

О МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В НЕЛЕГИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ α -Si : H

Звягин И. П., Курова И. А., Мелешко Н. В., Ормонт Н. Н.

Исследована кинетика фотоиндуцированных изменений фотопроводимости нелегированных отожженных и предварительно освещенных пленок α -Si : H в широком интервале температур. Обсуждаются механизмы образования метастабильных оборванных связей. Полученные результаты свидетельствуют о наличии как мономолекулярного активационного процесса (для отожженных пленок), который можно связать с захватом электронов или дырок на состояния слабых связей Si—Si в хвостах соответствующих зон, так и бимолекулярного безактивационного процесса (для предварительно освещенных пленок), связанного с захватом электрона и дырки на состояния одной и той же слабой связи Si—Si.

Известно, что освещение белым светом нелегированных пленок α -Si : H приводит к образованию метастабильных дефектов — оборванных связей (ОС) кремния [1]. Предложен ряд механизмов образования МОС: разрыв слабых связей Si—Si при прямой безызлучательной рекомбинации носителей заряда [2] или при захвате носителей в хвосты зон [3, 4] прямой разрыв связи фотоном [5]. Эти механизмы могут обуславливать различные зависимости изменения концентрации МОС от времени и различные температурные зависимости скорости образования МОС.

В целях выяснения механизма образования МОС в ряде работ проведены экспериментальные исследования кинетики образования МОС в нелегированных пленках α -Si : H при разных температурах. Обычно исследования проводятся путем измерения кинетики фотопроводимости (ФП); при этом предполагается, что ФП обратно пропорциональна концентрации МОС N :

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

где коэффициент β практически не зависит от температуры и времени освещения, определяется рекомбинационными характеристиками и подвижностью носителей заряда. Оказалось, что результаты, полученные в разных работах, не совпадают друг с другом. В [2] установлено, что кинетика образования МОС в нелегированных пленках α -Si : H бимолекулярная, т. е. при больших временах $\sigma_{\phi} \sim t^{-1/2}$, а скорость образования МОС экспоненциально зависит от температуры с энергией активации $E_a \approx 0.12$ эВ. В работе [6] наблюдалась зависимость $\sigma_{\phi} \sim t^{-1/2}$ при больших t , т. е. кинетика мономолекулярного типа. В работе [7] получено, что при $T < 285$ К скорость образования МОС экспоненциально увеличивается с температурой с энергией активации $E_a \approx 0.15$ эВ, а при $T > 285$ К — с энергией активации $E_a \approx 0.35$ эВ. В [5] было найдено, что скорость образования МОС практически не зависит от температуры. Отметим, что значения E_a и природа активационной зависимости скорости образования в этих работах практически не обсуждались. Авторы работы [8] предположили, что определяющую роль при образовании МОС играет дисперсионная диффузия водорода; в этом случае процесс образования МОС при освещении пленок можно описывать «растянутой» экспонентой, причем постоянная времени τ_0 экспоненциально зависит от температуры, а энергия активации $E_c \approx 0.9$ эВ. Естественно

предположить, что различия закономерностей кинетики образования МОС при освещении, наблюдавшихся в разных работах, могут быть связаны с различием характеристик исследовавшихся пленок, полученных в разных лабораториях.

В настоящей работе проведены исследования кинетики образования фотоиндуцированных дефектов при разных температурах в условиях, когда характеристики пленок направленно изменялись путем соответствующей предварительной обработки. Мы проводили измерения кинетики ФП на каждой из исследованных пленок после предварительного отжига и после длительного пред-

