

Влияние электронного облучения на оптические и фотоэлектрические свойства микрокристаллического гидрированного кремния

© А.Г. Казанский¹, П.А. Форш, К.Ю. Хабарова, М.В. Чукичев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

(Получена 10 января 2003 г. Принята к печати 21 января 2003 г.)

Исследовано влияние облучения электронами с энергией 40 кэВ на спектральную зависимость коэффициента поглощения, проводимость и фотопроводимость пленок $\mu\text{-Si:H}$. Обнаружено увеличение коэффициента поглощения в „дефектной области“ спектра ($h\nu < 1.2\text{ эВ}$) и уменьшение фотопроводимости пленок $\mu\text{-Si:H}$ после их облучения. Исходные параметры восстанавливаются после отжига пленок в течение 1 ч при температуре 180°C. Предположено, что наблюдаемые изменения связаны с образованием в пленках $\mu\text{-Si:H}$ в результате облучения электронами метастабильных дефектов типа оборванных связей на границах колонн микрокристаллов. Получена обратно пропорциональная зависимость между величиной фотопроводимости и концентрацией дефектов, возникающих под действием облучения пленок $\mu\text{-Si:H}$ электронами.

В последние годы микрокристаллический гидрированный кремний ($\mu\text{-Si:H}$) рассматривается в качестве материала, альтернативного аморфному гидрированному кремнию ($a\text{-Si:H}$), который широко используется для создания различных оптоэлектронных приборов, в частности солнечных батарей. В значительной степени это связано с тем, что в отличие от $a\text{-Si:H}$ пленки $\mu\text{-Si:H}$ не изменяют своих свойств под влиянием длительного освещения.

Исследование влияния облучения быстрыми электронами на свойства пленок $\mu\text{-Si:H}$ представляет интерес для определения эффективности функционирования приборов на основе данного материала в условиях воздействия на него высокоэнергетичных частиц (электронов, протонов). Данные исследования позволяют также получить информацию о влиянии возникающих под действием облучения, в частности, электронами дефектов на фотоэлектрические и оптические свойства материала. Согласно [1], порог образования дефектов при облучении кристаллического кремния быстрыми электронами (сотни кэВ) существенно выше, чем при облучении $a\text{-Si:H}$ (единицы кэВ). Влияние облучения высокоэнергетичными электронами с энергией 1 МэВ на параметры пленок $\mu\text{-Si:H}$ исследовалось в работах [2,3]. Авторы [2,3] наблюдали увеличение коэффициента поглощения в области энергий квантов $h\nu = (0.8-1.2)\text{ эВ}$ и уменьшение фотопроводимости вследствие увеличения концентрации дефектов в материале. В то же время пленки $\mu\text{-Si:H}$ имеют сложную структуру, состоящую из кристаллической и аморфной фаз, а также содержат значительную концентрацию атомов водорода. Поэтому представляется интересным исследовать влияние на оптические и фотоэлектрические свойства пленок $\mu\text{-Si:H}$ облучения их электронами, энергии которых (десятки кэВ) заведомо ниже порога образования дефектов в кристаллическом кремнии. Данные исследования были проведены в настоящей работе.

Исследования проводились на пленках $\mu\text{-Si:H}$ толщиной $\approx 1\text{ мкм}$, полученных методом химического осаждения из плазмы, возбуждаемой в условиях циклотронного резонанса (ECRCVD) [4]. Температура подложки (кварц) составляла 325°C. На поверхности пленки напылялись магниевые контакты. Темновая проводимость (σ_d) полученных пленок при комнатной температуре составляла $8 \cdot 10^{-7}\text{ Ом}^{-1}\text{ см}^{-1}$. Облучение пленок потоком электронов с энергией 40 кэВ и плотностью $3 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}\text{ с}^{-1}$ проводилось при комнатной температуре. Полная доза облучения составляла $3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$. Фотопроводимость ($\Delta\sigma_{ph}$) измерялась при освещении пленок квантами света с энергией $h\nu = 1.8\text{ эВ}$ и интенсивностью $6 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}\text{ с}^{-1}$. Все измерения проводились в вакууме 10^{-3} Па .

