

Влияние внешнего электрического смещения на фотоэлектрические свойства кремниевых MIS/IL-структур

© Я.С. Буджак, В.Ю. Ерохов, И.И. Мельник

Государственный университет "Львовская политехника",
290013 Львов, Украина

(Получена 17 июля 1996 г. Принята к печати 28 января 1997 г.)

Теоретически исследован механизм влияния внешнего электрического смещения на фотоэлектрические свойства структур Al/туннельно-тонкий SiO₂/p-Si с индуцированным инверсным слоем. Особенностью рассматриваемой структуры является наличие специальной инверсионной гребенки, между которой и подложкой прикладывается положительное напряжение. Получены соотношения, выражающие функциональную зависимость параметров структуры и выходных электрических характеристик фотоэлектрических преобразователей на ее основе от величины напряжения смещения. Представлены результаты численных расчетов, иллюстрирующие эффективность использования внешнего электрического смещения для повышения коэффициента полезного действия фотоэлектрических преобразователей на основе структур Al/SiO₂/p-Si с индуцированным инверсным слоем.

1. Введение

Длительное время рядом ученых [1–4] ведутся исследования структур Al/туннельно-тонкий SiO₂/p-Si с индуцированным инверсным слоем (MIS/IL). Их отличительной особенностью является наличие в приповерхностной области полупроводника мелкого (~ 0.1 мкм) *n*-*p*-перехода, возникающего под воздействием фиксированного в диэлектрическом слое положительного заряда (рис. 1, *a*). Простота технологической реализации MIS/IL-структур, отсутствие высокотемпературных процессов диффузии и диффузионных дефектов кристаллической решетки открывают уникальные возможности для производства на их основе высокоэффективных и дешевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечной энергии [5–7]. Однако практическое достижение предусмотренной теоретически высокой эффективности MIS/IL солнечных элементов (СЭ) оказалось затруднительным вследствие значительных потерь генерируемой мощности в высокоомном инверсном слое (ИС). Предпринятые попытки [8–10] уменьшить удельное сопротивление ИС путем увеличения плотности встроенного заряда неминуемо вели к усложнению технологии получения MIS/IL-структур и способствовали повышению себестоимости ФЭП на их основе.

Наиболее примечательным в связи с этим был метод [11], в котором для инверсии типа проводимости приповерхностной области полупроводниковой подложки предлагалось использовать совместно со встроенным в диэлектрическом слое положительным зарядом также эффект разности работ выхода электронов из полупроводника и тонких полос металлической инверсионной гребенки. Инверсионная гребенка на основе металла с низкой работой выхода формировалась поверх диэлектрического слоя туннельной толщины между полосами токособирающей гребенки (рис. 1, *b*). При этом ее толщина выбиралась исходя из условия минимизации оптических потерь. Несмотря на приемлемость использования данного метода с технологической точки зре-

ния, следует отметить его существенный недостаток, состоящий в ограниченности применения — в качестве материала для инверсионной гребенки — металлов с работой выхода ниже 4 эВ. И в силу только одного этого обстоятельства упомянутый метод мало пригоден для существенного увеличения коэффициента полезного действия (кпд) фотоэлектрических преобразователей на основе MIS/IL-структур.

