

Изменение кинетики термической релаксации фотоиндуцированной при $T = 425$ К метастабильной темновой проводимости пленок a -Si:H слабой подсветкой на начальном этапе релаксации

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт

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

E-mail: ormont@phys.msu.ru

(Получена 30 июня 2016 г. Принята к печати 1 августа 2016 г.)

Исследуется влияние слабой подсветки на начальном этапе релаксации метастабильной фотоиндуцированной при $T = 425$ К темновой проводимости нелегированной пленки a -Si:H на скорость ее последующей термической релаксации. Установлено, что кинетика релаксации после подсветки и без нее описывается растянутыми экспонентами с величинами параметров τ_0 и β , меньшими в случае подсветки. Показано, что уменьшение этих параметров увеличивает скорость термической релаксации метастабильной темновой проводимости пленки. Так как температура и интенсивности освещения, при которых проводились исследования, невелики, изменения скорости релаксации метастабильной проводимости вряд ли связаны с существенной структурной перестройкой аморфной сетки. Однако это может быть обусловлено изменением системы водородных связей, в частности, в результате процессов генерации и релаксации подсветкой медленных фотоиндуцированных дефектов.

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44332.8366

1. Введение

Под влиянием внешних воздействий изменяются свойства большинства аморфных полупроводников. Исследование этих изменений представляет как научный, так и практический интерес. В аморфном гидрированном кремнии (a -Si:H) в 1977 году было обнаружено уменьшение темновой проводимости и фотопроводимости при освещении — эффект Стеблера–Вронского [1]. Этот эффект широко исследуется уже более 30 лет. Однако ясного понимания микроскопичности и механизмов структурной перестройки аморфной сетки, определяющих эффект Стеблера–Вронского, нет. Это обусловлено, в частности, тем, что структура пленок a -Si:H сложная. Имеются различные виды пор, в которых находится до 80% всего водорода пленки в виде молекул и водородных связей на внутренней поверхности пор. Кроме того, в аморфной сетке существуют более и менее упорядоченные области соответственно с меньшей и большей концентрацией водорода [2–4]. Такая сложная структура пленок a -Si:H дает возможность образования врожденных и фотоиндуцированных дефектов разных типов [5–8].

В нашей предыдущей работе в нелегированных пленках a -Si:H с высокой фоточувствительностью при температурах выше комнатных был обнаружен аномальный эффект Стеблера–Вронского (ЭСВ): повышение темновой проводимости σ_d и фотопроводимости σ_{ph} при освещении пленок [9]. Проведенные исследования показали, что это может быть обусловлено фотоиндуцированным образованием двух типов дефектов, быстрых и медленных. Энергетические уровни этих дефектов расположены соответственно в нижней и верхней половине запрещенной зоны. Известно, что быстрые дефекты —

оборванные связи (ОС) кремния. Было предположено, что медленные дефекты — дефекты типа центральной связи водорода или оборванной связи рядом с SiH-связью. Последующие исследования кинетики релаксации фотоиндуцированной метастабильной темновой проводимости в темноте и при наличии подсветки показали, что особенности релаксации $\sigma_d(t)$ при подсветке могут быть обусловлены помимо термической релаксации процессами фотоиндуцированной генерации и релаксации медленных фотоиндуцированных дефектов [10].

В настоящей работе исследовалось влияние слабой подсветки на начальном этапе релаксации фотоиндуцированной при $T > 420$ К метастабильной темновой проводимости пленки a -Si:H на кинетику и время ее последующей термической релаксации.

