

# Фотоиндуцированные процессы в пленках $a\text{-Si:H}$ при повышенных температурах

© И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко

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

(Получена 14 октября 1996 г. Принята к печати 1 апреля 1997 г.)

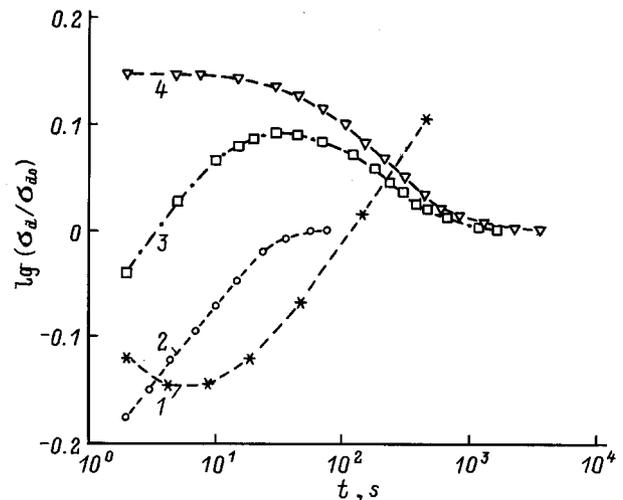
Обнаружено, что при температурах  $T > 120^\circ\text{C}$  кинетика изменения темновой проводимости ( $\sigma_d$ ) нелегированных и легированных бором пленок  $a\text{-Si:H}$  во время и после освещения немонотонна: имеются быстрый и медленный процессы изменения  $\sigma_d$  разного знака. Изменением длительности и интенсивности освещения или температуры пленки можно выделить быстрый или медленный процессы релаксации  $\sigma_d$ , которые описываются растянутой экспонентой. Немонотонная релаксация  $\sigma_d$  описывается суммой двух растянутых экспонент, параметры которых  $\tau, \beta$  зависят от характеристик пленки, а также от температуры, времени и интенсивности освещения. Обсуждается природа немонотонной релаксации.

Процессы образования и релаксации фотоиндуцированных метастабильных состояний (ФМС) в  $a\text{-Si:H}$  исследовались во многих работах [1–3]. В основном эти исследования проводились в области комнатных или азотных температур, когда наблюдалось монотонное уменьшение темновой проводимости ( $\sigma_d$ ) и фотопроводимости ( $\sigma_{ph}$ ) в нелегированных и легированных пленках  $n$ -типа проводимости во время освещения и монотонное увеличение  $\sigma_d$  после выключения освещения. Было установлено, что эти изменения обусловлены образованием нейтральных метастабильных оборванных связей (МОС) [1]. В пленках  $p$ -типа проводимости, легированных бором, в [4,5] наблюдалось увеличение  $\sigma_d$  при освещении, которое быстро исчезало при повышении температуры до  $80^\circ\text{C}$ . Было показано, что этот эффект обусловлен в основном оптической перезарядкой локальных состояний в оксидном слое или на границе его с пленкой и образованием в пленке в результате этого процесса приповерхностного аккумуляционного слоя повышенной дырочной проводимости. В более поздних работах [6,7] в легированных бором и фосфором пленках после освещения при повышенных температурах наблюдалась немонотонная релаксация  $\sigma_d$  — быстрый рост  $\sigma_d$  до значений выше равновесного  $\sigma_{d0}$  и затем медленное уменьшение к равновесному значению. Было установлено, что процессы релаксации — объемные [7]. Авторы работ предположили, что быстрый процесс увеличения  $\sigma_d$  обусловлен отжигом фотоиндуцированных оборванных связей, а медленный процесс уменьшения  $\sigma_d$  обусловлен деактивацией фотоиндуцированных электрически активных примесей. Однако подробных исследований закономерностей и природы немонотонной релаксации  $\sigma_d$  в этих работах не проводилось.

