

Светоиндуцированная релаксация метастабильной проводимости нелегированных пленок $a\text{-Si:H}$, освещенных при повышенных температурах

© И.А. Курова, Н.Н. Ормонт[†]

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

(Получена 30 июня 2014 г. Принята к печати 6 ноября 2014 г.)

Исследована кинетика релаксации светоиндуцированной при температуре выше 140°C метастабильной темновой проводимости нелегированных пленок $a\text{-Si:H}$. Измерения проводились в темноте и при подсветке разной интенсивности. Рассчитанные временные зависимости скорости релаксации темновой проводимости были проанализированы в предположении независимости от освещения термических скоростей генерации и релаксации метастабильных дефектов, образованных предварительной подсветкой. Показано, что особенности кинетики скоростей релаксации при подсветке определяются наличием светоиндуцированных процессов релаксации и генерации медленных метастабильных дефектов, энергетические уровни которых расположены в верхней половине запрещенной зоны.

1. Введение

В последние годы в ряде работ были исследованы изменения свойств пленок аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si:H}$) в результате их освещения при повышенных температурах [1–5]. Обнаруженные эффекты не наблюдались при температурах вблизи комнатной вследствие малых скоростей процессов структурной перестройки аморфной сетки, которые их обуславливают.

В нашей предыдущей работе [6] в высокочувствительных нелегированных пленках $a\text{-Si:H}$, освещенных при температурах выше 110°C , были обнаружены аномальный эффект Стеблера–Вронского, гистерезис фотопроводимости и немонотонная релаксация светоиндуцированной темновой проводимости. Было показано, что наблюдаемые эффекты могут быть обусловлены образованием двух типов светоиндуцированных метастабильных дефектов — быстрых и медленных. Их энергетические уровни расположены соответственно в нижней и верхней половине запрещенной зоны. Известно, что уровни в нижней половине запрещенной зоны — уровни оборванных связей кремния [7]. Образование энергетических уровней в верхней половине запрещенной зоны нелегированных пленок, освещенных при $T > 800^\circ\text{C}$, было обнаружено в работах [1,2], но природа их не обсуждалась.

Нами было предположено, что медленными метастабильными дефектами, образующими уровни в верхней половине запрещенной зоны, могут быть дефекты типа оборванной связи вблизи связи Si–H. Отметим, что образование таких дефектов было включено в предложенных в работах [1,8] моделях структурных перестроек аморфной сетки пленок $a\text{-Si:H}$ при их освещении. Однако, свойства этих дефектов не обсуждались.

В настоящей работе исследовалась кинетика релаксации темновой проводимости нелегированных пленок

$a\text{-Si:H}$ в темноте и при наличии подсветки после их предварительного освещения при температуре выше 140°C . Целью этих исследований — установление наличия светоиндуцированной релаксации медленных метастабильных дефектов. Светоиндуцированная релаксация быстрых метастабильных дефектов была обнаружена в работах [9,10].

2. Образцы и детали эксперимента

В данной работе исследовались нелегированные пленки $a\text{-Si:H}$ толщиной 1 мкм, выращенные методом плазмохимического осаждения при температуре подложки 250°C . Пленки имели высокую фоточувствительность: $k = \frac{\sigma_{ph}}{\sigma_d} = 10^6$ при $T = 300\text{ K}$ и $W = 50\text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Перед измерениями пленки отжигались при $T = 200^\circ\text{C}$ в течение 30 мин и медленно охлаждались до температуры эксперимента. Энергия термической активации отожженных исследованных пленок составляла 0.82 эВ. Для освещения пленок использовалась галогеновая лампа с ИК фильтром и набором нейтральных фильтров для изменения интенсивности освещения. Измерения проводились в криостате в вакууме.

3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлена кинетика релаксации темновой проводимости предварительно освещенной при $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 600 с пленки $a\text{-Si:H}$ в темноте (кривая 1) и при подсветках различной интенсивности (кривые 2 и 3). Видно, что кинетика релаксации различна. Для анализа процесса релаксации были вычислены и представлены на рис. 2 временные зависимости скоростей релаксации темновой проводимости. Нумерация кривых сохранена.