2. Образцы и детали эксперимента

В данной работе исследовались нелегированные пленки a -Si:H, выращенные методом плазмохимического осаждения при температуре подложки 250°C . Толщина пленок составляла 1 мкм. Пленки имели высокую фоточувствительность: $k = \frac{\sigma_{ph}}{\sigma_d} = 10^6$ при $T = 300$ К и интенсивности освещения $W = 50$ мВт · см⁻². Измерения пленок проводились в криостате в вакууме. Перед измерениями пленки всегда отжигались при $T = 200^\circ\text{C}$ в течение 30 мин и медленно охлаждались до температуры проведения эксперимента. Энергия термической активации отожженных исследованных пленок составляла 0.82 эВ. Пленки освещались белым светом от галогеновой лампы с ИК-фильтром. Для подсветки слабой интенсивности использовались дополнительно нейтральные фильтры.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Исследовалась кинетика релаксации фотоиндуцированной метастабильной темновой проводимости σ_d нелегированных пленок $a\text{-Si:H}$ при $T = 425\text{ K}$. Отожженные пленки освещались белым светом с интенсивностью $W = 15\text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение 600 с.

На рис. 1 представлены результаты измерений кинетики термической релаксации темновой проводимости пленки (σ_d (точки на кривой 1)), кинетики релаксации σ_d при наличии подсветки $W = 0.65\text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (точки на кривой 2), кинетики термической релаксации σ_d после выключения подсветки при $t = t_0$ (точки на кривой 3), кинетики термической релаксации σ_d при $t > t_0$ без предварительной подсветки (точки на кривой 4). На рис. 1 величина темновой проводимости пленки нормирована к σ_0 — темновой проводимости отоженной пленки при температуре измерений. Видно, что кинетика термической релаксации σ_d после подсветки и без нее при $t > t_0$ различна и время релаксации σ_d в результате предварительной подсветки уменьшается.

На рис. 2 показаны результаты измерений кинетики термической релаксации $\sigma_{d3}(t)$ и $\sigma_{d4}(t)$ (точки на кривых 3 и 4 из рис. 1) со шкалой времени, когда за начальный момент принято время t_0 — момент выключения подсветки. Представленные зависимости $\sigma_{di}(t)$ хорошо описываются растянутыми экспонентами с разными величинами параметров:

$$\frac{\sigma_{di}(t)}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{di}(0)}{\sigma_0} \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_{0i}}\right)^{-\beta_i}\right) \quad (1)$$

(символ i соответствует номеру кривых 3 и 4 на рис. 1 и 2). Из значений параметров, приведенных на рис. 2,

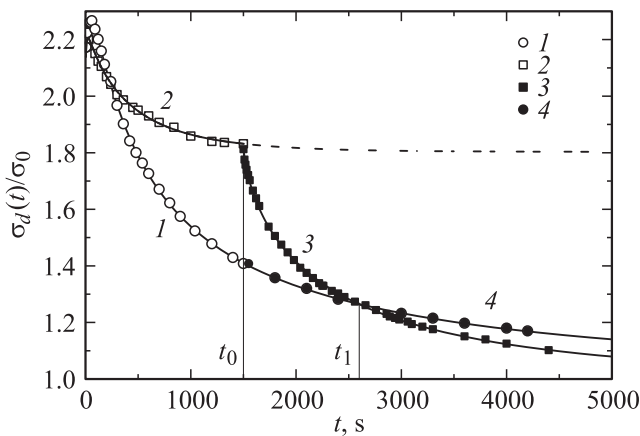


Рис. 1. Кинетика релаксации метастабильной фотоиндуцированной при $T = 425\text{ K}$ и интенсивности освещения $W = 15\text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ темновой проводимости нелегированной пленки $a\text{-Si:H}$ в темноте (кривые 1, 4) и при подсветке с интенсивностью $W = 0.65\text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 2), а также после выключения подсветки (кривая 3). Момент выключения подсветки $t_0 = 1500\text{ с}$. Величина темновой проводимости пленки нормирована к σ_0 — темновой проводимости отоженной пленки при температуре измерений.

