

О релаксационных характеристиках и стабильности пленок $a\text{-Si:H}$, выращенных при высоких температурах

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, О.А. Голикова*, В.Х. Кудоярова*

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 1 июля 1996 г. Принята к печати 8 июля 1996 г.)

Исследованы некоторые характеристики тепловой и световой стабильности в пленках $a\text{-Si:H}$, осажденных в триодном реакторе при температурах $300 \div 390^\circ\text{C}$, с различной концентрацией водорода C_H . Найдено, что температура установления равновесия T_E увеличивается с уменьшением C_H . При длительном освещении фотопроводимость уменьшается во времени t по закону $t^{-1/3}$ в пленках с большим значением C_H . В пленках с малым содержанием водорода фотопроводимость падает медленнее.

Свойства аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$) определяются условиями его получения, в частности температурой подложки при осаждении пленки, T_s . При повышенной температуре роста в пленках уменьшается концентрация водорода и его распределение по объему [1]. Так как в ряде работ указывается на корреляцию последнего с увеличением стабильности материала [2,3], исследование материала, полученного при высоких температурах, имеет большой практический интерес.

В настоящей работе исследовались пленки, полученные высокочастотным разложением силана в триодном реакторе при $T_s = 300 \div 400^\circ\text{C}$ [4,5]. Некоторые данные, касающиеся эффекта Стэблера–Вронского, для таких пленок приведены в [6,7], однако подробные исследования их метастабильности ранее не проводились. Для сравнения была исследована также пленка $a\text{-Si:H}$, полученная в диодном реакторе при $T_s = 310^\circ\text{C}$ и слабо компенсированная бором с общей концентрацией $N_B = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (N_B определялась методом SIMS).

В таблице представлены некоторые параметры исследованных пленок: ΔE_d и σ_0 определялись из температурной зависимости темновой проводимости σ_d в области температур $T = 380 \div 300 \text{ K}$ в соответствии с $\sigma_d = \sigma_0 \exp(-\Delta E_d/kT)$ после отжига пленок при 185°C в течение 60 мин. Величины fotocувствительности K , равной отношению фотопроводимости σ_{ph} к темновой проводимости σ_d отожженной пленки, приведены для $T = 300 \text{ K}$ при освещении галогеновой лампой с инфракрасным (ИК) фильтром (плотность мощности $W = 90 \text{ мВт/см}^2$); полная концентрация водорода в пленке C_H определялась методом ИК спектроскопии.

На рис. 1 показаны температурные зависимости темновой проводимости и фотопроводимости исследованных пленок; измерения σ_d проводились при понижении температуры, σ_{ph} — при повышении температуры. Видно, что температурная зависимость фотопроводимости для пленок 1–4 имеет область слабого температурного гашения, характерного для пленок n -типа проводимости. Фотопроводимость пленки 5 не имеет характерной обла-

сти температурного гашения и монотонно увеличивается с повышением температуры, что характерно для пленок с проводимостью p -типа. На зависимости $\sigma_d(T)$ для пленок 1 и 2 имеются области равновесной проводимости при температурах $T > T_E$ (T_E — температура, при которой сравниваются времена измерения и структурной релаксации) [8]. Для этих пленок T_E соответственно равна 110 и 185°C . Выше этих температур $\sigma_d(T)$ независимо от направления и скорости изменения температуры изменяется экспоненциально с меньшей энергией активации, а величины предэкспоненциального множителя σ_0 близки к значению $\sigma_{\min} = 1.5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Для пленки 5 наблюдается только переход к области равновесной проводимости, т.е. для этой пленки $T_E > 185^\circ\text{C}$. Для пленок 3 и 4 во всем исследованном интервале температур темновая проводимость изменяется экспоненциально с одной энергией активации. Это

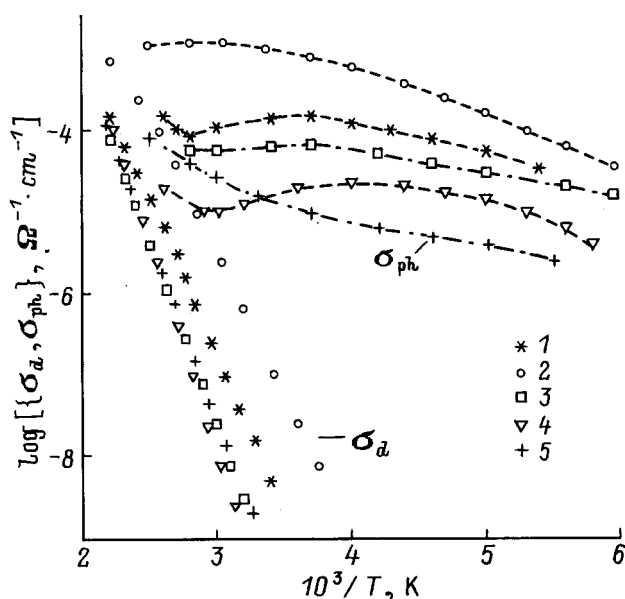


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости и фотопроводимости пленок $a\text{-Si:H}$. Обозначения соответствуют номерам образцов в таблице.

