

## К ВОПРОСУ О СПЕКТРЕ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ ИЗЛУЧЕНИЙ $\alpha$ -ЧАСТИЦАМИ

Вербицкая Е. М., Еремин В. К., Иванов А. М.,  
Игнатенко Е. С., Строкан Н. Б., Туребеков У. Ш., Борани Й., Шмидт Б.

Исследованы радиационные дефекты, возникающие после  $\alpha$ -облучения в кремниевых детекторах излучений, изготовленных на основе материала, выращенного по методу Чохральского и полученного методом бестигельной зонной плавки. Проведено сравнение результатов электронного и  $\alpha$ -облучения, а также воздействия  $\alpha$ -частиц различной дозы и энергии. Установлены общая природа и нестабильный характер при комнатной температуре центров, возникающих в нижней половине запрещенной зоны непосредственно после воздействия  $\alpha$ -излучения. Показано влияние термических воздействий на спектр радиационных дефектов в кремнии.

В отличие от большинства приборов твердотельной электроники воздействие ядерного излучения на полупроводниковые детекторы является неизбежным в силу их назначения. Регистрируемое детектором излучение не только генерирует в чувствительной области прибора электронно-дырочные пары, создающие информационный сигнал, но и образует радиационные дефекты. Их накопление снижает время жизни неравновесных носителей в полупроводнике и, как следствие, ухудшает основной параметр детектора — разрешающую способность по энергии. Наиболее эффективно этот процесс развивается при регистрации  $\alpha$ -частиц и ускоренных ионов, способных передать атомам полупроводника значительную долю своей энергии. В результате уже при дозе  $\alpha$ -частиц  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup> [1] (для Si-детекторов) возникает концентрация дефектов, достаточная для существенного ухудшения эксплуатационных характеристик приборов.<sup>1</sup>

Несмотря на значительное число выполненных исследований, до настоящего времени остается открытым вопрос количественной связи характеристик детекторов с поглощенной дозой  $\alpha$ -частиц. Основной причиной этого является существенный разброс данных о свойствах глубоких центров, создаваемых  $\alpha$ -частицами ( $\alpha$  ГЦ) в высокоомном кремнии. Так, до настоящего времени существуют различные точки зрения не только на природу некоторых  $\alpha$  ГЦ, но и на структуру спектра вводимых уровней. Например, в [3] обнаружено пять уровней в верхней половине запрещенной зоны (з.з.), тогда как в [4] указывается на наличие четырех центров, а также уровней в нижней половине з.з., четыре уровня в верхней половине зоны наблюдались авторами работы [5], однако только 2 из них расположены в средней части з.з. ( $E_c - E > 0.2$  эВ). Возможной причиной неоднозначности результатов могут являться различия в условиях эксперимента, в частности свойств Si (содержание неконтролируемых примесей и дефектов, вводимых как на стадии получения кремния, так и в процессе изготовления прибора), а также энергии частиц и дозы облучения. На существенность последних факторов указывалось в [6], где сложность в идентификации уровней

<sup>1</sup> Ранее деградация разрешающей способности наблюдалась лишь при дозах  $> 10^{10}$  см<sup>-2</sup> [2]. Увеличение чувствительности к дозе облучения связано с повышением разрешающей способности, достигнутой для планарных Si-детекторов.

дивакансий в кремнии (наблюдавшихся в диапазоне энергий  $0.23 \div 0.42$  эВ и  $0.39 \div 0.54$  эВ) связывалась с образованием их скоплений, что характерно для воздействия частиц с высокой плотностью ионизации либо при высоких дозах облучения. Однако это предположение находится в противоречии с результатами [7], где использовался  $n$ -Si с  $\rho = 1 \div 100$  Ом·см и дозы облучения варьировались от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  см $^{-2}$ . При этом структуры спектров ГЦ, соответствующие облучению протонами с энергией 7.8 МэВ и  $\alpha$ -частицами с энергией 25.2 МэВ, совпадали и не зависели от дозы.

Если ограничиться работами, где используются  $\alpha$ -частицы с энергией  $\sim 5$  МэВ, что соответствует большинству практических задач  $\alpha$ -спектрометрии, то количество экспериментальных данных существенно снижается при сохранении их несоответствия.

