

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ОТЖИГА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ ПЛЕНОК a -Si:H

И.А.Курова, А.Н.Луначева, Н.В.Мелешко, Э.В.Ларина

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,

119899, Москва, Россия

(Получена 3 августа 1993 г. Принята к печати 16 декабря 1993 г.)

Исследовано влияние теплового отжига на электрические и фотоэлектрические свойства пленок a -Si:H, легированных бором из газовой фазы. Установлено, что после отжига пленок при $T_s < T_a < 460^\circ\text{C}$ (T_a — температура отжига, T_s — температура роста) темновая проводимость σ_d и фотопроводимость σ_{ph} растут, энергия активации σ_d уменьшается. Это, по-видимому, обусловлено увеличением эффективности легирования пленок. Отжиг при $T_a > 460^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению σ_d и резкому падению σ_{ph} вследствие разупорядочения структуры пленки, связанного с разрывом Si-H-связей.

Известно [1-4], что отжиг пленок a -Si:H при $T_a > T_s$, где T_s — температура роста пленок, T_a — температура отжига, приводит к изменению их электрических, оптических и фотоэлектрических характеристик. Было установлено, что при этом изменяется содержание водорода в пленке вследствие его эффузии и увеличивается концентрация оборванных связей кремния. Так как оборванные связи являются основными центрами рекомбинации в a -Si:H, то время жизни электронов в отожженных пленках уменьшается и фотопроводимость падает. Темновая проводимость изменяется вследствие смещения уровня Ферми в глубь зоны при образовании оборванных связей.

Большинство работ посвящено исследованию влияния отжига на нелегированные пленки, в которых отжиг при $T_a \geq 360^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению темновой проводимости и фотопроводимости. Нам известна лишь одна работа [5], где исследуется влияние отжига на фотоэлектрические свойства легированной фосфором пленки a -Si:H. В этой работе было получено, что темновая проводимость пленки практически не изменялась в результате отжига при температурах до $T_a = 450^\circ\text{C}$, а фотопроводимость уменьшалась при $T_a > 450^\circ\text{C}$, но слабее, чем в нелегированной пленке.

В данной работе исследовалось влияние теплового отжига на электрические и фотоэлектрические свойства пленок a -Si:H, легированных

бором. Пленки были выращены в высокочастотном тлеющем разряде при температуре подложки $T_s = 280^\circ\text{C}$. Подложка была кварцевой или из кристаллического кремния (*c*-Si) с покрытием из термически выращенного SiO_2 (толщина слоя составляла 0.6 мкм). Концентрация бора, определенная методом SIMS, составляла $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Отжиг пленок проводился в вакууме при остаточном давлении 10^{-6} мм рт.ст., температура измерялась термопарой.

На рис. 1, *a, b* показаны температурные зависимости темновой проводимости, $\sigma_d(T)$, и фотопроводимости, $\sigma_{ph}(T)$, для легированных бором пленок, *a*-Si:H(B), на подложке из кварцевого стекла, отожженных при разных температурах. Для сравнения приведены темновая проводимость и фотопроводимость для контрольного неотожженного образца, выращенного в одном процессе с отожженными образцами. Видно, что после отжига пленок при $T_a \leq 450^\circ\text{C}$ (в течение 1 мин) темновая проводимость увеличивается, ее энергия активации E_σ уменьшается, фотопроводимость возрастает. Вместе с тем отжиг пленки при $T_a \geq 500^\circ\text{C}$ изменяет параметры пленки в другую сторону: темновая проводимость и фотопроводимость сильно уменьшаются.

На рис. 1, *c, d* представлены результаты измерений температурных зависимостей $\sigma_d(T)$ и $\sigma_{ph}(T)$ для отожженных при разных температурах пленок *a*-Si:H(B), выращенных на подложке *c*-Si/SiO₂. Видно, что наблюдаются подобные приведенным на рис. 1, *a, b* изменения $\sigma_d(T)$ и $\sigma_{ph}(T)$. Отжиг при $T_a < 460^\circ\text{C}$ приводит к увеличению темновой проводимости и фотопроводимости (при комнатной температуре σ_d увеличилась в ~ 100 раз, σ_{ph} — в 2 раза) и уменьшению энергии активации темновой проводимости E_σ . При $T_a > 460^\circ\text{C}$ σ_d и σ_{ph} резко уменьшаются (σ_d — на 2 порядка, σ_{ph} — на 3 порядка при комнатной температуре).

Были проведены аналогичные исследования влияния отжига на электрические и фотоэлектрические параметры нелегированных пленок *a*-Si:H, выращенных на подложке из кварцевого стекла. На рис. 2 представлены зависимости $\sigma_d(T)$ и $\sigma_{ph}(T)$ для пленок, отожженных при разных температурах. Из рисунка видно, что σ_d и E_σ не изменяются при температурах отжига $T_a < 520^\circ\text{C}$, однако величина σ_{ph} постепенно уменьшается с увеличением T_a (для пленки, отожженной при $T_a = 420^\circ\text{C}$, σ_{ph} при комнатной температуре уменьшилась в 11 раз; для пленки, отожженной при $T_a = 520^\circ\text{C}$, — в 55 раз).

