

Спектральные особенности фотоответа структур с наночастицами кремния

© О.С. Кен[†], Д.А. Андроников, Д.А. Явсин, А.В. Кукин, С.Н. Данилов*, А.Н. Смирнов, О.М. Сресели, С.А. Гуревич

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

* Регенсбургский университет,
93053 Регенсбург, Германия

(Получена 10 июня 2014 г. Принята к печати 18 июня 2014 г.)

Исследованы спектральные характеристики фотоответа гетероструктур со слоями плотноупакованных аморфных наночастиц кремния, полученных методом лазерного электродиспергирования. Структуры характеризуются выпрямляющими свойствами. Отжиг на воздухе приводит к появлению в слоях наночастиц оксида кремния, кроме того, происходит частичная кристаллизация наночастиц. Спектральные характеристики фотоответа гетероструктур обладают рядом особенностей. По сравнению со стандартными кремниевыми фотодиодами спектр чувствительности исследованных структур сдвинут в коротковолновую область, причем сдвиг увеличивается после отжига. Структуры с отожженным слоем наночастиц обладают чувствительностью в области 350–600 нм, более чем на порядок превышающей чувствительность неотожженных структур. Этот эффект может быть связан с транзисторным усилением в структуре.

1. Введение

Одной из задач современной оптоэлектроники является поиск новых материалов для фотодиодов и солнечных элементов (СЭ), увеличение квантового выхода этих приборов и управление полосой их чувствительности. Самым используемым материалом для изготовления СЭ в настоящее время является кремний, поликристаллический, монокристаллический или аморфный. Основная причина низкой эффективности кремниевых СЭ — узкий спектральный диапазон работы по сравнению с солнечным спектром. Поэтому для кремниевых структур, широко используемых для создания солнечных элементов, актуально расширение полосы чувствительности в коротковолновую сторону. Использование достижений нанотехнологий позволяет значительно улучшить характеристики кремниевых СЭ. В частности, структуры на квантовых точках обладают большими достоинствами для использования в солнечных элементах [1] — широким спектральным диапазоном, возможностью управлять этим диапазоном, возможностью получить ударную ионизацию и умножение тока в коротковолновой области света и др. Однако поглощение света в квазиодномерных и квазинульмерных структурах значительно ниже, чем в приборах на основе тонкопленочных полупроводников из-за низкой плотности получаемых слоев.

Большой интерес представляют слои, не обладающие этим недостатком — плотноупакованные наночастицы кремния (nano-Si), полученные методом лазерного электродиспергирования [2]. Этот метод позволяет получать слои аморфных некоагулированных наночастиц с малой дисперсией размеров [3]. Слои характеризуются достаточно высокой проводимостью, что, несомненно,

является достоинством для применения в фотодетекторах. Недостатком плотной упаковки наночастиц в слое является слабая локализация носителей заряда в наночастицах, что приводит к ослаблению квантово-размерных эффектов в слоях. Так, слои nano-Si обладают слабой фотолюминесценцией (ФЛ). В работе [4] показано, что отжиг в атмосфере кислорода усиливает ФЛ как за счет пассивации поверхности наночастиц, так и за счет кристаллизации некоторого количества аморфных наночастиц.

В данной работе исследованы оптические, электрические и фотоэлектрические свойства слоев nano-Si и гетероструктур на их основе. Фотоэлектрические характеристики изучались в широком спектральном диапазоне, включая ближний ультрафиолетовый (УФ). Исследовалось влияние отжигов различной длительности на воздухе.

2. Методики изготовления образцов и проведения измерений

Слои nano-Si толщиной 110 нм изготавливались методом лазерного электродиспергирования (ЛЭД) на подложках из монокристаллического кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1–4 Ом·см или плавленого кварца КУ-1. Образцы изготавливались без специального нагрева подложки. Часть образцов была подвергнута нескольким последовательным отжигам на воздухе до температуры 1000°С. Температура отжига выбиралась вблизи температуры кристаллизации аморфного кремния (см., например, [5]). Нагрев от комнатной температуры до температуры отжига осуществлялся в течение 45 мин, по достижении требуемой температуры нагрев отключался, и происходило медленное остывание образцов.

