

07

## Фоточувствительность кремниевых аморфно-кристаллических гетероструктур с инверсионным каналом

© А.М. Данишевский, И.М. Котина, О.И. Коньков,  
Е.И. Теруков, Л.М. Тухконен

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,  
Гатчина, Ленинградская область, Орлова Роща  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
E-mail: Alex.d@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2013 г.

Представлены результаты исследования влияния удельного сопротивления кристаллического кремния ( $1.5\text{--}40\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ ) и толщины аморфной пленки ( $200\text{--}2000\text{ \AA}$ ) на фотоэлектрические свойства гетероструктур  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ , созданных на основе высокоомного кремния  $p$ -типа. На исследуемых гетероструктурах наблюдался инверсионный приповерхностный изгиб зон в кристаллическом кремнии. Наличие проводящего канала обеспечило сбор неравновесных носителей при освещении областей, удаленных от электрода на расстояния, существенно превышающие их диффузионную длину. Гетероструктуры обладали высокой фоточувствительностью, в том числе и в УФ-области спектра. Спектральные характеристики таких структур в видимой и ближней ИК-области были аналогичны характеристикам кремниевых туннельных МДП-структур.

Аморфно-кристаллические  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ , гетероструктуры на основе низкоомного кремния используются для создания солнечных элементов. В связи с этим исследованию их фотоэлектрических свойств, формированию гетерограницы, токопрохождению посвящено значительное число работ [1–4]. Большой интерес представляют также аморфно-кристаллические структуры на высокоомном кремнии. В этом случае реально получать достаточно большие обедненные слои при относительно малых смещениях, что способствует сбору фотоносителей за счет дрейфа и, таким образом, более высокое быстродействие фотодиодов.

Как известно [5], при наличии инверсионного изгиба зон на границе раздела обеспечивается продление чувствительности фотоприемников в коротковолновую область в оптическом диапазоне спектра. В случае фотоприемников на основе барьеров Шоттки инверсионный слой в кремниевой подложке создается положительным зарядом, встроенным в тонком диэлектрике  $\text{SiO}_2$ . Однако получение тонкого слоя окисла со встроенным зарядом определенной величины представляет собой достаточно сложный технологический процесс, осуществляемый к тому же при достаточно высокой температуре (не менее  $600^\circ\text{C}$ ), и это в случае высокоомного кремния приводит к уменьшению времени жизни носителей.

Оценки показывают, что при соответствующей плотности состояний на гетерогранице и разности работ между аморфным и кристаллическим кремнием в гетероструктурах  $a\text{-Si:H/c-Si}$  на основе высокоомного кремния может реализоваться приповерхностный инверсионный изгиб зон в кристаллическом кремнии. Температура осаждения пленки аморфного гидрированного кремния на подложку обычно не превышает  $250\text{--}280^\circ\text{C}$ . При таких режимах изменения электрофизических свойств кристаллического кремния не происходит, а наличие водорода при осаждении пленки обеспечивает качественную границу раздела.

В данной работе исследуется влияние удельного сопротивления кристаллического кремния и толщины аморфных слоев на фотоэлектрические характеристики гетероструктур  $a\text{-Si:H/c-Si}$ , созданных на основе высокоомного  $p$ -кремния.

Исследуемые гетероструктуры создавались на бездислокационном кремнии  $p$ -типа (111) с удельным сопротивлением  $1.5\text{--}40\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$  и временем жизни электронов  $500\text{--}1000\ \mu\text{s}$ . Пластины  $16$  или  $9\text{ mm}$  в диаметре и  $1\text{ mm}$  толщиной шлифовались, травились в смеси  $\text{HF}:\text{HNO}_3$  (1:8) и тщательно промывались деионизованной водой. Аморфные пленки осаждались на подложку в плазме высокочастотного тлеющего разряда (ВЧ-разряд) из смеси газов:  $\text{SiH}_4/\text{Ar} = 3.4 \cdot 10^{-1}$  при  $T = 250^\circ\text{C}$ . Диаметр пленки был на  $2\text{ mm}$  меньше диаметра подложки; толщины пленок — в диапазоне  $200\text{--}2000\ \text{\AA}$ .

