

## ПЛЕНКИ $\alpha$ -Si:H, ОСАЖДЕННЫЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ МЕТОДОМ РАЗЛОЖЕНИЯ СИЛАНА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© О.А.Голикова, А.Н.Кузнецов, В.Х.Кудоярова, М.М.Казанин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 21 декабря 1995 г. Принята к печати 27 декабря 1995 г.)

Метод разложения силана на постоянном токе в магнитном поле впервые испытан для получения пленок нелегированного  $\alpha$ -Si:H при температурах осаждения  $300 \div 400^\circ\text{C}$ . Показано, что оптимизация параметров процесса позволяет получить материал приборного качества с содержанием водорода до 2 ат%. Примененный метод обеспечивает варьирование значения микроструктурного параметра  $R$ , характеризующего соотношение SiH- и SH<sub>2</sub>-связей, в интервале 0–1.0.

### 1. Введение

В нашей предыдущей работе [1] были представлены результаты исследований пленок  $\alpha$ -Si:H, осажденных при повышенных температурах  $T_s = 300 \div 400^\circ\text{C}$  методом высокочастотного разложения силана (методом тлеющего разряда). Целью работы было получение нелегированного материала приборного качества с пониженным содержанием водорода ( $C_H$ ). В последние годы этому вопросу уделялось значительное внимание [2–8] в связи с проблемой стабильности фотоэлектрических свойств  $\alpha$ -Si:H под влиянием внешних воздействий, особенно при интенсивной засветке. Тем не менее однозначной корреляции между величинами предельной плотности фотоиндуцированных дефектов ( $N_{\text{sat}}$ ) и  $C_H$  до сих пор установлено не было. По-видимому, при  $C_H = \text{const}$  для эффекта Стаблера–Вронского существенны и такие характеристики структурной сетки, как характер Si–H-связей [9], локальная микроструктура (наличие микропор) [10] и др., которые могут зависеть от метода осаждения пленки. Поэтому сравнение данных о стабильности пленок  $\alpha$ -Si:H, полученных различными методами [1–10], представляется затруднительным. Исходя из этого, в развитие работы [1], мы испытали метод разложения силана на постоянном токе ( $dc$ -разложение) в магнитном поле [11,12], который, как ожидалось, сможет обеспечить варьирование структурных и электронных параметров  $\alpha$ -Si:H в более широких пределах, чем метод тлеющего разряда.

## 2. Методика эксперимента

Пленки  $a\text{-Si:H}$  получали в стандартном реакторе, предназначенном для магнетронного распыления (рис. 1), однако вместо аргоно-водородной смеси использовали аргон-силановую смесь (magnetron assisted silane decomposition — MASD [11,12]). В [11,12] MASD успешно использовали для получения сплавов  $a\text{-Si:H}$  с Ge, Sn и C.

Вариации величин  $T_s$ , анодного напряжения, потенциала держателя подложки относительно катода, магнитного поля, давления, скорости прокатки и состава газовой смеси, а также введение дополнительного электрода (сетки) при варьировании ее потенциала относительно держателя подложки действительно открывают возможности широкого изменения условий осаждения пленок  $a\text{-Si:H}$  и, в свою очередь, широкого изменения их параметров.

В настоящей работе при получении пленок параметры процесса были следующие: газ  $25\% \text{SiH}_4 + 75\% \text{Ar}$ , магнитное поле 500 Гс, анодное напряжение  $200 \div 600 \text{ В}$ , удельная мощность разряда  $W = 0.1 \div 1.0 \text{ Вт/см}^2$ , давление газа  $P = (2.5 \div 7.0) \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$

Ряд экспериментов был проведен при наличии сетки, специально введенной в реактор. Сетка находилась под плавающим потенциалом, расстояния сетка-подложка и сетка-катод равнялись соответственно 15 и 35 мм. Скорости осаждения пленок были  $0.4 \div 2 \text{ \AA/с}$ .

Толщины пленок составляли  $0.6 \div 1.0 \text{ мкм}$ , коэффициент преломления находился в пределах  $n = 3.04 \div 3.25$ .

Содержание водорода в пленках определяли методом инфракрасной (ИК) спектроскопии (анализировали полосу при  $630 \text{ см}^{-1}$ ). Микроструктурный параметр определяли как  $P = I_{2090} / (I_{2000} + I_{2090})$ , где  $I_{2000}$  и  $I_{2090}$  — интенсивности полос при  $2000$  и  $2090 \text{ см}^{-1}$ , характеризующие соответственно вклады связей типов SiH и SiH<sub>2</sub>.

