

ВЛИЯНИЕ КОВАЛЕНТНОГО РАДИУСА ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ  
НА СКОРОСТЬ ВВЕДЕНИЯ А- и Е-ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ n-ТИПА

В. С. Вавилов, Е. Н. Мухомов, А. В. Спичин

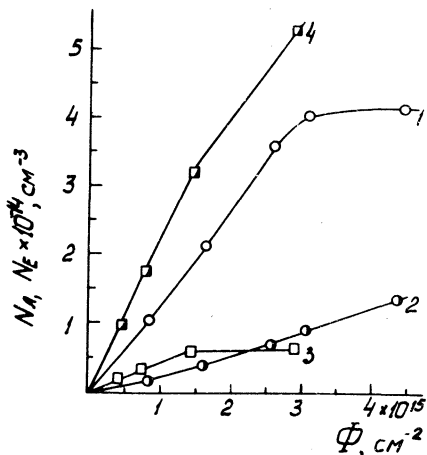
Исследования природы радиационных нарушений в полупроводниках показали, какую важную роль играют взаимодействия простейших дефектов с примесями и другими несовершенствами решетки. Подобные взаимодействия приводят к образованию А-центров (комплексов вакансии + атом кислорода) и Е-центров (комплексов вакансии + атом донорной примеси) в кремнии n-типа /1/. При этом важной характеристикой процесса образования комплексов является сечение захвата примесным атомом вакансии, т.е. сечение образования А-центров,  $\sigma_A$  и Е-центров,  $\sigma_E$ . Если не происходит заметного отжига комплексов, то, как следует из элементарных соображений (см., например, /2/),

$$\sigma_E/\sigma_A = \eta_E N_O / \eta_A N_D, \quad (I)$$

где  $\eta_A, \eta_E$  - дифференциальная скорость введения А- и Е-центров, а  $N_O$  и  $N_D$  - концентрации кислорода и донорной примеси. Это соотношение справедливо для начальных стадий облучения, когда концентрации А- и Е-центров малы по сравнению с концентрациями соответствующих примесей.

В данной работе исследуется влияние различных донорных примесей на скорость введения А- и Е-центров в кремнии. В работе использовались монокристаллы кремния, выращенные в кварцевых тиглях, легированные фосфором ( $5,75 \cdot 10^{15}$  P/cm<sup>3</sup> и  $6,60 \cdot 10^{15}$  P/cm<sup>3</sup>), мышьяком ( $1,60 \cdot 10^{15}$  As/cm<sup>3</sup>) и сурьмой ( $2 \cdot 10^{15}$  Sb/cm<sup>3</sup>), со средним содержанием кислорода  $(5 \pm 2) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (по оптическим измерениям) и монокристаллы, полученные методом бестигельной зонной плавки и легированные фосфором ( $5,50 \cdot 10^{14}$  P/cm<sup>3</sup>), с содержанием растворенного кислорода меньше  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Образцы облучались при 78°К на линейном ускорителе различными дозами электронов с энергией 1,5 Мэв. После каждого облучения кристаллы выдерживались в течение 10 мин при 380°К, чтобы

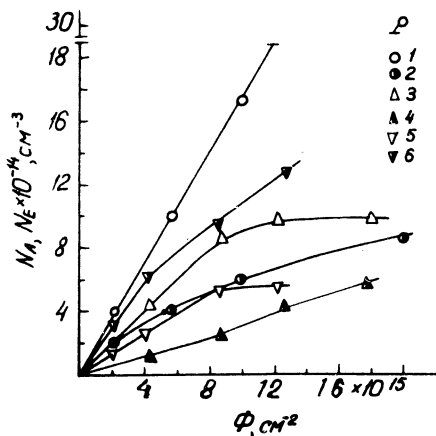


Р и с. 1. Зависимость концентраций А- и Е-центров от дозы облучения для образцов кремния с различным содержанием кислорода и легированных фосфором ( $\sim 5,6 \cdot 10^{14}$  р/см<sup>3</sup>). Кривые 1 и 2 — А- и Е-центры для тигельного кремния; 3 и 4 — для зонного кремния.

