

Фоточувствительность гетероструктур на мелкодисперсной фазе полупроводников

© Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь[†], Е.И. Теруков, Т.Н. Ушакова

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

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

(Получена 9 июня 2003 г. Принята к печати 25 декабря 2004 г.)

Предложен и создан новый тип гетероструктур, основанных на прямом контакте объемного полупроводника со слоем диэлектрика с рассредоточенной в нем мелкодисперсной фазой полупроводника. На гетероструктурах из Si и GaAs обнаружено выпрямление и фотовольтаический эффект. Показано, что при освещении таких структур со стороны слоя диэлектрика с мелкодисперсной фазой полупроводника возникает широкополосный фотовольтаический эффект в глубине фундаментального поглощения объемного полупроводника.

Гетероструктуры на алмазоподобных полупроводниках уже давно стали одним из главных объектов современной физики полупроводников и полупроводниковой электроники [1]. Прорыв в области оптоэлектроники нового поколения в настоящий период определяется созданием низкоразмерных гетероструктур [2–4]. Понижение размерности вещества обеспечило возникновение новых технологий управления фундаментальными свойствами полупроводников и создание мощных низкопороговых лазеров [2,3]. Настоящая работа посвящена первому исследованию фоточувствительности нового типа гетероструктур на основе объемных кристаллов и тонких слоев диэлектрика с однородно распределенной в нем мелкодисперсной фазой полупроводника (на примере Si и GaAs).

1. Фоточувствительные гетероструктуры создавались на ориентированных в кристаллографической плоскости (100) пластинах Si и GaAs *n*- и *p*-типа проводимости. Мелкодисперсная фаза получена механическим измельчением исходных монокристаллов. С целью понижения дисперсии размеров вкрапленных в диэлектрик частиц полупроводника проводилось их фракционное многократное осаждение из спиртовых смесей на воздухе. Затем мелкодисперсная фаза вводилась в жидкую эпоксидную смолу (*P*, в концентрации 1–2 вес%), которая тщательно перемешивалась, что в итоге обеспечивало

однородность распределения мелкодисперсной фазы полупроводника (*S*) в жидкой фазе диэлектрика. После этого капля жидкой эпоксидной смолы наносилась на поверхность полупрозрачного слоя металла (Mo, Ni), термически осажденного на поверхность стекла. Затем поверхность капли эпоксидной смолы приводилась в прямой контакт с пластиной полупроводника, после чего легким нажимом осуществлялась посадка полупроводниковой пластины на ограничительные диэлектрические пластины, помещенные непосредственно на поверхность слоя металла и обеспечивающие в конечном счете получение плоско-параллельного слоя эпоксидной смолы с диспергированными в нем частицами полупроводника. В таком режиме формирования структур избыточная жидкая смесь „выдавливается“ из зазора между поверхностями металла (*M*) и полупроводника, после чего система стекло/металл/смесь жидкой эпоксидной смолы с мелкодисперсной фазой полупроводника (*M*/(*P* + *S*)/*S*) фиксировалась механической нагрузкой до полного завершения стадии затвердевания эпоксидной смолы. После полного затвердевания смолы полученная структура превращалась в монолитную и снабжалась контактами к полупроводнику и металлу. Используемая в работе методика приготовления структур подобна предложенной ранее для гетероконтактов естественный белок/полупроводник [5] и отличается от нее лишь

Составляющие структур			R_0 , Ом	$K, U = 5$ В	$\Delta\hbar\omega^m, *$ эВ	$S_u^m, *$ В/Вт
монокристаллическая пластина	мелкодисперсная фаза	№ структуры				
<i>p</i> -Si	<i>p</i> -Si	5	10^6	1	1.7–2.2	
<i>n</i> -Si	<i>p</i> -Si	7	$5 \cdot 10^5$	10	2.5–2.9	50
<i>n</i> -GaAs	<i>p</i> -GaAs	17	10^5	10^2	1.5–2.5	850
<i>p</i> -Si	<i>p</i> -GaAs	23	10^6	10	2–3	100

Примечание. * Освещение гетероструктур производилось со стороны тонкопленочной компоненты, состоящей из вкрапленной в эпоксидную смолу мелкодисперсной фазы полупроводника. Величины $\Delta\hbar\omega^m$ и S_u^m отражают спектральный диапазон высокой вольтовой фоточувствительности и величину максимальной фоточувствительности.

