

## Влияние температуры на фотопроводимость и кинетику ее спада в микрокристаллическом кремнии

© А.Г. Казанский, Х. Мелл\*, Е.И. Торуков†, 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 26 января 2001 г. Принята к печати 31 января 2001 г.)

Исследовано влияние температуры на стационарную фотопроводимость и релаксацию фотопроводимости после прекращения освещения в пленках слабо легированного бором микрокристаллического гидрированного кремния. Измерения проводились в области температур 150–430 К при облучении пленок квантами света с энергией 1.4 эВ. Из измерений стационарной фотопроводимости и ее релаксации получены температурные зависимости времени фотоответа и дрейфовой подвижности носителей в микрокристаллическом кремнии. Рассмотрены возможные механизмы переноса и рекомбинации носителей, определяющие изменение с температурой указанных параметров.

Отсутствие деградации параметров пленок микрокристаллического гидрированного кремния ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) при их освещении, а также большая подвижность носителей тока в  $\mu\text{c-Si:H}$  по сравнению с подвижностью носителей в пленках аморфного гидрированного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ) определяют перспективность использования  $\mu\text{c-Si:H}$  в тонкопленочных приборах электроники и оптоэлектроники [1]. В то же время механизмы переноса носителей тока и механизмы рекомбинации неравновесных носителей в этом материале изучены в значительно меньшей степени, чем в  $a\text{-Si:H}$  [2–6]. С одной стороны, по-видимому, это связано с тем, что нелегированные пленки  $\mu\text{c-Si:H}$ , получаемые стандартным методом плазмо-химического осаждения из газовой фазы (методом PECVD), имеют малую фоточувствительность [7]. Это затрудняет использование фотоэлектрических методик для получения информации о переносе и рекомбинации носителей в  $\mu\text{c-Si:H}$ . С другой стороны, интерпретация результатов затрудняется сложной структурой  $\mu\text{c-Si:H}$ , сформированной из аморфной фазы, пор и микрокристаллической фазы, состоящей из микрокристаллов кремния размерами от единиц до десятков нанометров [1].

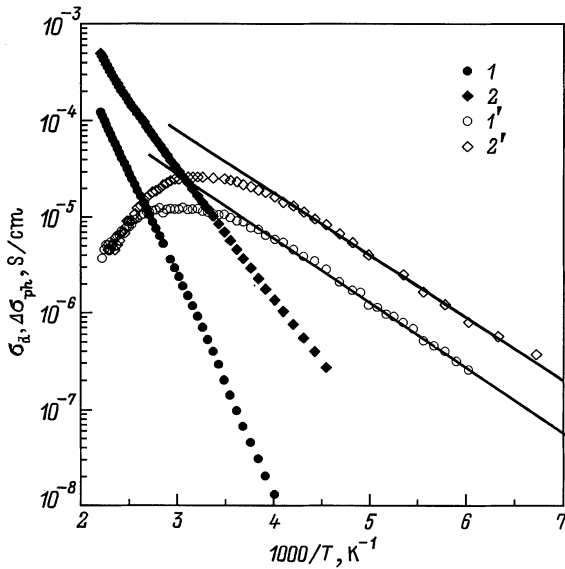
Введение в  $\mu\text{c-Si:H}$  относительно малых концентраций бора ( $10^{17}–10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) компенсирует влияние неконтролируемо вводимого в пленки (при использовании метода PECVD) кислорода [8] и существенно (на 4–5 порядков) уменьшает их проводимость [2,7]. Такие слабо легированные бором пленки имеют достаточно высокую фоточувствительность [2,7], что позволяет измерять их фотоэлектрические характеристики для изучения процессов переноса и рекомбинации носителей в  $\mu\text{c-Si:H}$ .

В настоящей работе исследовано влияние температуры в области 150–430 К на стационарную фотопроводимость и ее релаксацию после прекращения освещения в пленках  $\mu\text{c-Si:H}$ , слабо легированных бором. Пленки  $\mu\text{c-Si:H}$ , толщиной 0.6–0.7 мкм, осаждались на кварцевой