В настоящей работе исследовались как нелегированные, так и легированные бором пленки  $a\text{-Si:H}$ . Все пленки были выращены в ГИРЕДМЕТ (г.Москва) методом осаждения в плазме высококачественного разряда, легирование производилось из газовой фазы. Характеристики исследованных пленок представлены в таблице. Концентрация бора в исследованных пленках определялась методом вторичной ионной спектроскопии.

Исследовалась кинетика изменения  $\sigma_d$  во время и после выключения освещения пленок при повышенных температурах  $T > 120^\circ\text{C}$ . Источником света служила галогеновая лампа, интенсивность освещения пленок изменялась с помощью нейтральных фильтров. В начале каждого опыта пленки отжигались в течение 1 ч при температуре  $T_a = 190^\circ\text{C}$  и затем медленно охлаждались до температуры, при которой проводились их освещение и измерения.

На рис. 1 показана кинетика приведенной темновой проводимости  $\sigma_d(t)/\sigma_{d0}$  для пленки 4 во время ее освещения и после освещения различной длительности и при разных температурах. Видно, что изменение  $\sigma_d$  во время освещения немонотонно (кривая 1): сначала  $\sigma_d$  уменьшается, затем растет. Кривые релаксации  $\sigma_d$  после освещения зависят от времени освещения  $t_{ill}$ . Если  $t_{ill}$  мало, т. е. соответствует падающему участку зависимости  $\sigma_d(t_{ill})$  (кривая 1), то релаксация  $\sigma_d(t)$  монотонна (кри-



**Рис. 1.** Кинетика изменения приведенной темновой проводимости пленки 4 при  $T = 415\text{ K}$  во время освещения с  $W = 90\text{ мВт/см}^2$  (1) и после выключения освещения: 2 —  $t_{ill} = 3\text{ с}$ ,  $T = 415\text{ K}$ ; 3 —  $t_{ill} = 60\text{ с}$ ,  $T = 415\text{ K}$ ; 4 —  $t_{ill} = 60\text{ с}$ ,  $T = 430\text{ K}$ .

№	$d$ , мкм	$T_s$ , °C	$N_B$ , см <sup>-3</sup>	$E_d$ , эВ	$\sigma_d$ , Ом <sup>-1</sup> · см <sup>-1</sup> ( $T = 290$ К)	$E_1$ , эВ	$\nu_1$ , с <sup>-1</sup>	$E_2$ , эВ	$\nu_2$ , с <sup>-1</sup>
1	1	250	—	0.74	$8 \cdot 10^{-10}$	1.00	$4 \cdot 10^9$	1.05	$5 \cdot 10^8$
2	1	290	$1 \cdot 10^{17}$	0.83	$2 \cdot 10^{-10}$	1.05	$1 \cdot 10^{11}$	1.1	$5 \cdot 10^9$
3	4	290	$2 \cdot 10^{17}$	0.85	$1.2 \cdot 10^{-11}$	1.13	$2 \cdot 10^{13}$	1.27	$1.3 \cdot 10^{13}$
4	1	300	$2 \cdot 10^{18}$	0.66	$2 \cdot 10^{-9}$	0.86	$1 \cdot 10^9$	0.88	$1 \cdot 10^8$

Примечание.  $d$  — толщина пленки,  $T_s$  — температура подложки при росте пленки,  $N_B$  — общая концентрация бора,  $E_d$  — энергия активации темновой проводимости,  $\sigma_d$  — темновая проводимость,  $E_{1,2}$  — энергия активации  $\tau_{1,2}$ ,  $\nu_{1,2}$  — предэкспоненциальный множитель для  $\tau_{1,2}$ .

