

03;06

## Фоточувствительность гетеропереходов, полученных термическим окислением InP

© Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: yuryrud@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2006 г.

Методом термического окисления впервые получены гетеропереходы  $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$ . Исследованы стационарные вольт-амперные характеристики и фотовольтаический эффект полученных структур в естественном и линейно-поляризованном излучении. Обсуждаются особенности токопереноса и широкополосная фоточувствительность. Сделан вывод о возможностях применения метода термического окисления InP для создания на его основе гетерофотоэлементов.

PACS: 71.20.Nr, 78.55.-m.

Гетеропереходы (ГП) на прямозонных кристаллах фосфида индия InP ( $E_G^d = 1.28$  eV,  $T = 300$  K [1]) вызывают интерес исследователей при разработке эффективных радиационно стойких фотопреобразователей естественного и линейно поляризованного излучения (ЛПИ) [2–5]. Квантовая эффективность фотопреобразования солнечного излучения в ГП из InP, которые до сих пор создавались нанесением на его поверхность тонких ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) пленок CdS или окисла индия и олова ITO, достигает  $\approx 18\%$  при площади около  $0.5 \text{ cm}^2$ , а поляризационная квантовая эффективность  $\approx 0.13 \text{ A/W} \cdot \text{deg}$  ( $T = 300$  K), что соответствует мировому уровню [3,6]. В этой связи актуальность создания новых технологий и изучения фотоэлектрических явлений в ГП из InP непрерывно возрастает. Данная работа принадлежит этому важному направлению и посвящена первым исследованиям фоточувствительности новых структур естественный окисел (Ox)/InP. Развитый в данной работе новый технологический подход может существенно упростить процесс формирования гетероперехода на основе InP, снизить его стоимость, а также решить острую проблему обеспечения экологи-

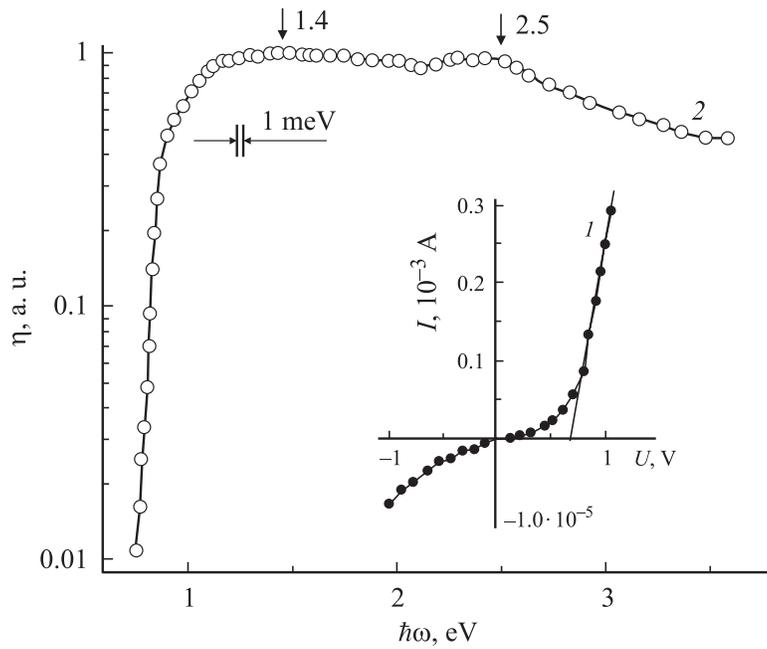
ческой безопасности фотопреобразователей, исключив из их состава высокотоксичный кадмий [7].

Для получения ГП использовались ориентированные в плоскости (100) пластины фосфида индия с концентрацией свободных дырок  $p \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ K}$ . Выполненные нами физико-технологические исследования показали, что термообработка в нормальной воздушной среде электрически однородных пластин  $p\text{-InP}$  вызывает образование на их поверхности однородно окрашенных в темно-лиловый цвет тонких пленок ( $d_1 \approx 1 \mu\text{m}$ )  $n$ -типа проводимости. Концентрация свободных электронов в таких пленках достигает  $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  и в области температур 80–400 К остается практически постоянной. Окраска пленок определяется температурой и временем процесса термообработки пластин  $p\text{-InP}$ . Следует отметить, что пленки обнаруживают высокую адгезию по отношению к сколотым и механически, а затем химически полированным поверхностям пластин  $p\text{-InP}$ . Важно указать, что после термообработки пластин  $p\text{-InP}$  при неизменных технологических условиях, но в вакууме  $\sim 10^{-3} \text{ mm Hg}$  интерференционные пленки на поверхности пластин  $\text{InP}$  не возникают. Это обстоятельство дает основание предположить, что возникающие в приповерхностной области пластин  $\text{InP}$  пленки связаны с взаимодействием фосфида индия с кислородом воздуха и образованием пленки собственного окисла.