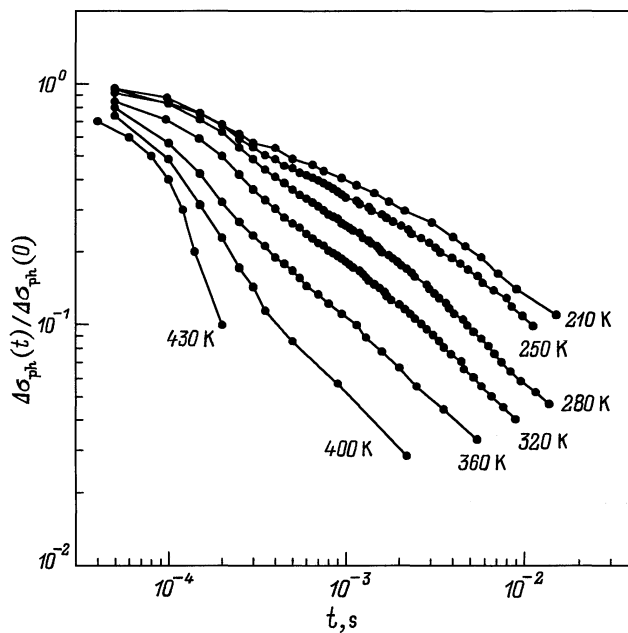
подложке при температуре 220°C в стандартном реакторе PECVD (Марбургский университет) при разложении в тлеющем разряде силаново-водородной смеси, содержащей 1.5% моносилана ( $\text{SiH}_4$ ). Легирование бором осуществлялось введением диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) в реакционную камеру. Объемное отношение газов ( $[\text{B}_2\text{H}_6]/[\text{SiH}_4]$ ) составляло  $4 \cdot 10^{-6}$  (образец 1) и  $5 \cdot 10^{-6}$  (образец 2). На поверхность пленки напылялись магниевые контакты. Измерения проводились в вакууме  $10^{-3}$  Па. Перед измерениями пленки отжигались в течение 30 мин в вакууме при температуре 180°C. Фотопроводимость и ее релаксация измерялись при освещении пленок излучением инфракрасных светодиодов с энергией квантов  $h\nu = 1.4 \text{ эВ}$  и интенсивностью  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Релаксация фотопроводимости регистрировалась с помощью цифрового запоминающего осциллографа.

По данным электронной микроскопии, пленки имели колоннообразную структуру перпендикулярно поверхности подложки, с диаметром колонн 30–100 нм, содержащих кристаллы размерами от 3 до 30 нм [3]. Согласно данным термоэдс, пленки обладали проводимостью  $p$ -типа.

На рис. 1 показаны температурные зависимости темновой проводимости ( $\sigma_d$ ) и стационарной фотопроводимости ( $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ ) исследованных пленок  $\mu\text{c-Si:H}$ . В области температур 220–450 К зависимости  $\sigma_d(T)$  имеют активационный характер с энергией активации  $E_a = 0.43$  (образец 1) и 0.27 эВ (образец 2). Увеличение уровня легирования приводит к возрастанию проводимости и уменьшению величины  $E_a$ . Как видно из рисунка, величина  $\Delta\sigma_{\text{ph}}$  в области  $T < 250 \text{ К}$  возрастает с температурой по закону, близкому к экспоненциальному, с энергией активации 0.13–0.14 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.



**Рис. 1.** Температурные зависимости проводимости  $\sigma_d$  (1, 2) и стационарной фотопроводимости  $\Delta\sigma_{ph}$  (1', 2') пленок  $\mu c$ -Si:H. Номера кривых соответствуют номерам исследованных образцов.

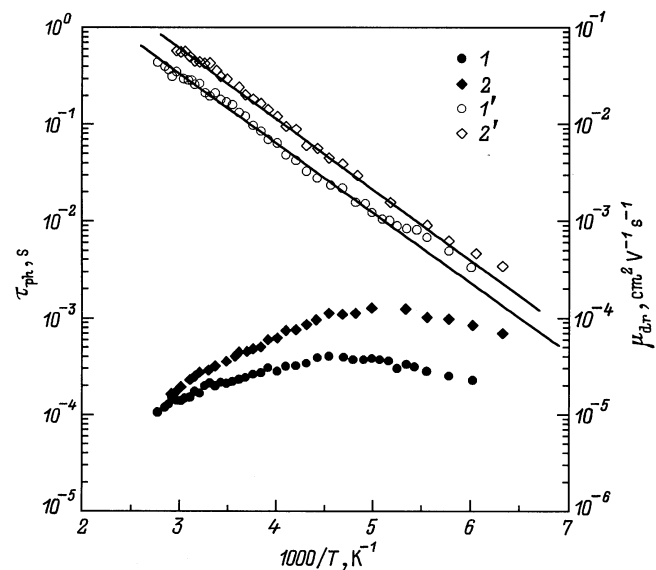


**Рис. 2.** Релаксация фотопроводимости образца 1 при различных температурах. Температура измерения указана около кривых.

