

СЕЛЕКТИВНАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР a -Si/ c -Si В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

© Б.Г.Будагян, А.А.Шерченков, А.А.Айвазов

Московский институт электронной техники,
103498 Москва, Россия

(Получена 16 декабря 1995 г. Принята к печати 2 февраля 1996 г.)

Исследованы спектральные характеристики фоточувствительности гетероструктур на основе n - a -Si/ p - c -Si в диапазоне длин волн 500–1200 нм в зависимости от температуры предварительного нагрева подложек T_s и температуры отжига T_a . Показано, что максимум фоточувствительности с увеличением температуры предварительного нагрева подложки сдвигается в длинноволновую область спектра и при $T_s = 500$ °С, $T_a = 200$ °С наблюдается на длине волны $\lambda = 1080$ нм. Предложена модель энергетической диаграммы гетероструктуры n - a -Si/ p - c -Si, учитывающая существование на границе раздела структуры промежуточного слоя, препятствующего образованию обедненной области в подложке c -Si. Полученные результаты указывают на перспективность использования гетероструктур n - a -Si/ p - c -Si для создания датчиков инфракрасного излучения с управляемым положением максимума фоточувствительности.

1. Введение

В последнее время анализу гетероструктур a -Si/ c -Si посвящен ряд работ, что связано с перспективностью их использования при изготовлении различных фотоэлектронных приборов. В частности, структуры a -Si:H/ c -Si уже сейчас нашли применение в производстве таких устройств, как солнечные батареи, мишени видеоконверторов и др. [1,2]. Однако физика процессов, происходящих на гетеропереходе a -Si/ c -Si, включая процессы транспорта и рекомбинации носителей заряда, не ясна и является предметом современных исследований.

В данной работе исследованы спектральные характеристики фоточувствительности гетероструктур на основе a -Si/ c -Si и проведен анализ фотогенерации и переноса носителей заряда через границу раздела. Показано, что образование промежуточного слоя на границе раздела контролирует фоточувствительность структур в инфракрасной (ИК) области спектра, что открывает широкие перспективы создания достаточно дешевых датчиков ИК излучения с управляемым максимумом фоточувствительности.

2. Эксперимент

В данной работе пленки a -Si n -типа проводимости толщиной $1.6 \div 2.2$ мкм осаждалась на подложки из монокристаллического кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (КДБ-20) методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления мишени из монокристаллического n -кремния с удельным сопротивлением $0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (КЭС-0.01). В ходе экспериментов осуществлялся предварительный нагрев подложек перед процессом осаждения пленок до температур $T_s = 200, 300, 500 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом нагрев отключался непосредственно перед подачей ВЧ мощности на мишень. После осаждения образцы отжигались в вакууме при температурах $T_a = 200, 300, 400, 450 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. На сформированные таким образом гетероструктуры методом вакуум-термического испарения наносились алюминиевые контакты (один на слой a -Si, другой на поверхность подложки c -Si) [3].

Для проведения измерений проводимости пленок a -Si изготавливались тестовые структуры, каждая из которых представляла собой слой исследуемого материала, сформированный на окисленных кремниевых подложках в одном процессе с исследуемой гетероструктурой. Далее, на поверхность полученного таким образом слоя аморфного кремния осаждался алюминий для формирования электродов.

Спектральная зависимость фоточувствительности структур n - a -Si/ p - c -Si измерялась в диапазоне длин волн $500 \div 1200$ нм при напряжениях $0 \div 20$ В и комнатной температуре. Измерения температурной зависимости темновой проводимости пленок a -Si при различных T_s и T_a проводились в температурном диапазоне $20 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ по методике, описанной в работе [4].

3. Результаты

На рис. 1 представлена обратная ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) (a) и спектральная зависимость фоточувствительности (b) при различных напряжениях смещения для гетероструктур со слоем аморфного кремния толщиной $d = 1.6$ мкм, полученным при $T_s = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_a = 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Как видно из рисунка, на ВАХ имеется начальный участок резкого роста тока I с увеличением напряжения V_b и участок с незначительным его возрастанием при $V_b > 5$ В. При этом в спектре фоточувствительности с увеличением смещения наблюдается сдвиг максимума относительной чувствительности от длины волны $\lambda = 840$ нм к $\lambda = 1080$ нм с одновременным увеличением ее абсолютного значения.

