

Фотоиндуцированный отжиг метастабильных дефектов в легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* Гиредмет,
109017 Москва, Россия

(Получена 17 мая 2002 г. Принята к печати 27 июня 2002 г.)

Исследовано влияние подсветки на изотермическую релаксацию медленных фотоиндуцированных метастабильных дефектов (метастабильных электрически активных атомов примеси) в пленках $a\text{-Si:H}$, легированных бором. Было установлено, что при наличии подсветки кинетику релаксации этих метастабильных дефектов определяют не только процессы термического отжига и фотоиндуцированного образования, но и процесс фотоиндуцированного отжига.

В последнее время в ряде работ исследовался фотоиндуцированный отжиг метастабильных оборванных связей кремния (МОС) в нелегированных пленках $a\text{-Si:H}$. Сначала этот процесс был предсказан теоретически. Так, в работе [1] было предположено, что в уравнение кинетики кроме процессов фотоиндуцированного образования метастабильных дефектов и их термического отжига необходимо включить еще два симметричных процесса — термическое образование и фотоиндуцированный отжиг. Затем в экспериментальных работах [2–4] было установлено наличие в нелегированных пленках $a\text{-Si:H}$ фотоиндуцированного отжига МОС, проявляющегося в увеличении скорости их отжига в начальный период времени релаксации. Было установлено также, что скорость отжига МОС при данном значении их концентрации N пропорциональна скорости генерации носителей G в степени γ , величина которой совпадает с величиной показателя степени люкс-амперной характеристики. По мнению авторов, это может указывать на то, что фотоиндуцированный отжиг МОС пропорционален концентрации свободных носителей заряда и связан с захватом дырки на метастабильный центр [4].

Известно, что в легированных пленках $a\text{-Si:H}$ при освещении образуются два типа метастабильных дефектов — быстрые и медленные. Быстрыми дефектами являются МОС, медленными — МЭАП (метастабильные электрически активные атомы примеси или их комплексы) [5,6]. Работы, в которых бы наблюдался фотоиндуцированный отжиг МЭАП, нам не известны. Поэтому в настоящей работе исследовалось влияние освещения на изотермическую релаксацию фотоиндуцированных МЭАП в легированных бором пленках $a\text{-Si:H}$ с целью изучения фотоиндуцированного отжига.

При изменении концентрации МОС и МЭАП в результате их образования или релаксации меняется положение уровня Ферми в запрещенной зоне и, следовательно, величина темновой проводимости (ТП) материала σ_d . При условии постоянства плотности состояний в области смещения уровня Ферми в запрещенной зоне

$a\text{-Si:H}$ кинетика изменения ТП отражает кинетику изменения концентрации метастабильных состояний $N(t)$ [7]:

$$|\ln(\sigma_d(t)/\sigma_{d0})| = |\Delta F(t)|/kT = N(t)/\rho_0 \cdot kT.$$

Здесь σ_{d0} — равновесная ТП, $|\Delta F(t)|$ — абсолютное значение смещения уровня Ферми относительно равновесного положения, ρ_0 — плотность состояний в области движения уровня Ферми.

Для исследования были выбраны пленки $a\text{-Si:H}$, слабо легированные бором. Полная концентрация бора в них, определенная методом SIMS, составляла $(3-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, уровень Ферми находился на 0.79 эВ выше потолка валентной зоны. В этом случае уровень Ферми расположен в области достаточно широкого минимума плотности состояний, где $\rho(E)$ можно считать практически постоянной и равной ρ_0 . Кроме того, в слабо легированном бором материале величина ρ_0 мала по сравнению с ρ_0 для более сильно легированного материала [8]. Это позволяет при той же концентрации созданных метастабильных состояний N получать большее изменение ТП и, следовательно, иметь большую точность определения зависимости $N(t)$.

На рис. 1 показана кинетика изменения ТП одной из исследованных пленок $a\text{-Si:H}$ с концентрацией бора $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ после ее предварительного освещения в течение 10 мин при $T = 410 \text{ К}$. Видно немонотонное изменение величины $\ln(\sigma_d(t)/\sigma_{d0})$, что обусловлено релаксацией фотоиндуцированных МОС и МЭАП, энергетические уровни которых расположены соответственно выше и ниже уровня Ферми. Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую 3, которую можно рассматривать как сумму двух растянутых экспонент с разными параметрами $N(0)$, τ_0 и β (кривые 1 и 2), представляющих быструю релаксацию МОС и медленную — МЭАП и обуславливающих увеличение ТП при малых значениях t и уменьшение ТП при больших t :

$$\begin{aligned} \ln(\sigma_d(t)/\sigma_{d0}) &= N_1(0) \exp[-(t/\tau_{01})^{\beta_1}] + N_2(0) \exp[-(t/\tau_{02})^{\beta_2}]. \end{aligned}$$

Индексы 1 и 2 относятся соответственно к релаксации МОС и МЭАП. Параметры растянутых экспонент приведены в подписи к рисунку.