тем, что вместо белка используется слой эпоксидной смолы с вкрапленной в нее мелкодисперсной фазой полупроводника. Исследованный диапазон толщин слоев диэлектрика в полученных гетероструктурах составлял $\sim 0.1-0.05$ мм.

Наряду со структурами $M/(P+S)/S$ изготавливались также слои эпоксидной смолы с вкрапленной в нее мелкодисперсной фазой полупроводника, которые контактировали с обеих сторон с поверхностями нанесенного на стекле слоя металла (структуры $M/(P+S)/M$).

2. В таблице указаны основные типы полученных структур и приведены их некоторые параметры. Главные результаты проведенных исследований состоят в следующем.

Структуры $M/P/M$ в области напряжений внешнего смещения $U \leq 100$ В, как правило, обнаруживали линейный характер зависимости тока от напряжения ($I \propto U$). Сопротивление созданных структур этого типа при комнатных температурах обычно находилось в диапазоне $R \approx 10^9-10^{11}$ Ом в зависимости от толщины и площади слоя эпоксидной смолы.

При введении в эпоксидную смолу мелкодисперсной фазы Si и GaAs сопротивление структур $M/(P+Si)/M$ и $M/(P+GaAs)/M$ относительно структур $M/P/M$ в области концентраций мелкодисперсной фазы в

смоле $\sim 1-2$ вес%, как правило, обычно падает на несколько порядков. Стационарная вольт-амперная характеристика (ВАХ) таких систем на ее линейном участке ($U \leq 50$ В) позволяет оценить сопротивление $R \approx 10^5-10^7$ Ом. Эта величина в основном определяется геометрическими размерами слоев, а также концентрацией введенной в смолу мелкодисперсной фазы полупроводника. При освещении таких гетероструктур интегральным излучением лампы накаливания возникает положительная фотопроводимость $\Delta\sigma/\sigma \approx 1.1-1.2$ при $T = 300$ К.

Исследования стационарных ВАХ гетероструктур $M/(P+Si(GaAs))/Si(GaAs)$ позволили наблюдать типичное для известных полупроводниковых гомо- и гетероструктур выпрямление. В качестве примера на вставке к рис. 1 показана ВАХ одной из полученных гетероструктур, представляющих собой контакт слоя из однородно распределенной в диэлектрике мелкодисперсной фазы p -Si (КДБ-2) с поверхностью монокристаллической пластины n -Si (КЭФ-0.1 и 0.01). Выпрямление в таких структурах, определяемое как отношение прямого тока к обратному при $U \approx 100$ В, достигает $K \approx 10$, причем пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на слое. Остаточное сопротивление гетероструктур в области проявления зависимости $I = (U - U_0)/R_0$ составляет $R_0 \approx 5 \cdot 10^5$ Ом, тогда как напряжение отсечки $U_0 \approx 1$ В.

Наряду с выраженным выпрямлением для гетероструктур $M/(P+S)/M$ обнаружен также фотовольтаический эффект, который, как правило, доминировал при их освещении со стороны тонких двухфазных слоев, состоящих из погруженной в диэлектрик P мелкодисперсной фазы Si и GaAs.