[†] E-mail: ormont@phys.msu.ru

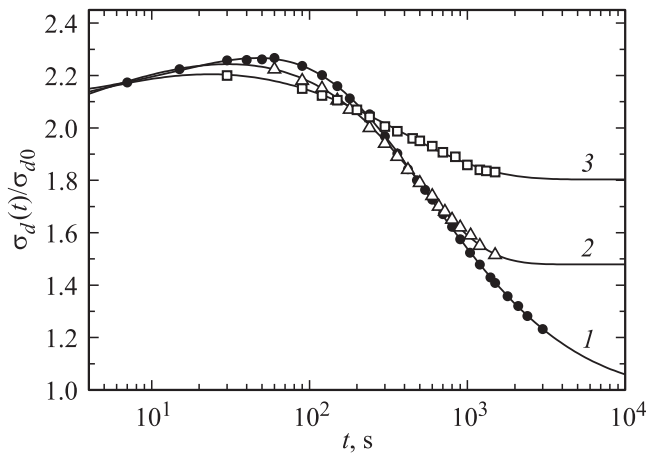


Рис. 1. Кинетика релаксации нормированной темновой проводимости $\frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}}$ освещенной в течение 600 с при $T = 150^\circ\text{C}$ пленки $a\text{-Si:H}$ в темноте (1) и при подсветках разной интенсивности: $W = 0.25 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (2), $W = 0.65 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (3); σ_{d0} — равновесная темновая проводимость отожженной пленки.

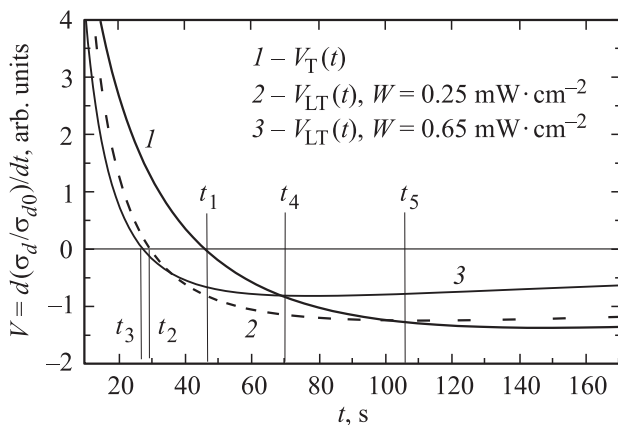


Рис. 2. Кинетика скорости релаксации нормированной темновой проводимости $V = \frac{d(\frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}})}{dt}$ освещенной в течение 600 с при $T = 150^\circ\text{C}$ пленки $a\text{-Si:H}$ в темноте (1) и при подсветках разной интенсивности: $0.25 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (2), $0.65 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (3). Характерные времена t_1 – t_5 определяются следующими равенствами: $V_T(t_1) = 0$ (кривая 1), $V_{LT}(t_2) = 0$ (кривая 2), $V_{LT}(t_3) = 0$ (кривая 3), $V_{LT}(t_4) = V_T(t_4)$ (кривые 3 и 1), $V_{LT}(t_5) = V_T(t_5)$ (кривые 2 и 1).

Релаксация темновой проводимости определяется процессами генерации и релаксации быстрых и медленных светоиндуцированных дефектов. Скорости этих процессов имеют разные знаки, что определяется тем, увеличивает или уменьшает со временем данный процесс темновую проводимость пленки. В нашем случае скорость релаксации темновой проводимости имеет положительный знак при релаксации быстрых дефектов, а также при образовании медленных дефектов. Скорость

отрицательна при образовании быстрых дефектов, а также при релаксации медленных дефектов.

Анализ временной зависимости скорости термической релаксации темновой проводимости $V_T(t)$ (рис. 2, кривая 1) показывает: 1) при $t < t_1$ скорость термической релаксации V_T положительна и определяется процессом термической релаксации быстрых дефектов; 2) при $t > t_1$ V_T отрицательна и определяется процессом релаксации медленных дефектов.

При анализе временных зависимостей скоростей релаксации в условиях подсветки (V_{LT}) было предположено, что скорости термических процессов остаются неизменными, к ним лишь добавляются скорости световых процессов генерации и релаксации быстрых и медленных светоиндуцированных метастабильных дефектов $V_{LT} = V_T + V_L$. Отметим, что термические и световые скорости генерации и релаксации быстрых и медленных дефектов имеют одинаковые знаки.

Временные зависимости скоростей релаксации темновой проводимости при подсветках $V_{LT}(t)$ (кривые 2 и 3 на рис. 2) и в темноте $V_T(t)$ (кривая 1 на рис. 2) различаются. Для сравнительного анализа кривых 1 и 2 выделим 4 временных участка.

1) При $t < t_2$ скорости V_T и V_{LT} положительны, но $V_{LT} = (V_T + V_L)$ меньше V_T . Это означает, что V_L отрицательна. Отрицательный знак V_L определяется наличием в этом временном участке процесса световой релаксации медленных метастабильных дефектов.

