

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

**Особенности фотоиндуцированной релаксации метастабильных дефектов в аморфном гидрированном кремнии**И. А. Курова, Н. Н. Ормонт<sup>а</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики полупроводников. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. E-mail: <sup>а</sup>ormont@phys.msu.ru*

Проведены измерения кинетики термической релаксации медленных фотоиндуцированных метастабильных дефектов (МД) в а-Si:H до и после их частичной релаксации в темноте и при подсветке. Установлено, что подсветка изменяет скорость релаксации МД и их распределение по временам релаксации. Показано, что это обусловлено наличием при подсветке как процесса фотоиндуцированной релаксации, так и процесса фотоиндуцированного образования МД.

PACS: 61.43.Dq, 71.23.Cq, 71.55.Jv.

*Ключевые слова:* гидрированный аморфный кремний (а-Si:H), фотоиндуцированные метастабильные дефекты, фотоиндуцированная релаксация, растянутая экспонента.

Статья поступила 30.01.2008, подписана в печать 12.03.2008.

Фотоиндуцированная релаксация метастабильных дефектов (МД) в аморфном гидрированном кремнии (а-Si:H) сначала была предсказана теоретически [1] и затем экспериментально обнаружена в легированных пленках а-Si:H [2]. Однако до настоящего времени нет ясного понимания механизма релаксации фотоиндуцированных МД при наличии подсветки.

Целью настоящей работы было установление особенностей процесса релаксации медленных фотоиндуцированных МД в слабо легированных бором пленках а-Si:H в условиях подсветки при температурах выше комнатной.

В работе проводилось исследование кинетики релаксации фотоиндуцированных МД, созданных сильным освещением пленок а-Si:H. Измерения проводились в темноте и при слабой подсветке пленки. Исследовалась также кинетика термической релаксации фотоиндуцированных МД после их частичной релаксации в темноте или при слабой подсветке. Все измерения проводились при температуре 410 К.

Кинетика термической релаксации массива фотоиндуцированных МД обычно описывается растянутой экспонентой

$$N(t) = N(0) \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_0}\right)^\beta\right). \quad (1)$$

Параметры термической релаксации массива МД  $N(0)$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$  имеют следующий смысл:  $N(0)$  — полная начальная концентрация МД,  $\tau_0$  — эффективное время релаксации массива МД,  $\beta$  — параметр, определяемый обратной величиной полуширины функции  $f(\tau)$  — функции распределения МД по временам релаксации  $\tau$  [3]. Сравнение параметров термической релаксации массива фотоиндуцированных МД, предварительно созданных сильным освещением пленки, после его частичной релаксации в темноте или при подсветке дает информацию о процессах изменения массива МД при релаксации в темноте и при подсветке.

Кинетика изменения концентрации МД  $N_{\text{МД}}(t)$  определялась путем измерения временной зависимости темновой проводимости пленки  $\sigma_d(t)$  в процессе релаксации и рассчитывалась по формуле

$$N_{\text{МД}}(t) = A \lg \left[ \frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}} \right], \quad (2)$$

где  $\sigma_{d0}$  — равновесная темновая проводимость, а величина  $A$  определяется температурой и плотностью состояний в области смещения уровня Ферми в щели подвижности при релаксации МД [4].

На рис. 1 показана кинетика изменения концентрации фотоиндуцированных МД, созданных при освещении пленки белым светом с интенсивностью  $100 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  в течение 300 с (начальный массив МД), в процессе их релаксации в темноте (кривая 1) и при наличии слабой подсветки с интенсивностями  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 2) и  $5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 3). Концентрация метастабильных дефектов  $N_{\text{МД}}$  рассчитывалась по формуле (2) и приведена в относительных единицах. Из рис. 1 видно, что скорость изменения концентрации МД уменьшается со временем и зависит от интенсивности подсветки. При больших длительностях релаксации в условиях подсветки концентрация МД стремится к постоянной величине, определяемой интенсивностью подсветки и превышающей равновесное значение концентрации МД. Равновесная концентрация МД устанавливается в темноте и при значительно больших временах.