3. Рассмотрим типичные для таких структур особенности спектральных зависимостей относительной квантовой эффективности фотопреобразования η , представляющей собой нормированный на число падающих фотонов фототок короткого замыкания. При освещении гетероструктур $M/(P+Si)/Si$ со стороны слоя диэлектрика с однородно распределенной в нем мелкодисперсной фазой p -Si спектры фоточувствительности оказываются широкополосными (рис. 1, кривые 1 и 2). Длинноволновой край спектров η в структурах такого типа оказывается одинаковым и спрямляется в координатах $(\eta\hbar\omega)^{1/2} = f(\hbar\omega)$ (рис. 2), что характерно для непрямых межзонных оптических переходов [6]. Экстраполяция типа $(\eta\hbar\omega)^{1/2} \rightarrow 0$ дает значение энергии отсечки, согласующееся с шириной запрещенной зоны объемного кристаллического кремния [7].

В условиях освещения гетероструктур $M/(P+Si)/Si$ со стороны монокристаллической подложки Si ($d \approx 0.3$ мм) спектр η становится узкополосным с максимумом вблизи $\hbar\omega \cong 1.24$ эВ (рис. 1, кривая 3). При этом с ростом энергии фотонов $\hbar\omega > 1.24$ эВ появляется выраженный коротковолновый спад фоточувствительности, обусловленный увеличением оптического поглощения в кремниевой подложке и удалением слоя фотогенерированных пар от области пространственного заряда, что

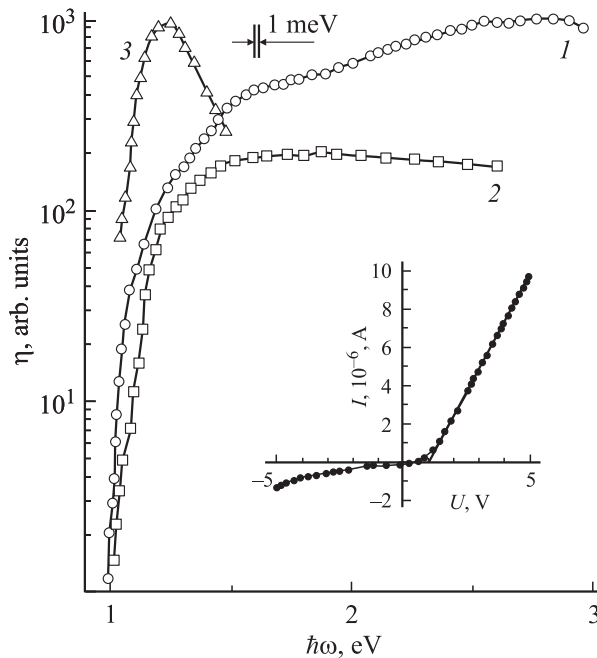


Рис. 1. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктур $M/(P+Si)/p$ -Si при $T = 300$ К. Геометрия освещения неполяризованным излучением: 1 и 2 — освещение со стороны слоя металла; 3 — освещение со стороны кристалла подложки p -Si толщиной $d = 0.3$ мм. Номера образцов: кривые 1 и 3 — 5, кривая 2 — 7. На вставке — стационарная вольт-амперная характеристика гетероструктуры $M/(P+Si)/p$ -Si. Пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на кристалле подложки p -Si.