Этот самоорганизованный процесс окисления достаточно высокотехнологичен и определяется в основном температурой и временем термообработки. Он может быть реализован практически на любых площадях исходных пластин  $\text{InP}$ .

После завершения термообработки пластин  $p\text{-InP}$  в нормальной воздушной среде путем механической и химической полировки слой окисла удаляется со всех сторон пластины  $\text{InP}$ , за исключением содержащей наиболее совершенную пленку  $\text{Ox}$ .

Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) анизотипных гетеропереходов  $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$  обнаружили четкое выпрямление. На рис. 1 (кривая 1) представлена типичная ВАХ одной из таких структур. Пропускное направление в них отвечает положительной полярности внешнего смещения на пластине  $p\text{-InP}$ . В области напряжений смещения  $U \leq 0.7 \text{ V}$  прямой ток этих ГП следует известному диодному уравнению с фактором неидеальности  $\approx 3.5$ , что можно связать с туннельно-рекомбинационной природой прямого тока [8].



**Рис. 1.** Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода (кривая 1) и спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta(\hbar\omega)$  (кривая 2) гетероперехода  $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$  при  $T = 300$  К.

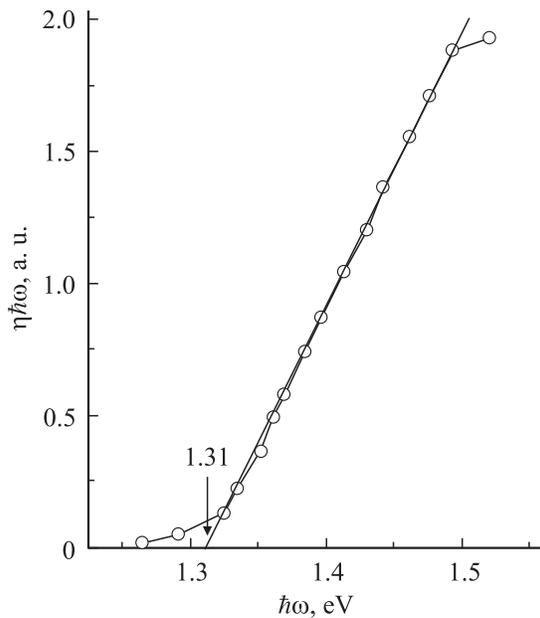
При напряжениях смещения  $|U| \approx 1$  В в лучших из полученных ГП коэффициент выпрямления достигает  $\approx 80 \div 90$ .

Прямой ток с ростом  $U > 0.7$  В обычно следует линейному закону

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

где напряжение отсечки  $U_0 \approx 0.7$  В, а остаточное сопротивление  $R_0 \approx 10^3 \Omega$  при  $T = 300$  К.

Освещение полученных ГП неполяризованным излучением вызывает появление фотонапряжения, причем кристалл  $p\text{-InP}$  заряжается положительно, что согласуется с направлением выпрямления.



**Рис. 2.** Зависимость  $(\eta\hbar\omega)^2 = f(\hbar\omega)$  для гетероперехода  $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$  при  $T = 300\text{ K}$ .

Знак фотонапряжения сохраняется во всей области fotocувствительности ГП и не зависит от локализации светового зонда на фотоприемной плоскости структур. В лучших ГП фотонапряжение холостого хода  $\sim 0.83\text{ V}$  при  $T = 300\text{ K}$ . Максимальная вольтовая и токовая fotocувствительность этих ГП достигает  $300\text{ V/W}$  и  $2\text{ mA/W}$  соответственно и реализуется при их освещении со стороны пленки окисла.