Отсутствие насыщения на обратной ветви ВАХ, как правило, связано с зависимостью величины потенциального барьера на переходе от приложенного смещения и в ряде работ объясняется наличием промежуточного слоя на границе раздела между аморфным и кристаллическим кремнием [2,5]. Этот слой может быть сформирован в результате либо воздействия различных составляющих плазмы в момент ее возгорания на поверхности подложки, либо образования естественного окисла. Очевидно, что определяющим для состояния границы является первоначальный момент роста пленки, в связи с чем нами были

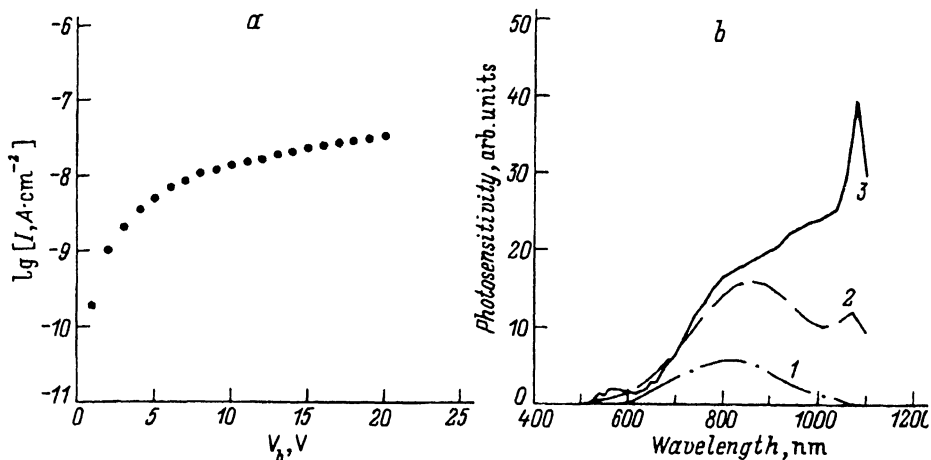


Рис. 1. а — обратная ветвь ВАХ. б — спектральная зависимость фоточувствительности для структуры с толщиной аморфного кремния 1.6 мкм, полученной при $T_s = 500^\circ C$, $T_a = 200^\circ C$; напряжения смещения V_b , В: 1 — 0, 2 — 0.5, 3 — 19.

проведены исследования влияния предварительного нагрева на фоточувствительность гетероструктур a -Si/c-Si.

Спектральные зависимости фоточувствительности структур, полученных при различных T_s и отожженных при $T_a = 200^\circ C$, приведены на рис. 2. Увеличение T_s от комнатной температуры до $500^\circ C$ приводит к уменьшению относительной чувствительности гетероструктур. При этом максимум фоточувствительности образцов, полученных без пред-

