

В пользу предлагаемого объяснения полученных результатов свидетельствуют и другие экспериментальные факты: 1) «пороговый» характер зависимостей  $\eta_{0.40}$  и  $\eta_{0.17}$  от  $T_{\text{пто}}$ ; 2) «одновременность» изменений  $\eta_{0.40}$  и  $\eta_{0.17}$  (они начинаются и происходят в одном и том же интервале изменений  $T_{\text{пто}}$ ); 3) независимость вида полученных кривых от дозы облучения; 4) соотношение  $\Delta\eta_{0.17} > \Delta\eta_{0.40}$ , из которого следует, что с ростом  $T_{\text{пто}}$  происходит уменьшение плотности примесной атмосферы ПДС при их отжиге.

Таким образом, не выявляемые селективным травлением ПДС (или включения) междоузельного типа стабильны до  $T_{\text{пто}} \approx 950^\circ\text{C}$ , при более высоких температурах они отжигаются (трансформируются или «растворяются»), а окружающие их поля упругих напряжений при этом уменьшаются, что приводит к наблюдаемым на опыте особенностям в образовании РД. Отметим также, что при  $T > 900^\circ\text{C}$ , как правило, отжигается большинство известных микродефектов [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 10. С. 1721—1725.
- [2] Колковский И. И., Лугаков П. Ф., Шуша В. В. // ФТП. 1989. Т. 23. З. 5. С. 885—887.
- [3] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурин Л. И., Ткачев В. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 4. С. 776—780.
- [4] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 294 с.
- [5] Корбетт Дж., Бургуэн Ж. // Точечные дефекты в твердых телах. М., 1979. С. 9—162.
- [6] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 472 с.
- [7] Junichi C. // Def. prop. semicond.: Def. Eng. Symp. Def. Qual. Semicond. Tokyo, 1987. P. 143—153.
- [8] Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 110—113.
- [9] Voronkov V. V. // J. Cryst. Growth. 1982. V. 59. P. 625—643.
- [10] Шейхет Э. Г., Червоный И. Ф., Фалькевич Э. С. // Высокочистые вещества. 1989. № 2. С. 50—55.
- [11] Критская Т. В., Неймарк К. Н., Шкляр Б. Л. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1986. Т. 22. В. 6. С. 1038—1039.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при БГУ  
им. В. И. Ленина  
Минск

Получено 22.10.1991  
Принято к печати 20.03.1992

ФТП, том 26, вып. 8, 1992

## СОСТОЯНИЕ ОБОРВАННЫХ СВЯЗЕЙ В ПСЕВДОЛЕГИРОВАННОМ АМОРФНОМ ГИДРИРОВАННОМ КРЕМНИИ $\alpha\text{-Si:H}$

Голикова О. А., Сорокина К. Л.

Псевдолегирование, позволяющее изменять в широких пределах положение уровня Ферми  $\epsilon_F$  в щели подвижности  $E_g$   $\alpha\text{-Si:H}$  без введения легирующей компонент, является в настоящее время перспективным методом управления фотоэлектрическими свойствами материала. Как было показано, значительного перемещения  $\epsilon_F$  можно добиться, варьируя смещение на сетке и импеданс цепи сетки в триодной системе ВЧ разложения силана [1] или температуру осаждения, скорость прокачки газовой смеси [2], состав газовой смеси и смещение на подложке [3, 4] в диодной системе. В результате без введения легирующих примесей удалось получить образцы  $\alpha\text{-Si:H}$ , аналогичные по свойствам пленкам  $\alpha\text{-Si:H}$ , легированным донорной примесью [5].