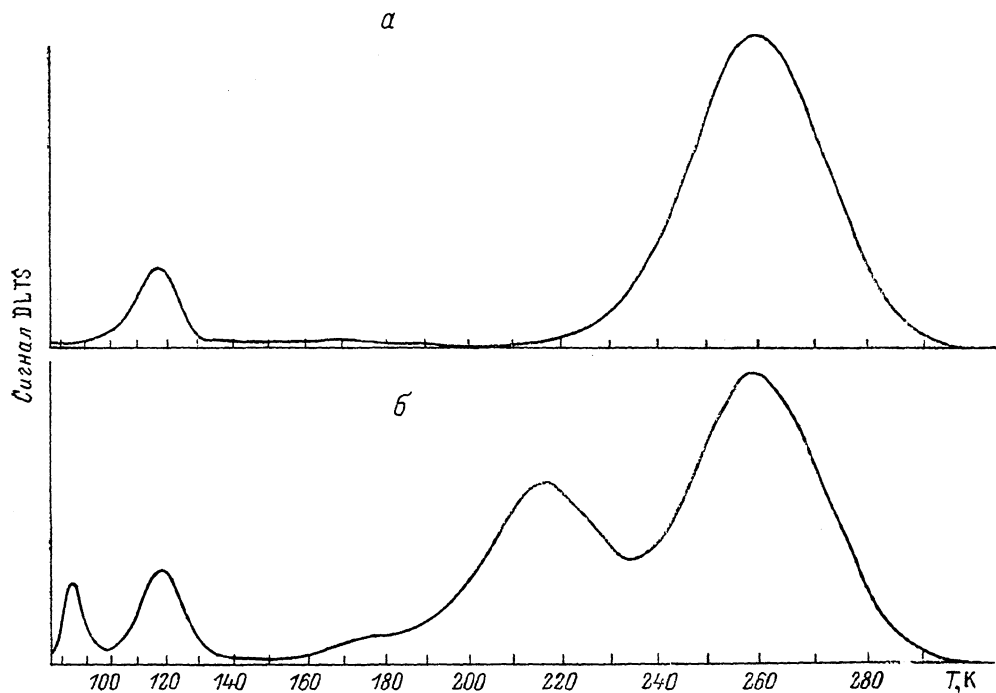


Рис. 1. Спектры DLTS кремния № 4, прошедшего термообработку до облучения (а), после облучения (б) ( $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$ ).

Цель настоящей работы — выяснение структуры и параметров  $\alpha$  ГЦ в высокоомном  $n$ -Si, образующем чувствительную среду детекторов короткопробежных ионов. Оригинальные эксперименты и анализ известной совокупности литературных данных показывают, что спектр глубоких центров укладывается в модель, содержащую 4 уровня в верхней половине и 2 уровня в нижней половине з.з. Обнаружены влияние технологических термообработок кремния в ходе изготовления образцов на спектр уровней в верхней половине з.з. и временная нестабильность уровней в нижней половине з.з.

Для выяснения влияния свойств Si на спектр  $\alpha$  ГЦ в работе использовались 2 разновидности материала: с повышенной концентрацией кислорода и углерода, полученный методом Чохральского (Ч) в США, с удельным сопротивлением  $\approx 500$  Ом·см (1 и 2) и выращенный методом бестигельной зонной плавки (БЗП) (3 — произведенный в СССР, 4 — изготовленный в ГДР). Материал 2 представлял тот же Si, но в отличие от 1 подвергнутый высокотемпературной обработке, характерной для технологического цикла изготовления детектора.

Образцами для исследований служили структуры с выпрямляющими барьерами металл—полупроводник (структуры Au— $n$ -Si—Al) либо с  $p^+$ — $n$ -переходами (планарные  $p^+$ — $n$ — $n^+$ -структуры). В последнем случае  $p^+$ - и  $n^+$ -области создавались методом ионной имплантации бора и фосфора соответственно, а тех-

нологический цикл изготовления структур включал целый ряд высокотемпературных обработок. Образцы имели чувствительную площадь  $25 \div 50 \text{ мм}^2$ . Важно отметить, что как материал, так и технология экспериментальных структур соответствовали процессу создания кремниевых детекторов ионов. Поэтому результаты проведенного исследования имеют прямое отношение к проблеме радиационной деградации промышленных полупроводниковых детекторов.

