

Влияние температуры и интенсивности освещения на образование метастабильных состояний в $a\text{-Si:H}$

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт[¶]

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),
119992 Москва, Россия

(Получена 21 июня 2007 г. Принята к печати 4 сентября 2007 г.)

В пленках $a\text{-Si:H}$ обнаружено немонотонное изменение с увеличением температуры в интервале 400–480 К концентрации медленных фотоиндуцированных метастабильных состояний и полуширины функции их распределения по времени отжига. Эти немонотонные изменения параметров ансамблей определяются зависящим от температуры соотношением скоростей образования и отжига исследуемых метастабильных состояний. Установлено также, что при уменьшении интенсивности освещения пленки падение концентрации метастабильных состояний и полуширины их распределения по времени отжига начинается при более высоких температурах. Это возможно объяснить, в частности, существенным уменьшением скорости отжига медленных метастабильных состояний по сравнению с уменьшением скорости их фотоиндуцированного образования, включающего, согласно трехуровневой модели, и термический процесс.

PACS: 61.43.Dq, 71.23.Cq, 71.55.Jv

1. Введение

В настоящее время еще нет ясного представления о природе и механизмах образования и отжига фотоиндуцированных метастабильных состояний (ФМС) в легированном аморфном гидрированном кремнии ($a\text{-Si:H}$). В то же время это важно для понимания физических процессов, происходящих в $a\text{-Si:H}$ при освещении светом и после его выключения, а также для решения задач практического применения этого материала. Поэтому необходимы дальнейшие детальные исследования образования и отжига ФМС в легированном $a\text{-Si:H}$.

Известно, что образование ФМС определяется четырьмя процессами: процессами фотоиндуцированного образования и отжига и термического образования и отжига метастабильных состояний. В зависимости от температуры и интенсивности освещения пленок $a\text{-Si:H}$ превалируют термические или фотоиндуцированные процессы, что обуславливает соответствующие изменения параметров образующихся при освещении ансамблей ФМС. Поэтому в настоящей работе исследовались изменения параметров ансамблей ФМС в зависимости от температуры и интенсивностей освещения пленки $a\text{-Si:H}$.

2. Эксперимент

В настоящей работе исследовались пленки $a\text{-Si:H}$ n -типа, слабо легированные бором. Концентрация бора в пленках измерялась методом вторичной ионной масс-спектрологии (SIMS) и составляла $N_B \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Пленки $a\text{-Si:H}$ были выращены методом осаждения в плазме ВЧ тлеющего разряда при температуре подложки 280°C и имели толщину 1 мкм. Для создания ФМС

пленки освещались белым светом от галогенной лампы. Параметры ансамблей ФМС, образованных в пленках в различных условиях, определялись из кинетики изменения темновой проводимости пленок после выключения освещения, отражающей кинетику термического отжига ФМС, согласно соотношению [1]

$$\left| \ln \left[\frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}} \right] \right| \propto N(t), \quad (1)$$

где σ_{d0} — равновесная темновая проводимость пленки, $N(t)$ — концентрация ФМС.

В исследованных нами пленках $a\text{-Si:H}$ при освещении образуются два типа ФМС — быстрые и медленные, в результате чего меняется положение уровня Ферми в запрещенной зоне и, следовательно, величина темновой проводимости пленки σ_d . При образовании быстрых ФМС проводимость σ_d падает, а при образовании медленных ФМС — растет.

