

Поглощение и фотопроводимость в компенсированном бором $\mu\text{c-Si} : \text{H}$

© А.Г. Казанский[†], Х. Мелл^{*}, Е.И. Теруков[†], П.А. Форш

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

*Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Physik,
D-35032, Marburg, Germany

[†]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 12 июля 1999 г. Принята к печати 4 октября 1999 г.)

Исследованы поглощение, проводимость и фотопроводимость фоточувствительного слабо легированного бором $\mu\text{c-Si} : \text{H}$. Зависимости фотопроводимости от температуры и интенсивности света измерены в области температур $100 \div 400 \text{ K}$ для различных энергий квантов (0.9, 1.3 и 1.8 эВ). Полученные результаты объясняются определяющим вкладом микрокристаллической фазы и состояний на границах раздела микрокристаллов в перенос и рекомбинацию неравновесных носителей в $\mu\text{c-Si} : \text{H}$. Рассмотрены возможные механизмы рекомбинации и изменение их роли с температурой.

В последние годы микрокристаллический гидрированный кремний ($\mu\text{c-Si} : \text{H}$) привлекает к себе внимание исследователей в связи с перспективами его использования при создании тонкопленочных солнечных батарей, фотосенсоров и тонкопленочных транзисторов. Обладая достаточно высокой по сравнению с аморфным гидрированным кремнием ($a\text{-Si} : \text{H}$) проводимостью, $\mu\text{c-Si} : \text{H}$, согласно имеющимся данным [1], не изменяет своих свойств под действием длительного освещения. В отличие от поликристаллических материалов, в которых размеры кристаллов составляют сотни нанометров, $\mu\text{c-Si} : \text{H}$ в общем случае состоит из аморфной и кристаллической фаз, причем их соотношение и размеры кристаллов от единиц до десятков нанометров зависят от условий получения.

В настоящее время достаточно подробно исследовано влияние условий получения на структуру [2], проводимость (σ_d) [3–7] и край оптического поглощения [8–10] пленок $\mu\text{c-Si} : \text{H}$. В то же время фотопроводимость ($\Delta\sigma_{\text{ph}}$) и определяющие ее величину процессы изучены в значительно меньшей степени [1,5,11]. По-видимому, это связано с тем, что нелегированные пленки $\mu\text{c-Si} : \text{H}$ обладают достаточно высокой проводимостью n -типа ($10^{-4} \div 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и малой фоточувствительностью ($\Delta\sigma_{\text{ph}}/\sigma_d$) [5]. Согласно [12], высокая проводимость нелегированного $\mu\text{c-Si} : \text{H}$ связана с кислородом, неконтролируемо входящим в пленки в процессе их получения.

Введение в $\mu\text{c-Si} : \text{H}$ относительно малых концентраций бора ($10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) существенно (на 4–5 порядков) уменьшает проводимость пленок [1,5,6]. Такие "компенсированные" пленки имеют достаточно высокую фоточувствительность, что позволяет использовать их для изучения процессов, определяющих фотопроводимость $\mu\text{c-Si} : \text{H}$.

В настоящей работе исследованы поглощение, проводимость и фотопроводимость $\mu\text{c-Si} : \text{H}$, слабо легированного бором. Пленки (полученные в Марбургском университете) толщиной $0.6 \div 0.7 \text{ мкм}$ осаждались на кварце при разложении в тлеющем разряде моносилана (SiH_4), сильно разбавленного водородом (содержание SiH_4 в газовой смеси составляло 1.5%). Легирование бором осуществлялось введением диборана (B_2H_6) в реакционную камеру — $[\text{B}_2\text{H}_6] / [\text{SiH}_4] = 4 \cdot 10^{-6}$. Температура подложки в процессе осаждения пленки составляла 220°C . Контакты напылялись на поверхность пленки. Перед измерениями образцы отжигались в течение 30 мин при температуре 180°C . Отжиг и измерения проводились в вакууме при остаточном давлении 10^{-3} Па .

По данным сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии пленки имеют колоннообразную структуру, направленную перпендикулярно поверхности подложки, с диаметром колонн $30 \div 100 \text{ нм}$, содержащих кристаллы размерами от 3 до 30 нм. Анализ спектров рамановского рассеяния показал, что вклад кристаллической компоненты в спектре исследованных пленок составляет 85% полной площади пика. Согласно данным термоэдс пленки обладают проводимостью p -типа.

