

Фотовольтаический эффект в гетероструктурах $a\text{-Si:H}/n\text{-InSe}$

© Р.Н. Бежимбетов, 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 марта 2000 г. Принята к печати 21 марта 2000 г.)

Осаждением пленок $a\text{-Si:H}$ на поверхность (001) монокристаллических пластин InSe, а также осаждением пленок чистого индия с их последующей селенизацией синтезированы пленки InSe на поверхности $a\text{-Si:H}$ и выращены гетероструктуры в системе $a\text{-Si:H}/\text{InSe}$. Обнаружен и исследован фотовольтаический эффект для обоих типов гетероструктур. Сделан вывод о перспективах применения полученных гетероструктур в качестве широкополосных фотопреобразователей излучения.

Введение

Создание гетероструктур (ГС) методом посадки на оптический контакт различных полупроводников находит все более широкое распространение при изучении фотовольтаических возможностей новых систем и его особая ценность состоит в том, что он не требует применения "ростовых" исследований, предохраняя контактирующие фазы от трансформации их свойств под воздействием технологических процессов получения ГС [1–5]. Именно такой метод недавно мы применили при изучении фотоэлектрических свойств контакта между отдельно полученными веществами $a\text{-Si:H}$ и InSe, что позволило экспериментально продемонстрировать потенциал новой системы для ее использования в солнечных элементах [6]. Данная работа продолжает это направление. Она посвящена развитию физико-технологических основ процессов получения и первым исследованиям ГС, в которых гетерограница формируется традиционным выращиванием одного полупроводника на исходной подложке другого [7].

Эксперимент

ГС выращивались двух различных типов. В одном из них (тип А) в качестве подложек использовались монокристаллические пластины InSe, которые были получены скалыванием вдоль плоскости спайности (001) из слитка, выращенного направленной кристаллизацией расплава, близкого по составу к стехиометрии этого соединения. Концентрация электронов в использованных пластинах InSe со средними размерами $5 \times 5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ в отсутствие легирования обычно составляла $n \cong 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300 \text{ К}$. Затем пленки $a\text{-Si:H}$ с удельным сопротивлением $\sim 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$ выращивались на зеркальной поверхности пластин $n\text{-InSe}$ методом тлеющего разряда в смеси силана в водороде ($\sim 12\%$). Во время роста температура подложек составляла 230°C . В результате на поверхности (001) InSe были получены пленки $a\text{-Si:H}$ толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$, которые обнаружили высокую адгезию в отношении поверхности (001) InSe.

В ГС В-типа в качестве подложек использовались пленки $a\text{-Si:H}$ с толщинами около 1 мкм , которые выращивались на кварцевых пластинах тем же методом, что и в случае ГС А-типа. Затем на поверхности пленок $a\text{-Si:H}$ вакуумным термическим осаждением наносился слой чистого индия толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$, который в последующем использовался для синтеза слоев InSe. Синтез InSe происходил в результате взаимодействия находящейся на поверхности $a\text{-Si:H}$ пленки чистого индия с парами селена. Температура пленок $a\text{-Si:H}$ во время процесса составляла $\sim 400^\circ\text{C}$. Разработанный метод позволил создать на поверхности $a\text{-Si:H}$ тонкие ($\cong 0.5 \text{ мкм}$) пленки InSe, которые имели зеркальную наружную поверхность и обладали высокой адгезией в отношении постростовой поверхности пленок $a\text{-Si:H}$. Площадь полученных ГС А- и В-типа составляла $\approx 5 \times 5 \text{ мм}^2$. При этом необходимо отметить, что оба метода не содержат принципиальных ограничений для увеличения площади ГС.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рассмотрим основные результаты фотоэлектрических исследований полученных ГС. В таблице приведены типичные параметры для обоих типов ГС. Как показывают исследования стационарных вольт-амперных характеристик, полученные ГС обладают слабым выпрямлением. Отношение фототоков в прямом и обратном направлениях обычно не превышает $2\text{--}3$ ($U \cong 5 \text{ В}$), причем остаточное сопротивление R_0 гетероструктур А-типа всегда оказывалось намного ниже, чем В-типа (см. таблицу). Такое различие, по-видимому, обусловлено особенностями межфазных взаимодействий во время процессов получе-