На рис. 1 показаны спектральные зависимости относительного коэффициента поглощения, $\alpha_{c_{pm}}(h\nu)/\alpha_{c_{pm}}(1.8\text{ эВ})$, полученные методом постоянного фототока, для пленки $\mu\text{-Si:H}$ до ее облучения электронами (кривая 1) и после облучения (кривая 2). Полученные спектральные зависимости характерны для $\mu\text{-Si:H}$ с большой долей кристаллической фазы ($> 70\%$) [5,6]. Как видно из рисунка, облучение $\mu\text{-Si:H}$ электронами с энергией 40 кэВ значительно увеличивает коэффициент поглощения $\mu\text{-Si:H}$ в области „хвоста“ поглощения ($h\nu < 1.2\text{ эВ}$). Согласно [6,7], поглощение в данной области энергий квантов определяется состояниями дефектов в $\mu\text{-Si:H}$. Соответственно полученный результат указывает на увеличение концентрации дефектов в результате облучения $\mu\text{-Si:H}$ электронами с энергией 40 кэВ. Наши измерения показали, что повышение температуры облученных образцов приводит к уменьшению поглощения в „дефектной области“ спектра и соответственно к отжигу дефектов, вызванных электронным облучением $\mu\text{-Si:H}$. В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны спектральные зависимости $\alpha_{c_{pm}}(h\nu)/\alpha_{c_{pm}}(1.8\text{ эВ})$, измеренные при комнатной температуре, для облученной пленки после ее отжига

¹ E-mail: kazanski@phys.msu.ru

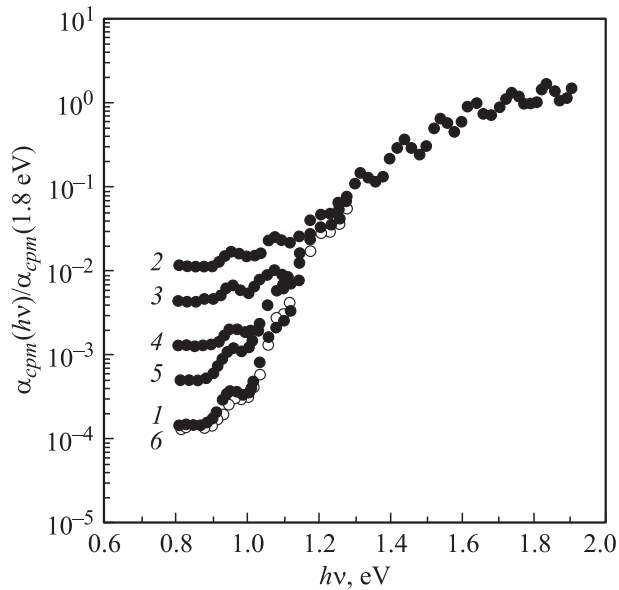


Рис. 1. Спектральные зависимости относительного коэффициента поглощения ($\alpha_{cpm}(h\nu)/\alpha_{cpm}(1.8 \text{ эВ})$) пленок $\mu\text{c-Si:H}$ до их облучения (1), после облучения (2), после облучения и отжига при температурах 110°C (3), 165°C (4) и 180°C (5) в течение 5 мин, а также при температуре 180°C (6) в течение 1 ч.

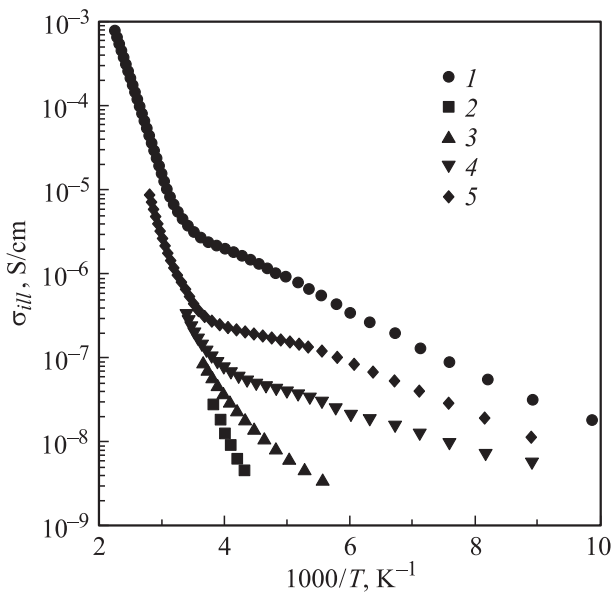


Рис. 2. Температурные зависимости полной проводимости при освещении ($\sigma_{ill} = \sigma_d + \Delta\sigma_{ph}$) пленок $\mu\text{c-Si:H}$ до их облучения (1), после облучения (2), после облучения и отжига при температурах 110°C (3), 165°C (4) и 180°C (5) в течение 5 мин.

