

## ЭФФЕКТ ПСЕВДОЛЕГИРОВАНИЯ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

Голикова О. А., Казанин М. М., Кудоярова В. Х.,  
Мездрогина М. М., Сорокина К. Л., Бабаходжаев У. С.

Получены пленки гидрированного аморфного кремния ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ) методом ВЧ разложения силаносодержащей газовой смеси в диодной и триодной системах. Показано, что варьирование температуры и скорости осаждения пленок, скорости прокачки газовой смеси, потенциала смещения на сетке (в триодной системе) приводит к изменениям элементов структурной сетки  $a\text{-Si} : \text{H}$  и соответственно функции плотности состояний и положения уровня Ферми в щели подвижности. Таким образом, без специального легирования удается смещать уровень Ферми в пределах  $|\epsilon_c - \epsilon_F| = 0.9 \div 0.3$  эВ.

В [1, 2] был установлен эффект псевдолегирования аморфного гидрированного кремния ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ): сдвиг уровня Ферми  $\epsilon_F$  в сторону края зоны проводимости  $\epsilon_c$  был достигнут без введения легирующей компоненты за счет увеличения температуры осаждения пленки  $T_S$  или уменьшения скорости прокачки  $r$  силаносодержащей газовой смеси в диодной системе ВЧ разложения. Уменьшение энергии активации электропроводности  $\Delta E$  с ростом  $T_S$  наблюдалось и ранее [3, 4], однако при этом оптическая ширина щели подвижности  $E_g$  либо не контролировалась [3], либо изменялась параллельно с  $\Delta E$  [4], поэтому сделать однозначный вывод о смещении именно  $\epsilon_F$  было нельзя. Систематическое же измерение  $\Delta E$  и  $E_g$  в [1, 2] позволило заключить, что эффект уменьшения  $\Delta E$  при варьировании  $T_S$  ( $r, v = \text{const}$ ;  $v$  — скорость осаждения пленки) или  $r$  ( $T_S, v = \text{const}$ ) вызван сдвигом  $\epsilon_F$ ; при этом электропроводность и фотопроводимость изменяются так же, как у  $a\text{-Si} : \text{H}$ , легированного фосфором.

Причину эффекта псевдолегирования следует искать в трансформации плотности локализованных состояний  $g(\epsilon)$  в щели подвижности, вызываемой некоторой перестройкой структурной сетки пленки под действием изменения условий осаждения — параметров  $T_S$  и  $r$  [2]. В данной работе был исследован другой метод воздействия на процесс осаждения пленки: процесс разложения осуществлялся в триодной системе [5].

В триодной системе ВЧ разложения сетка находится под потенциалом анода, на котором помещена подложка [5]. Поэтому условия осаждения пленки отличаются от условий осаждения в диодной системе, в частности, тем, что разряд в основном происходит в промежутке катод—сетка, и таким образом, исключается интенсивная бомбардировка растущей пленки заряженными частицами плазмы. Как и ранее [1, 2], использовалась смесь 25 %  $\text{SiH}_4 + 75$  %  $\text{He}$ .

Электронная микроскопия не обнаруживает у данных пленок выраженной микроструктуры: неоднородности размером  $\geq 50$  Å отсутствуют. Содержание оптически связанного водорода в пленках, по данным ИК спектроскопии, составляет 5—15 ат%, причем водород присутствует практически лишь в форме  $\text{Si}-\text{H}$ -комплексов. Полное содержание  $\text{H}$ , определенное методом обратного резерфордовского рассеяния, превышает предыдущую величину лишь на 1—2 ат%.

