается основная причина установленного различия в спектрах $\eta(\hbar\omega)$ ГП Ох/*n*-GaAs в зависимости от геометрии фотовозбуждения (рис. 2, кривые 1 и 2).

Анализ длинноволнового края фотоактивного поглощения $\eta(\hbar\omega)$ созданных ГП Ох/*n*-GaAs в диапазоне энергий падающих фотонов $\hbar\omega \approx 1.3-1.45$ эВ показал, что в координатах $(\eta\hbar\omega)^2 = f(\hbar\omega)$ экспериментальные зависимости $\eta(\hbar\omega)$ линеаризуются, что согласно теории фундаментального поглощения в тетраэдрических полупроводниках [11] позволяет связать его с прямыми межзонными переходами, а экстраполяция такой зависимости вида $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$ дает ширину запрещенной зоны для прямых переходов $E_G^d = 1.37$ эВ в GaAs при $T = 300$ К, что удовлетворительно согласуется с литературными данными [9,12].

Таким образом, предложен и развит метод безвакуумного термического окисления кристаллов арсенида галлия в воздушной атмосфере и впервые созданы фоточувствительные гетеропереходы Ох/*n*-GaAs. Исследованы стационарные вольт-амперные характеристики и

спектры относительной квантовой эффективности новых структур. Обсуждаются особенности спектров фотоактивного поглощения полученных ГП. Сделаны выводы о возможностях применения безвакуумного термического окисления кристаллов GaAs кислородом воздушной атмосферы для создания на их основе широкополосных гетерофотопреобразователей оптических излучений.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, N.N. Ledentsov. Ioffe Institute 1918–1998. Development and Research Activities (Ioffe Institute) p. 68.
- [2] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.П. Хвостиков. ФТП, **33**, 747 (1999).
- [3] Г.А. Ильчук, В.И. Иванов-Омский, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Р.Н. Бекимбетов, В.О. Украинец. ФТП, **34**, 1099 (2000).
- [4] Г.А. Ильчук, Р.Ю. Петрусь, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **33**, 24 (2007).
- [5] Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **33** (7), 87 (2007).
- [6] Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнеж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков, В.О. Украинец. ФТП, **40**, 1356 (2006).
- [7] С. Tatsuyama, S. Ichimura, H. Iwakuro. Hpn. J. Appl. Phys., **21**, L25 (1982).
- [8] С.Е. Никитин, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков, N. Fernelius, F. Goldstein. ФТП, **38**, 407 (2004).
- [9] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*. Справочник, под ред. А.В. Новоселовой (М., Наука, 1978).
- [10] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).
- [11] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир, 1975).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).

Редактор Т.А. Полянская

Ox/*n*-GaAs heterojunctions photosensitivity: creation and properties

V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'* , E.I. Terukov* , T.N. Ushakova*

St. Petersburg State Polytechnic University,
195257 St. Petersburg, Russia
Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Suggested the nonvacuum method of gallium arsenide thermal oxidation in air environmen and created the first photosensitivity heterojunction Ox/*n*-GaAs. Investigated the stationary current–voltage characteristics of the relative quantum efficiency of the new structures. The peculiarity of the discussed of photoactive absorption spectra for obtained heterojunction. Arrange the possibility of the applications of nonvacuum thermal oxidation of the GaAs crystals in the air atmosphere for creation on their basis the broad-strip photoconversion of the optical radiations.