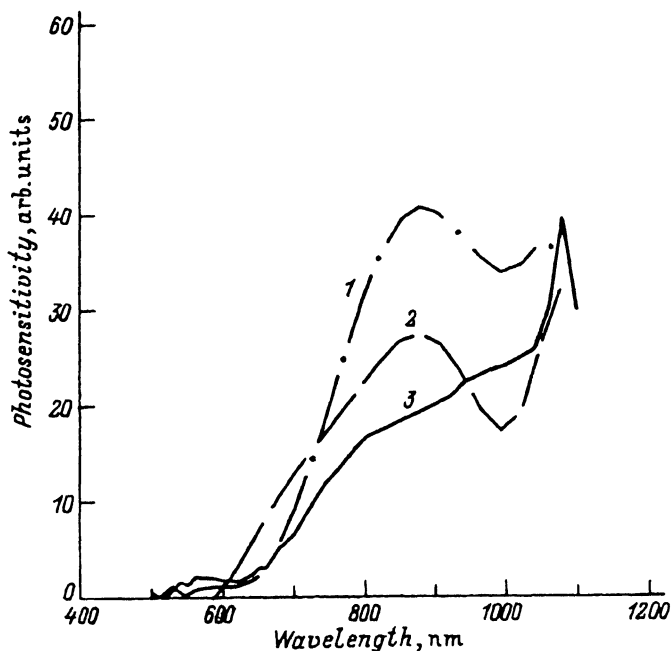


Рис. 2. Спектральная зависимость фоточувствительности структур с толщиной аморфного кремния 1.6 мкм, полученных при $T_a = 200^\circ C$. T_s , $^\circ C$: 1 — 20, 2 — 300, 3 — 500. $V_b = 19$ В.

варительного нагрева подложек, наблюдается при длинах волн 900 и 1080 нм. Как видно из рисунка, пик при 1080 нм становится преобладающим для образцов, полученных при $T_s = 500^\circ\text{C}$.

Результаты измерения температурной зависимости темновой проводимости пленок $a\text{-Si}$, полученных при различных T_s и термообработанных при $T_a = 200^\circ\text{C}$, свидетельствуют о том, что энергия активации проводимости E_σ не зависит от T_s и составляет величину $0.56 \pm 0.01 \text{ эВ}$. Таким образом, варьирование температур предварительного нагрева подложек не приводит к заметному изменению свойств $a\text{-Si}$ и, следовательно, изменение фоточувствительности гетероструктур с T_s (рис. 2) связано главным образом с изменением состояния промежуточного слоя на границе раздела $a\text{-Si}/c\text{-Si}$.

Оценка положения уровня Ферми относительно зоны проводимости в аморфном кремнии (ϕ_a), проведенная по результатам измерения температурной зависимости темновой проводимости для упомянутых образцов, показывает, что он расположен несколько выше середины запрещенной зоны. При оценке использовалось взятое из литературных данных значение оптической ширины запрещенной зоны $E_{ga} = 1.4 \text{ эВ}$ для слоев аморфного кремния, полученных в идентичных условиях [6]. Слабый n -тип проводимости слоя $a\text{-Si}$ в этом случае, по-видимому, определяется высокой плотностью состояний собственных дефектов, компенсирующих влияние донорных уровней Sb.

Влияние термообработки сформированных структур на их фоточувствительность показано на рис. 3 (кривые 1-3), там же указаны

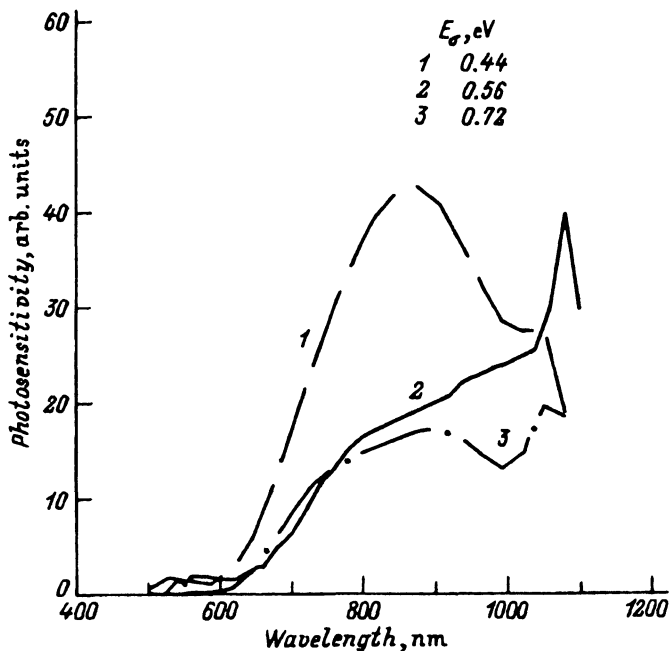


Рис. 3. Спектральная зависимость фоточувствительности структур с толщиной аморфной кремния 1.6 мкм, полученных при $T_s = 500^\circ\text{C}$ без отжига (1) и с отжигом при $T_a = 200$ (2) и 450°C (3). $V_b = 19 \text{ В}$. Приведены значения энергии активации темновой проводимости E_σ .

