ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТ СТЕБЛЕРА-ВРОНСКОГО В ПЛЕНКАХ *a*-Si : H, ЛЕГИРОВАННЫХ ФОСФОРОМ

А. Г. Казанский, Д. Г. Яркин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899, Москва, Россия
(Получена 5 апреля 1993 г. Принята к печати 28 апреля 1993 г.)

В области 300—450 К исследовано влияние длительного освещения на проводимость и фотопроводимость пленок *a*-Si : H с различным уровнем легирования фосфором. Полученные зависимости проводимости от времени освещения изменяются с легированием, температурой освещения и имеют немонотонный характер. Проводимость уменьшается при малых и возрастает при больших временах освещения. Характерные температуры отжига положительной и отрицательной составляющей изменения проводимости различаются. Результаты объясняются существованием двух процессов, происходящих в материале при освещении. Обсуждаются возможные механизмы, приводящие к возрастанию проводимости в результате освещения, связанные с увеличением эффективности легирования.

Изменению электрических и фотоэлектрических свойств аморфного гидрированного кремния (*a*-Si : H) под влиянием освещения (эффект Стеблера-Вронского) посвящено большое число работ. В подавляющем большинстве из них исследовались нелегированные пленки *a*-Si : H. В то же время легированный, в частности фосфором, *a*-Si : H изучен в значительно меньшей степени. Причем полученные результаты указывают на возможность увеличения концентрации электрически активных примесей в результате освещения легированного материала при температурах, превышающих комнатную [1–3]. В этой связи представляет интерес изучение динамики изменения проводимости (σ_T) и фотопроводимости ($\Delta\sigma$) пленок *a*-Si : H с различным уровнем легирования фосфором в результате их освещения при различных температурах. Результаты таких экспериментов приведены в настоящей работе.

Мы изучали пленки *a*-Si : H (толщиной ≈ 1 мкм), легированные фосфором, полученные методом разложения смеси газов моносилана (SiH_4) и фосфина (PH_3) в ВЧ тлеющем разряде при температуре подложки $T_s = 250$ °C. Относительное объемное содержание газов в реакционной камере $k = [PH_3]/[SiH_4]$ составляло 10^{-7}—10^{-4}. Световая деградация пленок осуществлялась светом лампы накаливания через тепловой фильтр интенсивностью 100 мВт/см^2. Перед проведением измерений пленки отжигались в вакууме при $T_a = 180$ °C в течение 30 мин.

Проведенные нами измерения показали, что освещение всех исследованных пленок при комнатной температуре приводит к монотонному уменьшению σ_T. Уменьшение σ_T обычно связывают с увеличением концентрации оборванных связей, состояния которых расположены в середине щели подвижности, и соответственно со смещением к середине щели положения уровня Ферми E_f. Динамика изменения σ_T в значительной степени определяется формой плотности состояний в области смещения E_f [4].

Увеличение температуры, при которой проводится освещение, изменяет характер зависимости σ_T от времени освещения. На рис. 1, *a* показана динамика

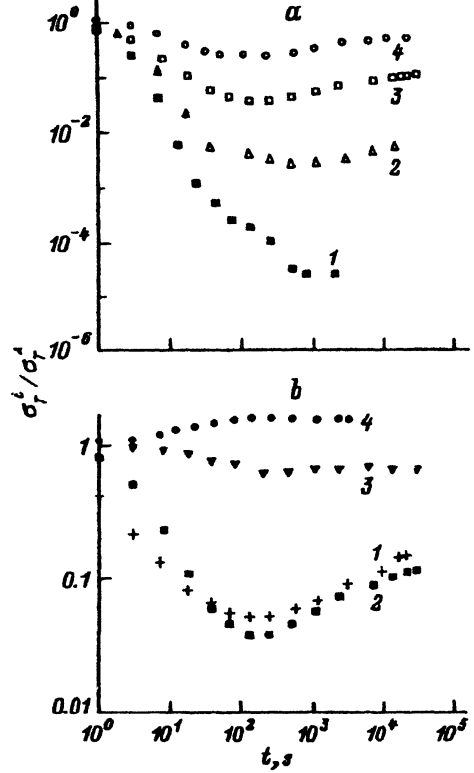

Рис. 1. Зависимость относительного изменения проводимости σ_T^B/σ_T^A от времени освещения *a* — для пленки с $k = 10^{-6}$ при температурах освещения T_l, K: *1* — 290, *2* — 365, *3* — 400, *4* — 420; *b* — при $T_l = 400$ K и значениях k: *1* — 10^{-4}, *2* — 10^{-5}, *3* — 10^{-6}, *4* — 10^{-7}.

