

Создание и свойства точечных структур на монокристаллах n -InSe

© Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнэж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь^{*,†}, Ю.В. Рудь⁺, В.О. Украинец

Национальный университет „Львівська політехніка“,
79013 Львов, Украина

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

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

(Получена 25 октября 2006 г. Принята к печати 28 февраля 2007 г.)

Методом электрического разряда созданы точечные структуры на основе монокристаллов InSe. Исследованы стационарные вольт-амперные характеристики и фоточувствительность структур (точечный контакт)/ n -InSe. Обнаружено выпрямление и измерены первые спектры фоточувствительности полученных электрическим разрядом структур. Обнаружены и обсуждаются широкополосный характер и экситонная особенность спектров фоточувствительности структур (точечный контакт)/ n -InSe. Установлена возможность применения точечных структур в качестве широкодиапазонных фотопреобразователей оптического излучения.

PACS: 71.20.Nr, 73.40.Ns, 73.50.Pz

Кристаллы InSe гексагональной модификации обладают прямыми межзонными переходами с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 1.25$ эВ [1,2], отвечающей критерию обеспечения максимальной квантовой эффективности фотопреобразования солнечного излучения [3]. До сих пор на слоистых кристаллах InSe были созданы и широко исследованы только плоскостные структуры, в которых активная область сформирована методом посадки на прямой оптический контакт высокосовершенных плоскостей естественного скола (001) или же термическим окислением на воздухе пластин InSe [4–6]. Обе эти технологии в принципе обеспечивают получение плоскостных структур больших площадей. В данной работе предложен новый метод формирования в InSe точечных структур и представлены результаты первых исследований фотоэлектрических явлений в новых структурах.

Фоточувствительные структуры создавались на однородных монокристаллических пластинах InSe n -типа проводимости с концентрацией свободных электронов $\sim 10^{14}$ см⁻³ и холловской подвижностью ~ 150 см²/(В·с) при $T = 300$ К. Пластины n -InSe получались скалыванием монокристаллического слитка вдоль плоскости (001) на воздухе. Средние размеры пластин $\sim 5 \times 5 \times (0.1-0.05)$ мм. Слитки n -InSe выращивались из расплава, близкого к стехиометрии этого соединения, методом направленной кристаллизации при вертикальном расположении кварцевого тигля. Для возможности сравнения слитки InSe были выращены также газофазным методом. Оба метода в отсутствие легирования посторонними примесями обеспечивали получение монокристаллов n -InSe с близкими электрическими свойствами.

Для получения точечных контактов были изучены возможности электрического разряда в воздушной среде между тонкими (диаметр $\sim 10-50$ мкм) проводниками из серебра или же платины. Эта процедура проводилась

под микроскопом. Место разряда между тонкими металлическими проводниками ориентировалось относительно выбранной зоны на поверхности полупроводника таким образом, что в исходном состоянии — перед подачей постоянного напряжения (20–200 В) на металлические проводники — расстояние между ними составляло ~ 5 мкм, тогда как расстояние до поверхности кристалла InSe было несколько выше ($\sim 10-20$ мкм). После завершения процедуры „наведения“ металлических проводников на место планируемого присоединения одного из них или обоих сразу к InSe включалось электрическое напряжение и между проволоками из Ag или Pt вблизи поверхности InSe происходил электрический разряд таким образом, что разогретый разрядом конец одной или обеих проволочек оказывался прочно соединенным с поверхностью InSe. При достаточном опыте оператора металлическая проволочка (или обе сразу) оказываются прочно соединенными с InSe, а состояние поверхности скола InSe после такой процедуры создания контакта остается практически неизменным. Также на поверхности скола не было замечено и образования каких-либо интерференционных пленок, которые обычно наблюдаются после термообработок InSe на воздухе [6]. Однако впоследствии мы обнаружили, что создание контакта металлического проводника (Ag, Pt) с InSe методом электрического разряда может приводить к изменению отклонений от стехиометрии в приповерхностной области монокристалла селенида индия в результате его термической обработки во время электрического разряда. Конечно же нельзя исключать из рассмотрения также и возможности окисления InSe в воздушной среде. В целом можно было ожидать, что сопутствующие электрическому разряду и соединению металла с полупроводником процессы могут вызвать образование в приконтактной области кристалла InSe точечной фоточувствительной структуры. Первые исследова-