[¶] E-mail: scon282@phys.msu.ru

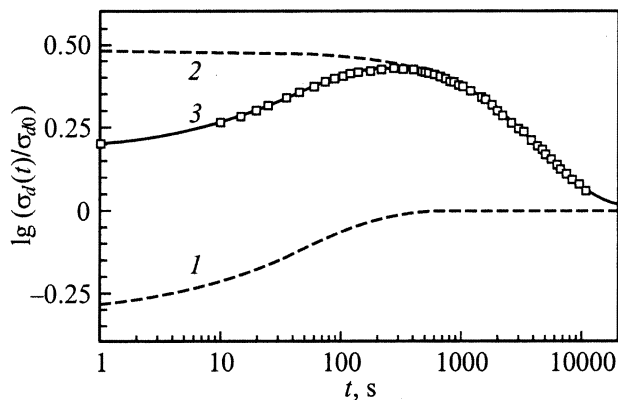


Рис. 1. Кинетика изменения ТП пленки $a\text{-Si:H}$ с концентрацией бора $N_B = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ после ее предварительного освещения белым светом с интенсивностью $90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^2$ в течение 10 мин при $T = 410 \text{ К}$ (экспериментальные точки). Кривая 3 описывается суммой двух растянутых экспонент (I и 2), соответствующих изотермической релаксации в темноте фотоиндуцированных ансамблей МОС I и МЭАП I. Параметры растянутых экспонент имеют следующие значения: $N_1(0) = -0.3$, $\tau_{01} = 51$, $\beta_1 = 0.66$ (кривая I); $N_2(0) = 0.49$, $\tau_{02} = 4800$, $\beta_2 = 0.85$ (кривая 2).

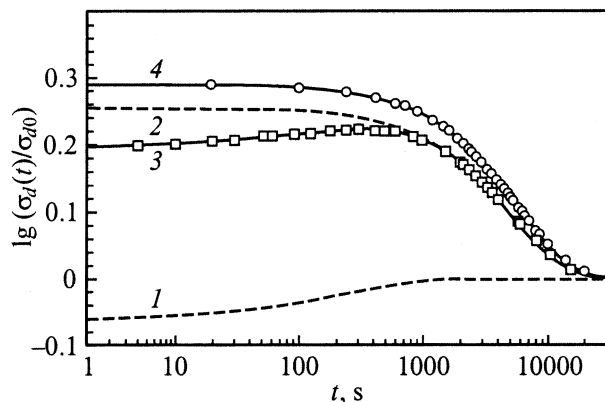


Рис. 2. Кинетика изменения ТП той же пленки $a\text{-Si:H(B)}$ после ее предварительного освещения в течение 10 мин при $T = 410 \text{ К}$ и последующей частичной изотермической релаксации в течении 40 мин в темноте (экспериментальные точки на кривой 4) или при слабой подсветке (экспериментальные точки на кривой 3). Кривые 4 , 1 и 2 — растянутые экспоненты, описывающие изотермическую релаксацию в темноте соответственно ансамблей МЭАП II, МОС III и МЭАП III, со следующими параметрами: $N_1(0) = -0.06$, $\tau_{01} = 240$, $\beta_1 = 0.68$ (кривая I); $N_2(0) = 0.25$, $\tau_{02} = 5200$, $\beta_2 = 1$ (кривая 2); $N_3(0) = 0.29$, $\tau_{03} = 5700$, $\beta_3 = 0.95$ (кривая 4).

То, что изотермическая релаксация метастабильных дефектов данного типа описывается растянутой, а не простой экспонентой, означает, что мы имеем дело с совокупностью этих дефектов с разными временами релаксации τ . При этом параметры растянутой экспоненты имеют следующий смысл: $N(0)$ — полная началь-

ная концентрация метастабильных дефектов с функцией распределения по временам релаксации, имеющей максимум при $\tau = \tau_0$ и полуширину, которая характеризуется обратной величиной параметра β . Таким образом, параметры $N(0)$, τ_0 и β определяют ансамбль метастабильных дефектов в начальный момент отжига.

Согласно с этим, для изучения фотоиндуцированного отжига мы определяли параметры $N(0)$, τ_0 и β изотермической релаксации трех ансамблей МЭАП и проводили их сравнение. Ансамбль I был получен при освещении отожженной пленки $a\text{-Si:H}$ светом с интенсивностью $90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение 10 мин при $T = 410 \text{ К}$. Ансамбли II и III были получены в результате изотермической релаксации ансамбля I в течение одного и того же времени (40 мин) соответственно в темноте и при наличии слабой подсветки ($8 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$).

