

## ОСЦИЛЛЯЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ И ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КИНЕТИКИ В $\alpha$ -Si : H

Б. Г. Будагян, А. А. Айвазов, О. Н. Становов

Московский институт электронной техники, 103498, Москва, Россия  
(Получена 30 ноября 1992 г. Принята к печати 5 апреля 1993 г.)

Проведено исследование обнаруженного ранее эффекта высокотемпературных (80—200 °С) осцилляций фотопроводимости в пленках  $\alpha$ -Si : H. Установлена корреляция между данным явлением и особенностями релаксационной кинетики в структурно-неоднородном материале. Показано, что параметры осцилляций контролируются диффузионным движением водорода между состояниями внутренних границ и объема материала, а их изменения во времени описываются законом растянутой экспоненты.

При проведении исследований электрофизических свойств аморфного гидрогенизированного кремния ( $\alpha$ -Si : H) и сплавов на его основе был обнаружен ряд интересных явлений, таких как неравновесная проводимость [1] и осцилляции фотопроводимости [2]. Мы предположили, что эти эффекты связаны с влиянием микроструктуры на метастабильные состояния в материале. Физическая природа подобных явлений может быть раскрыта при детальном изучении влияния микроструктуры на релаксационные процессы в  $\alpha$ -Si : H и сплавах на его основе.

Как известно, низкочастотные осцилляции фототока наблюдались в ряде широкозонных полупроводников типа монокристаллических CdS [3], ZnSe [4]. При этом были обнаружены сверхлинейность люкс-амперных характеристик, температурное и ИК-гашение фототока. Применительно к этим фактам была развита модель Роуза [5], объясняющая подобное поведение фотопроводимости с точки зрения наличия в запрещенной зоне полупроводника трех типов уровней с разными сечениями захвата неравновесных носителей заряда. Следует отметить, что осцилляции фототока в соединениях  $A^{II}B^{VI}$  наблюдались только в узком диапазоне температур, близких к температуре жидкого азота, при одновременном освещении образцов видимым и ИК излучением в достаточно ограниченных диапазонах интенсивности освещения и приложенного электрического поля.

Температурное и ИК гашение фотопроводимости наблюдались и в пленках аморфного гидрогенизированного кремния в области понижения температур (200—250 K) [6] и также были объяснены с точки зрения трехуровневой модели. Регулярные затухающие колебания фототока при комнатной температуре наблюдались также в работе [7] при исследовании квазиоднородных пленок  $\alpha$ -Si : H, полученных методом «тлеющего разряда». Это явление связывалось с процессами диэлектрической релаксации высокоомных областей материала, поскольку период наблюдаемых колебаний фототока составлял  $\sim 10^{-2}$  с. В отличие от полученных в работах [3, 4, 7] результатов, обнаруженные нами осцилляции фотопроводимости [2] наблюдались при освещении образцов светом He—Ne-лазера постоянной интенсивности только в области высоких температур (80÷250 °С) и имели период колебаний  $\sim 4 \div 6$  с.

Таким образом, трехуровневая модель, которая была успешно использована для интерпретации осцилляций фототока в случае низких температур, в нашем

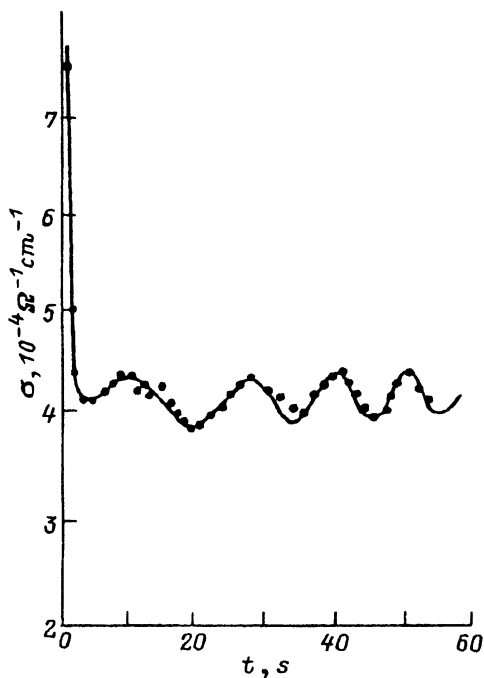


Рис. 1. Типичная кривая зависимости фотопроводимости пленки  $a\text{-Si:H}$  от времени при температуре  $150^\circ\text{C}$ . Сплошная линия — модельная кривая.