Величина фотопроводимости  $a\text{-Si} : \text{H}$ , согласно модели Стрита [6], определяется состоянием оборванных связей: падение  $\sigma_{\text{ф}}$  в  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$  при  $\epsilon_F \rightarrow E_g/2$  связывается с перезарядкой  $D^- \rightarrow D^0$  ( $D^-$  и  $D^0$  — отрицательно заряженная и нейтральная оборванная связи соответственно). Однако состояние оборванных связей в псевдолегированном  $a\text{-Si} : \text{H}$  оставалось неизвестным, поэтому интерпретация аналогичного поведения  $\sigma_{\text{ф}}$  в зависимости от  $\Delta E$  ( $\Delta E$  — энергия активации электропроводности, характеризующая положение  $\epsilon_F$ ) с помощью модели [6] требует дополнительного обоснования. Вопрос заключается в том, влияет ли на число оборванных связей и их зарядовое состояние тот способ, посредством которого осуществлялся сдвиг  $\epsilon_F$ .

Пролить свет на данный вопрос может сравнительный анализ свойств  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$  и  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{Li})$ : известно, что Li является примесью внедрения, тогда как P — типичная примесь замещения. Оказывается, что дефектное поглощение легированного  $a\text{-Si} : \text{H}$  не зависит от типа примеси [8], хотя для пленок  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{Li})$  был обнаружен ряд особенностей: новые колебательные моды при  $610 \text{ см}^{-1}$  (рамановская спектроскопия),  $1400$  и  $1800 \text{ см}^{-1}$  (ИК спектроскопия), вхождение Li в форме конгломератов в составе LiOH. Тем не менее все это кажется несущественным для результатов, полученных в [7]. Поэтому можно заключить, что концентрация оборванных связей определяется главным образом положением  $\epsilon_F$  независимо от способа достижения этого положения.

Аналогичные данные по дефектному поглощению в псевдолегированном  $a\text{-Si} : \text{H}$  были получены методом постоянного фототока (МПФ) в [9, 10], где также измерялись  $(\mu\tau)_n$  и  $(\mu\tau)_p$  (произведения подвижности на время жизни для электронов и дырок). Эти результаты также свидетельствуют в пользу перезарядки  $D^- \rightarrow D^0$  при  $\epsilon_F \rightarrow E_g/2$  в псевдолегированном  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

Тем не менее интересно непосредственно определить положение полосы оборванных связей в  $E_g$ , их концентрацию и полуширину полосы, что и было сделано на основе данных МПФ из [9, 10].

Расчеты проводились для модели Кочки и др. [11], согласно которой в образцах, подобных нашим, дефектное поглощение вызывается переходами между состояниями дефектов (оборванными связями) и делокализованными состояниями зоны проводимости (ЗП). В свертке, дающей коэффициент поглощения в одно-электронном приближении, плотность состояний в  $E_g$  представляется гауссовым распределением дефектных состояний и экспоненциальным хвостом ЗП; плотность конечных состояний берется  $\sim \epsilon^{-1/2}$ . Таким образом, плотность дефектных состояний характеризуется центром распределения  $\epsilon_D$ , полушириной  $2W$  и общим числом состояний  $N_D$ . Функция распределения Ферми — Дирака аппроксимируется «ступенькой» (1 для  $\epsilon < \epsilon_F$  и 0 для  $\epsilon > \epsilon_F$ ), величина «константы»  $C$  берется та же, что и в [11]. Параметры плотности состояний определяются путем подгонки расчетной кривой поглощения  $\alpha(h\nu)$  под экспериментальную.

Результаты данных расчетов приведены на рис. 1. Концентрация оборванных связей  $N_D$  падает, когда  $\Delta E$  возрастает (т. е.  $\epsilon_F \rightarrow E_g/2$ ), что согласуется с нашими выводами в [10]. Полуширина дефектной полосы составляет  $\sim 0.2$  эВ. Наиболее интересный результат — это сдвиг в псевдолегированном  $a\text{-Si} : \text{H}$  полосы оборванных связей в сторону края подвижности валентной зоны. Интересно также отметить, что в собственном  $a\text{-Si} : \text{H}$ , имеющем  $\Delta E = 0.9$  эВ, эта полоса расположена при  $(\epsilon_c - \epsilon_D) = 0.9$  эВ.

