

Фотопроводимость аморфного гидрированного кремния, легированного методом ионной имплантации

© А.Г. Казанский, С.М. Петрушко*, Н.В. Рыжкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* Варшавский технологический университет

(Получена 29 июня 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Исследовано влияние концентрации примесей (фосфора и бора) на фотопроводимость пленок аморфного гидрированного кремния, гидрированного и легированного методом ионной имплантации. Проведено сопоставление с данными для пленок, легированных из газовой фазы. Обнаружено существенное отличие зависимостей фотопроводимости от уровня легирования для фосфора и бора. Фотопроводимость имплантированных фосфором пленок возрастает с уровнем легирования и на порядок величины меньше фотопроводимости пленок, легированных фосфором из газовой фазы. В то же время фотопроводимость пленок, имплантированных бором, слабо зависит от уровня легирования и практически совпадает с фотопроводимостью пленок, легированных бором из газовой фазы. Полученные результаты объясняются в рамках модели рекомбинации, учитывающей различие в перезарядке состояний дефектов в пленках *n*- и *p*-типа.

Метод ионной имплантации широко используется для легирования кристаллических полупроводников. Легирование пленок аморфных гидрированных полупроводников, в частности аморфного гидрированного кремния (*a*-Si:H), в большинстве случаев проводится в процессе их получения из газовой фазы добавлением фосфина или диборана в реакционную камеру. Имплантация элементов III и V групп в аморфный гидрированный кремний также позволяет в широких пределах изменять проводимость данного материала [1–3]. Причем, в отличие от легирования из газовой фазы, концентрация водорода в пленке не зависит от уровня введенной примеси [3]. Электрические свойства пленок *a*-Si:H, легированных методом ионной имплантации, подробно изучены в работах [1–9]. Имеющиеся данные [1,4,10] указывают на то, что при ионной имплантации в аморфный материал должны вводиться дополнительные дефекты, являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации. В то же время фотоэлектрические свойства *a*-Si:H, легированного методом ионной имплантации, исследованы в значительно меньшей степени [1,4,9]. В частности, практически отсутствуют систематические исследования фотопроводимости пленок, легированных акцепторными примесями.

В настоящей работе исследовано влияние ионной имплантации элементов III (бор) и V (фосфор) групп на фотопроводимость пленок *a*-Si:H и проведено сопоставление с фотоэлектрическими свойствами пленок, легированных из газовой фазы.

Пленки *a*-Si:H (толщиной 0.5 мкм) для ионной имплантации осаждались с использованием термического разложения моносилана (SiH₄). В качестве подложек использовались пластины кристаллического кремния со сформированным на поверхности слоем SiO₂ (толщиной 1 мкм). Гидрирование пленок и их легирование фосфором или бором проводилось методом ионной имплантации. Содержание водорода в пленках составля-

ло 12 ат%. После имплантации пленки отжигались при температуре 400°C. На поверхности пленок были сформированы контакты из Al. Перед измерениями пленки отжигались в вакууме при температуре 180°C в течение 30 мин. Измерения проводились при комнатной температуре. Величина фотопроводимости определялась при освещении пленок светом с энергией квантов 1.8 эВ и интенсивностью $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

На рис. 1 показана зависимость проводимости (σ_d) исследованных пленок от концентрации имплантированного фосфора и бора. На этом же рисунке представлены данные, полученные в работе [1], в которой имплантация фосфора и бора проводилась в пленки *a*-Si:H, полученные методом разложения моносилана в высокочастотном (ВЧ) тлеющем разряде. Из рисунка видно, что величина σ_d исследованных нами пленок, гидрирование которых проводилось методом ионной имплантации, изменяется при имплантации фосфора или бора более чем на 6 порядков. Характер изменения σ_d близок к данным для пленок, гидрирование которых происходило в процессе их осаждения в плазме ВЧ тлеющего разряда [1]. Некоторое отличие наблюдается лишь для области перехода от проводимости *n*- к проводимости *p*-типа. Для исследованных нами пленок указанный переход наблюдается при концентрациях введенного бора, на порядок меньших, чем для пленок, полученных в работе [1].

Зависимость фотопроводимости ($\Delta\sigma_{ph}$) исследованных пленок от положения Ферми E_f относительно зоны проводимости E_c (валентной зоны E_v) для пленок *n*-типа (*p*-типа) проводимости представлены на рис. 2. Значения $(E_c - E_f)$ и $(E_f - E_v)$ определялись из величины проводимости с использованием соотношения $|E_{c,v} - E_f| = kT \ln(\sigma_0/\sigma_d)$, где $\sigma_0 = 150 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [11]. На этом же рисунке показаны данные для пленок *a*-Si:H, полученных разложением моносилана в ВЧ тлеющем разряде и легированных фосфором или бором из газовой фазы.