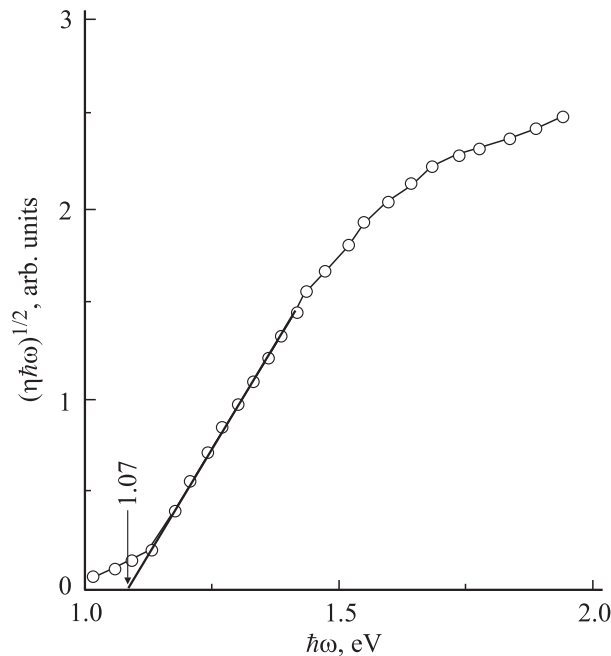


Рис. 2. Зависимость $(\eta \hbar \omega)^{1/2} = f(\hbar \omega)$ для структуры $M/(P + Si)/p\text{-Si}$ при $T = 300$ К и освещении со стороны слоя металла.

в конечном счете приводит к снижению квантовой эффективности фотопреобразования. Важно подчеркнуть, что с переходом к освещению таких гетероструктур со стороны слоя диэлектрика с вкрапленной в него мелкодисперсной фазой кремния спад fotocувствительности в области фундаментального оптического поглощения в кристаллическом объемном кремнии при $\hbar \omega > 1.24$ эВ практически отсутствует (рис. 1, кривые 1 и 2). Видно, что в коротковолновой части спектров $\eta(\hbar \omega)$ при $\hbar \omega > 1.4$ эВ fotocувствительность гетероструктур изменяется слабо и даже проявляет тенденцию к некоторому понижению в области $\hbar \omega > 2$ эВ (рис. 1, кривая 2), либо в другом типе изученных гетероструктур (рис. 1, кривая 1) наблюдается монотонный рост fotocувствительности в глубине области фундаментального поглощения объемного кремния с образованием абсолютного максимума при $\hbar \omega \approx 2.8$ эВ. Сравнимые гетероструктуры отличаются в основном размерами, координацией и концентрацией введенных в эпоксидную смолу частиц мелкодисперсной фазы.

Следует отметить, что выявление взаимосвязи спектров коротковолновой fotocувствительности с реальными топографией размещения и размерами частиц в мелкодисперсной фазе полупроводника может сыграть ключевую роль в понимании процессов фотопреобразования в новом типе гетероструктур. Вместе с тем обнаруженное отсутствие коротковолнового спада η при $\hbar \omega > E_G^{\text{Si}}$ в полученных на основе кремния гетероструктурах $M/(P + Si)/\text{Si}$ (рис. 1, кривая 1), как и в случае гетероконтакта наноразмерной и объемной фаз кремния [8,9], может также указывать на проявление

эффекта понижения размеров частиц полупроводника при его механическом дроблении.

Как видно из рис. 3, для структур $M/(P + \text{GaAs})/\text{GaAs}$ в спектрах $\eta(\hbar \omega)$ также проявились подобные рассмотренным выше (рис. 2) закономерности. Действительно, длинноволновая граница fotocувствительности таких структур не зависит от геометрии их освещения и следует экспоненциальному закону с изломом (рис. 3, кривые 1 и 2) или обнаруживает максимум (кривая 3) при $\hbar \omega \approx 1.41$ эВ, что согласуется с шириной запрещенной зоны GaAs [7]. Высокая крутизна длинноволнового края fotocувствительности $S = \delta(\ln \eta) / \delta(\hbar \omega) \approx 80 \text{ эВ}^{-1}$ с учетом [10] соответствует прямым межзонным оптическим переходам в GaAs [6], тогда как резкий коротковолновый спад η при $\hbar \omega > E_G^{\text{GaAs}}$, реализуемый при освещении полученных структур со стороны подложки (рис. 3, кривая 3), отражает резкое увеличение коэффициента оптического поглощения в прямозонном полупроводнике. Из рис. 3 также можно видеть, что в условиях освещения структур со стороны слоя диэлектрика с включениями мелкодисперсной фазы GaAs удается исключить коротковолновый спад квантовой эффективности фотопреобразования в области энергии фотонов $\hbar \omega > E_G^{\text{GaAs}}$ (кривая 1) или существенно продвинуть диапазон высокой fotocувствительности в глубину фундаментального поглощения GaAs (кривая 2). На этом основании можно полагать, что, как и в рассмотренных выше гетероструктурах из мелкодисперсных частиц Si

