

Релаксация фотоиндуцированных метастабильных состояний в пленках α -Si:H, выращенных при высоких температурах

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, О.А. Голикова*, М.М. Казанин*

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

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 апреля 1998 г. Принята к печати 15 апреля 1998 г.)

Приведены результаты исследования кинетики темновой проводимости пленок α -Si:H, полученных при температурах $T_s = 300 \div 390^\circ\text{C}$, после кратковременной засветки и в процессе длительной засветки. Получены данные о релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний, связанных с положением равновесного уровня Ферми.

Кинетика образования и релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний (ФМС) в пленках α -Si:H исследовалась в ряде работ [1,2]. В последние годы внимание исследователей привлекают ФМС в пленках, полученных при различных условиях роста [3,4]. В настоящей работе изучалась кинетика образования и релаксация ФМС в пленках α -Si:H, полученных методом радиочастотного тлеющего разряда при высоких температурах подложки: $T_s \geq 300^\circ\text{C}$ [5].

Кинетика изменения концентрации ФМС в пленках α -Si:H во время и после выключения освещения определялась методом, описанным в [6]. Предполагалось, что плотность состояний вблизи уровня Ферми постоянна в процессе изменения во времени t темновой проводимости $\sigma_d(t)$. В этом случае смещение уровня Ферми, пропорциональное логарифму отношения темновой проводимости к ее равновесному значению при данной температуре, σ_{d0} , определяется концентрацией ФМС:

$$\Delta F(t) = kT \ln[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}] = N(t)/\rho_0(E_F), \quad (1)$$

где ρ_0 — постоянная плотность состояний в области $F_0 + \Delta F$ (F_0 — исходный уровень Ферми), N — концентрация ФМС.

Знак ΔF , т.е. движение уровня Ферми вверх или вниз по запрещенной зоне, определяется тем, как расположены ФМС относительно исходного равновесного уровня Ферми. Так, в легированных пленках образование ФМС (в данном случае фотоиндуцированных нейтральных оборванных связей — ФОС) вблизи середины запрещенной зоны при положении F_0 в верхней половине запрещенной зоны приводит к понижению уровня Ферми и уменьшению темновой проводимости [1], отжиг ФОС после выключения освещения — к повышению σ_d . Увеличение числа электрически активных примесных состояний при освещении обуславливает рост темновой проводимости в легированных пленках в результате движения уровня Ферми к соответствующим зонам. Деактивация примесей сопровождается уменьшением темновой проводимости. Следует отметить, что процессы, связанные с активацией и деактивацией примесей, более медленные, поэтому реально они наблюдаются при

более высоких температурах, чем процессы, связанные с ФОС [7]. В случае образования или релаксации нескольких типов ФМС в различных энергетических интервалах запрещенной зоны выше и ниже F_0 кинетика изменения темновой проводимости может быть немонотонной. В таблице приведены некоторые параметры исследованных пленок, имеющих различную энергию активации темновой проводимости E_σ [8]. Положение уровня Ферми дано при температуре $T = 370\text{ K}$; оно определялось при значении $\sigma_{\min} = 2 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ из соотношения $E_c - F_0 = kT \ln(\sigma_{\min}/\sigma_{d0})$, где σ_{d0} — темновая проводимость пленки при данной температуре.

Параметры пленок α -Si:H

№ пленки	$T_s, ^\circ\text{C}$	$E_\sigma, \text{эВ}$	$E_c - F_0, \text{эВ}$ ($T = 370\text{ K}$)	$E_1, \text{эВ}$	$E_2, \text{эВ}$
1	300	0.71	0.57	1.1	1.5
2	340	0.82	0.64	1.0	1.5
3	390	0.87	0.70	1.1	—

На рис. 1 показана кинетика изменения темновой проводимости пленок 1–3 после их освещения при $T = 405\text{ K}$ в течение 15 с белым светом с интенсивностью $W = 90 \text{ мВт/см}^2$. Видно, что кривые релаксации σ_d для пленок 1 и 2 немонотонны, т.е. сначала идет возрастание, затем медленное уменьшение σ_d в зависимости от времени t . Для пленки 3 наблюдается монотонное уменьшение σ_d . Характер кривых релаксации соответствует изменениям σ_d этих пленок при освещении. На рис. 2 показана кинетика изменения σ_d в процессе освещения: монотонное увеличение σ_d со временем освещения t_{ill} для пленки 3, и немонотонное изменение σ_d для пленки 1.