Фотоэлектрические свойства ГС $a\text{-Si:H}/\text{InSe}$ при $T = 300 \text{ К}$ (освещение со стороны $a\text{-Si:H}$)

Тип ГС	R_0 , Ом	$\Delta\hbar\omega^m$, эВ	$\delta_{1/2}$, мЭВ	S_D , эВ $^{-1}$	S_u^m , В/Вт	S_i^m , мкА/Вт
A	$\sim 10^4$	1.2–1.75	780	42	0.2	25
B	$\sim 10^7$	2.05–2.15	500	35	200	2

ния этих ГС. Если в случае структур *B*-типа остаточное сопротивление соответствует характерному для полученных посадкой на оптический контакт InSe с *a*-Si:H [6], то для ГС *A*-типа обнаружено сильное понижение R_0 . В связи с этим есть основания полагать, что в процессе осаждения *a*-Si:H на поверхность InSe происходит легирование контактирующих фаз. Этот экспериментальный факт требует специальных исследований.

Оба типа ГС как и в случае посадки на оптический контакт [6], обнаруживают фотовольтаический эффект. Знак фотонапряжения этих ГС согласуется с направлением выпрямления и соответствует отрицательной полярности фотонапряжения на их узкозонной компоненте *n*-InSe. По максимальным величинам вольтовой S_u и токовой S_i фоточувствительности (см. таблицу) ГС *a*-Si:H/InSe уже сейчас значительно превзошли аналогичные характеристики для оптического гетероконтакта этих же полупроводников [6]. Если учесть, что электрические свойства ГС пока значительно уступают наблюдавшимся в оптических гетероконтактах [6], можно надеяться на существенное улучшение квантовой эффективности фотопреобразования ГС при условии оптимизации параметров их вольт-амперных характеристик.

На рис. 1 приведены типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования η для ГС *A*-типа в сравнении с оптическим гетероконтактом *a*-Si:H/InSe. При освещении ГС *A*-типа четко проявляется характерный для идеальных гетероструктур "эффект окна" [7], когда высокая фоточувствительность реализуется в диапазоне между ширинами запрещенных зон контактирующих полупроводников. В данном случае на монокристаллической подложке слоистого полупроводника InSe выращена пленка аморфного гидрированного кремния и это принципиальное различие в строении контактирующих веществ, как следует из рис. 1 (кривая 1), привело к сужению спектральной полосы фоточувствительности. Такая особенность обычно возникает в случае высокой концентрации дефектов на гетерогранице.

Максимальная фоточувствительность в ГС *B*-типа при освещении со стороны *a*-Si:H реализуется в диапазоне энергий фотонов $\Delta\hbar\omega^m$ от 1.2 до 1.75 эВ (см. таблицу, рис. 1). Длинноволновый край фоточувствительности этих ГС экспоненциальный и его крутизна $S_D = \delta(\ln \eta)/\delta(\hbar\omega)$ имеет высокие значения (см. таблицу), соответствующие прямым межзонным переходам в InSe [8]. Полная ширина спектров фоточувствительности ГС *B*-типа $\delta_{1/2}$ достигает 780 мэВ (см. таблицу), а коротковолновый спад η при $\hbar\omega > 1.7$ эВ обусловлен влиянием оптического поглощения в пленке *a*-Si:H, через которую излучение поступает в активную область. Следует подчеркнуть, что спектральный контур фоточувствительности в ГС *B*-типа оказывается близким к характерному для оптического гетероконтакта между InSe и *a*-Si:H (рис. 1, кривые 1 и 3). Это может служить основанием для предположения о близости качества аморфного гидрированного кремния на кристаллической