В этом случае кинетика термического отжига ФМС немонотонна и описывается суммой растянутых экспонент, соответствующих отжигу образованных при освещении ансамблей быстрых и медленных ФМС [2]:

$$\lg \left[\frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}} \right] = a_1 \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{01}} \right)^{\beta_1} \right] + a_2 \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{02}} \right)^{\beta_2} \right]. \quad (2)$$

Индексы 1 и 2 относятся к ансамблям соответственно быстрых и медленных ФМС. Абсолютные значения параметров a_1 и a_2 определяют концентрации быстрых и медленных ФМС в относительных единицах в момент выключения освещения и начала термического отжига: $|a_1| = N_1(0)$ и $|a_2| = N_2(0)$; τ_{01} и τ_{02} — эффективные времена отжига ансамблей быстрых и медленных ФМС, близкие к значениям времен в максимумах функций

[¶] E-mail: ormont@phys.msu.ru

распределения ФМС по временам отжига τ в ансамблях — $f_1(\tau)$ и $f_2(\tau)$; β_1 и β_2 — параметры растянутых экспонент, обратные величины которых β_1^{-1} и β_2^{-1} характеризуют полуширину функций распределения $f_1(\tau)$ и $f_2(\tau)$ [3]. Таким образом, из кинетики термического отжига ансамблей ФМС, образованных при различных температурах и интенсивностях освещения, мы определяем полную концентрацию ФМС в ансамбле $N(0)$, эффективное время отжига ансамбля τ_0 и параметр β в зависимости от температуры и интенсивности освещения пленки.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Представлены результаты исследований влияния температуры и интенсивности освещения пленки a -Si:H на параметры образованных ансамблей быстрых и медленных ФМС. Измерения проводились в интервале температур 390–480 К, интенсивность освещения пленки W для образования ФМС изменялась от 8 до 80 мВт/см².

На рис. 1 представлена типичная измеренная в работе немонотонная кинетика термического отжига ФМС в исследованных пленках a -Si:H. Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую 3, которая представляет собой сумму двух растянутых экспонент с разными параметрами $N(0)$, τ_0 и β согласно формуле (2), отражающих кинетику термического отжига образованных при освещении ансамблей быстрых (кривая 1) и медленных (кривая 2) ФМС. Вначале происходит отжиг быстрых ФМС, который увеличивает измеряемую проводимость пленки. Затем отжигаются медленные ФМС, что уменьшает про-

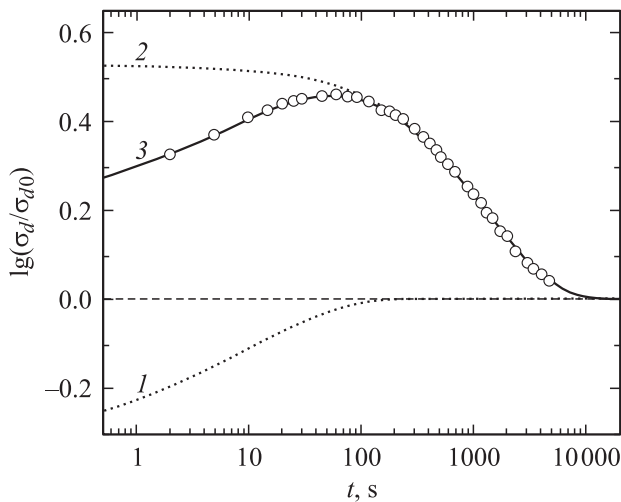


Рис. 1. Кинетика релаксации темновой проводимости пленки a -Si:H после ее освещения в течение 5 с светом интенсивностью $W = 80$ мВт · см⁻² при $T = 410$ К. Кружки — экспериментальные данные. Сплошная кривая 3 соответствует сумме двух растянутых экспонент (пунктирные кривые 1 и 2), отражающих релаксацию ансамблей соответственно быстрых и медленных ФМС.

