

Создание и фотоэлектрические свойства гетероструктур Oх/p-InAs

© В.Ю. Рудь[¶], Ю.В. Рудь*, Е.И. Торуков*, Т.Н. Ушакова*, М.С. Сергинов⁺

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

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

⁺ Туркменский государственный университет им. Махтумгули,
744000 Ашхабад, Туркменистан

(Получена 22 марта 2012 г. Принята к печати 2 апреля 2012 г.)

Впервые методом поверхностного термического взаимодействия арсенида индия с нормальной воздушной атмосферой Земли получены гетероструктуры, представляющие собой контакт тонкой пленки собственного окисла Oх арсенида индия с пластиной InAs. Исследованы первые вольт-амперные характеристики и спектральные зависимости fotocувствительности гетероструктур Oх/p-InAs. Впервые для этих гетероструктур обнаружено выпрямление и анализируются спектральные зависимости fotocувствительности. Сделан вывод о возможности использования новой технологии для получения широкополосных фотодетекторов оптического излучения Oх/p-InAs.

В широком семействе бинарных алмазоподобных полупроводниковых соединений A^{III}B^V арсенид индия InAs по значению своей ширины запрещенной зоны ($E_G^{\text{InAs}} = 0.36$ эВ, $T = 300$ К) занимает следующую за антимонидом индия InSb позицию, а роль InAs в создании длинноволновых фотодетекторов оптического излучения непрерывно расширяется по мере совершенствования технологий получения разнообразных гетероструктур (ГС) на его основе [1–5]. Поэтому актуальность становления новых технологий и расширения комплексных исследований фотоэлектрических явлений в ГС на основе InAs стремительно растет. Настоящая работа принадлежит этому важному направлению полупроводниковой фотоэлектроники и включает результаты первых экспериментальных исследований новых ГС Oх/p-InAs, построенных на самоорганизованном контакте тонких пленок собственного окисла InAs (Oх) с поверхностью кристалла подложки p-InAs. Предложенный в данной работе новый самоорганизованный безвакуумный процесс термического окисления бинарного полупроводникового соединения InAs может обеспечить (а) значительное упрощение известных вакуумных технологий создания гетероструктур на основе InAs и (б) снижение коммерческой стоимости их получения.

1. Создание гетероструктур Oх/p-InAs

При создании ГС на основе InAs в качестве исходных применялись специально ориентированные в кристаллографических плоскостях (100) и (111) электрически однородные пластины арсенида индия с концентрацией свободных носителей заряда $10^{16} - 10^{17}$ см⁻³ при $T = 300$ К. Такие пластины изготавливались скалыванием на воздухе из монокристаллических слитков InAs n- и p-типа проводимости, выращенных направленной кристаллизацией в вакуумированных кварцевых тиглях

как в отсутствие преднамеренного легирования расплава InAs примесными элементами, так и при специальном введении в близкий к стехиометрии арсенида индия расплав посторонних относительно индия и мышьяка химических элементов чистотой не ниже 99,999 вес%.

При разработке новой технологии создания ГС на монокристаллических подложках InAs p- и n-типа проводимости в отсутствие градиента температур вдоль пластин арсенида индия в качестве варьируемых параметров использовались температура и время термообработки исходных подложек. Выполненный нами цикл пионерских исследований позволил выявить главную закономерность такой термообработки пластин n- и p-InAs в нормальной воздушной атмосфере. Она заключалась в том, что на поверхности исходных пластин n- и p-InAs со средними размерами $1 \times 4 \times 4$ мм³ воспроизводимо формировались тонкие пленки ($t_1 \approx 1$ мкм) собственного окисла арсенида индия с однородной по площади пластин окраской темно-лилового или золотисто-желтого цветов. Окраска пленок Oх, образующихся в приповерхностной области пластин p- и n-InAs, в основном определяется выбором температуры и времени термообработки пластин InAs, что дает возможность связать происходящие изменения в их свойствах с образованием в приповерхностном слое исходных пластин InAs тонких интерференционных пленок собственного окисла Oх арсенида индия, свойства которых определяются в основном условиями температурной обработки пластин InAs в окружающей воздушной атмосфере Земли.