На рис. 2 показано согласие данных, изложенных выше, с результатами Кочки и др. для  $a\text{-Si} : \text{H}(\text{P})$ , полученными в [11] из данных МПФ с помощью аналогичных расчетов. Действительно, сдвиг полосы оборванных связей (являющихся в обоих случаях  $D^-$ ) одинаков для легированного и псевдолегированного  $a\text{-Si} : \text{H}$ . Это не свидетельствует, однако, об отрицательной корреляционной энергии дефектов и может быть объяснено в рамках концепции «pool defect» [12].

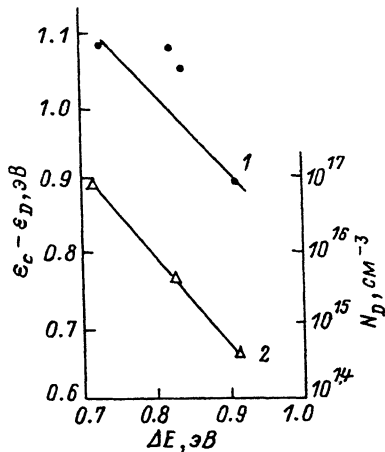


Рис. 1. Положение полосы оборванных связей (1) и их концентрация (2) в зависимости от положения уровня Ферми.

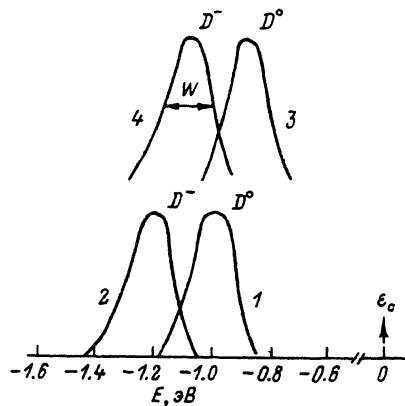


Рис. 2. Схематическое представление полосы оборванных связей в  $E_g$  (величина плотности состояний — в произвольных ед.).

1, 3 — собственный  $\alpha$ -Si:H, 2 —  $\alpha$ -Si:H(P), 4 — псевдолегированный  $\alpha$ -Si:H n-типа. 1, 2 — из [11].

Таким образом, экспериментальные данные относительно псевдолегированного  $\alpha$ -Si:H (P) и  $\alpha$ -Si:H (Li) позволяют заключить, что состояние оборванных связей (их концентрация, зарядовое состояние, расположение в  $E_g$ , полуширина полосы) зависит только от положения  $\epsilon_F$ . С другой стороны, определенное состояние оборванных связей как результат легирования или псевдолегирования ведет к данному положению  $\epsilon_F$ , которое в свою очередь определяет величины  $(\mu\tau)_n$  и  $(\mu\tau)_p$ , как это было показано ранее в [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Голикова О. А., Казанин М. М., Мездрогина М. М., Кудоярова В. Х., Сорокина К. Л., Бабаходжаев У. С. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 10. С. 1737—1740.
- [2] Голикова О. А., Домашевская З. П., Казанин М. М., Кудоярова В. Х., Мездрогина М. М., Сорокина К. Л., Терехов В. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 450—455.
- [3] Roca i Cabarrocas P., Liu J. Z., Park H. R., Murayama A., Wagner S. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 190—193.
- [4] Roca i Cabarrocas P., Morin P., Chu V., Conde J. D., Liu J. Z., Park H. R., Wagner S. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. N 9. P. 2942—2947.
- [5] Ле Комбер П., Спир У. Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982.
- [6] Street R. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. N 16. P. 1187—1190.
- [7] Pierz K., Fuhs W., Mell H. // J. Non-Cryst. Sol. 1989. V. 114. P. 651—653.
- [8] Pierz K., Stutzman V., Zollner S., Beyer W., Huber C. Abstracts of the ICAS 14. Garmishpartenkirchen, FRG. 1991. 284 p.
- [9] Голикова О. А., Бабаходжаев У. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 102—105.
- [10] Голикова О. А., Бабаходжаев У. С., Казанин М. М., Мездрогина М. М., Арлаускас К., Юшка Г. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 3. С. 551—553.
- [11] Kosca J., Vanecek M., Schauer F. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 715—717.
- [12] Smith Z., Wagner S. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 8. P. 688—692.