

КИНЕТИКА ЭФФЕКТА СТЕБЛЕРА—ВРОНСКОГО В НЕЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ $a\text{-Si} : \text{H}$

Курова И. А., Мелешко Н. В., Ормонт Н. Н., Лупачева А. Н.

Исследована кинетика изменения фотопроводимости нелегированных пленок $a\text{-Si} : \text{H}$ при освещении белым светом ($W=100$ мВт/см²) в интервале температур 200–425 К.

Исследованиям кинетики эффекта Стеблера—Вронского в нелегированных пленках аморфного гидрированного кремния ($a\text{-Si} : \text{H}$) посвящен ряд работ [1–3]. Методом измерения временных зависимостей собственной фотопроводимости или сигнала ЭПР при освещении пленок определялись закономерности кинетики образования фотоиндуцированных дефектов — оборванных связей кремния (ОС). В настоящее время в литературе обсуждаются два механизма образования ОС: механизм разрыва слабых связей кремния за счет энергии, выделяемой при безызлучательной рекомбинации, и механизм разрыва слабых связей после заряжения их в результате захвата носителя [4]. В этих работах обсуждается также вопрос об участии водорода в процессе возникновения ОС, однако определенных экспериментальных доказательств этого пока нет.

В настоящей работе исследовалась кинетика изменения фотопроводимости σ_ϕ нелегированных пленок $a\text{-Si} : \text{H}$ при освещении белым светом ($W=100$ мВт/см²) в интервале температур 200–425 К. В [1] было показано, что изменение σ_ϕ отражает изменение концентрации N оборванных связей:

$$\sigma_\phi = \frac{\beta}{N}, \quad (1)$$

где коэффициент β постоянен для данных температуры и интенсивности освещения. Исследованные пленки были выращены методом осаждения в тлеющей ВЧ разряде при температуре подложки ≈ 230 °С. Энергия активации темновой проводимости E_s для отожженных пленок составляла 0.72–0.74 эВ. Перед измерениями пленки отжигались при 170 °С в течение 1 ч и затем охлаждались до температуры, при которой проводились освещение пленок и измерения кинетики изменения σ_ϕ . На рис. 1 показана кинетика фотопроводимости σ_ϕ (нормированной к значению ее в начальный момент освещения $\sigma_\phi(0)$), при разных температурах пленки. Видно, что при $\sigma'(t) = \sigma_\phi(t)/\sigma_\phi(0) < 0.5$ наблюдается зависимость $\sigma'(t) \sim t^{-1/2}$, которая соответствует мономолекулярному процессу образования ОС:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{C_d}{N}. \quad (2)$$

При интегрировании (2) с учетом (1) получаем

$$\frac{\sigma_\phi^2(0)}{\sigma_\phi^2(t)} - 1 = C_d \frac{\sigma_\phi^2(0)}{\beta^2} t = \frac{C_d}{N^2(0)} t.$$

Зависимость величины $[\sigma_\phi^2(0)/\sigma_\phi^2(t)] - 1$ от времени t для разных температур приведена на рис. 2. Видно, что эти зависимости линейны при измерении в области низких температур в течение всего интервала времени; при высоких тем

пературах при больших t наблюдается отклонение от линейности в связи с ростом скорости отжига при увеличении концентрации ОС со временем освещения. Таким образом, механизм образования ОС в отожженных в темноте пленках $a\text{-Si}:\text{H}$ во всем исследованном интервале температур мономолекулярный. На вставке рис. 2 показана зависимость от температуры величины $C_d/N^2(0)$, определенной по наклонам кривых рис. 2. Эта зависимость экспоненциальна: $C_d = C_0 \exp(-E_d/kT)$ с разными энергиями активации для низких и высоких температур: $E_d = 0.15$ эВ для $T < 285$ К и $E_d = 0.35$ эВ для $T > 285$ К.

В [4] исследовалась кинетика изменения σ_ϕ при $T < 250$ К. Был установлен мономолекулярный тип кинетики и определена температурная зависимость коэффициента $C = C_d/N^2(0) = C' \exp(-E_d/kT)$, где $E_d = 0.15$ эВ. Такая температурная зависимость C объяснена авторами на основе предложенной в [3]