2) В области $t_2 < t < t_1$ скорость V_T положительна, а скорость $V_{LT} = V_T + V_L$ отрицательна. Это означает, что V_L больше V_T по абсолютной величине, т.е. на этом временном участке преобладает процесс световой релаксации медленных дефектов.

3) В области $t_1 < t < t_5$ обе скорости V_T и V_{LT} отрицательны, при этом по абсолютной величине $V_{LT} > V_T$. Однако разница эта уменьшается до нуля при $t = t_5$. Это определяется тем, что величина скорости V_{LT} определяется не только отрицательной скоростью световой и термической релаксации медленных метастабильных дефектов, но и положительной скоростью световой генерации медленных дефектов.

4) При $t > t_5$ скорость V_T по абсолютной величине больше V_{LT} . Это указывает на то, что положительная скорость световой генерации медленных дефектов становится больше отрицательной скорости их световой релаксации.

При большей интенсивности подсветки (кривая 3 на рис. 2) характер временной зависимости скорости релаксации темновой проводимости V_{LT} не изменяется, но уменьшаются величины характерных времен ($t_3 < t_2$, $t_4 < t_5$), а в области $t > t_4$ скорость V_{LT} по абсолютной величине меньше скоростей V_T и скорости V_{LT} для подсветки с меньшей интенсивностью (кривая 2). Это обусловлено тем, что при увеличении интенсивности подсветки растет скорость генерации медленных метастабильных дефектов, имеющая положительный знак.

4. Заключение

В работе исследовалась кинетика релаксации светоиндуцированной при температуре выше 140°C метастабильной темновой проводимости нелегированных пленок $a\text{-Si:H}$. Немонотонная релаксация проводимости — быстрый ее рост до величин, превышающих равновесную проводимость, и последующий медленный спад до равновесного значения — определялась процессами релаксации и генерации двух разных типов светоиндуцированных метастабильных дефектов и зависела от интенсивности подсветки. Для анализа влияния подсветки на кинетику релаксации темновой проводимости пленки были рассчитаны временные зависимости скоростей изменения метастабильной проводимости в темноте и при подсветке. Было предположено, что термические скорости генерации и релаксации метастабильных дефектов не зависят от освещения. Проведенный для этого случая анализ особенностей кинетики скоростей релаксации светоиндуцированной метастабильной темновой проводимости пленок $a\text{-Si:H}$ при их подсветке обнаружил наличие процессов светоиндуцированной релаксации и генерации медленных метастабильных дефектов, энергетические уровни которых расположены в верхней половине запрещенной зоны.

Список литературы

- [1] C. Longeaud, D. Roy, O. Saadane. *Phys. Rev. B*, **65**, 085 206 (2002).
- [2] I. Sakata, T. Kamei, M. Yamanaka. *Phys. Rev. B*, **76**, 075 206 (2007).
- [3] P. Stradins, M. Kondo, A. Matsuda. *J. Non-Cryst. Sol.*, **354**, 2144 (2008).
- [4] K. Takeda, K. Morigaki, H. Hikita, P. Roka i Cabarrocas. *J. Appl. Phys.*, **104**, 053 715 (2008).
- [5] D. Bobela, H. Branz, P. Stradins. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 201 908 (2011).
- [6] И.А. Курова, Н.Н. Ормонт. *ФТП*, **47** (6), 757 (2013).
- [7] N.F. Mott. *Phil. Mag. B*, **51**, 177 (1985).
- [8] K. Morigaki, H. Hikita. *Phys. Status Solidi*, **8** (9), 2564 (2011).
- [9] R. Meaudre, M. Meaudre. *Phys. Rev. B*, **45**, 12 134 (1992).
- [10] H. Gleskova, P.A. Morin, S. Wagner. *Appl. Phys. Lett.*, **62** (17), 2063 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

Light-induced relaxation of metastable conductivity of undoped films $a\text{-Si:H}$, illuminated at elevated temperatures

I.A. Kurova, N.N. Ormont

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

Abstract The kinetics of light-induced relaxation at a temperature above 140°C metastable dark conductivity of undoped films $a\text{-Si:H}$ was studied. Measurements were carried out in the darkness and under illumination of different intensity. The calculated time dependences of the relaxation rate of the dark conductivity have been analyzed under the assumption of independence from the lighting of the thermal rates of generation and relaxation of metastable defects formed pre-illumination. It was shown that the peculiarities of kinetics of the relaxation rates at illumination determined by the presence of light-induced relaxation processes and generation of slow metastable defects whose energy levels are in the upper half of the bandgap.