избегать возможного неконтролируемого отжига радиационных дефектов во время последующих измерений. Надо отметить, что отжиг вторичных дефектов (комплексов) в кремнии д-типа происходит при температурах выше 400°К /3/. Данные о концентрации дефектов и об энергетическом положении соответствующих им уровней в запрещенной зоне кремния получались из измерений эффекта Холла и электропроводности в диапазоне температур 78 + 380°К. При обработке экспериментальных данных использовались значения холловского фактора, приведенные в работе /4/.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости концентрации А- и Е-центров от интегральной дозы облучения. Для всех исследованных образцов концентрация А-центров вначале увеличивалась и затем достигала насыщения, а концентрация Е-центров монотонно возрастала с увеличением дозы. По начальным участкам кривых были определены

усредненные значения скоростей введения А- и Е-центров для пяти образцов из каждой серии. Для образцов кремния, выращенных в кварцевых тиглях, была отмечена интересная особенность. С увеличением ковалентного радиуса легирующей примеси скорость введения комп-

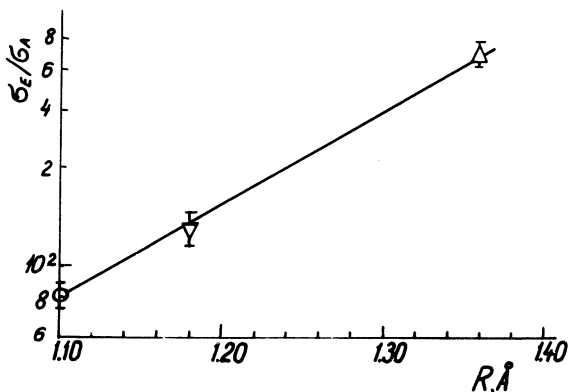


Р и с. 2. Зависимость концентраций А- и Е-центров от дозы облучения для кремния, выращенного в кварцевых тиглях. 1, 2 - А- и Е-центры в Si +  $6,6 \cdot 10^{15}$  P/cm<sup>3</sup>; 3, 4 - А- и Е-центры в Si +  $1,6 \cdot 10^{15}$  As/cm<sup>3</sup>; 5, 6 - А- и Е-центры в Si +  $2,1 \cdot 10^{15}$  Sb/cm<sup>3</sup>.

лексов вакансии - донорная примесь возрастала (рис. 2); при этом для кристаллов, легированных сурьмой, скорость введения Е-центров была значительно выше скорости введения А-центров. Зависимость отношения сечений образования Е- и А-центров от ковалентного радиуса донорной примеси, полученная из соотношения (1), показана на рис. 3.

В условиях нашего эксперимента образованные при облучении вакансии имеют заряд  $-2/5$ . Таким образом, между вакансиями и атомами донорной примеси существует кулоновское взаимодействие, благоприятствующее образованию Е-центров. При образовании А-центров подобного взаимодействия нет; соответственно, отношение сечений  $\sigma_E/\sigma_A$  должно быть велико, как это и видно из рис. 3. С другой стороны, обнаруженная нами зависимость сечения образования Е-центров от ковалентного радиуса донорной примеси является

довольно неожиданным экспериментальным фактом. Действительно, можно было думать, что сечение захвата донорной примесью вакансии целиком определяется кулоновским взаимодействием, а различия в радиусах атомов примеси не играют роли. Однако это не



Р и с. 3. Зависимость отношения течений образования E-центров к сечению образования A-центров от ковалентного радиуса донорной примеси.  $\Phi$  - кремний, легированный фосфором ( $5,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $6,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ );  $\Psi$  - кремний, легированный мышьяком ( $1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ );  $\Delta$  - кремний, легированный сурьмой ( $2,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ).

так. По-видимому, искажение решетки, окружающее атом примеси, каким-то образом влияет на глубину потенциальной ямы для кулоновского притяжения (например, через изменение эффективной диэлектрической постоянной).

Поступила в редакцию  
5 июня 1972 г.

### Л и т е р а т у р а

1. В. С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники, ФИЗМАТГИЗ, 1963 г.
2. В. Л. Винецкий и др. ФТП, **2**, 1236 (1968).

3. H. Stein, F. Vook. *Phys. Rev.*, 163, 790 (1967).
4. J. Messier, J. Merlo Flores. *J. Phys. Chem. Solids*, 24, 1539 (1963).
5. G. Watkins. *Radiation Effects on Semiconductor Components* (Toulouse, 1967), vol. 1, paper A1.