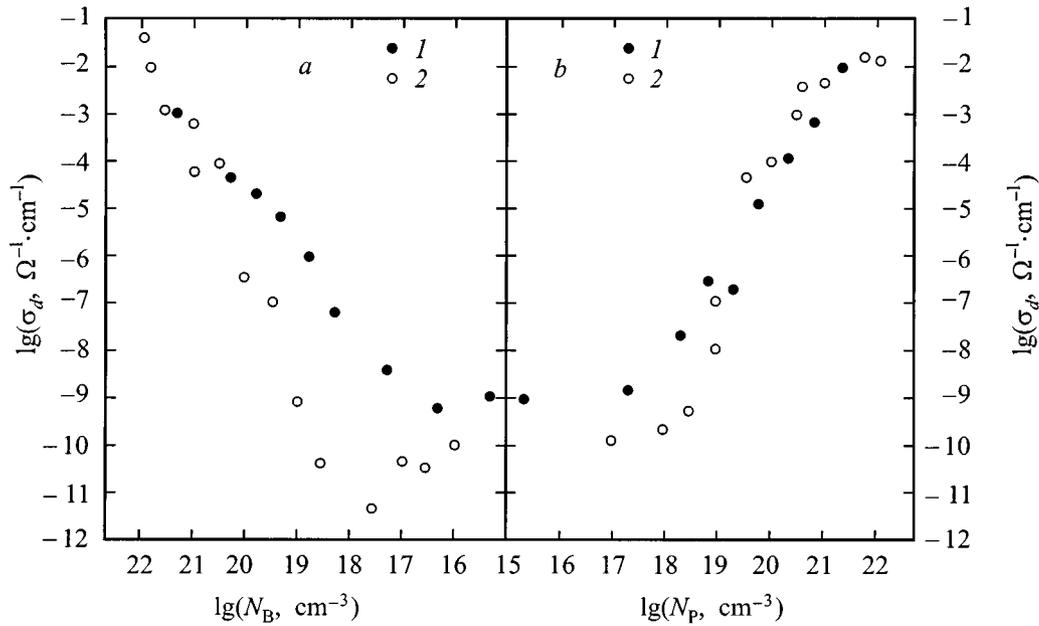


Рис. 1. Зависимости проводимости пленок *a*-Si:H от концентрации имплантированного бора (*a*) и фосфора (*b*). Данные: 1 — настоящая работа, 2 — работа [1].

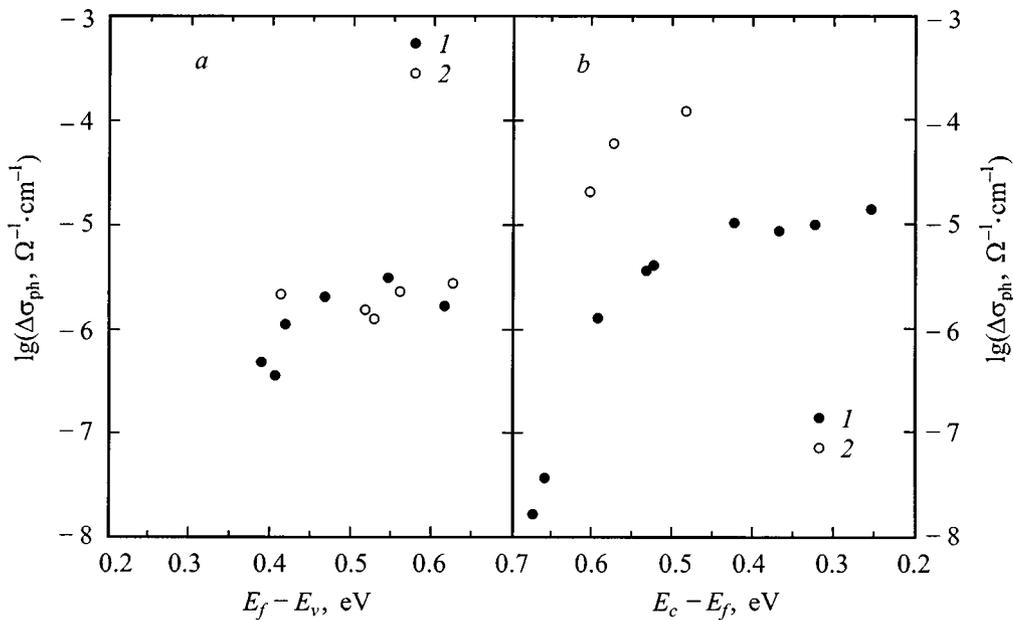


Рис. 2. Зависимости фотопроводимости от положения уровня Ферми для пленок *a*-Si:H, легированных бором (*a*) и фосфором (*b*) методом ионной имплантации (1) и из газовой фазы (2).

