

Фотоэлектрические явления в гетероструктурах $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$

© Н. Мелл*, Ю.А. Николаев[†], В.Ю. Рудь⁺, Ю.В. Рудь, Е.И. Тербуков

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

* Philipps-University, D-35032 Marburg, Germany

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

(Получена 11 апреля 2001 г. Принята к печати 19 апреля 2001 г.)

Методом плазмохимического осаждения получены гетероструктуры $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ с различным объемным соотношением x микрокристаллической и аморфной фаз кремния. Вариация соотношения достигалась путем изменения концентрации силана в водороде. Исследованы стационарные вольт-амперные характеристики и спектральные зависимости fotocувствительности полученных структур в естественном и линейно поляризованном излучении в зависимости от фазового состава тонких ($d_1 \cong 0.6\text{--}0.8$ мкм) пленок микрокристаллической и аморфной фаз кремния. Обнаружен фотовольтаический эффект и наведенный фото-плеохроизм полученных структур. Сделан вывод о перспективах применения нового типа гетеропереходов в фотопреобразователях естественного и линейно поляризованного излучений.

Обнаружение эффективной фото- и электролюминесценции пористого кремния (P-Si) при комнатных температурах в видимой спектральной области вскрыло новые возможности управления фундаментальными свойствами полупроводников исключительно за счет понижения их размерности [1,2] и одновременно стимулировало развитие новых технологических процессов создания тонкопленочных материалов, включающих нано- и микрокристаллиты. Метод плазмохимического осаждения в плазме тлеющего разряда из разбавленного в водороде силана (концентрация водорода менее 3%) позволяет получать тонкие пленки кремния, представляющие собой включения микрокристаллитов (μc) кремния в его аморфную ($a\text{-Si:H}$) матрицу [3–6]. Размеры кристаллитов Si в этих пленках обычно лежат в пределах 3.6–5.7 нм, а их объемная часть x может контролироваться от ≈ 15 до 100% за счет изменения условий осаждения [4,6]. Излучательная рекомбинация пленок, содержащих нано- и микрокристаллы кремния, наблюдается в видимой области и приблизительно на 2 порядка оказывается более слабой, чем в пористом кремнии P-Si [5]. В работе [4] показано также, что анализ спектров комбинационного рассеяния позволяет контролировать величину x в пленках, осажденных на подложки из кварца или кремния. В настоящей работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических свойств нового типа гетероструктур (ГС), основанных на контакте двухфазных пленок $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ с монокристаллической подложкой $c\text{-Si}$.

Пленки $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ выращивались плазменным методом с использованием разбавленного водородом силана (SiH_4). Процентное содержание силана f в водороде, использованное при получении таких пленок, приведено в таблице. Осаждение пленок $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ осуществлялось на полированные пластины p -типа кремния с удельным сопротивлением 20 Ом · см и кристаллогра-

фической ориентацией (100) при толщине ~ 0.4 мм и температурах осаждения $T_s = 160^\circ\text{C}$. Как показал анализ спектров комбинационного рассеяния, изменение величины f позволяет воспроизводимо контролировать соотношение объемов микрокристаллической и аморфной фаз Si (см. таблицу).

На полученных гетероструктурах проводились измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектров относительной квантовой эффективности фотопреобразования η в естественном и линейно поляризованном излучении (ЛПИ). Некоторые фотоэлектрические параметры исследованных ГС в зависимости от условий их получения приведены в таблице. Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем.

1. На рис. 1 приведены типичные ВАХ для двух ГС, выращенных при различном содержании силана в водороде, что позволяет контролировать соотношение между кристаллической и аморфной фазами Si (см. таблицу). Видно, что полученные ГС независимо от соотношения объемов микрокристаллической и аморфной фаз кремния в пленках обнаруживают четкое выпрямление, причем прямым ветвям ВАХ всегда отвечает отрицательная полярность внешнего смещения на слое $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$. В области напряжений смещения $U < 0.6\text{--}0.8$ В прямые ветви ВАХ при $T = 300$ К описываются обычным диодным уравнением с высоким значением фактора неидеальности $\cong 4.5\text{--}6$ у разных ГС. Это может быть обусловлено влиянием высокого последовательно-го сопротивления, что в итоге не позволяет судить о механизме протекания прямого тока в этих ГС. При напряжениях смещения $U > 1$ В прямые ветви ВАХ во всех исследованных ГС определяются соотношением $I = (U - U_0)/R_r$, где величина напряжения отсечки U_0 лежит в пределах 0.6–0.9 В для разных ГС и не имеет однозначной связи с фазовым составом пленок. Подобное заключение можно высказать и о величине