[†] E-mail: rudvas@spbstu.ru

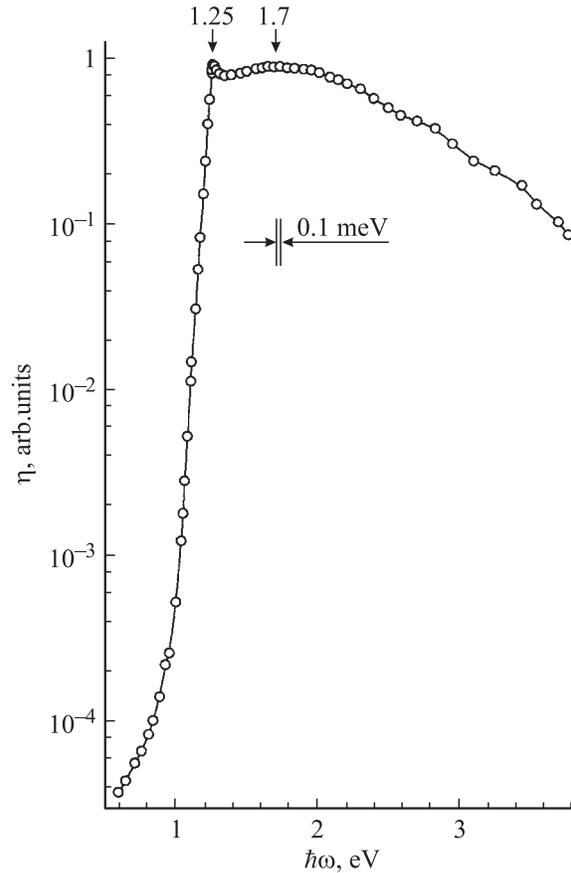
дования кристаллов n -InSe продемонстрировали соответствие полученных результатов нашей гипотезе.

Действительно, установленные режим и техника электрического разряда обеспечивают прочные механические соединения металлических проводников (Ag, Pt) с поверхностью InSe. Размеры контакта металл–полупроводник в созданных электрическим разрядом структурах определялись в основном диаметром используемого при разряде металлического проводника.

Как показывают измерения, стационарные вольт-амперные характеристики полученных точечных структур Pt/ n -InSe и Ag/ n -InSe обнаружили четкое выпрямление. Коэффициент выпрямления, представляющий собой отношение прямого тока к обратному при напряжении смещения $U \approx 1.5$ В, в полученных с применением Pt и Ag структурах обычно невысокий и находится в пределах 2.5–4. Пропускное направление для всех точечных контактов с n -InSe также оказалось одинаковым для металлов разной природы (Ag, Pt) и всегда отвечало положительной полярности внешнего смещения на „сварном“ контакте, который в последующем изложении обозначается ТК. Можно предположить, что образующаяся в окрестности электрического заряда приконтактная область связана в основном с испарением Se и соответственно с изменением отклонения от стехиометрии, которое и приводит к образованию вакансий в подрешетке селена.

В области смещений $U \lesssim 0.3$ В прямой ток в полученных структурах ТК/ n -InSe описывается известным диодным уравнением с высоким значением фактора неидеальности $n \approx 5-7$, что предположительно можно связать с туннельно-рекомбинационной природой прямого тока [7]. В области смещений $U > 2$ В прямой ток полученных точечных структур ТК/ n -InSe описывается линейным законом, причем остаточное сопротивление $R_0 \approx 10^6$ Ом, что существенно выше, чем в случае полученных нами ранее структур Oх/ n -InSe (Oх — окисел) [6]. Этот факт дает основания сделать предварительные заключения о существенном различии механизмов образования структуры в процессах термообработки InSe в воздушной среде [6] и при электрическом разряде. Следует отметить, что вольт-амперные характеристики не обнаруживают каких-либо деградационных процессов в полученных сваркой точечных структурах ТК/ n -InSe.

Освещение структур ТК/ n -InSe сопровождается возникновением фотовольтаического эффекта, причем сварной контакт во всех полученных структурах заряжается положительно, что согласуется с направлением выпрямления в них. Максимальный фотовольтаический эффект проявляется при освещении световым зондом (диаметр ~ 0.3 мм) непосредственно точечного контакта. Фотовольтаический эффект практически исчезает, если световой зонд „уходит“ со сварного контакта. Эта особенность дает основания полагать, что активная область такой структуры локализуется в окрестности сварного контакта. Оценки показали, что максимальная вольтовая фоточувствительность в полученных первых структурах



Спектральная зависимость относительно квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ при $T = 300$ К для одной из структур ТК/ n -InSe при освещении точечного контакта из Ag.

ТК/ n -InSe достаточно высокая и достигает ~ 1500 В/Вт при $T = 300$ К.

Типичная спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ при $T = 300$ К для одной из структур ТК/ n -InSE при освещении точечного контакта из Ag приведена на рисунке. Из него следует, что фоточувствительность структур в этой геометрии фоторегистрации наблюдается в широкой области энергий падающих фотонов от 0.6 до 3.8 эВ, тогда как при освещении со стороны подложек n -InSe (при их толщинах $d \approx 0.05$ мм) резкий коротковолновой „обрыв“ η наблюдается при $\hbar\omega \gtrsim 1.21$ эВ. Это связано с наступлением прямых межзонных переходов и вытекающим из этого удалением фотогенерированных носителей от активной области структуры на расстояния, которые превышают длину диффузионного смещения неравновесных носителей заряда.