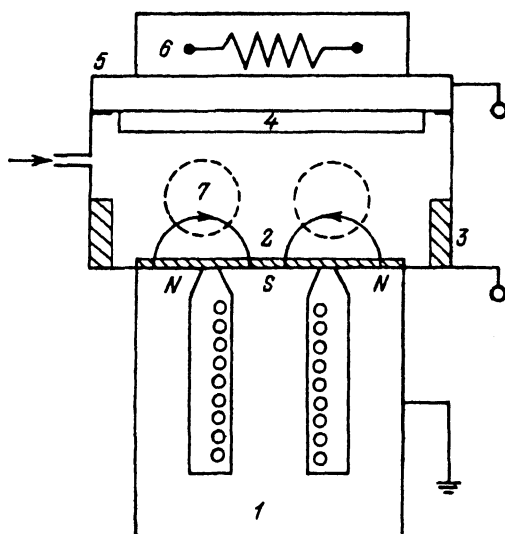


Рис. 1. Схема реактора: 1 — электромагнит, 2 — Si-диск (катод), 3 — цилиндрический анод, 4 — подложка, 5 — держатель подложки, 6 — нагреватель подложки, 7 — зона скрещенных электрического и магнитного полей.

Были исследованы температурные зависимости темновой проводимости ( $\sigma_d$ ) и фотопроводимости ( $\sigma_{ph}$ ). Перед измерениями образцы отжигались в вакууме при  $200^\circ\text{C}$  в течение 0.5 ч. Величина  $\sigma_{ph}$  измерялась в потоке фотонов излучения  $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  с энергией фотона  $h\nu = 2 \text{ эВ}$ .

Положения уровня Ферми в щели подвижности определяли, используя величины  $\sigma_d$ , измеренные при комнатной температуре, и известную формулу  $\varepsilon_c - \varepsilon_f = kT \ln(\sigma_0/\sigma_d)$ , где  $T = 300 \text{ К}$ ,  $\sigma_0 = 150 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$ . Величина зазора между зоной проводимости и уровнем Ферми  $\varepsilon_c - \varepsilon_f$  при  $0 \text{ К}$  равна, как известно, энергии активации  $\sigma_d$  ( $\Delta E$ ).

Плотность дефектов ( $N_D$ ) определялась на основе анализа спектра «дефектного» поглощения, измеряемого методом постоянного фототока (СРМ). Метод СРМ позволил также определить параметр Урбаха ( $E_U$ ).

### 3. Результаты экспериментов и обсуждение

Рассмотрим зависимости  $\sigma_d$ , измеренной при комнатной температуре, и  $\Delta E$  от температуры осаждения пленки (рис. 2). Разброс точек обусловлен вариациями параметров осаждения пленок (см. разд. 2), которые проводились с целью выбора оптимального режима процесса. Тем не менее видно, что в данном случае не наблюдается резкого возрастания  $\sigma_d$  и падения  $\Delta E$  с ростом  $T_s$ , характерных для  $a\text{-Si:H}$ , полученного стандартным методом тлеющего разряда в диодном реакторе [1,13] (см. рис. 2). В среднем, независимо от  $T_s$ ,  $\sigma_d \approx 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , а  $\Delta E \approx 0.85 \text{ эВ}$ . Рассчитанная, исходя из этого значения  $\sigma_d$ , величина зазора  $\varepsilon_c - \varepsilon_f$  при  $300 \text{ К}$  составляет  $0.72 \text{ эВ}$ . Эти данные очень близки к данным для пленок  $a\text{-Si:H}$ , полученных методом тлеющего разряда в триодном реакторе [1]. Величина зазора  $\varepsilon_c - \varepsilon_f = 0.72 \text{ эВ}$  отвечает минимальной плотности дефектов  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и величине параметра Урбаха  $E_U = 55 \text{ мэВ}$ .