значения энергии активации темновой проводимости E_σ пленок a -Si, полученных в идентичных условиях. Видно, что увеличение T_a приводит к уменьшению фоточувствительности. При этом, как следует из данных по E_σ , с ростом температуры отжига уровень Ферми сдвигается в глубь запрещенной зоны a -Si.

Сдвиг уровня Ферми в глубь запрещенной зоны может быть вызван увеличением концентрации собственных дефектов a -Si, компенсирующих влияние донорных уровней Sb. Уменьшение фоточувствительности гетероструктур указывает на уменьшение времени жизни носителей заряда, что также может быть обусловлено увеличением плотности дефектов в аморфном кремнии. Возрастание концентрации дефектов в a -Si при повышении температуры, как правило, связывается со структурно-релаксационными процессами, протекающими в аморфных материалах при повышенных температурах [7].

Таким образом, результаты, представленные на рис. 2 и 3, указывают на то, что фоточувствительность гетероструктур определяется как свойствами a -Si, так и наличием промежуточного слоя на границе раздела a -Si/ c -Si. При этом зависимость фоточувствительности от T , непосредственно свидетельствует о влиянии предварительного нагрева подложек на состояние промежуточного слоя, формируемого на начальной стадии процесса осаждения.

4. Обсуждение

Для объяснения полученных спектральных зависимостей фоточувствительности рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры n - a -Si/ p - c -Si. На рис. 4 приведена модель энергетической диаграммы гетероструктуры, учитывающая существование промежуточного слоя на границе раздела. Значения ширины запрещенной зоны E_{gc} , E_{ga} и сродства к электрону χ_c , χ_a в c -Si и a -Si были взяты из литературных данных и составляли $E_{gc} = 1.12$ эВ, $E_{ga} = 1.4$ эВ [6], $\chi_c = 4.05$ эВ, $\chi_a = 3.93$ эВ [2]. Положение уровня Ферми относительно валентной зоны в c -Si (ϕ_c) определялось из уравнения

$$\phi_c = kT \ln(N_v/N_a), \quad (1)$$

где $N_v = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — плотность состояний в валентной зоне, $N_a = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — концентрация акцепторов в c -Si. Проведенные расчеты показали, что уровень Ферми в нашем случае располагается на 0.25 эВ выше потолка валентной зоны. Положение уровня Ферми в аморфном кремнии определялось из измерения энергии активации темновой проводимости. Рассчитанное из данной диаграммы значение диффузионного потенциала V_d при $\phi_a = 0.56$ эВ составляет 0.46 В, что согласуется с результатами, приведенными ранее в работе [5].

При учете промежуточного слоя на границе раздела a -Si/ c -Si распределение заряда определяется из условия электронейтральности

$$Q_a + Q_{sc} + Q_{ss} = 0, \quad (3)$$

где Q_a , Q_{sc} , Q_{ss} — заряды в a -Si, c -Si и на поверхностных состояниях соответственно. Поскольку c -Si в нашем случае имеет проводимость

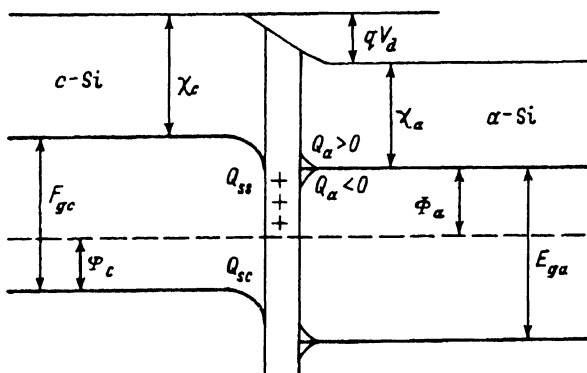


Рис. 4. Энергетическая диаграмма структуры $n\text{-}a\text{-Si}/p\text{-}c\text{-Si}$.