Таким образом, характер изменения температурных зависимостей темновой проводимости и фотопроводимости для легированных и нелегированных пленок различен. По-видимому, это различие, связанное с присутствием бора в легированных пленках, обусловлено увеличением концентрации электрически активных атомов бора в результате отжига пленок при $T_a < 460^\circ\text{C}$. Такой вывод можно сделать, если принять во внимание совпадение зависимостей фотопроводимости от положения уровня Ферми ($E_F - E_v$) при комнатной температуре для наших пленок и пленок с разным уровнем легирования из газовой фазы из работы [6] (рис. 3). Величина $E_F - E_v$ рассчитывалась по формуле

$$E_F - E_v = kT \ln(\sigma_{\min}/\sigma_d), \quad (1)$$

где $\sigma_{\min} = 150 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [7], $T = 300 \text{ К}$, σ_d — равновесная темновая проводимость при комнатной температуре. Так как в области комнат-

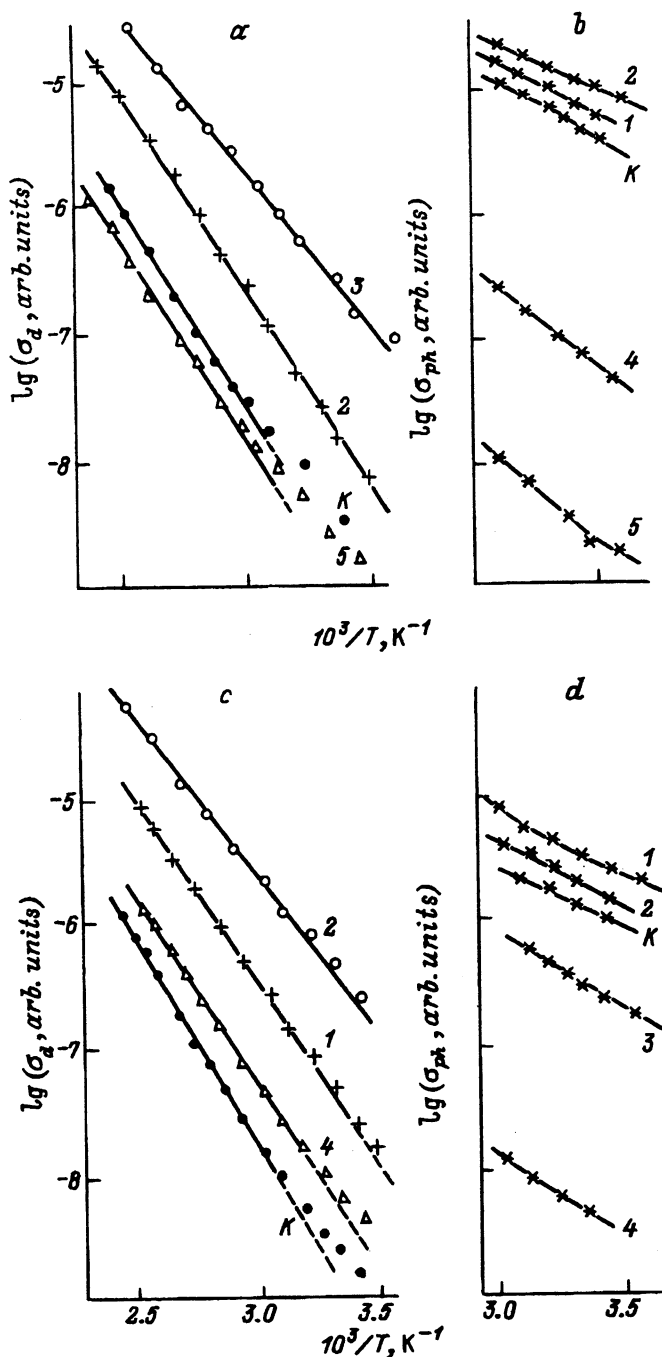


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости (*a, c*) и фотопроводимости (*b, d*) для легированных бором пленок, *a*-Si:H(B). *a, b* — пленки выращены на кварцевом стекле; температура отжига T_a , °C: 1 — 335, 2 — 360, 3 — 410, 4 — 490, 5 — 520. *c, d* — пленки выращены на структуре *c*-Si/SiO₂; температура отжига T_a , °C: 1 — 360, 2 — 460, 3, 4 — 520 (1 и 15 мин соответственно). К — контрольный неотожженный образец.

Рис. 2. Температурные зависимости темновой проводимости и фотопроводимости для нелегированных пленок α -Si:H, выращенных на кварцевом стекле. Температура отжига T_a , °C: 1 — 360, 2 — 420, 3 — 520; К — контрольный неотожженный образец.