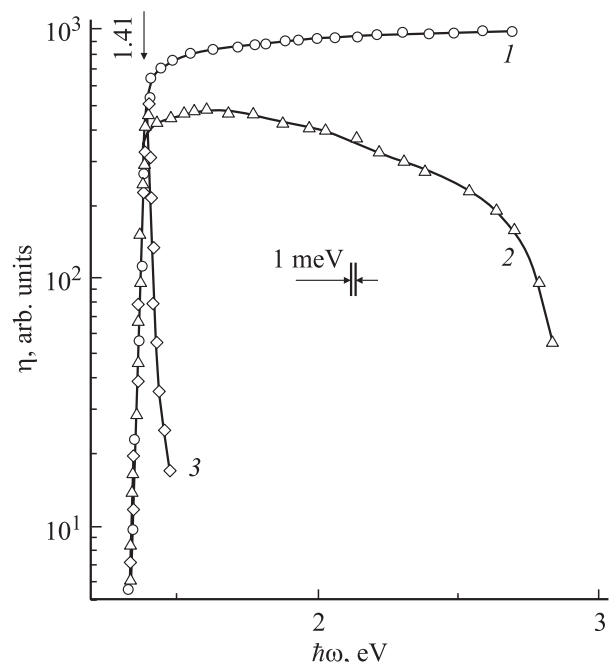


Рис. 3. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования структур $M/(P + \text{GaAs})/p\text{-GaAs}$ при $T = 300$ К. Геометрия освещения неполяризованным излучением: 1 и 2 — освещение со стороны слоя металла; 3 — освещение со стороны подложки толщиной $d = 0.3$ мм. Номера образцов: кривая 1 — 11, кривые 2 и 3 — 17.

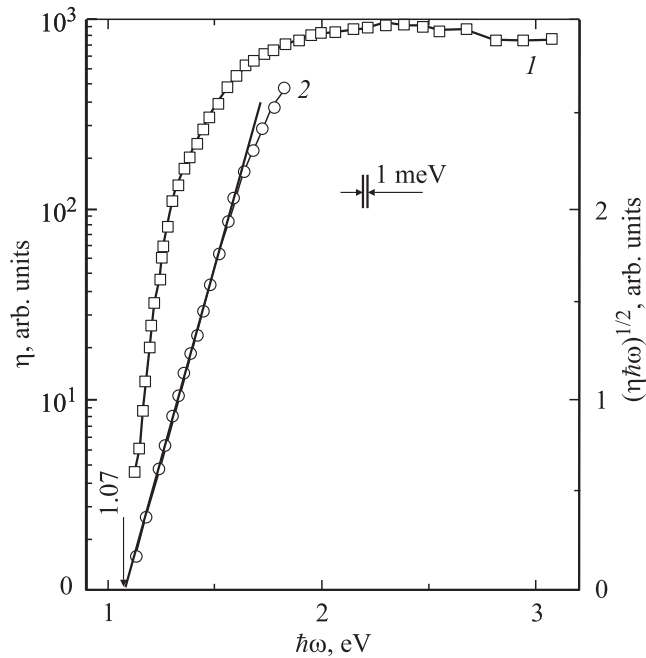


Рис. 4. Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования (кривая 1) и зависимость $(\eta\hbar\omega)^{1/2} = f(\hbar\omega)$ (кривая 2) для структуры $M/(P + \text{GaAs})/p\text{-Si}$ при $T = 300\text{ K}$. Образец 23. Освещение неполяризованным излучением со стороны слоя металла.

