

06

© 1992 г.

ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГИДРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО В ТЕТРОДНОЙ СИСТЕМЕ

*М. М. Мездрогина, О. А. Голикова, М. М. Казанин, Г. Юшка, К. Арлаускас,
У. С. Бабаходжаев, Р. Г. Икрамов.*

Рассмотрено влияние параметров собственного слоя на величины тока короткого замыкания, напряжение разомкнутой цепи в ФЭП на основе пленок аморфного гидрированного кремния. Слои были получены в тетродной системе нанесения, отличающейся от обычно применяемой диодной системы наличием двух дополнительных электродов-сеток. Показано, что в отличие от диодной системы увеличение энергии активации электропроводности слоя собственной проводимости до 0.85—0.88 эВ приводит к увеличению тока короткого замыкания. Дальнейшее увеличение энергии активации до 1.0—1.1 эВ приводит к уменьшению тока короткого замыкания. Напряжение разомкнутой цепи увеличивается плавно при увеличении энергии активации. Введение примесей (фосфора, кислорода, бора, углерода) приводит к изменению параметров ФЭП.

В настоящее время эффективность фотопреобразователей (ФЭП) на основе пленок гидрированного кремния (α -Si:H) достигает 10—12% [1]. Столь значительное увеличение эффективности ФЭП данного типа объясняется прежде всего прогрессом в технологии получения собственного слоя, легированных слоев α -Si:H, совершенствованием конструкции ФЭП. Имеется целый ряд работ, посвященных исследованию влияния параметров собственного слоя α -Si:H (фото- и темновой проводимости $\sigma_{\text{ф}}$, $\sigma_{\text{т}}$) [2], подлегирования бором [3], свойств легированных слоев на параметры ФЭП [4, 5].

Однако вопросы выбора оптимальных параметров собственного слоя, способа нанесения легированных слоев, а также создания границ перехода между слоями все еще остаются нерешенными. Также нерешенным остается вопрос о влиянии примесей в собственном слое — бора, фосфора, углерода, кислорода на параметры ФЭП.

Ранее в работе [6, 7] было показано, что широкое варьирование технологических режимов при использовании диодной емкостной системы ВЧ разложения силаносодержащих газовых смесей приводит к изменению параметров собственного слоя $\sigma_{\text{ф}}$, $\sigma_{\text{т}}$, энергии активации темновой проводимости ΔE_{σ} , плотности состояний на уровне Ферми $N_{\text{с}}$, а также параметров ФЭП тока короткого замыкания — $J_{\text{кз}}$, напряжения открытой цепи $U_{\text{хх}}$, фактора заполнения FF . Показано, что уменьшение ΔE_{σ} в α -Si:H приводит к увеличению $J_{\text{кз}}$, FF и уменьшению $U_{\text{хх}}$. Из измерений темновых ВАХ на структурах с барьером Шоттки (БШ) следует, что зависимость $N_{\text{с}}$ от ΔE_{σ} имеет немонотонный характер: минимум $N_{\text{с}}$ находится при значении $\Delta E_{\sigma} = 0.65$ — 0.70 эВ. В то же время из анализа данных работы [8] установлено, что наиболее оптимальными для ФЭП являются слои с величиной $\Delta E_{\sigma} = 0.86$ — 0.88 эВ.

В данной работе исследовалось влияние изменения параметров собственного слоя ($N_{\text{с}}$), удельных сдвигов электронов и дырок $(\mu\tau)_{\text{н}}$, $(\mu\tau)_{\text{р}}$, ΔE_{σ} , $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{т}}$, а также влияние примесей (бора, фосфора, углерода, кислорода) на параметры ФЭП. Легирование собственного слоя производилось из газовой фазы путем добавления в силаносодержащую газовую смесь диборана (B_2H_6), фосфина

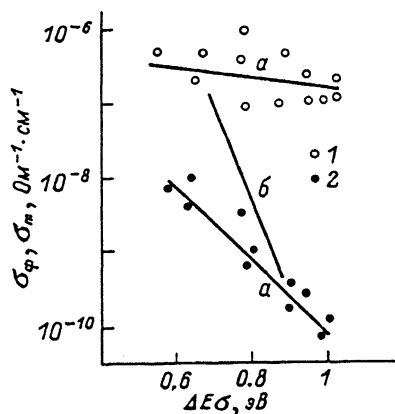


Рис.1. Зависимости фото- и темновой проводимости σ_{ϕ} (1), σ_m (2) при варьировании ΔE_{σ} пленок a -Si:H, полученных в диодной и тетрадной системах.

a — для пленок a -Si:H, полученных в диодной системе; $б$ — для пленок a -Si:H, полученных в тетрадной системе.