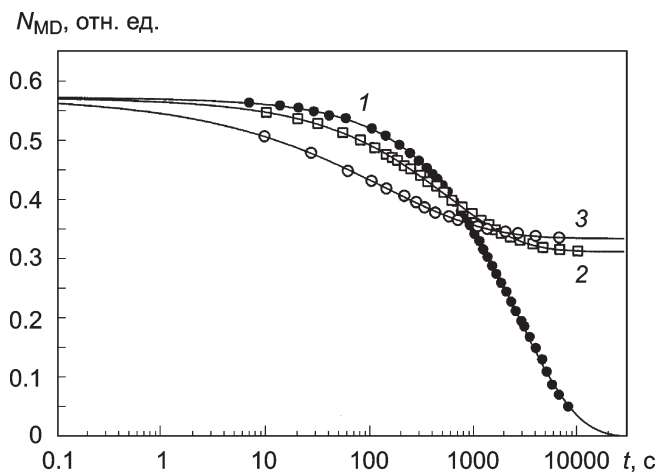


Рис. 1. Кинетика релаксации МД начального массива в темноте (кривая 1) и при подсветке разной интенсивности:  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 2) и  $5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 3)

Сплошные линии 1, 2 и 3 (рис. 1), на которые хорошо ложатся экспериментальные точки, отвечают растянутым экспонентам с разными параметрами. Дифференцируя кривые 1, 2 и 3 по времени, получаем соответственно временные зависимости скоростей изменения полной концентрации МД при релаксации начального массива МД в темноте ( $V_1(t)$ ) и в условиях подсветки с интенсивностями  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  ( $V_2(t)$ ) и  $5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  ( $V_3(t)$ ). На рис. 2 кривые 1, 2 и 3 соответствуют временным зависимостям скоростей  $V_1(t)$ ,  $V_2(t)$  и  $V_3(t)$ . Видно, что скорости изменения концентрации МД при подсветке ( $V_2$  и  $V_3$ ) зависят от интенсивности подсветки и при малых временах превышают скорость  $V_1$ . Скорости  $V_2$  и  $V_3$ , быстро уменьшаясь со временем, сравниваются со скоростью  $V_1$  при временах  $t_2 = 150 \text{ с}$  и  $t_3 = 110 \text{ с}$ , что более четко видно на вставке рис. 2. Далее скорости  $V_2$  и  $V_3$  становятся меньше  $V_1$  и стремятся к нулю при временах, когда устанавливается стационарная концентрация МД. Стационарная концентрация МД определяется равенством скоростей генерации и релаксации МД в условиях подсветки.

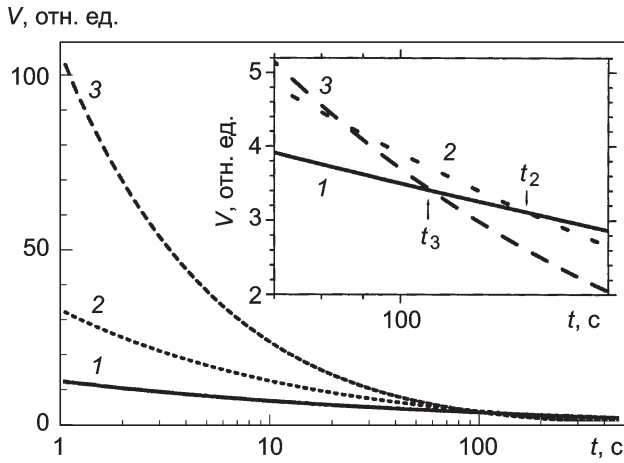


Рис. 2. Временные зависимости скорости изменения концентрации МД начального массива в темноте (кривая 1) и при наличии подсветки с интенсивностями  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 2) и  $5 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 3). На вставке представлены эти зависимости в интервале времен  $70 \div 180 \text{ с}$  в увеличенном масштабе

На рис. 3, а-г показаны временные зависимости изменения концентрации фотоиндуцированных МД начального массива при их термической релаксации (кривые 1). Кривые 2 и 3 на рис. 3, а-г отражают кинетику термической релаксации фотоиндуцированных МД после частичной изохронной релаксации начального массива МД в темноте (кривые 2) и при подсветке  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривые 3). Длительности частичной релаксации начального массива МД составляли 60 с (рис. 3, а), 100 с (рис. 3, б), 300 с (рис. 3, в) и 1200 с (рис. 3, г). Сплошные линии на рисунке отвечают растянутым экспонентам с параметрами  $N(0)$ ,  $\tau_0$ ,  $\beta$ , значения которых приведены в таблице.