Облучение образцов проводилось в вакууме коллимированным источником  $^{238}\text{Pu}$  ( $E \approx 5.5 \text{ МэВ}$ ), создававшим параллельный пучок  $\alpha$ -частиц. Набор дозы проводился дискретно в диапазоне  $1 \cdot 10^8 \div 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  с исследованием параметров

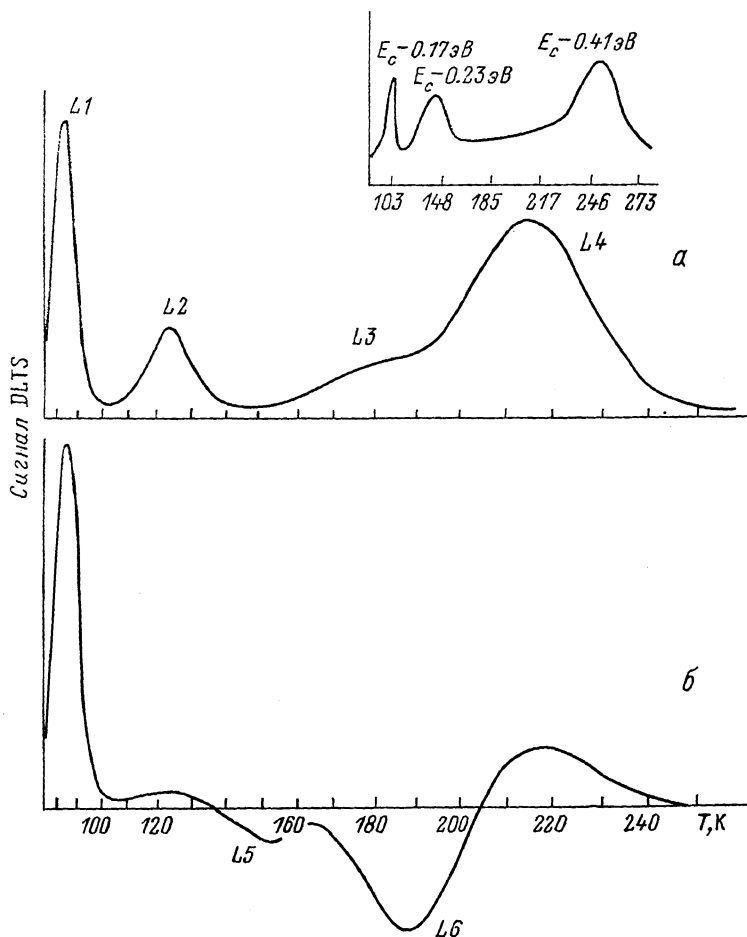


Рис. 2. Типичный спектр DLTS  $n$ -кремния ( $\Phi = 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ ) без инжекции (а), с инжекцией неосновных носителей (б).

На вставке — спектр DLTS без инжекции после облучения электронами (по материалу [11]).

$\alpha$  ГЦ непосредственно после каждого этапа облучения. Для измерения спектра ГЦ использовался DLTS-спектрометр с рабочей частотой 100 кГц.

Исследование структур из необлученного кремния выявило глубокие уровни в концентрации, не превышающей  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Исключением является материал 4 (БЗП), технологические термообработки которого в ходе создания  $p^+ - n - n^+$ -структур приводили к формированию характерного спектра ГЦ в верхней половине з.з., включавшего 2 доминирующих уровня:  $E_c - 0.23 \text{ эВ}$ ,  $\sigma_n = 3 \times 10^{-15} \text{ см}^2$  и  $E_c - 0.55 \text{ эВ}$ ,  $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  в концентрациях  $1 \cdot 10^{11}$  и  $4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  соответственно (рис. 1, а).

После облучения во всех образцах из материалов 1, 2 и 3 формировался характерный спектр из четырех уровней в верхней половине з.з. (рис. 2, а). Кроме того, в режиме инжекции на структурах с  $p^+ - n$ -переходами (3 и 4) были обнаружены 2 центра  $E_c + 0.29$  и  $E_c + 0.4 \text{ эВ}$  с нестабильной во