[†] E-mail: yu.nikolaev@pop.ioffe.rssi.ru

Фотозлектрические свойства гетероструктур ($\mu c_x a_{1-x}$)-Si:H/c-Si ($T = 300$ K)

Номера образцов	$f, \%$	$d_1, \text{мкм}$	$x, \%$	$U_0, \text{В}$	$R_f \cdot 10^{-4}, \text{Ом}$	$S_U^m, \text{В/Вт}$	$S_f^m, \text{мкА/Вт}$	$\Delta \hbar \omega^m, \text{эВ}$	$\delta_{1/2}, \text{эВ}$	i_m^p / i_0	$P_f, \%$ ($\Theta = 75^\circ$)
D44	1.5	0.65	86	0.85	20	10	12	1.32–1.55	0.83	1.75	56
D45	2.0	0.75	81	0.66	8.6	730	80	1.32–1.65	0.81	1.77	55
D46	2.5	0.70	65	0.80	37	74	8	1.35–1.68	0.78	1.70	58
D47	3.0	0.65	50	0.62	15	8300	66	1.60–1.70	0.77	1.73	55
D48	3.5	0.70	0	0.61	50	86	14	1.32–1.74	0.75	1.74	58
D56	8.0	0.80	0	0.90	26	145	48	1.35–1.65	0.72	1.70	57

остаточного сопротивления структур R_f (см. таблицу). Можно лишь указать на тенденцию роста R_f по мере перехода к ГС на основе аморфных ($x = 0$) пленок кремния. По этой причине, как видно из рис. 1, происходит смещение линейного участка прямой ветви ВАХ в область более высоких прямых смещений. Тот факт, что известное для таких двухфазных пленок возрастание удельного сопротивления на 6–8 порядков величины с понижением x от 90 до 0% [6] практически не проявилось в ВАХ ГС, может быть следствием анизотропии проводимости пленок со столбчатой структурой [6], с одной стороны, и низких толщин пленок d_1 (см. таблицу) в исследованных ГС. Обратные токи в этих ГС при $U \leq 5$ В достаточно низкие и обычно не превышают $(2-5) \cdot 10^{-7}$ А при $T = 300$ К. В целом следует отметить, что обеспечиваемое в использованном технологическом процессе управление объемным соотношением микрокристаллической и аморфной фаз кремния в пленочной компоненте полученных ГС практически не сказывается на процессах токопрохождения в таких весьма

специфических структурах. Очевидно, что электрические свойства таких структур должны определяться по крайней мере двумя различными типами гетероконтактов: ($\mu c_x a_{1-x}$)-Si:H/c-Si и a-Si:H/c-Si. Тот факт, что ВАХ не обнаружили зависимости от x , позволяет считать, что энергетический барьер определяется в основном ближним порядком, который для кремния сохраняется практически неизменным в кристаллической и аморфной фазах.

2. При освещении всех полученных ГС возникает фотовольтаический эффект, знак которого оказался независимым от локализации светового зонда (диаметр ~ 0.2 мм) на поверхности структур и энергии падающих фотонов. Поэтому можно считать, что фотовольтаический эффект в таких случаях определяется единственным энергетическим барьером, возникающим вследствие осаждения тонких пленок на монокристаллическую подложку c-Si. Как правило, фоточувствительность ГС преобладает, если фоторегистрация осуществляется при их освещении со стороны тонких пленок. Максимальные значения вольтовой S_U^m и токовой S_f^m фоточувствительности полученных гетероструктур приведены в таблице. Однозначной связи фоточувствительности ГС с величинами f и x не наблюдается. Пожалуй, можно только отметить, что максимальная фоточувствительность реализуется в структурах, включающих двухфазные пленки ($x = 0.81$ и 0.5). При этом пленки всегда заряжаются отрицательно, что отвечает направлению выпрямления.