вая 2) и логарифм  $\sigma_d(t)/\sigma_{d0}$  описываются растянутой экспонентой

$$\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}] = A \exp[-(t/\tau)^\beta]. \quad (1)$$

Если время освещения увеличивается до значений, соответствующих возрастающей ветви изменения  $\sigma_d(t_{III})$ , то релаксация  $\sigma_d$  после освещения немонотонная (кривая 3). Она включает два процесса: быстрое увеличение  $\sigma_d$  до значений, больших  $\sigma_{d0}$ , и медленное падение  $\sigma_d$  к равновесному значению. На рис. 1 видно также (кривая 4), что можно выделить медленный процесс релаксации  $\sigma_d$ , повышая температуру при освещении пленки. Подавление первого процесса может быть связано с уменьшением концентрации ФМС, обуславливающих этот процесс, вследствие увеличения скорости их отжига при повышении температуры.

Исследования показали, что медленный процесс релаксации  $\sigma_d$  может быть выделен также уменьшением интенсивности освещения пленки без изменения ее температуры, т.е. путем уменьшения скорости образования ФМС, обуславливающих первый процесс. На рис. 2 приведены типичные зависимости кинетики релаксации  $\sigma_d$  пленки 3 после ее освещения с разной интенсивностью при одной температуре (кривые 1 и 3), а также после освещения с низкой интенсивностью при разных температурах (кривые 2–4). Из рис. 2 видно, что при  $T = 400$  К после освещения пленки светом с большой интенсивностью ( $W = 90$  мВт/см<sup>2</sup>,  $t_{III} = 10$  с) релаксация  $\sigma_d$  немонотонна (кривая 1), а после освещения с малой интенсивностью ( $W = 4$  мВт/см<sup>2</sup>,  $t_{III} = 300$  с) релаксация  $\sigma_d$  монотонна и соответствует медленному процессу уменьшения  $\sigma_d$  к равновесному значению. Эта монотонная медленная релаксация  $\sigma_d$  также описывается растянутой экспонентой, параметры которой  $\tau$  и  $\beta$  зависят от температуры и длительности освещения для каждой пленки.

На рис. 3 показана кинетика релаксации  $\sigma_d$  нелегированной пленки 1 после ее освещения при разных температурах светом с интенсивностью  $W = 90$  мВт/см<sup>2</sup> и длительностью  $t_{III} = 15$  с. Видно, что в нелегированной пленке после освещения при повышенных температурах также наблюдается два процесса релаксации  $\sigma_d$ , скорости которых увеличиваются с температурой. Немонотонная зависимость  $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$  описывается суммой двух растянутых экспонент, параметры которых зависят от температуры, длительности и интенсивности освещения. Эти параметры определялись следующим образом. Предполагалось, что быстрый процесс релаксации завершается ко времени  $t \gtrsim t_{max}$ , где  $t_{max}$  — время, при котором

наблюдается максимальное значение  $\lg(\sigma_d/\sigma_{d0})$ . Поэтому вначале находились параметры медленного процесса из зависимости  $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$  для  $t > t_{max}$ . Из суммы двух растянутых экспонент, описывающих немонотонную релаксацию  $\sigma_d$  во всем временном интервале измерений, определялись параметры быстрого процесса с учетом найденных параметров медленного процесса.

