

Фоточувствительность гетероконтактов $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$

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

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

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

(Получена 21 декабря 1999 г. Принята к печати 21 декабря 1999 г.)

Методом приведения в прямой оптический контакт поверхности осажденных на подложки из кварцевого стекла тонких пленок аморфного гидрированного кремния с поверхностью естественного скола $n\text{-InSe}$ впервые получены выпрямляющие фоточувствительные структуры. Исследованы спектральные зависимости квантовой эффективности полученных гетероконтактов и установлены перспективы использования нового гетероперехода $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ в фотопреобразователях солнечного излучения.

Изучение процессов фотопреобразования в структурах на основе аморфного гидрированного кремния связывается прежде всего с надеждами на снижение стоимости кремниевых солнечных элементов [1]. В настоящий период идет выбор эффективных технологий создания тонких пленок аморфного и поликристаллического кремния, а также полупроводниковых бинарных и тройных соединений с целью формирования различных типов эффективных фотопреобразовательных структур [1–6]. Данная работа относится к этому направлению и посвящена первым исследованиям фоточувствительности гетероконтакта между аморфным гидрированным кремнием ($a\text{-Si:H}$) и прямозонным полупроводниковым соединением InSe (ширина запрещенной зоны $E_g = 1.21$ эВ при температуре $T = 300$ К) [7].

Для получения фоточувствительных структур на основе пленок $a\text{-Si:H}$ и объемных кристаллов InSe был использован метод приведения поверхности компонент в прямой оптический контакт [8,9]. Этот метод позволяет использовать полупроводники с требуемыми характеристиками, а при создании самого гетероконтакта избежать каких-либо дополнительных технологических операций и таким образом избежать изменений в физических свойствах исходных фаз.

Пленки $a\text{-Si:H}$ были получены методом высокочастотного тлеющего разряда. В качестве рабочей газовой смеси использовалась смесь силана (12%) с водородом. Подложками служили химически очищенные пластины кварцевого стекла толщиной ~ 0.1 мм, температура подложки в процессе осаждения пленки составляла $\sim 260^\circ\text{C}$. Выбранная температура обеспечивала получение однородных пленок $a\text{-Si:H}$ n -типа проводимости с темновым удельным сопротивлением $\rho \approx 10^9$ Ом·см при комнатной температуре. Реализованные параметры процесса позволили воспроизводимо получать однородные по толщине пленки $a\text{-Si:H}$ с зеркальной поверхностью площадью $\sim 15 \times 15$ мм². При толщинах ~ 1 мкм пленки $a\text{-Si:H}$ в условиях интегрального освещения имели ярко-красную однородную окраску.

Монокристаллы InSe выращивались направленной кристаллизацией расплава, близкого к стехиометрии бинарного соединения, и в отсутствие преднамеренного

легирования имели n -тип проводимости с концентрацией свободных носителей $n \approx 10^{15}$ см⁻³, $\rho \approx 10^2$ Ом·см при $T = 300$ К. Из монокристаллических слитков $n\text{-InSe}$ скалыванием на воздухе получались плоско-параллельные пластины с высокосоввершенными зеркальными поверхностями [9,10]. Средние размеры использованных для создания гетероконтактов пластин $n\text{-InSe}$ составляли $\sim 5 \times 5 \times 0.1$ мм³.

Гетероконтакты обычно получают приведением в прямое касание одной из поверхностей пластины $n\text{-InSe}$ с наружной постростовой поверхностью пленки $a\text{-Si:H}$. В специальном держателе этот контакт фиксируется так, что достигается высокая стабильность его фотоэлектрических свойств. Схема сформированных гетероконтактов $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ представлена на рис. 1. Типичная стационарная вольт-амперная характеристика одного из полученных гетероконтактов приведена на рис. 2. Из рисунка следует, что метод приведения в прямой контакт постростовой поверхности пленки $a\text{-Si:H}$ с поверхностью естественного скола $n\text{-InSe}$ позволяет получить выпрямляющие структуры. Пропускное направление в таком типе гетероконтактов соответствует отрицательной полярности внешнего смещения на пластине $n\text{-InSe}$. Из рис. 2 следует, что при прямых смещениях $U > 2.5$ В вольт-амперная характеристика $I(U)$ структур $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ описывается законом $U = U_0 + R_0 I$. Величина напряжения отсечки во всех полученных структурах составляет $U_0 \approx 2$ В, остаточное сопротивление $R_0 \approx 10^7$ Ом