На рис. 2 приведены спектральные зависимости относительной квантовой эффективности η для полученных ГС при их освещении неполяризованным излучением со стороны тонких пленок. Видно, что фотовольтаический эффект во всех структурах широкополосный. Длинноволновый край фоточувствительности обусловлен межзонными переходами в подложке ГС. Высокая фоточувствительность наблюдается в глубине фундаментального поглощения кристаллического кремния, а ее спектральный диапазон $\Delta \hbar \omega^m$ (см. таблицу) и величина сохраняются практически постоянными в пределах от 1.3 до 1.7 эВ. Полная ширина полосы фоточувствительности на полувысоте $\delta_{1/2}$ для полученных ГС приведена в таблице. Величина $\delta_{1/2}$ оказывается достаточно высокой, что отражает достаточно хорошее качество гетерограницы. Обращает на себя также внимание тот факт, что ширина полосы η

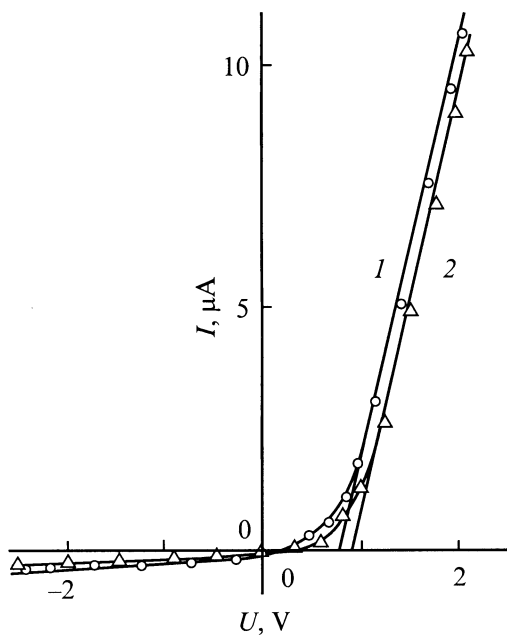


Рис. 1. Стационарные вольт-амперные характеристики гетероструктур ($\mu c_x a_{1-x}$)-Si:H/c-Si; $T = 300$ К. 1 — образец D44, 2 — образец D56.

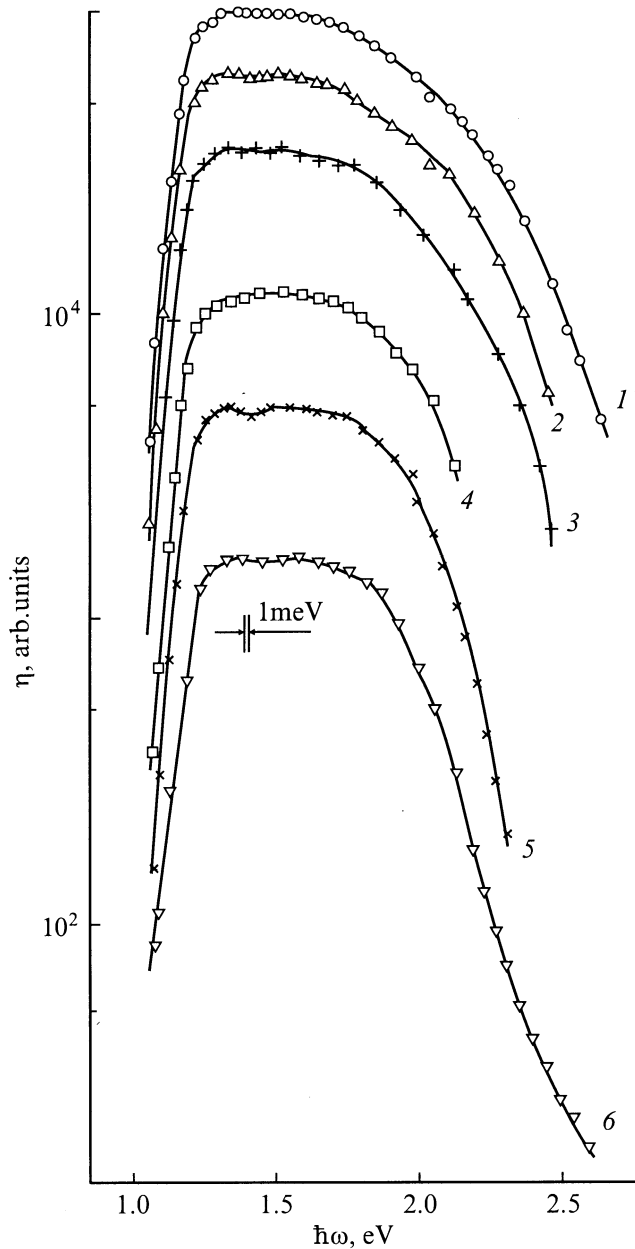


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктур $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ (1 — образец D44, 2 — образец D45, 3 — образец D46, 4 — образец D47, 4 — образец D48, 6 — образец D56) в естественном свете при $T = 300\text{ K}$. Освещение структур со стороны слоев $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$. Кривые смещены вдоль оси η .