p -типа, то можно предположить, что Q_{ss} положителен и в $c\text{-Si}$ существует область пространственного отрицательного заряда. В этом случае, как следует из уравнения (2), заряд Q_a в $a\text{-Si}$ отрицателен, когда $Q_{ss} > Q_{sc}$, и положителен, когда $Q_{ss} < Q_{sc}$. Положительный заряд в $a\text{-Si}$ определяется присутствием ионизированных атомов донора, в то время как отрицательный заряд может быть связан с высокой плотностью состояний в середине запрещенной зоны $a\text{-Si}$ [8]. При смещении уровня Ферми по направлению к зоне проводимости на границе раздела эти состояния могут вести себя как отрицательно заряженные акцепторы.

При подаче обратного смещения на такую структуру промежуточный слой и поверхностные состояния на границе раздела $a\text{-Si}/c\text{-Si}$ препятствуют распространению обедненной области в $c\text{-Si}$ [2]. В этом случае рост обратного тока при $V_b < 5$ В на рис. 1, a может быть обусловлен понижением потенциального барьера на промежуточном слое. При $V_b > 5$ В заряд в промежуточном слое Q_{ss} становится малым, и обедненная область, начиная распространяться в $c\text{-Si}$, приводит к насыщению тока на обратной ветви ВАХ.

Рассмотренная модель энергетической диаграммы использована нами для объяснения спектральной зависимости фоточувствительности структуры $n\text{-}a\text{-Si}/p\text{-}c\text{-Si}$. Для такого типа анализа необходимо рассмотреть также распределение фотогенерированных носителей заряда в пленке $a\text{-Si}$ и в подложке $c\text{-Si}$ при различных длинах волн освещения. Используя спектральную зависимость коэффициента поглощения для $a\text{-Si}$ [6], можно подсчитать, что пленка толщиной 1.6 мкм эффективно поглощает свет с длиной волны $\lambda < 850$ нм. Таким образом, дырки, фотогенерированные в пленке $a\text{-Si}$ при этих длинах волн, участвуют в фототоке и определяют спектр фоточувствительности структуры $n\text{-}a\text{-Si}/p\text{-}c\text{-Si}$. Свет с длиной волны $\lambda > 850$ нм проникает в подложку $c\text{-Si}$, где он эффективно поглощается и генерирует избыточные носители заряда. Таким образом, фотогенерированные в подложке $p\text{-Si}$ электроны приводят к появлению фоточувствительности в длинноволновой области спектра.

В рамках данной модели влияние напряжения на спектральную фоточувствительность структуры $n\text{-}a\text{-Si}/p\text{-}c\text{-Si}$ может быть объяснено следующим образом. Как видно из рис. 1, b , максимум на спектре фото-

чувствительности при $V_b = 0$ наблюдается при $\lambda = 840$ нм. При отсутствии напряжения обедненный слой в a -Si мал и распределяется встроеным полем, обусловленным пространственным распределением заряда. В этом случае в фототоке принимают участие только дырки, генерированные около границы раздела a -Si/ c -Si, поскольку диффузионная длина дырок мала (около 500 \AA [8]). Таким образом, дырки, генерированные светом с длиной волны $\lambda < 800$ нм на расстоянии от границы раздела большем, чем диффузионная длина, не будут участвовать в фототоке. С другой стороны, фотогенерированные электроны в c -Si при $\lambda > 850$ нм также не принимают участия в фототоке из-за рекомбинации на положительно заряженных состояниях промежуточного слоя. В результате наблюдается максимум фоточувствительности при $\lambda = 840$ нм.

