

Фотоиндуцированная релаксация метастабильных состояний в $a\text{-Si:H(B)}$

© Н.Н. Ормонт[†], И.А. Курова, Г.В. Прокофьев

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

(Получена 27 декабря 2004 г. Принята к печати 12 января 2005 г.)

Исследована кинетика термической релаксации ансамбля фотоиндуцированных метастабильных электрически активных атомов бора в пленках $a\text{-Si:H(B)}$ после частичной релаксации ансамбля в темноте и при подсветках разной интенсивности и длительности. Определены параметры растянутой экспоненты, описывающей кинетику релаксации ансамблей. Установлено, что фотоиндуцированная релаксация метастабильных состояний проявляется в условиях, когда ее скорость превышает скорость их фотоиндуцированного образования. Показано, что изменения функции распределения метастабильных состояний по временам релаксации вследствие термической и фотоиндуцированной релаксации подобны.

Фотоиндуцированная релаксация метастабильных оборванных связей (МОС) в аморфном гидрированном кремнии сначала была предсказана теоретически [1] и затем экспериментально обнаружена в легированных пленках $a\text{-Si:H}$ [2,3]. В наших предыдущих работах [4,5] была обнаружена фотоиндуцированная релаксация метастабильных электрически активных атомов примеси (МЭАП) в слабо легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$. Цель настоящей работы заключалась в более детальном исследовании процесса фотоиндуцированной релаксации МЭАП в пленках $a\text{-Si:H}$, слабо легированных бором, в частности, в исследовании кинетики изменения функции распределения МЭАП по временам релаксации под влиянием освещения.

Исследовались пленки $a\text{-Si:H}$, легированные бором, полученные методом осаждения в плазме ВЧ тлеющего разряда. Легирование пленок проводилось из газовой фазы. Полная концентрация бора, определенная методом SIMS, составляла величину $N_B = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Методика исследований и ее обоснование подробно изложены в работах [4,5]. Основой методики является определение и сравнение параметров кинетики термической релаксации ансамблей МЭАП, полученных при частичной релаксации в темноте и при наличии подсветки ансамбля МЭАП, предварительно созданного сильным освещением. Кинетика термической релаксации ансамблей МЭАП описывается растянутой экспонентой с параметрами, характеризующими эти ансамбли,

$$N(t) = N(0) \exp\left(-\left(t/\tau_0\right)^\beta\right),$$

где $N(0)$ — полная начальная концентрация МЭАП в ансамбле; τ_0 — эффективное время релаксации ансамбля, близкое к значению τ в максимуме $f(\tau)$ — функции распределения МЭАП по τ ; β^{-1} — характеризует полуширину функции $f(\tau)$. Было показано также, что в исследованных пленках $a\text{-Si:H(B)}$ кинетика изменения темновой проводимости пленки $\sigma_d(t)$ при данной температуре отражает кинетику изменения

концентрации МЭАП ансамбля при этой температуре согласно соотношению

$$N(t) = A \lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}],$$

где σ_{d0} — равновесная темновая проводимость при данной температуре, A — определяется температурой и постоянной плотностью состояний в области изменения уровня Ферми при релаксации МЭАП.

В настоящей работе были проведены измерения кинетики изменения проводимости пленки $a\text{-Si:H(B)}$ с различными ансамблями фотоиндуцированных МЭАП при температуре 410 К. Отметим, что образование фотоиндуцированных МЭАП приводило к увеличению проводимости пленки, а релаксация МЭАП — к уменьшению ее проводимости. На рис. 1 приведены экспериментально полученные временные зависимости $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$, которые описываются растянутыми экспонентами с разными

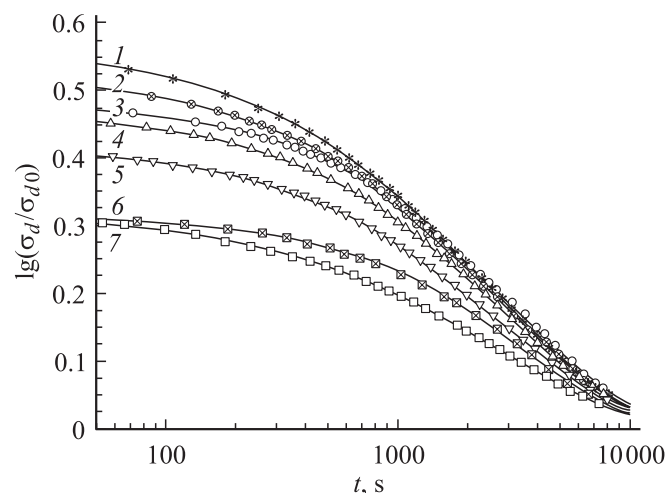


Рис. 1. Кинетика изменения темновой проводимости пленки $a\text{-Si:H(B)}$ после образования в ней ансамбля МЭАП-I (кривая 1). Кинетика изменения темновой проводимости этой пленки после образования в ней ансамбля МЭАП-I и последующей частичной его релаксации в темноте (кривые 2–4) и при слабой подсветке с интенсивностью $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривые 5–7) в течение 100, 300 и 1200 с.