Рассмотрим результаты, полученные для пленок, имплантированных фосфором. Из рис. 2, *b* видно, что $\Delta\sigma_{ph}$ имплантированных фосфором пленок на порядок меньше, чем $\Delta\sigma_{ph}$ пленок, легированных из газовой фазы, что согласуется с данными работы [1]. По мнению авторов [1,4], это связано с введением при ионной имплантации дополнительных рекомбинационных центров. Данное предположение согласуется с результатами

проведенных нами сравнительных измерений методом постоянного фототока коэффициента поглощения (α) в "дефектной" области спектра (0.8÷1.4 эВ) для пленок, легированных фосфором методом ионной имплантации и из газовой фазы и имеющих близкие значения ($E_c - E_f$). Значение $\alpha(1.2\text{ эВ})/\alpha(1.8\text{ эВ})$ для имплантированных фосфором пленок было на порядок больше, чем для пленок, легированных из газовой фазы. Это указыва-

ет на большую плотность состояний, соответствующих дефектам, при энергиях $E < E_f$ в щели подвижности имплантированных фосфором пленок.

Как видно из рисунка 2, b , при смещении E_f к E_c , происходящем с ростом концентрации фосфора N_p , величина $\Delta\sigma_{ph}$ имплантированных фосфором пленок возрастает. Если имплантация приводит к увеличению концентрации оборванных связей, то наблюдаемое увеличение $\Delta\sigma_{ph}$ связано с уменьшением концентрации основных центров рекомбинации неравновесных электронов — нейтральных оборванных связей, которые при смещении E_f к E_c становятся отрицательно заряженными [12]. Заметим при этом, что полная концентрация оборванных связей, находящихся в нейтральном и отрицательно заряженном состояниях, возрастает при легировании [2]. В то же время, по мнению авторов [10], возникающие при имплантации центры безызлучательной рекомбинации не являются оборванными связями. В этом случае наблюдаемое увеличение $\Delta\sigma_{ph}$ имплантированных фосфором пленок при смещении E_f к E_c указывает на уменьшение концентрации рекомбинационных центров, соответствующих введенным дефектам (возможно, вследствие их перезарядки).

Рассмотрим результаты, полученные для имплантированных бором пленок p -типа проводимости (см. рис. 2, a). Из рисунка видно, что в отличие от пленок, имплантированных фосфором, значения $\Delta\sigma_{ph}$ пленок, легированных бором методом ионной имплантации и из газовой фазы, близки друг другу. Измерения показали, что величины $\alpha(1.2 \text{ эВ})/\alpha(1.8 \text{ эВ})$ для пленок с равными значениями $E_f - E_v$ также близки друг другу. Последний результат указывает на то, что ионная имплантация не приводит к существенному увеличению плотности состояний в области энергий $E > E_f$ в пленках $a\text{-Si:H}$ p -типа проводимости.

Как видно из рисунка, увеличение концентрации имплантированного бора N_B и, соответственно, смещение E_f к E_v практически не изменяют величину $\Delta\sigma_{ph}$. Некоторое уменьшение наблюдается лишь для максимальных концентраций введенного бора. Слабую зависимость $\Delta\sigma_{ph}$ от E_f в пленках p -типа проводимости можно объяснить в рамках модели, развитой в работе [13]. Согласно этой модели, существенное различие в протяженности хвостов плотности состояний вблизи E_v и E_c приводит к тому, что в пленках $a\text{-Si:H}$ p -типа проводимости, в отличие от пленок n -типа, в условиях оптического возбуждения концентрация основных центров рекомбинации — нейтральных оборванных связей (N^0) существенно отличается от равновесной (N_0^0). При этом значение N^0 определяется концентрацией неравновесных дырок, захваченных на хвост валентной зоны, и соответственно зависит от плотности состояний в хвосте валентной зоны и не зависит от N_0^0 и соответственно от положения E_f . В результате этого величина $\Delta\sigma_{ph}$ не должна зависеть от E_f и N_0^0 и должна уменьшаться при увеличении плотности состояний в хвосте валентной зоны.