Следует отметить, что в отличие от [5] в ряде случаев к сетке прикладывалось положительное смещение. Это изменяло условия разряда и, как будет показано далее, дало дополнительную возможность управлять свойствами пленок  $a\text{-Si} : \text{H}$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $E_g$  и  $\Delta E$  от  $T_S$  для образцов, полученных в триодной системе. Для сравнения здесь же приведены данные из [1, 2]. Видно, что эффект псевдолегирования, заключающийся в сдвиге  $\epsilon_F$  в сторону  $\epsilon_c$  [1, 2], здесь не наблюдается, зато, как видно из рис. 1, у рассматриваемых пленок  $\alpha$ -Si : H  $\epsilon_F$  существенно сдвинуто по направлению к  $\epsilon_c$  (краю подвижности валентной зоны). Аналогичный, так называемый «собственный»  $\alpha$ -Si : H с  $(\epsilon_c - \epsilon_F)_{T=0} = E_g/2$  ранее получали в диодной системе при слабом легировании бором (при соотношении молекул диборана и силана в газовой смеси  $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$  [3]). Нам удалось получить такой же по свойствам материал, но без легирования бором. Таким образом, снова реализуется эффект псевдолегирования, но на этот раз  $\epsilon_F$  сдвигается в противоположную сторону — в направлении  $\epsilon_v$ . Какого рода трансформация структурной сетки может приводить к подобному перемещению  $\epsilon_F$ ?

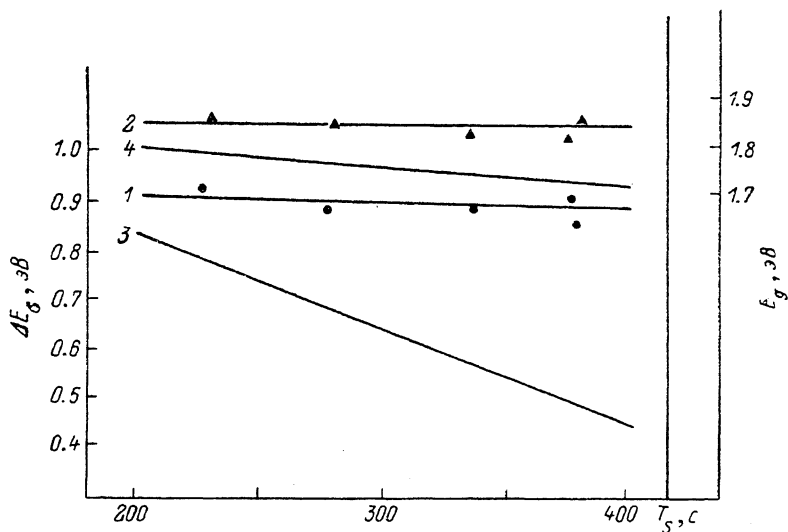


Рис. 1. Зависимости энергии активации электропроводности  $\Delta E$  (1, 3) и оптической ширины щели подвижности  $E_g$  (2, 4) от температуры осаждения  $T_S$  для пленок  $\alpha$ -Si : H, полученных в триодной (1, 2) и диодной системах (3, 4).

В [2] было показано, что сдвиг  $\epsilon_F$  в сторону  $\epsilon_c$  не связан с изменением ни концентрации оборванных Si—Si-связей, ни величины соотношения концентраций SiH<sub>2</sub>- и Si—H-комплексов ( $\gamma = \text{конц. SiH}_2 / \text{конц. SiH}$ ). Перемещение  $\epsilon_F$  относилось за счет перезарядки трехцентровых Si—H—Si-связей как дефектов с отрицательной корреляционной энергией. В пользу реализации трехцентровых связей трактовались данные метода обратного резерфордского рассеяния: полное содержание водорода превышало количество оптически связанного H на 2—5 ат%. При этом существенно то, что Si—H<sub>2</sub>-комплексы всегда присутствовали в пленках ( $\gamma \neq 0$ , [2]). В случае пленок, полученных в триодной системе, напротив,  $\gamma \simeq 0$ , поэтому можно полагать, что наличие SiH<sub>2</sub>-связей сопровождается образованием неких сопутствующих дефектов, действующих донорноподобным образом.