Кинетика изменения ТП пленки, обусловленная релаксацией МЭАП ансамбля I, представлена кривой 2 на рис. 1. Параметры, характеризующие этот ансамбль в начальный момент отжига, приведены в таблице. На рис. 2 приведена кинетика изменения ТП пленки, обусловленная релаксацией ансамбля II (кривая 4). Видно, что релаксация ансамбля II описывается одной растянутой экспонентой, соответствующей релаксации МЭАП. Таким образом, отожглись практически все МОС ансамбля I и ансамбль МОС II отсутствует. Параметры, характеризующие ансамбль МЭАП II, приведены в таблице. Из сравнения параметров для ансамблей МЭАП I и МЭАП II видно, что изотермический отжиг ансамбля МЭАП I в темноте приводит к уменьшению полной концентрации МЭАП ансамбля I (уменьшению $N(0)$), уменьшению полуширины ансамбля (увеличению β) и увеличению эффективного времени релаксации τ_0 . Последнее обусловлено тем, что термически отжигаются в первую очередь МЭАП с малыми временами τ .

Кинетика изменения ТП, обусловленная изотермической релаксацией в темноте метастабильных дефектов ансамбля III, полученного при изотермическом отжиге ансамбля I в условиях подсветки, представлена кривой 3 на рис. 2. Видно, что наличие подсветки при отжиге ансамбля I приводит к образованию ансамбля МОС III наряду с ансамблем МЭАП III и, следовательно, немонотонной кинетике изменения ТП. Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую 3, которая представляет собой сумму двух растянутых экспонент (кривые 1 и 2). Параметры растянутой экспоненты, характеризующей ансамбль МЭАП III, приведены в таблице.

Сравнение параметров для ансамблей МЭАП II и III показывает, что присутствие подсветки при термическом

Ансамбли МЭАП	$N(0)$, отн. ед.	τ_0 , с	β
I	0.49	4800	0.85
II	0.29	5700	0.95
III	0.25	5200	1

отжиге приводит к уменьшению полной концентрации МЭАП (уменьшению $N(0)$). Это указывает на наличие фотоиндуцированного отжига МЭАП, особенно при учете дополнительного фотоиндуцированного образования МЭАП при подсветке. Из таблицы видно также, что значение параметра τ_0 для ансамбля МЭАП III стало меньше, чем τ_0 для ансамбля МЭАП II. Это указывает на то, что фотоиндуцированный отжиг проявляется в уменьшении концентрации МЭАП с большими временами релаксации τ . Это может быть связано с тем, что скорость образования МЭАП с большими временами релаксации τ под влиянием подсветки существенно меньше, чем скорость образования МЭАП с малыми τ , в согласии с моделью образования МЭАП, основанной на трехуровневой конфигурационной диаграмме [9].

Релаксация МЭАП в исследуемых пленках a -Si:H обусловлена структурной перестройкой, заключающейся в переходе четырехкоординированного электрически активного атома примеси, в нашем случае акцепторной примеси бора, в электрически неактивный комплекс, состоящий из трехкоординированного атома бора и водорода, связанного с атомом кремния. Для решения вопроса о механизме увеличения скорости такой структурной перестройки под влиянием света требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

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

Работа поддержана программой „Университеты России — фундаментальные исследования“ и научной программой ГНЦ „Гиредмет“.

Список литературы

- [1] D. Redfield. Appl. Phys. Lett., **52**, 492 (1988).
- [2] R. Meaudre, M. Meaudre. Phys. Rev. B, **45**, 12 134 (1992).
- [3] H. Gleskova, P.A. Morin, S. Wagner. Appl., Phys. Lett., **62**, 2063 (1993).
- [4] H. Gleskova, S.N. Bullock, S. Wagner. J. Non-Cryst. Sol., **164–166**, 183 (1993).
- [5] X.M. Dong, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, **36**, 9778 (1987).
- [6] И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко. ФТП, **31**, 1455 (1997).
- [7] J.K. Rath, W. Fuhs, H. Mell. J. Non-Cryst. Sol., **137–138**, 279 (1991).
- [8] S. Sheng, X. Liao, G. Kong. Appl. Phys. Lett., **78**, 2509 (2001).
- [9] A.G. Kazanskii, I.A. Kurova, N.N. Ormont, I.P. Zvyagin. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 306 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

Light-induced annealing of metastable defects in boron-doped a -Si:H films

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

Moscow State University, Physics Faculty,
119899 Moscow, Russia

* Giredmet,
109017 Moscow, Russia

Abstract The effect of illumination on the isothermal relaxation of slow light-induced metastable defects (metastable electrically active impurity atoms) in B-doped a -Si:H films has been investigated. It is shown that at low illumination intensity the kinetic of metastable defect relaxation is determined not only by the processes of thermal annealing and light-induced creation, but also by the light-induced annealing of metastable defects.