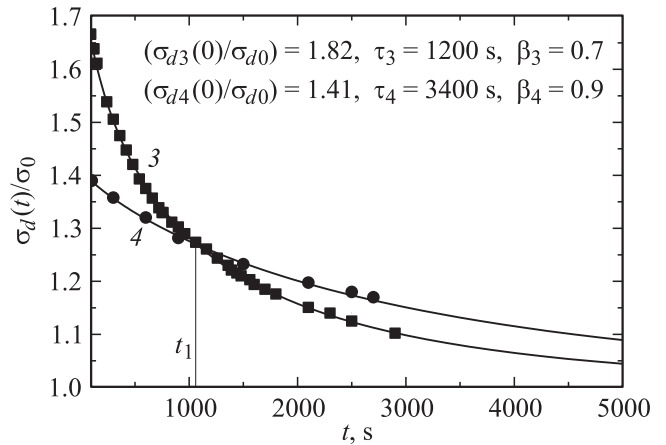


Рис. 2. Кинетика термической релаксации метастабильной фотоиндуцированной темновой проводимости пленки $a\text{-Si:H}$ после предварительной релаксации при подсветке в течение $t_0 = 1500\text{ с}$ (рис. 1, кривая 3) и предварительной изохронной релаксации в темноте (рис. 1, кривая 4). За начальный момент времени принято t_0 — момент выключения подсветки. Время t_1 соответствует условию $\sigma_{d3}(t_1) = \sigma_{d4}(t_1)$. На рисунке указаны величины параметров растянутых экспонент, описывающих кинетику релаксации σ_{d3} и σ_{d4} .

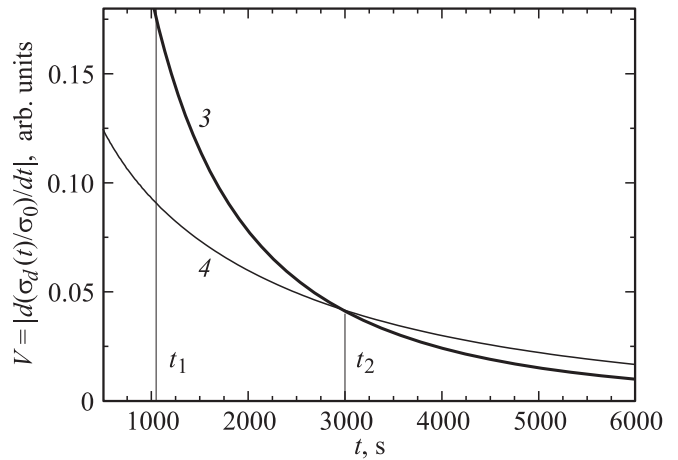


Рис. 3. Кинетика скоростей термической релаксации метастабильной фотоиндуцированной темновой проводимости $V_3(t) = \left|\frac{d\sigma_{d3}(t)}{dt}\right|$ и $V_4(t) = \left|\frac{d\sigma_{d4}(t)}{dt}\right|$, вычисленных соответственно из кривых 3 и 4 на рис. 2. Время t_2 соответствует условию $V_{d3}(t_2) = V_{d4}(t_2)$.

следует, что $\tau_{03} < \tau_{04}$, $\beta_3 < \beta_4$ и $\frac{\sigma_{d3}(0)}{\sigma_0} > \frac{\sigma_{d4}(0)}{\sigma_0}$. На рис. 2 видно также, что скорость термической релаксации темновой проводимости в результате предварительной подсветки больше.

На рис. 3 показана кинетика скорости термической релаксации темновой проводимости после ее предварительной релаксации с подсветкой $V_3(t) = \left|\frac{d\sigma_{d3}(t)}{dt}\right|$ и без нее $V_4(t) = \left|\frac{d\sigma_{d4}(t)}{dt}\right|$. Видно, что отношение скоростей $\frac{V_3(t)}{V_4(t)} > 1$ до времени $t = t_2$. При $t > t_2$ на конечном

участке релаксации, где величина $\sigma_{d3}(t)$ близка к σ_0 , отношение скоростей $\frac{V_3(t)}{V_4(t)} < 1$.