Для понимания достигнутых изменений в свойствах пластин InAs весьма важно учесть тот факт, что при идентичных рассмотренным выше условиям термообработки InAs замена воздушной среды на вакуум ($\leq 10^{-3}$ мм рт.ст.) прерывает какие-либо рассмотренные выше изменения в окраске поверхности исходных пластин InAs. Это важное обстоятельство является достаточно убедительным аргументом в пользу заключения о том, что процесс самоорганизованного роста интерференционных пленок Oх на кристаллографических

[¶] E-mail: rudvas.spb@gmail.com

плоскостях (100) и (111) арсенида индия фактически не выявил влияния кристаллографической ориентации подложек InAs на окраску возникающих на этих подложках интерференционных пленок. При этом также важно подчеркнуть, что термообработка пластин InAs в условиях вакуума ($\leq 10^{-3}$ мм рт. ст.) воспроизводимо исключает образование интерференционных пленок Oх на поверхности подложек InAs. Это обстоятельство позволяет считать, что возникающие на поверхности пластин InAs пленки собственного окисла Oх являются результатом термического взаимодействия приповерхностных атомов подложки In и As с кислородом воздушной атмосферы, в результате чего в системе InAs–воздушная атмосфера достигается образование тонких пленок собственного окисла Oх в окрестности поверхности подложек InAs.

Развитая в проведенном цикле исследований безвакуумная технология на основе самоорганизованного процесса поверхностного окисления пластин InAs оказалась высокотехнологичным способом образования структур на основе арсенида индия. Важно при этом подчеркнуть, что процесс окисления легко контролируется выбранными значениями температуры и длительности термообработки подложек InAs в нормальной воздушной атмосфере.

В результате проведения процесса самоорганизованного окисления исходная пластина InAs оказывается покрытой со всех ее сторон сплошной тонкой окрашенной пленкой собственного окисла Oх, которая затем путем шлифовки и химического травления удалялась со всех плоскостей подложки, за исключением одной, которая, как правило, выбиралась наиболее совершенной среди пленок, выращенных на разных гранях одной и той же пластины.

2. Фотоэлектрические свойства структур Oх/p-InAs

Исследования стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) полученных ГС показали, что гетероструктуры *n*-Oх/*p*-InAs воспроизводимо обнаруживают четкое выпрямление. Омическим контактом к подложкам InAs *p*-типа проводимости служила серебряная паста, а к пленкам *n*-Oх применялся чистый индий. Тип проводимости подложек InAs и пленок собственного окисла определялся по знаку термоэдс вблизи комнатной температуры. На рис. 1 (кривая 1) приведена типичная ВАХ одной из полученных гетероструктур при $T = 300$ К. Пропускному направлению во всех исследованных гетероструктурах всегда отвечала положительная полярность внешнего смещения на подложке *p*-InAs.

Коэффициент выпрямления полученных структур K , определенный из отношения значений токов при прямом и обратном направлениях смещения (рис. 1, кривые 1 и 2), в случае лучших ГС при напряжениях смещения $U \cong 1$ В достигал значений $K \cong 45$ при $T = 300$ К. Прямой ток в исследованных ГС (рис. 1, кривая 1) с ростом

$U > 0.5$ В обычно следует линейному закону

$$I = (U - U_0)/R_0, \quad (1)$$

где напряжение отсечки $U_0 \cong 0.5$ В, а остаточное сопротивление $R_0 \cong 10^4 - 10^5$ Ом при $T = 300$ К.

