

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В $p-i-n$ -СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

© Н.А.Феохтистов, А.Б.Певцов, А.И.Косарев

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

(Получена 16 ноября 1995 г. Принята к печати 27 ноября 1995 г.)

Исследовано влияние поверхностной рекомбинации на фотоэлектрические характеристики структур на основе аморфного гидрированного кремния. Получены аналитические зависимости для фототока барьерных структур на основе $a\text{-Si:H}$, учитывающие вклад поверхностной рекомбинации и позволяющие определять величину эффективной скорости поверхностной рекомбинации.

Выполнено исследование влияния параметров изготовления p -слоя и промежуточных обработок p -слоя между процессами нанесения p - и i -слоев на эффективную скорость поверхностной рекомбинации $p-i$ -границы.

1. Введение

Поверхностная рекомбинация (ПР) оказывает существенное влияние на работу фотопреобразователей (ФП) на основе аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$) [1,2]. Особенно заметно она влияет на характеристики ФП в синей области спектра из-за сильного поглощения в $a\text{-Si:H}$. В этом случае неравновесные носители рождаются вблизи границы раздела фронтального (освещаемого) легированного слоя (или слоя металла в барьере Шоттки) и нелегированного (i) слоя барьерной структуры и, следовательно, имеют большую вероятность рекомбинировать на поверхностных состояниях (ПС) этой границы раздела.

Исследованию ПР в барьерных структурах на основе $a\text{-Si:H}$ был посвящен ряд работ [2-6]. Однако до настоящего времени в силу сложного характера процессов собирания неравновесных носителей в структурах на основе $a\text{-Si:H}$ отсутствует простое и, в то же время, достаточно точное описание влияния ПР на работу ФП. В связи с этим отсутствуют надежные методики определения основного параметра поверхностной рекомбинации — эффективной скорости. Так, из имеющихся экспериментальных данных в работах [2,3,5,6] для определения величины эффективной скорости ПР (S_{nr}) необходимо выполнить

сложную процедуру численного расчета. В связи с этим представляет интерес установить аналитические зависимости для описания фототока в барьерных структурах на $a\text{-Si:H}$ в рамках разумных физических приближений, в которых учитывалась бы ПР, и применить эти зависимости для определения S_{nr} .

Основная цель данной работы — получение аналитических зависимостей для фототока в барьерных структурах на $a\text{-Si:H}$, сравнение их с полученными экспериментальными результатами и определение величин эффективной скорости ПР для границ раздела фронтальный (освещаемый) слой-нелегированный слой при различном их изготовлении.

2. Технология получения образцов и методика их исследования

Барьерные структуры, а именно — барьеры Шоттки, $p-i-n$, $n-i-p$ -структуры, изготавливались последовательным напылением легированных и нелегированных пленок аморфного гидрированного кремния методом плазмохимического газофазного осаждения силана. Перед осаждением слоев $a\text{-Si:H}$ на подложку из кварца или ситалла наносился проводящий электрод — слой проводящего окисла ИТО (indium-tin oxide) на кварцевую подложку или слой титана на ситалловую подложку. Затем в случае кварцевой подложки наносился легированный слой $a\text{-Si:H}$ (p) толщиной $100 \div 400 \text{ \AA}$, нелегированный слой (i) толщиной $4000 \div 5000 \text{ \AA}$, легированный фосфором слой (n) толщиной $200 \div 300 \text{ \AA}$. Поверх этих слоев напылялись точки Тi диаметром $2 \div 4 \text{ мм}$. В случае ситалловой подложки обычно напылялись структуры с последовательностью слоев $n-i-p$ -ИТО (Me) и $n-i$ -Me. В последнем случае в качестве металла (Me) с большой работой выхода использовалась Pt, наносимая методом магнетронного распыления. Образец представлял собой матрицу из $10 \div 30$ отдельных точечных структур диаметром 3 мм . Освещение полученных структур производилось через ИТО или через Pt.

На полученных структурах выполнялись измерения спектральных зависимостей коэффициента собирания и вольт-амперных характеристик при различном монохроматическом освещении. Для получения монохроматического потока фотонов плотностью $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ использовался монохроматор МДР-3, а для измерений при больших интенсивностях — He-Ne-лазер (длина волны излучения $\lambda = 0.63 \text{ мкм}$) и He-Cd-лазер ($\lambda = 0.44 \text{ мкм}$). Типичные спектральные зависимости коэффициента собирания (η) структур представлены на рис. 1, а вольт-амперные характеристики при воздействии красным и синим светом на рис. 2.