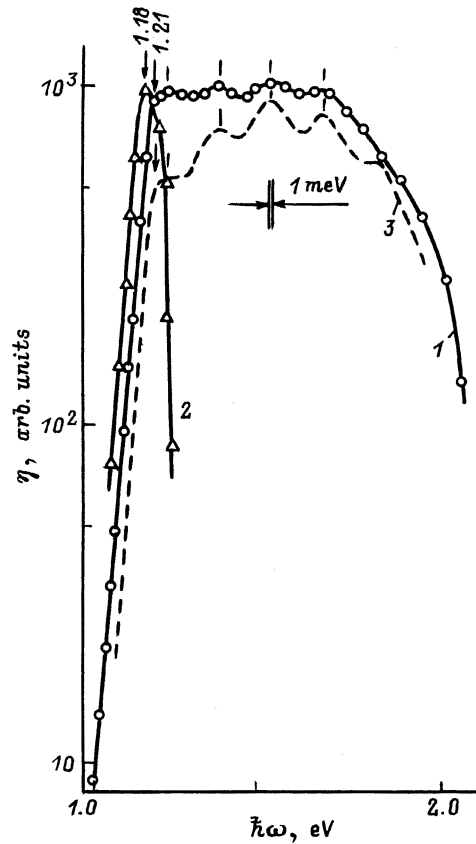


Рис. 1. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктур *a*-Si:H/InSe при $T = 300$ К. 1, 2 — ГС получена выращиванием пленки *a*-Si:H на поверхности пластины InSe (тип A), 3 — ГС получена методом посадки на оптический контакт пластины *n*-InSe и пленки *a*-Si:H. Геометрия освещения: 1, 3 — освещение со стороны *a*-Si:H; 2 — со стороны пластины *n*-InSe толщиной ≈ 50 мкм.

подложке InSe и кварцевом стекле. В пользу высказанного предположения свидетельствует и наблюдение в спектрах фоточувствительности ГС *B*-типа серии эквидистантных пиков, которые, как и в случае оптических гетероконтактов, могут быть отнесены на счет интерференции излучения в пленках *a*-Si:H.

Переход к освещению ГС *B*-типа со стороны их узкозонной компоненты смещает коротковолновую границу фоточувствительности в область межзонного поглощения InSe (рис. 1, кривая 2). Поэтому спектр фоточувствительности становится узкополосным и, соответственно, происходит снижение $\delta_{1/2}$ до значений ≈ 100 мэВ при использованной толщине пластины InSe. Энергетическое положение четкой ступеньки в спектрах η в случае освещения ГС *A*-типа со стороны *a*-Si:H при $\hbar\omega \approx 1.21$ эВ, как и коротковолновой границы фоточувствительности в условиях освещения со стороны InSe, соответствует ширине запрещенной зоны селенида индия [8]. Наблюдаемое соответствие спектрального контура и энергетического положения коротковолнового

