

Особенности релаксации термоиндуцированных и фотоиндуцированных метастабильных состояний в пленках $a\text{-Si:H}\langle\text{P}\rangle$

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119899 Москва, Россия

(Получена 23 июля 1999 г. Принята к печати 22 сентября 1999 г.)

Обсуждается кинетика релаксации термоиндуцированных и фотоиндуцированных метастабильных состояний, обуславливающих повышение темновой проводимости пленок $a\text{-Si:H}\langle\text{P}\rangle$. Установлено, что релаксация описывается функциями типа растянутой экспоненты с параметрами τ и β , различно зависящими от температуры для фото- и термоиндуцированных состояний. Так, релаксация фотоиндуцированных состояний характеризуется уменьшением β с температурой, для термоиндуцированных состояний параметр β практически постоянен. Показано, что эти различные температурные зависимости β коррелируют с температурными изменениями полуширины распределений по энергиям отжига этих состояний. Установленные особенности релаксации фото- и термоиндуцированных метастабильных состояний обусловлены разными механизмами их образования. Природа их может быть одна и связана с активацией пассивированных водородом атомов фосфора.

В легированных пленках $a\text{-Si:H}$ под влиянием освещения или закалки (быстрого охлаждения) образуются соответственно фотоиндуцированные и термоиндуцированные метастабильные состояния, обуславливающие повышение проводимости [1–5]. Природа их обычно связывается с метастабильными электрически активными атомами примеси (МЭАП) или связанными с ними комплексами. Механизм образования фотоиндуцированных и термоиндуцированных МЭАП различен. Это должно проявляться в особенностях их релаксации.

Исследования релаксации термоиндуцированных МЭАП проводились в ряде работ [6,7]. Было установлено, что их релаксация (изменение концентрации ΔN во времени t) в пленках как n -, так и p -типа проводимости описывается растянутой экспонентой:

$$\Delta N(t) = \Delta N(0) \exp\{-(t/\tau)^\beta\}, \quad (1)$$

где $\tau = \nu_0^{-1} \exp(E_a/kT)$, E_a — энергия отжига, ν_0 — частота попыток релаксации.

Для параметра β имеются разноречивые литературные данные. Так, в работе [6] для релаксации термоиндуцированных метастабильных состояний в пленках, легированных бором, получено увеличение β с температурой и постоянное значение β в случае легирования фосфором. В работе [7] было установлено, что при релаксации термоиндуцированных метастабильных состояний в пленках, легированных бором, параметр β уменьшается с температурой.

Уменьшение β с температурой получено также в работах [3,4] для релаксации фотоиндуцированных МЭАП при повышенных температурах. Это коррелировало с $\Delta E_a(T)$ — температурной зависимостью полуширины начального распределения фотоиндуцированных МЭАП по энергии отжига, определенного из кинетики релаксации, в согласии с формулой [4]

$$\Delta E_a = AkT/\beta. \quad (2)$$

Предложенная в работе [4] модель образования фотоиндуцированных МЭАП, основанная на трехуровневой конфигурационной диаграмме с коррелированными термическими энергиями их образования и отжига, объясняет увеличение с температурой ΔE_a и, следовательно, уменьшение β .

Представляется очевидным необходимость исследования релаксации фотоиндуцированных и термоиндуцированных МЭАП на одних и тех же легированных пленках $a\text{-Si:H}$.

Цель настоящей работы — проведение таких исследований в пленках $a\text{-Si:H}$, легированных фосфором.

Исследуемые пленки $a\text{-Si:H}\langle\text{P}\rangle$ были получены в ГИРЕДМЕТ методом осаждения в плазме высокочастотного тлеющего разряда при температуре кварцевой подложки $T_s = 250^\circ\text{C}$. Концентрация фосфора, определенная методом вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS), составляла $(1 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Методика исследований основывалась на предположении, что кинетика релаксации МЭАП подобна кинетике изменения логарифма приведенной темновой проводимости $\sigma_d^* = \sigma_d(t)/\sigma_{d0}$, где σ_{d0} — равновесная для данной температуры T темновая проводимость. Действительно, $\ln[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}] = [F_0 - F(t)]/kT = \Delta F(t)/kT$. Здесь F_0 — равновесный уровень Ферми. С другой стороны, $\Delta F(t) = \Delta N(t)/\rho_0$, где ρ_0 — постоянная плотность состояний в области смещения уровня Ферми ΔF . Предположение о постоянстве ρ_0 основано на том, что в наших пленках с примесью фосфора уровни фото- и термоиндуцированных МЭАП расположены в запрещенной зоне выше $F_0 + \Delta F$.