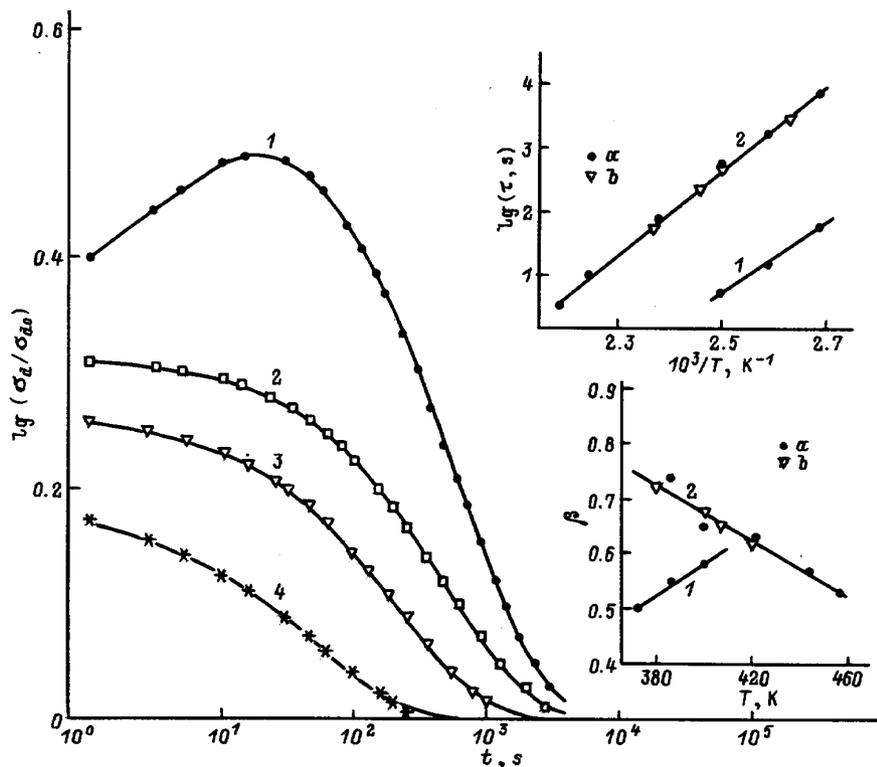
Логарифм отношения  $\sigma_d(t)/\sigma_{d0}$  определяет изменение во времени положения уровня Ферми ( $\Delta E_F$ ) в запрещенной зоне относительно равновесного значения:  $\lg(\sigma_d/\sigma_{d0}) = \Delta E_F/kT$ . В предположении постоянства плотности состояний вблизи уровня Ферми во время освещения можно полагать, что  $\Delta E_F(t) \sim N(t)$ , где  $N$  — концентрация ФМС выше или ниже уровня Ферми; таким образом, при сделанных допущениях растянутыми экспонентами описывается кинетика изменения концентрации ФМС  $N(t)$ .

На рис. 4 и на вставках к рис. 2 и 3 показаны температурные зависимости параметров растянутых экспонент  $\tau_1, \tau_2$  и  $\beta_1, \beta_2$  для исследованных пленок (индексы 1 и 2 относятся соответственно к быстрому начальному и медленному конечному процессам). Отметим, что на вставке к рис. 2 для построения зависимостей  $\tau_2(T)$  и  $\beta_2(T)$  использовались значения  $\tau_2$  и  $\beta_2$ , определенные как из монотонной релаксации  $\sigma_d$  при малой интенсивности освещения ( $W = 4$  мВт/см<sup>2</sup>), так и из немонотонной релаксации при большой интенсивности ( $W = 90$  мВт/см<sup>2</sup>). Видно, что  $\tau_1$  и  $\tau_2$  для всех пленок экспоненциально зависят от температуры:

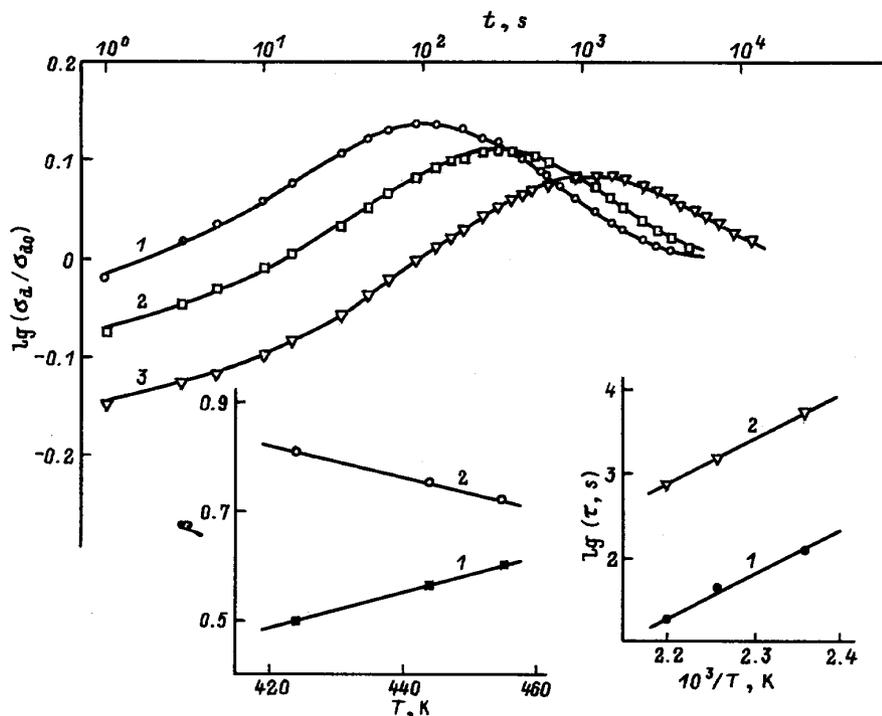
$$\tau_{1,2} = \nu_{1,2}^{-1} \exp(E_{1,2}/kT). \quad (2)$$