[†] E-mail: Olja.Ken@mail.ioffe.ru

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) образцов на кварцевых подложках были измерены при комнатной температуре на спектрометрической установке Horiba Jobin-Yvon T64000, оснащенной конфокальным микроскопом. В качестве источника возбуждения использовался Ag^+ -лазер (длина волны $\lambda = 514 \text{ нм}$). Спектры инфракрасного (ИК) пропускания слоев, нанесенных на кремниевые подложки, измерялись на фурье-спектрометре Shimadzu FTIR-8400s в интервале волновых чисел $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . Спектрометр Cary 5000 UV-Vis-NIR использовался для измерения спектров оптического пропускания и зеркального отражения слоев nano-Si на кварцевых подложках.

Для исследования электрических и фотоэлектрических свойств структур, созданных на кремниевых подложках, были сделаны контакты: омический контакт к подложке и полупрозрачный золотой контакт к слою nano-Si . Последний изготавливался методом магнетронного напыления пленки золота толщиной 200 \AA .

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) изготовленных структур Au-nano-Si-p-Si измерялись с использованием потенциостата ELYPOR-3.

Спектры фототока образцов измерялись в фотодиодном режиме при приложении напряжения $1.3\text{--}5 \text{ В}$ в заперном направлении. Использовались два режима измерений: квазистационарный и импульсный. В квазистационарном режиме образец освещался светом от галогеновой лампы (150 Вт), модулированным с частотой 600 Гц и прошедшим через монохроматор МДР-2. Фототок в спектральном диапазоне $330\text{--}1100 \text{ нм}$ детектировался селективным усилителем У2-8 на частоте модуляции. Для калибровки мощности прошедшего сквозь монохроматор света использовался кремниевый фотодиод ФДУК-100УТ [6]. В синем и УФ диапазонах чувствительность исследуемых структур относительно низкая, поэтому в диапазоне длин волн от 266 до 419 нм для измерений фототока использовался перестраиваемый импульсный лазер EXPLA NT342/3/UV (энергия в импульсе от ~ 2 до $\sim 200 \text{ нДж}$, длительность импульсов $4\text{--}6 \text{ нс}$, частота следования 10 Гц). Сигналы фототока образца и фотодиода сравнения усиливались, а затем усреднялись по нескольким десяткам импульсов. Калибровка проводилась с помощью измерителя энергии Gentec ED100A.

Рассчитывалась фоточувствительность $S(\lambda)$, а также квантовая эффективность фототока $\eta(\lambda)$ — отношение числа рожденных при поглощении света электронно-дырочных пар N_e к числу поглощенных квантов света N_{ph} :

$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_{\text{ph}}} = \frac{I_{\text{ph}}(\lambda) \hbar\omega}{W(\lambda) e} = S(\lambda) \frac{\hbar\omega}{e},$$

где I_{ph} — фототок, e — заряд электрона, $\hbar\omega$ — энергия кванта света с длиной волны λ , $W(\lambda)$ — спектр мощности падающего на образец излучения.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

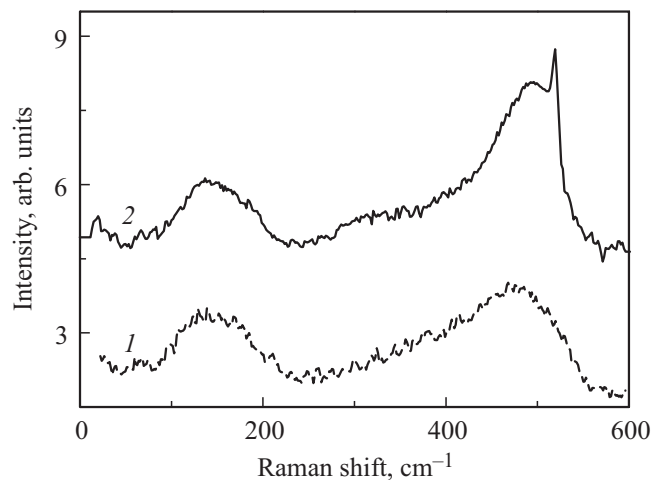


Рис. 1. Типичный спектр КРС исходного слоя nano-Si на кварцевой подложке (1) и после отжига до 1000°C (2).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Характеризация образцов, влияние отжига

Исходные слои nano-Si , полученные методом ЛЭД, представляют собой ансамбль плотноупакованных аморфных наночастиц кремния размером порядка нескольких нанометров и характеризуются довольно высокой проводимостью (на уровне проводимости монокристаллического кремния с концентрацией $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$). В таких слоях частицы аморфного кремния не коагулируют, несмотря на то что находятся в плотном контакте друг с другом [3].

