

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПЛЕНКАХ $a\text{-Si} : \text{H}$, ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ

Курова И. А., Мочалова Д. А.

Исследована кинетика релаксации двух типов метастабильной повышенной проводимости пленок $a\text{-Si} : \text{H}$, легированных бором, полученных путем быстрого охлаждения пленки и предварительным освещением. Показано, что релаксация различна; это определяется разной природой метастабильных состояний пленки.

В настоящее время вызывают большой научный и практический интерес исследования метастабильных состояний в пленках $a\text{-Si} : \text{H}$, обусловленных структурными перестройками и дефектообразованием под влиянием внешних воздействий [1-6]. Легированные пленки $a\text{-Si} : \text{H}$ имеют более сложные и разнообразные возможности структурных изменений, которые менее изучены и ясны. В литературе имеются противоречивые экспериментальные данные и теоретические предположения, в частности, об эффекте Стеблера—Вронского (ЭСВ), т. е. о метастабильных изменениях в пленках $a\text{-Si} : \text{H}$ под влиянием освещения. В работах [5-8] приводятся данные об отсутствии ЭСВ или его обратном знаке — увеличении темновой проводимости σ_t и фотопроводимости σ_ϕ в легированных пленках $a\text{-Si} : \text{H}$. Установлено фотоиндуцированное образование оборванных связей кремния (ОС) в концентрациях до 10^{18} см^{-3} , пропорциональных концентрациям легирующих примесей. В [9] теоретическое описание кинетики образования ОС включает процессы безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей в хвостах зон, что практически исключает образование ОС, т. е. ЭСВ в легированных пленках. В то же время в [10] предполагалось, что определяющим фактором образования ОС является диффузия водорода, которая увеличивается в присутствии примесей в пленках $a\text{-Si} : \text{H}$, а в [7] приведены данные о малой величине ЭСВ, т. е. малой концентрации фотоиндуцированных ОС в компенсированных (с Р и В) пленках $a\text{-Si} : \text{H}$. Очевидно, что необходимы дальнейшие исследования метастабильных состояний в легированных пленках $a\text{-Si} : \text{H}$.

В настоящей работе исследовались пленки $a\text{-Si} : \text{H}$, легированные бором из газовой фазы ($\text{B}_2\text{H}_6/\text{SiH}_4 \approx 2 \cdot 10^{-3}$). Метастабильные состояния в них создавались двумя способами: предварительным освещением белым светом и быстрым уменьшением температуры.

На рис. 1 показаны температурные зависимости темновой проводимости σ_t одной из пленок, охлажденной с различными скоростями после высокотемпературного отжига. Кривые 1 и 2 соответствуют скоростям охлаждения 2 и 20 К/мин. Измерения $\sigma_t(T)$ проводились при нагревании пленки со скоростью 5 К/мин. Из рисунка видно, что при $T > T_E \approx 380 \text{ К}$ кривые 1 и 2 совпадают. При более низких температурах величина σ_t и ее энергия активации E_a зависят от скорости охлаждения пленки.

Наблюдаемые закономерности обусловлены тем, что время установления равновесной величины σ_t при $T > T_E$ мало, меньше времени измерения, и значения σ_t соответствуют равновесным значениям. При $T < T_E$ время релаксации увеличивается, и при быстром охлаждении пленки наблюдается «замораживание» неравновесной, повышенной проводимости. При меньшей скорости охлаждения

замораживается» меньшая по величине проводимость. Кривая 3 на рис. 1 получена после «отдыха» пленки в темноте в течение 6 месяцев при $T \approx 290$ К. Поэтому величина σ_T при $T \approx 290$ К равновесна. Действительно, экстраполяция температурной зависимости равновесной σ_T , т. е. измеренной выше T_E , на область низких температур дает значение σ_T при $T \approx 290$ К, соответствующее кривой 3. Из зависимости $\sigma_T(T)$ при $T > T_E$ определены параметры равновесной темновой проводимости: $E_a = 0.54$ эВ и предэкспоненциальный фактор $\sigma_0 = 670 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Малое отличие σ_0 от значения минимальной металлической проводимости $\sigma_{\min} \approx 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ указывает на малый статистический сдвиг уровня Ферми ($\sigma_0 = \sigma_{\min} \exp^{\gamma/k}$, $E_F(T) = E_F(0) + \gamma T$ [1]) и, следовательно, на