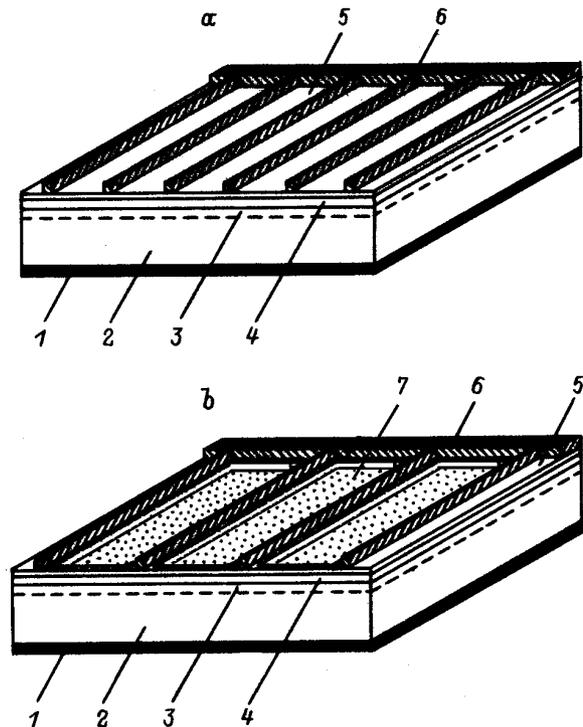


Рис. 1. Схематическое изображение солнечных элементов с MIS/IL-структурой: *a* — общеизвестная структура, *b* — структура с инверсионной гребенкой. 1 — тыльный контакт, 2 — кремниевая подложка *p*-типа, 3 — область пространственного заряда, 4 — инверсный слой, 5 — пленка SiO₂, 6 — токособирающая гребенка, 7 — инверсионная гребенка.

2. Механизм влияния электрического смещения на параметры MIS/IL-структуры

Цель настоящей статьи — теоретическое обоснование эффективности использования предложенного авторами метода улучшения фотоэлектрических свойств кремниевых MIS/IL-структур. Данный метод основанный на использовании в структурах с индуцированным инверсным слоем наряду с внутренними факторами (встроенным зарядом, низкой плотностью поверхностных состояний, эффектом разности работ выхода) также факторов внешнего воздействия, в частности — обратного электрического смещения [12]. Сохраняя все преимущества MIS/IL-структуры, показанной на рис. 1, *b*, предложено влиять на ее параметры с помощью подачи на инверсионную гребенку положительного напряжения (относительно подложки). В этом случае условие электронейтральности обратно смещенной MIS/IL-структуры в состоянии термодинамического равновесия будет по аналогии с [13] определяться уравнением

$$Q_i - Q_{sc} + Q_{ox} + Q_{td} - Q_{ts} = 0, \quad (1)$$

где Q_i , Q_{sc} , Q_{ox} , Q_{td} , Q_{ts} — отнесенные к единице площади заряды на металлической инверсионной гребенке, в приповерхностной области полупроводника, в диэлектрическом слое, на донорных и акцепторных поверхностных состояниях соответственно. Представляя Q_{sc} согласно [14], определим из закона Гаусса падение приложенного напряжения поперек поверхности раздела Si-SiO₂:

$$\Delta = -\frac{d}{\varepsilon_{ox}} Q_i = -\frac{d}{\varepsilon_{ox}} \left(qN_{ox} + Q_{td} - Q_{ta} - \sqrt{2kT\varepsilon_s N_A} F \left(\beta\psi_s, \frac{n_i}{N_A} \right) \right), \quad (2)$$

где d и ε_{ox} — соответственно толщина и диэлектрическая проницаемость оксидного слоя, а N_{ox} — плотность фиксированного в нем положительного заряда;

$$F \left(\beta\psi_s, \frac{n_i}{N_A} \right) = \left\{ \left[\exp(-\beta\psi_s) + \beta\psi_s - 1 \right] + \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 (\exp \beta\psi_s - \beta\psi_s - 1) \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

ψ_s — поверхностный электростатический потенциал; $\beta = q/kT$, а все другие обозначения имеют свой традиционный смысл.

Другое выражение для Δ можно получить, как показано в [3], анализируя зонную диаграмму MIS/IL-структуры в режиме обратного смещения (рис. 2, *b*). При этом

$$\Delta = - \left[\frac{E_g}{q} + \chi - \Phi_m - \psi_s - V_p + V \right], \quad (4)$$