случае неприменима. Этот результат свидетельствует о том, что наблюдаемый нами эффект имеет иную природу и связан с процессами структурных перестроек в материале.

В данной работе мы проводим анализ явления высокотемпературных ( $80\div 250^\circ\text{C}$ ) осцилляций фотопроводимости в пленках  $a\text{-Si:H}$  на основе изучения влияния микроструктуры на релаксационные процессы в материале.

Пленки  $a\text{-Si:H}$  были получены методом ВЧ разложения в плазме «тлеющего разряда» смеси силана и водорода ( $10\% \text{SiH}_4 + 90\% \text{H}_2$ ). Плотность мощности разряда слегка превышала свое оптимальное значение для получения образцов с выраженной структурной неоднородностью. Микроструктура пленок анализировалась с помощью ИК спектроскопии. Линия поглощения на  $2075 \text{ см}^{-1}$

свидетельствовала о наличии в материале структурных неоднородностей в виде микропор, микрополостей и т. п., содержащих кластеризованные  $\text{Si-H}$  группы [8]. Для измерения характера изменения фотопроводимости во времени использовался универсальный цифровой электромметр В7-45, сопряженный с персональным компьютером типа IBM PC. Данная система обеспечивала прецизионные измерения малых токов до  $10^{-17} \text{ A}$  с дискретностью автоматизированного снятия показаний до  $10^{-2} \text{ с}$ .

На рис. 1 представлена типичная кривая зависимости фотопроводимости пленки от времени при температуре  $150^\circ\text{C}$ . На этой зависимости наблюдаются затухающие периодические колебания вокруг некоторой базовой линии. В связи с этим для анализа данного явления были ориентировочно выделены базовая линия и собственно колебания. В результате были получены кривые, представленные на рис. 2. Как видно, период колебаний фотопроводимости составляет  $4\text{--}6 \text{ с}$ , что сравнимо со временем для межатомного перехода атома водорода в структурно-неоднородных пленках  $a\text{-Si:H}$  (коэффициент диффузии  $D_{\text{H}} \approx 10^{-16} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  при  $150^\circ\text{C}$ ) [9, 10]. Таким образом, этот результат, а также поведение базовой линии, характерное для зависимостей, описывающих эффект Стэблера—Вронского [11], свидетельствуют о структурно-релаксационной природе наблюдаемых осцилляций.

Для описания базовой линии светоиндуцированного изменения проводимости была использована зависимость «растянутой экспоненты» [12], которая, как было установлено в работе [13], описывает также генерацию и релаксацию светоиндуцированных дефектов

$$N(t) = N_s - (N_s - N_0) \exp[-(t/\tau)^\beta], \quad (1)$$

где  $N(t)$  — плотность метастабильных дефектов в момент времени  $t$ ,  $N_s$  — равновесная плотность этих дефектов,  $N_0$  — плотность дефектов в начальный момент времени,  $\tau$  — эффективная постоянная времени,  $\beta$  — дисперсионный параметр.