[†] E-mail: ormont@phys.msu.su

Таблица 1. Параметры термической релаксации различных ансамблей МЭАП до и после частичной релаксации ансамбля МЭАП-I в темноте и при подсветке $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$

Ансамбли МЭАП	$N(0)$ отн. ед.		$\tau_0, \text{с}$		β	
	В темноте	При подсветке	В темноте	При подсветке	В темноте	При подсветке
МЭАП-I	0.57		2520		0.77	
МЭАП-I после частичной релаксации						
60 с	0.54	0.51	2680	2910	0.8	0.82
100 с	0.53	0.49	2800	3230	0.82	0.84
300 с	0.47	0.42	2950	2860	0.84	0.8
1200 с	0.32	0.34	3620	2690	0.89	0.73

параметрами (кривые 1–7), отражающими кинетику релаксации МЭАП в следующих ансамблях.

Кривая 1 — термическая релаксация исходного ансамбля МЭАП-I, образованного предварительным освещением исследуемой пленки в течение 300 с белым светом с интенсивностью $80 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ от галогеновой лампы с ИК фильтром.

Кривые 2, 4, 6 — термическая релаксация ансамбля МЭАП-I после его частичной термической релаксации, соответственно, в течение 100, 300 и 1200 с.

Кривые 3, 5, 7 — термическая релаксация ансамбля МЭАП-I после его частичной термической релаксации при наличии слабой подсветки интенсивности $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, соответственно, в течение 100, 300 и 1200 с.

Параметры кривых 1–7, отражающих кинетику термической релаксации этих ансамблей МЭАП, приведены в табл. 1.

Из таблицы видно.

1. При увеличении времени частичной термической релаксации ансамбля МЭАП-I уменьшается концентрация МЭАП, при этом τ_0 и β увеличиваются. Это свидетельствует о том, что при термической релаксации происходит преимущественно релаксация состояний с малыми временами релаксации, в результате чего эффективное время релаксации увеличивается и ширина функции распределения $f(\tau)$ уменьшается.

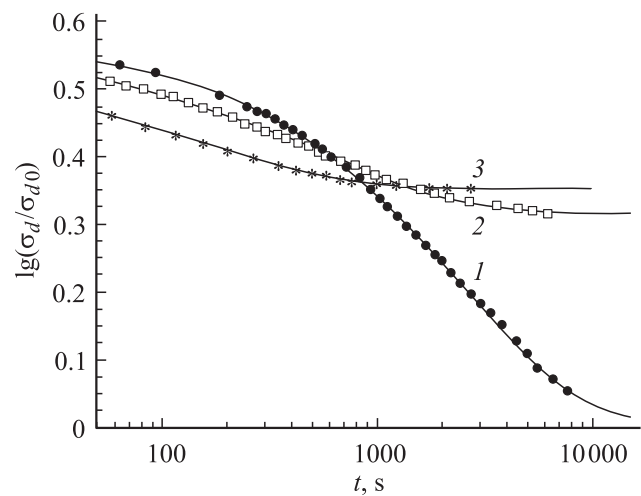
2. Все параметры ($N(0)$, τ_0 и β) термической релаксации ансамблей, полученных после частичной релаксации ансамбля МЭАП-I в темноте и при наличии подсветки, различны. Это указывает на наличие фотоиндуцированной релаксации МЭАП.

3. Эти различия зависят от времени предварительной частичной релаксации ансамбля МЭАП-I. При малых временах в условиях подсветки $N(0)$ уменьшается, а τ_0 и β увеличиваются, как и в темноте, но на большую величину. При увеличении времени предварительной релаксации действие подсветки иное: параметр $N(0)$ уменьшается слабее, τ_0 и β не увеличиваются, а уменьшаются. Это указывает на расширение функции распределения $f(\tau)$ в область малых времен. Такое действие подсветки обусловлено тем, что при больших

временах частичной релаксации ансамбля МЭАП-I в условиях подсветки становится существенным процесс фотоиндуцированного образования МЭАП.