Параметры пленок α -Si:H

Образец	$T_s, ^\circ\text{C}$	$C_H, \text{ат}\%$	$\Delta E_d, \text{эВ}$ $T < T_E$	$\sigma_0, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ $T < T_E$	$\Delta E_d, \text{эВ}$ $T > T_E$	$\sigma_0, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ $T > T_E$	$T_E, ^\circ\text{C}$	$K = \sigma_{ph}/\sigma_d$ ($T = 290 \text{ K}$)	$\sigma_d, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ($T = 290 \text{ K}$)
1	300	9	0.82	$3 \cdot 10^5$	0.56	$1.7 \cdot 10^2$	185	$4.5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-9}$
2	340	20	0.71	$1 \cdot 10^5$	0.49	$1.4 \cdot 10^2$	110	$1 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^{-7}$
3	340	6	0.83	$5 \cdot 10^5$	—	—	> 200	$1.5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-10}$
4	390	4	0.86	$5 \cdot 10^5$	—	—	> 200	$1 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^{-10}$
5	310	7	0.83	$3 \cdot 10^5$	—	—	> 185	$8 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^{-10}$

Примечание. (1–4) — нелегированные пленки, 5 — пленка, легированная бором.

означает, что T_E для них лежит в области более высоких температур: $T_E > 200^\circ\text{C}$. Таким образом, наблюдается увеличение T_E с уменьшением концентрации водорода, как это наблюдалось в [9] на пленках α -Si:H после имплантации В и Р с концентрацией водорода от 0.06 до 12 ат%. Это согласуется также с увеличением скорости диффузии водорода в нелегированных пленках α -Si:H при увеличении C_H , обнаруженным в [10].

Можно предположить, что времена структурной релаксации при изменении температуры и под влиянием света определяются одним и тем же процессом диффузии водорода [11] и, следовательно, скорость образования фотоиндуцированных оборванных связей (ОС) Si-Si в наших пленках будет коррелировать с величиной T_E . На рис. 2 показана кинетика изменения приведенной фотопроводимости $\sigma_{ph}(t)/\sigma_{ph}(0)$ для исследованных пленок в режиме освещения при комнатной температуре кварцевой галогеновой лампой с ИК фильтром. Согласно [12], для нелегированных пленок $\sigma_{ph}(t) \sim N(0)/N(t)$ и отражает изменение концентрации оборванных Si-Si-связей

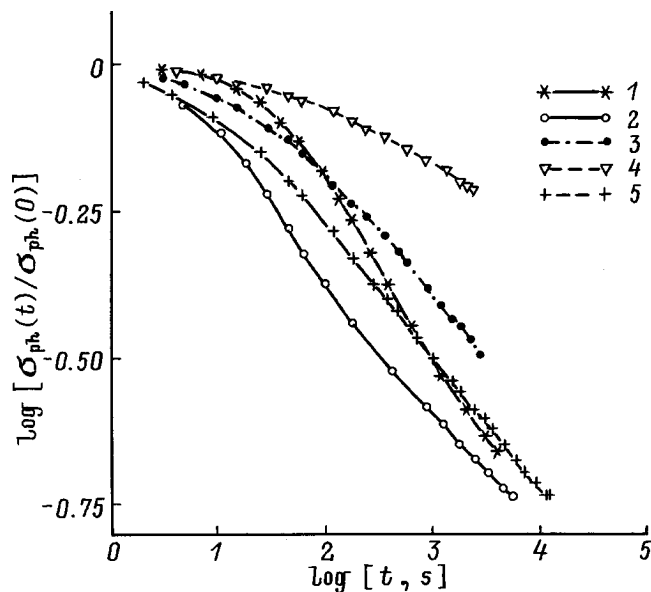


Рис. 2. Кинетика изменения приведенной фотопроводимости для пленок α -Si:H при освещении галогеновой лампой интенсивностью $W = 90 \text{ мВт/см}^2$. Обозначения соответствуют номерам образцов в таблице.