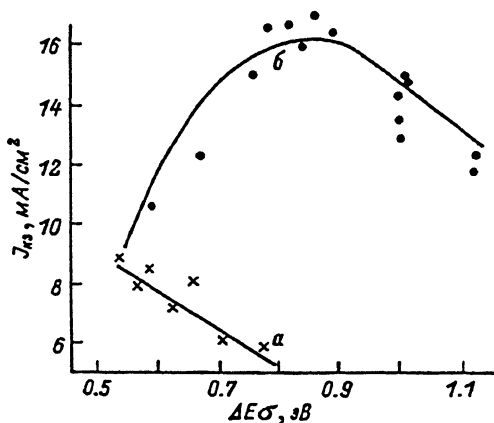


Рис.2. Изменение $J_{кз}$ ФЭП при изменении ΔE_{σ} пленок a -Si:H.

a — для ФЭП, полученных в диодной системе; $б$ — для ФЭП, полученных в тетрадной системе.

(PH_3), воды (H_2O), метана (CH_4). Были исследованы ФЭП с p - i - n , n - i - p структурой, а также ФЭП с барьером Шоттки (БШ) (n - i - $\tilde{P}t$, p - i - $\tilde{Y}b$).

Параметры n - и p -легированных слоев ФЭП следующие: $\Delta E_{\sigma} = 0.35$ — 0.3 эВ, $\sigma_T = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Параметры собственного слоя варьировались в следующих пределах: ΔE_{σ} от 0.6 до 1 эВ, $(\mu\tau)_n$ от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{В}$, $(\mu\tau)_p$ от $5 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{В}$, σ_T от 10^{-11} до $5 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, σ_{ϕ} от 10^{-8} до $10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (при освещении потоком $\Phi = 10^{15} \text{ фотон}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$, $\lambda = 0.65 \text{ мкм}$). Это достигалось путем варьирования импеданса промежуточного электрода [9] без обычно применяемого подлегирования бором.

Ранее было показано [10, 11], что использование тетрадной системы для получения пленок a -Si:H обеспечивает однородную микроструктуру собственных и легированных слоев, а также границ раздела между ними вследствие отсутствия бомбардировки поверхности растущей пленки ионами и "высокоэнергетичными" электронами из плазменного промежутка. Это основное отличие пленок a -Si:H, полученных в тетрадной системе, от пленок a -Si:H, полученных в диодной структуре.

На рис. 1 приведены зависимости σ_{ϕ} , σ_T от ΔE_{σ} . Данные по диодной системе взяты из работы [12], в которой изменение ΔE_{σ} производилось в результате варьирования технологических параметров нанесения — температуры подложки — T_s , скорости осаждения — S , напряжения на ВЧ электроде, а также подлегирования бором. Здесь также приведены данные по тетрадной структуре ($T_s = 320^\circ$).

На рис. 2 представлены зависимости $J_{кз}$ от ΔE_{σ} для ФЭП, полученных в диодной и тетрадной системах. Видно, что увеличение ΔE_{σ} для пленок, полученных в диодной системе, приводит к уменьшению $J_{кз}$. В отличие от этого для пленок, полученных в тетрадной системе, изменение $J_{кз}$ при варьировании ΔE_{σ} имеет немонокотный характер, $J_{кз}$ имеет максимум при значении $\Delta E_{\sigma} = 0.85$ — 0.88 эВ. Величина U_{xx} при увеличении ΔE_{σ} в обоих случаях меняется одинаково.

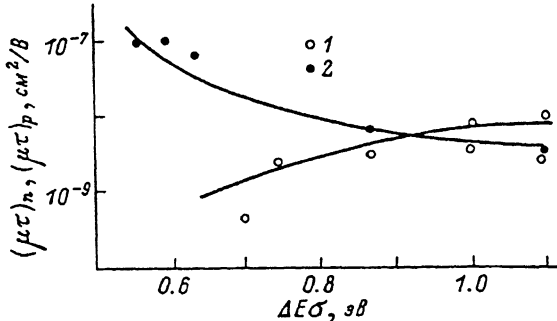
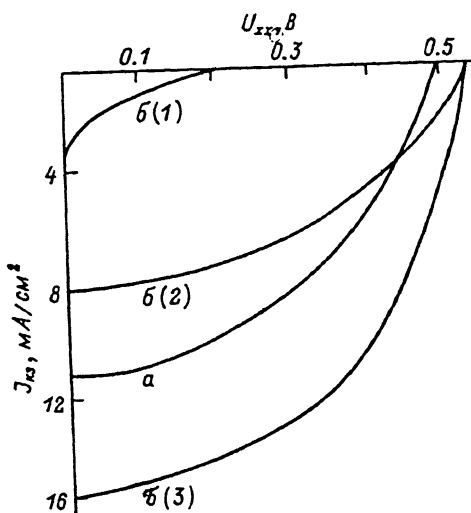


Рис.3. Зависимости изменения удельных сдвигов электронов и дырок при варьировании ΔE_{σ} .
1 — для электронов, 2 — для дырок.