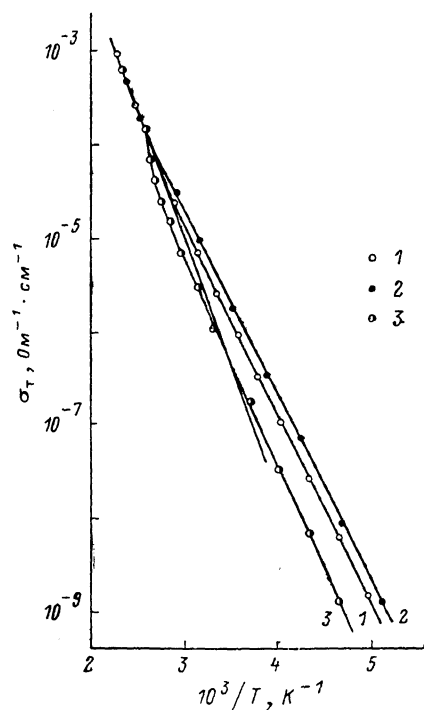


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости пленки, охлажденной со скоростями 2 (1) и 20 К/мин (2) после высокотемпературного отжига, а также температурная зависимость проводимости пленки после «отдыха» в темноте при $T = 290$ К в течение 6 месяцев (3).

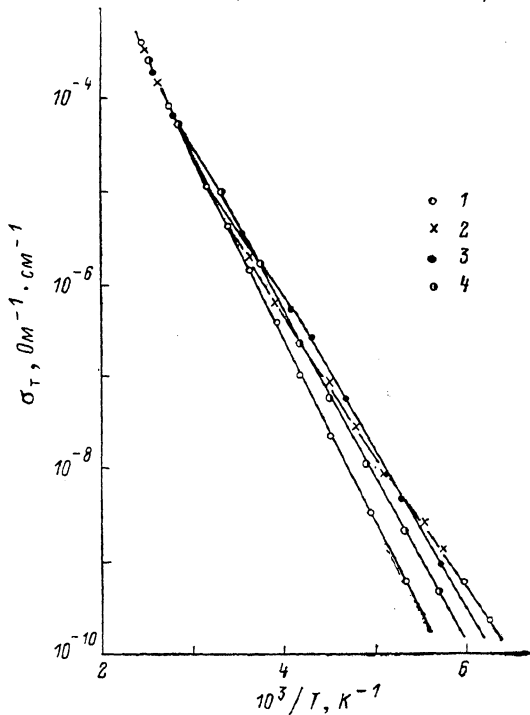


Рис. 2. Температурные зависимости темновой проводимости пленки после отжига (1) и после освещения пленки при разных температурах в течение 1 ч.

$T, \text{ К}: 2 - 160, 3 - 243, 4 - 297.$

слабую зависимость от энергии плотности состояний $\rho(E)$ вблизи $E = E_v + E_2 = E_c + 0.54$ эВ. В частности, возможно наличие минимума для $\rho(E)$ в этой области. О наличии такого минимума в $\rho(E)$ сообщалось в работе [12].

На рис. 2 приведены температурные зависимости σ_T для метастабильных состояний пленки, полученных предварительным освещением ее белым светом в течение 1 ч при различных температурах. Видно, что наблюдается аномальный эффект Стеблера—Вронского (АЭСВ), освещение приводит к повышению проводимости пленки.

В работах [5, 6] было показано, что повышение проводимости при освещении пленок p -типа обусловлено образованием на окисленной поверхности отрицательного заряда и, следовательно, слоя повышенной проводимости в приповерхностной области пленки.

Было проведено исследование кинетики релаксации этих метастабильных состояний. На рис. 3 показаны кривые релаксации пленки, охлажденной со скоростью 50 К/мин после высокотемпературного отжига (кривые 1, 2), и пред-

варительно освещенной пленки (кривые 3, 4). Кривые 1, 2 удовлетворительно описываются «растянутой экспонентой»:

$$\Delta\sigma_{\tau}(t) = \Delta\sigma_{\tau}(0) \exp \left\{ -\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta} \right\},$$

где $\Delta\sigma_{\tau}(t) = \sigma_{\tau}(t) - \sigma_{\tau}(\infty)$, $\beta = 0.54$ и 0.52 , а $\tau = 1.5 \cdot 10^3$ и $2.6 \cdot 10^3$ мин соответственно для температур пленки 328 и 315 К. Значения β практически совпадают со значениями, полученными в работе [3], а значения τ несколько выше приведенных в ней. Это указывает, согласно [3], на меньшую скорость диффузии водорода в наших пленках, которая зависит от степени легирования и концентрации дефектов.

