

РОЛЬ ПРИМЕСЕЙ III И V ГРУПП В ПРОЦЕССАХ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ γ -ОБЛУЧЕНИИ ГЕРМАНИЯ

*Е. М. Гершензон, Г. Н. Гольцман, В. В. Емцев, Т. В. Машовец,
Н. Г. Птицына, С. М. Рыскин*

В ранних работах по изучению действия ядерных излучений на полупроводники [1] предполагалось, что процесс образования дефектов сводится к возникновению пар Френкеля или дефектов по Шоттки. Недавние исследования ЭПР в кремнии, облученном электронами при комнатной температуре, показали, что изменение параметров материала обусловлено не появлением свободных вакансий или межузельных атомов, а образованием комплексов вакансий с примесями. Изучены, в частности, комплексы вакансия-донор V группы VD [2, 3] и вакансия-акцептор III группы VA [4]. Соответствующие данные для германия в настоящее время отсутствуют.

Целью настоящей работы было выяснение роли примесей III и V групп в процессах образования дефектов в германии, причем в качестве основных исследуемых параметров были выбраны концентрации донорных состояний атомов V группы N_D^V и акцепторных состояний атомов III группы N_A^{III} . Для раздельного определения этих величин [5, 6] проводились измерения температурных зависимостей коэффициента Холла R в интервале температур 4,2 – 300° К и фотопроводимости в субмиллиметровой области спектра [7] при 7° К. Из зависимостей $R(T)$, кроме того, могли быть найдены [8, 9] концентрации отдельных акцепторных уровней радиационного происхождения и их сумма $N_{\text{рад}}^A$. Холловские измерения позволяют судить о величине N_D^V лишь в материале n -типа (до n - p -конверсии). Важно, однако, иметь информацию об этой концентрации во всем интервале доз облучения. Такие данные для образцов в предельном состоянии (p -тип, не изменяющийся при сколь угодно большом увеличении дозы Φ облучения) были получены при исследовании спектра фотопроводимости в субмиллиметровом диапазоне волн. В этом диапазоне лежат линии переходов между возбужденными состояниями мелких примесей, причем при достигнутой разрешающей способности прибора [7] спектры возбужденных состояний доноров V группы и акцепторов III группы легко идентифицируются. Интенсивность спектральных линий для доноров и акцепторов определялась в условиях полной нейтрализации их межзонным возбуждением. В этих условиях интенсивность линий пропорциональна числу примесных состояний.

Исследовались образцы Ge, легированного P, As, Sb и Bi¹⁾ с различными концентрациями ($5 \cdot 10^{13}$ – $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³) каждой из при-

¹⁾ Для германия, легированного фосфором, результаты холловских измерений опубликованы ранее [8].

месяц, облученные при комнатной температуре γ -лучами ^{60}Co (мощность потока $1 \cdot 10^{12}$ квант/см² сек). Типичные результаты измерений приведены в таблице.

Видно, что концентрация N_D^V донорных состояний всех примесей V группы при облучении уменьшается. Наиболее вероятно, что это является следствием связывания доноров в комплексы [2, 3, 10].

Концентрация мелких акцепторных состояний N_A^{III} в исходном, облученном (n-тип) и предельном состояниях одинакова¹⁾. Поэтому можно полагать, что атомы III группы не взаимодействуют ни с вакансиями, ни с межузельными атомами.

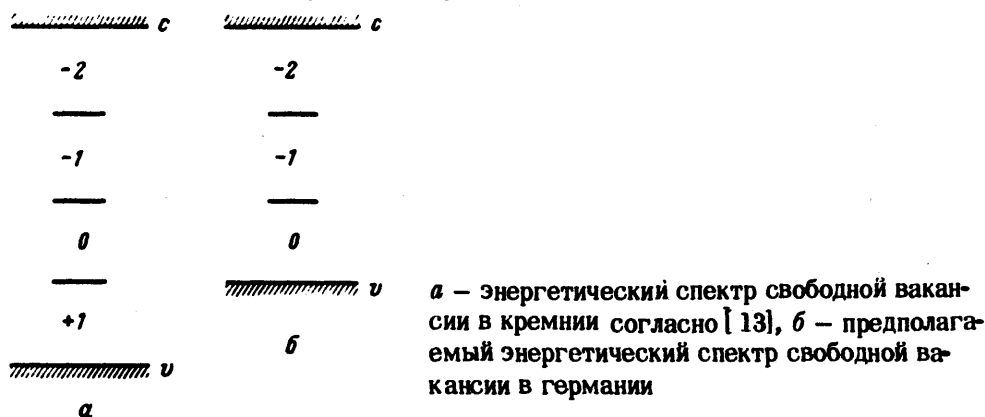
Примесь	Состояние образца	Доза Φ	N_D^V	N_A^{III}
		$\times 10^{-16}, \text{см}^{-2}$	$\times 10^{-13}, \text{см}^{-3}$	$\times 10^{-13}, \text{см}^{-3}$
P	исходное	—	17,0	~1,7
	облученное n-тип	5,4	10,4	~1,9
	облученное предельное p-тип	198	$\leq 0,1$	2,0
As	исходное	—	12,0	~0,3
	облученное n-тип	5,7	7,0	~0,3
Sb	исходное	—	104	~2,4
	облученное n-тип	34	57	~2,5
	исходное	—	12,9	~2,7
	облученное предельное p-тип	311	$\leq 0,1$	2,7
Bi	исходное	—	203	~2,0
	облученное n-тип	68	116	~2,0