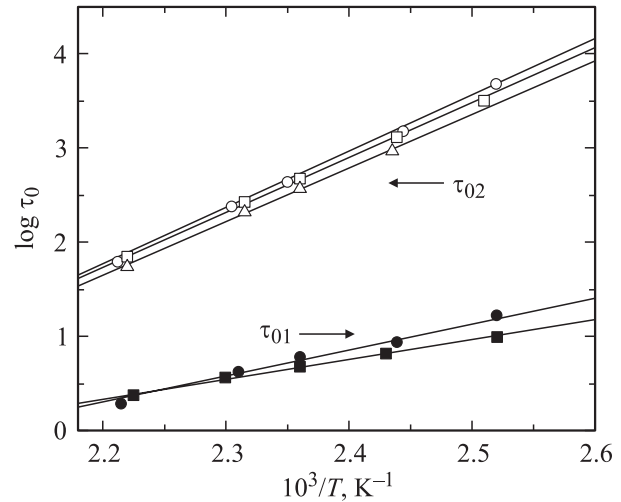


Рис. 2. Температурные зависимости эффективных времен отжига τ_0 ансамблей быстрых (τ_{01}) и медленных (τ_{02}) ФМС, образованных в пленке a -Si:H в результате ее предварительного освещения в течение 5 с светом разной интенсивности W . τ_{02} : кружки — 80 мВт · см⁻², $E_2 = 1.18$ эВ; квадраты — 40 мВт · см⁻², $E_2 = 1.15$ эВ; треугольники — 20 мВт · см⁻², $E_2 = 1.12$ эВ. τ_{01} : сплошные кружки — 80 мВт · см⁻², $E_1 = 0.53$ эВ; сплошные квадраты — 40 мВт · см⁻², $E_1 = 0.4$ эВ.

водимость пленки до равновесного значения σ_{d0} . Видно, что времена отжига для быстрых и медленных ФМС существенно различаются. Это позволяет с большой точностью определить параметры растянутых экспонент $N(0)$, τ_0 и β , характеризующие ансамбли как быстрых, так и медленных ФМС.

На рис. 2 приведены температурные зависимости эффективных времен отжига ансамблей быстрых и медленных ФМС, образованных при разных интенсивностях освещения пленки. Видно, что все полученные зависимости $\tau_0(T)$ имеют активационный характер. Кроме того, величины τ_0 для ансамблей быстрых и медленных ФМС существенно различаются ($\tau_{01} \ll \tau_{02}$), что связано с различными эффективными энергиями отжига этих ансамблей — E_1 и E_2 . Значения этих энергий, определенные из приведенных температурных зависимостей эффективных времен отжига, составляют при интенсивности освещения пленки $W = 80$ мВт · см⁻² $E_1 = 0.53$ эВ и $E_2 = 1.18$ эВ и слабо уменьшаются с уменьшением интенсивности.

На рис. 3 и 4 представлены температурные зависимости $N(0)$ и β для ансамблей быстрых и медленных ФМС, созданных при одинаковой длительности и разных интенсивностях освещения пленки. Видно, что температурные зависимости этих параметров для ансамблей быстрых и медленных ФМС в исследованной области температур различны. Для ансамбля быстрых ФМС (рис. 3) в области температур 400–450 К с ростом температуры происходит уменьшение $N_1(0)$ и увеличение β_1 , т.е. уменьшение полной концентрации и

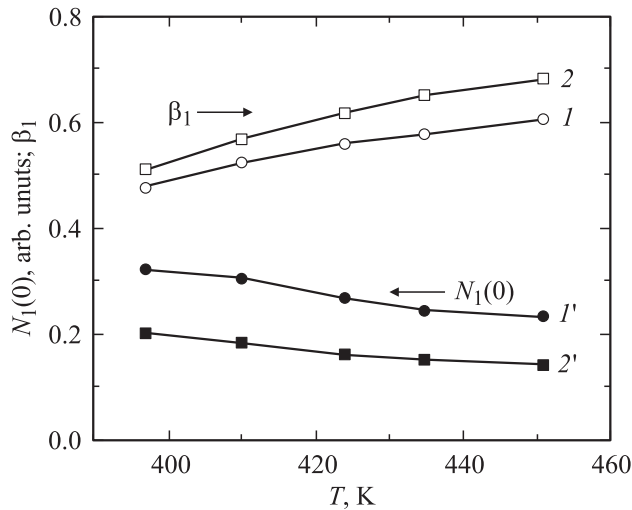


Рис. 3. Температурные зависимости параметра β_1 ансамбля быстрых ФМС и концентрации $N_1(0)$ быстрых ФМС, образованных в пленке α -Si:H в результате ее предварительного освещения в течение 5 с светом разной интенсивности W . β_1 : 1 — $80 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 2 — $40 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$; $N_1(0)$: 1' — $80 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 2' — $40 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

