

О КОМПЛЕКСАХ ВАКАНСИЯ-ДОНОР В ГЕРМАНИИ

В. В. Емцев, Т. В. Машовец

До настоящего времени считалось, что причиной широко известного явления *n-p*-конверсии германия при термообработке и действии ядерных излучений [1, 2] является компенсация электронной проводимости акцепторными уровнями радиационных или термодиффектов. Однако точное сопоставление концентраций вводимых акцепторов и числа электронов, удаленных из зоны проводимости, было по ряду причин затруднительно и никогда не производилось.

Ниже приведены результаты экспериментов, которые показывают, что причиной *n-p*-конверсии является не компенсация, а уменьшение концентрации N_D^V самих донорных состояний атомов элементов *V* группы. Можно думать, что это является следствием захвата атомами *V* группы свободных вакансий с образованием комплексов VD^1). Такие комплексы наблюдались методом ЭПР в облученном кремнии, легированном фосфором [5, 6]. Авторы [5, 6] не следили за концентрацией донорных состояний фосфора.

¹⁾ Предположение об образовании комплексов VD в германии в [3, 4] было положено в основу модели, позволившей получить хорошее совпадение экспериментальной и расчетной зависимостей концентрации электронов проводимости от дозы облучения.

1. Уменьшение N_D^V при облучении. На германии, легированном фосфором, снимались температурные зависимости концентрации электронов в зоне проводимости в интервале температур 4,2 – 300°К, до и после облучения γ -лучами Co^{60} при 280°К. Доза облучения была такой, что сохранялась проводимость n -типа. Из кривых 1 и 2 рис. 1 с помощью статистических методов, описанных, например в [7] определялись: n -концентрация электронов в зоне проводимости в области полной ионизации доноров; $K = \Sigma N_A / N_D^V$ – степень компенсации;

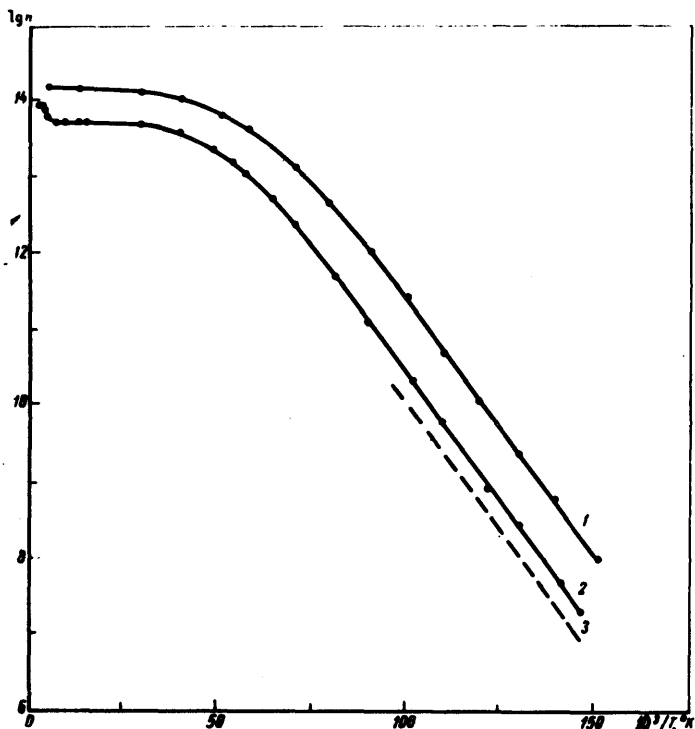


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации электронов в зоне проводимости для исходного (1) и облученного (2) образцов. Кривая 3 рассчитана в предположении, что все изменения обусловлены процессом компенсации

N_D^V – концентрация донорных уровней фосфора; ΣN_A – сумма всех компенсирующих акцепторов. Результаты приведены в табл. 1. Видно, что хотя суммарная концентрация акцепторов и возрастает при облучении, основное уменьшение концентрации электронов происходит за счет уменьшения N_D^V . Различие в положении экспериментальной кривой 2 и кривой 3; рассчитанной в предположении, что все уменьшение n обусловлено введением компенсирующих акцепторов, выходит за пределы экспериментальной ошибки.

Таблица 1

№ образца	Состояние	K	$n_{T=77^{\circ}\text{K}}$	N_D^V	ΣN_A	Δn	ΔN_D^V	$\Delta \Sigma N_A$	$\Delta \Sigma N_A^{\text{эксп}}$
			$\times 10^{-13}, \text{см}^{-3}$						
1,2	Исходное	0,10	15,3	17,0	1,7	—	—	—	—
1	После облучения	0,35	7,6	11,7	4,1	7,7	5,3	2,4	2,6
2	После облучения	0,50	5,2	10,4	5,2	10,0	6,6	3,5	3,3

Как будет ясно из дальнейшего (п. 2), уровень Ферми в процессе облучения смещается по всей ширине запрещенной зоны (от $E_c - 0,012$ до $E + 0,010 \text{ эВ}$). При этом (по кривым $n, p = f(1/T)$ на разных стадиях облучения) оказывается возможным раздельное определение концентраций всех вводимых акцепторных уровней. Определенное таким образом значение $\Delta \Sigma N_A^{\text{эксп}}$, приведенное в табл. 1, приблизительно совпадает с $\Delta \Sigma N_A$. Так как эта сумма меньше $\Delta \Sigma N_D^V$, то, по-видимому, комплексам VD нельзя прямо сопоставить какие-либо уровни в запрещенной зоне.