Необходимо отметить, кроме того, что уменьшение числа донорных состояний превышает суммарную концентрацию глубоких компенсирующих акцепторов $\Delta N_D^V > N_A^{\text{рад}}$, т. е. образующиеся акцепторные уровни не могут принадлежать комплексам VD. Отсюда следует, что электронные состояния комплексов лежат в валентной зоне. Начальные скорости изменения концентраций доноров всех четырех типов приблизительно одинаковы и лежат в пределах $(1,0 - 1,3) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{квант}^{-1}$. Это означает, что в рассматриваемых условиях скорость образования комплексов VD определяется исключительно скоростью генерации свободных вакансий [10].

Результаты проведенных измерений позволяют сделать следующие выводы: 1) показано, что процесс образования комплексов VD в германии является весьма универсальным, он одинаково эффективен в отношении различных элементов V группы и может обеспечивать обыч-

¹⁾ Предположение о постоянстве N_A^{III} в процессе облучения для случая Ge, легированного Sb, было высказано ранее в [11].

но наблюдаемое уменьшение концентрации электронов в условиях генерации дефектов Френкеля или Шоттки при комнатной температуре. Электронные состояния комплексов лежат в валентной зоне; 2) высокая (по сравнению с $n\text{-Ge}$) радиационная устойчивость германия p -типа [12], очевидно, является следствием того, что акцепторы III группы в Ge не взаимодействуют с межузельными атомами или вакансиями;



3) известно, что уровень Ферми в германии стремится при облучении к валентной зоне, а в кремнии – к середине запрещенной зоны. Тот факт, что акцепторы III группы образуют в кремнии комплексы VA, а в германии не участвуют в дефектообразовании, может объяснить это различие; 4) можно высказать некоторые соображения об энергетическом спектре свободной вакансии. Как показано в [13], свободная вакансия в кремнии может находиться в 4-х различных зарядовых состояниях: V^{-2} , V^{-1} , V^0 , V^{+1} (см. рис. а). По-видимому, вследствие кулоновского взаимодействия отрицательно заряженные вакансии в $n\text{-Si}$ захватываются ионизованными D^{+1} донорами, а V^{+1} в материале p -типа ионизованными акцепторами A^{-1} , при этом уровень Ферми в кремнии n - и p -типа действительно должен стремиться к середине запрещенной зоны. Поскольку в германии доноры входят в состав комплексов VD , а акцепторы III группы не участвуют в дефектообразовании, можно предположить, что вакансия в Ge обладает только тремя зарядовыми состояниями: V^{-2} , V^{-1} , V^0 (см. рис. б).

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
13 августа 1971 г.

Литература

- [1] H. James, K. Lark-Horovitz. Z. Phys. Chem., 198, 107, 1951.
- [2] G.D. Watkins, J.W. Corbett. Phys. Rev., 134, A1359, 1964.
- [3] E.L. Elkin, G.D. Watkins. Phys. Rev., 174, 881, 1968.
- [4] G.D. Watkins. Phys. Rev., 155, 802, 1967.
- [5] Дж. Блemor. Статистика электронов в полупроводниках, М., Изд. Мир, 1964.

- [6] S.H.Koenig, R.D.Brown, W.Schillinger. Phys. Rev., 128, 1668, 1962.
 - [7] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман. Письма в ЖЭТФ, 14, 98, 1971.
 - [8] Н.А.Витовский, Б.М.Коноваленко, Т.В.Машовец, С.М.Рывкин, И.Д.Ярошецкий. ФТТ, 5, 3510, 1963.
 - [9] В.В.Емцев, Т.В.Машовец. Письма в ЖЭТФ, 13, 675, 1971.
 - [10] Н.А.Витовский, М.Максимов, Т.В.Машовец. ФТТ, 4, 2276, 1970.
 - [11] Л.С.Смирнов, В.Ф.Стась, В.В.Хайновская. ФТТ, 5, 85, 1971.
 - [12] J.H.Crawford, J.W.Cleland. J.Appl. Phys., 30, 1204, 1959.
 - [13] G.D.Watkins. Proc. of the Santa Fe Conf. on Radiation Effects in Semicond. Plenum Press, N.Y. 1968.
-