На рис. 1 представлен типичный спектр КРС слоя nano-Si . Нарушение трансляционной симметрии кристаллической решетки в таких объектах приводит к полному снятию запрета, накладываемого законом сохранения квазиимпульса ($q = 0$). Как следствие, фононы с любыми волновыми векторами разрешены в их спектрах КРС, которые в итоге воспроизводят плотность акустических и оптических колебательных состояний кристаллического кремния. В процессе отжига происходит частичная кристаллизация наночастиц кремния, о чем свидетельствует появление узкого пика в области $518\text{--}520 \text{ см}^{-1}$, соответствующего трижды вырожденному оптическому колебанию симметрии F_{2g} , разрешенному в спектре первого порядка кристаллического кремния.

Спектры ИК пропускания, измеренные в области колебаний связей Si-O-Si , показывают почти полное отсутствие связанного кислорода в неотожженном слое nano-Si (рис. 2, кривая 1): наблюдается очень незначительное поглощение вблизи 950 см^{-1} , где проявляют себя валентные колебания Si-O-Si в аморфном кремнии [7]. В то же время в спектре ИК пропускания отожженного слоя (кривая 2) наблюдается сильное поглощение на частоте 1075 см^{-1} , соответствующей частоте колебаний связей Si-O-Si в кристаллическом

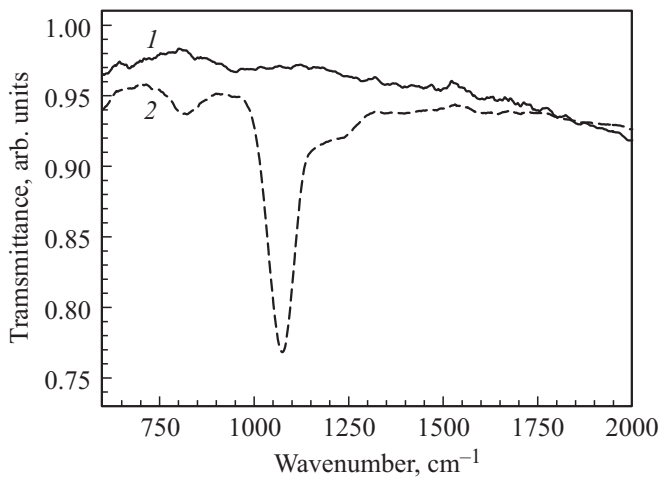


Рис. 2. Спектры ИК пропускания слоя nano-Si: до отжига (1), после отжига до 1000°C (2).

оксидированном кремнии. Таким образом, спектры ИК пропускания также свидетельствуют о появлении фазы кристаллического кремния после отжига исходного слоя.

В работе [4] была обнаружена слабая ФЛ слоев nano-Si с максимумом при 580–600 нм (2.1 эВ). Пик ФЛ соответствует эмиссии света из наночастиц аморфного кремния с размерами $\sim (1.3–1.4)$ нм [8], что находится в соответствии с данными сканирующей туннельной микроскопии [3]. Очень слабая ФЛ и относительно высокая проводимость слоев свидетельствуют о недостаточной локализации носителей в частицах. Эти результаты объясняют необходимость отжига в кислороде. ФЛ заметно возрастает уже после первого отжига. При этом после отжига в спектре появляется коротковолновый пик при 480 нм (2.7 эВ), который был приписан ФЛ образовавшихся нанокристаллов кремния. Авторы предположили, что в процессе отжига кислород проникает в слой nano-Si в основном по пустотам между наночастицами и окисляет их поверхность. При достижении достаточной температуры начинается кристаллизация аморфных наночастиц, при этом оксидная оболочка сохраняется, препятствуя их коагуляции. В процессе остывания часть наночастиц кристаллизуется. На основании этих данных мы полагаем, что неотожженные образцы характеризуются эффективной шириной запрещенной зоны $E_g \approx 2.1$ эВ, а в отожженных появляются нанокристаллы с $E_g \approx 2.7$ эВ. По результатам работы [8] обе эти величины соответствуют частицам с размерами 1.3–1.5 нм.

3.2. Вольт-амперные характеристики

Пользуясь фотоэлектрохимической методикой определения типа проводимости полупроводников, не требующей нанесения омических контактов, мы показали, что слой nano-Si обладает электронным типом проводимости. Мы предполагаем, что это может быть связано с различием подвижностей электронов и дырок, так как

слой nano-Si близки к собственным [3]. Все исследованные структуры Au–nano-Si–p-Si имеют выпрямляющие ВАХ (рис. 3, а). Прямая ветвь ВАХ $I(U)$ (на Au-контакт подано отрицательное смещение относительно подложки) в области небольших смещений близка к линейной, а при больших смещениях удовлетворяет степенному закону $I(U) \propto U^b$ с показателем степени $b = 2–3$ (рис. 3, б). Такое поведение характерно для тока, ограниченного объемным зарядом.