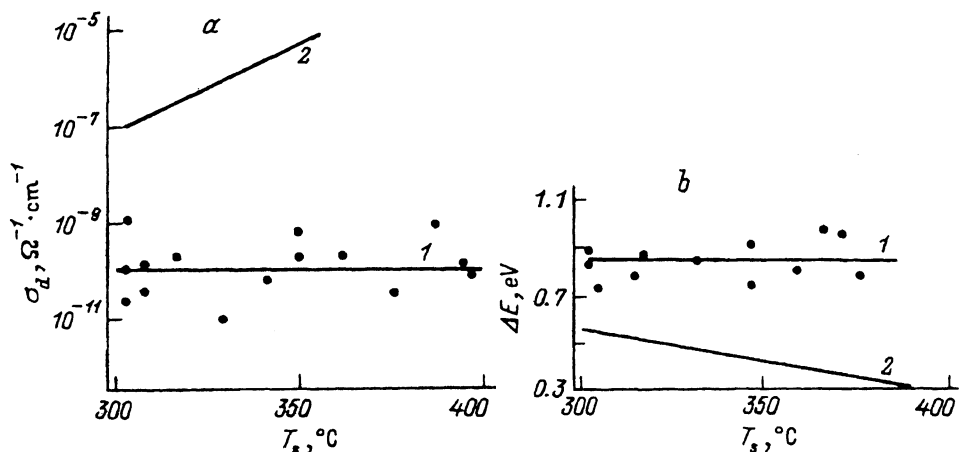


Рис. 2. Темновая проводимость при  $300 \text{ К}$  (а) и энергия активации темновой проводимости (б) в зависимости от температуры осаждения пленки. 1 — настоящая работа, 2 — [13].

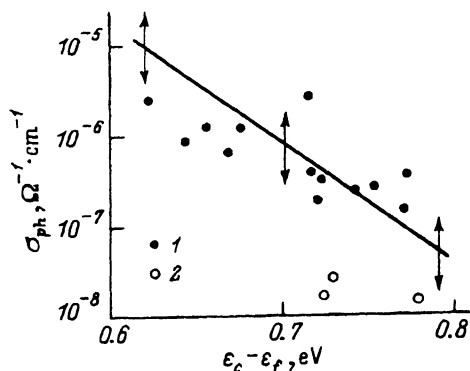


Рис. 3. Фотопроводимость в зависимости от положения уровня Ферми в щели подвижности в пленках  $a$ -Si:H с  $R < 1$  (1) и  $R = 1$  (2).  $T = 300$  K,  $h\nu = 2$  эВ,  $\Phi = 10^{15}$  см $^{-2}$  · с $^{-1}$ .

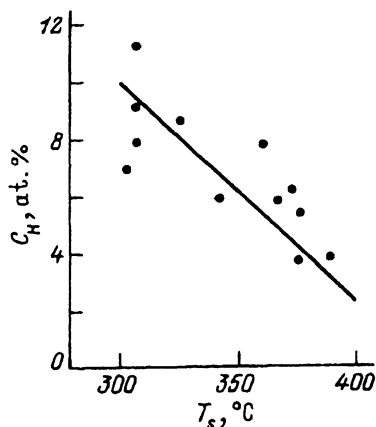


Рис. 4. Содержание водорода в пленке в зависимости от температуры осаждения.

Рассмотрим фотопроводимость при  $T = 300$  K в зависимости от  $\epsilon_c - \epsilon_f$  (рис. 3). Прямая, приведенная на том же рисунке, отвечает усредненным данным для пленок  $a$ -Si:H, полученных методом тлеющего разряда, стрелки показывают обычно наблюдаемый их разброс. Из рис. 3 следует хорошее, за некоторым исключением, согласие данных по фотопроводимости  $a$ -Si:H, полученного методом тлеющего разряда и методом  $dc$ -разложения силана в магнитном поле.

Таким образом, в настоящей работе получен материал приборного качества при  $T_s = 300 \div 400^\circ\text{C}$  с оптимальными электронными параметрами: при 300 K  $\epsilon_c - \epsilon_f = 0.72$  эВ,  $N_D = 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $\mu\tau = 10^{-6}$  см $^2$  · В $^{-1}$  ( $\mu\tau$  — произведение подвижности на время жизни, определенное из  $\sigma_{ph}$  в предположении, что квантовый выход  $\eta = 1$ ),  $E_U = 55$  мэВ.

Минимальное содержание водорода в пленках, исследованных в настоящей работе, составляет  $2 \div 3$  ат% (рис. 4). Минимальное содержание водорода в пленках, полученных методом тлеющего разряда, находится на том же уровне [1]. Однако пленки, исследованные в настоящей работе, отличаются тем, что при  $T_s = 300 \div 400^\circ\text{C}$  структурный параметр удается варьировать в диапазоне  $R = 0 \div 1.0$ , в то время как при использовании других методов осаждения  $R \approx 0$ , когда  $T_s > 300^\circ\text{C}$  [1].

