

## ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В $\alpha$ -Si : H ПРИ ДЕГИДРОГЕНИЗАЦИИ И ОПТИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Казанский А. Г., Милчевич Е. П.

Исследовано влияние дегидрогенизации  $\alpha$ -Si : H на изменение под действием длительного освещения фотопроводимости и спектральной зависимости коэффициента поглощения в «дефектной» области спектра (1.0—1.5 эВ).

Измерения проведены при комнатной температуре на пленках нелегированного  $\alpha$ -Si : H, полученных разложением моносилана в ВЧ тлеющем разряде при температуре подложки 250 °С. Дегидрогенизация осуществлялась посредством высокотемпературного отжига при  $T_a = 280 \div 500$  °С. Оптическая деградация проводилась освещением образцов светом лампы накаливания через тепловой фильтр интенсивностью 100 мВт·см<sup>-2</sup> в течение 160 мин.

Дегидрогенизация приводила к уменьшению относительного изменения в результате освещения фотопроводимости и поглощения в «дефектной» области. Для образцов, отожженных при  $T_0 > 400$  °С, после длительного освещения не наблюдалось увеличения поглощения. В то же время величина фотопроводимости для данных образцов существенно уменьшалась. Полученные результаты объясняются определяющей ролью слабосвязанного водорода в процессе образования при освещении дефектов типа оборванных связей, а также захватом неравновесных носителей на состояния пространственно коррелированных дефектов с отрицательной энергией корреляции с последующей их трансформацией в дефекты с положительной энергией корреляции.

Известно, что длительное освещение аморфного гидрогенизированного кремния ( $\alpha$ -Si : H) приводит к изменению его темновой проводимости ( $\sigma_n$ ) и фотопроводимости ( $\sigma_{\phi}$ ) (эффект Стеблера—Вронского) [1]. Представляется установленным, что при освещении  $\alpha$ -Si : H происходит увеличение концентрации дефектов  $N$  типа оборванных связей (оптическая деградация) [2]. Предполагается, что изменение концентрации оборванных связей обусловлено наличием в  $\alpha$ -Si : H слабосвязанного или кластерированного водорода [3, 4]. С другой стороны, отжиг  $\alpha$ -Si : H при температурах  $T_a > 300$  °С вызывает выход водорода из пленок, что также сопровождается увеличением концентрации оборванных связей и изменением свойств материала [5]. В связи с этим представляет интерес провести сравнительное исследование влияния дегидрогенизации при высокотемпературном отжиге и оптической деградации на фотоэлектрические свойства  $\alpha$ -Si : H, а также исследовать влияние дегидрогенизации  $\alpha$ -Si : H на изменение его параметров, происходящее при длительном освещении.

В настоящей работе измерения проводились на пленках нелегированного  $\alpha$ -Si : H толщиной  $\sim 1$  мкм, полученных при разложении смеси газов 5 % SiH<sub>4</sub>+95 % Ar в ВЧ тлеющем разряде при температуре подложки (кварцевое стекло)  $T_s = 250$  °С. Дегидрогенизация образцов проводилась посредством отжига в вакууме 10<sup>-3</sup> Па при температурах  $T_a = 280 \div 500$  °С. Оптическая деградация осуществлялась освещением образцов светом лампы накаливания интенсивностью 100 мВт·см<sup>-2</sup> через тепловой фильтр в течение 160 мин. Изменение  $N$  определялось из измерения коэффициента поглощения ( $\alpha_{\text{деф}}$ ) в «дефектной» области спектра (1.0÷1.5 эВ) [6] методом постоянного фототовета [7]. Фотопроводимость при комнатной температуре измерялась при возбуждении носителей квантами света с энергией 1.9 эВ и интенсивностью 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Перед измерениями образцы отжигались при температуре 200 °С в течение 15 мин.

Дегидрогенизация  $a\text{-Si} : \text{H}$  приводила к уменьшению оптической ширины щели для подвижности от 1.8 до 1.72 эВ ( $T_a = 500^\circ\text{C}$ ). Энергия активации  $E_a$  температурной зависимости  $\sigma_T$  возрастала при отжиге  $a\text{-Si} : \text{H}$  от 0.62 до 0.74 эВ ( $T_a = 500^\circ\text{C}$ ) (рис. 1). В то же время после освещения недегидрированного образца  $E_a$  увеличивалась от 0.62 до 0.92 эВ. Дегидрогенизация  $a\text{-Si} : \text{H}$