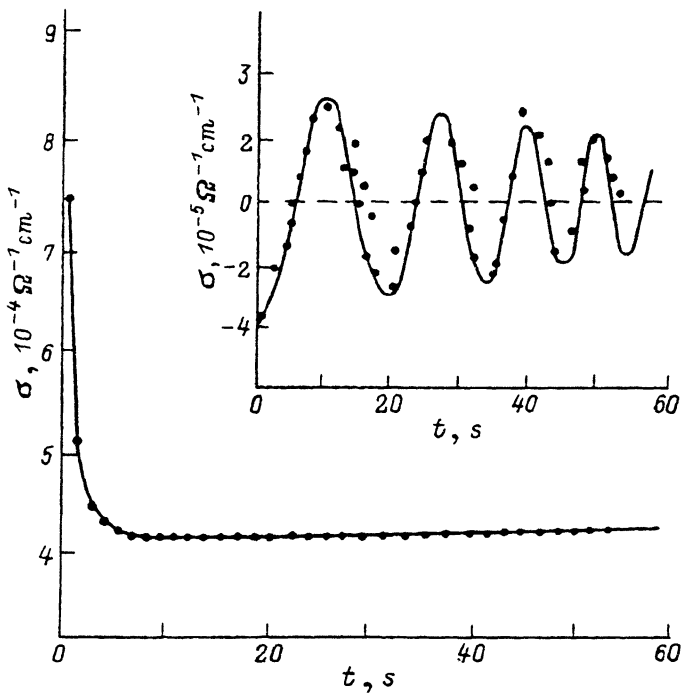


Рис. 2. Базовая линия светоиндуцированного изменения фотопроводимости для пленки  $\alpha$ -Si : H при  $150^\circ\text{C}$ . На вставке показана кривая осцилляции фотопроводимости. Сплошные линии — модельные кривые.

Как видно из рис. 2, поведение кривой может быть описано суперпозицией как минимум двух «растянутых экспонент»

$$\sigma(t) = \{\sigma_{\infty 1} - (\sigma_{\infty 1} - \sigma_{01}) \exp[-(t/\tau_1)^{\beta 1}]\} + \{\sigma_{\infty 2} - (\sigma_{\infty 2} - \sigma_{02}) \exp[-(t/\tau_2)^{\beta 2}]\}. \quad (2)$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся соответственно к возрастанию и убыванию фотопроводимости, а символы 0 и  $\infty$  — к ее исходным и равновесным значениям. Интерполяционное моделирование базовой линии в соответствии с зависимостью (2) показано на рис. 2 сплошной линией. Видно, что зависимость (2) достаточно точно описывает поведение базовой линии светоиндуцированного изменения фотопроводимости. Параметры «растянутых экспонент»  $\tau$  и  $\beta$  определялись из лучшего соответствия модельной кривой экспериментальным данным и приведены в таблице.

Для описания осцилляций фотопроводимости использовали гармоническую функцию с затухающей амплитудой колебаний. В результате проведенного моделирования было установлено, что затухание колебаний подчиняется закону «растянутой экспоненты», параметры которой аналогичны значениям, полученным для базовой линии (см. таблицу). Кроме того, в процессе математического моделирования было установлено, что для более точного описания изменений фотопроводимости необходимо задать экспоненциальное уменьшение периода колебаний. В результате была получена следующая зависимость:

$$\sigma(t) = \sigma_{osc} \exp[-(t/\tau_{osc})^{\beta_{osc}}] \sin \left[ \frac{2\pi t}{T \cdot \exp(-t/\tau_3)} + \varphi \right], \quad (3)$$

Параметры моделирования  
осцилляций фотопроводимости для  
пленок  $a\text{-Si:H}$  в зависимости от  
температуры и интенсивности  
освещения

Температура, °C	150		200
	10 <sup>15</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>
Интенсивность, см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>			
$\tau_1$	120	110	28
$\beta_1$	0.7	1.2	0.9
$\tau_2$	8	2	—
$\beta_2$	0.7	1.2	—
$\tau_{osc}$	120	100	40
$\beta_{osc}$	0.8	1.0	0.9
$T$	35	25	45
$\tau_3$	110	95	50
$\varphi$	2.5	4.5	2.3

где  $\sigma_{osc}$  — максимальная амплитуда осцилляций, захватывающая со временем по закону «растянутой экспоненты» с параметрами  $\tau_{osc}$  и  $\beta_{osc}$ ;  $T$  — период колебаний, захватывающий по экспоненте с характеристическим временем  $\tau_3$ ;  $\varphi$  — начальная фаза колебаний, используемая для более точной подгонки модельной кривой к экспериментальным данным. Результаты моделирования осцилляций фотопроводимости в соответствии с зависимостью (3) показаны сплошной линией на вставке к рис. 2.