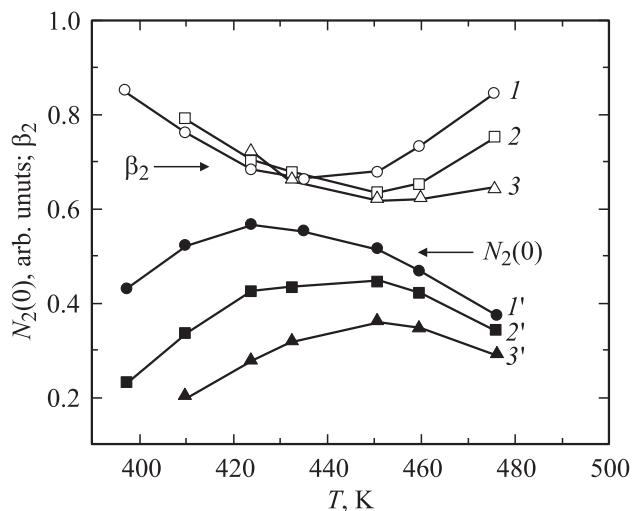


Рис. 4. Температурные зависимости параметра β_2 ансамбля медленных ФМС и концентрации $N_2(0)$ медленных ФМС, образованных в пленке α -Si:H в результате ее предварительного освещения в течение 5 с светом разной интенсивности W . β_2 : 1 — $80 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 2 — $40 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 3 — $20 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$; $N_2(0)$: 1' — $80 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 2' — $40 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$, 3' — $20 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

полуширины функции распределения быстрых ФМС в ансамбле по τ .

Для параметров $N_2(0)$ и β_2 ансамбля медленных ФМС (рис. 4) были обнаружены немонотонные зависимости от температуры в интервале 400–480 К. Сначала с ростом температуры $N_2(0)$ увеличивалась и β_2 уменьшалась, т.е. концентрация медленных ФМС в ансамбле и его полуширина увеличивались, а затем, как и в случае

ансамбля быстрых ФМС, с ростом температуры $N_2(0)$ уменьшалась, а β_2 увеличивалась, т.е. концентрация медленных ФМС в ансамбле и его полуширина уменьшались.

Как видно из рис. 3 и 4, уменьшение $N(0)$ и увеличение β с ростом температуры наблюдается для ансамблей и быстрых и медленных ФМС, но в разных температурных областях. Данные изменения $N(0)$ и β обусловлены проявлением термического отжига ФМС в процессе формирования ансамблей во время освещения пленки, когда параметры ансамблей определяются как скоростями образования, так и скоростями отжига ФМС. Эффективные энергии термического отжига E_1 и E_2 для ансамблей быстрых и медленных ФМС различны ($E_1 < E_2$). Это и определяет разные температурные области, где проявляется влияние термического отжига на параметры образующихся при освещении медленных и быстрых ансамблей ФМС.

На рис. 4 видно, что для медленных ФМС, в отличие от быстрых ФМС, в области температур 400–450 К при одном и том же времени освещения пленки наблюдается рост ансамбля с температурой — увеличение полной концентрации ФМС $N_2(0)$ и полуширины распределения ФМС по τ в ансамбле β_2^{-1} . Это может быть связано с тем, что фотоиндуцированное образование медленных ФМС включает процесс термической активации и описывается трехуровневой моделью образования ФМС [4]. В этой модели образование ФМС представляет собой двухступенчатый процесс, в котором первым шагом является оптическое возбуждение системы из равновесного состояния А в промежуточное состояние С, а вторым — термический переход из состояния С в метастабильное состояние В.