Скорость релаксации темновой проводимости, кинетика релаксации которой описывается растянутой экспонентой, сложным образом зависит от параметров этой экспоненты:

$$V_i(t) = \left| \frac{d\sigma_{di}(t)}{dt} \right| = \beta_i \tau_{0i}^{-\beta_i} \tau^{-(1-\beta_i)} \sigma_{di}(t). \quad (2)$$

Отношение скоростей релаксации $\frac{V_3(t)}{V_4(t)}$, согласно формуле (2), имеет вид

$$\frac{V_3(t)}{V_4(t)} = \frac{\beta_3 \tau_{03}^{-\beta_3}}{\beta_4 \tau_{04}^{-\beta_4}} \frac{\sigma_{d3}(t)}{\sigma_{d4}(t)} \frac{t^{-(1-\beta_3)}}{t^{-(1-\beta_4)}}. \quad (3)$$

Первый множитель в формуле (3) больше единицы, что определяется меньшей величиной параметров τ_0 и β после подсветки, и не зависит от времени. Произведение двух других множителей $\frac{\sigma_{d3}(t)}{\sigma_{d4}(t)} \frac{t^{-(1-\beta_3)}}{t^{-(1-\beta_4)}}$ уменьшается со временем. Вследствие этого при $t = t_2$ скорости V_3 и V_4 становятся равными, а при $t > t_2$, когда метастабильные проводимости σ_{d3} и σ_{d4} близки по величине к равновесной проводимости, скорость V_4 немного превышает

4. Заключение

Таким образом, обнаруженное увеличение скорости термической релаксации метастабильной фотоиндуцированной проводимости после подсветки происходит вследствие изменения величин параметров τ_0 , β и $\sigma_d(0)$. Эти изменения вряд ли связаны с существенной структурной перестройкой пленки, поскольку температура и интенсивность освещения, при которых проводились данные исследования, невелики. Наблюдаемые изменения параметров растянутой экспоненты, описывающей термическую релаксацию метастабильной темновой проводимости после подсветки, могут быть обусловлены изменением системы водородных связей, а также ансамбля медленных дефектов в результате их фотоиндуцированной генерации и релаксации подсветкой. Это может влиять на скорость диффузии водорода, определяющей кинетику релаксации метастабильных медленных дефектов в пленке *a*-Si:H.

Список литературы

- [1] D.L. Stabler, C.R. Wronski. Appl. Phys. Lett., **31**, 292 (1977).
- [2] D. Bobela, H. Branz, P. Stradins. Appl. Phys. Lett., **98**, 201908 (2011).
- [3] W. Beyer, W. Hilgers, P. Prunici, D. Lennartz. J. Non-Cryst. Sol., **358**, 2023 (2012).
- [4] S.C. Agarwal. Phil. Mag., **93**, 4213 (2013).
- [5] C. Longeaud, D. Roy, O. Saadane. Phys. Rev. B, **65**, 085206 (2002).
- [6] I. Sakata, T. Kamei, M. Yamanaka. Phys. Rev. B, **76**, 075206 (2007).
- [7] K. Morigaki, H. Hikita. Phys. Status Solidi C, **8**, 2564 (2011).
- [8] H. Tanimoto, H. Abai, H. Mizubayashi, M. Yamanaka, I. Sakata. J. Appl. Phys., **115**, 073503 (2014).
- [9] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт. ФТП, **47**, 757 (2013).
- [10] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт. ФТП, **49**, 603 (2015).

Редактор Г.А. Оганесян

Modification of the kinetics of photoinduced at $T = 425$ K thermal relaxation of metastable dark conductivity of *a*-Si:H films caused by the weak illumination at the initial stage of relaxation

I.A. Kurova, N.N. Ormont

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

Abstract It is studied the effect of weak illumination at the initial stage of relaxation of dark metastable conductivity of undoped *a*-Si:H films photoinduced at $T = 425$ K on the rate of its subsequent thermal relaxation. It is found that kinetics of relaxation after illumination or in the absence of illumination is described by stretched exponents with values of the parameters τ_0 and β that are less in the case of illumination. It is shown that decreasing of these parameters increases the rate of thermal relaxation of the dark conductivity of the film. Since temperature and illumination intensities at which the studies were conducted were low, changes of the rate of metastable conductivity relaxation was hardly associated with a significant restructuring of the amorphous network. Perhaps this is due to changes in hydrogen bond system particularly to the processes of generation and relaxation of slow photoinduced defects under the influence of pre-illumination.