3. Теоретическое описание влияния поверхностной рекомбинации на фототок в барьерных структурах на основе $a\text{-Si:H}$

Теоретические расчеты фототока в барьерных структурах на основе $a\text{-Si:H}$ были выполнены в ряде работ [2,3,5,6]. Их различает степень упрощения реальной физической картины. В более детальном исследовании [3] учитывалось реальное распределение плотности

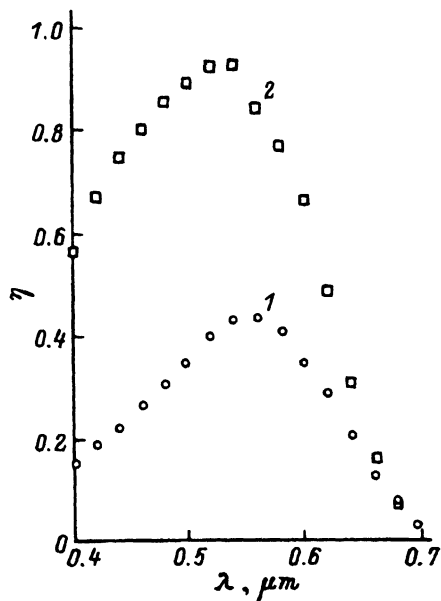


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента сбора η структур с различной толщиной фронтального легированного p -слоя, \AA : 1 — 400, 2 — 150.

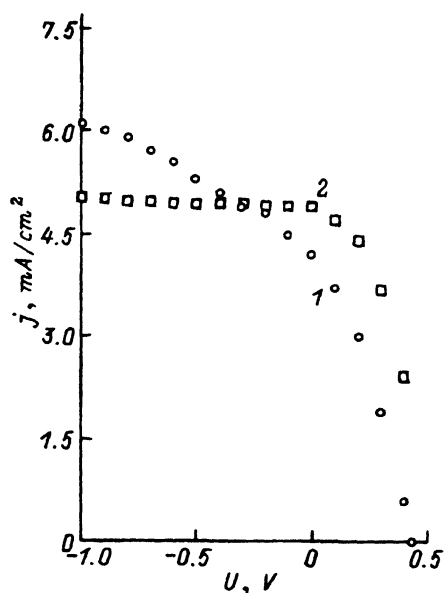


Рис. 2. Нагрузочные характеристики p - i - n -структуры при освещении на длине волны λ , мкм: 1 — 0.7, 2 — 0.44.

локализованных состояний (ЛС), рекомбинация типа рекомбинации Шокли-Рида на локализованные состояния всего спектра. Поскольку наша задача — получение простых аналитических выражений, ограничимся приближением мономолекулярного характера рекомбинации в объеме и приближением постоянной плотности ЛС (N_0) вблизи середины запрещенной зоны a -Si:H. Такое упрощение означает введение эффективных значений плотности ЛС и, следовательно, длины экранирования Дебая в a -Si:H $L_0 = (\epsilon\epsilon_0/qN_0)^{1/2}$, а также эффективного времени рекомбинации τ и, следовательно, соответствующей длины диффузии $L_{\text{diff}} = [(kT/q)\mu\tau]^{1/2}$. Отметим, что такие упрощения являются общепринятыми при экспериментальном описании характеристик a -Si:H.

Рассмотрим ПР на границе фронтального слоя с i -слоем. Описание влияния ПР на второй, более глубоко расположенной, границе во многом аналогично данному ниже, однако ее вклад значительно меньше. Генерированные светом вблизи p - i -границы электроны в основном двигаются под воздействием электрического поля в сторону n -слоя, однако некоторая их часть может за счет диффузии попасть на p - i -границу и там рекомбинировать [2,4]. Понятно, что это наиболее вероятно для электронов, рожденных вблизи p - i -границы, т. е. влияние ПР будет наиболее существенным при воздействии коротковолновым светом. В модели, рассматриваемой далее, будем считать p -слой нефотоактивным и введем скорость поверхностной рекомбинации S_n ,

$$S_n = j_n(0)/qn(0), \quad (1)$$

где $j_n(0)$ — ток электронов на границе раздела p - и i -областей, $n(0)$ — их концентрация на этой границе, q — заряд электрона.