Зависимость  $\Delta\sigma_{ph}$  от температуры может определяться изменением с температурой времени жизни и(или) подвижности носителей заряда. Для получения информации о влиянии температуры на рекомбинацию носителей в исследованных пленках нами была исследована релаксация фотопроводимости после выключения освещения. Кинетика спада фотопроводимости образца 1 и

ее изменение с температурой представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, спад фотопроводимости во всей области исследованных температур (150–430 К) не описывается экспоненциальной зависимостью. Наблюдается долговременная релаксация фотопроводимости. При  $t > 3 \cdot 10^{-4}$  с уменьшение фотопроводимости близко к степенной зависимости ( $\Delta\sigma_{ph} \propto t^{-\beta}$ ). При  $T > 250$  К время релаксации уменьшается с ростом температуры, а величина параметра  $\beta$  возрастает. В области низких температур ( $T < 200$  К) релаксация фотопроводимости практически не изменяется с температурой. Аналогичные результаты были получены для образца 2.

На рис. 3 показаны температурные зависимости времени фотоответа исследованных образцов. В качестве параметра, характеризующего время фотоответа ( $\tau_{ph}$ ), измерялось время полуспада фотопроводимости от величины стационарного значения. (Анализ кривых релаксации, представленных на рис. 2, показал, что полученное таким образом значение близко к значению мгновенного времени фотоответа  $\tau_{ph}(0)$ , определенному из соотношения  $\tau_{ph}(0) = \{\Delta\sigma_{ph}[\partial(\Delta\sigma_{ph})/\partial t]^{-1}\}_{t=0}$ ). Из рис. 3 видно, что в области высоких температур ( $T > 250$  К) величина  $\tau_{ph}$  уменьшается с ростом температуры. В области низких температур ( $T < 200$  К)  $\tau_{ph}$  слабо зависит от температуры (наблюдается некоторое увеличение  $\tau_{ph}$  с ростом температуры). Заметим, что с увеличением уровня легирования величина  $\tau_{ph}$  возрастает. Из измеренных температурных зависимостей  $\Delta\sigma_{ph}$  и  $\tau_{ph}$  можно рассчитать температурные зависимости дрейфовой подвижности неравновесных носителей ( $\mu_{dr} = \Delta\sigma_{ph}/(eG\tau_{ph})$ , где  $G$  — темп генерации). Полученные зависимости  $\mu_{dr}(T)$  показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, в области температур 200–350 К для исследованных образцов ве-



**Рис. 3.** Температурные зависимости времени фотоответа  $\tau_{ph}$  (1, 2) и дрейфовой подвижности  $\mu_{dr}$  (1', 2') пленок  $\mu c$ -Si:H. Номера кривых соответствуют номерам исследованных образцов.

личина  $\mu_{dr}$  экспоненциально возрастает с температурой с энергией активации 0.14–0.15 эВ.

Рассмотрим полученные результаты. Проведенные ранее измерения спектров поглощения методом постоянного фототока [9] позволяют предположить, что перенос носителей в исследованных пленках  $\mu c$ -Si:H происходит в основном по микрокристаллической фазе. Наличие неэкспоненциальной релаксации фотопроводимости указывает на присутствие значительной концентрации ловушек неравновесных носителей в  $\mu c$ -Si:H. Такими ловушками могут являться локализованные состояния в хвостах зон, возникающие на границах микрокристаллов [10]. Долговременная релаксация фотопроводимости также, по-видимому, может быть связана с потенциальным рельефом, возникающим внутри колонн, образованных микрокристаллами, вследствие возможного наличия в них крупномасштабных флуктуаций потенциала.