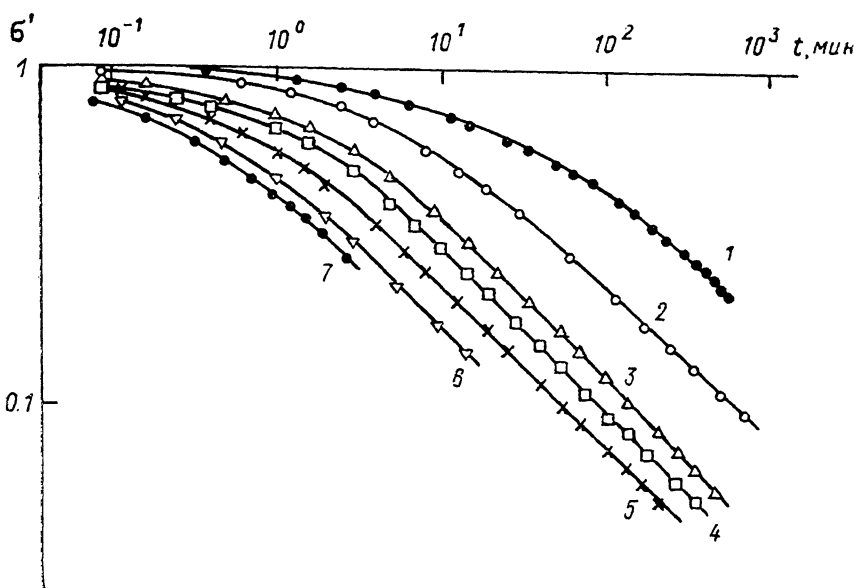


Рис. 1. Изменение нормированной фотопроводимости $\sigma'(t) = \sigma_\phi(t)/\sigma_\phi(0)$ в зависимости от времени освещения белым светом ($W = 100$ мВт/см²) при разных T .

1—7 соответствуют температурам 200, 240, 287, 302, 312, 320, 336 К.

модели рекомбинации электрона на состояния, расположенные на 0.15 эВ выше потолка валентной зоны. Таким образом, в [4] предполагалось, что $N(0)$ не зависит от температуры.

Мы предполагаем, что $N(0)$ не зависит от температуры, так как предварительный отжиг пленок перед всеми измерениями проводился в одних и тех же условиях. Изменение энергии активации E_d можно объяснить изменением при повышении температуры энергетического положения состояний в хвосте валентной зоны, на которых идет рекомбинация электронов с захваченными на эти состояния дырками.

На рис. 3 показана кинетика изменения нормированной фотопроводимости σ' при $T > 310$ К, когда существенно влияние отжига ОС. Видно, что при длительном освещении фотопроводимость достигает стационарного значения σ_s , которое устанавливается в результате уравнивания скоростей образования и отжига ОС по мере увеличения концентрации ОС при освещении пленки. Величина σ_s увеличивается при повышении температуры освещения по экспоненциальному закону с энергией активации $E_s = 0.27$ эВ (см. вставку на рис. 3). Так как коэффициенты скорости образования ОС C_d и σ_s экспоненциально зависят от температуры, предполагаем, что коэффициент скорости C_r в уравнении кинетики отжига

$$\frac{dN}{dt} = -NC_r \quad (4)$$

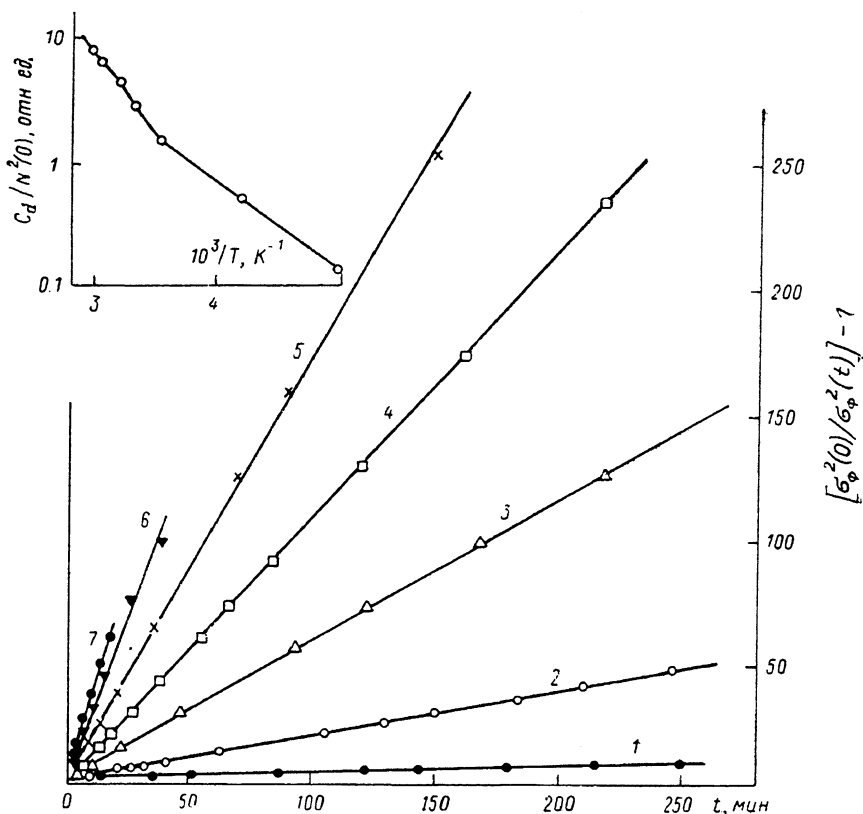


Рис. 2. Зависимость величины $[\sigma_{\phi}^2(t)/\sigma_{\phi}^2(0)] - 1$ от времени освещения при разных T . 1—7 соответствуют температурам 200, 240, 287, 302, 312, 320 и 336 К. На вставке — зависимость величины $Ca/N^2(0)$ — наклона прямых 1—7 рис. 2 от обратной температуры.