Измерения кинетики релаксации фотоиндуцированных МЭАП проводились следующим образом. Пленка $a\text{-Si:H}$ предварительно отжигалась при температуре $T_a = 460 \text{ K}$ в течение 1 ч, затем медленно охлаждалась до температуры исследования. После установления нужной

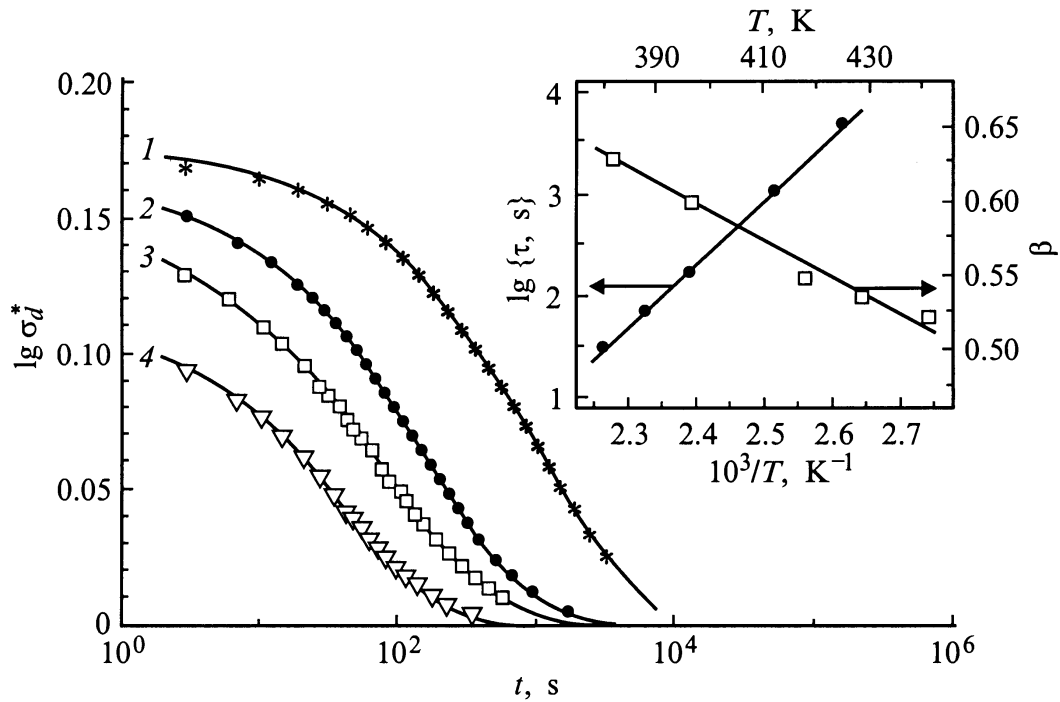


Рис. 1. Кинетика релаксации темновой проводимости после освещения пленки 1 *a*-Si:H(P) в течение 5 мин при *T*, К: 1 — 397, 2 — 418, 3 — 429, 4 — 441. На вставке — температурные зависимости параметров релаксации τ и β для этой же пленки.

температуры проводилась проверка установления равновесной величины темновой проводимости, указывающей на отсутствие термоиндуцированных метастабильных состояний, которые могли возникнуть в результате недостаточно медленного охлаждения пленки. Далее пленка освещалась галогеновой лампой с инфракрасным фильтром с интенсивностью 90 мВт/см², и после выключения освещения измерялась кинетика релаксации темновой проводимости пленки.

На рис. 1 показана типичная кинетика релаксации фотоиндуцированных МЭАП при разных температурах — $\Delta N(t) \sim \lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$. Сплошными линиями на рисунке представлены функции вида растянутой экспоненты с параметрами τ и β , зависящими от температуры. На вставке показаны их температурные зависимости. Видно, что β монотонно уменьшается с температурой. Температурная зависимость τ описывается экспонентой (1) с параметрами $E_a = 1.3$ эВ и $\nu_0 = 3.2 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-1}$.