Предположения о том, что водород либо сам является донором, либо формирует электрически активные дефекты, например Si—H—Si-комплексы, неоднократно высказывались ранее [2, 6-8]. В нашем случае, учитывая то, что расхождение между полным содержанием H и его оптически связанной фракцией меньше, чем для пленок из [1, 2], логично развить идею влияния на положение  $\epsilon_F$  Si—H—Si-связей. Можно допустить, что при отсутствии комплексов и общей гомогенности структуры трехцентровые связи или совсем не образуются, или их воздействие минимально. При этом в условиях снижения плотности локализованных состояний в середине щели подвижности происходит перемещение  $\epsilon_F$  в точку  $E_g/2$ . Падение плотности состояний в центре щели

показано для исследуемых образцов методом емкостных измерений:  $g(\epsilon_F)$  составляет  $\sim 10^{15} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Правомерность рассмотрения перестройки структурной сетки Si при переходе от диодной системы к триодной с единых позиций подтверждается харак-

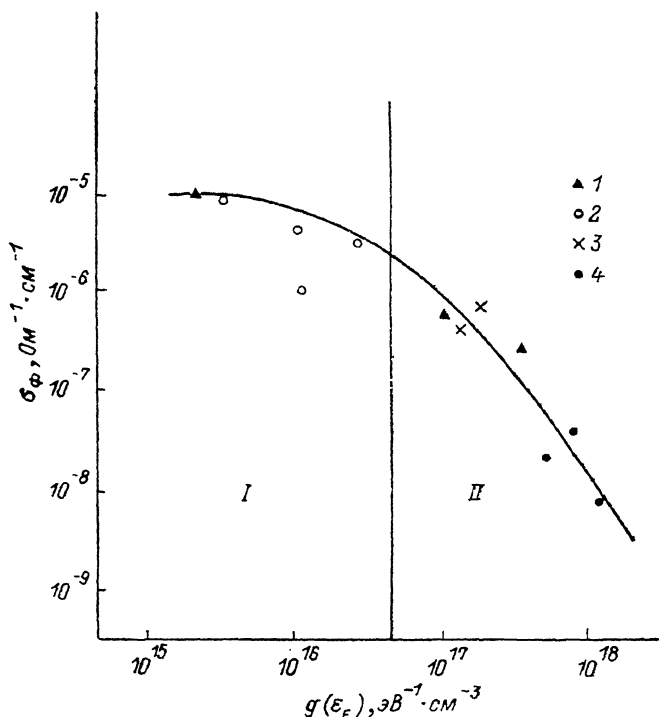


Рис. 2. Зависимость фотопроводимости от плотности состояний на уровне Ферми ( $T=300 \text{ К}$ ,  $\Phi=10^{15} \text{ ф/см}^2 \cdot \text{с}$ ,  $\lambda=625 \text{ нм}$ ) для образцов, полученных в триодной (область I) и диодной (область II) системах.

Методы определения  $g(\epsilon_F)$ : 1 — емкостный, 2 — переходных фототоков, 3 — ГППЗ, 4 — по формуле Мотта.

тером зависимости фотопроводимости от величины  $g(\epsilon_F)$  (рис. 2). Величина  $g(\epsilon_F)$  определялась методами токов, ограниченных пространственным зарядом, емкостных характеристик структур с барьерами Шоттки (Pt—*a*-Si : H), методом исследования переходных фототоков и встроенных электрических полей *p-i-n*-структур, а также по формуле Мотта (для пленок, облученных ионами Ar [2]). Видно, что точки, относящиеся к образцам, полученным в диодной (область II) и триодной (область I) системах, удовлетворительно ложатся на одну общую кривую, аналогичную приведенной в [9] зависимости  $\sigma_\phi$  от плотности неспа-

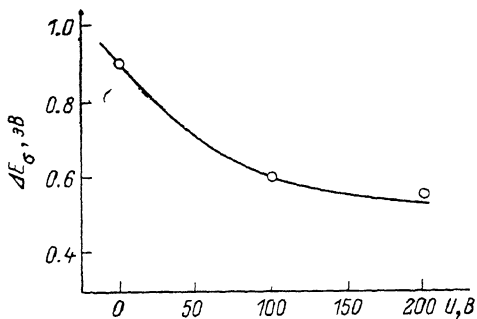


Рис. 3. Зависимость энергии активации электропроводности от приложенного к сетке потенциала смещения ( $E_g=1.85 \div 1.75 \text{ эВ}$ ).

