

Влияние светового излучения на скорость релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний в $a\text{-Si:H(B)}$

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт[¶], А.Л. Громадин*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Физический факультет),
119992 Москва, Россия

* ГИРЕДМЕТ, 109017 Москва, Россия

(Получена 24 сентября 2002 г. Принята к печати 6 ноября 2002 г.)

Исследованы в темноте и при подсветке временные зависимости скоростей релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний электрически активных атомов примеси в легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$. Установлено, что в условиях подсветки скорость релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний атомов бора увеличивается в начальный период времени, когда скорость их фотоиндуцированной релаксации превышает скорость их фотоиндуцированного образования.

В работах [1–3] исследовалось влияние освещения на кинетику релаксации метастабильных оборванных связей кремния в нелегированных пленках аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$). Было показано, что подсветка пленок увеличивает скорость их изотермической релаксации в начальный период релаксации по сравнению со скоростью релаксации в темноте. Это указывает на фотоиндуцированный отжиг метастабильных оборванных связей в нелегированных пленках. Подобных исследований для метастабильных состояний в легированных пленках $a\text{-Si:H}$ не проводилось.

Известно, что в легированных пленках $a\text{-Si:H}$ образуются два типа метастабильных состояний (МС) — метастабильные оборванные связи кремния (МОС) и метастабильные электрически активные атомы примесей (МЭАП). Данная работа посвящена исследованию влияния подсветки на скорость изотермической релаксации фотоиндуцированных МЭАП в легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$.

Исследования кинетики релаксации МЭАП проводились путем регистрации кинетики изменения темновой проводимости пленок. В работах [4–6] показано, что для каждого типа МС изменение со временем t их концентрации обуславливает смещение уровня Ферми вверх или вниз от его равновесного положения в запрещенной зоне. Это вызывает уменьшение или увеличение темновой проводимости пленки $\sigma_d(t)$. В процессе релаксации МС при выполнении условия постоянства плотности локализованных состояний в области смещения уровня Ферми, $\rho(E) = \rho_0$, изменение темновой проводимости пленки со временем связано с изменением концентрации МС $N(t)$ соотношением

$$N(t) = kT \rho_0 \left| \lg \left[\frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}} \right] \right|. \quad (1)$$

Здесь $\sigma_{d0}(T)$ — равновесная темновая проводимость пленки, T — температура, k — постоянная Больцмана.

В работе исследовались пленки $a\text{-Si:H}$, слабо легированные бором. Концентрация бора в них определялась методом SIMS и составляла $(3\text{--}4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Уровень

Ферми в этих пленках находился на $\sim 0.8 \text{ эВ}$ выше потолка валентной зоны в области достаточно широкого минимума плотности состояний, где величину $\rho(E)$ можно считать практически постоянной и равной ρ_0 . Это позволяло нам использовать приведенную выше формулу (1) при исследовании кинетики релаксации МС. Кроме того, в слабо легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$ величина ρ_0 мала по сравнению с ρ_0 в сильно легированном материале [7]. Это определяет большую величину изменения темновой проводимости пленки при данном значении $N(t)$ и, следовательно, большую точность определения концентрации МС в зависимости от времени.

Эксперимент проводился следующим образом. Пленка $a\text{-Si:H(B)}$ перед каждым исследованием отжигалась в течение 1 ч в азотном криостате при температуре $T = 200^\circ\text{C}$, затем медленно охлаждалась до температуры, при которой выдерживалась в течение длительного времени для достижения равновесного для этой температуры состояния. Затем для создания фотоиндуцированных МС пленка освещалась белым светом от галогеновой лампы с инфракрасным фильтром, плотность освещения составляла 9 мВт/см^2 . После выключения света проводились измерения кинетики изменения темновой проводимости пленки в темноте и при слабой подсветке (8 мВт/см^2). В последнем случае для измерения величины темновой проводимости во время релаксации МС подсветка на короткое время выключалась. Температура, при которой проводились измерения, составляла 410 К, что требовалось для образования достаточно большой концентрации фотоиндуцированных МЭАП [5,6]. Во время измерений температура пленки поддерживалась постоянной с точностью до 0.5 К.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные (точки) по кинетике изменения темновой проводимости пленки 1 с момента выключения ее предварительного освещения с плотностью мощности 90 мВт/см^2 в течение 600 с. Видно, что зависимость $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$ немоноотонна. Она может быть представлена, как и для релаксации МС в сильно легированных пленках [6], суммой (кривая 3) двух растянутых экспонент (кривые 1