На рис. 4 также видно, что температура T_C , выше которой $N_2(0)$ и β_2^{-1} уменьшаются, с уменьшением интенсивности освещения пленки растет. В исследованной области температур эти параметры ансамбля определяются скоростями образования и отжига ФМС при формировании ансамбля. Скорость отжига ФМС определяется суммой скоростей как фотоиндуцированного отжига, так и термического отжига [5]. Скорость же образования ФМС является фотоиндуцированным процессом, включающим, однако, термическую составляющую, энергия активации которой меньше энергии активации термического отжига (трехуровневая модель образования ФМС [4]). При температуре, равной T_C , скорости отжига и образования ФМС сравниваются, а при $T > T_C$ скорость отжига при формировании ансамбля во время освещения пленки становится больше скорости образования ФМС. При уменьшении интенсивности освещения пленки уменьшается скорость фотоиндуцированного образования ФМС, в результате чего уменьшается полная концентрация ФМС в ансамбле. Уменьшается также и скорость отжига ФМС. Если это уменьшение одинаково, то величина T_C не должна изменяться. Если же уменьшение скорости отжига больше, чем уменьшение скорости образования, то равенство

скоростей образования и отжига ФМС будет достигаться при более высокой температуре, т.е. величина T_C будет увеличиваться. Более детальное рассмотрение этого эффекта невозможно, так как механизм фотоиндуцированного отжига ФМС в настоящее время не ясен.

4. Заключение

В работе обнаружена немонотонная температурная зависимость полной концентрации медленных ФМС и полуширины их распределения по τ в ансамбле в интервале температур 400–480 К. Эти немонотонные изменения параметров ансамблей медленных ФМС определяются зависящим от температуры соотношением скоростей образования и отжига медленных ФМС. Установлено также, что при уменьшении интенсивности освещения пленки во время формирования ансамбля ФМС падение $N_2(0)$ и β_2^{-1} с температурой, т.е. преобладание отжига ФМС в процессе формирования ансамбля, начинается при более высоких температурах. Это можно объяснить, в частности, существенным уменьшением скорости отжига медленных ФМС по сравнению с уменьшением скорости их фотоиндуцированного образования при снижении интенсивности освещения пленки.

Список литературы

- [1] J.K. Rath, W. Fuhs, H. Mell. *J. Non-Cryst. Sol.*, **137–138**, 279 (1991).
- [2] И.А. Курова, Э.В. Ларина, Н.Н. Ормонт, Д.В. Сенашенко. *ФТП*, **31**, 1455 (1997).
- [3] D. Redfield. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (Pittsburgh), N 258, 341 (1992).
- [4] Н.Н. Ормонт, И.А. Курова, И.П. Звягин. *Тез. докл. 5-й Росс. конф. по физике полупроводников* (Н. Новгород, 2001) т. 1, с. 153.
- [5] Н.Н. Ормонт, И.А. Курова, Г.В. Прокофьев. *ФТП*, **39**, 960 (2005),

Редактор Л.В. Беляков

The effect of temperature and light intensity on formation of metastable states in a -Si:H

I.A. Kurova, N.N. Ormont

Moscow State University, Faculty of Physics,
119992 Moscow, Russia

Abstract In a -Si:H films it was observed the nonmonotonous change with temperature increasing at the range 400–480 K of slow photo-induced metastable state concentration and distribution function half-width with respect to annealing time. These nonmonotonous changes of assemblies parameters are determined by the ratio of formation and annealing rates of metastable states, that depends on temperature. It was established, that with the intensity decreasing of the film lighting the declining of the metastable state concentration and distribution function half-width with respect to annealing time starts at higher temperatures. This can be explained in particular by the essential annealing rate decreasing of slow photo metastable states compared with rate decreasing of photoinduced formation, which includes also the thermal process, according to the three-level model.