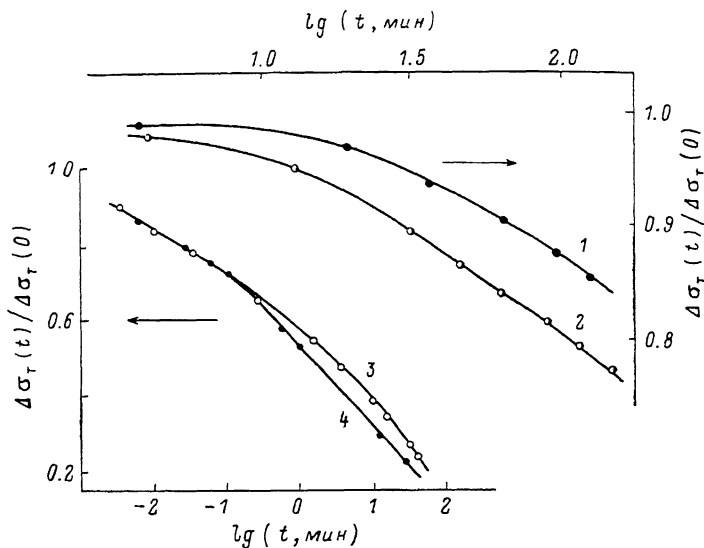


Рис. 3. Кинетика релаксации σ_{τ} при $T=315$ (1, 3) и 328 К (2, 4) после быстрого охлаждения пленки со скоростью 50 К/мин (1, 2) и после предварительного освещения белым светом при тех же температурах в течение 1 ч (3, 4).

Кривые релаксации σ_{τ} после предварительного освещения пленки (кривые 3, 4) значительно быстрее и не описываются «растянутой экспонентой». Релаксация метастабильной проводимости, созданной освещением пленки и обусловленной только перезарядкой поверхностных дефектов, также описывается зависимостью типа «растянутая экспонента» — закон Коца [11]. Отсутствие такой зависимости может указывать на более сложную, чем простая оптическая перезарядка центра, природу этого эффекта, а именно создание отрицательного заряда на поверхности при освещении пленок $\alpha\text{-Si} : \text{H}$ обусловлено и оптической перезарядкой, и образованием дефектов на границе и в слое SiO_2 при наличии потенциального барьера на границе $\alpha\text{-Si} : \text{H}/\text{SiO}_2$.

Список литературы

- [1] Kakalions J., Street R. A. // Phys. Rev. B. 1986. V. 34. N 8. P. 6014—6017.
- [2] Street R. A., Kakalious J., Tsai C. C., Hayes T. M. // Phys. Rev. B. 1987. V. 35. N 3. P. 1316—1332.
- [3] Street R. A. // Sol. cel. 1988. V. 24. P. 211—221.
- [4] Stabler D. L., Wronski C. P. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. P. 202.
- [5] Aker B., Fritzsche H. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 11. P. 6628—6633.
- [6] Курова И. А., Мочалова Д. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 573—575.
- [7] Курова И. А., Акимченко И. П., Читая К. Б. // Вестн. МГУ. Сер. 3. 1987. Т. 28. В. 2. P. 90—92.
- [8] Skumanich A., Amer N. M., Jackson W. B. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 3. P. 2263—2269.

- [9] Stutzman M., Jackson W. S., Tsai C. C. // Phys. Rev. B. 1985. V. 32. N 1. P. 23—47.
[10] Jackson W. B., Kakalions J. // Amorphous silicon and related materials / Ed. by H. Fritzsche. 1989. P. 247.
[11] Киселев В. Ф., Козлов С. И., Зарифьянц Ю. А. // Проблемы физической химии поверхности полупроводников. Новосибирск, 1978. С. 200.
[12] Fritzsche H. // Non-Cryst. Sol. 1985. V. 77-78. Pt. 1. P. 273—279.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получена 5.06.1989
Принята к печати 16.10.1989