Предложенное выше объяснение подтверждается следующими экспериментальными данными. На рис. 2 показана кинетика изменения проводимости пленки в процессе релаксации ансамбля МЭАП-I в темноте (кривая 1) и при наличии слабой подсветки $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 2) и $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 3). Видно, что величина стационарной проводимости пленки при больших временах (кривые 2 и 3) больше величины равновесной темновой проводимости (кривая 1), что указывает на увеличение концентрации МЭАП в пленке в результате фотоиндуцированного образования их под воздействием длительной подсветки.

Дифференцируя кривые 1, 2 и 3 (рис. 2) по времени, получаем временные зависимости скоростей изменения концентрации МЭАП в темноте — $v_1(t)$ и при подсветках — $v_2(t)$ и $v_3(t)$. На рис. 3 приведены зависимости $v_1(t)$, $v_2(t)$ и $v_3(t)$ (соответственно кривые 1, 2 и 3). Видно, что скорости релаксации МЭАП при подсветке

**Рис. 2.** Кинетика изменения темновой проводимости пленки $\alpha\text{-Si:H(B)}$ после образования в ней ансамбля МЭАП-I в темноте (кривая 1) и при подсветке с интенсивностью 1.3 и $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривые 2 и 3).

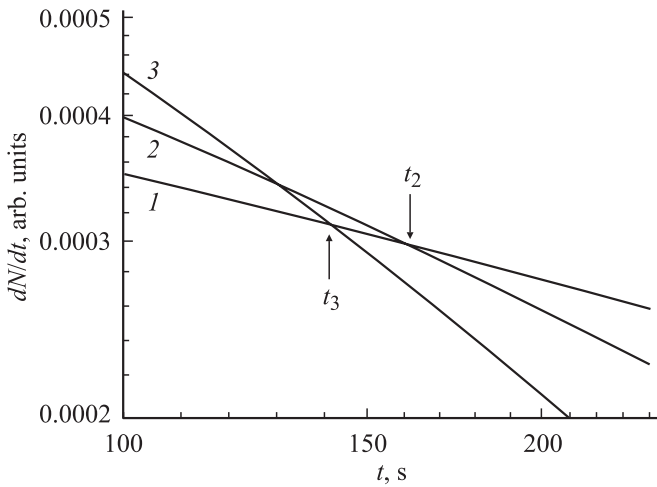


Рис. 3. Временные зависимости скоростей изменения концентрации МЭАП в пленке $a\text{-Si:H(B)}$ в темноте (кривая 1) и при подсветке с интенсивностью 1.3 и $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривые 2 и 3).

ке (v_2, v_3) при малых временах больше скорости термической релаксации МЭАП (v_1). В моменты времени t_2 и t_3 скорости v_2 и v_3 сравниваются со скоростью v_1 , а при больших временах скорости v_2 и v_3 становятся меньше v_1 . Скорости v_2 и v_3 определяются четырьмя скоростями — термической и фотоиндуцированной релаксации и генерации МЭАП, а скорость v_1 только двумя скоростями — термической релаксации и генерации МЭАП. Следовательно, в моменты времени t_2 и t_3 сравниваются скорости фотоиндуцированной релаксации и фотоиндуцированной генерации МЭАП. Таким образом, если время предварительной частичной релаксации ансамбля МЭАП-I при подсветке меньше времени t_c , при котором сравниваются скорости фотоиндуцированной релаксации и генерации МЭАП, то фотоиндуцированное образование МЭАП во время частичной релаксации при подсветке мало. В этом случае идет преимущественно процесс фотоиндуцированной релаксации. Если время частичной релаксации больше t_c , то преобладающим становится процесс фотоиндуцированного образования МЭАП. На рис. 3 видно также, что $t_3 < t_2$, т.е. при увеличении интенсивности подсветки критическое время t_c уменьшается.

В табл. 1 приведены найденные значения параметров $N(0)$, τ_0 и β полной термической релаксации ансамбля МЭАП-I, а также ансамблей, полученных после частичной релаксации ансамбля МЭАП-I в течение разного времени в темноте и при наличии слабой подсветки $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Время t_c для этой интенсивности подсветки, согласно рис. 3, составляет 160 с. Времена предварительной релаксации 60 и 100 с меньше этой величины. Это условие обуславливает малую величину скорости фотоиндуцированной генерации МЭАП во время предварительной релаксации ансамбля МЭАП-I при подсветке, и, следовательно, изменение параметров $N(0)$, τ_0 и β определяется фотоиндуцированной

релаксацией ансамбля МЭАП-I с малыми временами релаксации. Времена предварительной релаксации, равные 300 и 1200 с, больше величины $t_c = 160$ с. Это обуславливает малую величину скорости фотоиндуцированной релаксации МЭАП во время предварительной релаксации ансамбля МЭАП-I, и, следовательно, изменение параметров τ_0 и β определяется фотоиндуцированным образованием МЭАП с малыми временами релаксации.