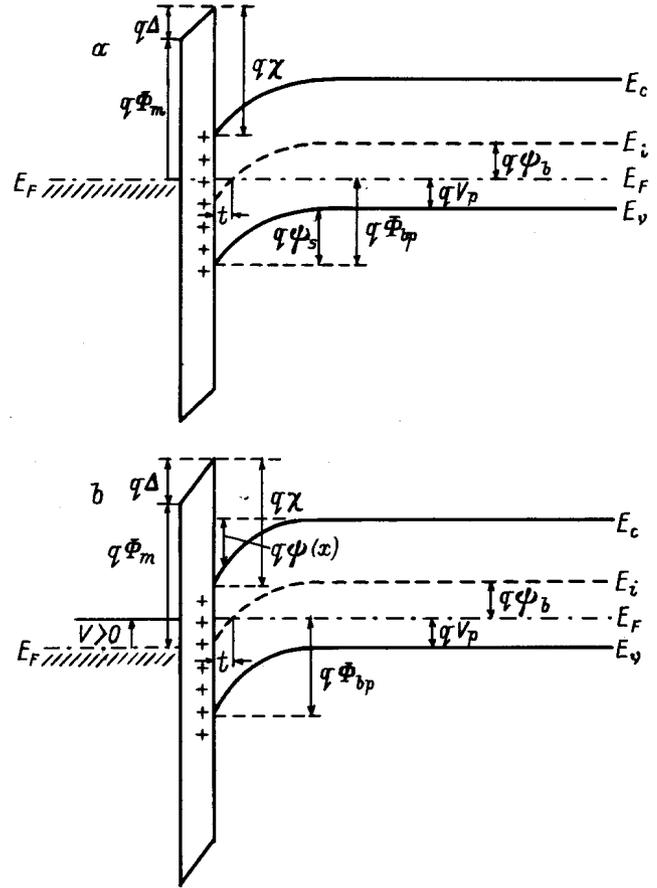


Рис. 2. Энергетические диаграммы системы металл/тонкий SiO₂/p-Si: *a* — без внешнего смещения, *b* — при обратном смещении.

где E_g и χ — соответственно ширина запрещенной зоны и электронное сродство полупроводника, Φ_m — работа выхода электронов из металла инверсионной гребенки, V_p — глубина залегания уровня Ферми по отношению к потолку валентной зоны, V — величина приложенного к инверсионной гребенке внешнего напряжения.

В результате объединения соотношений (3) и (4), с учетом зависимости степени заполнения акцепторных и донорных поверхностных ловушек от величины поверхностного потенциала [13], получим

$$F \left(\beta\psi_s, \frac{n_i}{N_A} \right) + \frac{q^2 D_{it} (\psi_s + V_p)}{\sqrt{2kT\varepsilon_s N_A}} = \frac{\frac{E_s}{q} + \chi - \Phi_m - \psi_s - V_p + V}{\frac{d}{\varepsilon_{ox}} \sqrt{2kT\varepsilon_s N_A}} + \frac{qN_{ox} + qD_{it} [E_c - q(\psi_s + V_p)]}{\sqrt{2kT\varepsilon_s N_A}}, \quad (5)$$

где D_{it} — энергетическая плотность поверхностных ловушек; E_c — энергетическое положение дна зоны проводимости по отношению к потолку валентной зоны.

Полученное соотношение (5) предоставляет возможность рассчитать зависимость поверхностного потенциала ψ_s от величины внешнего напряжения, поданного на инверсную гребенку в режиме обратного смещения (рис. 3).

Поскольку рассматриваемый метод направлен в первую очередь на уменьшение омических потерь мощности при работе ФЭП на основе MIS/IL, определим степень влияния внешнего смещения на последовательное сопротивление R_s . Для этого, основываясь на [15] и принимая во внимание аналогию MIS/IL в приборах СЭ и ФЭП с $n^+ - p$ -переходом, выразим удельное сопротивление ИС через его поверхностное сопротивление R_i и ширину инверсионной гребенки d_1

$$R_{inv} = R_i \frac{d_1^2}{12}. \quad (6)$$

При этом сопротивление поверхности ИС, согласно [7], определяется соотношением

$$R_i = \frac{1}{\mu_n \sqrt{2kT \varepsilon_s N_A} \left\{ [\beta \psi_s + (n_i/N_A)^2 e^{\beta \psi_s}]^{1/2} - (\beta \psi_s)^{1/2} \right\}}, \quad (7)$$