Величины дырочного (j_p) и электронного (j_n) токов на границе можно определить, решив систему уравнений непрерывности для электронов и дырок [7],

$$\begin{aligned} \frac{1}{q} \frac{dj_p}{dx} &= G_p - V_p, & j_p &= qp\mu_p E(x) - qD_p \frac{dp}{dx}, \\ \frac{1}{q} \frac{dj_n}{dx} &= V_n - G_n, & j_n &= qn\mu_n E(x) + qD_n \frac{dn}{dx}, \end{aligned} \quad (2)$$

где μ_p, μ_n — подвижности дырок и электронов; p, n — их концентрации; $E(x)$ — напряженность электрического поля; D_p, D_n — коэффициенты диффузии дырок и электронов ($D = \mu kT/q$); k — постоянная Больцмана; T — температура;

$$\begin{aligned} V_n &= V_p = V(x), \\ G_n &= G_p = G(x), \end{aligned} \quad (3)$$

$V(x)$ — скорость рекомбинации в объеме, $G(x)$ — скорость генерации.

Эта система может быть решена при использовании указанных выше упрощений и при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} p \Big|_{x=0} &= 0, & n \Big|_{x=0} &= 0, \\ p \Big|_{x=d} &= 0, & n \Big|_{x=d} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где d — толщина i -слоя. Эти граничные условия соответствуют случаю бесконечной скорости рекомбинации на границах p - i и n - i . В случае введения эффективной скорости поверхностной рекомбинации на p - i -границе граничное условие для электронов записывается следующим образом:

$$n_{x=0} = j_n(0)/(qS_n). \quad (5)$$

Перепишем более подробно уравнение непрерывности для электронов:

$$\mu_n \frac{d}{dx} [nE(x)] + \frac{kT}{q} \mu_n \frac{d^2 n}{dx^2} = V_n - G_n. \quad (6)$$

Для получения приближенного аналитического решения учтем тот факт, что область вблизи $x = 0$ является областью сильного поля и полевым член уравнения (6) доминирует над диффузионным, т. е.

$$\frac{d}{dx} [nE(x)] > \frac{kT}{q} \frac{d^2 n}{dx^2}. \quad (7)$$

Другими словами, это означает, что полученное выражение будет справедливо для случая, когда ПР не очень сильно снижает суммарный фототок. Вопрос о допустимости использования приближения (7) рассмотрим ниже при сравнении аналитического и численного решений системы (2).

Запишем также скорость рекомбинации в упрошенном виде: $V_n = = n/\tau_n$. Учитывая, что $G_n = \alpha I_0 \exp(-\alpha x)$, где α — коэффициент поглощения, I_0 — число падающих на единицу площади фотонов, запишем уравнение (6) как

$$\mu_n E(x) \frac{dn}{dx} + \mu_n n(x) \frac{dE(x)}{dx} = \frac{n}{\tau_n} - \alpha I_0 \exp(-\alpha x). \quad (8)$$

Учитывая, что $E(x) = -d\psi/dx$, где $\psi(x)$ — потенциал, и используя приближенное выражение для профиля изгиба зон (приближение постоянной плотности локализованных состояний (N_0) в середине щели подвижности) $\psi(x) = -\psi_s \exp(-x/L_0)$, перепишем уравнение (8) в виде

$$-\mu_n \tau_n \left(\frac{\psi_s}{L_0}\right) \exp\left(-\frac{x}{L_0}\right) \frac{dn}{dx} + \mu_n \tau_n \left(\frac{\psi_s}{L_0^2}\right) \exp\left(-\frac{x}{L_0}\right) n = n - \alpha I_0 \tau_n \exp(-\alpha x). \quad (9)$$

Используя граничное условие (5), получим выражение для dn/dx , а затем окончательное выражение для электронной составляющей фототока —

$$j_n(0) = q I_0 \alpha L_0 \frac{kT}{q \psi_s} / \left(1 + \frac{\psi_s \mu_n}{S_n L_0}\right). \quad (10)$$

Для выяснения границ применимости этого выражения система (2) была решена численно и получено совпадение численного и аналитического решений в пределах 10% для величин $\alpha L_0 < 10$. В случае очень сильного поглощения, $\alpha L_0 > 10$, нельзя пренебречь диффузионной составляющей тока, что было сделано при выводе соотношения (10) (а именно, использовалось неравенство (7)). Поскольку для длины экранирования Дебая типичны значения $L_0 \simeq 0.1$ мкм, измерения фототока с целью определения ПР должны проводиться при длинах волн, где $\alpha < 10^6$ см⁻¹, что соответствует сине-зеленому спектральному диапазону.

4. Экспериментальное исследование барьерных структур

На рис. 2 приведены типичные вольт-амперные характеристики исследованных структур при воздействии красным и синим светом. Изменение формы нагрузочной кривой при освещении в синей области спектра по сравнению со случаем красного освещения как раз и говорит о возрастающем влиянии ПР вследствие роста поглощения. Расчеты показывают, что ПР может снижать фототок не более чем на 5 ÷ 10% при однородной генерации неравновесных носителей, соответствующей воздействию красным светом.