На аморфную пленку путем вакуумного напыления через маску наносились металлические контакты из алюминия диаметром  $3\text{ mm}$ . Предварительно формировался омический контакт к кристаллическому кремнию путем вакуумного напыления алюминия и прогрева при  $450^\circ\text{C}$ .

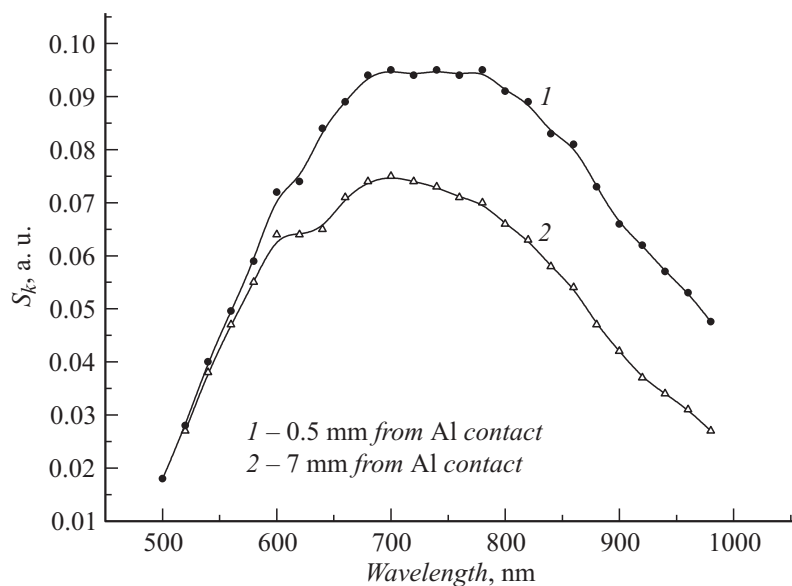
Спектральные характеристики фототока измерялись при нулевом и различных обратных смещениях. В качестве источника монохромати-

ческого излучения использовался монохроматор с кварцевой лампой, освещение производилось полоской света размером  $1 \times 3$  mm. Абсолютная интенсивность излучения определялась с помощью калиброванного кремниевого фотодиода. Все измерения были произведены при комнатной температуре.

Значения обратных токов созданных структур при смещениях  $1-100$  V лежали в диапазоне  $5 \cdot 10^{-9}-10^{-6}$  A ( $T = 300$  K). При этом изменение площади контакта на пленке аморфного кремния практически не влияло на величину обратного тока, тогда как величина обратного тока уменьшалась с уменьшением диаметра подложки, т.е. зависела от площади гетероконтакта. Поскольку пленки были достаточно высокоомны, последний факт мы связываем с наличием проводящего канала в кристаллическом кремнии на гетерогранице. Существование такого канала подтвердилось при исследованиях фототока короткого замыкания в случае сканирования структур со стороны пленки  $a$ -Si:H узкой полоской света.

На рис. 1 в качестве примера приведены спектральные характеристики фототока гетероструктуры  $a$ -Si:H/ $c$ -Si, созданной на кристаллическом кремнии с удельным сопротивлением  $1.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  с относительно толстой аморфной пленкой ( $1000 \text{ \AA}$ ). Даже без обратного напряжения на структуре величина фотосигнала довольно слабо зависит от положения светового зонда по отношению к контакту: фототоки при освещении вблизи контакта и на заметном удалении от него ( $7 \text{ mm}$ ) оказываются довольно близкими. В случае, когда на поверхность аморфной пленки (по ее периферии) наносился круговой контакт, положение светового зонда на пленке внутри кругового контакта вообще не влияло на величину фототока. Данные факты свидетельствуют о том, что сбор неравновесных носителей осуществляется с расстояний, значительно превышающих диффузионную длину. Последнее может иметь место лишь при наличии инверсионного канала. Такой канал был обнаружен во всех исследуемых гетероструктурах с аморфным кремнием, независимо от толщины аморфной пленки и удельного сопротивления подложки в диапазоне  $1.5-40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  [6].