На рис. 3 приведены изменения удельных сдвигов электронов и дырок $(\mu\tau)_n$, $(\mu\tau)_p$ при варьировании ΔE_{σ} пленок, полученных в тетродной системе. Увеличение ΔE_{σ} до 0.87 эВ приводит к уменьшению $(\mu\tau)_n$ примерно на один порядок, при этом величина $(\mu\tau)_p$ возрастает на порядок. Удельные сдвиги определялись по время-пролетной методике с учетом распределения встроенного поля по толщине образца. Кроме того, использовалась методика исследования световых ВАХ при обратном смещении для определения $(\mu\tau)_p$. Величины удельных сдвигов, определенные двумя независимыми способами, удовлетворительно совпадают: по-видимому, учет распределения встроенного поля не оказывает большого влияния. Это является следствием малых значений $N_s \sim 3-7 \cdot 10^{15} \text{эВ} \cdot \text{см}^3$. Увеличение ΔE_{σ} до 0.88 эВ приводит к увеличению J_{k3} вследствие увеличения $(\mu\tau)_p$, а уменьшение J_{k3} при увеличении ΔE_{σ} до 1.0—1.1 эВ, вероятно, происходит вследствие уменьшения $(\mu\tau)_n$. Собственные слои с величиной $\Delta E_{\sigma} = 0.85-0.88 \text{эВ}$ вследствие равенства величин удельных сдвигов электронов и дырок дают возможность получения максимальной величины J_{k3} в ФЭП.

На рис. 4 представлены нагрузочные характеристики структур с БШ $p-i\text{-Yb}$, $n-i\text{-Pt}$. Данные структуры сформированы на слоях с $\Delta E_{\sigma} = 0.86 \text{эВ}$, $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{т}} = 5 \cdot 10^5$ при освещении АМ-1, $(\mu\tau)_n = (\mu\tau)_p = 4 \cdot 10^{-9} \text{см}^2/\text{В}$, при толщинах



слоя 0.1, 0.2, 0.28 мкм. Величина J_{k3} определялась без поправки на прозрачность верхнего электрода, которая в случае Pt была не выше 60—50%, а в случае Yb была ниже. Видно, что увеличение толщины слоя собственной проводимости приводит к увеличению J_{k3} , U_{xx} .

Рассмотрим влияние слабого легирования собственного $\alpha\text{-Si:H}$ на параметры ФЭП. На рис. 5 приведены ВАХ структур с БШ, сформированных на подлегированных фосфором, бором, углеродом слоях $\alpha\text{-Si:H}$. Введение фосфора ($\Delta E_{\sigma} = 0.78 \text{эВ}$) существенно меняет форму ВАХ: величины

Рис. 4. Нагрузочные характеристики ФЭП с БШ на основе $\alpha\text{-Si:H}$.

a — $p-i\text{-Yb}$, b — $n-i\text{-Pt}$ (d , мкм: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.28).

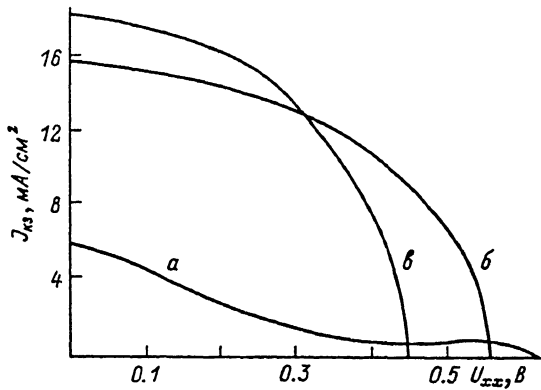


Рис.5. Влияние подлегирования фосфором, бором, углеродом на параметры ФЭП.

a - P, *b* - B, *c* - C.

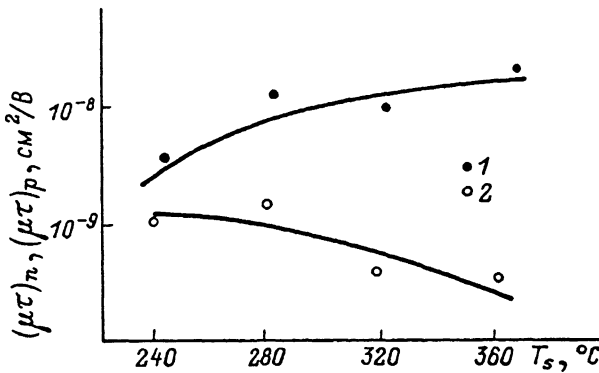


Рис.6. Влияние температуры подложки на изменение удельного сдвига электронов и дырок при легировании кислородом.