относительного изменения проводимости σ_T^B/σ_T^A для пленки с $k = 10^{-6}$ при различных температурах освещения. Данные для пленок с различным уровнем легирования, полученные при температуре освещения 400 K, представлены на рис. 1, *b*. Индексы *A* и *B* соответствуют состоянию пленки до и после освещения. Из рис. 1, *a* видно, что увеличение температуры, при которой проводится световая деградация, приводит к появлению участка, соответствующего увеличению σ_T^B/σ_T^A со временем освещения. Для пленки с максимальным уровнем легирования $k = 10^{-4}$ (рис. 1, *b*) освещение при высокой температуре вызывает увеличение σ_T^B/σ_T^A во всей области времен освещения. Наблюдаемая динамика изменения σ_T^B/σ_T^A свидетельствует о том, что в легированном фосфором *a*-Si : H в результате освещения помимо процесса образования оборванных связей протекает иной процесс, который может быть связан с увеличением концентрации электрически активных примесей [1–3]. Причем интенсивность данного процесса возрастает как с концентрацией фосфора, так и с температурой, при которой происходит освещение.

На рис. 2 представлены температурные зависимости σ_T, полученные для пленки с $k = 10^{-4}$ в отожженном состоянии (*A*) и после освещения в течение 5 мин при $T = 300$ (*B'*) и $T = 400$ K (*B''*). Как видно, после освещения при $T = 300$ K σ_T уменьшается, в то время как после освещения при $T = 400$ K σ_T возрастает. Температурные зависимости E_f относительно края зоны проводимости E_c, соответствующие зависимостям, представленным на рис. 2, показаны на рис. 3. Значения E_c—E_f определялись из выражения

$$E_c - E_f = kT \ln (\sigma_m/\sigma_T),$$

где $\sigma_m = 150$ Ом$^{-1}$ см$^{-1}$ — минимальная металлическая проводимость [5].

При температурах, меньших температуры «замерзания» структуры T_c [6], плотность состояний в щели подвижности не изменяется и зависимость E_c—E_f от температуры пленки определяется статистическим сдвигом E_f. Процессом, определяющим изменение E_c—E_f для образца в отожженном состоянии при $T > 415$ K и дающим вклад в уменьшение E_c—E_f для образца в состоянии *B'* и *B''*, является, по-видимому, температурное смещение уровня протекания [7]. Однако характер зависимости положения E_f от температуры для пленки в состояниях *B'* и *B''* показывает, что в области высоких температур увеличение температуры приводит также к прекращению изменений σ_T, вызванных двумя процессами, происходившими в пленке при ее освещении (один из которых

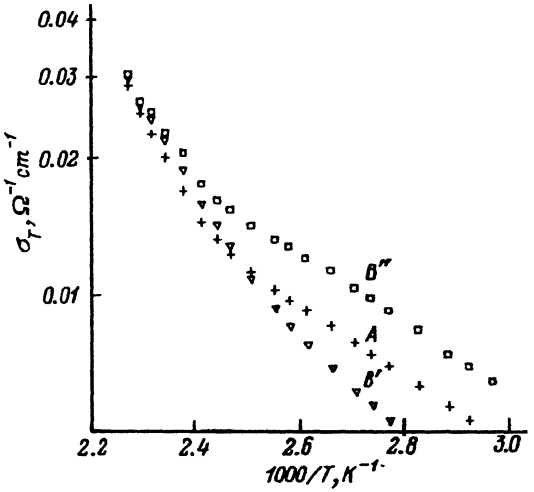

Рис. 2. Зависимость проводимости σ_T от температуры для пленки с $k = 10^{-4}$ в отожженном состоянии (A) и после ее освещения в течение 5 мин при 300 К (B') и 400 К (B'').