[¶] E-mail: scon282@phys.msu.ru

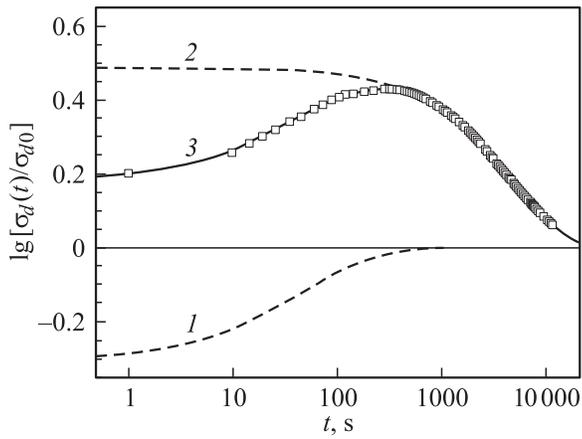


Рис. 1. Кинетика изменения $\sigma_d(t)$ пленки $a\text{-Si:H(B)}$ при $T = 410\text{ K}$ в темноте после ее предварительного освещения в течение 600 с. Точки — эксперимент, линии — расчет: 3 — сумма двух растянутых экспонент, отражающих изотермическую релаксацию фотоиндуцированных МОС (1) и МЭАП (2). Параметры растянутых экспонент: $a_1 = -0.31$, $\tau_{01} = 51$, $\beta_1 = 0.66$; $a_2 = 0.49$, $\tau_{02} = 4800$, $\beta_2 = 0.85$.

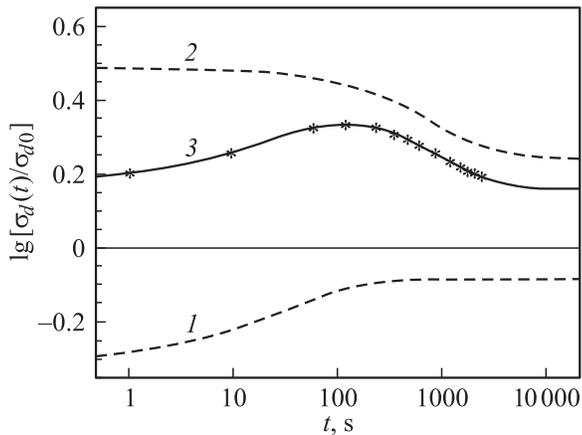


Рис. 2. Кинетика изменения $\sigma_d(t)$ пленки $a\text{-Si:H(B)}$ при $T = 410\text{ K}$ в условиях слабой подсветки после ее предварительного освещения в течение 600 с. Точки — эксперимент, линии — расчет: 3 — расчет по формуле (3), сумма кривых 1 и 2, отражающих релаксацию фотоиндуцированных МОС (1) и МЭАП (2) в условиях подсветки. Параметры расчета: $h_1 = -0.08$, $\tau_{01} = 31$, $\beta_1 = 0.6$; $h_2 = +0.24$, $\tau_{02} = 970$, $\beta_2 = 0.78$.

и 2), отражающих релаксацию в темноте двух ансамблей фотоиндуцированных МС — МОС и МЭАП:

$$\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}] = a_1 \exp[-(t/\tau_{01})^{\beta_1}] + a_2 \exp[-(t/\tau_{02})^{\beta_2}]. \quad (2)$$

Здесь a_1 , τ_{01} , β_1 и a_2 , τ_{02} , β_2 — параметры растянутых экспонент, имеющие следующий смысл: a_1 и a_2 — начальные концентрации соответственно МОС и МЭАП в относительных единицах; τ_{01} и τ_{02} — эффективные времена релаксации соответственно ансамблей МОС и МЭАП, равные значениям времен в максимуме функций

распределения МОС и МЭАП по $\tau_{1,2}$; $1/\beta_{1,2}$ характеризуют полуширины функций распределения.