При освещении структур ТК/ n -InSE со стороны точечного контакта (см. рисунок) в спектрах $\eta(\hbar\omega)$ обычно проявляется плавный рост фоточувствительности в диапазоне от 0.6 до 1 эВ. Этот рост лежит в области относительно низкого оптического поглощения с участием уровней дефектов решетки и поэтому практически не зависит от геометрии фоторегистрации. Резкий длинно-

волновой рост фоточувствительности, проявляющийся во всех точечных структурах ТК/ n -InSe в узкой области энергий от 1.06 до 1.2 эВ, подчиняется экспоненциальному закону с крутизной $S = \delta(\ln \eta) / \delta(\hbar\omega) \approx 50 \text{ эВ}^{-1}$, что соответствует прямым межзонным переходам в InSe [8].

На длинноволновом краю спектров $\eta(\hbar\omega)$ всех структур, полученных сваркой Ag и Pt с InSe, при $\hbar\omega_m \approx 1.25 \text{ эВ}$ всегда присутствует характерный пик (см. рисунок), который обычно связывается с экситонным поглощением [4,9], а также размытый коротковолновой максимум в глубине фундаментального поглощения в окрестности $\hbar\omega_{m1} \approx 1.7 \text{ эВ}$. Этот максимум можно, приписать образованию окисла InO₃ на поверхности InSe [10]. Тот факт, что получение точечных структур на InSe производилось в воздушной среде, также может быть основанием для аналогичного предположения относительно природы коротковолнового максимума $\hbar\omega_{m1} \approx 1.7 \text{ эВ}$ в полученных спектрах $\eta(\hbar\omega)$.

Как видно из рисунка, высокая фоточувствительность точечных структур без выраженного коротковолнового спада η наблюдается вплоть до $\hbar\omega \approx 3.8 \text{ эВ}$, что указывает на достаточно высокое в отношении рекомбинации совершенство интерфейса в них. Полная ширина спектров $\eta(\hbar\omega)$ на их полувысоте в точечных структурах ТК/InSe $\delta \approx 1.38 \text{ эВ}$, что существенно выше, чем в плоскостных структурах Ож/InSe [6]. Проявление экситонной особенности при $\hbar\omega_m \approx 1.25 \text{ эВ}$ (см. рисунок) также является свидетельством того, что развитый в данной работе новый метод позволяет формировать в InSe высокоэффективные широкополосные фотопреобразовательные структуры.

Исследования фоточувствительности полученных структур в линейно поляризованном излучении (ЛПИ) позволили установить, что естественный фотоплекроизм в них при освещении вдоль изотропного направления (001) отсутствует во всей области фоточувствительности, а при наклонном падении ЛПИ возникает фотоплекроизм, связанный с особенностями прохождения падающим излучением границы воздух/InSe [11].

Таким образом, методом электрического разряда в воздушной среде созданы точечные структуры ТК/ n -InSe, для которых получены спектральные зависимости фотovoltaического эффекта. Показано, что новый тип структур может найти применение в качестве широкодиапазонных фотопреобразователей оптического излучения.

Работа поддержана программой Российской академии наук „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“.

Список литературы

- [1] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника. Свойства материалов* (Киев, Наук. думка, 1975).
- [2] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*, под ред. А.В. Новоселовой, В.Б. Лазарева (М., Наука, 1979).

- [3] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир, 1975).
- [4] В.Л. Бакуменко, В.Ф. Чишко. ФТП, **11**, 200 (1977).
- [5] В.Н. Катеринчук, М.З. Ковалюк. Письма ЖТФ, **18** (12), 70 (1992).
- [6] Г.А. Ильчук, В.В. Кусьнэж, Р.Ю. Петрусь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков, В.О. Украинец. ФТП, **36**, 1356 (2006).
- [7] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [8] F. Adduci, M. Ferrara, P. Fantalino, A. Cingolani, A. Minafra. Phys. Status Solidi A, **15**, 303 (1973).
- [9] В.Л. Бакуменко, З.Д. Ковалюк, Л.Н. Курбатов, В.Ф. Чишко. ФТП, **10**, 1045 (1976).
- [10] С.И. Драпак, М.О. Воробец, З.Д. Ковалюк. ФТП, **39**, 633 (2005).
- [11] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **33**, 513 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

Creation and properties of the point structures on the n -InSe single crystals

G.A. Il'chuk, V.V. Kusnez, R.Yu. Petrus', V.Yu. Rud',
Yu.V. Rud', V.O. Ukrainets

National University „Lvivska Politehnika“,
79013 Lviv, Ukraine

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

+ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The point structures on the InSe single crystals have been fabricated by electric discharge method. The stationary current-voltage characteristics and photosensitivity of created by the first time structures (Spot weld)/ n -InSe have been investigated. Structures created by the electric discharge show clear electric rectification. The wideband nature and exciton peculiarity of investigated photosensitivity spectrum of (Spot weld)/ n -InSe structures are discussed. The fabricated point structures can be applied in wide-range photoconverters of light radiation.