уменьшает, а другой увеличивает σ_T). Как видно из рис. 3, на кривой, соответствующей состоянию B', при $T \approx 400$ К (показано стрелкой) прекращаются изменения σ_T, вызванные процессом, уменьшающим σ_T. В то же время при $T \approx 425$ К как для состояния B', так и для состояния B'' прекращаются изменения, соответствующие процессу, приводящему к увеличению σ_T.

Отличие как скоростей указанных двух процессов, происходящих при освещении образца, так и характерных температур прекращения, вызванных этими процессами изменений, свидетельствует о их независимости друг от друга. Процесс, приводящий к уменьшению σ_T, по-видимому, как отмечено выше, определяется разрывом слабых связей между атомами кремния под действием освещения [8]. В то же время увеличение σ_T может быть связано с возрастанием в результате освещения концентрации электрически активных атомов фосфора.

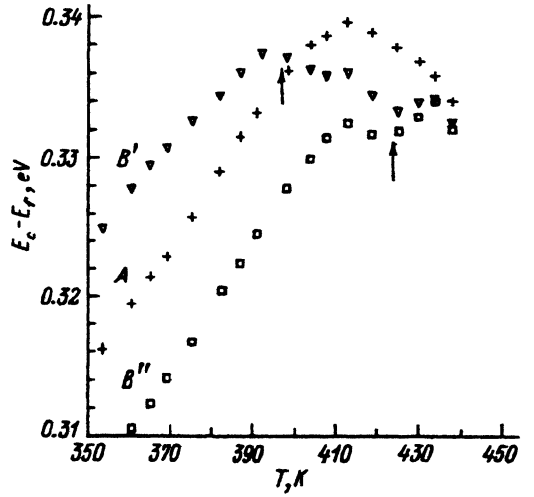

Рис. 3. Зависимость положения уровня Ферми от температуры для той же пленки, что и на рис. 2, в тех же состояниях A, B', B''.

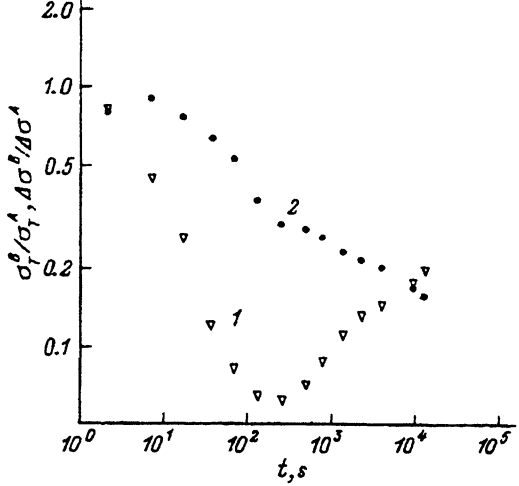

Рис. 4. Зависимость относительного изменения проводимости σ_T^B/σ_T^A (*1*) и фотопроводимости $\Delta\sigma^B/\Delta\sigma^A$ (*2*) от времени освещения для пленки с $k = 10^{-6}$ при $T = 400$ К.

По мнению Бранца [9], данный процесс может определяться реакцией $h + Si_3^- + P_3^0 \rightarrow Si_4^- + P_4^+ \rightarrow Si_4^0 + P_4^+ + e$, где нижний и верхний индексы соответствуют координации и зарядовому состоянию (S_4^- соответствует электрону, захваченному на состояние в хвосте зоны проводимости). Если указанная реакция справедлива, то вероятность данного процесса увеличивается с ростом концентрации дефектов и легирующей примеси.