На рис. 2 приведены распределения фотоиндуцированных МЭАП по энергии отжига $P(E_a)$ для разных температур. Эти распределения получены методом, предложенным в работе [8], а именно путем дифференцирования рассчитанной зависимости $N(E_a)$ по E_a , где $E_a = kT \ln(\nu_0 t)$, T — температура измерения, t — время, соответствующее данному значению $\lg[\sigma_d(t)/\sigma_{d0}]$, ν_0 — величина, определенная из экспериментальной зависимости $\tau(1/T)$. Видно, что полученное распределение $P(E_a)$ изменяется с температурой, его полуширина ΔE_a увеличивается с ростом температуры сильнее, чем по

линейному закону. Это и обуславливает уменьшение β с температурой в соответствии с формулой (2).

Эксперименты по исследованию кинетики релаксации термоиндуцированных МЭАП проводились следующим образом. Образец перед закалкой отжигался при одной и той же температуре $T_a = 460$ К, большей температуры установления квазиравновесия T_E , равной 410 К в наших пленках. Затем в полый медный держатель, на котором

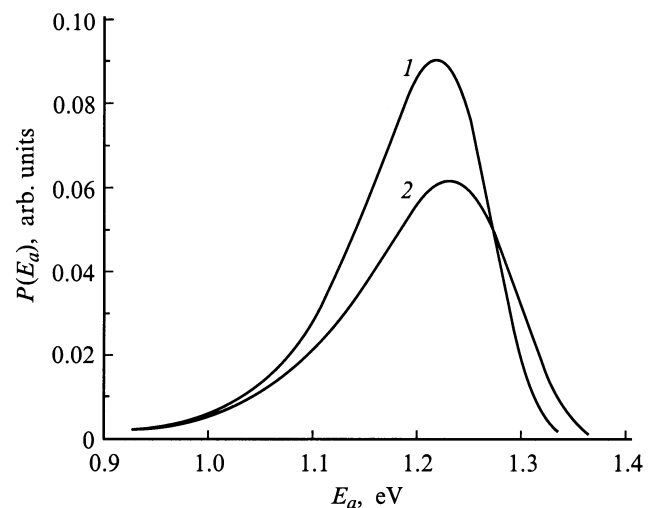


Рис. 2. Начальное распределение фотоиндуцированных метастабильных состояний по энергиям отжига после освещения пленки 1 в течение 5 мин при $T = 397$ (1) и 441 К (2).

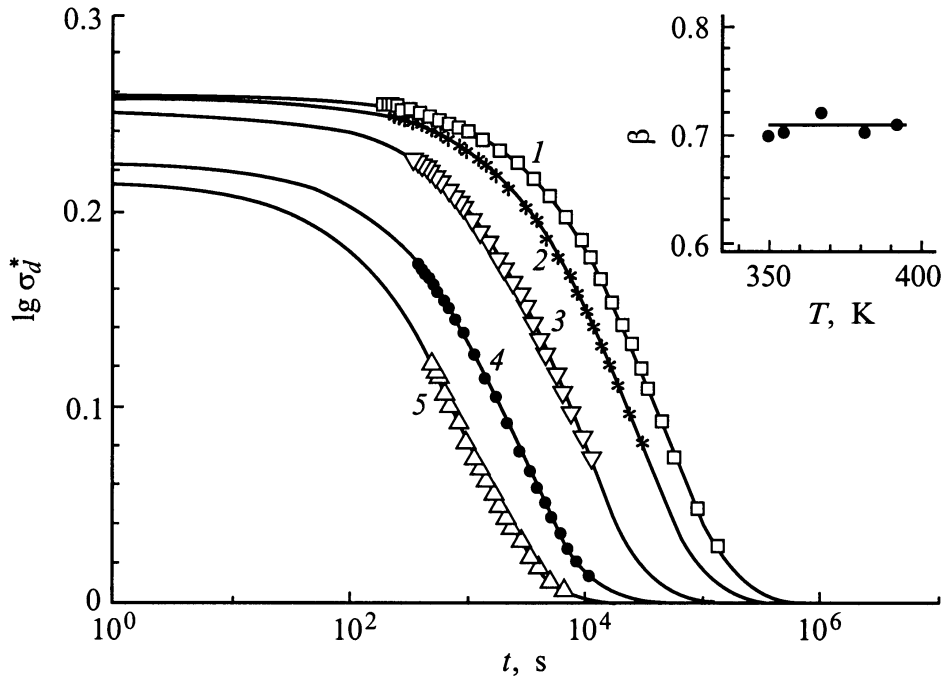


Рис. 3. Кинетика релаксации темновой проводимости пленки 1 после быстрого охлаждения (с учетом времени установления температуры) для разных температур T , К: 1 — 350, 2 — 355, 3 — 368, 4 — 382, 5 — 394. На вставке — температурная зависимость параметра β .