Спектральная зависимость относительного коэффициента поглощения, $\alpha_{\text{срм}}/\alpha_{\text{срм}}(1.8 \text{ эВ})$, измеренная методом постоянного фототока, показана на рис. 1 (кривая 1). На вставке рис. 1 данная спектральная зависимость представлена в координатах $\alpha_{\text{срм}}^{1/2}(h\nu)$. Как видно из рисунка, в пределах точности, определяемой влиянием интерференции на измеряемые спектры, изменение $\alpha_{\text{срм}}(h\nu)$ в области энергий фотонов $h\nu > 1.2 \text{ эВ}$ хорошо описывается квадратичной зависимостью, характерной для непрямых оптических переходов с участием фононов в $c\text{-Si}$. Экстраполяция зависимости, полученной в области $h\nu > 1.2 \text{ эВ}$, к нулю дает значение $E_0 = 1.12 \text{ эВ}$, что близко к величине ширины запрещенной зоны $c\text{-Si}$. По-

[†] Факс: (095) 939 37 31

E-mail: Kazanski@sccon279.phys.msu.su

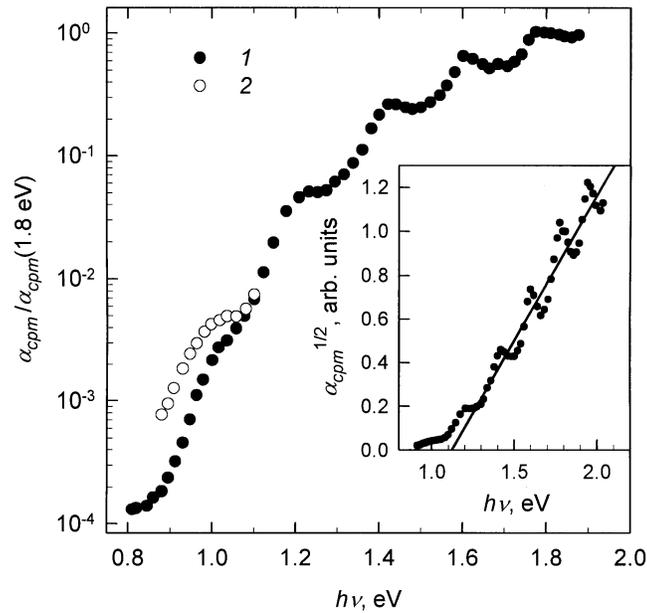


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения $\mu\text{c-Si:H}$ в относительных единицах $\alpha_{\text{срм}}/\alpha_{\text{срм}}(1.8 \text{ эВ})$, измеренная методом постоянного фототока без подсветки (1) и в условиях фоновой подсветки с энергией фотона $h\nu = 1.8 \text{ эВ}$, интенсивностью $I = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (2). На вставке — спектральная зависимость в координатах $\alpha_{\text{срм}}^{1/2}(h\nu)$.

лученный результат указывает на то, что основной вклад в поглощение, измеренное методом постоянного фототока, дает кристаллическая фаза исследованного $\mu\text{c-Si:H}$.

Из рис. 1 видно, что в области $h\nu < 1.1 \text{ эВ}$ наблюдается "хвост" оптического поглощения. Проведенные нами измерения спектров $\alpha_{\text{срм}}$ в условиях фоновой подсветки с энергией кванта 1.8 эВ показали, что фоновая подсветка приводит к увеличению поглощения в области хвоста (кривая 2). Это может быть связано с увеличением заполнения локализованных состояний, определяющих поглощение при $h\nu < 1.1 \text{ эВ}$. По мнению авторов [9], данными состояниями могут быть состояния дефектов на границе раздела микрокристаллов.

На рис. 2 показана температурная зависимость темновой проводимости исследованного $\mu\text{c-Si:H}$. В области температур $T = 220 \div 450 \text{ К}$ зависимость $\sigma_d(T)$ имеет активационный характер с энергией активации $E_a = 0.43 \text{ эВ}$. На этом же рисунке представлены температурные зависимости фотопроводимости, измеренные при энергиях квантов $h\nu = 1.8, 1.3$ и 0.9 эВ . Как видно из рисунка, для всех использованных значений $h\nu$ характер изменения $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ с температурой один и тот же. В области температур $T < 200 \text{ К}$ $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ возрастает с температурой по закону, близкому к экспоненциальному, с энергией активации $0.12 \div 0.13 \text{ эВ}$. При дальнейшем увеличении температуры рост $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ ослабляется, и в области температур, при которых $\Delta\sigma_{\text{ph}} \leq \sigma_d$, величина

$\Delta\sigma_{\text{ph}}$ уменьшается с ростом температуры. Изменение интенсивности падающего излучения не приводило к существенному изменению характера температурной зависимости $\Delta\sigma_{\text{ph}}$, в частности энергии активации.