Приложенное обратное смещение $V_b = 0.5$ В приводит к уменьшению положительного заряда на промежуточном слое и, следовательно, к участию в фототоке фотогенерированных электронов в подложке c -Si. В результате наблюдается сдвиг максимума фоточувствительности в область больших длин волн. При $V_b = 19$ В Q_{ss} мал и фототок от c -Si увеличивается. Принимая во внимание, что для a -Si $\mu_e \gg \mu_h$ (где μ_e, μ_h — подвижности электронов и дырок соответственно), фототок от c -Si становится преобладающим, что определяет максимум фоточувствительности при $\lambda = 1080$ нм. Малое значение Q_{ss} в этом случае подтверждается тем фактом, что обратная ветвь ВАХ при $V_b > 5$ В выходит на насыщение (рис. 1, а). В рамках данной модели появление пика в длинноволновой области с увеличением температуры предварительного нагрева подложек объясняется уменьшением плотности состояний на границе раздела a -Si/ c -Si.

5. Выводы

Таким образом, результаты исследования спектральных характеристик и ВАХ гетероструктур на основе n - a -Si/ p - c -Si указывают на наличие промежуточного слоя на границе раздела аморфный/кристаллический кремний.

Предложена модель энергетической диаграммы гетероструктуры n - a -Si/ p - c -Si, учитывающая существование промежуточного слоя на границе раздела. Показано, что спектральная зависимость фоточувствительности определяется экранирующей ролью промежуточного слоя, препятствующего распространению обедненной области в c -Si.

Полученные результаты указывают на перспективность использования гетероструктур n - a -Si/ p - c -Si для создания датчиков ИК излучения с управляемым положением максимума фоточувствительности при условии эффективного управления плотностью состояний на границе раздела a -Si/ c -Si. Применение стандартной кремниевой технологии интегральных схем в этом случае позволит обеспечить изготовление достаточно дешевых датчиков и реализовать идею интеграции в одном кристалле чувствительного элемента и устройств обработки сигнала.

- [1] Н. Mimura, Y. Hatanaka. Appl. Phys. Lett., **45**, 452 (1984).
 [2] Н. Mimura, Y. Hatanaka. Japan. J. Appl. Phys., **26**, 60 (1987).
 [3] Б.Г. Будагян, А.А. Айвазов, А.А. Шерченков, И.В. Филатова. В сб.: Тез. докл. VI науч.-техн. конф. «Датчик-95» (Гурзуф, 1995) ч. 1, с. 460.
 [4] А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, О.Н. Становов, Д.А. Стряхилев. Зав. лаб., **1**, 52 (1992).
 [5] Н. Matsuura, T. Okuno, H. Okushi, K. Tanaka. J. Appl. Phys., **55** 1012 (1984).
 [6] A.K. Batabyal, P. Chaudhuri, Ray Swati, K. Barua. Thin Sol. Films, **112**, 51 (1984).
 [7] Аморфный кремний и родственные материалы, под ред. Х. Фрицше (М., Мир 1991).
 [8] А. Меден, М. Шо. Физика и применение аморфных полупроводников (М., Мир, 1991).

Редактор Л.В. Шаронова

Selective photosensitivity of *a*-Si/*c*-Si heterostructures in the nearest IR spectrum range

B.G. Budagyan, A.A. Sherchenkov and A.A. Aivazov

Institute of Electronic Technology, 103498 Moscow, Russia

Photosensitivity spectral characteristics of a *n-a*-Si/*p-c*-Si heterostructure have been investigated in the wavelength range of 500÷1200 nm for different substrate predeposition temperatures T_s and annealing temperatures T_a . It was shown that the photosensitivity maximum shifts to the longer wavelength range with the increase of the predeposition substrate temperature and at $T_s = 500^\circ\text{C}$, $T_a = 200^\circ\text{C}$ the maximum was observed at the wavelength $\lambda = 1080$ nm. The model of the *n-a*-Si/*p-c*-Si heterostructure energy band diagram taking into account the existence of the interfacial layer on the *a*-Si/*c*-Si boundary preventing the depletion layer formation in *c*-Si substrate have been proposed. The results are promising for the *n-a*-Si/*p-c*-Si heterostructure application in fabricating IR detectors with controllable positions of the photosensitivity maximum.