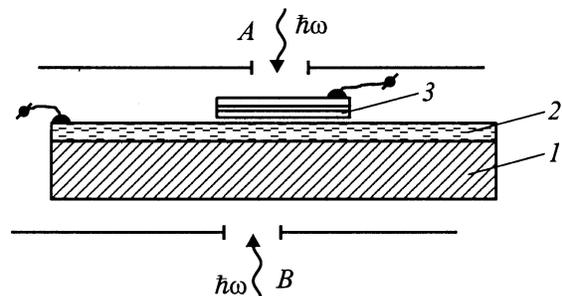


Рис. 1. Схема гетероконтакта $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$: 1 — кварцевая подложка, 2 — пленка $a\text{-Si:H}$, 3 — InSe .

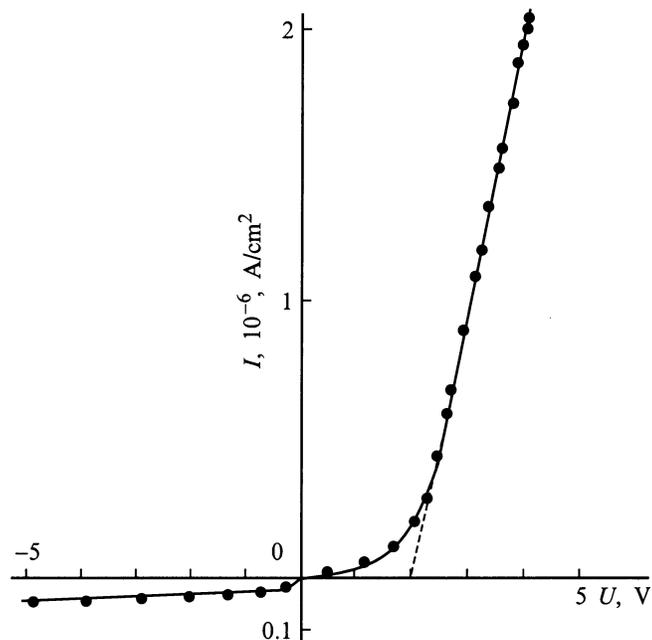


Рис. 2. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероконтакта $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$. $T = 300$ К. Площадь гетероконтакта ~ 0.25 см², пропускное направление реализуется при положительной полярности внешнего смещения на $a\text{-Si:H}$.

при $T = 300$ К. Из сопоставления электрических свойств контактирующих веществ следует, что высокое значение R_0 определяется в основном электрическими свойствами пленок $a\text{-Si:H}$. Обратная вольт-амперная характеристика всех полученных гетероконтактов обычно подчиняется степенному закону $I \sim U^m$, где $m = 0.7-1$, и увеличивается с ростом напряжения смещения, что может быть обусловлено несовершенствами их периферии и соответствующим влиянием токов утечки. Следует указать на достаточную стабильность во времени параметров вольт-амперных характеристик полученных структур, т.е. выраженные процессы деградации отсутствуют.

Для полученных гетероструктур $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ при освещении со стороны обеих компонент (рис. 1, геометрии А и В) обнаруживается фотовольтаический эффект. При этом знак фотонапряжения оказался одинаковым в обеих геометриях освещения этих структур и не изменялся при перемещении светового зонда диаметром ~ 0.2 мм вдоль поверхности, а также сохранялся во всей области фоточувствительности. Перечисленные особенности позволяют считать, что разделение фотогенерированных носителей заряда в таких гетероконтактах осуществляется единственной активной областью, возникающей в результате образования оптического контакта $a\text{-Si:H}$ с $n\text{-InSe}$. Полярность фотонапряжения во всех таких гетероконтактах всегда соответствует знаку "+" на $a\text{-Si:H}$, что согласуется с направлением выпрямления. Фоточувствительность структур $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ имеет большую величину при освещении со стороны

широкозонной компоненты и в лучших образцах составляет $1-5$ В/Вт при $T = 300$ К. Это значение хорошо воспроизводится при изменении места размещения пластины InSe площадью $\sim 1 \times 1$ мм² на поверхности $a\text{-Si:H}$, что указывает на достаточно хорошую однородность пленок $a\text{-Si:H}$. Существенно также подчеркнуть, что фотовольтаический эффект в таких структурах, как и вольт-амперные характеристики, не обнаруживает признаков деградации.

Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η , определенной из отношения фототока короткого замыкания к числу падающих фотонов, в двух геометриях освещения одной из гетероструктур $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$, приведены на

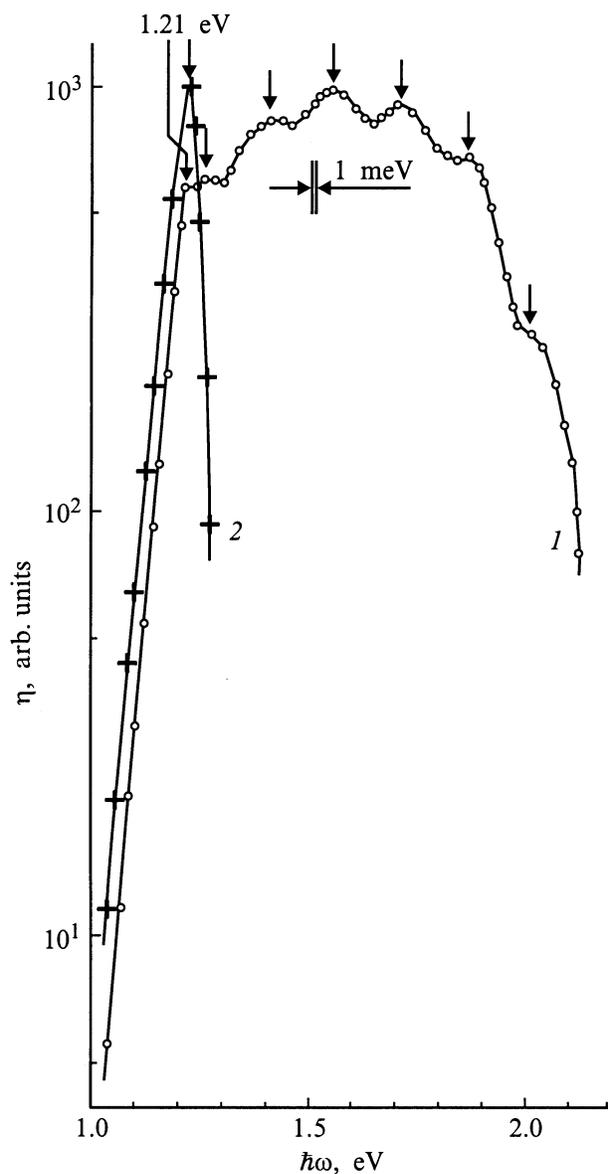


Рис. 3. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероконтакта $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$: 1 — освещение со стороны $a\text{-Si:H}$, 2 — со стороны InSe . $T = 300$ К.

рис. 3. Только длинноволновый край спектра остается нечувствительным к геометрии освещения гетероструктур, что обусловлено объемным характером фотоактивного поглощения в этой области. Спектральное положение длинноволнового экспоненциального края η и особенности в виде максимума (рис. 3, кривая 2) или ступеньки (рис. 3, кривая 1) соответствует ширине запрещенной зоны InSe [6,8], а большая крутизна $S = \delta(\ln \eta) / \delta(\hbar\omega) \approx 40 \text{ эВ}^{-1}$ в разных структурах связана с прямыми межзонными оптическими переходами в этом соединении. С ростом энергии падающих фотонов ($\hbar\omega > 1.21 \text{ эВ}$) при освещении гетероструктур со стороны InSe наступает резкий спад фоточувствительности, обусловленный влиянием поглощения излучения в узкозонной компоненте, тогда как при освещении со стороны широкозонной компоненты $a\text{-Si:H}$ такой спад η оказывается значительно смещенным в глубину фундаментального поглощения InSe (рис. 3, кривые 1 и 2).