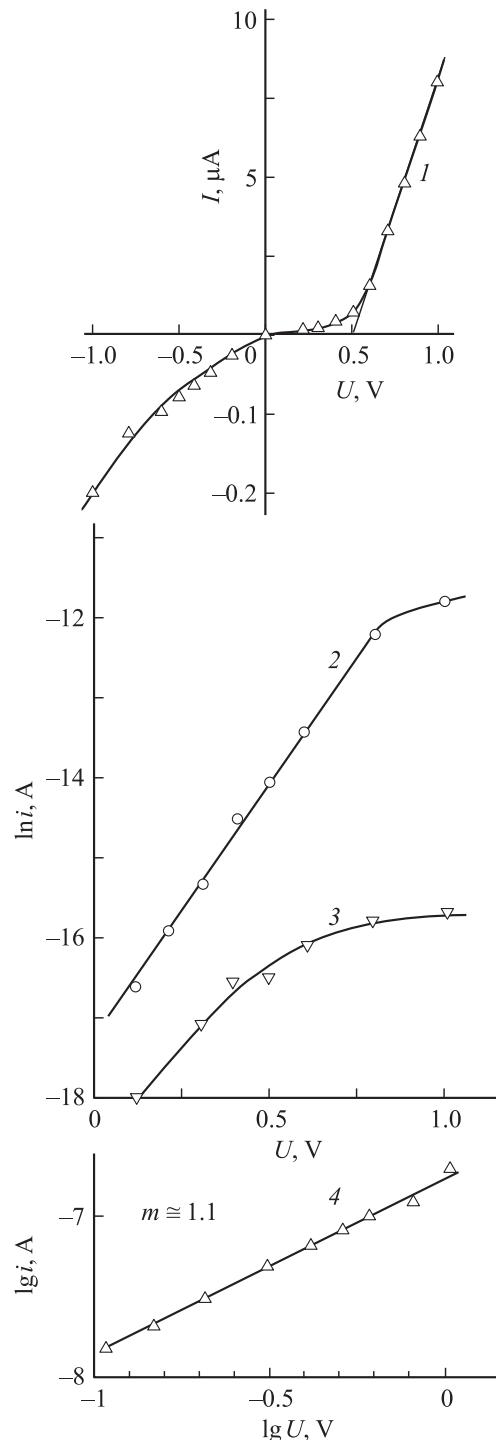


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероструктуры Oх/*p*-InAs при $T = 300$ К в обычном (кривая 1), полулогарифмическом (кривая 2 и 3) и двойном логарифмическом (кривая 4) масштабах. Пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на кристалле подложки *p*-InAs. Образец 8.

Начальный участок прямых ветвей ВАХ полученных гетероструктур $Ox/p\text{-InAs}$ (рис. 1, кривая 2) в области напряжений смещения $U < 0.7$ В подчиняется известному диодному уравнению [6,7]

$$I = I_S \exp\{eU/\beta kT - 1\}, \quad (2)$$

где ток насыщения I_S для исследованных ГС $Ox/p\text{-InAs}$ обычно не выходит за пределы 10^{-7} – 10^{-8} А при $T = 300$ К, а фактор неидеальности $\beta \cong 4$ – 6 , на основании чего можно высказать предположение о том, что токоперенос в таких самоорганизованных ГС ограничивается в основном рекомбинационными потерями [8,6].

Обратная ветвь стационарных ВАХ для ГС $Ox/p\text{-InAs}$ в исследованном диапазоне напряжений смещения (рис. 1, кривая 4) подчиняется степенному закону $I \propto U^m$ с показателем степени $m \cong 1.1$, что дает основания связать прохождение тока в полученных ГС с туннельным механизмом токопереноса либо с его ограничением пространственным зарядом в режиме насыщения скорости движения носителей заряда [9].

3. Фотоактивное поглощение гетероструктур $Ox/p\text{-InAs}$

При освещении полученных ГС $Ox/p\text{-InAs}$ проявляется фотовольтаический эффект, который доминирует в условиях попадания оптического излучения в активную область таких ГС со стороны тонкой пленки естественного окисла Ox . Исследования ГС показали, что для лучших из созданных структур максимальная вольтовая чувствительность в диапазоне линейности люкс-вольтовой характеристики при $T = 300$ К достигает $S_u^m \cong 410$ В/Вт при $T = 300$ К, причем какие-либо деградационные явления в этих ГС не обнаруживались.

