

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $a\text{-Si:H}$ (В), ОБЛУЧЕННЫХ МОЩНЫМИ СВЕТОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

И. А. Курова, А. Н. Лупачева, Н. В. Мелешко, Н. Н. Ормонт,
Л. П. Авакянц

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899, Москва, Россия
(Получена 14 мая 1993 г. Принята к печати 28 мая 1993 г.)

Исследовано влияние мощного светового облучения на электрические свойства пленок $a\text{-Si:H}$ (В). Установлено, что с ростом дозы облучения (до 2 Дж/см^2) проводимость и фотопроводимость пленок увеличиваются, энергия активации уменьшается. При этом спектры комбинационного рассеяния не показали образования кристаллической фазы. Наблюдаемые изменения параметров пленок связываются с локальными перестройками аморфной сетки, включающими водород и примесь и приводящими к увеличению эффективности легирования.

В последнее время широко исследуется влияние внешних воздействий (светового излучения, тепловой закалки и др.) на электрические свойства, концентрацию дефектов и электрически активных примесей в пленках $a\text{-Si:H}$ [$1-4$]. Эти исследования связаны с решением вопросов о механизмах дефектообразования и равновесия системы «примесь—дефекты» в $a\text{-Si:H}$, а также с практическими вопросами стабильности и деградации этого материала.

В настоящей работе исследовалось влияние мощного светового облучения от импульсной галогенной лампы накаливания ($W \approx 10 \text{ кВт}$) легированных бором пленок $a\text{-Si:H}$ на их электрические и фотоэлектрические свойства и спектры комбинационного рассеяния. Пленки были получены методом осаждения в плазме ВЧ тлеющего разряда при температуре подложки $T = 280^\circ \text{C}$ (концентрация водорода 10%) и легированы бором из газовой фазы в процессе осаждения. Концентрация бора, определенная по методу SIMS, составляла $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве подложки была использована пластина из монокристаллического кремния толщиной 300 мкм с покрытием из термически образованного SiO_2 толщиной 0.60 мкм. Облучение осуществлялось в атмосфере аргона как со стороны подложки, так и со стороны пленки, при этом могли изменяться число импульсов (1—10), их длительность (2.5—3.1 с) и скважность (20—60 с). При облучении со стороны подложки свет проходил через структуру $\text{SiO}_2/c\text{-Si/SiO}_2$, основная часть спектра поглощалась и на пленку воздействовала лишь ИК область спектра. При облучении со стороны пленки на нее воздействовал весь диапазон длин волн, включая область сильного собственного поглощения. Очевидно, что в первом случае световое воздействие на слой SiO_2 пленки и границу раздела очень мало по сравнению с режимом освещения со стороны пленки, и определяющее воздействие — тепловое, со стороны нагреваемой подложки. Температура подложки при облучении измерялась с помощью припаянной к ней термодпары и достигала $300-500^\circ \text{C}$ в зависимости от режима освещения. Контакты из Al напылялись на пленки после облучения. Перед измерениями температурных зависимостей темновой проводимости σ_d и фотопроводимости σ_{ph} пленки отжигались в криостате в темноте при 170°C в течение 45 мин. Затем при нескольких температурах измерялись вольт-ам-