Показатель степени $b > 2$ свидетельствует об экспоненциальном распределении уровней захвата носителей заряда в запрещенной зоне nano-Si, при этом $b = (T_c/T + 1)$, где параметр T_c характеризует скорость уменьшения плотности состояний с энергией в глубь запрещенной зоны [9]. Наличие хвостов плотности состояний в запрещенной зоне характерно для аморфного кремния. Кроме того, уровни захвата (ловушки) в запрещенной зоне nano-Si могут быть обусловлены дефектами на поверхности наночастиц кремния. После отжига прямая ветвь сдвигается в сторону больших напряжений, но основные закономерности сохраняются, хотя показатель степени для участка больших напряже-

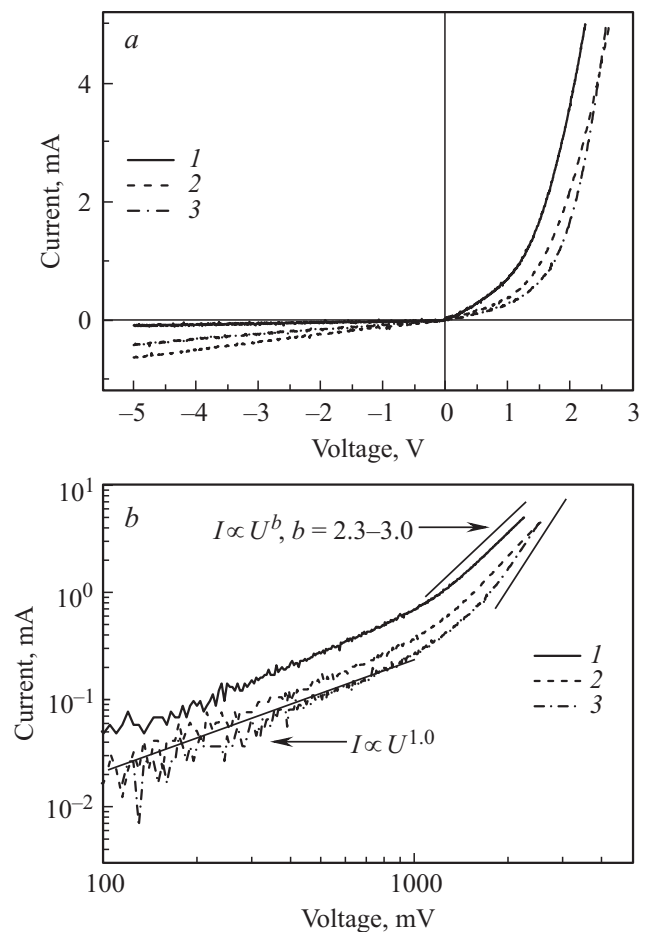


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (а) и их прямые ветви в двойном логарифмическом масштабе (б) образцов Au–nano-Si–p-Si: 1 — неотожженный образец, 2 — отожженный до 1000°C, 3 — отожженный дважды.

ний прямой ветви ВАХ возрастает, $b > 3$, указывая на увеличение параметра T_c .

Стоит отметить, что при заперном смещении темновой ток не насыщается, а растет линейно с ростом напряжения. Это свидетельствует о вкладе генерационно-рекомбинационного тока в аморфном слое в обратный ток структуры. Такая зависимость типична для широкозонных или собственных полупроводников. После отжига обратный ток становится больше, что может быть связано с увеличением концентрации генерационно-рекомбинационных центров в слое или на границе раздела слой–подложка.

3.3. Фотоэлектрические свойства

На рис. 4, а представлены спектры fotocувствительности неотожженного и отожженных образцов, измеренные в квазистационарном режиме при приложении к образцам различного по величине смещения в заперном направлении. На рис. 4, б приведен пересчет этих спектров (для смещения 1.3 В) в зависимость квантовой эффективности от энергии фотона; точками показаны результаты в УФ области спектра, полученные в импульсном режиме.

По форме спектральные кривые всех исследованных образцов отличаются от спектральной кривой фабричного кремниевого фотодиода (с мелким $p-n$ -переходом), особенно это относится к отожженным образцам.

На наш взгляд, надо отметить следующие особенности полученных спектров.