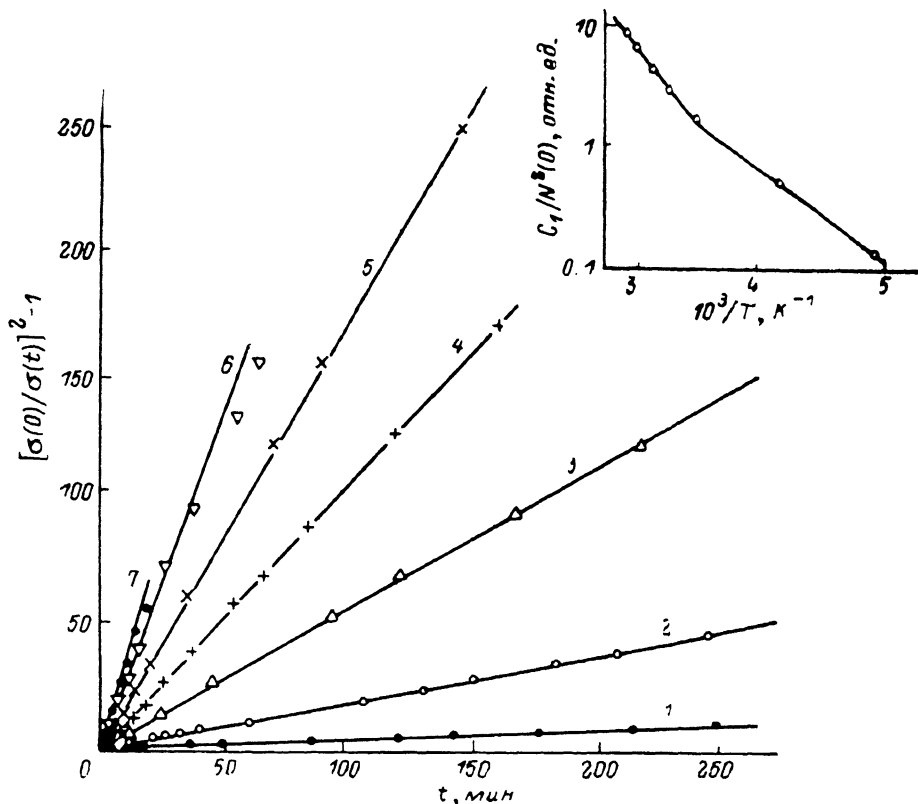


Рис. 1. Кинетика изменения фотопроводимости отожженной нелегированной пленки ($E_d = 0.74$ эВ) при разных температурах.

T, K : 1 — 200, 2 — 240, 3 — 287, 4 — 302, 5 — 312, 6 — 320, 7 — 336. На вставке — зависимость величины $C_1/N^2(0)$ от температуры, определенная из наклона прямых 1—7.

варительного освещения пленки при разных температурах, приводящего к систематическому изменению исходной концентрации МОС. Кинетика изменения ФП пленок измерялась при освещении галогенной лампой с ИК фильтром, интенсивность излучения составляла около 100 мВт/см^2 .

На рис. 1 показаны зависимости величины $[\sigma_\phi(0)/\sigma_\phi(t)]^2 - 1$ от времени t при разных температурах в интервале $180\text{—}350 \text{ K}$ для пленки, отожженной при 175°C . Видно, что в области температур $180\text{—}310 \text{ K}$ эта зависимость линейна во всем исследованном интервале времени. При более высоких температурах наблюдается отклонение от линейной зависимости, связанное с влиянием процесса отжига МОС, при больших временах. Линейная зависимость, приведенная на рис. 1, соответствует мономолекулярному процессу образования МОС, когда в уравнении кинетики

$$\frac{dN}{dt} = \frac{C_m}{N^m} \quad (2)$$

$m=1$. Как следует из (1) и (2), наклон прямых на рис. 1 определяется величиной $C_1(T)/N^2(0)$. Температурная зависимость этой величины показана на вставке к рис. 1. Поскольку измерения $\sigma_\phi(t)$ проводились для каждой температуры

после одинакового (в течение 1.5 ч) предварительного отжига при 175 °С, можно предположить, что начальная концентрация $N(0)$ одинакова для всех циклов измерений при разных температурах и является замороженной концентрацией ОС. Таким образом, изменение величины $C_1(T)/N^2(0)$ определяется температурной зависимостью $C_1(T)$. Видно, что $C_1(T)$ можно описать двумя экспонентами с энергиями активации $E_1=0.15$ эВ при $T < 285$ К и $E_2=0.35$ эВ при $T > 285$ К.