В табл. 2 представлены значения параметров релаксации ансамбля МЭАП-I после его частичной релаксации в течение 300 с в темноте и при различных интенсивностях подсветки от 0.5 до $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Видно, что полная начальная концентрация МЭАП в ансамблях — $N(0)$ уменьшается монотонно с увеличением интенсивности подсветки во время предварительной частичной релаксации ансамбля МЭАП-I. В то же время величины τ_0 и β изменяются немонотонно с увеличением интенсивности. При малой интенсивности подсветки ($0.5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$) значения τ_0 и β больше значений этих параметров при отсутствии подсветки во время предварительной релаксации ансамбля МЭАП-I. При увеличении интенсивности подсветки до 1.3 и $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ значения τ_0 и β не увеличиваются, а уменьшаются. Это обусловлено тем, что при увеличении интенсивности подсветки уменьшается время t_c , когда сравниваются скорости фотоиндуцированной релаксации и фотоиндуцированного образования МЭАП. Поэтому при малой интенсивности подсветки преобладает фотоиндуцированная релаксация МЭАП, так как время $300 \text{ с} < t_c$. При интенсивностях подсветки 1.3 и $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ преобладает фотоиндуцированное образование МЭАП, так как $300 \text{ с} > t_c$. Соответственно при малой интенсивности подсветки τ_0 и β увеличиваются в результате фотоиндуцированной релаксации МЭАП с малыми временами релаксации τ . При больших интенсивностях — τ_0 и β уменьшаются вследствие фотоиндуцированного образования МЭАП с малыми временами релаксации τ .

Итак, в работе установлено, что фотоиндуцированная релаксация фотоиндуцированных метастабильных электрически активных атомов бора в пленках $a\text{-Si:H(B)}$ проявляется при их релаксации с подсветкой, когда скорость фотоиндуцированной релаксации метастабиль-

Таблица 2. Параметры термической релаксации различных ансамблей МЭАП до и после частичной релаксации в течение 300 с ансамбля МЭАП-I в темноте и при подсветке различной интенсивности

Ансамбли МЭАП	$N(0)$ отн. ед.	$\tau_0, \text{с}$	β
МЭАП-I	0.57	2520	0.77
МЭАП-I после частичной релаксации:			
в темноте	0.47	2880	0.81
при подсветке $0.5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$	0.44	2920	0.82
при подсветке $1.3 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$	0.42	2820	0.8
при подсветке $10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$	0.40	2680	0.77

ных состояний существенно превышает скорость их фотоиндуцированного образования. Выполнение этого условия зависит от начальной концентрации фотоиндуцированных метастабильных состояний, интенсивности и длительности подсветки. Проведенные исследования показывают также, что изменения функции распределения $f(\tau)$ в ансамбле фотоиндуцированных метастабильных состояний вследствие термической и фотоиндуцированной релаксации подобны. Это указывает на идентичные механизмы термической и фотоиндуцированной релаксации.

Работа выполнена при поддержке программы „Интеграция“.

Список литературы

- [1] D. Redfield. Appl. Phys. Lett., **52**, 492 (1988).
- [2] R. Meaudre, M. Meaudre. Phys. Rev. B, **45**, 12 135 (1992).
- [3] H. Gleskova, P.A. Morin, S. Wagner. Appl. Phys. Lett., **62**, 2063 (1993).
- [4] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, А.Л. Громадин. ФТП, **37**, 142 (2003).
- [5] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, А.Л. Громадин. ФТП, **37**, 753 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

Photo-induced relaxation of metastable states in $a\text{-Si:H(B)}$

N.N. Ormont, I.A. Kurova, G.V. Prokofyev

Faculty of Physics, Moscow State University,
119992 Moscow, Russia

Abstract The thermal relaxation kinetics of the ensemble of photo-induced metastable electrically active B atoms in $a\text{-Si:H(B)}$ films was investigated after its partial relaxation in the darkness and under the light of different intensity and duration. The parameters of the stretched exponent, that approximates the relaxation kinetics of this ensembles, were calculated. It was found that photo-induced relaxation of metastable states can be essential provided that its rate is higher then the rate of their photo-induced generation. It was obtained, that due to the thermal and photo-induced relaxation the variations of the distribution function in ensemble of metastable states are similar.