1) Спектральная полоса чувствительности всех исследованных структур сдвинута в коротковолновую область по сравнению с наблюдаемой в обычных кремниевых фотодиодах (кривая 4 на рис. 4, а). Для отожженных образцов по сравнению с неотожженными наблюдается расширение спектрального диапазона чувствительности в коротковолновую сторону и возрастание чувствительности в этой области. В интервале длин волн от 350 до 600 нм (3.5–2 эВ), спектральная чувствительность отожженных образцов (при смещении 1.3 В) более чем на порядок превышает чувствительность неотожженных. С увеличением заперного смещения этот интервал расширяется, причем чувствительность отожженных образцов сильнее зависит от приложенного смещения, чем неотожженного.

2) По сравнению с фабричным кремниевым фотодиодом длинноволновый край чувствительности исследованных структур сдвинут в коротковолновую сторону, а спад чувствительности с увеличением длины волны значительно более пологий (см. рис. 4, а, кривые 1–3 и 4). С отжигом сдвиг увеличивается.

3) В УФ области спектра квантовая эффективность значительно меньше, чем в видимой области, однако после отжигов она увеличивается. Кроме того, спектральная зависимость квантовой эффективности в этой

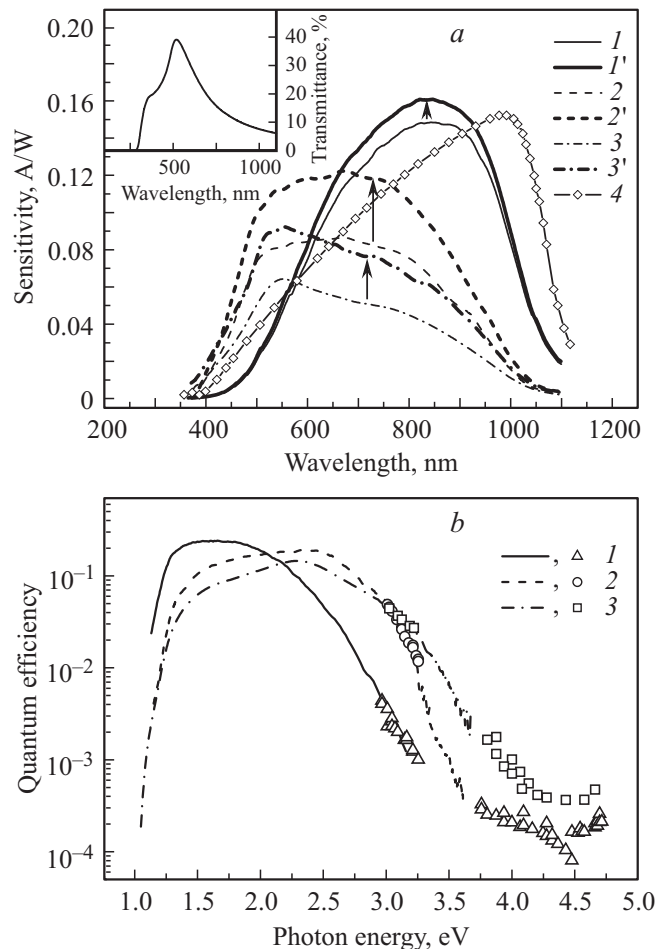


Рис. 4. Спектры fotocувствительности (а) и квантовой эффективности (б) структур Au–nano-Si– p -Si: 1, 1' — неотожженная, 2, 2' — отожженная до 1000°C, 3, 3' — отожженная дважды. Заперное напряжение 1.3 (1, 2, 3) и 2.7 В (1', 2', 3'). Точки — данные, полученные в импульсном режиме. Для сравнения приведен спектр чувствительности стандартного кремниевого фотодиода, умноженный на 0.23 (4). На вставке (а) — спектр пропускания пленки золота толщиной 200 Å, нанесенной магнетронным распылением.

области становится более полой и выходит на некоторое возрастание при энергиях фотонов $\hbar\omega > 4.5$ эВ (см. рис. 4, б).

Естественно предположить, что все отмеченные особенности связаны с присутствием слоя np-Si и изменениями структуры этого слоя, происходящими при отжиге. При рассмотрении этих особенностей нужно учитывать: поглощение света в слое np-Si и изменение спектра поглощения после отжига; механизмы переноса носителей в слое; изменения на гетеропереходе слой–подложка, связанные с отжигом; возможные эффекты сильного электрического поля в структуре.