где μ_n — подвижность электронов в ИС. Исходя из того, что низкоомными сопротивлениями контактов и проводников в приборе ФЭП на основе MIS/IL в сравнении с величиной R_{inv} можно пренебречь [11], то объединяя (6) и (7) и выражая удельное сопротивление полупроводника R_{sc} , согласно [11], через сопротивление поверхности R_{ss} , получим выражение для R_s :

$$R_s = R_{sc} + R_{inv} = \frac{R_{ss} [2d_0^2 + 3d_1 (d_0 + \frac{d_1}{2})]}{6} + \frac{d_1^2}{12 \mu_n \sqrt{2kT \varepsilon_s N_A} \left\{ [\beta \psi_s + (n_i/N_A)^2 \exp \beta \psi_s]^{1/2} - (\beta \psi_s)^{1/2} \right\}}, \quad (8)$$

где d_0 — расстояние между токособирающей и инверсионной гребенками. Так как в MIS/IL-структуре обычно $R_{inv} \simeq 10^{-1}$ Ом, а $R_{sc} \simeq 10^{-2}$ Ом, анализ (8) дает основание с достаточной степенью точности считать последовательное сопротивление R_s структуры этого типа функцией поверхностного потенциала и, в соответствии с (5), функцией приложенного внешнего напряжения (рис. 3).

Поскольку высота потенциального барьера MIS/IL-структуры Φ_{bp} является суммой величины изгиба энергетических зон в приповерхностной области полупроводника и глубины залегания уровня Ферми V_p (рис. 2):

$$\Phi_{bp} = \psi_s + V_p = \psi_s + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right) \quad (9)$$

(здесь N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне), очевидно, что обратное смещение будет способствовать повышению Φ_{bp} . Потенциальный барьер в

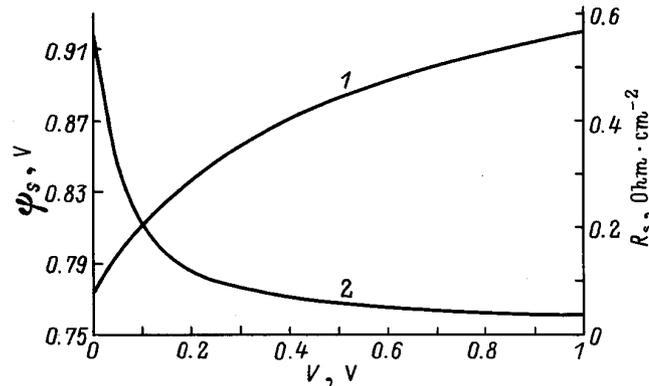


Рис. 3. Зависимости поверхностного потенциала ψ_s (1) и последовательного сопротивления R_s солнечного элемента на основе MIS/IL (2) от величины внешнего электрического смещения V . При расчете использованы параметры: $a - D_{it} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, $N_A = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_{ox} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d = 30 \text{ \AA}$; $b - T = 300 \text{ К}$, $A^{**} = 110 \text{ А/К}^2 \cdot \text{см}^2$, $N_v = 1.04 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

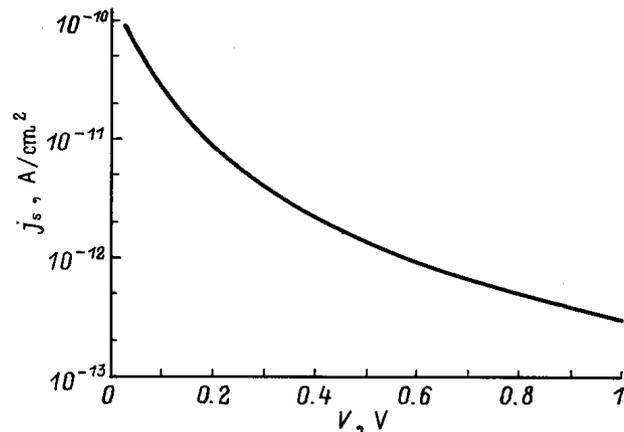


Рис. 4. Плотность тока насыщения MIS/IL-структуры J_s в зависимости от обратного смещения V .