На рис. 3 представлена зависимость фототока в координатах $j \sim 1/(\psi_{s0} - U)^2$, где ψ_{s0} — начальный изгиб зон на p - i -границе, а U — приложенное к структуре смещение. Как следует из полученной формулы (10) при достаточно больших смещениях ($\psi_s \mu_n / S_n L_0 > 1$) зависимость фототока от напряжения должна спрямляться с углом наклона, равным $(q I_0)(\alpha L_0)(S_n L_0 / \mu_n)(kT / q \psi_s^2)$, ($\psi_s = \psi_{s0} - U$). Приводя фототок в относительных единицах $j/q I_0$, т. е. измеряя коэффициент

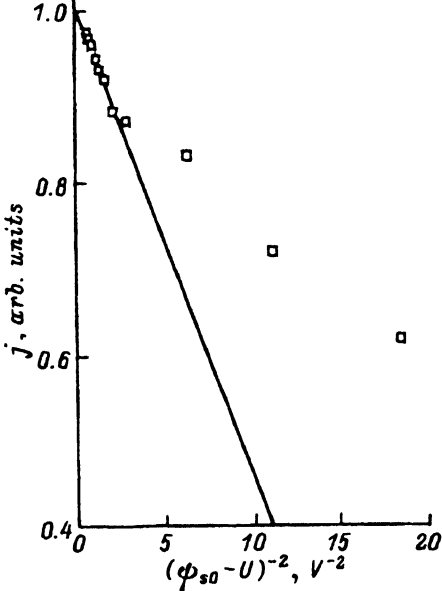


Рис. 3. Зависимость фототока p - i - n -структуры от напряжения в координатах $j \sim (\psi_{s0} - U)^{-2}$ при воздействии синим светом ($\lambda = 0.44$ мкм).

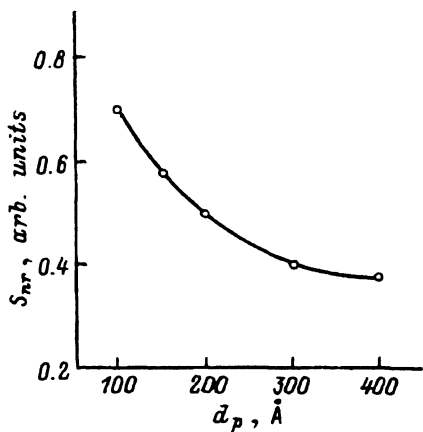


Рис. 4. Зависимость эффективной скорости поверхностной рекомбинации S_{nr} на p - i -границе от толщины p -слоя d_p .

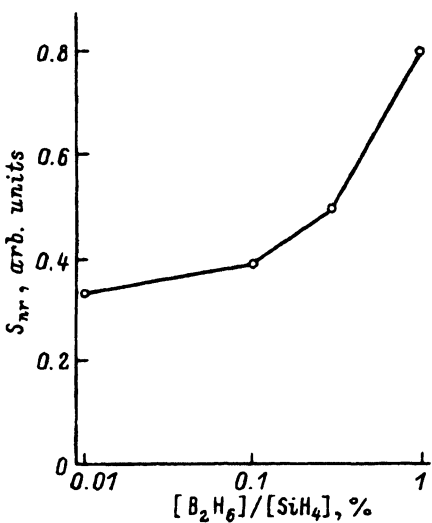


Рис. 5. Зависимость эффективной скорости поверхностной рекомбинации S_{nr} на p - i -границе от концентрации диборана в газовой фазе при изготовлении p -слоя.

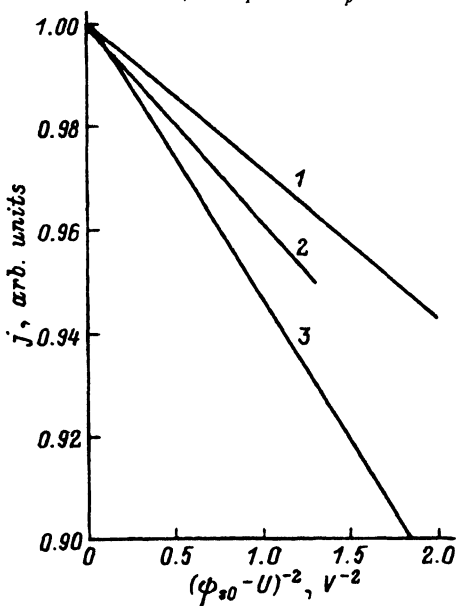


Рис. 6. Зависимость фототока p - i - n -структуры от напряжения в координатах $j \sim (\psi_{s0} - U)^{-2}$ при воздействии синим светом ($\lambda = 0.44$ мкм) для структур без обработки (1) и с различной обработкой p -слоя после напыления: 2 — травление в плазме водорода в течение 2 мин, 3 — окисление в плазме воды в течение 40 с.