увеличивается с возрастанием объемного содержания микрокристаллитов, вкрапленных в аморфную матрицу кремния. Последнее обстоятельство позволяет считать, что рекомбинация фотогенерированных пар на гетерогранице между двухфазной пленкой $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ и монокристаллическим кремнием, а также оптические потери в двухфазной пленке относительно ГС $a\text{-Si:H/c-Si}$ не усиливаются. Это может быть вызвано увеличением

ширины запрещенной зоны вкрапленных в аморфную матрицу микрокристаллитов кремния [5]. По-видимому, получение ГС с $x > 86\%$ позволяет обеспечить дальнейшее увеличение $\delta_{1/2}$ в актуальном для солнечных элементов спектральном диапазоне.

3. Исследования фоточувствительности ГС $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ в линейно поляризованном излучении показали, что при их освещении со стороны тонких пленок $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ вдоль нормали к их поверхности поляризационная фоточувствительность отсутствует и фотоплетохроизм $P_l = 0$ [7,8]. Это обстоятельство соответствует изотропному характеру фотоактивного поглощения в подложке и тонких пленках, образующих исследованные ГС. Фоточувствительность к положению вектора электрического поля световой волны \mathbf{E} полученных ГС возникает только в условиях наклонного падения ЛПИ на их приемную плоскость [8]. На рис. 3, *a* и *b* представлены примеры типичных экспериментальных зависимостей фототоков i^P (вектор \mathbf{E} параллелен плоскости падения (ПП)) и i^S ($\mathbf{E} \perp$ ПП) от угла падения θ

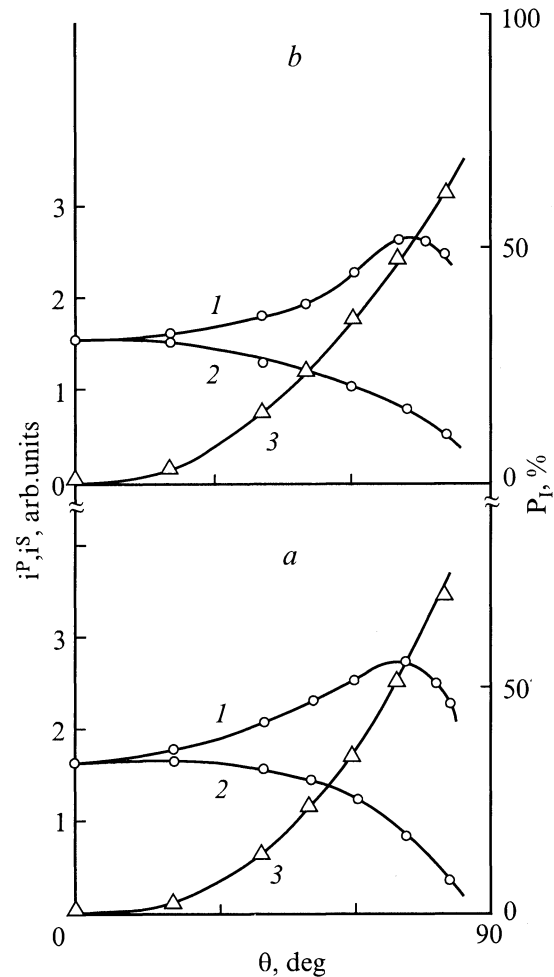


Рис. 3. Зависимости фототоков i^P (1) и i^S (2) и коэффициента наведенного фотоплетохроизма P_l (3) от угла падения ЛПИ на приемную плоскость слоев $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ при $T = 300\text{ K}$ (*a* — образец D44, *b* — образец D56).

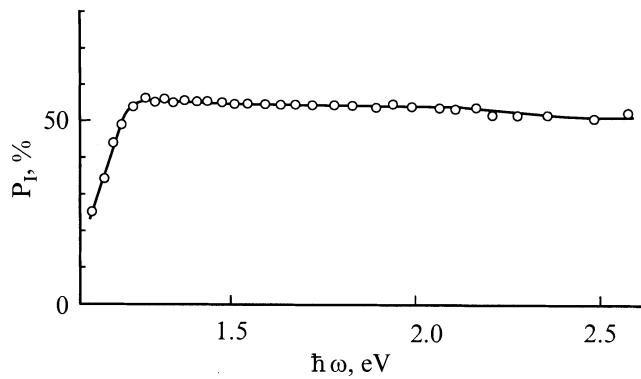


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма P_I гетероструктуры $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$, $T = 300\text{ K}$ (образец $D = 46$, $\theta = 75^\circ$).