Значения энергии активации  $\tau_{1,2}$   $E_1$  и  $E_2$  и предэкспоненциальных множителей  $\nu_1$  и  $\nu_2$  приведены в таблице. Видно, что они различны для разных пленок, причем во всех пленках  $E_1 < E_2$ , а  $\nu_1 > \nu_2$ , т.е. не согласуются с правилом Мейера–Нелдела. Это может указывать на различную природу этих процессов. Главное отличие быстрого и медленного процессов проявляется в температурной зависимости  $\beta$ . Обнаружено, что  $\beta_1$  увеличивается, а  $\beta_2$  уменьшается с температурой во всех исследованных пленках в режиме как монотонной, так и немонотонной релаксации  $\sigma_d$  (см. рис. 2), т.е. независимо от наличия быстрого процесса.

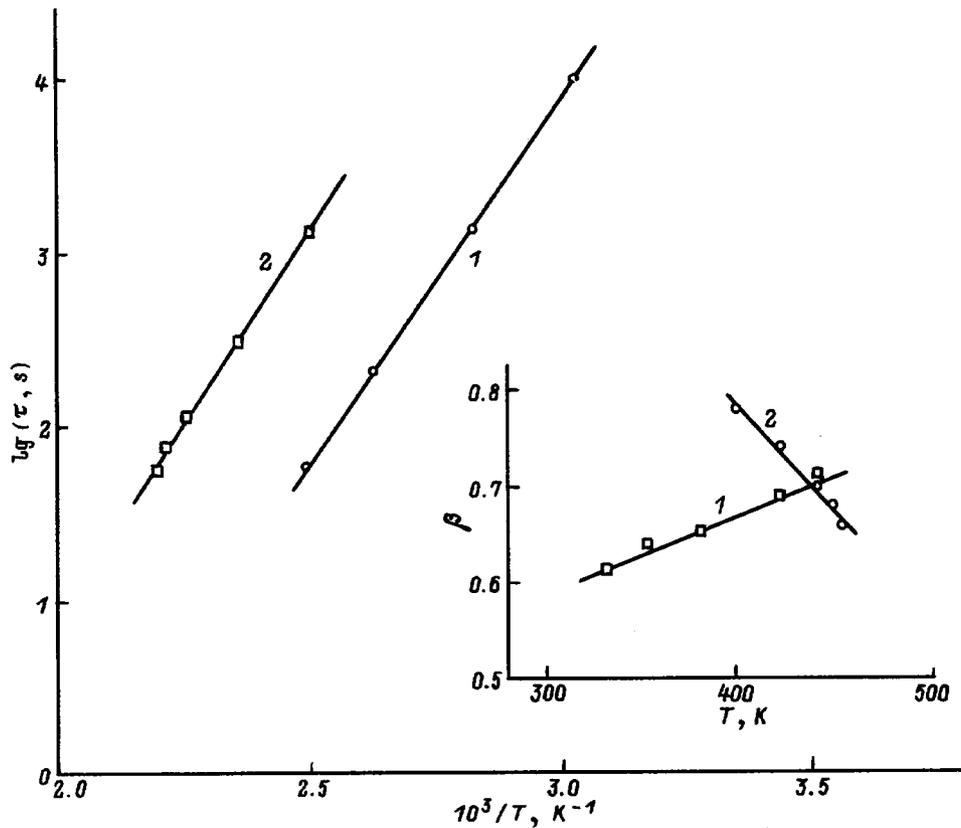
Увеличение  $\beta$  с температурой наблюдалось в ряде работ при отжиге ФМС, идентифицированных как нейтральные оборванные связи [8], отжиг которых обуславливает увеличение  $\sigma_d$  при релаксации. Уменьшение  $\beta$