Для пленки 3 во всем исследованном интервале температур $360 \div 430\text{ K}$ при временах освещения t_{ill} до $2 \cdot 10^3$ с наблюдалась монотонная релаксация σ_d , а следовательно, — ФМС. В этом случае релаксация ФМС описывалась одной "растянутой" экспонентой $N = A \exp(-t/\tau)^\beta$, где параметры τ и β зависят от

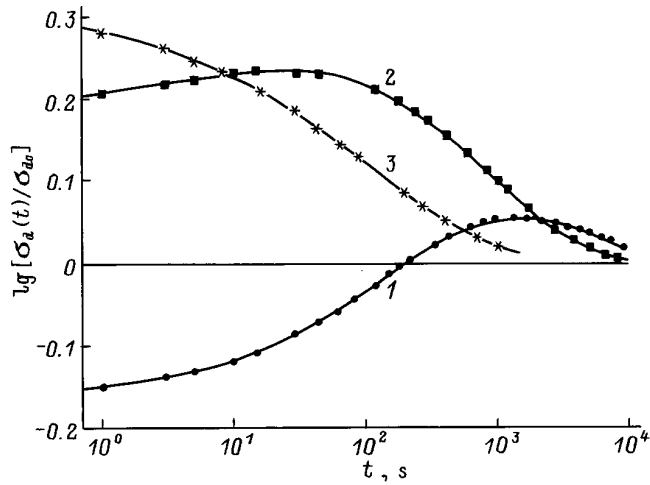


Рис. 1. Кинетика релаксации темновой проводимости пленок 1, 2 и 3 (соответственно 1, 2 и 3) после их освещения при $T = 405$ К в течение 15 с.

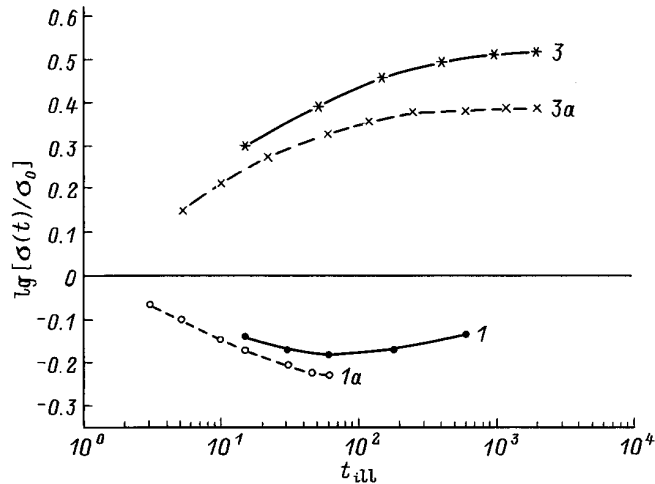


Рис. 2. Кинетика изменения темновой проводимости пленок 1 и 3 (1, 3) и их фотопроводимости (1а, 3а) в процессе освещения при 405 К.

температуры (рис. 3, 4). Немонотонная релаксация σ_d , а следовательно, ФМС для пленок 1 и 2 описывалась суммой двух "растянутых" экспонент с различными параметрами τ_1 , β_1 и τ_2 , β_2 . Индекс 1 относится к кратковременной релаксации ФМС, при которой происходит увеличение σ_d , индекс 2 относится к длинновременной релаксации ФМС с уменьшением σ_d до равновесного значения. Как уже указывалось, первый из процессов, по-видимому, связан с ФОС, второй — с примесями.

На рис. 3 и 4 показаны температурные зависимости τ и β для пленок 1–3, определенные из кинетики релаксации σ_d . Видно, что полученные значения параметра τ для всех пленок экспоненциально зависят от температуры, $\tau \sim \exp(-E/kT)$, причем энергия кратковременного отжига ФМС (E_1) для пленок 1 и 2 меньше, чем для длинновременного (E_2): $E_1 \approx 1.1 \div 1.0$ эВ и $E_2 \approx 1.5$ эВ

(см. таблицу). Для пленки 3 с монотонной релаксацией ФМС энергия их отжига составляет 1.1 эВ, т.е. совпадает с величинами E_1 , полученными для пленок 1 и 2. Более того, температурная зависимость параметра β для пленки 3 аналогична температурной зависимости β для пленок 1 и 2. Таким образом, монотонная релаксация ФМС в пленке 3 — быстрый процесс, связанный с ФОС. Отметим, что для пленки 3, в отличие от пленок 1 и 2, при образовании ФОС темновая проводимость увеличивается, а при их релаксации уменьшается. Мы полагаем, что это определяется более глубоким расположением равновесного уровня Ферми F_0 в запрещенной зоне