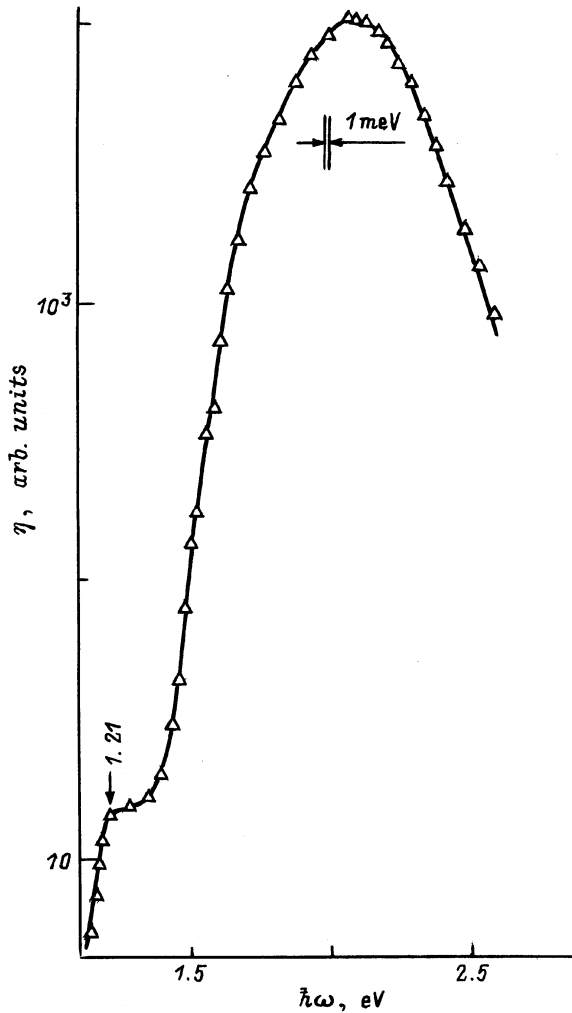


Рис. 2. Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктуры $\text{InSe}/a\text{-Si:H}$, полученной выращиванием пленки InSe на поверхности пленки $a\text{-Si:H}$ (тип B), при $T = 300\text{ K}$.

спада η в ГС A -типа и оптических гетероконтактах $a\text{-Si:H}/\text{InSe}$ (рис. 1, кривые 1 и 3) следует также рассматривать с позиций количественного соответствия в спектрах краевого поглощения пленок $a\text{-Si:H}$, выращенных на подложках разной природы.

В случае ГС B -типа спектральные зависимости η при освещении со стороны $a\text{-Si:H}$ свидетельствуют о том, что фоточувствительность остается широкополосной, однако ее максимум смещается в область фундаментального поглощения их широкозонной компоненты $a\text{-Si:H}$ (рис. 2). Длинноволновая граница фоточувствительности, как и для ГС A -типа, по-прежнему определяется поглощением в InSe , однако вклад этого поглощения на 2–3 порядка величины падает по отношению к фундаментальному поглощению в $a\text{-Si:H}$. Фоточувствительность ГС A -типа преобладает при их освещении со стороны широкозонного окна. При этом спектральный контур η практически не зависит от геометрии освещения, что

может быть обусловлено преимущественной локализацией активной области ГС в высокоомной пленке $a\text{-Si:H}$. Это различие в уровнях легирования компонент ГС A - и B -типа как раз и вызывает ослабление вклада в фоточувствительности ГС B -типа фундаментального поглощения в селениде индия. Принимая в учет это обстоятельство, длинноволновый край высокой фоточувствительности ГС B -типа на рис. 3 построен в координатах $\sqrt{i\hbar\omega} - \hbar\omega$. Видно, что спектр фоточувствительности ГС B -типа в диапазоне от 1.6 до 1.9 эВ в указанных координатах хорошо аппроксимируется прямой, что соответствует непрямым межзонным переходам в $a\text{-Si:H}$ [9], а ее экстраполяция к $\eta\hbar\omega = 0$ дает величину энергии ≈ 1.48 эВ, которая принята за ширину запрещенной зоны пленок $a\text{-Si:H}$, на которых создавались ГС A - и B -типа. Подчеркнем, что эта величина удовлетворительно согласуется с энергией фотонов, выше которой начинается спад фоточувстви-