Кривая 1 отражает быструю релаксацию фотоиндуцированных МОС, определяющую увеличение проводимости пленки до равновесной величины σ_{d0} . Кривая 2 отражает медленную релаксацию фотоиндуцированных МЭАП, в результате которой проводимость пленки уменьшается до своего равновесного значения σ_{d0} .

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по кинетике изменения проводимости этой же пленки в условиях слабой подсветки с момента выключения предварительного освещения пленки с плотностью 90 мВт/см² в течение 600 с. Видно, что экспериментальная зависимость $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$ также немонотонна (кривая 3) и значения проводимостей в начальный период времени для кривых релаксации в темноте и при подсветке близки по величине (ср. кривые 3 на рис. 1 и 2). Это определяется одинаковыми условиями предварительного освещения пленки, в результате чего создаются одни и те же концентрации фотоиндуцированных МОС и МЭАП. Далее, при $t > 0$, кривые 3 на рис. 1 и 2 существенно различаются по скорости изменения темновой проводимости во времени. Кроме того, при больших временах значение стационарной проводимости при релаксации МС в условиях подсветки выше равновесной величины σ_{d0} . Это обусловлено тем, что во втором случае со временем достигается стационарная концентрация МОС и МЭАП, определяемая равенством скоростей образования и релаксации МОС и МЭАП при подсветке.

Кривую релаксации проводимости в условиях слабой подсветки (рис. 2, кривая 3) можно представить как сумму двух слагаемых:

$$\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}] = \{(-0.31 - h_1) \exp[-(t/\tau_{01})^{\beta_1}] + h_1\} + \{(0.49 - h_2) \exp[-(t/\tau_{02})^{\beta_2}] + h_2\}. \quad (3)$$

Первое слагаемое (кривая 1) отражает релаксацию МОС при подсветке, второе слагаемое — релаксацию МЭАП. Начальные концентрации МОС и МЭАП в относительных единицах (0.31 и 0.49) равны начальным значениям концентраций МОС и МЭАП, определенным из кривых 1 и 2 на рис. 1, отражающих релаксацию МОС и МЭАП в темноте.

Для определения скоростей релаксации фотоиндуцированных МОС и МЭАП в темноте и при подсветке мы дифференцируем по времени кривые 1 и 2 на рис. 1 и 2. На рис. 3, *a, b* представлены полученные таким образом временные зависимости скоростей релаксации соответственно МОС и МЭАП в темноте (кривые 1) и при подсветке (кривые 2). Из рис. 3, *b* видно, что в некоторый момент времени $t = t_C$ скорости изменения концентрации МЭАП в темноте и при подсветке равны. Это означает, что равны скорости фотоиндуцированного образования и релаксации МЭАП, обусловленные подсветкой. Действительно, при подсветке скорость изменения концентрации МЭАП определяется тепловыми и

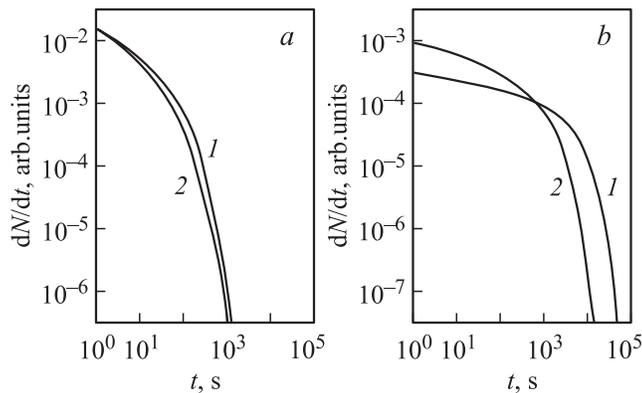


Рис. 3. Зависимости скоростей релаксации фотоиндуцированных МОС (а) и МЭАП (б) в темноте (1) и при слабой подсветке (2) от времени релаксации. $T = 410$ К.