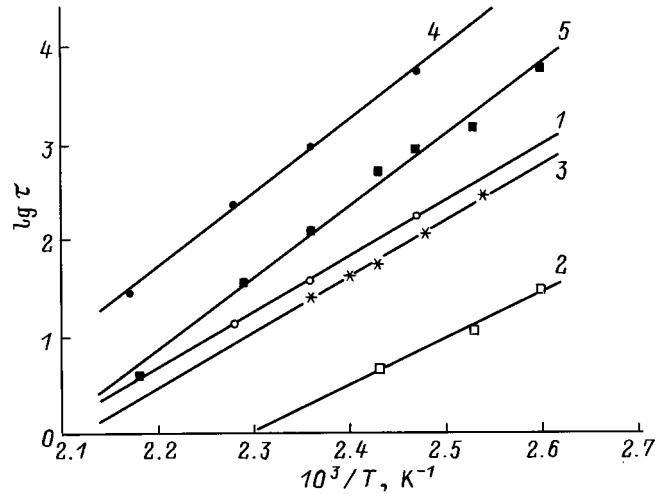


Рис. 3. Температурные зависимости параметров τ процессов релаксации ФМС пленок 1, 2, 3. 1, 2 — τ_1 , 4, 5 — τ_2 , определенные для σ_d пленок 1 и 2 соответственно. 3 описывает монотонную релаксацию ФМС пленки 3. Время освещения $t_{\text{ill}} = 15$ с.

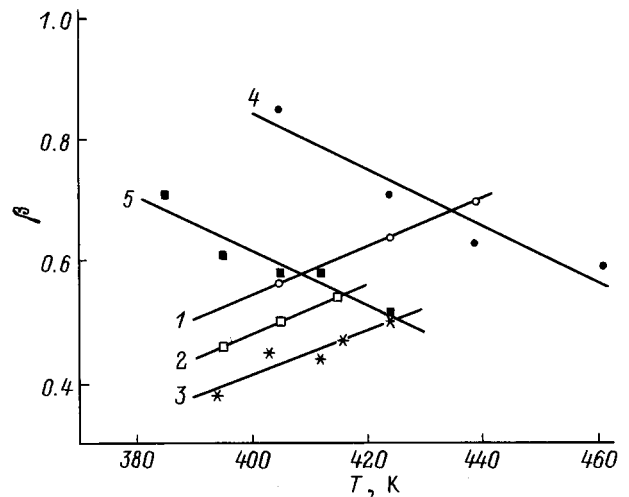


Рис. 4. Температурные зависимости параметров β процессов релаксации ФМС пленок 1, 2, 3. 1, 2 — β_1 , 4, 5 — β_2 , определенные для σ_d пленок 1 и 2 соответственно. 3 описывает монотонную релаксацию ФМС пленки 3. Время освещения $t_{\text{ill}} = 15$ с.

пленки 3 (см. таблицу). Вследствие этого нейтральные ФОС образуются выше F_0 и действуют как доноры, отдавая электроны. В результате уровень Ферми движется вверх к зоне проводимости, и темновая проводимость в пленке 3 увеличивается при освещении, соответственно релаксация ФОС сопровождается уменьшением σ_d . В пленке 1 уровень Ферми расположен выше энергетических уровней ФОС, которые действуют в этом случае как акцепторы. В результате при освещении пленки 1 уровень Ферми движется вниз и темновая проводимость уменьшается. Изменение фотопроводимости пленок 1 и 3 в процессе освещения также имеет разные знаки: процесс изменения фотопроводимости для пленки 1 имеет отрицательный знак, а для пленки 3 — положительный (рис. 2). Таким образом, фотопроводимость пленки 3 также изменяется аномально, т.е. растет со временем, что объясняется движением уровня Ферми вверх.

Медленные процессы изменения σ_d пленок 1 и 2 в процессе освещения и после его выключения могут быть обусловлены активацией и деактивацией неконтролируемых примесей донорного типа, вероятно, O, N, C. Такие процессы не наблюдались при исследованиях пленки 3, что может быть обусловлено более низкой концентрацией неконтролируемых примесей вследствие более высокой температуры роста этой пленки.

Работа была поддержана грантом INTAS N 931916.

Список литературы

- [1] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. Phys. Rev. B, **32**, 23 (1985).
- [2] R.S. Crandal. Phys. Rev. B, **43**, 4057 (1991).
- [3] N. Nata, A. Matsuda. J. Non-Cryst. Sol., **164–166**, 231 (1993).
- [4] D. Caputo, G. De Cesare, F. Irrera et al. J. Non-Cryst. Sol., **170**, 278 (1994).
- [5] О.А. Голикова. ФТП, **25**, 517 (1991).
- [6] J.K. Ratl, W. Fuhs, H. Mell. J. Non-Cryst. Sol., **137–138**, 279 (1991).
- [7] И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко. ФТП, **31**, 1455 (1997).
- [8] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, О.А. Голикова, В.Х. Кудоярова. ФТП, **31**, 536 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Relaxation of photoinduced metastable states in the α -Si:H films deposited at high temperatures

I.A. Kurova, N.N. Ormont, O.A. Golikova*, M.M. Kazanin*

M.V. Lomonosov State University,
119899 Moscow, Russia

* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of the investigation of dark conductivity kinetics in α -Si:H after short illumination and under a prolonged illumination are presented. The films were deposited at the temperature range $T_s = 300 \div 390^\circ\text{C}$. The data on relaxation of the photoinduced metastable states were shown to correlate to the Fermi level position.