№ образца	Материал	Концентрация мелкой примеси, см <sup>-3</sup>	Структура	Наличие высоко-температурных обработок	Концентрация центра (см <sup>-3</sup> ) при дозе ~ 3 · 10 <sup>8</sup> см <sup>-2</sup>		
					L1	L2	L3
					$E_c - 0.18$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-14}$ см <sup>2</sup>	$E_c - 0.21$ эВ, $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-16}$ см <sup>2</sup>	$E_c - 0.48$ эВ, $\sigma_n = 8 \cdot 10^{-12}$ см <sup>2</sup>
1	Ч (США)	2 · 10 <sup>13</sup>	Au—Si	—	3 · 10 <sup>11</sup>	9 · 10 <sup>10</sup>	2 · 10 <sup>10</sup>
2	Ч (США)	2 · 10 <sup>13</sup>	Au—Si	+	7 · 10 <sup>11</sup>	1 · 10 <sup>11</sup>	4 · 10 <sup>10</sup>
3	БЗП (СССР)	4.5 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	3 · 10 <sup>11</sup>	1 · 10 <sup>11</sup>	6 · 10 <sup>10</sup>
3a	БЗП (СССР)	2 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	2 · 10 <sup>10</sup>	6 · 10 <sup>9</sup>	5 · 10 <sup>9</sup>
4	БЗП (ГДР)	4.5 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	1 · 10 <sup>11</sup>	—	4 · 10 <sup>10</sup>

Продолжение

№ образца	Материал	Концентрация мелкой примеси, см <sup>-3</sup>	Структура	Наличие высоко-температурных обработок	Концентрация центра (см <sup>-3</sup> ) при дозе ~ 3 · 10 <sup>8</sup> см <sup>-2</sup>		
					L4	L5	L6
					$E_c - 0.4$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16}$ см <sup>2</sup>	$E_c + 0.29$ эВ, $\sigma_p = 6 \cdot 10^{-15}$ см <sup>2</sup>	$E_c + 0.4$ эВ, $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-14}$ см <sup>2</sup>
1	Ч (США)	2 · 10 <sup>13</sup>	Au—Si	—	6 · 10 <sup>10</sup>	—	—
2	Ч (США)	2 · 10 <sup>13</sup>	Au—Si	+	1 · 10 <sup>11</sup>	—	—
3	БЗП (СССР)	4.5 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	2 · 10 <sup>11</sup>	3 · 10 <sup>10*</sup>	1 · 10 <sup>11*</sup>
3a	БЗП (СССР)	2 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	2 · 10 <sup>10</sup>	—	3 · 10 <sup>10*</sup>
4	БЗП (ГДР)	4.5 · 10 <sup>12</sup>	p <sup>+</sup> —n—n <sup>+</sup>	+	2 · 10 <sup>11</sup>	1 · 10 <sup>11*</sup>	1 · 10 <sup>11*</sup>

Примечание. \* Концентрация на момент измерения спектра DLTS.

времени концентрацией (рис. 2, б). К сожалению, авторы не располагали образцами с p<sup>+</sup>—n-переходами на материалах 1 и 2, поэтому вопрос об образовании центров в нижней половине з.з. в обогащенном кислородом кремнии остается открытым.

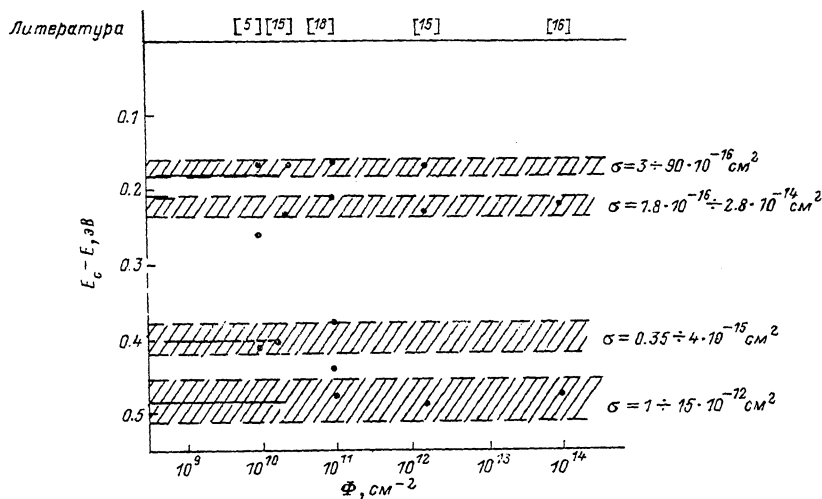


Рис. 3. Уровни радиационных дефектов в верхней половине запрещенной зоны при разных дозах облучения (сплошная линия — настоящая работа).

