

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 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 InP не возникают. Это обстоятельство дает основание предположить, что возникающие в приповерхностной области пластин 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 InP .

После завершения термообработки пластин $p\text{-InP}$ в нормальной воздушной среде путем механической и химической полировки слой окисла удаляется со всех сторон пластины InP , за исключением содержащей наиболее совершенную пленку 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 ≈ 3.5 , что можно связать с туннельно-рекомбинационной природой прямого тока [8].

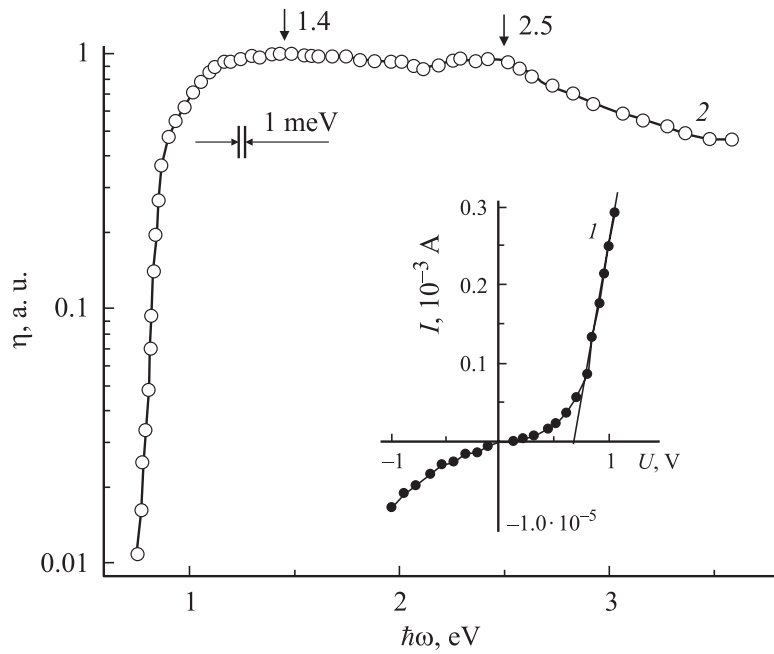


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода (кривая 1) и спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ (кривая 2) гетероперехода $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$ при $T = 300\text{ K}$.

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

Прямой ток с ростом $U > 0.7\text{ V}$ обычно следует линейному закону

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

где напряжение отсечки $U_0 \approx 0.7\text{ V}$, а остаточное сопротивление $R_0 \approx 10^3\ \Omega$ при $T = 300\text{ K}$.

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

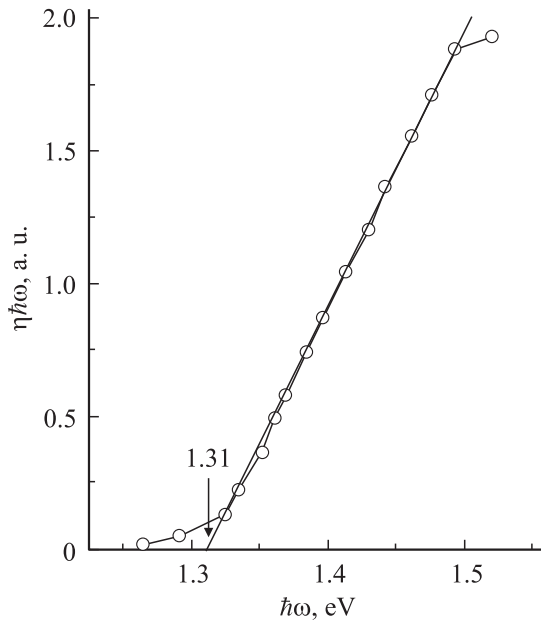


Рис. 2. Зависимость $(\eta\hbar\omega)^2 = f(\hbar\omega)$ для гетероперехода $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$ при $T = 300\text{ K}$.