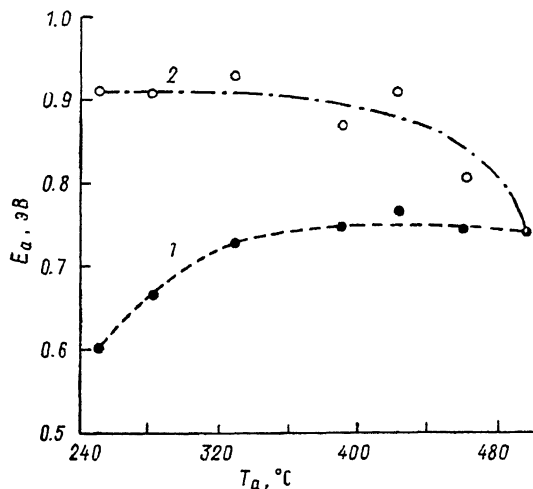
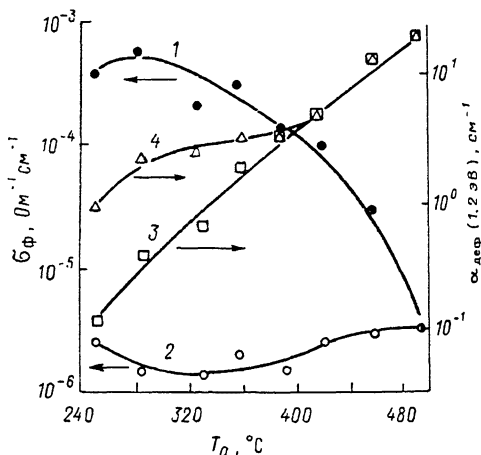


Рис. 1. Влияние температуры отжига  $T_a$  на энергию активации температурной зависимости темновой проводимости  $E_a$  образцов  $a\text{-Si} : \text{H}$  до (1) и после (2) их освещения в течение 160 мин белым светом интенсивностью  $100 \text{ мВт/см}^2$ .

в результате отжига приводила к уменьшению изменения  $E_a$  при эффекте Стеблера—Вронского. На рис. 2 показано влияние отжига  $a\text{-Si} : \text{H}$  на изменение  $\sigma_\phi$  и  $\alpha_{\text{деф}}$  (1.2 эВ) под действием длительного освещения. Как видно из рисунка, как высокотемпературный отжиг при  $T_a = 500^\circ\text{C}$ , так и оптическая деградация недегидрированного образца вызывают уменьшение  $\sigma_\phi$  в  $\sim 10^2$  раз. При этом в результате отжига  $\alpha_{\text{деф}}$  возрастает в  $\sim 10^2$  раз. В то же время при длительном освещении недегидрированного  $a\text{-Si} : \text{H}$  величина  $\alpha_{\text{деф}}$  увеличивается лишь в  $\sim 10$  раз. Из рис. 2 видно также, что дегидрогенизация уменьшает вызванное освещением изменение  $\sigma_\phi$  и  $\alpha_{\text{деф}}$ .<sup>1</sup> Отметим, что значения  $\sigma_\phi$  после длительного освещения образцов, имеющих различные исходные величины  $\sigma_\phi$ , близки друг к другу. Для  $a\text{-Si} : \text{H}$ , отожженного при  $T_a > 400^\circ\text{C}$ , изменение  $\alpha_{\text{деф}}$  после освещения не наблюдалось. В то же время величина  $\sigma_\phi$  для данных образцов существенно уменьшалась в результате освещения.

Рис. 2. Влияние температуры отжига  $T_a$  на величину фотопроводимости  $\sigma_\phi$  (1, 2) и поглощение в «дефектной» области  $\alpha_{\text{деф}}$  (3, 4) (1.2 эВ).

1, 3 — данные для образцов до освещения, 2, 4 — после их освещения в течение 160 мин светом интенсивностью  $100 \text{ мВт/см}^2$ .



Уменьшение при дегидрогенизации  $a\text{-Si} : \text{H}$  относительного увеличения  $\alpha_{\text{деф}}$  в результате освещения свидетельствует об уменьшении концентрации образующихся при освещении дефектов в дегидрированных образцах. Этот результат согласуется с данными работ [3, 4], в которых методом ЭПР исследовалось влияние отжига  $a\text{-Si} : \text{H}$  на увеличение в результате освещения концентрации спинов, соответствующих нейтрально заряженным оборванным связям. Проведенные в [8] исследования ЯМР в пленках  $a\text{-Si} : \text{H}$  показали, что увеличение  $T_a$  приводит к уменьшению концентрации водорода, содержащегося в  $a\text{-Si} : \text{H}$

<sup>1</sup> Заметим, что смещение положения уровня Ферми к середине щели подвижности при длительном освещении может привести к некоторому уменьшению изменения  $\alpha_{\text{деф}}$ , вызванного увеличением  $N$ .