ренных спинов. Этот факт можно в какой-то степени считать доказательством общности процессов, лежащих в основе перестройки структуры. Как следует из рис. 2, пленки *a*-Si : H, полученные в триодной системе, обладают максимальной фотопроводимостью:  $\sigma_\phi \approx 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при  $T=300 \text{ К}$  (поток  $10^{15} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ,  $\lambda=625 \text{ нм}$ ). Такая же величина  $\sigma_\phi$  зарегистрирована в [9] при концентрации оборванных Si—Si-связей  $\sim 10^{15} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ .

Дополнительный довод в пользу того, что одновременное присутствие в структурной сетке  $\text{SiH}$ - и  $\text{SiH}_2$ -комплексов приводит к сдвигу  $\epsilon_F$  в сторону  $\epsilon_c$ , дают данные рис. 3. Они относятся к пленкам  $a\text{-Si} : \text{H}$ , полученным в триодной системе, но при приложении к сетке положительного смещения. Эти пленки, имеющие выраженную микроструктуру и  $\gamma \neq 0$ , обнаруживают эффект псевдолегирования, аналогичный приведенному в [1, 2]. Для данного случая он также установлен впервые.

Таким образом, в настоящее время известны уже четыре способа достижения эффекта псевдолегирования  $a\text{-Si} : \text{H}$ , причем последних два — путем направленного электрического воздействия на условия разряда плазмы. Очевидно, что получение структур нелегированных слоев  $a\text{-Si} : \text{H}$ , по своим свойствам являющихся аналогами легированных  $n$ - и  $p$ -слоев, открывает новые возможности для создания приборов на основе этого материала. Одним из таких приборов уже сейчас может быть назван видикон с мишенью из  $a\text{-Si} : \text{H}$ , обладающий повышенным по сравнению с зарубежными аналогами током сигнала [10].

#### Список литературы

- [1] Мездрогина М. М., Голикова О. А., Кудоярова В. Х., Сорокина К. Л., Казанин М. М. // Тез. докл. VII конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, 1986. Т. 1. С. 177—178.
- [2] Голикова О. А., Домашевская Э. П., Казанин М. М., Кудоярова В. Х., Мездрогина М. М., Сорокина К. Л., Терехов В. А., Тростянский С. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 450—455.
- [3] Спир У., Ле Комбер Л. // Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. М., 1987. В. 1. С. 85—155.
- [4] Okamoto H., Nitta Y., Yamagushi T., Hamakawa Y. // Sol. Energy Mater. 1980. V. 2. P. 313—325.
- [5] Tanaka M., Ninomija K., Nakamura N., Tzuda S., Nakana S., Ohnishi M., Kuwana Y. // Japan. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 1. P. 14—19.
- [6] Фишер В. // Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродски. М., 1982. С. 201—237.
- [7] Terekhov V. A., Trostyanskiy S. N., Domashevskaya E. P., Golikova O. A., Mezdrogina M. M., Sorokina K. L., Kazanin M. M. // Phys. St. Sol. 1986. V. 138. N 2. P. 647—653.
- [8] Найтс Дж. // Физика гидрогенизированного аморфного кремния / Под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски. М., 1987. В. 1. С. 13—84.
- [9] Street R. A. // Phil. Mag. B. 1982. V. 46. N 3. P. 273—278.
- [10] Голикова О. А., Мездрогина М. М., Петров И. Н., Казанин М. М., Сорокина К. Л. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 4. С. 85—87.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 11.05.1989  
Принята к печати 18.05.1989