

Влияние уровня легирования на фотопроводимость пленок микрокристаллического гидрированного кремния

© А.Г. Казанский[¶], Х. Мелл*, Е.И. Териуков⁺, 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 апреля 2001 г. Принята к печати 19 апреля 2001 г.)

Исследовано влияние уровня легирования бором пленок микрокристаллического гидрированного кремния на температурные зависимости стационарной фотопроводимости и времени фотоответа. Измерения проведены в области температур 130–450 К при облучении пленок квантами света с энергией 1.4 эВ. Получено, что с ростом уровня легирования величина стационарной фотопроводимости и время фотоответа возрастают. Предложена модель рекомбинации неравновесных носителей, учитывающая многофазную структуру микрокристаллического кремния и позволяющая удовлетворительно объяснить полученные результаты.

Несмотря на широкое использование пленок микрокристаллического гидрированного кремния ($\mu\text{c-Si:H}$) в приборах оптоэлектроники, до сих пор окончательно не ясен механизм процессов генерации и рекомбинации неравновесных носителей, определяющих фотопроводимость этого материала.

Известно, что в пленках $\mu\text{c-Si:H}$ наблюдается корреляция изменений темновой проводимости (σ_d) и стационарной фотопроводимости ($\Delta\sigma_{\text{ph}}$) при легировании пленок донорами (фосфором) или акцепторами (бором) [1–4]. Величина $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ возрастает при увеличении σ_d с легированием. Минимальное значение $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ наблюдается для пленок с минимальной величиной σ_d . При этом данные пленки $\mu\text{c-Si:H}$ обладают максимальной fotocувствительностью ($\Delta\sigma_{\text{ph}}/\sigma_d$). Аналогичная корреляция величин σ_d и $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ при легировании наблюдается в пленках аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$) [5]. В случае $a\text{-Si:H}$ это связывают с уменьшением при смещении уровня Ферми к зоне проводимости или валентной зоне концентрации основных центров рекомбинации неравновесных носителей в $a\text{-Si:H}$ — нейтральных оборванных связей вследствие их перезарядки [5]. В настоящее время предполагается, что оборванные связи играют также существенную роль в рекомбинации неравновесных носителей в $\mu\text{c-Si:H}$ [6]. В то же время результаты исследований ЭПР в $\mu\text{c-Si:H}$ [7,8] показывают, что концентрация нейтральных оборванных связей в $\mu\text{c-Si:H}$ не изменяется при существенном смещении уровня Ферми (на 0.5 эВ) при легировании этого материала. Таким образом, влияние уровня легирования $\mu\text{c-Si:H}$ как на величину $\Delta\sigma_{\text{ph}}$, так и ее температурную зависимость требует дальнейшего изучения.

В настоящей работе исследовалось влияние уровня легирования $\mu\text{c-Si:H}$ бором на стационарную фотопроводимость пленок и ее релаксацию после прекращения освещения. Пленки $\mu\text{c-Si:H}$ толщиной 0.6–0.7 мкм осаждались на кварцевой подложке при температуре 220°C путем разложения в тлеющем разряде силаново-водородной смеси, содержащей 1.5% моносилана (SiH_4). Легирование бором осуществлялось введением диборана (B_2H_6) в реакционную камеру. Объемное отношение газов ($[\text{B}_2\text{H}_6]/[\text{SiH}_4]$) составляло $4 \cdot 10^{-6}$ (образец 1), $5 \cdot 10^{-6}$ (образец 2) и 10^{-5} (образец 3). Согласно данным термоэдс, пленки обладали проводимостью p -типа. На поверхность пленок 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 измерялась в области температур 130–450 К при освещении пленок излучением инфракрасных светодиодов с энергией квантов $h\nu = 1.4$ эВ с интенсивностью $4 \cdot 10^{16}$ см⁻²·с⁻¹. Релаксация фотопроводимости регистрировалась с помощью цифрового запоминающего осциллографа.