Таким образом, для описания поведения всей кривой светоиндуцированного изменения фотопроводимости необходимо использовать сумму зависимостей типа (2) и (3). Результаты этого моделирования представлены на рис. 1 сплошной линией. Как видно, наблюдается достаточно точное соответствие теоретической кривой экспериментальным данным. Параметры показанной зависимости для образцов  $a\text{-Si:H}$  в зависимости от температуры измерений и интенсивности освещения представлены в таблице. Отсутствие в таблице данных для параметров при температуре 200 °C объясняется тем, что базовая линия изменений фотопроводимости достаточно точно описывается одной «растянутой экспонентой». Необходимо отметить, что в связи с большим числом параметров, используемых для подгонки теоретической кривой к экспериментальным данным, существуют определенные сложности при выборе значений периода колебаний  $T$  и характеристического времени его затухания  $\tau_3$ . Этим, в частности, объясняются несколько завышенные значения  $T$ , что, однако, не препятствует наблюдению характера относительного изменения этого параметра в зависимости от условий измерений.

Из представленных результатов видно, что характеристические времена, описывающие поведение базовой линии, затухание амплитуды и период колебаний, имеют близкие между собой значения. Более того, полученные параметры близки к значениям, описывающим образование светоиндуцированных дефектов в эффекте Стэблера—Вронского [14], что свидетельствует об единой природе наблюдаемых осцилляций и процесса генерации метастабильных состояний. Возрастание интенсивности освещения и температуры измерений приводит к уменьшению этих характеристических времен, что в соответствии с работой [15] связано с влиянием концентрации носителей заряда на энергетические барьеры для диффузии водорода.

Таким образом, результаты проведенного моделирования позволяют предположить, что осцилляции фотопроводимости, как и эффект Стэблера—Вронского, связаны со структурными неоднородностями в  $a\text{-Si:H}$  и диффузионным

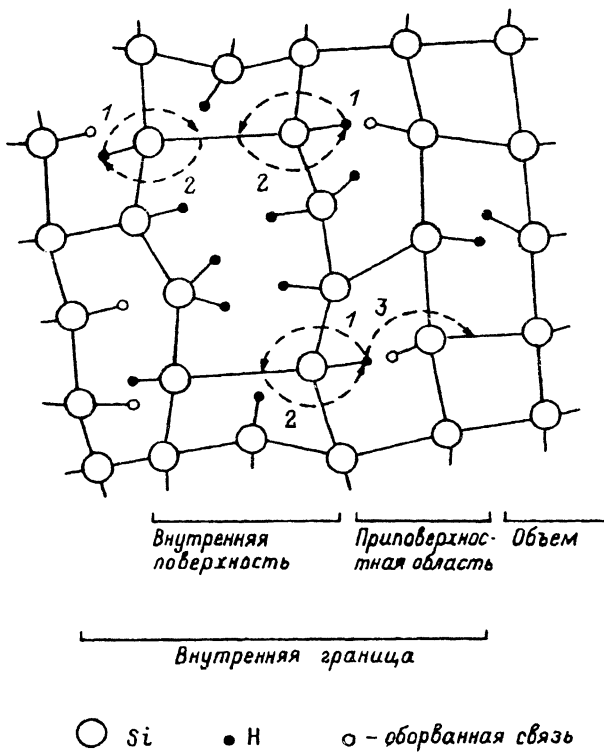


Рис. 3. Схема диффузионного транспорта водорода, приводящего к возникновению осцилляций фотопроводимости.

движениями водорода. Следует отметить, что связь между эффектом Стэблера Вронского и структурными неоднородностями пленок  $\alpha$ -Si:H рассматривалась в целом ряде работ [16-18]. При этом, согласно [16, 17], природа эффекта связывалась с активацией под действием освещения диффузии водорода, кластеризованного на поверхностях микропор, в объем материала.

В работе [19] мы рассмотрели модель микроструктуры пленок  $\alpha$ -Si:H, состоящих из однородных областей, разделенных участками с повышенным содержанием кластеризованного водорода. Эти участки формируют внутренние границы, а однородные области составляют объем материала. Схематическое изображение такой структуры показано на рис. 3.