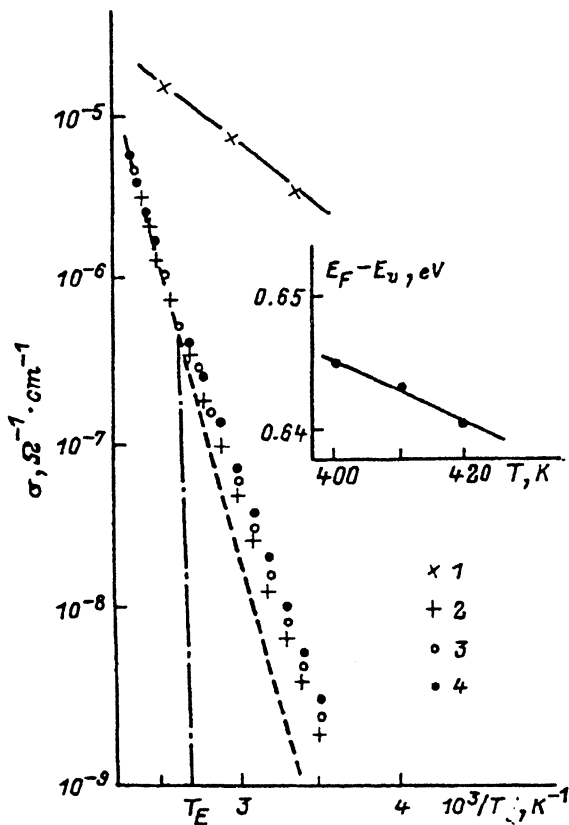


Рис. 1. Температурные зависимости темновой проводимости σ_d (1) и фотопроводимости σ_{ph} (2—4) необлученной пленки $a\text{-Si:H}$ (В) после отжига при 170°C . Измерения проведены при понижении T (2, 3) и повышении T (4) со скоростями v , К/мин: 2 — 0.5, 3, 4 — 5.

перные характеристики и отбирались пленки с достаточно широким линейным участком (до 200 В/см). Измерения проводились при напряженности поля $E = 20$ В/см. Температуру пленки при измерениях проводимости можно было изменять с разными скоростями от 20 до 0.5 К/мин.

На рис. 1 приведены температурные зависимости $\sigma_d(T)$ и $\sigma_{ph}(T)$ для необлученной (контрольной) пленки. Видно, что в области температур $T > 350$ К σ_d не зависит от скорости нагрева и охлаждения и соответствует равновесной проводимости. При $T < 350$ К проводимость зависит от скорости и направления изменения температуры. Этот гистерезис связан с тем, что при понижении температуры скорость установления равновесия в системе «дефект—примесь» уменьшается, структура «замораживается» и возможно возникновение неравновесной проводимости при $T < T_E$, где T_E — температура, при которой время установления равновесия в системе дефект—примесь τ_E сравнивается с экспериментальным временем измерений [2].

Известно [5], что проводимость можно описать соотношением

$$\sigma_d(T) = \sigma_{\min} \exp \frac{-(E_F - E_v)_T}{kT}, \quad (1)$$

где E_v , E_F — энергии уровня протекания для дырок и уровня Ферми, $(E_F - E_v)_T$ — их разность для данной температуры T , σ_{min} — минимальная металлическая проводимость. При линейной зависимости E_F и E_v от T

$$\sigma_d(T) = \sigma_{min} \exp \frac{-\gamma}{k} \exp \frac{-(E_F - E_v)_0}{kT} \equiv \sigma_0 \exp \frac{-E_\sigma}{kT}, \quad (2)$$

где γ есть сумма γ_v и γ_F коэффициентов линейного температурного изменения уровня протекания и уровня Ферми.

На вставке (рис. 1) показана температурная зависимость $(E_F - E_v)$, определенная из соотношения (1)

$$(E_F - E_v)_T = kT \ln \frac{\sigma_{min}}{\sigma_d}, \quad (3)$$

где значение σ_{min} мы принимали равным $1.5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ [2]. Видно, что в области $T > T_E$ величина $(E_F - E_v)_T$ с понижением температуры растет и коэффициент $\gamma \approx -1.6 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$. Знак и значение γ [6], по-видимому, указывают на то, что увеличение $(E_F - E_v)_T$ с понижением T происходит за счет сдвига уровня протекания E_v , а статистический сдвиг E_F мал. Это свидетельствует о том, что равновесный уровень Ферми лежит в области слабо изменяющейся с энергией плотности состояний.