Общее уменьшение спектральной чувствительности наших гетероструктур по сравнению с фабричными фотодиодами мы приписываем не только технологическим недостаткам при изготовлении (токи утечки, сильное

поглощение света в Au-контакте и т. п.), но и рекомбинационным процессам на гетерогранице слой–подложка. Центры рекомбинации, предположительно P_b -центры, обусловленные дислокациями и дефектами на границе Si–SiO₂, расположены, скорее всего, в тонком оксидном слое на поверхности p -Si. После отжига толщина оксидного слоя растет, количество рекомбинационных центров увеличивается, а фототок падает. Аналогичный эффект наблюдался в работе [10].

В длинноволновой области, когда энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны кремния $E_g = 1.12$ эВ, но меньше, чем ширина эффективной запрещенной зоны слоя nano-Si , фоточувствительность структур Au– nano-Si – p -Si обусловлена поглощением света в области объемного заряда кремниевой подложки вблизи границы со слоем. Сдвиг длинноволнового края чувствительности в область более коротких длин волн, по нашему мнению, связан с особенностями транспорта носителей через границу слой nano-Si –подложка. Так, для фотоэлектронов в подложке существует потенциальный барьер на границе с более широкозонным слоем nano-Si , который препятствует прохождению электронов с кинетической энергией, недостаточной для преодоления этого барьера. В итоге такие электроны в основном рекомбинируют в подложке, не внося вклада в фототок. С увеличением энергии фотонов возрастает кинетическая энергия фотоносителей, обуславливая рост фототока. После отжига потенциальный барьер на границе расширяется, его высота увеличивается вследствие образования нанокристаллов Si и оксида кремния SiO_x, что приводит к дополнительному сдвигу длинноволнового края фоточувствительности в область более коротких волн.

Расширение спектрального диапазона чувствительности структур и практически постоянная чувствительность в широком интервале длин волн представляют наибольший интерес для дальнейшего использования. Чувствительность в коротковолновой части спектра обусловлена свойствами более широкозонного по сравнению с подложкой слоя nano-Si . Как было показано выше, при отжиге образуется некоторое количество кремниевых нанокристаллов. Известно, что квантово-размерный эффект сильнее проявляется в нанокристаллах, чем в аморфных наночастицах [8,11]: при тех же размерах эффективная ширина запрещенной зоны нанокристаллов больше, чем аморфных наночастиц. Увеличение числа отжигов (продолжительности отжига) приводит не только к увеличению количества кристаллизовавшихся наночастиц, но и к уменьшению их размеров благодаря окислению поверхности. Таким образом, появление нанокристаллов объясняет сдвиг спектра фоточувствительности в коротковолновую область.

Однако при отжиге, по результатам измерения спектров пропускания, происходит просветление слоя, что противоречит увеличению фототока в этой области после отжигов. В связи с этим были измерены зависимости

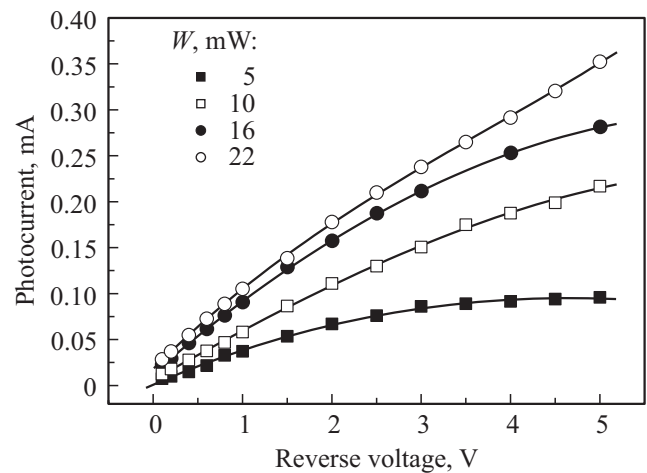


Рис. 5. Зависимость фототока дважды отожженной структуры Au– nano-Si – p -Si от величины запорного смещения при различной мощности излучения W с $\lambda = 404$ нм.