Под действием излучения индуцируются избыточные носители заряда, которые приводят к росту в первую очередь плотности состояний, имеющих малую энергию образования [20]. Процесс образования метастабильных дефектов на внутренних границах может быть обусловлен диффузионным движением водорода из кластеров в приповерхностных областях на дефекты внутренних поверхностей (процесс 1 на рис. 3). Так как при высоких температурах эти дефекты являются эффективными центрами рекомбинации, то их пассивация приведет к увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда и, следовательно, к возрастанию фотопроводимости. С другой стороны, на месте ушедшего водорода образуются дефекты, которые будут являться потенциальными узлами для обратного движения водорода.

С ростом температуры активизируется процесс ухода водорода из внутренних границ в объем материала. При этом часть атомов водорода выходит в объем (процесс 2 на рис. 3), а другая часть может опять быть захвачена ловушками

на границах (процесс 3). В результате этот процесс может повторяться периодически. Как отмечалось, это коррелирует с тем, что полученные значения периода колебаний фотопроводимости соответствуют временам, за которые атом водорода при данной температуре проходит путь порядка межатомного расстояния. А так как часть атомов водорода при повышенной температуре постоянно уходит в объем, этот процесс имеет затухающий характер.

Таким образом, обнаруженный эффект осцилляции фотопроводимости в  $a\text{-Si}:\text{H}$  связан с процессом диффузионного движения водорода между состояниями внутренних границ и объема материала. Этот процесс оказывает влияние на время жизни неравновесных носителей заряда и, следовательно, на величину фотопроводимости. Захутание колебаний фотопроводимости описывается тем же законом «растянутой экспоненты», что и эффект Стэблера—Вронского, и свидетельствует о единой природе данных явлений. Обнаруженный эффект указывает на важную роль структурных неоднородностей и внутренних границ в процессах структурной релаксации в  $a\text{-Si}:\text{H}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. А. Айвазов, Б. Г. Будагян, О. Н. Становов. ФТП, **25**, 1808 (1991).
- [2] Б. Г. Будагян, О. Н. Становов. Письма ЖТФ, **18**, 88 (1992).
- [3] S. H. Liebson. J. Electrochem. Soc., **102**, 529 (1955).
- [4] R. H. Bude, E. L. Lind. Phys. Rev., **110**, 1040 (1958).
- [5] А. Поуз. Основы теории фотопроводимости, 192. М. (1966).
- [6] W. Fuhs, H. M. Welsh, D. C. Booth. Phys. St. Sol. (b), **120**, 198 (1983).
- [7] Ю. В. Воробьев, В. Н. Захарченко, С. С. Кильчицкая, Р. П. Комирено, В. А. Скрышевский, В. И. Стриха. ФТП, **25**, 334 (1991).
- [8] R. A. Street. Solar Cells., **24**, 211 (1988).
- [9] J. Kakalios, W. B. Jackson. In: Amorphous silicon and related materials, 207 (ed. by H. Fritzsche) World Scientific. (1988).
- [10] R. A. Street, C. C. Tsai. Phil. Mag. B, **57**, 663 (1988).
- [11] D. L. Staebler, C. R. Wronski. Appl. Phys. Lett., **31**, 292 (1977).
- [12] R. Meaudre, M. Meaudre, P. Jensen, G. Guiraud. Phil. Mag. Lett., **57**, 315 (1988).
- [13] D. Redfield, R. H. Bude. Appl. Phys. Lett., **54**, 1037 (1989).
- [14] J.-H. Yoon, M.-S. Kim, Ch. Lee. J. Non-Cryst. Solids., **114**, 636 (1989).
- [15] W. B. Jackson. Phys. Rev. B, **41**, 1059 (1990).
- [16] M. Ohsawa, T. Hama, T. Akasaka, T. Ichimura, H. Sakai, S. Ishida, Y. Uchida. Japan. J. Appl. Phys., **24**, L838 (1985).
- [17] G. G. Qin, G. L. Kong. Sol. St. Commun., **71**, 41 (1989).
- [18] M. Kondo, K. Morigaki. J. Non-Cryst. Solids, **137/138**, 247 (1991).
- [19] A. A. Aivazov, B. G. Budaguan, A. Yu. Sazonov, D. A. Stryahilev. J. Non-Cryst. Solids., **146**, 190 (1992).
- [20] K. Winer. Phys. Rev. B, **41**, 12150 (1990).

Редактор Т. А. Полянская

---