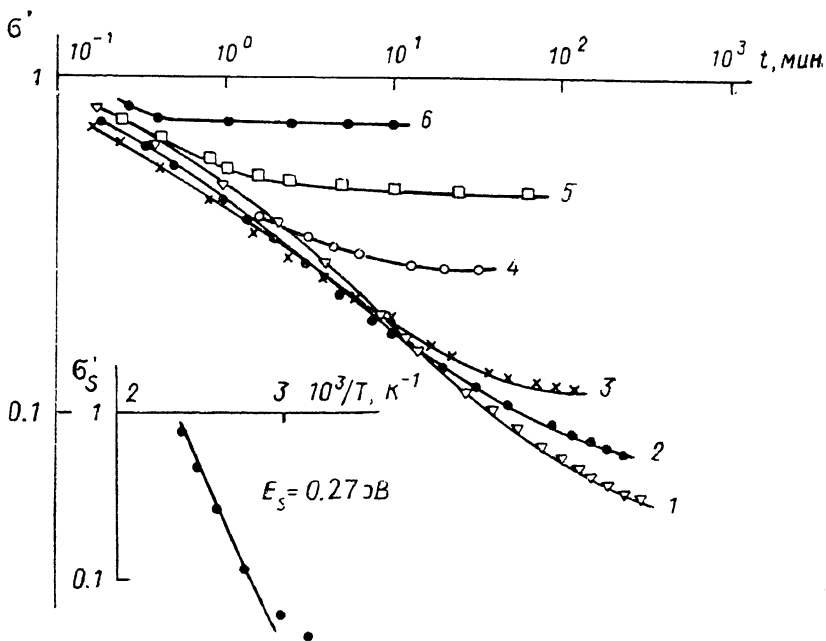


Рис. 3. Зависимость нормированной фотопроводимости $\sigma' (t) = \sigma_{\phi}(t)/\sigma_{\phi}(0)$ от времени освещения пленки при разных T . 1—6 соответствуют 320, 336, 360, 385, 403 и 425 К. На вставке — зависимость стационарной нормированной фотопроводимости $\sigma'_{с}$ от $1/T$.

также имеет экспоненциальную зависимость: $C_r = C' \exp(-E_r/kT)$. Приравнивая правые части уравнений (3) и (4), для концентрации N_s и $\sigma_s = \beta/N_s$, получаем

$$N_s = \left(\frac{C_d}{C_r}\right)^{1/2}, \quad \sigma_s = \beta \left(\frac{C_r}{C_d}\right)^{1/2} = \beta' \exp \frac{-E_r - E_d}{2kT}. \quad (5)$$

В области $T > 285$ К $E_d = 0.35$ эВ, $E_s = (E_r - E_d)/2 = 0.27$ эВ и, следовательно, $E_r = 0.89$ эВ. Это значение E_r совпадает с минимальным значением энергии отжига ОС в нелегированных пленках a -Si : H, определенным в [1]. В этой же работе по значениям E_s и E_d была оценена величина $E_r = 0.4$ эВ. Такое малое значение E_r авторы объясняют тем, что в соотношениях (4) и (5) E_r различны: при измерениях σ_s пленка освещена и E_r может быть меньше, чем при отжиге ОС в темноте. В настоящей работе показано, что это различие, если оно есть, не столь велико, тем более что определенное по E_s значение E_r может рассматриваться лишь как эффективное: коэффициент скорости отжига ОС в (4) C_r описывается одной эффективной энергией активации E_r .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Stutzmann M., Jackson W. B., Tsai C. C. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. N 1. P. 23—46.
- [2] Eser E. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. N 10. P. 3508—3515.
- [3] Hack M., Guha S., den Boer W. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. N 4. P. 2512—2519.
- [4] Eser E., Urbanski E. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 25. P. 2124—2127.
- [5] Курова И. А., Ормонт Н. Н., Чытая К. Б. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 700—704.
- [6] Stutzmann M. // Phys. Mag. B. 1987. V. 56. N 1. P. 63—70.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова

Получена 20.02.1989
Принята к печати 10.07.1989