ЛПИ на приемную плоскость ГС $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$. Видно, что угловые зависимости фототоков i^P и i^S в этих ГС находятся в соответствии с соотношениями Френеля для амплитудных коэффициентов прохождения ЛПИ разных азимутов границы воздух/пленка $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ [8]. Действительно, во всей области фоточувствительности изученных ГС фототок i^P с ростом θ в начале возрастает и проходит через максимум i_{m}^P , после чего происходит его понижение. Этот рост обусловлен снижением потерь излучения на отражение и наблюдается в случае достаточно высокого качества приемной плоскости [9]. Величина отношения фототока в максимуме к фототоку при $\theta = 0$ i_{m}^P/i_0 для всех полученных ГС в пределах области фоточувствительности оказалась близкой (см. таблицу) и характеризует поверхность слоев $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H}$ как весьма совершенную. Фототок i^S для всех ГС, как видно из рис. 3 (кривая 2), понижается с увеличением θ , что с учетом результатов [10,11] может быть основанием для вывода о том, что интерференция ЛПИ в тонких пленках входного окна ГС не проявляется. Коэффициент наведенного наклонным падением ЛПИ фотоплеохроизма P_I для полученных ГС $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ с ростом угла падения (рис. 3, кривая 3) следует квадратичному закону $P_I \propto \theta^2$ во всей области фоточувствительности. Величина коэффициента наведенного фотоплеохроизма в этих ГС при $\theta = \text{const}$ сохраняется практически постоянной в пределах области их фоточувствительности (рис. 4), как и в случае поверхностно-барьерных структур [7,8]. При этом важно подчеркнуть, что величина P_I в этих ГС находится в соответствии с показателем преломления для объемного $c\text{-Si}$ [8], что также типично для поверхностно-барьерных структур [7].

Таким образом, гетероструктуры на основе тонких двухфазных пленок, состоящих из включений микрокристаллитов Si в аморфной матрице кремния, обнаруживают выпрямление и широкополосный фотовольтаический

эффект, который может быть реализован в фотопреобразователях естественного и линейно поляризованного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы COPERNICUS (грант № IC15-CT98-0819, ТИМОС) и проекта Министерства промышленности, науки и технологий по направлению "Лазерная физика" (проект № 08.01.100 ф).

Список литературы

- [1] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2] N. Koshida, H. Koyama. Appl. Phys. Lett., **60**, 347 (1992).
- [3] Y. He, C. Yin, G. Geng, L. Wang, X. Liu, G.Y. Hu. J. Appl. Phys., **75**, 797 (1994).
- [4] E.I. Terukov, V.Kh. Kudoyarova, V.Yu. Davydov, K.V. Koughia, G. Weiser, H. Mell. Mater. Sci. Engin. B, **69-70**, 266 (2000).
- [5] X.N. Liu, X.W. Wu, X.-M. Bao, Y.L. He. Appl. Phys. Lett., **64**, 220 (1994).
- [6] D. Ruff. *Elektrischer Transport in mikrokristallen Silizium*. (Philips-University, Marburg, 1999).
- [7] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. Письма ЖТФ, **39**, 18 (1992).
- [8] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **33**, 513 (1998).
- [9] Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Л.М. Федоров. ФТП, **27**, 1611 (1993).
- [10] V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', H.W. Shock. Semicond. Sci. Technol., **15**, 625 (2000).
- [11] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 245 (1997).

Редактор Л.В. Беляков

Photoelectrical phenomena in $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ heterostructures

H. Mell*, Yu.A. Nikolaev, V.Yu. Rud'+, Yu.V. Rud', E.I. Terukov

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

* Philipps-University, D-35032 Marburg, Germany

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

Abstract The heterostructures $(\mu c_x a_{1-x})\text{-Si:H/c-Si}$ with different value relation (x) of microcrystalline and amorphous phase were formed by a glow discharge plasma chemical deposition method. The deviation of this relation was achieved by silane/hydrogen gas mixture concentration changing. The current-voltage characteristics and spectral dependence of photosensitivity of formed structure in natural and linearly-polarized radiation depending on silicon thin films phase mixture were studied. The photovoltaic effect and photopleochroism of these structures were determined. The conclusion was drawn about perspective applications of new type heterostructures in photoconverters of natural and linearly-polarized radiation.