свою очередь связан обратной экспоненциальной зависимостью с плотностью тока насыщения J_s структуры [14]:

$$J_s = A^{**} T^2 \exp \left(-\frac{q \Phi_{bp}}{kT} \right) \exp [-(q \Phi_T)^{1/2} d], \quad (10)$$

где A^{**} — эффективная постоянная Ричардсона, а Φ_T — средняя высота барьера в диэлектрическом слое толщиной d . В результате подстановки (9) в (10) и незначительных преобразований можно получить соотношение, выражающее зависимость тока насыщения I_s от величины поверхностного потенциала:

$$I_s = AA^{**} T^2 \exp \left\{ - \left[\beta \psi_s + \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right) \right] \right\} \times \exp [-d (q \Phi_T)^{1/2}], \quad (11)$$

где A — площадь индуцированного $n - p$ -перехода, которую вследствие незначительной флуктуации его по-

верхности можно принять равной площади ФЭП. Таким образом, при известной зависимости J_s от величины электрического смещения V можно рассчитать степень влияния внешнего напряжения на плотность тока насыщения MIS/IL-структуры (рис. 4).

Отметим также, что повышение поверхностного потенциала MIS/IL-структуры в режиме обратного смещения будет сопровождаться увеличением толщины индуцированного ИС [16]. Используя приведенное в [7] уравнение зависимости электростатического потенциала ψ от координаты x в приповерхностной области полупроводника. Определяя толщину ИС t путем нахождения точки пересечения $\psi(x)$ с уровнем Ферми (рис. 2) и, соответственно, принимая в качестве нижней границы интеграла в (12) величину ψ_b , получим

$$t = \left(\frac{\varepsilon_s}{2kTN_A} \right)^{1/2} \int_{\psi_b}^{\psi_s} \left[\beta\psi + \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 \exp \beta\psi \right]^{-1/2} d\psi. \quad (12)$$

3. Влияние внешнего смещения на выходные характеристики ФЭП на основе MIS/IL

Поскольку, согласно с приведенными в [7] соотношениями, толщина ИС наряду с другими структурными параметрами определяет плотность генерируемого в СЭ на основе MIS/IL фототока, несложно рассчитать функциональную зависимость последнего от поданного на инверсионную гребенку внешнего напряжения. Для этого представим фототок ФЭП в виде суммы дырочного и электронного токов, генерируемых световым потоком F соответственно в обедненной области и в индуцированном ИС:

$$J_L = qF(1-R) \left[\frac{L_1\nu_n \exp \nu_n t + L_2\nu_n \exp(-\nu_n t) - \alpha \exp(-\alpha t)}{1 - \nu_n^2/\alpha^2} + \frac{K_1\nu_p \exp \nu_p t + K_2\nu_p \exp(-\nu_p t) - \alpha \exp(-\alpha t)}{1 - \nu_p^2/\alpha^2} \right], \quad (13)$$

где

$$L_1 = \frac{e^{-(l+\nu_n t)} - e^{-(t+\nu_n l)}}{2\sinh(\nu_n l - \nu_n t)}, \quad L_2 = \frac{e^{-(\alpha l + \nu_n t)} - e^{-(\alpha t + \nu_n l)}}{2\sinh(\nu_n l - \nu_n t)},$$

$$K_1 = \frac{(\alpha + h)e^{-\nu_p t} - (\nu_p + h)e^{-\alpha t}}{(\nu_p + h)e^{\nu_p t} - (\nu_p - h)e^{\nu_p t}},$$

$$K_2 = \frac{(\alpha + h)e^{\nu_p t} + (\nu_p - h)e^{-\alpha t}}{(\nu_p + h)e^{\nu_p t} - (\nu_p - h)e^{-\nu_p t}};$$