в течение 5 мин при различных температурах. Полностью исходное значение поглощения в области энергий квантов, меньших 1.2 эВ , восстанавливается после отжига облученной пленки при температуре 180°C в течение 1 ч (кривая б).

На рис. 2 показаны температурные зависимости полной проводимости пленки при ее освещении ($\sigma_{ill} = \Delta\sigma_{ph} + \sigma_d$), измеренные до облучения пленки электронами, после облучения электронами, а также для облученной пленки после ее отжига в течение 5 мин при различных температурах. Как видно из рисунка, в результате электронного облучения величина σ_{ill} уменьшается. Отжиг облученной пленки приводит к возрастанию σ_{ill} . Измерения, проведенные при комнатной температуре, показали, что электронное облучение практически не изменяло темновой проводимости σ_d и уменьшало величину фотопроводимости $\Delta\sigma_{ph}$ почти на 2 порядка. Значение $\Delta\sigma_{ph}$ восстанавливалось после отжига облученной пленки при температуре 180°C в течение 1 ч.

Представленные результаты показывают, что облучение $\mu\text{c-Si:H}$ электронами с энергией 40 кэВ приводит к образованию метастабильных дефектов в материале. Причем отжиг возникших в результате облучения дефектов начинается при сравнительно низких температурах. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показано влияние температуры отжига (5 мин) облученных пленок на относительное изменение фотопроводимости $\Delta\sigma_{ph}/\Delta\sigma_{ph}^A$ и коэффициента поглощения в „дефектной области“ $\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})/\alpha_{cpm}^A(0.8 \text{ эВ})$. Здесь значения $\Delta\sigma_{ph}$ и $\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})$ соответствуют данным для необлученной пленки $\mu\text{c-Si:H}$. Исходные значения $\Delta\sigma_{ph}$ и $\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})$ восстанавливаются после отжига облученной пленки при 180°C в течение 1 ч. Заметим, что представленная на рис. 3 зависимость коэффициента поглощения в дефектной области спектра от температуры отжига для облученной пленки $\mu\text{c-Si:H}$ близка к аналогичной зависимости для концентрации дефектов, созданных облучением электронами, в пленках $a\text{-Si:H}$ [8]. Это указывает на одинаковый механизм возникновения и отжига

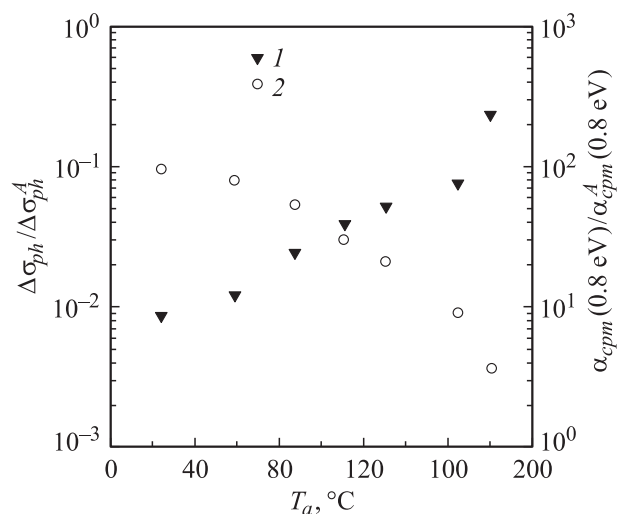


Рис. 3. Относительные зависимости фотопроводимости ($\Delta\sigma_{ph}/\Delta\sigma_{ph}^A$) (1) и коэффициента поглощения ($\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})/\alpha_{cpm}^A(0.8 \text{ эВ})$) (2) облученных пленок $\mu\text{c-Si:H}$ от температуры их отжига в течение 5 мин.