Рассмотрим изменение фотопроводимости $\Delta\sigma$ при освещении легированного *a*-Si : H при высокой температуре. На рис. 4 показана динамика изменения $\Delta\sigma$, измеренная при интенсивности освещения 10 мВт/см^2 для пленки с $k = 10^{-6}$ и $T = 400$ К. Для сравнения на этом же рисунке показано изменение σ_T. Как видно, изменение $\Delta\sigma$ не коррелирует с изменением σ_T и $\Delta\sigma$ уменьшаетя при всех временах освещения. Известно, что величина фотопроводимости в *a*-Si : H в основном определяется концентрацией оборванных связей в нейтральном зарядовом состоянии N^0 [10]. В области малых времен освещения E_f смещается к середине щели подвижности, поэтому уменьшение $\Delta\sigma$ в результате световой деградации при малых временах освещения может быть вызвано ростом как полной концентрации оборванных связей N_D, так и увеличением относительной концентрации N^0/N_D в результате смещения E_f к середине щели. В области больших времен освещения увеличение σ_T свидетельствует о смещении E_f к E_c. В то же время $\Delta\sigma$ продолжает уменьшаться. Оценки показывают, что уменьшение $\Delta\sigma$ при больших временах освещения нельзя объяснить увеличением N_D в результате световой деградации, компенсирующим уменьшение относительной концентрации N^0/N_D в результате смещения E_f к E_c.

Полученный результат можно объяснить, если принять во внимание, что в легированном *a*-Si : H концентрация N^0 в условиях освещения может отличаться от равновесного значения N_0^0, причем $N^0 = N_0^0 + n_t$ [11], где n_t — концентрация неравновесных электронов, захваченных на состояния в хвосте зоны проводимости. На основании исследования влияния освещения на дрейфовую подвижность электронов в *a*-Si : H в работах [12, 13] был сделан вывод об увеличении плотности состояний в хвосте зоны проводимости в результате длительного освещения. Это должно привести к увеличению n_t и соответственно к уменьшению $\Delta\sigma$ даже в области увеличения σ_T.

Отсутствие корреляции в изменении σ_T и $\Delta\sigma$ может также наблюдаться в том случае, если увеличение σ_T связано с эффектами, происходящими вблизи поверхности пленки. Действительно, поскольку концентрация дефектов вблизи поверхности пленки превышает объемную концентрацию [14], то в случае справедливости рассмотренной выше реакции увеличение концентрации электрически активных атомов фосфора должно происходить более эффективно в приповерхностном слое. Это может привести к появлению вблизи поверхности области, обогащенной электронами, и соответственно появлению участка нарастания σ_T. В то же время наблюдаемое уменьшение $\Delta\sigma$ можно объяснить увеличением концентрации оборванных связей в объеме образца, поскольку в условиях освещения влияние приповерхностного слоя уменьшается и фотопроводимость определяется в основном концентрацией дефектов в объеме.

Таким образом, проведенные измерения указывают на существование двух процессов, определяющих изменение σ_T, происходящих в результате освещения пленок a-Si : H, легированных фосфором. Один из них приводит к уменьшению σ_T. Другой процесс, эффективность которого возрастает с ростом легирования и температуры, при которой происходит освещение, приводит к увеличению проводимости пленки.

Авторы выражают благодарность В. Фусу и Х. Меллу за предоставление использованных в экспериментах пленок a-Si : H.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] X.-M. Deng, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, **36**, 9378 (1987).
[2] J.-H. Lee, C. Lee, J. Jang. Sol. St. Commun., **68**, 615 (1988).
[3] M. Stutzmann. Phys. Rev. B, **35**, 9735 (1987).
[4] А. Г. Казанский. ФТП, **24**, 1462 (1990).
[5] J. Stuke. J. Non-Cryst. Sol. **97-98**, 1 (1987).
[6] J. Kakalios, R. A. Street. Phys. Rev. B, **34**, 6014 (1986).
[7] A. G. Kazanski, S. V. Kuznetsov. Phys. St. Sol., **167**, K39 (1991).
[8] M. Stutzmann, W. B. Jackson, C. C. Tsai. Phys. Rev. B, **32**, 23 (1985).
[9] H. M. Branz. Phys. Rev. B, **38**, 7474 (1988).
[10] W. E. Spear, H. L. Steemers, P. G. LeComber, R. A. Gibson. Phil. Mag. B, **50**, 133 (1984).
[11] R. H. Bube, D. Redfield. J. Appl. Phys., **66**, 3074 (1989).
[12] J. Takada, H. Fritzsche. Phys. Rev. B, **36**, 1706 (1987).
[13] О. В. Буторин, А. Г. Казанский. ФТП, **22**, 84 (1988).
[14] S. Jin, S. Aljischi, L. Ley. J. Non-Cryst. Sol., **137-138**, 327 (1991).

Редактор Т. А. Полянская