N во времени t . Из рис. 2 видно, что в пленке 4 скорость образования ОС наименьшая, а в пленке 2 наибольшая. Это коррелирует со временем установления структурного равновесия: в пленке 4 это время — наибольшее (T_E высокая), в 2 — наименьшее (T_E самая низкая). Отметим, что пленка 2 осаждалась в заведомо не оптимальных условиях и поэтому содержание водорода в ней сильно завышено по сравнению с другими пленками, осажденными при $T_s = 300 \div 400^\circ\text{C}$ (см. таблицу и [5]).

Стабильность пленки к свету оценивается стационарной концентрацией ОС N_{st} , возникающей при длительном освещении, когда скорости образования и уничтожения ОС сравниваются. Для достижения N_{st} необходимо длительное освещение пленки, в наших условиях до $150 \div 200 \text{ ч}$. В [1] показано, что в рамках модели образования ОС путем разрыва слабых Si-Si-связей при рекомбинации электронов и дырок N_{st} коррелирует с начальной скоростью образования ОС. Согласно этой модели $\sigma_{ph}(t)$ изменяется в некоторой области концентраций ОС как $t^{-1/3}$. Такую зависимость мы видим лишь для пленок 1 и 2, причем пленка 2 более стабильна чем 1, так как начальная скорость изменения σ_{ph} в пленке 2 меньше. Для пленок 3–5 $\sigma_{ph}(t) \sim t^{-n}$, где $n < 1/3$.

Для пленок p -типа проводимости не выполняется условие обратной пропорциональности фотопроводимости и концентрации оборванных связей [13] и, следовательно, зависимость $\sigma_{ph}(t)$ не отражает скорость образования ОС и не наблюдается зависимость $t^{-1/3}$. В пленках n -типа проводимости 3 и 4 уровень Ферми E_f расположен более глубоко, чем в 1 и 2. Более того, при освещении E_f движется к середине запрещенной зоны, что делает пленки 3 и 4 сходными с пленками p -типа проводимости, для которых не наблюдается участка с зависимостью $\sigma_{ph} \sim t^{-1/3}$. Однако для более ясного понимания особенностей кинетики σ_{ph} в этих пленках проводятся дополнительные исследования.

Авторы выражают благодарность А.Г. Казанскому за полезные дискуссии по результатам работы.

Работа была поддержана грантом INTAS N 931916 и выполнялась в соответствии с Программой совместных исследований Московского государственного университета и Физико-технического института им.А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Список литературы

- [1] D. Caputo, G. de Cesare, F. Irrera, F. Palma, M.C. Rossi, G. Conte, G. Nobile, G. Fameli. *J. Non-Cryst. Sol.*, **170**, 278 (1994).
- [2] D.E. Carlson. *Appl. Phys. A*, **41**, 305 (1986).
- [3] M. Rondo, R.H. Morigaku, *J. Non-Cryst. Sol.*, **137/138**, 247 (1991).
- [4] О.А. Голикова, М.М. Казанин, М.М. Мездрогина, В.Х. Кудоярова, К.Л. Сорокина, У.С. Бабаходжаев. *ФТП*, **23**, 1737 (1989).
- [5] О.А. Голикова, М.М. Казанин, О.И. Коньков, В.Х. Кудоярова, Е.И. Теруков. *ФТП*, **27**, 263 (1996).
- [6] О.А. Голикова, Р.Г. Икрамов, М.М. Казанин, М.М. Мездрогина. *ФТП*, **27**, 263 (1993).
- [7] O.A. Golikova, R.G. Ikramov, M.M. Kazanin. *J. Non-Cryst. Sol.*, **164–166**, 395 (1993).
- [8] R.A. Street, J. Kakalios, T.M. Hayer. *Phys. Rev. B*, **34**, 3030 (1986).
- [9] S.M. Pietruszko, S. Olszewski, A.V. Zherzdev. *Sol. St. Phenom.*, **44–46**, 695 (1995).
- [10] R. Shinaz, J. Shinaz, H. Sia, X.L. Wu. *Phys. Rev. B*, **47**, 9361 (1993).
- [11] R.A. Street. *Physica B*, **170**, 69 (1991).
- [12] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. *Phys. Rev. B*, **32**, 23 (1985).
- [13] A.G. Kazanski, S.V. Kuznetsov. *Phys. St. Sol. (b)*, **168**, k19 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

On relaxational characteristics and stability of α -Si:H films grown at elevated temperatures

I.A. Kurova, N.N. Ormont, O.A. Golikova*,
V.H. Kudoyarova*

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

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

Abstract Some characteristics of thermal and light-induced metastabilities have been investigated for α -Si:H films with various hydrogen concentration, C_H , which were deposited in a triode reactor at 300–390°C. The equilibrium temperature, T_E , was shown to decrease with increasing C_H . The photoconductivity decay also depends on the C_H : σ_{ph} falls with a period t more slowly than $t^{-1/3}$ in the films with low C_H .