Экспоненциальный рост относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(h\omega)$ в исследованных ГС $Ox/p\text{-InAs}$ при их освещении со стороны пленки Ox , как видно из рис. 2, начинается при энергии падающих фотонов $h\omega > 0.5$ эВ и обнаруживает максимум в диапазоне $h\omega \cong 0.8$ – 1 эВ.

Из рис. 2 хорошо видно, что при освещении ГС $Ox/p\text{-InAs}$ со стороны пленки собственного окисла Ox высокая фоточувствительность $\eta(h\omega)$ проявляется в широкой спектральной области 0.6 – 1.5 эВ (рис. 2). Полная ширина спектров относительной квантовой эффективности фотопреобразования в лучших ГС $Ox/p\text{-InAs}$ на их полувысоте $\delta_{1/2} \cong 1.1$ эВ при $T = 300$ К. Такое обнаружение проявления широкополосного характера фотопреобразования в созданных новых гетероструктурах $Ox/p\text{-InAs}$ свидетельствует в пользу достаточно высокого совершенства гетерограницы в созданных ГС нового типа, что с учетом впервые продемонстрированной возможности создания таких ГС в безвакуумном самоорганизованном процессе термического окисления арсенида индия представляет возможности упрощения технологии и обеспечения возможности дальнейшего

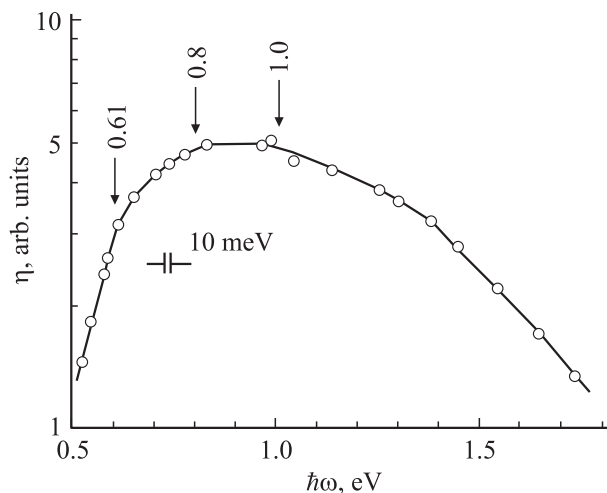


Рис. 2. Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктуры $Ox/p\text{-InAs}$ при $T = 300$ К в условиях ее освещения со стороны пленки собственного окисла Ox . Образец 10.