ν_n и ν_p являются величинами, обратными диффузионным длинам электронов и дырок соответственно; $h = S/D_p$, где S — скорость поверхностной рекомбинации на фронтальной поверхности ФЭП, а D_p — коэффициент

диффузии дырок. Коэффициент R учитывает часть фотонного потока, отражающуюся от поверхности полупроводниковой подложки с толщиной l и коэффициентом оптического поглощения α . В выражении (13) необходимо также учитывать влияние электрического поля, созданного встроенным в диэлектрик положительным зарядом и приложенным к инверсионной гребенке напряжением, на диффузионную длину фотогенерированных в ИС неосновных носителей. Для этого во 2-м слагаемом данного соотношения величина ν_p вводится как функция электрического поля, зависящего в свою очередь от величины внешнего смещения.

Поскольку фототок I_L наряду с током насыщения I_s определяет величину напряжения холостого хода V_{oc} солнечного элемента

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_s} + 1 \right), \quad (14)$$

можно утверждать, что и V_{oc} является функцией внешнего электрического смещения. Для получения аналитического выражения зависимости $V_{oc}(\psi_s)$ используем подстановку (11) в (14) с последующим преобразованием функции под логарифмом:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \left[\ln \left(\frac{I_L}{AA^{**}T^2} \right) + \beta\psi_s + \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right) + d(q\Phi_T)^{1/2} + 1 \right], \quad (15)$$

где n имеет смысл диодного коэффициента качества.

Определив таким образом кинетику влияния внешнего смещения на структурные параметры и выходные электрические характеристики ФЭП, можно непосредственно подойти к исследованию зависимости эффективности фотогенерации в СЭ данного типа от приложенного к инверсионной гребенке положительного напряжения. Для этого представим КПД ФЭП как функцию последовательного сопротивления R_s , тока насыщения I_s , фототока

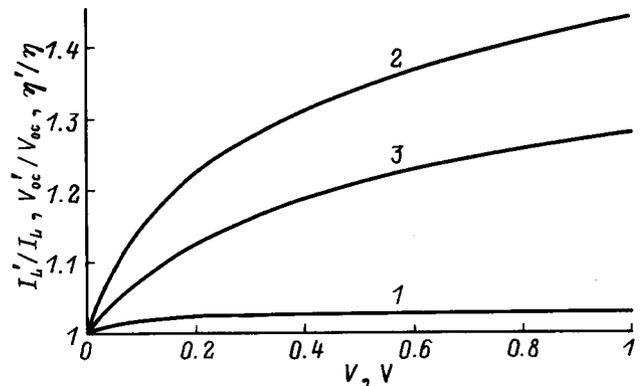


Рис. 5. Зависимости: 1 — $I'_L(V)/I_L$, 2 — $V'_oc(V)/V_{oc}$, 3 — $\eta'(V)/\eta$, где I_L , V_{oc} , η — выходные характеристики фотоэлектрического преобразователя на основе MIS/IL без внешнего смещения; I'_L , V'_oc , η' — то же в режиме обратного смещения.

I_L и мощности падающего светового потока P_{in} [16]:

$$\eta = \left[\left(\frac{nkT}{q} \right) I_L (1 - \gamma) \ln \left(\gamma \frac{I_L}{I_s} \right) - R_s I_L^2 (1 - \gamma)^2 \right] / P_{in}, \quad (16)$$

где

$$\gamma = \left[1 + \frac{1}{1 + 2R_s I_L \gamma \left(\frac{q}{nkT} \right)} \ln \left(\gamma \frac{I_L}{I_s} \right) \right]^{-1}.$$

Из анализа полученного соотношения следует, что КПД СЭ, полностью являясь функцией зависящих от внешнего смещения структурных параметров и выходных электрических характеристик, будет претерпевать существенное изменение под воздействием приложенного к инверсионной гребенке внешнего напряжения (рис. 5).