крепилась образец и нагреватель, напускался жидкий азот, и образец охлаждался со скоростью 0.5 град/с до $T = 290$ К. Далее образец быстро нагревался, и после установления нужной температуры измерялось изменение темновой проводимости образца со временем.

На рис. 3 приведена кинетика релаксации термоиндуцированных метастабильных состояний при разных температурах. Для каждой кривой время определялось с учетом времени установления данной температуры после закалки. Сплошные кривые представляют собой функции вида растянутой экспоненты с разными параметрами τ и β . Получено, что τ экспоненциально уменьшается с температурой, а величина β практически не изменяется (см. вставку на рис. 3). Это согласуется с данными работы [6], где время установления заданной температуры измерения после отжига пленки было малым (~ 2 с).

На рис. 4 показаны начальные распределения термоиндуцированных МЭАП по энергии отжига $P(E_a)$, полученные из кривых релаксации рис. 3. Видно, что полуширина распределения увеличивается практически линейно с температурой, что согласуется с почти неизменным значением β .

На рис. 5 показаны кривые релаксации термоиндуцированных метастабильных состояний при разных температурах без учета времени установления температуры измерения. Сплошные линии представляют собой функции вида растянутой экспоненты с различными параметрами τ и β . Видно, что весьма значительно уменьшаются

начальная концентрация термоиндуцированных МЭАП $\Delta N(0) \sim \lg[\sigma_d(0)/\sigma_{d0}]$ и параметр β . Возможно, что наблюдавшееся в работе [7] уменьшение β с температурой связано с неучетом отжига МЭАП, происходящего за время установления заданной температуры измерения релаксации метастабильных состояний.

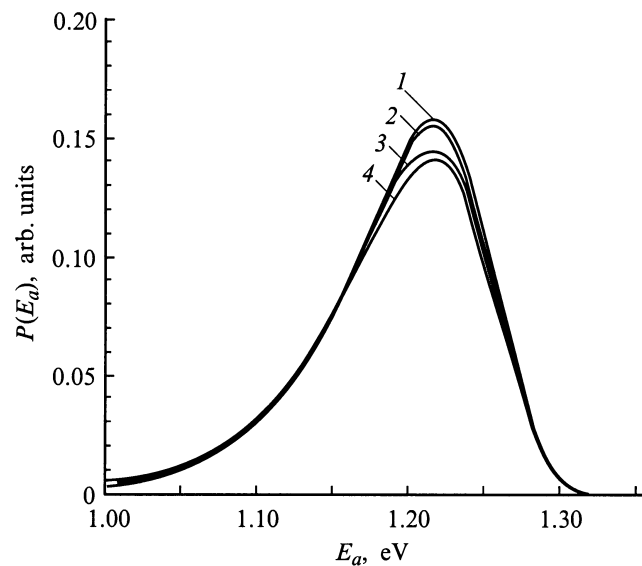


Рис. 4. Начальное распределение термоиндуцированных метастабильных состояний по энергиям отжига после быстрого охлаждения пленки 1 для температур T , К: 1 — 350, 2 — 355, 3 — 382, 4 — 394.