1 — для электронов, 2 — для дырок.

J_{kz} и FF уменьшаются. Это можно объяснить тем, что вследствие уменьшения $(\mu\tau)_p$ дырки располагаются вблизи тыльного контакта, а электроны, имея большую величину $(\mu\tau)_n$, отходят к наружному контакту. Таким образом, данная структура ведет себя как диполь при освещении. По данным время-пролетной методики для данной структуры $(\mu\tau)_n = 1 \cdot 10^{-7} \text{cm}^2/\text{V}$, в то время как $(\mu\tau)_p = 10^{-10} \text{cm}^2/\text{V}$. Введение бора (кривая *b*) приводит лишь к увеличению U_{xx} , FF практически не меняется. Углерод в слое $a\text{-Si:H}$ приводит к увеличению J_{kz} ; FF U_{xx} уменьшаются. При введении кислорода температура подложки играет существенную роль: уменьшение T_s до 220°C влияние кислорода незначительно, J_{kz} увеличивается. Увеличение температуры подложки приводит к увеличению $(\mu\tau)_n$, $(\mu\tau)_p$ при этом падает. Данные по влиянию кислорода на величины $(\mu\tau)_n$, $(\mu\tau)_p$ приведены на рис. 6.

Таким образом, при использовании однокамерной системы для нанесения пленок $a\text{-Si:H}$ и формирования на их основе ФЭП наиболее опасными примесями являются кислород и фосфор, загрязнение бором (не более 100 ppm) не приводит

к существенным изменениям параметров ФЭП. Введение углерода не уменьшает эффективность ФЭП при той же концентрации.

Выводы

1. Величина тока короткого замыкания в ФЭП на основе пленок α -Si:H, полученных в тетродной системе, немонотонно меняется при варьировании энергии активации электропроводности слоя собственной проводимости. Максимальная величина тока короткого замыкания при $\Delta E_{\sigma} = 0.85-0.88$ эВ. Величина $U_{\text{хх}}$ увеличивается при увеличении ΔE_{σ} .
2. Величина удельного сдвига дырок $(\mu\tau)_p$ увеличивается, а электронов $(\mu\tau)_n$ уменьшается при увеличении энергии активации электропроводности слоя собственной проводимости.
3. Введение примесей (фосфора, кислорода, бора, углерода) приводит к изменению параметров ФЭП: фосфор и кислород уменьшают $J_{\text{кз}}$, введение бора увеличивает $U_{\text{хх}}$, введение углерода увеличивает $J_{\text{кз}}$.
4. Использование тетродной системы нанесения пленок α -Si:H позволяет формировать на их основе ФЭП.

Список литературы

- [1] Carlson D. E. // JEEE Trans. Electron Dev. 1989. Vol. 36. N 12. P. 2775—2779.
- [2] Matsuda A., Kunagai K., Tanaka M. // Jap. J. Appl. Phys. 1983. Vol. 22. N 1. P. 34—36.
- [3] Harukai H., Sakai N., Kanyano M., Uchida Y. // Sol. Energy Materials, 1983. Vol. 10. N 4. P. 441—455.
- [4] Faughan B. W., Hanak J. J. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. Vol. 59—60. P. 1127—1130.
- [5] Hack M., Shur M., Crubatai N., Yang Y. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. Vol. 59—60. P. 1115—1118.
- [6] Мездрогина М. М., Голикова О. А., Кудоярова В. Х. и др. // Тр. VII Всесоюз. конф. по синтезу полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, 1986. Т. II. С. 56—58.
- [7] Голикова О. А., Мездрогина М. М., Кудоярова В. Х. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 8. С. 1464—1466.
- [8] Minotira B., Tsuji K., Hirage T., Fukai F. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. Vol. 59—60. P. 1118—1123.
- [9] Голикова О. А., Мездрогина М. М., Петров И. Н., Казанин М. М. // Тр. Всесоюз. конф. по твердотельной электронике. Л., 1989. Т. А. С. 257.
- [10] Tanaka M., Nakamura N., Tsuda S. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. Vol. 27. N 1. P. 14—19.
- [11] Мездрогина М. М., Голикова О. А., Казанин М. М. и др. // Тр. Междунар. конф. "Некристаллические полупроводники-89". Ужгород, 1989. С. 86—88.
- [12] Vanier R., Delahoy, Griffith R.-W. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 8. P. 5235—5242.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
2 октября 1990 г.
В окончательной редакции
19 февраля 1991 г.