На рис. 1 показаны температурные зависимости σ_d и $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ исследованных пленок $\mu\text{c-Si:H}$. В области исследованных температур зависимости $\sigma_d(T)$ имеют активационный характер с энергией активации $E_a = 0.43$ (образец 1), 0.27 (образец 2) и 0.23 эВ (образец 3). С увеличением уровня легирования σ_d возрастает, а E_a уменьшается. Как видно из рисунка, величина $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ также возрастает при увеличении уровня легирования, а характер ее температурной зависимости практически не изменяется. В области $T < 220$ К $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ исследованных пленок возрастает с температурой по закону, близкому к экспоненциальному, с энергией активации ~ 0.13 эВ. При дальнейшем увеличении температуры рост $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ ослабляется, и в области высоких температур величина $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ уменьшается.

[¶] E-mail: Kazanski@phys.msu.ru
Fax: (095) 939 37 31

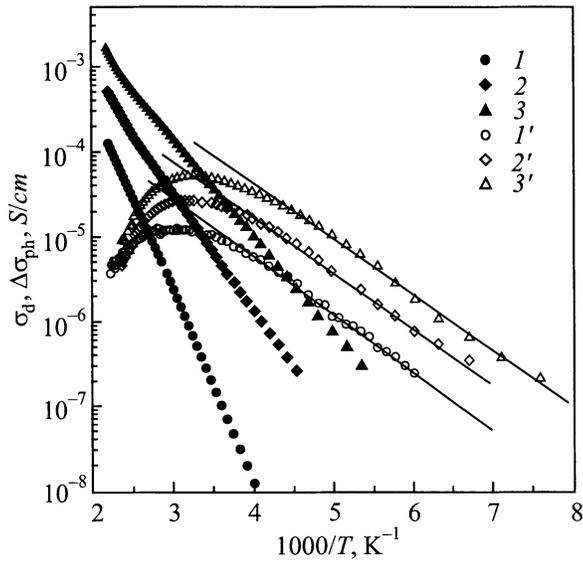


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости σ_d (1–3) и стационарной фотопроводимости $\Delta\sigma_{ph}$ (1'–3') пленок $\mu\text{-Si:H}$. Номера кривых соответствуют номерам исследованных образцов.

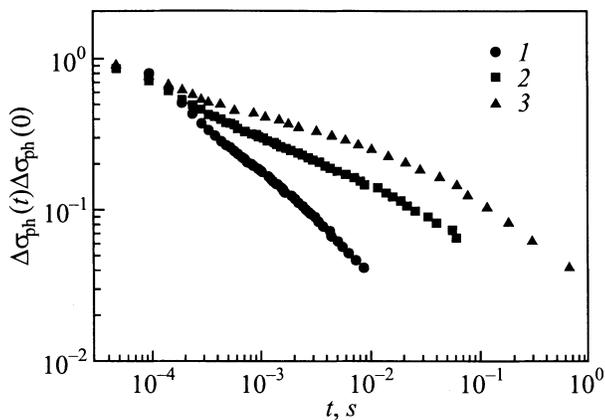


Рис. 2. Релаксация фотопроводимости пленок $\mu\text{-Si:H}$ при $T = 320\text{ K}$. Номера кривых соответствуют номерам исследованных образцов.

Увеличение $\Delta\sigma_{ph}$ с легированием может быть связано как с увеличением времени жизни неравновесных носителей, так и с увеличением их подвижности. Информация о влиянии легирования на время жизни может быть получена из измерений релаксации фотопроводимости после прекращения освещения образцов. На рис. 2 показано влияние уровня легирования на релаксацию фотопроводимости при $T = 320\text{ K}$. Как видно из рисунка, релаксация фотопроводимости после выключения освещения для всех исследованных образцов не описывается экспоненциальным законом и имеет долговременную составляющую. С увеличением уровня легирования скорость релаксации уменьшается. Этот результат согласуется с данными работы [4].

Измерения показали, что относительное уменьшение скорости релаксации фотопроводимости с легированием изменяется с температурой. На рис. 3 представлены температурные зависимости времени фотоответа (τ_{ph}) исследованных образцов. В качестве параметра, характеризующего τ_{ph} , измерялось время полуспада фотопроводимости после прекращения освещения. Заметим, что полученные величины τ_{ph} были близки к значениям мгновенного времени фотоответа $\tau_{ph}(0)$, определенным из соотношения $\tau_{ph}(0) = (\Delta\sigma_{ph}(\partial(\Delta\sigma_{ph})/\partial t)^{-1})_{t=0}$. Как видно из рисунка, величина τ_{ph} возрастает с легированием, причем при $T > 220\text{ K}$ относительное изменение τ_{ph} с легированием уменьшается.