4. Заключение

Подробный анализ полученных расчетных зависимостей структурных параметров, выходных электрических характеристик и КПД ФЭП на основе MIS/IL от величины обратного смещения показывает, что наиболее эффективным является воздействие внешнего положительного напряжения в диапазоне от 0 до 0.6 В. Поскольку напряжения холостого хода ФЭП как раз достигает верхней границы указанного интервала, целесообразно в качестве источника внешнего напряжения использовать дополнительный СЭ на основе MIS/IL. Под этим подразумевается создание солнечного модуля (СМ), в котором выходное напряжение вспомогательного СЭ будет подаваться в обратном направлении на инверсионные гребенки нескольких основных СЭ. Поскольку под влиянием внешнего смещения ток утечки через инверсионную гребенку уменьшается до 10^{-13} А/см² (рис. 4) и обусловленные им потери приложенного напряжения являются несущественными, количество основных ФЭП в предложенном СМ может быть значительным. Проведенные расчеты показывают, что уже при использовании только двух основных СЭ эффективность работы данного СМ будет выше КПД солнечного модуля традиционной конструкции с последовательным или параллельным соединением трех СЭ с MIS/IL-структурой.

Таким образом, подводя итог сказанному выше, можно заключить, что предложенный метод улучшения фотоэлектрических свойств структур AlSiO₂/p-Si является действенным средством повышения эффективности работы ФЭП на основе MIS/IL, оставаясь при этом достаточно простым для практической реализации.

Представленная работа была частично поддержана Международной Соросовской программой поддержки образования в сфере точных наук (ISSEP), грант № PSU 062066.

Список литературы

- [1] A.M. Cowley, S.M. Sze. J. Appl. Phys., **36**, 3212 (1965).
- [2] D.L. Pulfrey. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-23**, 587 (1976).
- [3] A.N. Daw, P. Chattopadhyay. Sol. St. Electron., **27**, 1057 (1984).
- [4] M.Y. Doghish, F.D. Ho. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-40**, 1446 (1993).
- [5] P. van Halen, R.P. Mertens, R.J. van Overstraeten, R.E. Thomas, J. van Meerbergen. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-25**, 507 (1978).
- [6] M.A. Green, R.B. Godfrey, M.R. Willison, A.W. Blakers. Proc. 14th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. (N.Y., 1980) p. 684.
- [7] G.S. Salter, R.E. Thomas. Sol. St. Electron., **20**, 95 (1977).
- [8] R. Hezel, Sol. St. Electron., **24**, 863 (1981).
- [9] R. Schorner, R. Hezel. IEEE Trans. Electron Dev., **12**, 1466 (1981).
- [10] R. Hezel, K. Jaeger. J. Electrochem. Soc., **36**, 518 (1989).
- [11] P. Chattopadhyay. Sol. St. Electron., **31**, 1641 (1988).
- [12] V.Yu. Erohov, I.I. Melnyk, I.M. Rarenko. Proc., First Int. Conf. Mater. Sci. Chalcogenide and Diamond-Structure Semicond. (Chernivtsi, 1994) v. 2, p. 211.
- [13] В.Н. Овсяк. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда (Новосибирск, 1984).
- [14] С.М. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984).
- [15] R.N. Hall. Sol. St. Electron., **24**, 595 (1981).
- [16] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы (М., Мир, 1987).

Редактор Т.А. Полянская

External electric bias influence on photoelectrical properties of a silicon MIS/IL structure

Ya.S. Budzak, V.Yu. Erohov, I.I. Melnyk

State university "Lvivska Polytechnica",
290013 Lviv, the Ukraine

Abstract A mechanism of the influence of external electrical bias on photoelectric properties of Al/tunnel-thin SiO₂/p-Si structures with an induced inversion layer (MIS/IL) was theoretically investigated. A characteristic feature of a MIS/IL structure considered is a availability of a special inversion grid, between which and the substrate a positive voltage is applied. The ratio expressing a functional dependence of parameters of MIS/IL structures and output electrical characteristics of photoelectric MIS/IL-based transducers on the bias voltage was obtained. Results are presented of numerical calculations, illustrating employment of the external electrical bias to increase the efficiency of photoelectric MIS/IL-based transducers.