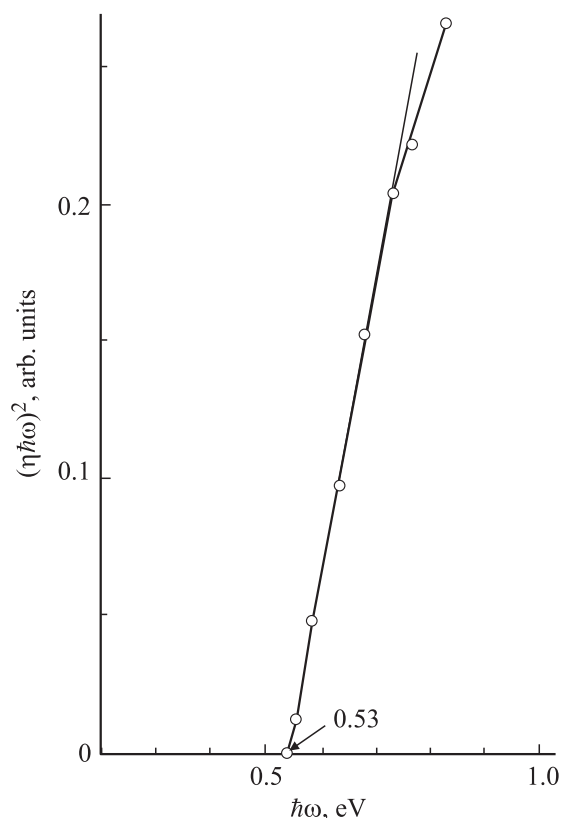


Рис. 3. Зависимость $(\eta h\omega)^2 = f(h\omega)$ гетероструктуры $Ox/p\text{-InAs}$ при $T = 300$ К. Образец 10.

снижения коммерческой стоимости таких ГС по отношению к структурам, получаемым в условиях высокого вакуума.

Длинноволновый край относительной квантовой эффективности $\eta(h\omega)$ для полученных ГС $Ox/p\text{-InAs}$ в

условиях освещения со стороны тонкой пленки Ох, как это следует из рис. 3, линейризуется в координатах $(\eta h\omega)^2 = f(h\omega)$, что, исходя из теории фундаментального поглощения в алмазоподобных полупроводниках [6,9], дает основания связать его с прямыми межзонными переходами, тогда как экстраполяция произведения $(\eta h\omega)^2 \rightarrow 0$ (рис. 3) позволяет оценить ширину запрещенной зоны для прямых межзонных оптических переходов $E_G^{\text{dir}} \cong 0.53$ эВ при $T = 300$ К, что превышает известное для InAs значение E_G^{dir} . Причина обнаруженного несоответствия в значениях E_G^{dir} по отношению к определенным из анализа спектров коэффициента оптического поглощения может быть связана с особенностями проведенной в данном исследовании термообработки InAs в воздушной среде. Очевидно, что для детального выяснения причин данной особенности необходимы дополнительные исследования.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе открыта и впервые реализована возможность использования термического взаимодействия арсенида индия с окружающей воздушной средой для безвакуумного самоорганизованного создания новых фотопреобразовательных гетероструктур Ох/*p*-InAs, которые могут найти применение в широкополосных фотопреобразователях оптического излучения длинноволнового спектрального диапазона и дают основания связать его с прямыми межзонными переходами, тогда как последующая экстраполяция зависимости $(\eta h\omega)^2 \rightarrow 0$ позволяет оценить ширину запрещенной зоны для прямых оптических переходов $E_G^{\text{dir}} \cong 0.53$ эВ при $T = 300$ К, что превышает известное для InAs значение ширины запрещенной зоны [5,9].

Список литературы

- [1] Н.А. Горюнова. *Химия алмазоподобных полупроводников* (Л., Изд-во ЛГУ, 1963).
- [2] В.И. Стафеев. *ФТП*, **44**, 232 (2010).
- [3] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [4] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника* (М., Мир, 1976).
- [5] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*, под ред. А.В. Новоселовой (М., Наука, 1979).
- [6] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*, под ред. Р.А. Сурица. В 2-х кн. (М., Мир, 1973).
- [7] Г. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [8] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).
- [9] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника. Свойства материалов. Справочник* (Киев, Наук. думка, 1975).

Редактор Л.В. Беляков

Creation and photoelectrical properties of Ох/*p*-InAs heterostructures

V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'* , E.I. Terukov* , T.N. Ushakova* , M.S. Serginov⁺

St. Petersburg State Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

⁺ Mahtumkuly Turkmenian State University,
744000 Ashgabat, Turkmenistan

Abstract For the first time by method of surface-thermal interactions of InAs crystals with the normal air atmospheric of Earth was obtained the first heterostructures which present itself the contact of thin film oxide of InAs compounds with the surface of InAs plate. The first *I*-*V*-characteristics and spectral dependences of the photosensitivity of obtained Ох/*p*-InAs heterostructures were investigated and discussed. The new technology can be applied to the creation of photoconversion structures based on indium arsenide.