собирания η , и задавшись величинами α и L_0 , можно определить величину эффективной скорости ПР, выражаемую в обратных вольтах, — $S_{nr} = S_n L_0 / \mu_n$. Поскольку параметры L_0 , μ_n , α относятся к объему i -слоя, то осуществляя напыления нелегированного слоя при одинаковых условиях и меняя параметры легированного слоя или производя определенные воздействия на p - i -границу между напылениями фронтального легированного и i -слоя, можно наблюдать относительные изменения эффективной скорости ПР S_{nr} и, следовательно, и самой величины скорости ПР S_n .

На рис. 4 приведена зависимость эффективной скорости ПР (в относительных единицах) от толщины легированного p -слоя, а на рис. 5 — от концентрации диборана в газовой фазе, которая определяет уровень легирования пленок a -Si:H. Оценка S_n дает величину в пределах $10^5 \div 10^6$ см/с ($\mu_n \simeq 1$ см²/В·с, $L_0 \simeq 0.1$ мкм, $\alpha \sim 10^5$ см⁻¹). Как видно из этих рисунков, скорость ПР уменьшается при возрастании толщины легированного слоя и снижении уровня легирования. Это говорит о снижении дефектности p - i -границы для более толстых и слабее легированных бором пленок a -Si:H. На рис. 6 представлены зависимости фототока от напряжения для случая обычного приготовления p - i - n -структуры и при промежуточном воздействии в процессе изготовления структуры на границу между p - и i -слоями. Кривая 2 относится к структуре, подвергнутой отжигу в плазме водорода в течение 2 мин после напыления p -слоя, а кривая 3 — к структуре, подвергнутой отжигу в плазме паров воды в течение 40 с после напыления p -слоя. Как видно из рисунка, эти воздействия приводят к возрастанию скорости ПР.

5. Основные выводы работы

1. Получена аналитическая зависимость для фототока барьерных структур на основе a -Si:H, учитывающая вклад поверхностной рекомбинации. Сравнение с численными расчетами позволило показать границы применимости этой формулы — они определяются условием $\alpha L_0 < 10$.

2. Проведено сравнение вольт-амперных характеристик — экспериментальных и согласно формуле (10). Показана применимость аппроксимации (10) для обработки экспериментальных результатов.

3. На основании предложенной модели и методики обработки результатов исследовано влияние параметров p -слоя и обработок структуры между процессами нанесения p - и i -слоев на эффективную скорость ПР на p - i -границе.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант INTAS-93-1916).

Список литературы

- [1] *Аморфные полупроводники и приборы на их основе*, под ред. И. Хамакавы (М., Металлургия, 1986).
- [2] D. Gutkowitz-Krusin. J. Appl. Phys., **52**, 5370 (1981).
- [3] M. Hack, M. Shur. J. Appl. Phys., **54**, 5858 (1983).
- [4] А.А. Андреев, Б.И. Гильман, Н.А. Феоктистов, В.Ю. Флоринский, Е.И. Теруков. ФТП, **17**, 1869 (1983).

- [5] H. Okamoto, H. Kida, S. Nonomura, Y. Hamakawa. Solar cells, **8**, 317 (1983).
[6] W. Kusian, K.P. Ufert, H. Pfeiderer. *Hydrogenated amorphous silicon*, pt. 2 [Sol. St. Phen., **44-46**, 823 (1995)].
[7] С.М. Зи *Физика полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1973).

Редактор Л.В. Шаронова

Study of surface recombination in $a\text{-Si:H } p\text{-i-n}$ structures

N.A. Feoktistov, A.B. Pevtsov, A.V. Kosarev

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

Effect of surface recombination in $a\text{-Si:H } p\text{-i-n}$ junctions on current-voltage characteristics under illumination has been studied. Computer and analytical calculations of current-voltage characteristics under illumination have been carried out and resulted in analytical equation taking into account the effect of surface recombination on photocurrent. Influence of p -layer thickness and of some treatments of p -layer before i -layer deposition on recombination rate at $p\text{-i}$ interface was investigated.