Был проведен также контрольный эксперимент на исследуемой структуре с двумя контактами к аморфной пленке, разнесенными на  $8 \text{ mm}$ . Цепи обоих контактов 1 и 2 замкнуты по отдельности с тыловым контактом 3, и в них измеряется фототок. Когда световой зонд устанавливается рядом с контактом 2, а в цепи контакта 1 имеется



**Рис. 1.** Спектральная характеристика фототока  $S_k$  гетероструктуры  $a\text{-Si:H/c-Si}$  ( $\rho_{\text{Si}} = 1.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ; толщина аморфной пленки  $1000 \text{ \AA}$ ) в режиме тока короткого замыкания при различном расстоянии пятна освещения от контакта.

источник напряжения и величина обратного смещения изменяется от 0 до 0.5 V, фототок в цепи контакта 1 существенно увеличивается с напряжением, а фототок в цепи контакта 2 при этом уменьшается. При таком же изменении смещения на контакте 2 наблюдается обратная картина (т.е. увеличивается ток в цепи 2, а в цепи 1 — уменьшается). Отметим, что перемещение светового зонда лишь слабо повлияло на измеряемые фототоки.

Интересно, что на аналогичных гетероструктурах с пленками аморфного углерода, нанесенными магнетронным напылением, описанные эффекты отсутствовали: величина фотосигнала уменьшалась с удалением светового зонда от контакта в соответствии с диффузионной длиной носителей.

Для гетероструктур с аморфным кремнием разница между величиной фотосигнала при освещении вблизи контакта и на расстоянии от

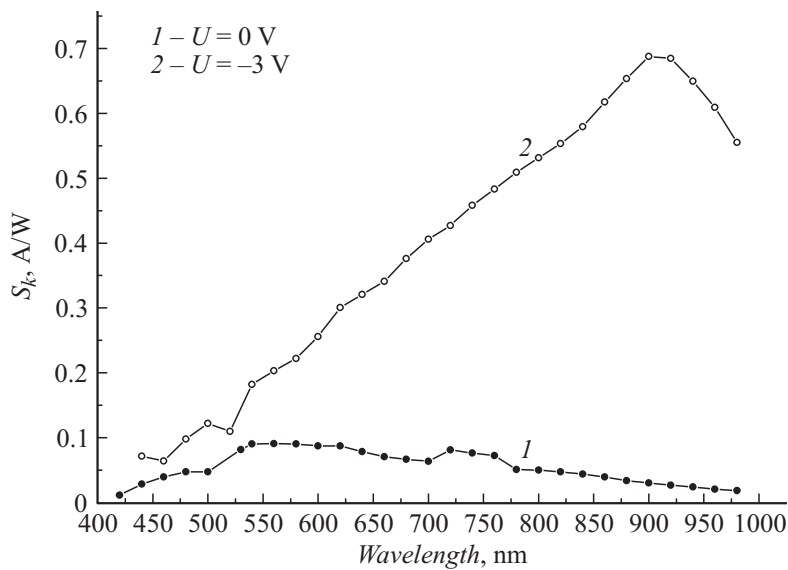
него ( $\Delta I$ ) росла с увеличением толщины аморфной пленки. Однако приложение к структуре обратного смещения приводило к существенному уменьшению величины  $\Delta I$ . Величина обратного смещения, необходимого для выравнивания фототоков, увеличивалась с увеличением толщины пленки.