**Рис. 2.** Кинетика изменения приведенной темновой проводимости пленки 3 после выключения освещения: 1 —  $t_{\text{ill}} = 5$  с,  $T = 400$  К,  $W = 90$  мВт/см<sup>2</sup>; 2–4 —  $t_{\text{ill}} = 300$  с,  $W = 4$  мВт/см<sup>2</sup>,  $T = 400, 407, 420$  К соответственно. На вставках — температурные зависимости параметров  $\tau$  и  $\beta$ ; 1, 2 относятся соответственно к быстрому и медленному процессам;  $a$  — результат обработки немонотонных кривых релаксации,  $b$  — результат обработки монотонных кривых релаксации.



**Рис. 3.** Кинетика изменения приведенной темновой проводимости после выключения освещения для пленки 1 при температурах  $T$ , К: 1 — 423, 2 — 443, 3 — 455.  $t_{\text{ill}} = 15$  с,  $W = 90$  мВт/см<sup>2</sup>. На вставках — температурные зависимости параметров  $\tau$  и  $\beta$  растянутых экспонент, описывающих немонотонные релаксационные кривые; 1, 2 относятся соответственно к быстрому и медленному процессам релаксации.



**Рис. 4.** Температурные зависимости параметров  $\tau$  и  $\beta$  (см. вставку) для пленки 4 после ее освещения с интенсивностью  $W = 90 \text{ мВт/см}^2$  в течение 5 (1) и 60 с (2). 1, 2 относятся соответственно к быстрому и медленному процессам релаксации.

с температурой наблюдалось в [9] для релаксации термоиндуцированных метастабильных связей в нелегированных пленках, выращенных при низких температурах  $T_s \approx 100^\circ\text{C}$  и имеющих вследствие этого много пор. Авторы связывают такую зависимость  $\beta(T)$  с релаксацией МОС на поверхности пор, размеры которых уменьшаются с температурой. В исследованных нами пленках, выращенных при высоких температурах ( $T_s > 250^\circ\text{C}$ ), наличие большой концентрации пор маловероятно и, следовательно, мала вероятность того, что медленная релаксация  $\sigma_d$  связана с отжигом МОС на поверхности пор. В то же время наличие медленного процесса с характерной зависимостью  $\beta(T)$  во всех исследованных пленках, как с электронной, так и с дырочной проводимостью, заставляет предполагать единый механизм этого процесса.

В работах [6,7] медленный процесс релаксации  $\sigma_d$  объяснялся деактивацией фотоиндуцированных электрически активных примесей после выключения освещения. В согласии с этой гипотезой медленная релаксация проводимости в исследованной нами пленке с дырочной проводимостью (пленка 4) обусловлена деактивацией метастабильных фотоиндуцированных электрически активных атомов бора. Для пленок 1–3 с электронной проводимостью, не легированных специально донорной примесью, необходимо предположить наличие неконт-

ролируемых примесей. Такими примесями могут быть углерод, азот, кислород, введение которых сдвигает уровень Ферми к зоне проводимости [10]. Поэтому медленные процессы изменения  $\sigma_d$  в пленках 1–3 при их освещении и после выключения освещения могут быть связаны с процессами активации и деактивации этих примесей, а наблюдение немоного изменения  $\sigma_d$  в нелегированных пленках могло бы служить основой для способа определения наличия неконтролируемых примесей в них.