Для той же пленки, предварительно освещенной при повышенной температуре $T_{\text{п}}$ до установления стационарной величины $\sigma_{\text{ф}}$ (до насыщения), законо-

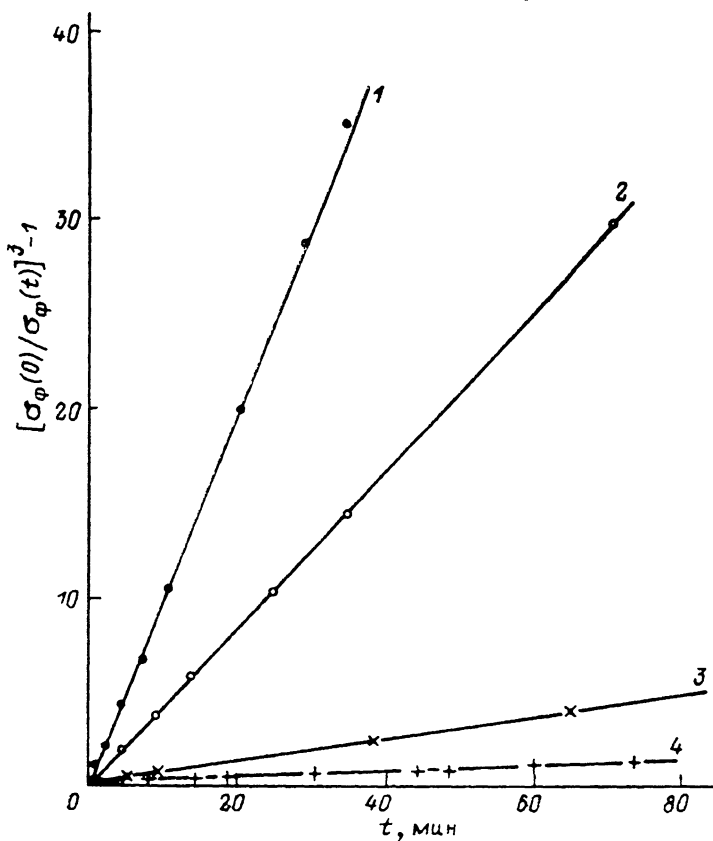


Рис. 2. Кинетика изменения фотопроводимости при комнатной температуре для той же пленки, предварительно освещенной при разных температурах.

$T_{\text{п}}$, К: 1 — 425, 2 — 403, 3 — 360, 4 — 336.

мерности кинетики образования МОС отличны от описанных выше. Из рис. 2 видно, что изменение фотопроводимости при $T=300$ К описывается соотношением

$$\left[\frac{\sigma_{\text{ф}}(0)}{\sigma_{\text{ф}}(t)} \right]^3 - 1 = \frac{C_2(300)}{N^3(0)} t, \quad (3)$$

вытекающим из (1) и (2) при $m=2$. Различия наклонов кривых определяются различиями значений $N(0)$, которые изменялись путем предварительного освещения пленки при разных $T_{\text{п}}$. Это подтверждается тем, что величина $C_2(300)/\beta^3 = C_2(300)[N(0)\sigma_{\text{ф}}(0)]^{-3}$ оказывается одинаковой для всех $T_{\text{п}}$.

На рис. 3 показана кинетика изменения ФП при освещении при разных температурах для пленки, предварительно освещенной при $T_{\text{п}}=390$ К. Видно, что кинетика ФП описывается соотношением (3). Наклон кривых, пропорциональный $C_2(T)/N^3(0)$, слабо зависит от температуры. Поскольку условия предварительного освещения и охлаждения пленки были одинаковыми, начальная концентрация $N(0)$ в разных циклах была тоже одинаковой. Это указывает на то, что в предварительно освещенной пленке $C_2(T)$ слабо зависит от температуры.

Возможность исследования образования МОС методом измерения кинетики фотопроводимости опирается на соотношение (1), связывающее ФП с концентрацией ОС. В работе [2] экспериментально было установлено, что закономерности кинетики изменения фотопроводимости и кинетики изменения обратной концентрации спинов при освещении нелегированных пленок совпадают. Теоретически обратная пропорциональность концентрации неравновесных носителей и концентрации МОС получалась для различных механизмов рекомбинации неравновесных носителей заряда. Например, в [2] предполагался захват неравновесных носителей на МОС из зоны проводимости и из валентной зоны, а в [9] рассматривался туннельный захват носителей на МОС из хвостов соответствующих зон. Согласно этим расчетам, люкс-амперная характеристика (ЛАХ)