В геометрии освещения B (рис. 1) полная ширина спектров фоточувствительности на их полувысоте составляет $\delta_{1/2} \approx 50\text{--}60 \text{ мэВ}$ при использованных толщинах пластин InSe, тогда как переход к геометрии A сопровождается сильным увеличением $\delta_{1/2}$ до значений $700\text{--}750 \text{ мэВ}$. Резкий коротковолновый спад фоточувствительности при этом располагается вблизи 2 эВ , что соответствует межзонным переходам в $a\text{-Si:H}$ [2]. Следовательно, фоточувствительность гетероконтакта $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ при освещении со стороны широкозонной компоненты, как в случае идеальных резких гетеропереходов [11,12], сохраняется на высоком уровне в спектральном диапазоне, который ограничивается ширинами запрещенных зон контактирующих фаз. Это в свою очередь позволяет считать, что в условиях прямого контакта даже различия в структуре контактирующих полупроводников оказываются не критичными: в данном случае рассматривается контакт между аморфным гидрированным кремнием и естественным сколом кристалла InSe со структурой вюрцита [6].

Особенностью спектров исследованных гетероструктур $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ следует считать проявление серии из шести эквидистантных пиков в области высокой фоточувствительности гетероконтактов. Если связать проявление этой особенности с интерференцией излучения в широкозонной пленке $a\text{-Si:H}$, тогда оценка толщины по положениям экстремумов дает значение $\sim 1 \text{ мкм}$, что соответствует результатам измерений толщины пленок другими методами. Сам факт наблюдения структуры в спектрах фоточувствительности наряду с широкополосным характером зависимостей $\eta(\hbar\omega)$ следует рассматривать как свидетельство достаточно высокого качества фоточувствительных структур на основе пленок аморфного гидрированного кремния, получаемых методом прямого контакта с InSe. Этот результат позволяет рассматривать экспрессный подход к созданию новых гетероконтактов с использованием простого метода приведения полупроводниковых материалов в контакт как перспективный с точки зрения изучения новых гетероконтактов. В случае

обнаружения на основании этих результатов практического потенциала можно перейти к развитию технологии создания стационарных гетероструктур на таких материалах. В данном случае очевидно, что технологическая разработка стационарных гетероструктур на основе аморфного кремния в качестве широкозонного полупроводника и селенида индия как узкозонной компоненты с высоким коэффициентом оптического поглощения излучения во всей области спектра Солнца может привести к созданию новых высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов.

Список литературы

- [1] *Polycrystalline Semiconductors V-Bulk Materials, Thin Films and Devices*, ed by J.H. Werner, H.P. Strunk, H.W. Schock (Scitec. Publ. Ltd., Uetikon-Zuerich, 1999).
- [2] *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices. II-Materials and Devices Physics*, ed. by J. Kamaki (Artech Hause, Boston-London, 1992).
- [3] W. Wang, K. Liao. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **70**, 359 (1986).
- [4] R. DeRosa, M.L. Grilli, G. Sosikala, M. Tucci, F. Rocer. Sol. St. Phenomena, **67-68**, 565 (1999).
- [5] B. Sang, K. Daiziki, A. Yamada, M. Kanagai. Japan. J. Appl. Phys., **38**, 4983 (1999).
- [6] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник* (М., Наука, 1979).
- [7] I.V. Bodnar, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. Cryst. Res. Technol., **31**, 261 (1996).
- [8] В.Ю. Рудь, В.Ф. Гременок, Ю.В. Рудь, И.В. Боднар, Р.Н. Бекимбетов. ФТП, **33**, 1205 (1999).
- [9] F. Adduci, M. Ferrara, P. Fantalino, A. Cingolani. Phys. St. Sol. (a), **15**, 303 (1973).
- [10] Н.М. Мехтиев, Ю.В. Рудь, Э.Ю. Салаев. ФТП, **12**, 1566 (1978).

Редактор Л.В. Шаронова

Photosensitivity of heterocontacts $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$

Yu.A. Nikolaev, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', E.I. Terukov

loffe Physicotechnical institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* State Technical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract The rectifying photosensitive structures have been first obtained by the method of putting deposited on quartz substrates hydrogenated amorphous silicon films onto direct optical contact with the surface of InSe natural cleavage. The quantum efficiency spectral dependences of heterocontacts obtained were studied. The perspectives of application of a new $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$ heterocontact in the high efficiency photoconvertors of solar radiation were established.