

Таким образом, даже задание относительно невысокой точности определения  $\xi^{(m)}$  и последующее применение метода «уменьшения невязки» позволяет получить решение задачи с высокой точностью, сделав сравнительно небольшое число итераций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Prosser R. T. // J. Math. Phys. 1976. 17, N 10. P. 1775—1779. [2] Бу-  
ров В. А., Горюнов А. А., Сасковец А. В. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ.-  
Астрон. 1982. 23, № 6. С. 87—89. [3] Байков С. В., Буров В. А., Горю-  
нов А. А., Сасковец А. В. // Там же. С. 22—25.

Поступила в редакцию  
06.08.86

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 2

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

### ЭФФЕКТ СТЕБЛЕРА — ВРОНСКОГО В ПЛЕНКАХ $a\text{-Si:H}$ , ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ В И Р

И. А. Курова, И. П. Акимченко, К. Б. Читая

(кафедра физики полупроводников)

Эффект Стеблера—Вронского (ЭСВ) — уменьшение проводимости после освещения белым светом — был обнаружен в нелегированных пленках  $a\text{-Si:H}$  [1]. Впоследствии этот эффект исследовался на пленках с различной энергией активации темновой проводимости  $E_a$ , т. е. с различным расположением уровня Ферми  $F_0$  в запрещенной зоне. Было найдено [2], что в зависимости от  $E_a$  проводимость может оставаться практически неизменной, уменьшаться или увеличиваться. Это связывалось с образованием фотоиндуцированных состояний донорного и акцепторного типа, расположенных соответственно ниже и выше середины запрещенной зоны. В [3] также предполагалось возникновение двух типов фотоиндуцированных центров донорного и акцепторного типа. ЭСВ наблюдался также в пленках  $a\text{-Si:H}$ , легированных из газовой фазы [4]. Исследования методом ЭПР [5] показали, что после облучения белым светом пленок  $a\text{-Si:H}$  при комнатной температуре образуется дополнительная концентрация нейтральных оборванных связей (до  $10^{17}$  см $^{-3}$ ).

В работе [6] для объяснения ЭСВ в нелегированных пленках  $a\text{-Si:H}$  мы предположили, что после облучения белым светом образуются нейтральные оборванные связи, которые в зависимости от положения  $F_0$  действуют как доноры или как акцепторы, сдвигая  $F_0$  соответственно вверх или вниз по запрещенной зоне.

В настоящей работе мы исследовали ЭСВ в пленках  $a\text{-Si:H}$  с имплантированными ионами Р и В. Характеристики пленок представлены в таблице ( $N_B$  и  $N_P$  — полные концентрации имплантированных примесей).

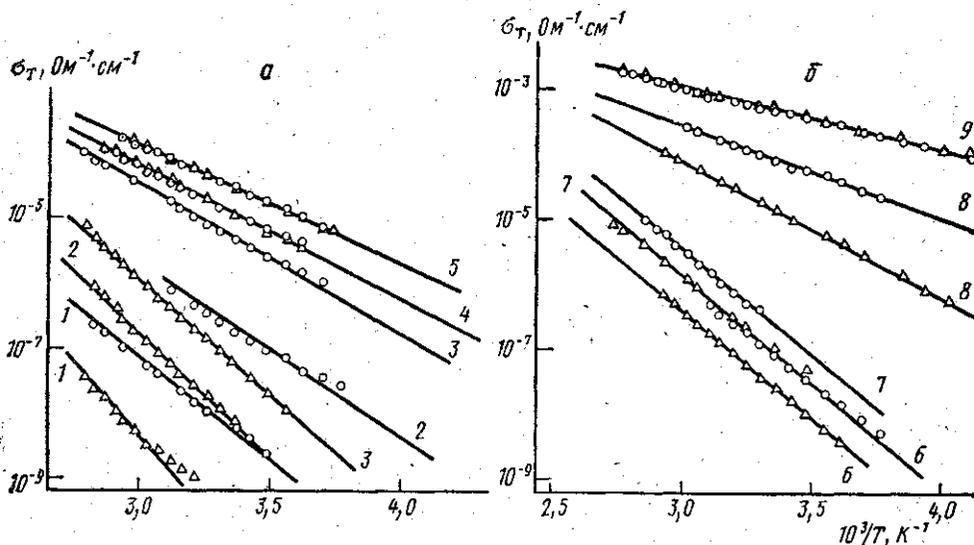
Согласно нашим оценкам, совпадающим с данными работы [7], коэффициент эффективности легирования, т. е. отношение концентрации электрически активных атомов примеси к полной концентрации введенной примеси, для бора составляет 1/200, для фосфора 1/500. Следовательно, концентрации электрически активных примесей изменяются от  $2,5 \cdot 10^{16}$  до  $2,5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  в пленках с бором и от  $1 \cdot 10^{16}$  до  $1 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  в пленках с фосфором.

На рисунке показаны температурные зависимости темновой проводимости  $\sigma_T$  после отжига пленки при 170°С и после облучения светом от лампы накаливания в течение 30 мин (интенсивность освещения 2 Вт/см $^2$ ). Видно, что при полной концентрации имплантированных атомов бора ( $N_B$ ) и фосфора ( $N_P$ ), не превышающей  $5 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ , наблюдается ЭСВ:  $\sigma_T$  и ее энергия активации  $E_a$  после освещения изменяются. Значения  $E_a$  после отжига,  $E_a'$  после освещения и  $\Delta F_0$  — разница этих значений — приведены в таблице.

В результате освещения в пленках образуются нейтральные оборванные связи — состояние  $D^0$ . Нейтральные оборванные связи могут отдать или принять электрон, образуя состояния  $D^+$  или  $D^-$ . Локализованные состояния  $D^0$  расположены в нижней половине запрещенной зоны, а состояния  $D^-$  — в верхней. Поэтому в зависимости от положения  $F_0$  по отношению к  $D^0$  и  $D^-$  фотоиндуцированные оборванные связи могут перезаряжаться.

В пленках  $r$ -типа с бором уровень  $F_0$  находится в нижней половине запрещенной зоны, и если  $F_0$  лежит ниже хотя бы части фотоиндуцированных состояний  $D^0$ ,

то последние отдают электрон и  $F_0$  движется вверх,  $E_a$  увеличивается и проводимость падает — наблюдается ЭСВ. Для пленок  $p$ -типа с бором (1, 2, 3) установлено, что  $F_0$  движется в области энергий от  $E_v+0,47$  эВ до  $E_v+0,85$  эВ. Для пленки 1 значение  $E_a=0,85$  эВ может соответствовать разности  $E_c-F_0$ , так как проводимость может быть электронной. Но в этой пленке  $E_c-0,85=E_v+0,85$  эВ, так как значение



Температурные зависимости темновой проводимости образцов  $a$ -Si:H, имплантированных ионами бора (а) и фосфора (б) (кружочки — после отжига, треугольники — после освещения). Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице

$E_c-E_v=1,7$  эВ. В таблице приведены значения  $E_g=E_c-E_v$ , определенные экстраполяцией к нулю зависимости от  $\ln \omega$  величины  $(\alpha \hbar \omega)^{1/2}$ .

По смещению  $F_0$  и плотности состояний  $N(E)$  в области смещения  $F_0$  возможно оценить  $D^+$  — концентрацию оборванных связей, отдавших электрон:  $D^+=N_{F_0+\Delta F_0}$

$$= \int_{F_0}^{F_0+\Delta F_0} N(E)dE.$$
 В указанной области смещения  $F_0$  в пленках 1, 2, 3  $N(E) \approx \text{const}$  и повышается при увеличении  $N_V$  [8]. Принимая для пленок 1, 2, 3 соответственно  $N(E)=2 \cdot 10^{17}$ ;  $4 \cdot 10^{17}$  и  $6 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-1}$  и  $\Delta F_0=0,24$ ;  $0,27$  и  $0,24$  эВ, для  $D^+=N(E)\Delta F_0$  получаем значения  $0,5 \cdot 10^{17}$ ;  $1,1 \cdot 10^{17}$  и  $1,6 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ .

Номер образца	$N_V, \text{см}^{-3}$	$N_p, \text{см}^{-3}$	$E_a, \text{эВ}$	$E_{a'}, \text{эВ}$	$\Delta F_0 = E_a' - E_a, \text{эВ}$	$E_g, \text{эВ}$
1	$5 \cdot 10^{16}$	—	0,60	0,84	0,24	1,70
2	$1 \cdot 10^{19}$	—	0,51	0,78	0,27	1,68
3	$5 \cdot 10^{19}$	—	0,47	0,71	0,24	1,68
4	$2 \cdot 10^{20}$	—	0,41	0,41	—	1,65
5	$5 \cdot 10^{20}$	—	0,36	0,36	—	1,64
6	—	$5 \cdot 10^{18}$	0,63	0,65	0,02	1,70
7	—	$1 \cdot 10^{19}$	0,63	0,65	0,02	1,67
8	—	$5 \cdot 10^{19}$	0,28	0,40	0,12	1,65
9	—	$5 \cdot 10^{20}$	0,21	0,21	—	1,65

По максимальным значениям  $E_a$  после отжига можно определить положение  $D^0$  в запрещенной зоне: верхняя граница состояний лежит не ниже 0,85 эВ.

Для пленок 4 и 5 мы не наблюдали ЭСВ:  $\sigma_T$  и  $E_a$  оставались практически неизменными после освещения. Это может быть обусловлено рядом причин и требует отдельного исследования. Мало вероятно, что не образуются фотоиндуцированные состояния, поэтому можно предположить, что в таких пленках велик вклад прыжковой проводимости и могут быть значительными крупномасштабные флуктуации потенциа-

ла: В [9] также наблюдалось полное подавление ЭСВ в пленках с имплантированными ионами Ga и As при полной концентрации  $\approx 10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

В пленках *n*-типа уровень  $F_0$  расположен в верхней половине запрещенной зоны. В зависимости от его положения относительно состояний  $D^-$  некоторая часть фотиндуцированных оборванных связей  $D^0$  захватывает электрон с других донороподобных состояний и наблюдается ЭСВ:  $F_0$  движется вниз,  $E_a$  увеличивается и  $\sigma_T$  уменьшается.

В пленке 9 с большой концентрацией фосфора, как и для пленок 4 и 5, мы не наблюдали ЭСВ. Это может быть обусловлено, в частности, упомянутыми выше особенностями сильно легированных пленок *a*-Si:H. Однако и в пленках 6, 7 и 8 изменение  $F_0$  мало по сравнению с пленками 1, 2, 3. При этом, согласно [10, 11], уровень  $F_0$  в пленках 6, 7 расположен вблизи максимума плотности состояния  $D^-$ , а в пленке 8 выше его. При условии образования одинаковой концентрации фотиндуцированных состояний  $D^0$  в пленках *n*- и *p*-типа с одинаковой концентрацией  $N_p$  и  $N_n$  перезарядка  $D^0$  была бы значительной и величина  $\Delta F_0$  большой. Наблюдаемая малая величина  $\Delta F_0$  в пленках *n*-типа может быть связана с меньшей концентрацией фотиндуцированных оборванных связей  $D^0$  в пленках *n*-типа с имплантированным фосфором. Это уменьшение  $D^0$  в свою очередь может быть обусловлено меньшей концентрацией электрически активных атомов фосфора при одной и той же полной концентрации имплантированных примесей.

Авторы выражают благодарность В. Д. Дравину за имплантирование примесей в пленки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Staebler D. L., Wronski C. R.//Appl. Phys. Lett. 1977. 31. P. 292—294.
- [2] Taniellian M. H., Goodman N. B., Fritzsche H.//J. de Phys. Suppl. 1981. 42, N 10. P. C-4-375—C-4-378. [3] Vanier P. E.//Appl. Phys. Lett. 1982. 41. P. 986—988.
- [4] Irsigler P., Wagner D., Dunstan D. J.//J. Phys. C: Solid State Phys. 1983. 16. P. 6605—6613. [5] Morigaki K., Sano Y., Hirabayashi J.//J. Phys. Soc. Jap. 1982. 51. P. 147—152. [6] Курова И. А., Ормонт Н. Н., Подругина В. Д.//Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физ. Астрон. 1985. 26, № 5. С. 86—88.
- [7] Le Comber P. G., Spear W. E.//J. Non-Cryst. Sol. 1980. 35/36. P. 327—339.
- [8] Lang D. V., Cohen J. D., Harbison J. P.//Phys. Rev. 1982. B25. P. 5285—5320. [9] Акимченко И. П. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1981. 33, № 9. С. 448—451.
- [10] Tanaka K., Okushi H.//J. Non-Cryst. Sol. 1984. 66. P. 205—216.
- [11] Dersch H., Stuke J., Beichler J.//Phys. Stat. Sol. (b), 1981. 105. P. 265—274.

Поступила в редакцию  
29.12.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1987. Т. 28, № 2

УДК 621.315.592;541

### РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА НА ПОВЕРХНОСТЬ ГЕРМАНИЯ

А. В. Зотеев, В. Ф. Киселев

(кафедра общей физики для химического факультета)

Подавляющее число работ по десорбции, стимулированной ИК излучением лазеров, относится к случаю физической адсорбции молекул, имеющих резонансные с излучением колебательные моды (см. [1, 2]). В основном изучалась область полимолекулярной адсорбции, когда число адсорбционных слоев колебалось от 1—3 до  $10^3$ . Для максимально возможного снижения нагрева твердого тела в результате поглощения радиации использовались хорошо пропускающие диэлектрики (NaCl, KCl) или отражающие радиацию металлы (Ag, Cu). Даже в этой оптимальной ситуации вопрос о вкладе в резонансную десорбцию чисто термической десорбции является предметом оживленной дискуссии [1—3]. В таких системах преобладающим каналом диссипации энергии возбужденных молекул является передача ее соседним молекулам (канал *M*).

Нас интересовал противоположный случай — стимулированная СО<sub>2</sub>-лазером десорбция изолированных молекул с поверхности полупроводника, когда канал *M* выключен и эффективна передача энергии возбуждения в твердое тело. В качестве «резонансных» молекул мы выбрали молекулы СО<sub>2</sub> в качестве полупроводника — монокристаллы германия ( $\rho \approx 20$  Ом·см). Исследовались образцы с реальной поверхностью (Ge<sub>p</sub>) и термически окисленные (Ge<sub>o</sub>). Толщина оксидных слоев GeO<sub>2</sub> на них