фотоиндуцированными скоростями образования и релаксации МЭАП [8]:

$$(dN/dt)_{\text{III}} = G_T + G_{\text{III}} - R_T - R_{\text{III}}. \quad (4)$$

Здесь G_T , G_{III} и R_T , R_{III} — соответственно скорости термического и фотоиндуцированного образования и релаксации. В темноте скорость изменения концентрации МЭАП определяется только скоростями термического образования и релаксации МЭАП:

$$(dN/dt)_T = G_T - R_T. \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) следует, что в момент времени $t = t_c$ наступает равенство скоростей фотоиндуцированного образования и релаксации МЭАП — $G_{\text{III}} = R_{\text{III}}$; при $t < t_c$ скорость фотоиндуцированной релаксации превышает скорость фотоиндуцированного образования — $R_{\text{III}} > G_{\text{III}}$; при $t > t_c$ скорость фотоиндуцированного образования становится больше скорости фотоиндуцированной релаксации — $G_{\text{III}} > R_{\text{III}}$.

Из рис. 3, а видно, что для МОС в области измеряемых времен ($t \geq 1$ с) мы не наблюдаем фотоиндуцированной релаксации: проявляется только область $t > t_c$, где скорость фотоиндуцированной релаксации МОС меньше скорости их фотоиндуцированного подсветкой образования. Сравнение полученных нами временных зависимостей скоростей релаксации МЭАП в темноте и при подсветке (рис. 3, б) с аналогичными зависимостями для релаксации МОС, полученными в работе [2] в нелегированных пленках, показывает, что зависимости подобны. Это может указывать на близкую природу механизмов фотоиндуцированной релаксации МОС и МЭАП в пленках $a\text{-Si:H}$. Однако требуются дальнейшие исследования для более детального изучения механизмов фотоиндуцированной релаксации МЭАП и МОС в аморфном гидрированном кремнии.

Авторы выражают благодарность И.П. Звягину за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана программой „Университеты России — фундаментальные исследования“ и научной программой ГИЦ „ГИРЕДМЕТ“.

Список литературы

- [1] R. Meaudre, M. Meaudre. Phys. Rev. B, **45**, 12 134 (1992).
- [2] H. Gleskova, P.A. Morin, S. Wagner. Appl. Phys. Lett., **62**, 2063 (1993).
- [3] C.F.O. Graeff, R. Buhleir, M. Stutzmann. Appl. Phys. Lett., **62** (23), 3001 (1993).
- [4] J.K. Rath, W. Fuhs, H. Mell. J. Non-Cryst. Sol., **137–138**, 279 (1991).
- [5] И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко. ФТП, **31**, 1455 (1997).
- [6] A.G. Kazanskii, I.A. Kurova, N.N. Ormont, I.P. Zvyagin. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 306 (1998).
- [7] S. Sheng, X. Liao, G. Kong. Appl. Phys. Lett., **78**, 2509 (2001).
- [8] D. Redfield. Appl. Phys. Lett., **52**, 492 (1988).

Редактор Л.В. Шаронова

The effect of illumination on relaxation rate of light-induced metastable states in $a\text{-Si:H(B)}$

I.A. Kurova, N.N. Ormont, A.L. Gromadin*

Moscow State University, Physics Faculty,
119992 Moscow, Russia

* GIREDMET, 109017 Moscow, Russia

Abstract Time dependences of relaxation rates of light-induced metastable states of electrically active impurity atoms in boron-doped $a\text{-Si:H}$ films are investigated both at dark and low-illumination intensity. It has been established that at a low illumination intensity the relaxation rate of light-induced metastable states of boron atoms increased at the early stage of illumination since their light-induced relaxation rate exceeded their light-induced creation rate.