Рассмотрим полученные результаты. По нашему мнению, увеличение $\Delta\sigma_{ph}$ с ростом легирования (рис. 1) в основном связано с увеличением времени жизни носителей. Увеличение времени жизни может определять наблюдаемое с ростом легирования увеличение τ_{ph} (рис. 3). Причем долговременная релаксация фотопроводимости (рис. 2) указывает на значительную концентрацию ловушек неравновесных носителей в $\mu\text{-Si:H}$.

Известно, что пленки $\mu\text{-Si:H}$ имеют многофазную структуру, состоящую из кристаллической и аморфной фаз кремния, пор и границ раздела между микрокристаллами. По данным электронной микроскопии, исследованные пленки имели колоннообразную структуру перпендикулярно поверхности подложки, с диаметром колонн 30–100 нм, содержащих кристаллы размерами от 3 до 30 нм [9]. Кристаллическая компонента в спектрах рамановского рассеяния составляла 85% полной площади пика. Согласно данным [10], генерация и перенос неравновесных носителей в таких пленках определяется кристаллической фазой.

Возможная энергетическая диаграмма для границы колонны с аморфной и кристаллической фазой в $\mu\text{-Si:H}$ представлена на рис. 4. Анализ экспериментов по ЭПР в $\mu\text{-Si:H}$ показывает, что основная концентрация дефектов типа оборванных связей расположена на границах ко-

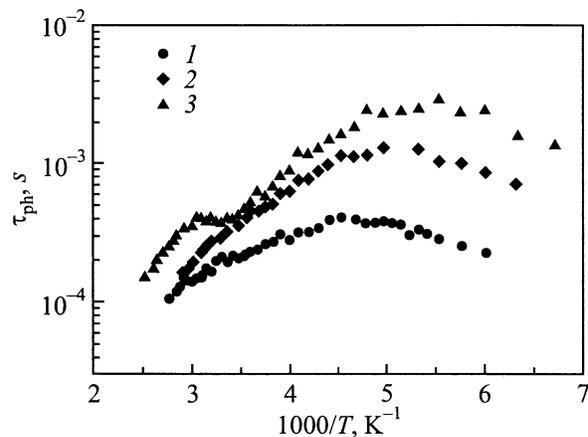


Рис. 3. Температурные зависимости времени фотоответа τ_{ph} пленок $\mu\text{-Si:H}$. Номера кривых соответствуют номерам исследованных образцов.

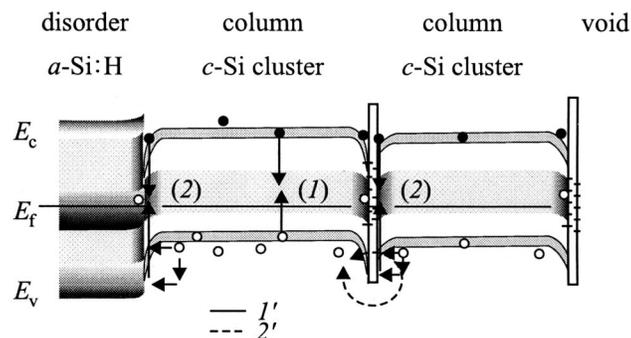


Рис. 4. Энергетическая диаграмма границ раздела колонны микрокристаллов с кристаллической и аморфной фазами в $\mu\text{c-Si:H}$, легированном бором. $1'$ — возможные рекомбинационные переходы неравновесных носителей, $2'$ — переходы, соответствующие переносу носителей.