Влияние интерференции в исследованных структурах $a\text{-Si:H/SiO}_2/c\text{-Si}$ на измеряемые спектральные зависимости α в области экспоненциального "хвоста Урбаха" не позволило нам определить крутизну "хвоста Урбаха" и, соответственно, оценить влияние имплантации на параметры хвоста плотности состояний валентной зоны [14]. Если предположить, что хвост валентной зоны не изменяется при малых концентрациях имплантированного бора и возрастает вследствие увеличения беспорядка в структуре при больших концентрациях, то рассмотренная модель позволяет объяснить близость значений $\Delta\sigma_{ph}$ для пленок, легированных бором методом ионной имплантации и из газовой фазы, и некоторое уменьшение $\Delta\sigma_{ph}$ при максимальных концентрациях введенного бора.

Таким образом, проведенные исследования показали, что легирование пленок $a\text{-Si:H}$ фосфором методом ионной имплантации приводит к большим значениям плотности состояний в щели подвижности в области энергий $E < E_f$ и меньшим значениям $\Delta\sigma_{ph}$ по сравнению с легированием из газовой фазы. В случае бора имплантация не вызывает существенного увеличения плотности состояний в щели подвижности в области энергий $E > E_f$, а величины $\Delta\sigma_{ph}$ для пленок, легированных указанными методами, близки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках программы "Университеты России — фундаментальные исследования".

Список литературы

- [1] P.G. Le Comber, W. E. Spear, G. Muller, S. Kalbitzer. *J. Non-Cryst. Sol.*, **35–36**, 327 (1980).
- [2] H. Mannsperger, S. Kalbitzer, G. Muller. *Appl. Phys. A*, **41**, 253 (1986).
- [3] F.J. Demond, G. Muller, S. Kalbitzer, W.E. Spear, P.G. Le Comber. *Nucl. Instr. Meth.*, **191**, 59 (1981).
- [4] G. Muller, P.G. Le Comber. *Phil. Mag. B*, **43**, 419 (1981).
- [5] W.E. Spear, P.G. Le Comber, S. Kalbitzer, G. Muller. *Phil. Mag. B*, **39**, 159 (1979).
- [6] W. Beyer, D. Stritzker, H. Wagner. *J. Non-Cryst. Sol.*, **35–36**, 321 (1980).
- [7] H. Matsumura, N. Kuzuta, H. Ishiwara, S. Furukawa. *Radiat. Eff.*, **48**, 133 (1980).
- [8] S.M. Pietruszko. *J. Non-Cryst. Sol.*, **164–166**, 255 (1993).
- [9] K. Boringer, X.H. Liu, S. Kalbitzer. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **16**, L1187 (1983).
- [10] T.M. Searle, W.A. Jackson, S. Kalbitzer. *J. Non-Cryst. Sol.*, **114**, 286 (1989).
- [11] H. Overhof, P. Thomas. *Transport in Hydrogenated Amorphous Semiconductors* [Springer Tracts in Modern Physics (1989) v. 114].
- [12] W.E. Spear, H.L. Steemer, P.G. Le Comber, R.A. Gibson. *Phil. Mag. B*, **50**, L33 (1984).
- [13] А.Г. Казанский, Е.А. Шамонина. *ФТП*, **27**, 1688 (1993).
- [14] R. Kuntz, J. Dziesiaty. *Phys. St. Sol. (a)*, **124**, K149 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoconductivity of amorphous hydrogenated silicon, doped by ion implantation

A.G. Kazanskii, S.M. Pietruszko*, N.V. Ryzhkova

M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

* Warsaw University of Technology,
Institute of Microelectronics and Optoelectronics,
IMIOW, 00-662 Warsaw, Poland

Abstract The influence of impurity concentration (phosphorus or boron) on the photoconductivity of amorphous hydrogenated silicon films doped by ion implantation have been studied. The results have been compared against the data, obtained for the films doped from vapor phase. The results showed the difference of the dependences of the photoconductivity on the doping level for phosphorus and boron implanted films. The photoconductivity of phosphorus implanted films increases with the doping level and is one order of magnitude lower than the photoconductivity of the films doped from vapor phase. On the other hand, the photoconductivity of the films doped with boron changes insignificantly with the doping level and is close to the photoconductivity of the films doped from gas phase. The results are explained by using the model of recombination, which takes into account the difference in defect state recharge for *n*- and *p*-type samples.

Fax: (095)939 37 31 (Kazanskii)

E-mail: Kazanskii@scon279.phys.msu.su(Kazanskii)