Из таблицы видно, что:

1) при увеличении времени предварительной релаксации начального массива МД в темноте уменьшается  $N(0)$ , а параметры  $\tau_0$  и  $\beta$  увеличиваются. Это указывает на то, что при релаксации в темноте уменьшение концентрации МД сопровождается уменьшением  $\beta^{-1}$ ,

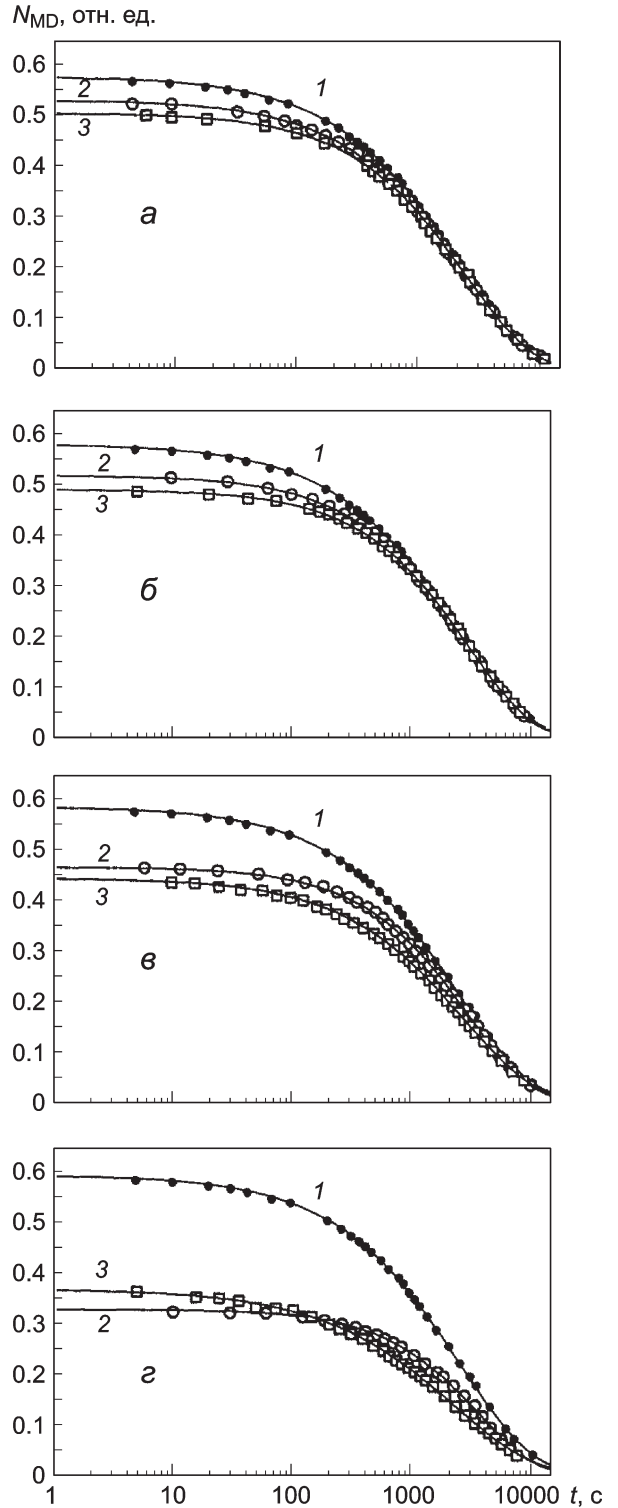


Рис. 3. Кинетика термической релаксации МД начального массива (кривые 1) и массивов МД, полученных в результате частичного отжига начального массива в течение 60 с (а), 100 с (б), 300 с (в) и 1200 с (г) в темноте (кривые 2) и при подсветке с интенсивностью  $1.2 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривые 3)

т.е. уменьшением полуширины функции распределения МД по  $\tau$ , а также увеличением эффективного времени релаксации  $\tau_0$ , что может быть связано с преимущественной релаксацией МД с малыми временами релаксации;

**Параметры термической релаксации начального массива МД и массивов МД, полученных после его частичной релаксации в темноте и при подсветке  $1.2 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$**

Массивы МД	$N(0)$ , отн. ед.		$\tau_0$ , с		$\beta$	
	В темноте	При подсветке	В темноте	При подсветке	В темноте	При подсветке
Начальный	0.583		2430		0.72	
После релаксации начального массива МД в течение						
60 с	0.536	0.510	2640	2800	0.74	0.78
100 с	0.521	0.493	2730	3000	0.80	0.82
300 с	0.464	0.442	2950	2700	0.85	0.74
1200 с	0.320	0.360	3470	2200	0.92	0.66

2) параметры  $N(0)$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$  при термической релаксации МД после частичной релаксации начального массива МД в темноте и при наличии подсветки различны. Эти различия зависят от длительности частичной релаксации начального массива МД. При малых длительностях релаксации (60 с и 100 с) концентрация  $N(0)$  уменьшается, а  $\tau_0$  и  $\beta$  увеличиваются как в темноте, так и при наличии подсветки, только в условиях подсветки эти изменения больше по величине. При дальнейшем увеличении длительности предварительной релаксации в темноте (300 с и 1200 с) величина  $N(0)$  продолжает уменьшаться, а параметры  $\tau_0$  и  $\beta$  увеличиваться. При подсветке же величина  $N(0)$  уменьшается, но в меньшей степени, и после релаксации начального массива МД в течение 1200 с она становится больше, чем  $N(0)$  после такой же по времени релаксации в темноте. При этом параметры  $\tau_0$  и  $\beta$  не увеличиваются, как после релаксации в темноте, а уменьшаются.