Вместе с тем возможны и другие механизмы образования ФМС при освещении в нелегированных и легированных пленках  $\alpha\text{-Si:H}$ . В частности, в [11] перезарядка положительно и отрицательно заряженных оборванных связей кремния, образующихся при росте как легированных, так и нелегированных пленок  $\alpha\text{-Si:H}$  [12], предложена в качестве механизма образования МОС при инжекции и освещении пленок. Такой механизм использовался при интерпретации процессов релаксации МОС, возникающих при инжекции носителей в пленках  $p$ - и  $n$ -типа проводимости [13]. Наконец, быстрый и медленный процессы изменения  $\sigma_d$  во время и после освещения могут относиться к разным областям пленки с различными свойствами, определяемыми неоднородным распределением водорода и примесей, типов их связей с кремнием и т.п. Из сказанного следует, что

для решения вопроса о природе медленного процесса изменения  $\sigma_d$  в пленках  $a\text{-Si:H}$  во время освещения и после его выключения требуются дополнительные исследования.

Авторы выражают благодарность И.П. Звягину и А.Г. Казанскому за полезные дискуссии.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Госкомвуза Российской Федерации (грант 95-0-71-153 в области фундаментального естествознания) и научно-технической программы "Университеты России".

## Список литературы

- [1] M. Stutzmann, N.B. Jackson, C.C. Tsai. Phys. Rev. B, **32**, 23 (1985).
- [2] E. Eser. J. Appl. Phys., **59**, 3508 (1986).
- [3] P. Stradins, H. Fritzsche. Phil. Mag. B, **69**, 121 (1994).
- [4] B. Aker, H. Fritzsche. J. Appl. Phys., **54**, 6628 (1983).
- [5] И.А. Курова, Д.А. Мочалова. ФТП, **23**, 573 (1989).
- [6] X.M. Dong, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, **36**, 9378 (1987).
- [7] J. Jang, S.C. Park, S.C. Kim, C. Lee. Appl. Phys. Lett., **51**, 1804 (1987).
- [8] R.A. Street. Solar Cells, **24**, 211 (1988).
- [9] K. Takeda, H. Hikita, Y. Kimura, H. Yokomichu, K. Morigaki. J. Non-Cryst. Sol., **198–200**, 486 (1996).
- [10] P.E. Vanier, A.E. Delahoy, R.W. Griffith. J. Appl. Phys., **52**, 5235 (1981).
- [11] R.S. Crandall. Phys. Rev. B, **43**, 4057 (1991).
- [12] H.M. Branz, M. Silver. J. Non-Cryst. Sol., **114**, 639 (1989).
- [13] M.W. Caslen, Y. Xu, R.S. Crandall. Phys. Rev. B, **51**, 2173 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photoinduced processes in $a\text{-Si:H}$ films at high temperatures

I.A. Kurova, E.V. Larina, N.N. Ormont,  
D.V. Senashenko

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

**Abstract** It has been found for undoped and  $B$ -doped  $a\text{-Si:H}$  films that at  $T > 120^\circ\text{C}$  the kinetics of the dark conductivity ( $\sigma_d$ ) alteration during and after the illumination is not monotonic. There are fast and slow processes of  $\sigma_d$  alteration of opposite signs. By the variation of the duration and the intensity of illumination or of the temperature of the film it is possible to separate the fast or slow relaxation processes of  $\sigma_d$  that are described by a stretched exponential function. Nonmonotonic relaxation of  $\sigma_d$  is described by a sum of two of the stretched exponentials, of which parameters  $\tau$  and  $\beta$  depend both on characteristics of a film as well as on temperature, time period and intensity of illumination. The nature of nonmonotonic relaxation is discussed.