На рис. 2 показаны температурные зависимости σ_d и σ_{ph} после облучения пленок как со стороны подложки (3, 4), так и со стороны пленки (2) разным числом световых импульсов. Приведены данные исследований пленок, облученных с плотностью энергии до 2 Дж/см^2 , в которых нет заметных разрушений пленки из-за механических напряжений или эффузии водорода при облучении. Видно, что равновесная проводимость пленок после облучения увеличилась (при комнатной температуре до 100 раз), а энергия активации уменьшилась (от 0.71 до 0.56 эВ). Характер изменения параметров не зависит от того, с какой стороны облучалась пленка. Это указывает на то, что увеличение σ_d не связано с поверхностными эффектами освещения — возникновением в приповерхностной области обогащенного дырками слоя с повышенной проводимостью [7]. По мере возрастания дозы облучения уменьшается не только энергия активации, но и предэкспоненциальный множитель σ_0 до значений, равных σ_{min} . Таким образом, с увеличением дозы облучения уменьшается температурное смещение E_F относительно E_v , а для пленок, где $\sigma_0 = \sigma_{min}$, т. е. $\gamma = 0$, $E_F - E_v$ не зависит от температуры (см. вставку). Значение $\gamma = 0$ в сильно облученных пленках может указывать на то, что уровень Ферми в исследованном интервале температур лежит в области минимума плотности состояний, соответствующих слабым Si—Si связям (хвост валентной зоны), примеси и дефектам. Отметим, что при наибольших дозах облучения проводимость во всем температурном интервале ($T > T_E$ и $T < T_D$) не зависит от скорости изменения температуры и описывается одной экспонентой с энергией активации и $\sigma_0 = \sigma_{min}$. Таким образом, неравновесная проводимость не наблюдается в сильно облученных пленках при $T < T_E$. Этот эффект может быть обусловлен уменьшением времени релаксации τ_E вследствие увеличения коэффициента диффузии водорода D_H ($\tau_E \sim D_H^{-1}$), который возрастает с увеличением проводимости при повышении уровня легирования [8].

Как видно из рис. 1 и 2, величина фотопроводимости увеличивается по мере увеличения дозы облучения, подобно тому, как это происходит при увеличении легирования пленок, например фосфором.

Из литературы известен ряд процессов, приводящих к повышению проводимости пленок $a\text{-Si} : \text{H}$ в результате их освещения или нагрева.

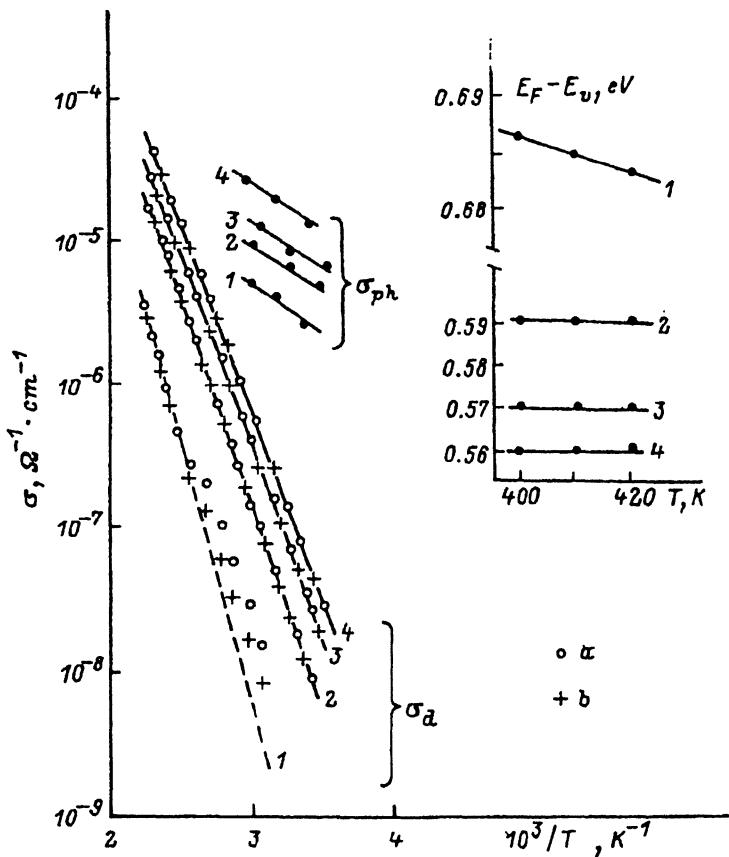


Рис. 2. Температурные зависимости после отжига при 170 °С фотопроводимости σ_{ph} и темновой проводимости σ_d пленок $a\text{-Si:H}$ (В). Цифры у кривых соответствуют номерам образцов. Отношение доз облучения для образцов 1, 2, 3, 4 составляет 0, 3, 5, 7 соответственно. Образцы облучены со стороны: 2 — пленки, 3, 4 — подложки. Измерения проведены при: а — повышении T , б — на понижении.