На рис. 1 (кривая 2) приведена типичная спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотообразования  $\eta(\hbar\omega)$ , которая реализуется при освещении ГП со стороны пленки окисла. Видно, что высокая fotocувствительность при этом наблюдается в широкой спектральной области от  $0.8$  до  $3.5\text{ eV}$ . Длинноволновый край  $\eta(\hbar\omega)$ , как видно из рис. 2, линейризуется в координатах  $(\eta\hbar\omega)^2 - \hbar\omega$ , что в соответствии с теорией фундаментального поглощения в по-

лупроводниках [8] позволяет связать его с прямыми межзонными переходами, а экстраполяция зависимости  $(\eta\hbar\omega)^2 \rightarrow 0$  дает ширину запрещенной зоны для прямых переходов  $E_G^d = 1.31$  eV при  $T = 300$  K, что удовлетворительно согласуется с известным для InP значением ширины запрещенной зоны [1].

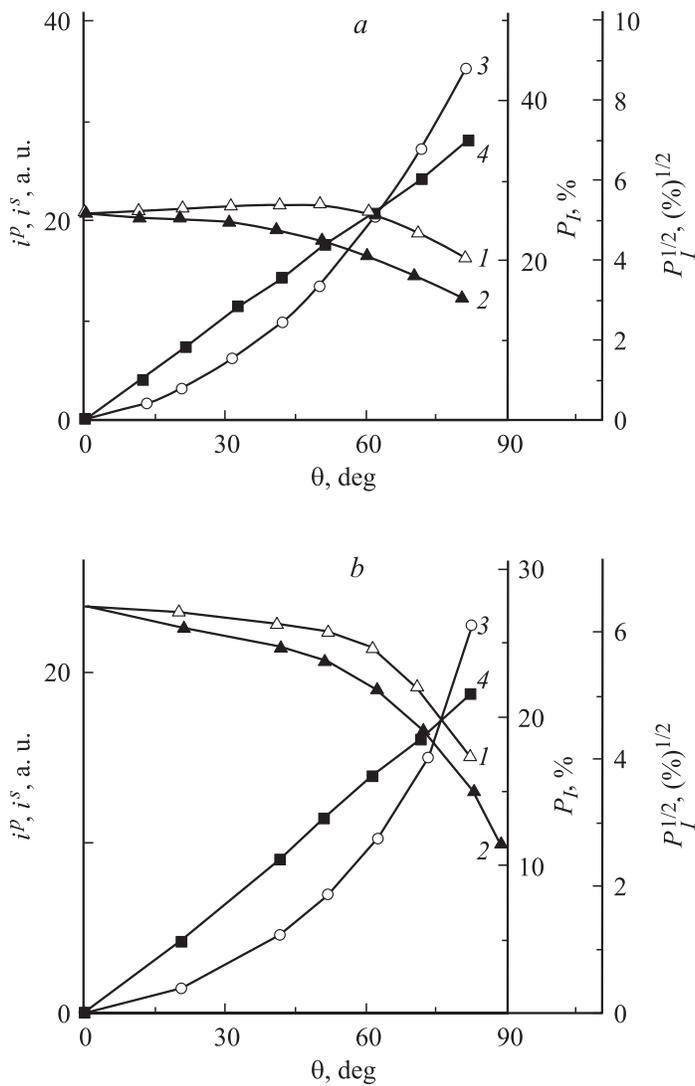
При освещении полученных ГП со стороны пластины InP (толщины  $d \cong 1 \mu\text{m}$ ) спектральная зависимость  $\eta(\hbar\omega)$  имеет селективный характер и ее резкий коротковолновый спад по своему энергетическому положению соответствует значению ширины запрещенной зоны  $E_G^d$ , что и должно быть в случае прямозонного полупроводника.

Типичный спектр фоточувствительности гетероперехода Oх/InP, наблюдаемый при его освещении со стороны широкозонной пленки собственного окисла (рис. 1), можно характеризовать высоким значением полной ширины спектра  $\eta(\hbar\omega)$  на его полувысоте  $\delta_{1/2} \cong 2.38$  eV, что превышает значение  $\delta_{1/2} \cong 1.9$  eV для ГП ПГО/In [5]. Это обстоятельство можно связать с более высоким совершенством гетерограницы в ГП, полученном в процессе термического окисления InP. Важно подчеркнуть, что в полученных окислением ГП Oх/InP в широкой спектральной области от 1.4 до 2.5 eV квантовая эффективность фотопреобразования остается на максимальном уровне.

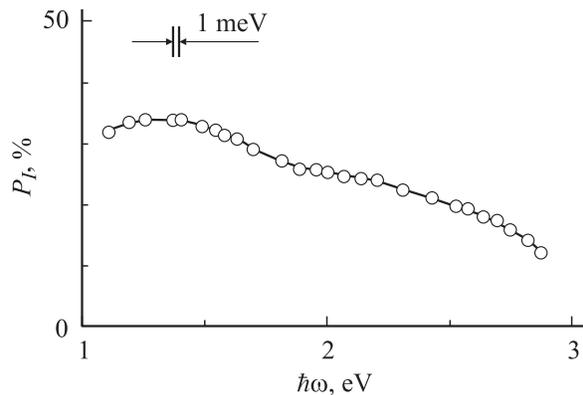
При освещении ГП линейно-поляризованным излучением вдоль нормали к поверхности пленки окисла фототок короткого замыкания  $i$  не проявляет какой-либо зависимости от пространственной ориентации вектора электрического поля световой волны **E**. Этот экспериментальный результат служит основанием для заключения о том, что фотоактивное поглощение во всей области фоточувствительности таких ГП изотропное, а естественный фотоэффект отсутствует и коэффициент  $P_N = 0$  [9].

Когда угол падения излучения на приемную плоскость структуры  $\theta \neq 0$ , как видно из рис. 3, *a* и *b*, в ГП возникает наведенный фотоэффект  $P_I > 0$ , величина которого изменяется по спектру. К тому же в пределах области фоточувствительности обнаружена трансформация вида угловых зависимостей фототока  $i^p(\theta)$  при **E**, параллельном плоскости падения (ПП) излучения.

На рис. 4 приводится типичная для ГП Oх/InP спектральная зависимость  $P_I(\hbar\omega)$  при  $\theta \cong 70^\circ$ . Обращает на себя внимание выраженной зависимости величины  $P_I$  от энергии падающих фотонов, что свидетельствует о влиянии интерференции в пленке собственного



**Рис. 3.** Зависимости фототоков  $i^p$  (1) и  $i^s$  (2), а также коэффициента наведенного фотоплекроизма  $P_I$  (3) и  $P_I^{1/2}$  (4) от угла падения  $\theta$  для гетероперехода  $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$  при  $T = 300\text{ K}$ ,  $\hbar\omega, \text{eV}$ : 1.41 (a), 2.07 (b).



**Рис. 4.** Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоэффекта гетероперехода  $n$ -Ох/ $p$ -InP при  $T = 300$  К,  $\theta = 70^\circ$ .

окисла на характер спектра наведенного фотоэффекта [10]. Эта закономерность может быть использована в разработках эффективных просветляющих покрытий на требуемую спектральную область.

Таким образом, на основании изучения процесса взаимодействия фосфида индия с воздушной средой установлено, что его термическое окисление может найти применение в разработках высокоэффективных и дешевых фотопреобразователей естественного и линейно поляризованного излучения на основе InP.

Работа выполнялась в рамках Программы ОФН РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниках“.

## Список литературы

- [1] Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973.
- [2] Alferov Zh.I., Andreev V.M., Ledentsov N.N. Ioffe Institute 1918–1998. Development and Research Activities. Ioffe Institute, 1998.
- [3] Botnaryuk V.M., Gorchak L.V., Grigorjeva C.M., Kogan M.B., Kozyneva T.A., Lyubashevskaya L.L., Russu C.V., Simashkevich A.V. // Sol. Energy Mater. 1990. Т. 20. Р. 359.

- [4] Ботнарюк В.М., Горчак Л.В., Диакону И.И., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ФТП. 1998. Т. 32. В. 1. С. 72.
- [5] Ботнарюк В.М., Горчак Л.В., Диакону И.И., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 5. С. 72.
- [6] Konnikov S.G., Rud' V.Yu., Rud' Yu.V., Medvedev D., Berkovich F., Sergimov M., Tilevov S. // Jpn. J. Appl. Phys. 1993. V. 32. P. 515.
- [7] Hariskos D., Spiering S., Povalla M. // Thin Solid Films. 2005. V. 480–481. N 1. P. 99.
- [8] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
- [9] Кесеманлы Ф.П., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ФТП. 1996. Т. 30. С. 1921.
- [10] Кесеманлы Ф.П., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ФТП. 1999. Т. 33. С. 513.