Для сбора избыточных носителей на металлический контакт, кроме проводящего канала, необходимо также наличие в нем тянущего поля. Такое поле при отсутствии обратного смещения возникает за счет разности значений энергии поверхностных уровней Ферми на гетерогранице под металлическим контактом и вне его. Исходя из этого, можно понять, почему величина  $\Delta I$  в отсутствие обратного напряжения возрастала при увеличении толщины аморфной пленки. Влияние контакта на положение уровня Ферми на гетерогранице с увеличением толщины аморфной пленки уменьшается, и в результате градиент потенциала в инверсионном канале, определяющий сбор фотоносителей, также уменьшается.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики гетероструктуры  $a\text{-Si}:\text{H}/c\text{-Si}$ , изготовленной на подложке с удельным сопротивлением  $2\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  и толщиной аморфной пленки  $\sim 500 \text{ \AA}$ . Спектры, измеренные без напряжения и с обратным смещением  $3\text{ V}$ , заметно различаются. При  $U = 0$  во всем спектральном диапазоне имеет место довольно низкая фоточувствительность с максимумом при  $\lambda = 540 \text{ nm}$ . При подаче обратного смещения фоточувствительность существенно возрастает, причем спад ее в длинноволновой области спектра сменяется не менее резким ее возрастанием с максимумом при  $\lambda = 900 \text{ nm}$ . При этом влияние напряжения на величину фототока для длин волн  $\lambda < 600 \text{ nm}$  значительно меньше.

Для понимания полученных экспериментальных результатов рассмотрим процессы, происходящие в гетероструктуре при освещении.

Полный фототок гетероструктуры складывается из фототоков, возникающих за счет разделения электронно-дырочных пар, генерируемых в аморфной пленке ( $J_{am}$ ) и в кристаллическом кремнии ( $J_{cr}$ ). При  $\lambda < 600 \text{ nm}$  все большая часть носителей генерируется в приповерхностной области и аморфной пленке. Поскольку время жизни неравновесных носителей в приповерхностном канале всегда меньше времени жизни в толще подложки [7], общие рекомбинационные потери фотоносителей увеличиваются. Кроме того, с уменьшением длины волны за счет увеличения коэффициента поглощения в  $a\text{-Si}:\text{H}$  уменьшается

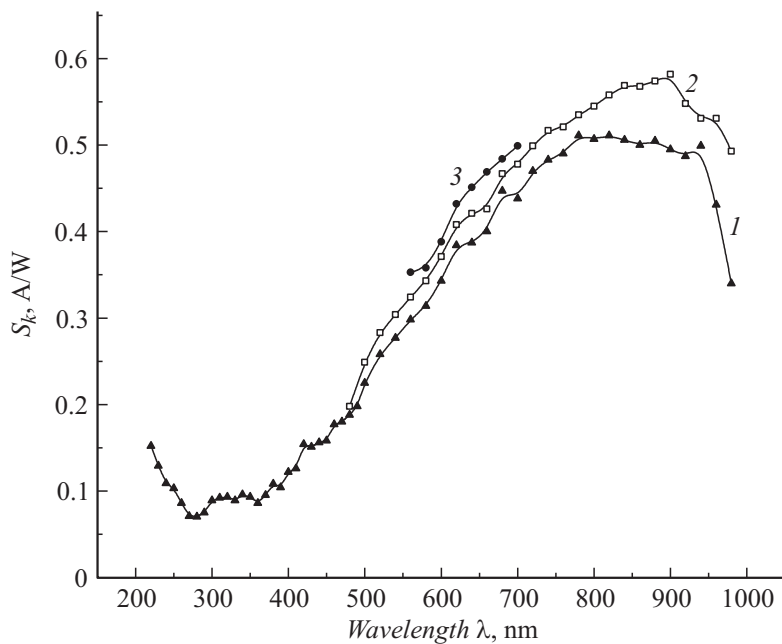


**Рис. 2.** Спектральные характеристики фототока гетероструктуры  $a$ -Si:H/ $c$ -Si ( $\rho_{Si} = 2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ , толщина аморфной пленки  $500 \text{ \AA}$ ) с Al-контактом при различном напряжении смещения.