Полученные зависимости  $\tau_{ph}(T)$  свидетельствуют об изменении процессов рекомбинации неравновесных носителей в области температур  $T = 200$ – $250$  К. Слабая температурная зависимость  $\tau_{ph}$  при  $T < 200$  К указывает на возможность туннельной рекомбинации в области низких температур. В этом случае время фотоответа  $\tau_{ph}$  может возрастать с температурой [11]. Туннельные переходы неравновесных носителей могут происходить как между локализованными состояниями в хвостах зон, так и между состояниями хвостов зон и состояниями дефектов [12]. В случае флуктуаций потенциала, по-видимому, также может происходить туннелирование носителей между флуктуационными минимумами зоны проводимости и валентной зоны [13]. В области высоких температур ( $T > 250$  К) возможно увеличение вклада в переходы на рекомбинационные центры из локализованных состояний, либо состояний, расположенных выше уровня протекания (при наличии крупномасштабных флуктуаций потенциала). В этом случае время фотоответа должно уменьшаться с ростом температуры [11]. Время жизни носителей при этом также может уменьшаться с ростом температуры. В качестве центров рекомбинации, определяющих время жизни носителей в области высоких температур, могут выступать дефекты типа "оборванных связей", расположенные, согласно [4], на границах колонн, сформированных микрокристаллами.

Активационный характер зависимости  $\mu_{dr}(T)$  при  $T > 200$  К может быть связан с тем, что перенос неравновесных носителей, как и в  $a$ -Si:H, контролируется их захватом на хвосты плотности состояний, либо активацией носителей из флуктуационных минимумов на уровень протекания (при наличии крупномасштабных флуктуаций потенциала) [14]. Наличие потенциальных барьеров на границах колонн также может привести к активационному характеру  $\mu_{dr}(T)$ . При  $T < 200$  К возможно ослабление температурной зависимости  $\mu_{dr}$ , связанное с увеличением вклада в транспорт носителей прыжкового переноса по состояниям хвостов зон и туннелированием носителей под потенциальными барьерами [14].

Таким образом, проведенные исследования показали, что характер температурных зависимостей стационарной фотопроводимости и ее релаксации в  $\mu c$ -Si:H близок к аналогичным зависимостям для  $a$ -Si:H. Это, по-видимому, связано с близостью основных закономерностей распределения эффективной плотности состояний в данных материалах [15].

Работа выполнена в рамках проектов INTAS No 97-1910, COPERNICUS № IC15-CT98-0819 (TIMOC) и программы "Университеты России".

## Список литературы

- [1] K. Tanaka. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **452**, 3 (1997).
- [2] M.J. Williams, C. Wang, G. Lucovsky. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **219**, 389 (1991).
- [3] D. Ruff, H. Mell, L. Toth, I. Sieber, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 1011 (1998).
- [4] D. Will, C. Lerner, W. Fuhs, K. Lips. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **467**, 361 (1997).
- [5] J.-H. Zhou, S.D. Baranovskii, Y. Yamasaki, K. Ikuta, M. Kondo, A. Matsuda, K. Tanaka. ФТП, **32**, 905 (1998).
- [6] J. Muller, F. Finger, R. Carius, H. Wagner. Phys. Rev. B, **60**, 11 666 (1999).
- [7] R. Fluckiger, J. Meier, M. Goetz, A. Shah. J. Appl. Phys., **77**, 712 (1995).
- [8] 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).
- [9] А.Г. Казанский, X. Мелл, Е.И. Теруков, П.А. Форш. ФТП, **34**, 373 (2000).
- [10] J.H. Werner. In: *Polycrystalline Semiconductors. Springer Proceedings in Physics* (Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1989) v. 35, p. 345.
- [11] T.D. Moustakas, W. Paul. Phys. Rev. B, **16**, 1564 (1997).
- [12] P. Kanschat, K. Lips, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 524 (2000).
- [13] K.V. Kougia, I.S. Shlimak. In: *Transport, Correlation and Structural Defects. Advances in Disordered Semiconductors*, ed. by H. Fritzsche (Singapore, World Scientific, 1990) v. 3, p. 213.
- [14] R. Carius, F. Finger, U. Backhausen, M. Luysberg, P. Hapke, L. Houben, M. Otte, H. Overhof. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **467**, 283 (1997).
- [15] F. Finger, J. Muller, C. Malten, R. Carius, H. Wagner. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 511 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

## Temperature effect on photoconductivity and photoconductivity decay in microcrystalline silicon

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

Department of Physics,  
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** Temperature effect on steady-state photoconductivity and photoconductivity relaxation after switching off illumination has been studied on lightly boron-doped microcrystalline hydrogenated silicon films. The measurements are performed on the temperature range 150–430 K and at the photon energy 1.4 eV. Temperature dependencies of photoresponse time and drift mobility in microcrystalline silicon are obtained from measurement of steady-state photoconductivity and photoconductivity decay. Possible mechanisms of carrier transport and recombination, which determine temperature dependencies of photoresponse time and drift mobility, are discussed.