в кластерной форме  $[\text{SiH}_2(\text{SiH}_2)_n]$ , комплексы  $\text{SiH}$ . Причем при  $T_a > 400^\circ\text{C}$ , согласно [8], водород содержится в  $a\text{-Si}:\text{H}$  в основном в связях  $\text{SiH}$ , равномерно распределенных по объему. Сопоставление этих данных с полученными нами результатами указывает на то, что определяющую роль в процессах образования дефектов в  $a\text{-Si}:\text{H}$  при освещении играет водород, содержащийся в слабо-связанной или кластерной форме.

Для образцов, дегидрированных при  $T_a < 400^\circ\text{C}$ , изменение  $\sigma_\phi$  после освещения существенно больше, чем изменение  $\alpha_{\text{деф}}$ . В [9] предполагалось, что это может быть связано с возникновением в  $a\text{-Si}:\text{H}$  при освещении помимо оборванных связей дефектов иной природы, не дающих вклад в  $\alpha_{\text{деф}}$ , но приводящих к смещению уровня Ферми и увеличению концентрации заряженных рекомбинационных центров. Как видно из рис. 2, для образцов, отожженных при  $T_a > 400^\circ\text{C}$ , не наблюдается изменение  $\alpha_{\text{деф}}$ , в то время как  $\sigma_\phi$  существенно уменьшается. Полученный результат можно также объяснить, если предположить наличие в  $a\text{-Si}:\text{H}$  оборванных связей, пространственно коррелированных либо друг с другом [10], либо с неконтролируемыми примесями [11] и имеющих отрицательную энергию корреляции. Естественно ожидать увеличения относительной концентрации коррелированных дефектов в дегидрированных образцах. Согласно [12], энергетические состояния таких  $D^-$ -центров расположены в нижней части щели подвижности, что приводит к вкладу оптических переходов с них в  $\alpha_{\text{деф}}$ . Согласно Адлеру [10], при захвате данными состояниями неравновесных носителей возможна их трансформация в состоянии оборванных связей с положительной энергией корреляции. Это в свою очередь вызывает смещение уровня Ферми к середине щели подвижности и изменение распределения плотности состояний в щели [10]. На возможность данного процесса указывают данные работ [13, 14]. В этом случае помимо уменьшения  $\sigma_\phi$  вследствие смещения уровня Ферми возможно уменьшение  $\sigma_\phi$  вследствие уменьшения концентрации  $D^-$ -центров, которые являются ловушками для неосновных носителей — дырок.

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что уменьшение  $\sigma_\phi$  при эффекте Стеблера—Вронского может вызываться помимо увеличения дефектов вследствие разрыва слабых связей иными процессами, в частности захватом неравновесных носителей состояниями пространственно коррелированных дефектов и происходящей при этом их трансформацией.

#### Список литературы

- [1] Staebler D. L., Wronski C. R. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 6. P. 3262—3268.
- [2] Dersch H., Stuke J., Beichler J. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. N 6. P. 456—458.
- [3] Ohsawa M., Nama T., Akasaka T., Ishimura T., Sakai H., Ischida S., Uchida Y. // Japan. J. Appl. Phys. Pt2. 1985. V. 24. N 10. P. L838—L840.
- [4] Ohsawa M., Nama T., Ishimura T., Akasaka T., Sakai H., Ishida S., Uchida Y. // J. Non-Cryst. Sol. 1985. V. 77-78. P. 401—405.
- [5] Biegelsen D. K., Street R. A., Tsai C. C., Knights J. C. // J. Non-Cryst. Sol. 1980. V. 35-36. P. 285—290.
- [6] Jackson W. B., Amer N. M. // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. N 8. P. 5559—5562.
- [7] Гордеев С. Н., Зарифьянц Ю. А., Казанский А. Г. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 182—184.
- [8] Kumeda M., Shimizu T. // Sol. St. Commun. 1986. V. 58. N 7. P. 455—456.
- [9] Казанский А. Г., Милчичевич Е. П. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 7. С. 1253—1257.
- [10] Adler D. // Solar Cells. 1983. V. 9. P. 133—150.
- [11] Okushi H., Migakawa M., Okuno T., Yamasaki S., Tokumaru Y., Tanaka K. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. V. 59-60. P. 437—440.
- [12] Nitta Y., Abe K., Hattory K., Okamoto H., Hamakawa Y. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 695—698.
- [13] Yamagishi H., Kida H., Kamada T., Tagliaferro A., Okamoto H., Hamakawa Y. // J. Non-Cryst. Sol. 1985. V. 77-78. P. 413—416.
- [14] Okushi H., Itoh M., Okuno T., Hosokawa Y., Yamasaki S., Tanaka K. // Int. Conf. Photo-induced Effects in Amorphous Semiconductors. Salt Lake City. USA, 1984.