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 V/W и 2 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 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 \mathbf{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 \mathbf{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

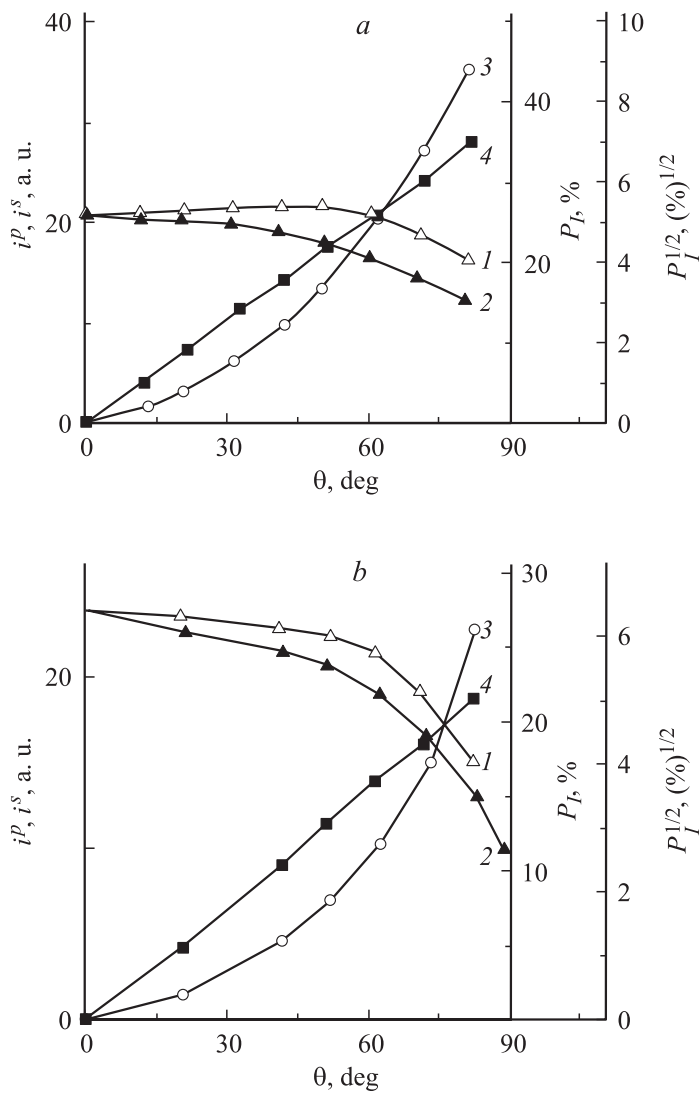


Рис. 3. Зависимости фототоков i^p (1) и i^s (2), а также коэффициента наведенного фотоплекроизма P_I (3) и $P_I^{1/2}$ (4) от угла падения θ для гетероперехода $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$ при $T = 300\text{ K}$, $\hbar\omega, \text{eV}$: 1.41 (a), 2.07 (b).

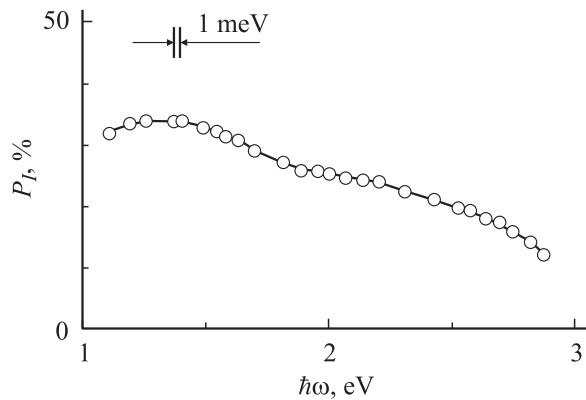


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоэффекта гетероперехода $n\text{-Ox}/p\text{-InP}$ при $T = 300\text{ K}$, $\theta = 70^\circ$.

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. T. 20. P. 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.