интенсивность света, дошедшего до кристаллического кремния. Оба эти фактора обуславливают коротковолновый спад фоточувствительности указанных структур.

При длинах волн  $\lambda > 770 \text{ nm}$  вкладом аморфной компоненты фототока можно пренебречь, поскольку  $E_g(a\text{-Si:H}) = 1.6 \text{ eV}$  и коэффициент поглощения достаточно мал. В этом спектральном диапазоне, как показывают оценки, генерация носителей происходит за пределами слоя объемного заряда, т.е. в области, где поле почти отсутствует. Это приводит при  $U = 0$  к их растеканию в неосвещенные области рекомбинации и, как следствие, к неполному сбору.

С приложением смещения все большая часть фотоносителей достигает границы раздела, и их транспорт к металлическому контакту, зависящий от разрывов зон и дрейфа в аморфной пленке, облегчается. Эти факторы и определяют наблюдаемый столь существенный рост фототока при подаче смещения.



**Рис. 3.** Спектральная характеристика фототока гетероструктуры  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  ( $\rho_{\text{Si}} = 40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ , толщина аморфной пленки  $200 \text{ \AA}$ ) при различных обратных напряжениях смещения: 1 —  $U = 0$ ; 2 —  $U = -0.375 \text{ V}$ ; 3 —  $U = -1.6 \text{ V}$ .

Для подложек с большим удельным сопротивлением (8, 12,  $40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ) фоточувствительность гораздо слабее зависит от приложенного смещения во всей спектральной области. На рис. 3 в качестве примера приведены спектральные зависимости гетероструктуры на подложке с  $\rho = 40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  и толщиной аморфной пленки  $200 \text{ \AA}$ . Нетрудно видеть, что в области длин волн как меньших, так и больших  $540 \text{ nm}$  фототок слабо зависит от обратного смещения.

Таким образом, исследовано влияние сопротивления подложки кристаллического кремния  $p$ -типа и толщины аморфной пленки на фоточувствительность аморфно-кристаллических гетероструктур  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ . Полученные результаты свидетельствуют, что в указанных гетероструктурах, созданных на кремнии с удельным сопротивлением в диапазоне  $1.5\text{--}40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ , существует приповерхностный инверсион-

ный канал. Канал обеспечивает хороший сбор фотоносителей даже в ситуации, когда освещение производится на значительном расстоянии от контакта. Граница коротковолновой чувствительности исследуемых гетероструктур определялась толщиной аморфной пленки, максимум в спектральном распределении фототока — толщиной аморфной пленки и удельным сопротивлением подложки.

При выполнении оптимальных условий имеется возможность создавать фотоприемники большой площади с высокой чувствительностью (в том числе в УФ-области спектра) и достаточной однородностью с использованием относительно простой и дешевой технологии.

## Список литературы

- [1] *Maslova O.A., Alvarez J., Gushina E.V., Favre W., Gueunier-Farret M.E., Gudovskikh A.S., Ankudinov A.V., Terukov E.I., Kleider J.-P.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. P. 252 110.
- [2] *Jian V.Li, Richard S., Crandall S., David L. Young, Matthew R. Page, Eugene Iwaniczko et al.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 114 502.
- [3] *Leendertz C., Mingirulli N., Schulze T.F., Kleider J.P., Rech B., Korte L.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 202 108.
- [4] *Schulze T.F., Korte L., Rech B.* // Thin Solid Films. 2012. V. 520. P. 4439.
- [5] *Зуев В.А., Понов В.Г.* Фотоэлектрические МДП приборы. М.: Радио и связь, 1983. 160 с.
- [6] *Афанасьева Н.П., Данишевский А.М., Дербин А.В., Котина И.М.* Ядерно-спектрометрические и фотоэлектрические свойства аморфно-кристаллических гетероструктур. Препринт ЛИЯФ АН СССР № 1759. 1991. 35 с.
- [7] *Овсяк В.Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука, 1984. 253 с.