Представленные в таблице экспериментальные данные могут быть обусловлены тем, что при релаксации МД в условиях подсветки при временах, превышающих 100 с, начинает проявляться процесс фотоиндуцированного образования МД с малыми временами релаксации. В результате этого уменьшается эффективное время релаксации  $\tau_0$  и увеличивается полуширина функции распределения МД по  $\tau$ . Это объяснение экспериментальных данных по изменению параметров кинетики термической релаксации основного массива МД после его частичной релаксации в темноте и при подсветке согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2.

Действительно, на рис. 2 представлены временные зависимости скорости изменения концентрации МД начального массива в темноте ( $V_1(t)$ ) и при подсветке с интенсивностями  $1.2 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$  ( $V_2(t)$ ) и  $5 \text{ мВт}\cdot\text{см}^{-2}$  ( $V_2(t)$ ). На вставке рис. 2 видно, что скорость  $V_2$  (интенсивность подсветки та же, что и для данных рис. 3) при  $t > 150$  с становится меньше скорости  $V_1$ . Скорости  $V_1$  и  $V_2$  определяются как разности скоростей релаксации и генерации МД соответственно в темноте и при подсветке [1]. Скорость генерации МД в темноте

при  $t = 150$  с меньше скорости термической релаксации, поэтому скорость  $V_1$  определяется только скоростью термической релаксации. Следовательно, в условиях подсветки скорость  $V_2$ , равная разности скоростей световой релаксации и световой генерации МД, при временах больших 150 с становится меньше скорости термической релаксации МД. Это может быть обусловлено тем, что скорость генерации МД подсветкой становится сравнимой по величине со скоростью световой релаксации МД.

Итак, в работе показано, что различие временных зависимостей скоростей изменения концентрации фотоиндуцированных МД в слабо легированных бором пленках a-Si:H в темноте и в условиях слабой подсветки обусловлено как разными временными зависимостями световой и термической скоростей релаксации МД, так и наличием световой генерации МД при подсветке.

Установлено также, что кинетика термической релаксации начального массива фотоиндуцированных МД после его частичной изохронной релаксации в темноте и в условиях слабой подсветки описывается растянутой экспонентой с различными параметрами  $N(0)$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$ , которые зависят от условий и длительности предварительной релаксации. При больших длительностях релаксации в условиях подсветки параметры термической релаксации МД — меняются аномально: концентрация МД уменьшается, при этом эффективное время релаксации  $\tau_0$  также уменьшается, а полуширина функции распределения МД по  $\tau$  увеличивается. Эти аномальные изменения параметров могут быть обусловлены генерацией МД при подсветке с малыми временами термической релаксации.

#### Список литературы

1. Redfield D. // Appl. Phys. Lett. 1988. **52**. P. 492.
2. Gleskova H., Morin P.A., Wagner S. // Appl. Phys. Lett. 1993. **62**. P. 2063.
3. Redfield D. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1992. **258**. P. 341.
4. Rath J.K., Fuhs W., Mell H. // J. Non-Cryst. Sol. 1991. **137–138**. P. 279.

**Peculiarities of photoinduced relaxation of metastable defects in hydrogenated amorphous silicon****I. A. Kurova, N. N. Ormont<sup>a</sup>***Department of Semiconductor Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: <sup>a</sup>ormont@phys.msu.ru.*

Thermal relaxation kinetics of slow photo-induced metastable defects in a-Si:H was measured before and after their partial relaxation in the dark and under weak illumination. It was shown that weak illumination changes the relaxation rate of metastable defects and their relaxation time distribution. It is proved that this effect is caused by the existence of photo-induced relaxation process and photo-induced formation of metastable defects under weak illumination.

PACS: 61.43.Dq, 71.23.Cq, 71.55.Jv.

*Keywords:* hydrogenated amorphous silicon(a-Si:H), photoinduced metastable defects, photoinduced relaxation, stretched-exponential relaxation.*Received 30 January 2008.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)*Сведения об авторах*

1. Курова Ида Александровна — к. ф.-м. н., ст. научн. сотр.; тел.: 939-39-17.

2. Ормонт Наталия Николаевна — к. ф.-м. н., ст. научн. сотр.; тел.: 939-39-17, e-mail: ormont@phys.msu.ru.