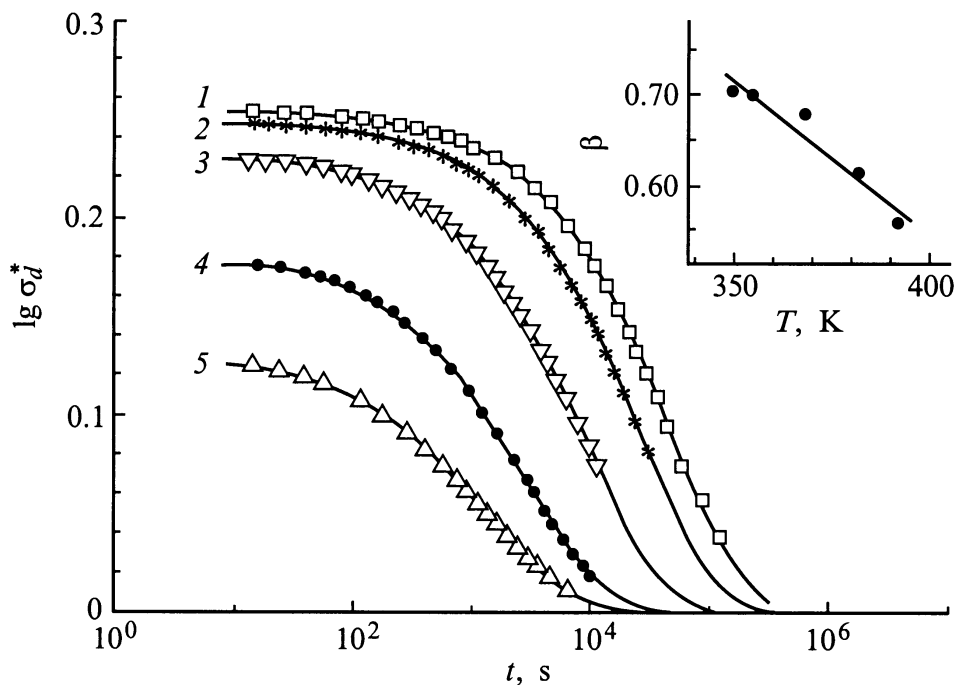


Рис. 5. Кинетика релаксации темновой проводимости пленки 1 после быстрого охлаждения (без учета времени установления температуры) для температур T , К: 1 — 350, 2 — 355, 3 — 368, 4 — 382, 5 — 394. На вставке — температурная зависимость параметра β .

Таким образом, в настоящей работе получено, что температурная зависимость β определяется температурной зависимостью полуширины начального распределения МЭАП по энергиям отжига. Это в свою очередь обуславливается механизмом образования МЭАП. Для фотоиндуцированных МЭАП в пленках $a\text{-Si:H}$ с фосфором механизм образования тот же, что и для МЭАП в пленках с бором, и описывается трехуровневой координационной диаграммой, когда переход из основного состояния в метастабильное совершается в два этапа. Первый этап представляет собой оптический переход из основного состояния в промежуточное метастабильное состояние, а второй этап — термический переход из промежуточного метастабильного состояния в основное метастабильное состояние. Термоиндуцированные МЭАП — это МЭАП, образованные термическим путем при одной и той же высокой температуре и “замороженные” при быстром охлаждении. Отметим, что природа фотоиндуцированных метастабильных состояний, образованных при повышенных температурах, и термоиндуцированных метастабильных состояний, по-видимому, одна и та же и связана с активацией пассивированных водородом, т. е. электрически неактивных, атомов фосфора.

Мы благодарны И.П. Звягину за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана программой “Университеты России — фундаментальные исследования”.

Список литературы

- [1] X.M. Deng, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, **36**, 9378 (1987).
- [2] J. Jang, S.C. Park, S.C. Kim, C. Lee. Appl. Phys. Lett., **51**, 1804 (1987).
- [3] И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко. ФТП, **31**, 1455 (1997).
- [4] A.G. Kazanskii, I.A. Kurova, N.N. Ormont, I.P. Zvyagin. J. Non-Cryst. Sol., **227–230**, 306 (1998).
- [5] R.A. Street, J. Kakalios, C.C. Tsai, T.M. Hayes. Phys. Rev. B, **35**, 1316 (1987).
- [6] С.Е. Nebel, R.A. Street, W.B. Jackson, N.M. Johnson. J. Non-Cryst. Sol., **164–166**, 203 (1993).
- [7] R. Meaudre, M. Meaudre, P. Roca i Cabarrocas. Appl. Phys. Lett., **62**, 594 (1993).
- [8] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. Phys. Rev. B, **32**, 23 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

Relaxation kinetics of thermo- and photoinduced metastable states in α -Si:H(P) films

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

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

Abstract We discuss relaxation kinetics of thermo- and photoinduced metastable states, which increase the dark conductivity of α -Si:H(P) films. It is found that the relaxation can be approximated by an extended exponent with parameters τ and β that depend differently on the temperature for photo- and thermoinduced states. In particular, relaxation of photoinduced states is characterized by β decreasing with temperature. For thermoinduced states the parameter β is practically independent on the temperature. It is shown that these different temperature dependences of β correlate with temperature changes of the distribution half-width versus the annealing energies of these states. The observed features of photo- and thermoinduced state relaxation are explained in terms of different mechanisms of metastable states creation. The origin of these states can be the same being caused by an activation of hydrogen-passivated phosphorus atoms.