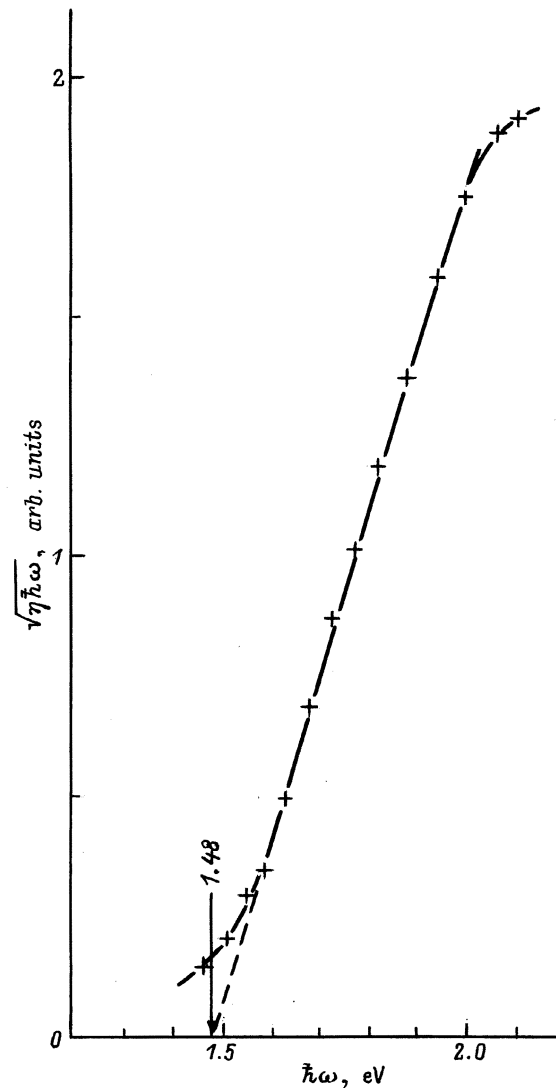


Рис. 3. Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктур $\text{InSe}/a\text{-Si:H}$ (тип B) в координатах $\sqrt{i\hbar\omega} - \hbar\omega$ при $T = 300\text{ K}$.

тельности в ГС при освещении со стороны $a\text{-Si:H}$ (рис. 1, кривые 1 и 2). Естественный фотоэффект в обоих типах ГС отсутствует, что соответствует изотропному характеру поглощения в их компонентах [10].

Заключение

Таким образом, развиты технологии выращивания ГС $a\text{-Si:H/InSe}$ двух типов и выполнены первые исследования фотовольтаических свойств новых гетероструктур, которые открывают возможности построения на этой системе широкополосных фотопреобразователей естественного излучения.

Список литературы

- [1] I.V. Bodnar, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. Cryst. Res. Technol., **31**, 261 (1996).
- [2] V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', S. Iida, M. Morohashi-Yamazaki, H. Uchiki, N. Mamedov. Inst. Phys. Conf. Ser. **152**, 967 (1997).
- [3] M.C. Ohmer, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', P.G. Schuhemann. Abstracts 24th Int. Conf. on the Physics Semicond. Aug. 2–7, 1998 (Jerusalem, Israel) v. 2, Th-P213.
- [4] А.А. Лебедев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **32**, 353 (1998).
- [5] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.Ф. Гременок, И.В. Боднар, Р.Н. Бекимбетов. ФТП, **33**, 1205 (1999).
- [6] Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. ФТП, **34**, 818 (2000).
- [7] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М. Сов. радио, 1979).
- [8] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник* (М., Наука, 1979).
- [9] *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices II-Materials and Devices Physics*, ed. by J. Kamaki (Artech House, Boston–London, 1992).
- [10] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **30**, 1921 (1997).

Редактор В.В. Чалдышев

Photovoltaic effect in $a\text{-Si:H/n-InSe}$ heterostructures

R.N. Bekimbetov, Yu.A. Nikolaev, V.Yu. Rud'*, Yu.V. Rud', E.I. Terukov

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

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

Abstract $a\text{-Si:H/InSe}$ heterostructures have been grown by the deposition of an $a\text{-Si:H}$ film on the surface of InSe crystal wafer as well as a pure In film for subsequent InSe films formation by selenization of a pure In film on $a\text{-Si:H}$ surface. The photovoltaic effect for these new heterostructures was detected and studied. The conclusion about prospects of obtained heterostructures applications as wide band radiation photoconverters was made.