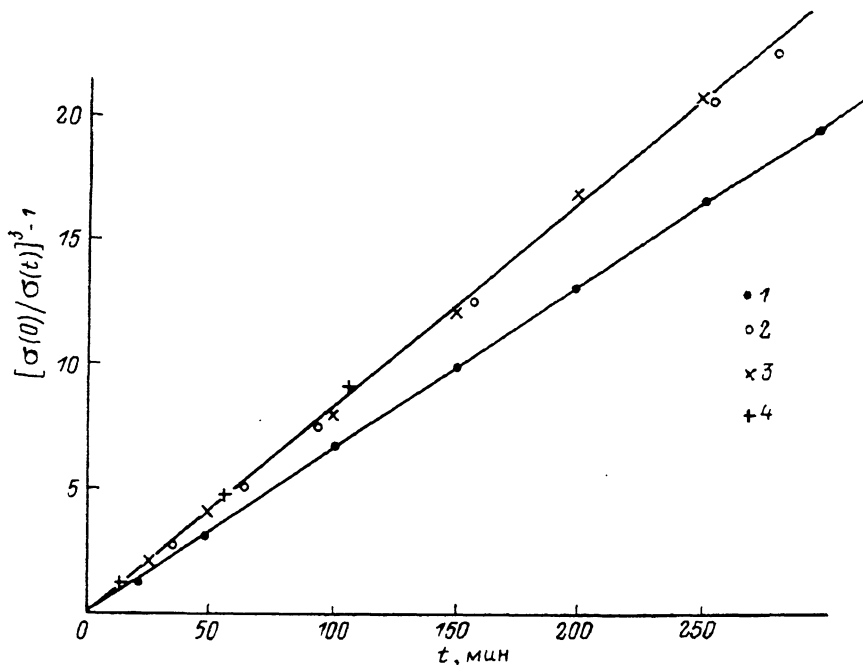


Рис. 3. Кинетика изменения фотопроводимости пленки, предварительно освещенной при $T_{\text{н}}=390$ К, измеренная при разных температурах.
 T , К: 1 — 270, 2 — 295, 3 — 312, 4 — 358.

линейна, т. е. $\gamma=1$, что и наблюдалось в работе [2]. На рис. 4 показаны ЛАХ одной из исследованных в настоящей работе пленок при $T=325$ (1, 3) и 290 К (2, 4) после отжига (1, 2) и после предварительного освещения (3, 4). Видно, что $\gamma \approx 0.8-0.9$ для отожженных и $\gamma \approx 1$ для предварительно освещенных пленок. Это указывает на возможность использования соотношения (1). Соответственно кинетика образования МОС в исследованных нелегированных пленках описывается уравнением кинетики (2) с $m=1$ для отожженных пленок и с $m=2$ для предварительно освещенных. Можно предположить, что в первом случае процесс образования МОС определяется мономолекулярным процессом — захватом электрона или дырки в хвосты соответствующих зон на состояния слабых связей Si—Si. Бимолекулярный механизм в предварительно освещенных пленках может быть обусловлен захватом электрона и дырки в хвосты зон на состояния одной и той же слабой связи Si—Si.

В [3] были произведены оценки энергии разрыва слабой связи Si—Si после захвата на нее электрона, дырки или обоих носителей заряда. Для реальных значений параметров $a\text{-Si}:\text{H}$ оказалось, что процесс разрыва слабой связи при захвате одного носителя является активационным, причем величина энергии активации определяется энергетическим положением уровней оборванных связей и глубиной состояния хвоста, на которое захвачен носитель, т. е. степенью напряженности слабой связи Si—Si. При захвате двух носителей разность

энергий электронов в начальном и конечном состояниях отрицательна, т. е. процесс является безактивационным [3]. Это согласуется с нашими результатами, из которых следует, что мономолекулярный процесс в отожженных пленках имеет энергию активации, а бимолекулярный процесс в предварительно освещенных пленках является безактивационным.

Интересная особенность мономолекулярного процесса образования МОС в отожженных пленках состоит в наличии различных энергий активации для скорости образования МОС в разных областях температур. Это может быть связано с тем, что при низких температурах скорость образования МОС определяется захватом электронов на слабые связи, а при высоких температурах —