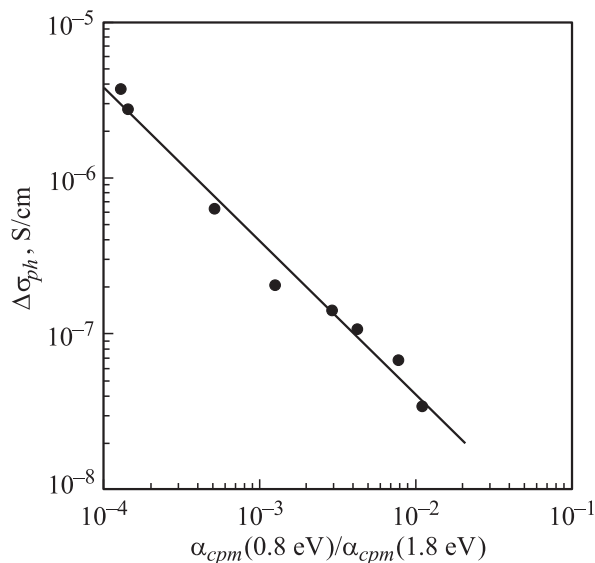


Рис. 4. Зависимость фотопроводимости ($\Delta\sigma_{ph}$) пленки $\mu\text{c-Si:H}$ при комнатной температуре от величины относительного коэффициента поглощения в „дефектной области“ спектра ($\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})/\alpha_{cpm}(1.8 \text{ эВ})$).

метастабильных дефектов, возникающих при облучении электронами пленок $\mu\text{c-Si:H}$ и $a\text{-Si:H}$.

Как видно из рис. 3, с ростом температуры отжига коэффициент поглощения в дефектной области и соответственно концентрация дефектов уменьшаются. В то же время величина фотопроводимости возрастает. Корреляция изменения фотопроводимости и коэффициента поглощения в дефектной области представлена на рис. 4. Как видно, зависимость $\Delta\sigma_{ph}$ от $\alpha_{cpm}(0.8 \text{ эВ})/\alpha_{cpm}(1.8 \text{ эВ})$ близка к обратной пропорциональной (показана на рис. 4 сплошной линией). Этот результат свидетельствует о том, что возникающие при электронном облучении дефекты являются основными центрами рекомбинации неравновесных носителей и определяют величину фотопроводимости $\mu\text{c-Si:H}$ при комнатной температуре.

Рассмотрим возможную природу возникающих при электронном облучении $\mu\text{c-Si:H}$ дефектов и возможные механизмы их образования. Известно [9], что структура $\mu\text{c-Si:H}$ сформирована из микрокристаллов, имеющих размеры от единиц до десятков нанометров, которые объединены в колонны, расположенные перпендикулярно поверхности подложки, с диаметром от десятков до сотен нанометров. На границах колонн возможно наличие аморфной фазы, а также пор. По мнению авторов [10,11], основными дефектами в $\mu\text{c-Si:H}$ являются оборванные связи кремния, основная часть которых расположена на границах колонн. Предполагается [12], что состояния этих дефектов дают вклад в поглощение $\mu\text{c-Si:H}$ при $h\nu < 1.2 \text{ эВ}$. Таким образом, наблюдаемое нами увеличение поглощения в дефектной области спектра (см. рис. 1) указывает на увеличение концентрации оборванных связей в результате облучения $\mu\text{c-Si:H}$ электронами с энергией 40 кэВ. При этом полученная

нами зависимость фотопроводимости от величины коэффициента поглощения в дефектной области (см. рис. 4) подтверждает высказанное в работах [13,14] предположение о том, что в $\mu\text{c-Si:H}$ рекомбинация неравновесных носителей при комнатной температуре происходит через локализованные состояния оборванных связей на границах колонн.