Таблица 2

№ образца	$\Delta E_A, \text{эВ}$	K	N_D^V исходное	N_A^{III}	$\Delta \Sigma N_D$
			$\times 10^{-12}, \text{см}^{-3}$		
1	0,010	0,2		9	1,8
2	0,010	0,3	15 - 20	9	2,7
3	0,010	0,3		10	3,0
4	0,010	0,9	160	25	22,0

2. "Предельное" положение уровня Ферми¹⁾. После n - p -конверсии уровень Ферми стремится к валентной зоне и достигает некоторого предельного значения, которое не изменяется при сколь угодно большом увеличении дозы облучения. Оказалось, что это предельное положение при 0°K совпадает с уровнями акцепторов III группы, которые частично заполнены электронами. Концентрация N_A^{III} близка к определенной ранее по степени компенсации исходного материала, а число электронов в системе не превышает нескольких процентов от их исходной концентрации (см. рис. 2 и табл. 2).

¹⁾ Исследование "предельного" состояния проводилось не только на германии, легированном фосфором, но и на германии с другой донорной примесью [3, 4], подвергавшемуся как облучению, так и термообработке.

Таким образом, даже если бы сумма появляющихся в запрещенной зоне состояний $\Delta \Sigma N_A$ равнялась или превышала N_D^V , "предельное" при 0°K состояние системы может быть получено только при условии, что основная часть доноров V группы связывается в комплексы, электронные состояния которых лежат в валентной зоне.

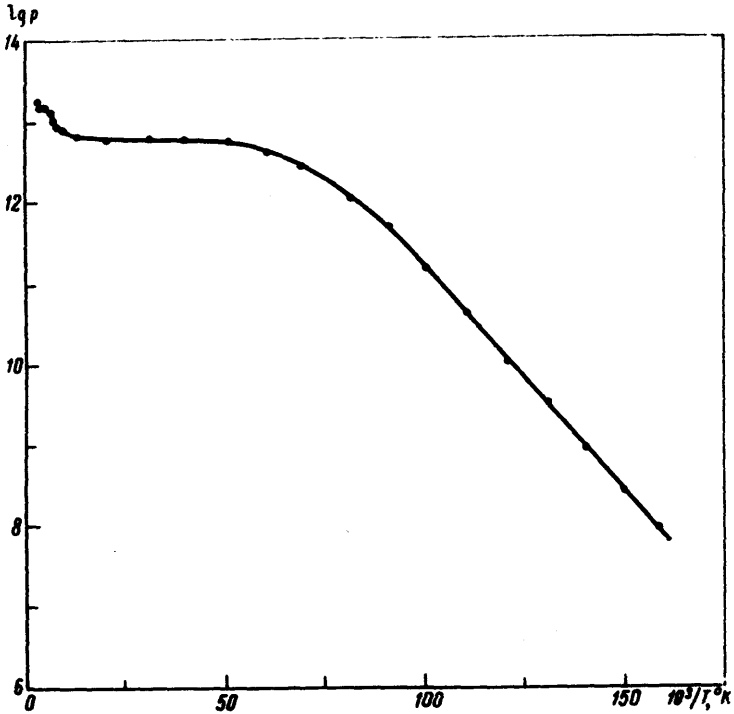


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации дырок для облученного образца в "предельном" состоянии

Возможно, что локализация этих состояний является одним из условий, определяющих различие в "предельном" положении уровня Ферми, в германии и кремнии *n*-типа, так как уровни комплексов располагаются в кремнии вблизи середины запрещенной зоны [5, 6].

Авторы признательны С.М.Рывкину за внимание и интерес к работе, Г.Л.Биру за участие в обсуждении результатов.

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

Поступила в редакцию
4 мая 1971 г.

Литература

- [1] В.С.Вавилов, Н.А.Ухин. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М., Атомиздат, 1969.
- [2] A.Seeger, K.P.Chik. Phys. Stat. Sol. 29, 455, 1968.
- [3] Н.А.Витовский, М.Максимов, Т.В.Машовец. ФТП, 4, 1030, 1970.

- [4] Н.А.Витовский, М.Максимов, Г.Т.Машовец. ФТП, 4, 2276, 1970.
- [5] G.D.Watkins, J.W.Corbett. Phys. Rev., 134, A1359, 1964.
- [6] G.D.Watkins. Proceedings of the Santa Fe Conference on Radiation Effects in Semiconductors, p.67, Plenum Press, New York, 1968.
- [7] Дж. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. Изд. Мир, 1964.
-