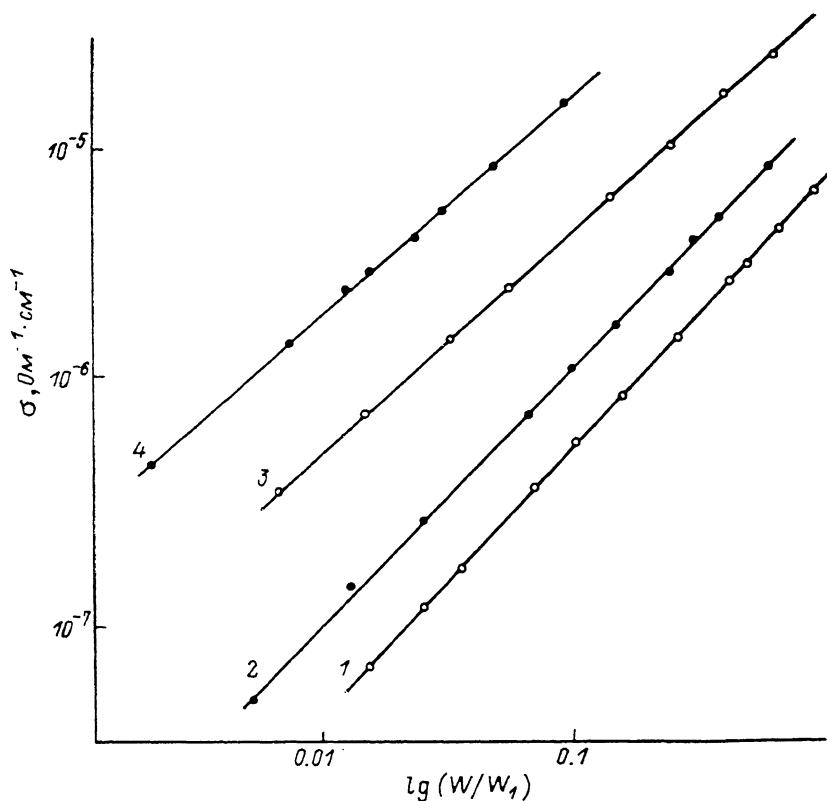


Рис. 4. Люкс-амперные характеристики отожженной (1, 2) и предварительно освещенной (3, 4) пленки при разных температурах.

Т, К: 1, 3 — 290, 2, 4 — 325.

дырок. Активационная зависимость возникает, когда образование МОС идет при захвате носителей на пустые глубоко лежащие в хвостах состояния из соответствующих зон (латентные центры образования МОС). Энергия активации электронов в зону проводимости меньше, а следовательно, их концентрация больше, чем соответствующие величины для дырок. Поэтому при низких температурах процесс обусловлен электронами. При возрастании температуры увеличивается концентрация свободных дырок и процесс начинает определяться захватом дырок из валентной зоны. Отметим, что образование МОС при инжекции дырок наблюдалось в [10], причем этот процесс при комнатных температурах более эффективен, чем при инжекции электронов.

Наконец, изменение механизма образования МОС при переходе от отожженных пленок к предварительно освещенным, т. е. подавление процессов первого порядка при длительном предварительном освещении пленки при повышенной температуре, может быть обусловлено релаксацией структуры и уменьшением числа латентных центров образования МОС, неустойчивых относи-

тельно захвата одного носителя. Заметим, что число таких центров, вообще говоря, непосредственно не связано с плотностью более мелких состояний ква-стов, определяющих в основном ФП и переходные токи в материале.

Список литературы

- [1] Dersch H., Schweitser L., Stuke J. // *Phys. Rev. B*. 1983. V. 28. N 8. P. 4678—4683.
- [2] Stutsmann M., Jackson W. R., Tsai C. C. // *Phys. Rev. B*. 1985. V. 32. N 1. P. 23—47.
- [3] Stutsmann M. // *Phil. Mag. B*. 1987. V. 56. N 1. P. 63—70.
- [4] Jackson W. B., Moyer D. M. // *Phys. Rev. B*. 1987. V. 36. N 7. P. 6217—6222.
- [5] Алдабергенова С. Б., Андреев А. Л. и др. // Тез. докл. конф. «Некристаллические полупроводники». Ужгород, 1989. Т. 3. С. 222.
- [6] Eser E., Urbansky E. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. N 25. P. 2124—2127.
- [7] Курова И. А., Мелешко Н. В., Ормонт Н. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 11. С. 2030—2033.
- [8] Redfield D., Bube R. H. // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 54. N 11. P. 1037—1039.
- [9] Балагуров Л. А. и др. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 6. С. 1046—1051.
- [10] Pfeleiderer H., Kusian W., Kruhler W. // *Sol. St. Commun.* 1984. V. 49. N 1. P. 493—494.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова

Получена 3.05.1990
Принята к печати 21.05.1990