Можно предположить, что одним из основных механизмов образования дефектов в $\mu\text{c-Si:H}$ при облучении его электронами с энергией в десятки кэВ, как и в случае $a\text{-Si:H}$ является разрыв связей между атомами водорода и кремния [8]. По мнению авторов [15], основная концентрация водорода, пассивирующего оборванные связи в $\mu\text{c-Si:H}$, расположена на границах колонн. Поэтому разрыв кремний-водородных связей должен привести к увеличению концентрации оборванных связей на границах колонн и соответственно к увеличению поглощения в дефектной области спектра и уменьшению фотопроводимости.

Таким образом, проведенные исследования показали, что, хотя в $\mu\text{c-Si:H}$ в отличие от $a\text{-Si:H}$ не наблюдаются фотоиндуцированные изменения свойств, облучение $\mu\text{c-Si:H}$ низкоэнергетичными электронами с энергией в десятки кэВ приводит, как и в случае $a\text{-Si:H}$, к возникновению метастабильных дефектов, влияющих на оптические и фотоэлектрические параметры материала.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. В. Фусу и д-ру М. Биркхольцу за предоставление для исследований пленок $\mu\text{c-Si:H}$.

Список литературы

- [1] H. Shade, J.I. Pankove. J. de Phys., C-4, Suppl. 10, **42**, C4-327 (1981).
- [2] W. Bronner, M. Mehring, R. Bruggemann. Phys. Rev. B, **65**, 165212-1 (2002).
- [3] R. Bruggemann, W. Bronner, M. Mehring. Sol. St. Commun., **119**, 23 (2001).
- [4] I. Beckers, N.H. Nickel, W. Pilz, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227**, 847 (1998).
- [5] D. Han, D. Yue, J.D. Lorentzen, J. Lin, H. Habuchi, Q. Wang, J. Appl. Phys., **87**, 1882 (2000).
- [6] N. Beck, J. Meier, J. Fric, Z. Remes, A. Poruba, R. Fluckiger, J. Pohl, A. Shah, M. Vanecek. J. Non-Cryst. Sol., **198-200**, 903 (1996).
- [7] N. Beck, P. Torres, J. Fric, Z. Remes, A. Poruba, H.A. Stuchlicova, A. Fejfar, N. Wyrsh, M. Vanecek, J. Kocka, A. Shah. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **452**, 761 (1997).
- [8] M. Stutzmann. In: *Amorphous and microcrystalline semiconductor devices, v. II: Material and device physics*, ed. by J. Kanicki (Artech House Boston, London, 1991) p. 129.
- [9] D. Ruff, H. Mell, L. Toth, I. Sieber, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227**, 1011 (1998).
- [10] K. Lips, P. Kanschak, D. Will, C. Lerner, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227**, 1021 (1998).
- [11] F. Finger, J. Muller, C. Malten, R. Carius, H. Wagner. J. Non-Cryst. Sol., **266**, 511 (2000).

- [12] A. Poruba, M. Vanecek, J. Meier, A. Shah. *J. Non-Cryst. Sol.*, **299–302**, 536 (2002).
- [13] А.Г. Казанский, Х. Мелл, Е.И. Теруков, П.А. Форш. *ФТП*, **36**, 41 (2002).
- [14] К.В. Коугия, Е.И. Теруков. *ФТП*, **36**, 41 (2002).
- [15] K. Tanaka. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **452**, 3 (1997).

Редактор Л.В. Беляков

The influence of electron irradiation on optical and photoelectrical properties of microcrystalline hydrogenated silicon

A.G. Kazanskii, P.A. Forsh, K.Y. Khabarova, M.V. Chukichev

Department of Physics, M.V. Lomonosov
Moscow State University,
119992 Moscow, Russia

Abstract The influence of electron irradiation with 40 keV electrons on absorption coefficient spectral dependence, conductivity and photoconductivity of μc -Si:H films is investigated. The increase of absorption coefficient in the subgap region ($h\nu < 1.2$ eV) and reduction of photoconductivity of μc -Si:H films after electron irradiation are revealed. Initial parameters are restored after annealing of films within 1 hour at 180°C temperature. It is assumed that observed parameter changes take place due to creation of metastable defects on microcrystals column boundaries in μc -Si:H films induced by the electron irradiation. Inversely proportional dependence of photoconductivity value on concentration of the defects induced by electron irradiation of μc -Si:H films is obtained.