лонн [8]. Исследования гетеропереходов $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ свидетельствует о том, что концентрация оборванных связей на границе гетероперехода достигает 10^{18} см^{-3} [11]. Значительная плотность локализованных состояний на границах колонн, в том числе и на границах с аморфной фазой, должна привести к формированию барьеров для основных носителей тока (в нашем случае дырок). Перенос носителей осуществляется через участки колонн, соприкасающиеся друг с другом. Стрелками показаны возможные рекомбинационные переходы как внутри колонн (1), так и на ее границах (2). Из результатов измерений $\Delta\sigma_{\text{ph}}$ исследованных образцов можно получить, что произведение подвижности (μ) на время жизни носителей (τ) превышает $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}$. Соответственно в области исследованных температур длина диффузии носителей $L = (kT\mu\tau/e)^{1/2} > 200 \text{ нм}$ и превышает размеры колонн (здесь k и e — соответственно постоянная Больцмана и заряд электрона). Поэтому захват и рекомбинация носителей на состояниях, расположенных вблизи поверхности колонн, могут определять как релаксацию фотопроводимости, так и время жизни неравновесных носителей. Как видно из рисунка, наличие барьера на границе с аморфной фазой приводит к разделению основных и неосновных носителей. При этом процесс рекомбинации через состояния на границе колонн должен включать туннелирование основного носителя с последующей его рекомбинацией через состояния дефектов. Туннельные процессы должны определять рекомбинацию при низких температурах. С этим может быть связана слабая температурная зависимость τ_{ph} при $T < 220 \text{ К}$. С ростом температуры возможна активация дырок, что должно приводить к наблюдаемому уменьшению τ_{ph} с ростом температуры. Заметим, что при повышении температуры происходит активация электронов из потенциальных ям вблизи поверхности колонн. Соответственно возможно усиление рекомбинационного потока (I) внутри колонны (в случае значительной концентрации рекомбинационных центров внутри колонны).

Большая плотность состояний на границах колонны приводит к тому, что при легировании материала возрастает величина потенциального барьера на границе колонны, в частности с аморфной фазой. Это должно привести к увеличению эффективного разделения основных и неосновных неравновесных носителей заряда и уменьшению вероятности рекомбинационных переходов вблизи поверхности колонн. Соответственно должны возрастать время жизни носителей, время релаксации и величина фотопроводимости. Увеличение величины барьера должно приводить к усилению с легированием температурной зависимости τ_{ph} в области высоких температур, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3).

Таким образом, представленная в работе качественная модель рекомбинации носителей в $\mu\text{c-Si:H}$, предполагающая определяющую роль границ колонн с $a\text{-Si:H}$ в процессе рекомбинации неравновесных носителей, позволяет качественно объяснить влияние уровня легирования на фотопроводимость $\mu\text{c-Si:H}$.

Работа выполнена в рамках проектов INTAS-97-1910 и "Университеты России".

Список литературы

- [1] M.J. Williams, C. Wang, G. Lucovsky. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **219**, 389 (1991).
- [2] R. Fluckiger, J. Meier, M. Goetz, A. Shah. J. Appl. Phys., **77**, 712 (1995).
- [3] M. Bruggemann, A. Hierzenberger, R. Reining, M. Rojahn, M.B. Schubert, S. Schweizer, H.N. Wanka, I. Zrinscak. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 982 (1998).
- [4] M. Bruggemann, C. Main. Phys. Rev. B, **57**, R16080 (1998).
- [5] W.E. Spear, H.L. Steemers, P.G. LeComber, R.A. Gibson. Phil. Mag. B, **50**, L33 (1984).
- [6] P. Kanschhat, K. Lips, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 524 (2000).
- [7] P. Kanschhat, H. Mell, K. Lips, W. Fuhs. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **609**, 463 (2000).
- [8] F. Finger, J. Muller, C. Malten, R. Carius, H. Wagner. J. Non-Cryst. Sol., **266–269**, 511 (2000).
- [9] D. Ruff, H. Mell, L. Toth, I. Sieber, W. Fuhs. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 1011 (1998).
- [10] А.Г. Казанский, X. Мелл, Е.И. Теруков, П.А. Форш. ФТП, **34**, 373 (2000).
- [11] J.M. Essick, J.D. Cohen. Appl. Phys. Lett., **55**, 1232 (1989).

Редактор Л.В. Беляков

Boron doping effect on photoconductivity of microcrystalline hydrogenated silicon films

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 The influence of boron doping level of microcrystalline hydrogenated silicon films on temperature dependencies of steady-state photoconductivity and photocurrent response time have been investigated. The measurements were carried out in the temperature range 130–450 K and at the photon energy of 1.4 eV. It was obtained that both the steady-state photoconductivity and photocurrent response time increase with boron doping. A model of nonequilibrium carrier recombination considering a mixed-phase structure of microcrystalline silicon and explaining the results obtained was proposed.