(рис. 1, кривые 1 и 2), новый подход в формировании гетероструктур из мелкодисперсных частиц GaAs позволяет обеспечить эффективное подавление рекомбинационных процессов в глубине области фундаментального поглощения объемного GaAs, несмотря на механическое дробление вещества, использованное для понижения размерности частиц полупроводника.

На рис. 4 приведена также типичная спектральная зависимость фоточувствительности гетероструктуры $M/(P + \text{GaAs})/\text{Si}$, представляющей собой контакт двух разных полупроводников в различных состояниях: объемный кристалл Si и мелкодисперсная фаза GaAs. Такая гетеросистема при освещении со стороны слоя эпоксидной смолы с внедренными в нее мелкодисперсными частицами GaAs, как видно из рис. 4 (кривая 1), обнаруживает высокую фоточувствительность в широкой спектральной области от 1 до 3 эВ и типичный для идеальных гетеропереходов „эффект окна“ [11]. Длинноволновый край фоточувствительности таких гетероструктур следует характерному для непрямых межзонных оптических переходов в Si закону $\eta\hbar\omega \propto (\hbar\omega - E_G^{\text{Si}})^2$ и поэтому может быть приписан поглощению излучения в подложке из кремния (рис. 4, кривая 2). Отсутствие выраженного коротковолнового спада фоточувствительности при освещении структур со стороны слоя $P + \text{GaAs}$ в свою очередь может свидетельствовать о подавлении рекомбинационных процессов в области фундаментального поглощения применяемого при создании этой гетероструктуры мелкодисперсного

полупроводника. С учетом [8,9] можно полагать, что одной из возможных причин достигаемого расширения спектрального диапазона фоточувствительности в таких гетероструктурах может быть трансформация электронного спектра полупроводника в мелкодисперсной фазе полупроводника.

Таким образом, на основе объемных алмазоподобных полупроводников (на примере Si, GaAs) и рассредоточенной в диэлектрике мелкодисперсной полупроводниковой фазы впервые созданы фоточувствительные структуры, для которых достигнуто расширение спектрального диапазона высокой фоточувствительности в коротковолновую спектральную область, что может быть вызвано понижением размерности кристаллов полупроводников в процессе их измельчения.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov. Rev. Mod. Phys., **73**, 767 (2001)
- [2] J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. 2000 IEEE LEOS Annual Meeting Conf. Proc. (November 13–14, 2000) **1**, p. 304.
- [3] N.A. Maleev, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.P. Vasilev, E.S. Semenova, Yu.M. Shernyakov, E.V. Nikitina, N.V. Kryzhanovskaya, D.S. Sirov, I.P. Soshnikov, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. 10th Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“ (St. Petersburg, Russia, June 17–21, 2002) p. 399.
- [4] Л.В. Асрян, Р.А. Сурис. ФТП, **38**, 3 (2004).
- [5] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, В.Х. Шпунт. ЖТФ, **70**, 114 (2000).
- [6] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [7] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*. Справочник, под ред. А.В. Новоселовой (М., Наука, 1979).
- [8] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 245 (1997).
- [9] E.V. Astrova, A.A. Lebedev, A.D. Remenyuk, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud'. Thin Sol. Films, **297**, 129 (1997).
- [10] A. Shileika. Surf. Sci., **37**, 730 (1973).
- [11] Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках* (М., Мир, 1973).

Редактор Л.В. Беляков

Photosensitivity of heterostructures of semiconductor fine dispersion phase

*YU.A. Nikolaev, V.Yu. Rud**, *Yu.V. Rud'*, *E.I. Terikov*,
T.N. Ushakova

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

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195256 St. Petersburg, Russia

Abstract The photoelectrical properties of heterostructures formed by a fine dispersion phase and continuous Si and GaAs crystals were studied. The side-band photovoltaic effect was observed which can be explained by reduction of the semiconductor crystal.