1. В работе [9] при кристаллизации пленок в результате импульсного облучения лазером при дозах энергии $W > 200$ мДж/см² наблюдалось увеличение проводимости при комнатной температуре на 4—5 порядков.

2. При изотермическом отжиге нелегированных пленок при температурах $T_a \approx 500$ °С в результате кристаллизации проводимость возрастала в 100 раз; перед началом кристаллизации наблюдалось падение проводимости [10]. Последнее связывалось авторами с эффузией водорода.

3. В работах [3, 4] при освещении легированных пленок при повышенной температуре ($T = 200$ °С) наблюдалось неболь-

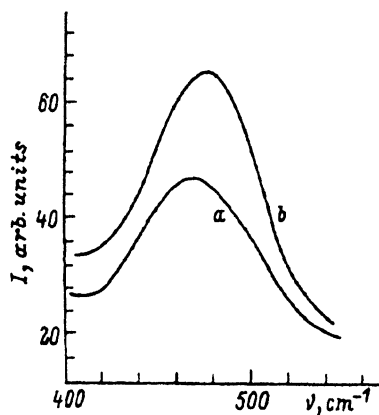


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния для не-облученной пленки 1 (а) и облученной 4 (б).

шее увеличение проводимости в 1.5 раза. Авторы связывают это с увеличением концентрации электрически активных атомов примеси в результате их фотоионизации и разрыва слабых Si—Si связей при освещении.

Измерения спектров комбинационного рассеяния в исследованных пленках показали отсутствие кристаллической фазы. Однако с увеличением дозы облучения наблюдались малое смещение максимума пика TO моды аморфной фазы в область более высоких частот (от 472 до 474 см⁻¹) и уменьшение полуширины пика TO моды (от 72 до 68 см⁻¹) (рис. 3). Смещение пика TO моды аморфной фазы наблюдалось в [11] в необлученных нелегированных пленках a-Si : H при уменьшении концентрации водорода в них в процессе роста от 20% до 8%. В [12] теоретически показано, что уменьшение полуширины является следствием уменьшения разброса углов тетраэдрических связей в аморфной сетке.

В исследованных пленках возможно незначительное уменьшение содержания слабо связанного водорода во время облучения из-за кратковременного нагрева. Однако весь комплекс обнаруженных изменений параметров пленок, по-видимому, возможно объяснить локальными перестройками аморфной сетки с участием водорода и примеси, приводящими к более равномерному распределению бора и увеличению концентрации электрически активных атомов.

Для более полного понимания природы изменений параметров облученных пленок будут предприняты дальнейшие исследования.

Авторы благодарны И. П. Звягину за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Stutzmann, W. B. Jackson, C. C. Tsai. Phys. Rev. B, 32, 23 (1985).
- [2] R. A. Street, J. Kakalios, C. C. Tsai, T. H. Hayes. Phys. Rev. B, 35, 1316 (1987).
- [3] X. M. Deng, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, 36, 9378 (1987).
- [4] J. Lang, S. C. Park, S. C. Kim, C. Lee. Appl. Phys. Lett., 51, 1804 (1987).
- [5] Д. Мотт. Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Под ред. Дж. Джоунупулоса и Дж. Люковски, 2, 217 (1988).
- [6] J. Perrin, I. Solomon. J. Non-Cryst. Sol., 37, 407 (1980).
- [7] B. Aker, H. Fritzsche. J. Appl. Phys., 54, 6628 (1983).
- [8] R. A. Street. Solar Cells, 24, 211 (1988).
- [9] K. Winer, G. B. Anderson et al. Appl. Phys. Lett., 57, 2222 (1990).
- [10] J. C. Chou, Lu C. Y. Hsiung. J. Non-Cryst. Sol., 99, 23 (1988).
- [11] Y. Hishikawa. J. Appl. Phys., 62, 3150 (1987).
- [12] D. Veeman, R. Tsu, M. F. Thoepe. Phys. Rev. B, 32, 874 (1985).

Редактор Т. А. Полянская