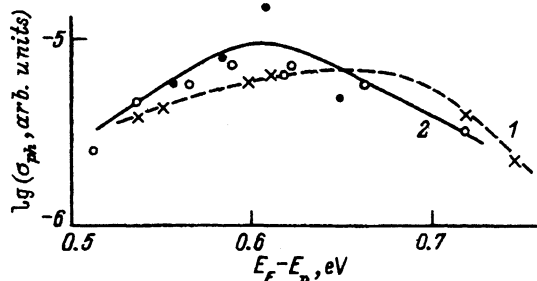
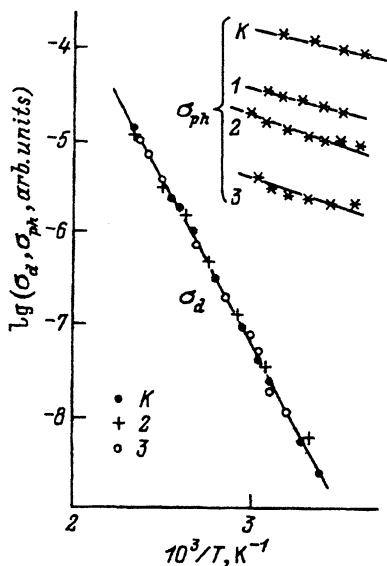


Рис. 3. Зависимость фотопроводимости от положения уровня Ферми. 1 — данные из работы [6], 2 — наши результаты.

ных температур наблюдаются неравновесная проводимость и ее гистерезис [8], σ_d определялась путем экстраполяции высокотемпературного равновесного участка темновой проводимости в область более низких температур. (В области высоких температур отсутствует гистерезис и наблюдается экспоненциальная температурная зависимость равновесной темновой проводимости с энергией активации E_σ , которая уменьшается в легированных пленках после отжига при $T_a < 460^\circ\text{C}$). Из рисунка видно, что фотопроводимость имеет максимум в области $E_F - E_v \approx 0.6$ эВ и слабо спадает по обе стороны от него. В работе [9] наблюдается независимость фотопроводимости от положения уровня Ферми $E_F - E_v$ при изменении последнего степенью легирования пленок бором из газовой фазы. Такое поведение $\sigma_{ph}(E_F - E_v)$, отличное от зависимости $\sigma_{ph}(E_F - E_v)$ в пленках n -типа проводимости α -Si:H, объясняется в работе [6] определяющим влиянием прилипания дырок в хвосте состояний валентной зоны на концентрацию рекомбинационных центров — нейтральных оборванных связей. В рамках этой модели увеличение фотопроводимости в результате отжига при $T_a < 460^\circ\text{C}$, может указывать на отсутствие существенных изменений хвоста состояний валентной зоны, а температурная зависимость фотопрони-

мости — ее энергия активации E_{ph} — определяет эффективную энергию активации центров прилипания дырок в хвосте валентной зоны. Неизменная энергия активации $E_{ph} \approx 0.18$ эВ при отжиге с $T_a < 460^\circ\text{C}$ также означает практически слабое изменение хвоста валентной зоны и, следовательно, структуры пленок.

Резкое уменьшение σ_d и σ_{ph} при отжиге с $T_a > 460^\circ\text{C}$ указывает на возникновение структурных изменений в пленках, обусловленных разрывом Si—H-связей при этих температурах отжига [10].

Таким образом, установлено, что в пленках a-Si:H, легированных бором, термический отжиг при температурах $T_a \leq 460^\circ\text{C}$ приводит к существенному росту темновой проводимости, уменьшению ее энергии активации, а также к увеличению фотопроводимости. Это, по-видимому, обусловлено увеличением эффективности легирования пленок в результате их отжига при $T_s < T_a < 460^\circ\text{C}$. При повышении температуры отжига выше 460°C происходит сильное уменьшение фотопроводимости и темновой проводимости вследствие существенного разупорядочения структуры пленки, связанного с разрывом Si—H-связей.

Список литературы

- [1] G.D. Cody, T. Tiedhje, B. Abelis, B. Brooks. Phys. Rev. Lett., **47**, 1480 (1981).
- [2] J. Stuke. J. Non-Cryst. Sol., **97**, 1 (1987).
- [3] D.K. Biegelsen, R.A. Street, C.C. Tsai. Phys. Rev. B, **20**, 4839 (1979).
- [4] P. Jensen, R.M. Meandre. J. Phys.: Condens. Matter, **2**, 4785 (1990).
- [5] D.L. Staebler, J.I. Pankove. Appl. Phys. Lett., **37**, 609 (1980).
- [6] A.G. Kazanskii, S.V. Kuznetsov. Phys. St. Sol. (b), **168**, K19 (1991).
- [7] R.A. Street, J. Kakalios, C.C. Tsai, T.M. Hayes. Phys. Rev. B, **35**, 1316 (1987).
- [8] J. Kakalios, R.A. Street. Phys. Rev. B, **34**, 6014 (1986).
- [9] О.А. Голикова, М.М. Мездрогина, А.П. Соколов, А.П. Шебанин. ФТП, **26**, 960 (1992).
- [10] S.H. Jang, C. Lee. Phil. Mag. B, **53**, 293 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова