

где  $N_i$  — концентрация скоплений, содержащих  $i$  атомов и имеющих в темноте заряд  $Z=iQ$ ;  $f_z, f_{z-Q}, f_{z+Q}$  — доли объема, занимаемые ОПЗ скоплений с зарядами  $Z, Z-Q$  и  $Z+Q$ . На рис. 2 представлена полученная таким способом функция распределения скоплений по числу содержащихся в них атомов меди.

Оказалось, что вероятность нахождения скоплений с  $i \leq 5$  соответствует среднестатистической вероятности попадания соответствующего числа атомов меди в объем  $5 \cdot 10^{-18}$  см<sup>3</sup>, что близко к  $\lambda^3$ . Таким образом, возникновение скоплений не связано с какими-либо особенностями материала. Скоплений с  $i > 5$  наблюдается значительно больше, чем следовало бы ожидать из теории вероятности. Так, концентрация скоплений с  $i=10-15$ , которых не должно было бы быть больше, чем  $10^4-10^7$  см<sup>-3</sup>, достигает  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Их появление можно связать с наличием особенностей структуры или областей упругих напряжений. Однако концентрация таких крупных скоплений относительно низка, она находится в пределах  $10^{11}-10^{12}$  см<sup>-3</sup> на фоне общей концентрации меди  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

#### Список литературы

- [1] Витовский Н. А. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 882—885.
- [2] Пекар С. И. // ФТТ. 1966 Т. 8. В. 4. С. 1115—1121.
- [3] Vinetskii V. L., Kukhtarev N. V. // Sol. St. Commun. 1973. V. 13. N 1. P. 31—33.
- [4] Шпиар Л. И., Ясковец И. И. // Радиационные эффекты в твердых телах. Киев, 1977. С. 139—149.
- [5] Баграев Н. Т., Витовский Н. А., Власенко Л. С., Машовец Т. В., Рахимов О. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 11. С. 1979—1984.
- [6] Витовский Н. А., Лагунова Т. С., Рахимов О. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1624—1628.
- [7] Витовский Н. А., Лагунова Т. С., Машовец Т. В., Рахимов О. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 9. С. 1593—1596.
- [8] Weisberg L. R. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. N 5. P. 1817—1821.
- [9] Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М., 1974. 464 с.
- [10] Дахно А. Н., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Шик А. Я. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 6. С. 1110—1114.

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

Получено 9.01.1989  
Принято к печати 17.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

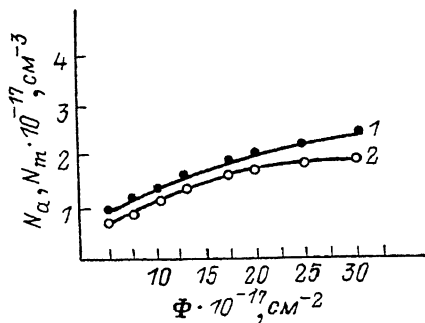
## ЭФФЕКТИВНОСТЬ АННИГИЛЯЦИИ КОМПОНЕНТОВ ПАР ФРЕНКЕЛЯ НА АТОМАХ КИСЛОРОДА В Si

Шаховцов В. И., Ясковец И. И.

Одним из дискуссионных вопросов радиационной физики полупроводников является интенсивность не прямой аннигиляции первичных радиационных дефектов (вакансий  $V$  и межузельных атомов  $I$ ) на примесных атомах. Наиболее часто обсуждается не прямая аннигиляция  $V$  и  $I$  в Si на атомах кислорода (см., например, [1]). В [2, 3] представлены аргументы в пользу того, что в кристаллах Si центрами не прямой аннигиляции являются атомы Ge. Несмотря на популярность впервые высказанной в [4] идеи о центрах не прямой аннигиляции, количественной оценки ее относительной интенсивности нет.

В настоящей работе проводится количественный анализ скорости аннигиляции  $V$  и  $I$  на атомах кислорода в Si. Приведена оценка концентрации образующихся при облучении комплексов  $VO$  ( $A$ -центров), начиная с которой вероятность захвата ими  $I$  сравнима с вероятностью захвата  $I$  всеми другими стоками, в том числе и неконтролируемыми. Предполагается, как это общепринято [1], что каждый захват  $I$   $A$ -центром сопровождается аннигиляцией  $I$  и  $V$ , связанной с высвобождением  $O$ .

Для анализа взята работа [5], в которой представлены результаты исследования дефектообразования в  $p$ -Si с примесью олова ( $N_{\text{Sn}}^0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) при облучении электронами с энергией 2.5 МэВ. Для анализа удобно взять именно эти результаты, поскольку в [5] хорошо исследована кинетика накопления  $A$ -центров и комплексов Sn V, причем авторами [5] было показано, что атомы олова являются эффективными центрами захвата вакансий, но не аннигиляции V и I. Там же указана погрешность измерений. Исходные концентрации атомов кислорода и атомов углерода в исследованных образцах были равны соответственно  $N_{\text{O}}^0 = 1.22 \cdot 10^{18}$  и  $N_{\text{C}} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . На рисунке приведены концентрации  $A$ -центров



Дозовые зависимости концентрации радиационных дефектов в  $p$ -Si <Sn>.

1 —  $N_a$ , 2 —  $N_m$ .

тров ( $N_a$ ) и комплексов атом олова + вакансия ( $N_m$ ) в зависимости от дозы облучения.

Обозначив скорость образования V и I при действии облучения посредством  $\lambda$ , запишем систему кинетических уравнений, описывающих изменение со временем концентрации  $A$ -центров, комплексов (Sn V) —  $N_m$ , вакансий  $N_V$  и собственных межузельных атомов  $N_i$ :

$\Phi \cdot 10^{-17}, \text{ см}^{-2}$	$N_a \cdot 10^{-17}, \text{ см}^{-3}$
2.5	0.82
5	1.08
10	1.29
12.5	1.5
17.5	1.86
20	2
25	2.24
30.7	2.53

$$\frac{dN_a}{dt} = \alpha_{OV}(N_{\text{O}}^0 - N_a)N_V - \alpha_{ai}N_aN_i,$$

$$\frac{dN_m}{dt} = \alpha_{SnV}N_V(N_{\text{Sn}}^0 - N_m), \quad \frac{dN_i}{dt} = \lambda - \alpha_{ai}N_aN_i - \frac{N_i}{\tau_i}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_V}{dt} = \lambda - \alpha_{OV}N_V(N_{\text{O}}^0 - N_a) - \alpha_{SnV}N_V(N_{\text{Sn}}^0 - N_m),$$

где  $\alpha_{ij}$  — вероятности реакций между дефектами  $i$  и  $j$ , а  $\tau_i$  — время жизни межузельных атомов  $I$  по отношению к захвату их стоками. Здесь не учитывается образование дивакансий, поскольку, как это следует из результатов работы [5], их концентрация значительно меньше концентраций  $N_a$  и  $N_m$ . Из приведенных данных также следует, что при всех использованных дозах  $N_a \ll N_{\text{O}}^0$ . Последнее обстоятельство существенно упрощает рассмотрение системы (1).

В квазистационарном приближении ( $dN_V/dt = dN_i/dt = 0$ ) из системы (1) трудно получить при малых дозах ( $N_m \ll N_{\text{Sn}}^0$ )

$$N_a \approx \frac{\alpha_{OV}N_{\text{O}}^0}{\alpha_{SnV}N_{\text{Sn}}^0} \frac{\lambda t}{1 + \alpha_{OV}N_{\text{O}}^0/\alpha_{SnV}N_{\text{Sn}}^0} \quad (2)$$

и при больших дозах ( $N_{\text{Sn}}^0 \ll N_{\text{Sn}}^0$ )

$$N_a [1 + 1/2\tau_i\alpha_{ai}N_a] = \lambda t. \quad (3)$$

В таблице для удобства приведены значения концентрации  $N_a$  при соответствующих дозах облучения  $\Phi$ . Из нее следует, что начиная с дозы  $\Phi \approx \Phi^* = 12.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  с высокой степенью точности выполняется закон

$$N_a \sim \sqrt{\Phi},$$

чему соответствует, согласно (3), условие

$$1/2\tau_i\alpha_{ai}N_a \gg 1. \quad (4)$$

Таким образом, захват собственных междузельных атомов А-центрами становится существенным при  $N_a$ , соответствующей  $\Phi^*$ , т. е. при  $N_a \geq N_a^* \approx 1.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При  $N_a = N_a^*$  из условия (4) находим

$$1/\tau_i \alpha_i \leq 7.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}. \quad (5)$$

Если для оценок принять, что скорость захвата междузельных атомов I как А-центрами, так и другими стоками лимитируется диффузией,  $1/\tau_i = 4\pi D_i r_1 N_F$ , а  $\alpha_{ai} = 4\pi D_i r_2$ , где  $r_1$  и  $r_2$  — соответствующие радиусы захвата,  $D_i$  — коэффициент диффузии I,  $N_F$  — концентрация стоков для I, то из (5) получим

$$N_F \leq \frac{r_2}{r_1} 7.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Поскольку, по-видимому,  $r_1 \approx r_2$ , полученная оценка сверху указывает на то, что возможными стоками, определяющими  $\tau_i$ , являются атомы углерода, концентрация которых  $N_C \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . При этом зависимость  $N_a \sim \sqrt{\Phi}$  будет выполняться уже достаточно хорошо, с точностью не хуже 30 %.

Полученные результаты позволяют также провести оценку эффективности введения V и I в анализируемом эксперименте. При  $\Phi \geq \Phi^*$  имеем  $N_a^2 = 2\lambda t / \tau_i \alpha_{ai}$ . Учитывая, что  $\lambda = \Sigma N_{Si} J$ , где  $\Sigma$  — сечение образования дефектов,  $N_{Si}$  — концентрация атомов Si, а  $J$  — интенсивность потока электронов, и используя найденное значение  $\tau_i \alpha_{ai}$ , нетрудно получить, что скорость введения дефектов при данном виде облучения  $\Sigma N_{Si} \geq 0.12 \text{ см}^{-1}$ . С другой стороны, если атомы углерода действительно являются преобладающими стоками для I, то можно получить, что  $\Sigma N_{Si} \leq 0.18 \text{ см}^{-1}$ . Эти границы для скорости введения первичных дефектов, участвующих в образовании вторичных дефектов, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [6].

#### Список литературы

- [1] Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979. 332 с.
- [2] Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К., Хируненко Л. И., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562—565.
- [3] Атабаев И. Г., Саидов М. С., Шаховцов В. И., Хируненко Л. И., Шинкаренко В. К., Шпинар Л. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 570—573.
- [4] Смирнов Л. С. // Дефекты структуры в полупроводниках. Новосибирск, 1973. С. 201—207.
- [5] Неймаш В. Б., Соснин М. Г., Туровский Б. М., Шаховцов В. И., Шиндяч В. Л. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 5. С. 901—903.
- [6] Kimerling L. C. // Inst. Phys. Conf. Ser. N 31. 1977. Ch 2. P. 221—230.

Институт физики АН УССР  
Киев

Получено 7.06.1988  
Принято к печати 24.01.1989

ФТП, том 23, вып. 5, 1989

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПРОВОДИМОСТИ И ЕМКОСТИ В КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУРАХ

Галаев А. А., Выговская Е. А., Малинкович М. Д.

Осцилляции продольной проводимости в зависимости от напряжения на затворе наблюдались в ряде работ [1—5]. Было показано, что положение экстремумов не зависит от температуры, магнитного поля, смещения подложки. Амплитуда осцилляций растет с уменьшением длины канала, понижением температуры. Характер осцилляций не остается постоянным при смене номера образца или выборе другой группы контактов к каналу на исследуемом образце. Выска-