Следует отметить, что высокие значения  $R$  обычно характерны для  $a$ -Si:H, полученного при низких температурах ( $T_s < 200^\circ\text{C}$ ), когда величина  $C_H$  значительно превышает 10 ат%. Здесь же мы имеем  $R$ , близкие к единице, на фоне низкого содержания водорода (до  $2 \div 3$  ат%). Поэтому указанные пленки представляют собой новые объекты как для дальнейших структурных исследований, так и для изучения взаимосвязей между структурой и электронными свойствами  $a$ -Si:H.

Пленки такого типа, полученные при  $T_s = 350$  и  $380^\circ\text{C}$ , апробировались методом оптической модуляционной спектроскопии в университете г. Лёвен (Leuven), Бельгия. Сделано заключение, что в отношении плотности дефектов они находятся на уровне пленок приборного качества, полученных методом тлеющего разряда при  $T_s = 200 \div 250^\circ\text{C}$  [14].

Однако для пленок, имеющих  $R = 1$ , характерно некоторое увеличение протяженности хвостов зон. Это, по-видимому, является причиной снижения их фотопроводимости при  $\varepsilon_c - \varepsilon_f = \text{const}$  (рис. 3).

Возвращаясь к проблеме стабильности, следует подчеркнуть, что варьирование  $R$  в максимально возможных пределах при  $C_H = \text{const}$  создает основу для дальнейших исследований влияния характера Si-H-связей на образование фотоиндуцированных дефектов.

Настоящая работа поддержана грантом INTAS N 931916. Апробация пленок  $\alpha$ -Si:H в университете г. Лёвен (Бельгия), а также некоторые измерения их электрических параметров в Московском государственном университете проводились в соответствии с Программой сотрудничества, предусмотренной этим грантом.

### Список литературы

- [1] О.А. Голикова, М.М. Казанин, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, Е.И. Теруков. ФТП, **30**, 405 (1996).
- [2] G. Ganguly, A. Matsuda. Phys. Rev. B, **47**, 3881 (1993).
- [3] U. Kroll, J. Maier, M. Goetz, A. Howling, J.-L. Dorier, J. Dutla, A. Shah, Ch. Hollenstein. J. Non-Cryst. Sol., **164-166**, 59 (1993).
- [4] N.M. Johnson, P.V. Santos, C.E. Nebel, W.B. Jackson, R.A. Street, K.S. Stevens, J. Walker. J. Non-Cryst. Sol., **137/138**, 235 (1991).
- [5] V.L. Dalal, M. Leonard, G. Baldin. J. Non-Cryst. Sol., **164/166**, 71 (1993).
- [6] R. Zedlitz, F. Kessler, M. Heintze. J. Non-Cryst. Sol., **164/166**, 83 (1993).
- [7] M. Vanecek, B.P. Nelson, A.H. Mahan, R.S. Crandall. J. Non-Cryst. Sol., **137/138**, 191 (1991).
- [8] J.R. Liang, N. Maley, J.R. Abelson. J. Appl. Phys., **75**, 3704 (1994).
- [9] R. Meaudre, M. Meaudre, S. Vignoli, P. Roca i Cabarrocas, Y. Bouizem, M.L. Theve. Phil. Mag. B, **67**, 4978 (1993).
- [10] S.J. Jones, Y. Chen, D.L. Willamon, U. Kroll, P. Roca i Cabarrocas. J. Non-Cryst. Sol., **164/166**, 119 (1993).
- [11] F.D. Emichelis, A. Tagliaferro. Phil. Mag. B, **61**, 867 (1990).
- [12] V. Marachonov, N.A. Rogachev, E.I. Terukov, J.T. Ishkalov, V.E. Chelnokov. J. Non-Cryst. Sol., **137/138**, 817 (1991).
- [13] R.M.A. Dawson, C.M. Fortmann, M. Gunes, Y.M. Li, S.S. Nag, R.W. Collins, C.R. Wronski. Appl. Phys. Lett., **63**, 955 (1993).
- [14] W. Grevendonk, M. Verluyten, J. Dauwen, G.J. Adriaenssens, J. Bezemer. Phil. Mag. B, **61**, 393 (1990).

Редактор Л.В. Шаронова

### $\alpha$ -Si:H films prepared at elevated temperatures by direct current magnetron assisted silane decomposition

*O.A. Golikova, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, M.M. Kazanin*

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

Direct current magnetron assisted silane decomposition technique has been tested for deposition of an undoped  $\alpha$ -Si:H at 300–400 °C. The process optimisation enables us to prepare a device-quality  $\alpha$ -Si:H with a low hydrogen content (up to 2 at %). This technique also ensures a wide-range variation of the microstructure parameter  $R$  characterizing the dehydrid to monohydrid form ratio of hydrogen-silicon bonds from 0 to 1.