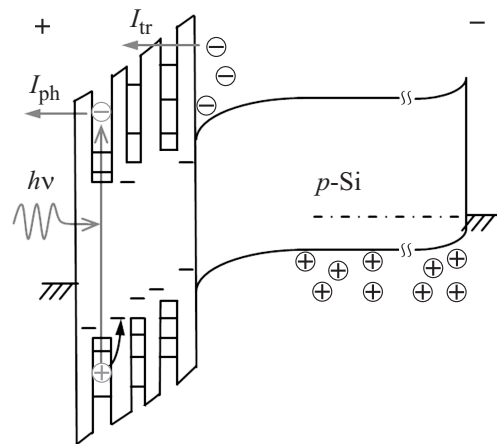


Рис. 6. Иллюстрация транзисторного эффекта в отожженной структуре Au– nano-Si – p -Si при подаче запорного смещения. I_{ph} — ток фотоэлектронов, I_{tr} — дополнительный ток электронов из подложки, возникающий в результате понижения барьера на границе подложка–слой за счет захвата дырок ловушками в слое nano-Si .

фототока структур от приложенного запорного напряжения при различной мощности освещения с длиной волны 404 нм (непрерывный лазер KLM-405–200 мощностью до 200 мВт) (рис. 5). Отличительной особенностью этих кривых является рост фототока с увеличением приложенного напряжения. Выход на насыщение фототока происходит при напряжениях, значения которых растут с увеличением интенсивности освещения. Подобные закономерности наблюдались в структурах с туннельно тонким диэлектриком [12] и в структурах со слоем нанокристаллов, внедренных в диэлектрическую матрицу [13], и были объяснены транзисторным эффектом.

Применительно к исследуемым структурам этот эффект может быть описан следующим образом. Отожжен-

ный слой nano-Si можно рассматривать как наночастицы кремния (аморфные и кристаллические), разделенные барьерами SiO_x (рис. 6), что подтверждается существенным возрастанием сопротивления слоев после отжига. До освещения при достаточно больших смещениях на границе слой–подложка благодаря барьеру для электронов в подложке образуется инверсный слой. При этом ток через структуру определяется неосновными носителями — электронами, которые туннелируют через оксидные барьеры из подложки в металл. При поглощении света в слое часть появившихся фотодырок захватывается на ловушки (например, на поверхностные уровни), образуя положительный заряд в слое nano-Si . Положительный заряд может также образовываться из-за разных подвижностей электронов и дырок. Этот заряд понижает барьер на границе раздела слой–подложка и вызывает дополнительную инжекцию электронов из инверсионного слоя через барьер в слой nano-Si и далее в металлический контакт. В этом случае полный фототок состоит из тока фотоэлектронов и тока электронов, инжектированных за счет понижения барьера, т.е. будет наблюдаться усиление фототока (транзисторный эффект).

Появление оксида кремния в слоях nano-Si , с одной стороны, увеличивает сопротивление структуры, что приводит к уменьшению ее ампер-ваттной фоточувствительности (см. рис. 4, а), но, с другой стороны, усиливает квантово-размерный эффект в слое и обеспечивает расширение спектральной полосы. Более того, оксидная оболочка препятствует коагуляции кристаллических частиц и превращению слоя nano-Si в поликристаллический. Эту двойственную роль образующегося оксида кремния необходимо учитывать при оптимизации спектральных свойств структур.

Существенный сдвиг чувствительности отожженных образцов в УФ область потребовал расширения измерений в ближнюю УФ область спектра (3.5–4.6 эВ). В этой области фототок оказался чрезвычайно малым — на 2–2.5 порядка меньше, чем в максимуме сигнала, в частности из-за сильного поглощения света в Au-контакте (см. вставку на рис. 4, а). Однако наблюдаемое постоянство квантовой эффективности и даже небольшой рост ее при $\hbar\omega > 4.5$ эВ свидетельствуют о появлении нового механизма образования фототока. Можно предположить, что это — проявление ударной ионизации в кремниевых квантовых точках, так как в этой области спектра выполнено условие $\hbar\omega > 2E_g$, необходимое для ее наблюдения [14]. Однако это предположение требует дополнительных экспериментов, для чего необходимо, во-первых, усилить сигнал в этой области, заменив, например, золото на прозрачный в этой области спектра контакт, и, во-вторых, исследовать эффект в слоях с наночастицами различных размеров.

4. Заключение

Исследованы спектральные характеристики фотоответа гетероструктур Au-nano-Si-p-Si , в которых nano-Si — слой плотноупакованных аморфных наночастиц кремния, полученных лазерным электродиспергированием. Структуры характеризуются выпрямляющими свойствами. Отжиг на воздухе приводит к просветлению слоев nano-Si и увеличению их сопротивления, что является следствием появления в слоях оксида кремния. Спектральные характеристики фотоответа гетероструктур обладают рядом особенностей. Так, по сравнению со стандартными кремниевыми фотодиодами с $p-n$ -переходом спектр чувствительности исследованных структур сдвинут в коротковолновую область, причем после отжига сдвиг увеличивается. Показано, что гетероструктуры с отожженным слоем nano-Si в области 350–600 нм обладают чувствительностью, более чем на порядок превышающей чувствительность неотожженных структур. Этот эффект может быть связан с транзисторным усилением в структуре.