Исследование люкс-амперных характеристик фотопроводимости показало, что характер изменения $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ с интенсивностью света (I) описывается выражением $\Delta\sigma_{\text{ph}} \sim I^\gamma$, определяется величиной фотопроводимости и не зависит от энергии падающего кванта. На рис. 2 показано влияние температуры на параметр γ при возбуждении исследованной пленки светом с энергией кванта 1.8 эВ в области интенсивностей $I = 6 \cdot 10^{13} \div 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Обращает на себя внимание тот факт, что при $T < 200 \text{ К}$ $\gamma < 0.5$.

Рассмотрим полученные результаты. Интерпретация явлений переноса носителей в $\mu\text{c-Si:H}$ зависит от структуры материала, в частности от долей аморфной и кристаллической фаз в его составе. Если микрокристаллы в $\mu\text{c-Si:H}$ разделены $a\text{-Si:H}$, то, по мнению авторов [1], энергия активации σ_d в компенсированных бором пленках $\mu\text{c-Si:H}$ должна определяться величиной барьера в валентной зоне на границе перехода $c\text{-Si}/a\text{-Si:H}$. Данные рамановской спектроскопии и спектры поглощения, полученные методом постоянного фототока, позволяют предположить, что в исследованном нами $\mu\text{c-Si:H}$ перенос носителей происходит в основном по микрокристаллам. В этом случае, по-видимому, можно использовать барьерную модель [3], согласно которой захват носителей на состояния на границах раздела должен приводить к возникновению потенциальных барьеров на границах раздела. Поскольку концентрация носителей, необходимых для формирования барьеров в

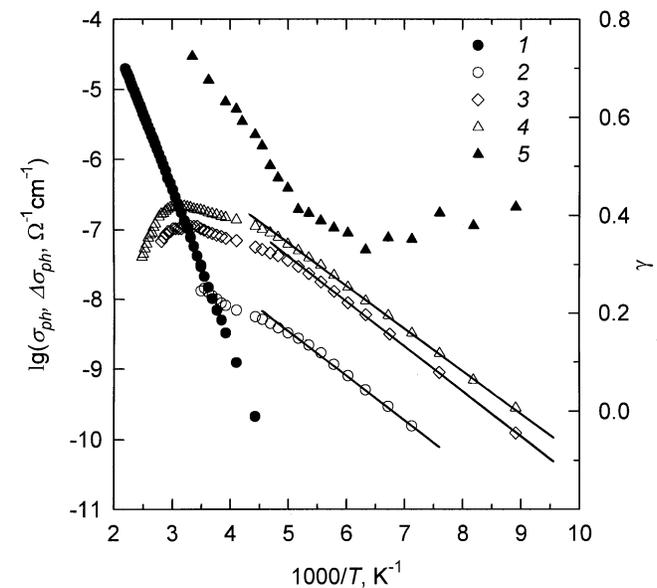


Рис. 2. Температурные зависимости проводимости (1), фотопроводимости (2–4) при возбуждении квантами с энергией 0.9 (2), 1.3 (3), 1.8 эВ (4) и параметра γ люкс-амперной характеристики для $h\nu = 1.8 \text{ эВ}$ (5).

исследованном $\mu\text{c-Si:H}$, много меньше концентрации микрокристаллов (10^{18} см^{-3} при размерах 10 нм), можно предположить, что барьеры возникают, например, на границах колонн [7]. В то же время, состояния на границах микрокристаллов могут формировать локализованные состояния в запрещенной зоне микрокристаллов внутри колонн, которые определяют наблюдаемое поглощение в области $h\nu < 1.1 \text{ эВ}$. Таким образом, значение $E_a = 0.43 \text{ эВ}$ в исследованном $\mu\text{c-Si:H}$ может определяться положением уровня Ферми относительно края валентной зоны в микрокристалле и величиной барьера, определяющей активацию подвижности носителей, которая в нелегированном $\mu\text{c-Si:H}$ составляет $0.05 \div 0.1 \text{ эВ}$ [3,7].