Авторы благодарны С.Д. Ганичеву, В.Ю. Давыдову и Е.И. Терукову за помощь в осуществлении экспериментов и интерес к работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-02-31576, гранта Президента РФ „Ведущие научные школы“ № НШ 347.2014.2, программы Отделения физических наук Российской академии наук „Физика новых материалов и структур“, а также проекта EU FP7 project 295180 MagNonMag.

Список литературы

- [1] A.J. Nozik. In: *Next Generation Photovoltaics*, ed. by A. Marti, A. Luque (Bristol and Philadelphia, IOP Publishing Ltd, 2004) p. 196.
- [2] V.M. Kozhevnikov, D.A. Yavsin, V.M. Kouznetsov, V.M. Busov, V.M. Mikushkin, S.Yu. Nikonov, S.A. Gurevich, A. Kolobov. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 1402 (2000).
- [3] С.А. Гуревич, Д.А. Андроников, В.Ю. Давыдов, В.М. Кожевников, И.В. Макаренко, А.Н. Титков, Д.А. Явсин, Т.Л. Кулова, А.М. Скудин. *Труды XIV международного симпозиума „Нанозифика и нанозлектроника“* (Н. Новгород, Россия, 2009) с. 333.
- [4] O.S. Yeltsina, D.A. Andronikov, A.V. Kukin, J.S. Vainshtein, O.M. Sreseli. *Physica Status Solidi C*, **9**, 1471 (2012).
- [5] D.M. Zhigunov, V.N. Seminogov, V.Yu. Timoshenko, V.I. Sokolov, V.N. Glebov, A.M. Malyutin, N.E. Maslova, O.A. Shalygina, S.A. Dyakov, A.S. Akhmanov, V.Ya. Panchenko, P.K. Kashkarov. *Physica E*, **41**, 1006 (2009).
- [6] В.В. Забродский, В.П. Белик, П.Н. Аруев, Б.Я. Бер, С.В. Бобашев, М.В. Петренко, В.Л. Суханов. *Письма ЖТФ*, **38** (17), 69 (2012).
- [7] P.G. Pai, S.S. Chao, Y. Takagi, G. Lucovsky. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **4**, 689 (1986).
- [8] G. Allan, C. Delerue, M. Lannoo. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 3161 (1997).

- [9] А. Роуз. *Основы теории фотопроводимости* (М., Мир, 1966) с. 91.
- [10] J.S. Vainshtein, O.S. Yeltsina, E.I. Terukov, O.M. Sreseli. *Physica E*, **49**, 72 (2013).
- [11] K. Nishio, J. Koga, T. Yamaguchi, F. Yonezawa. *Phys. Rev. B*, **67**, 195 304 (2003).
- [12] И.В. Грехов, М.И. Векслер, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова, А.Ф. Шулекин. *ФТП*, **32** (9), 1145 (1998).
- [13] J.-M. Shieh, Y.-F. Lai, W.-X. Ni et al. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 051 105 (2007).
- [14] D. Timmerman, I. Izeddin, P. Stallinga, I.N. Yassievich, T. Gregorkiewicz. *Nature Photonics*, **2**, 105 (2008).

Редактор А.Н. Смирнов

Spectral features of photoresponse of the structures with silicon nanoparticles

O.S. Ken, D.A. Andronikov, D.A. Yavsin, A.V. Kukin, S.N. Danilov, A.N. Smirnov, O.M. Sreseli, S.A. Gurevich*

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

* University of Regensburg,
93053 Regensburg, Germany

Abstract We studied photoresponse of the structures with densely packed amorphous silicon nanoparticles obtained by laser electrodispersion. These structures exhibit rectifying behavior. Annealing in the open air results in formation of silicon oxide within the layer of nanoparticles, and moreover, in partial crystallization of the nanoparticles. Spectral photoresponse of the structures reveals several special features. As compared with common silicon photodiodes, the sensitivity spectra of the structures with silicon nanoparticles are shifted towards the shorter wavelength region, and the shift increases after annealing. In the wavelength range between 350 and 600 nm, the sensitivity of the structures with annealed layer of silicon nanoparticles is more than one order of magnitude greater than that of the structures with initial layer. This may result from the transistor-like effect in the investigated structures.