Как видно из рис. 2, форма температурной зависимости $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ не изменяется при изменении $h\nu$ от 0.9 до 1.8 эВ. По-видимому, это связано с тем, что процессы генерации, переноса и рекомбинации неравновесных носителей в исследованном $\mu\text{c-Si:H}$ определяются микрокристаллической фазой. Изменение характера зависимости $\Delta\sigma_{\text{ph}}(T)$ при $T = 200 \div 220 \text{ К}$, по нашему мнению, указывает на изменение при этих температурах процессов, определяющих рекомбинацию неравновесных носителей. На это же указывает температурная зависимость параметра γ , представленная на рис. 2. При $T < 200 \text{ К}$ $\gamma = 0.3 \div 0.4$ и слабо изменяется с температурой. В то же время, при $T > 200 \text{ К}$ наблюдается увеличение параметра γ . Отсутствие в настоящее время данных о процессах рекомбинации в $\mu\text{c-Si:H}$ не позволяет дать однозначной интерпретации. Можно предположить, что при $T = 200 \div 220 \text{ К}$ изменяется вклад различных областей материала и соответственно различных состояний в рекомбинацию неравновесных носителей. Такими областями могут быть, например, микрокристаллические области внутри колонн и области потенциальных барьеров на границе колонн. Во втором случае время жизни должно активационно уменьшаться с температурой. Если в области низких температур ($T < 200 \text{ К}$) рекомбинация неравновесных носителей имеет туннельный характер и, соответственно, не зависит от температуры, наблюдаемая энергия активации, проявляющаяся в зависимости $\Delta\sigma_{\text{ph}}(T)$, может определяться активационной зависимостью подвижности неравновесных носителей, связанной с наличием потенциальных барьеров. Возможное увеличение с ростом температуры вклада в рекомбинацию состояний в области потенциальных барьеров может ослабить температурную зависимость $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ в области высоких температур. Заметим, наконец, что возможное наличие потенциального рельефа внутри колонн $\mu\text{c-Si:H}$ и его изменение под действием температуры и освещения также могут оказывать влияние на процессы переноса и рекомбинации неравновесных носителей в исследованном $\mu\text{c-Si:H}$.

Работа выполнена в рамках проекта INTAS-97-1910.

Список литературы

- [1] M.J. Williams, C. Wang, G. Lucovsky. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **219**, 389 (1991).
- [2] I. Beckers, N.H. Nickel, W. Pilz, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 847 (1998).
- [3] P.G. LeComber, G. Willeke, W.E. Spear. J. Non-Cryst. Sol., **59&60**, 795 (1983).
- [4] G. Lucovsky, C. Wang. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **219**, 377 (1991).
- [5] R. Fluckiger, J. Meier, M. Goetz, A. Shah. J. Appl. Phys., **77**, 712 (1995).
- [6] M. Bruggemann, A. Hierzenberger, P. Reining, M. Rojahn, M.B. Schubert, S. Schweizer, H.N. Wanka, I. Zrinscak. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 982 (1998).
- [7] D. Ruff, H. Mell, L. Toth, I. Sieber, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 1011 (1998).
- [8] F. Siebke, S. Yata, Y. Hishikawa, M. Tanaka. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 977 (1998).
- [9] 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).
- [10] M. Vanecek, A. Poruba, Z. Remes, N. Beck, M. Nesladek. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 967 (1998).
- [11] H.N. Liu, Y.L. He, F. Wang, S. Crebner. J. Non-Cryst. Sol., **164–166**, 1005 (1993).
- [12] P. Torres, J. Meier, R. Fluckiger, J.A. Selvan, H. Keppner, A. Shah, S.D. Littlewood, I.E. Kelly, I. Giannoules. Appl. Phys. Lett., **69**, 1373 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Absorption and photoconductivity in a boron compensated $\mu\text{c-Si:H}$

A.G. Kazanskii, H. Mell*, E.I. Terukov†, P.A. Forsh

M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

*Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Physik,
D-35032, Marburg, Germany

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

Abstract Absorption, conductivity and photoconductivity of photosensitive lightly boron doped $\mu\text{c-Si:H}$ are studied. The dependencies of photoconductivity on temperature and the light intensity are measured in the temperature range 100–400 K for different photon energies (0.9, 1.3 and 1.8 eV). The results obtained are attributed to the significant contribution of a microcrystalline phase and that of the states at grain boundaries into the transport and recombination of nonequilibrium carriers in $\mu\text{c-Si:H}$. Possible mechanisms of recombination and the role of the temperature are considered.