Совокупность полученных результатов сведена в таблицу. При этом отметим, что одна падающая α-частица создает в з.з. кремния в зависимости от материала концентрацию ГЦ ≈ (1 ÷ 8) см<sup>-3</sup>. Разброс в значениях энергии отдельных центров, составляющий ~ 5 %, характеризует точность обработки формы DLTS-пиков (применяя метод, описанный в [8]).

Для интерпретации наблюдаемой системы  $\alpha$  ГЦ сопоставим ее с известными в литературе данными. Для этого проанализируем связь глубины залегания ГЦ с дозой и энергией  $\alpha$ -частиц. На рис. 3 приведены литературные данные по положению  $\alpha$  ГЦ в з.з. кремния в зависимости от дозы облучения. Заштрихованные зоны показывают диапазоны глубин залегания ГЦ, соответствующих 5 % погрешности определения их положений. Принято, что такая оценка является нижним пределом погрешности, поскольку не включает систематических ошибок, неизбежно возникающих при измерениях на различных установках. Видно, что обсуждаемой в [6] зависимости глубины залегания центров от дозы в пределах погрешности экспериментов не прослеживается. На рис. 4 показано что на глубину уровней вводимых радиационных дефектов энергия  $\alpha$ -частиц также не влияет.

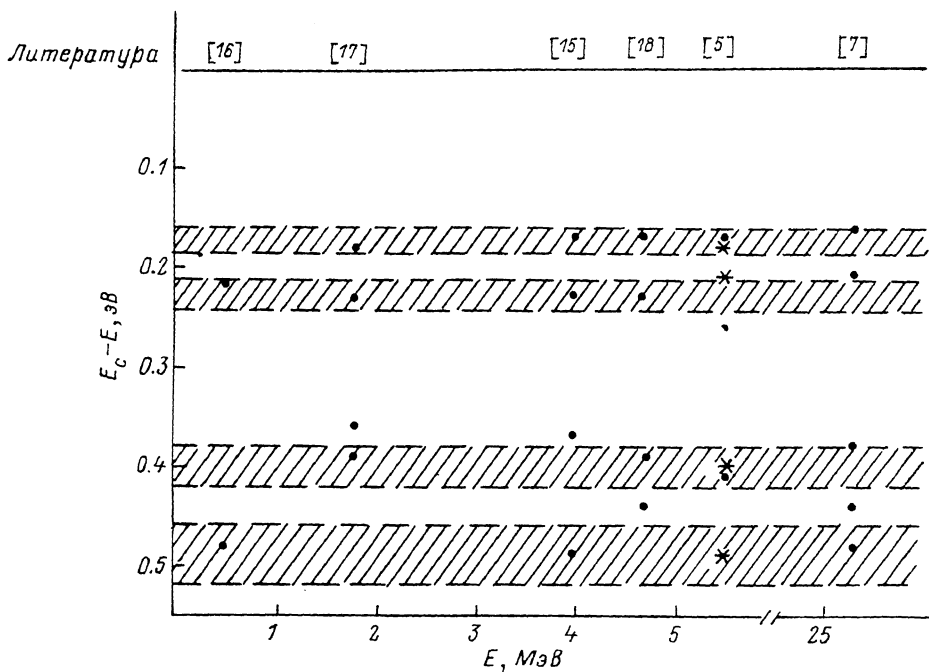


Рис. 4. Уровни радиационных дефектов в верхней половине запрещенной зоны при разных энергиях  $\alpha$ -частиц (звездочкой отмечены результаты настоящей работы).

Наблюдаемое отклонение экспериментальных точек от 5%-го диапазона может быть связано с систематическими погрешностями в обработке результатов. Заметим, что только неопределенность в показателе степени зависимости сечения захвата  $\sigma$  от температуры, учитываемом при расчетах энергетического положения центра, может привести к ошибке в энергии до 10 % [9]. В настоящей работе использовано значение показателя степени  $n = -2$ , что соответствует [10].

Из рис. 3 и 4 следует, что имеющаяся в настоящее время в литературе совокупность результатов по  $\alpha$  ГЦ в верхней половине з.з. и данные настоящей работы сводятся к 4 уровням. Наиболее мелким из них является хорошо изученный А-центр с энергией  $E_c - 0.17$  эВ. Следующим за ним двум уровням большинством авторов приписывается вакансионная природа, и, согласно [4], они являются либо уровнями многовакансионных комплексов, либо дивакансий в различных зарядовых состояниях:  $E_c - 0.4$  эВ — однозарядная дивакансия  $V_2^-$  и  $E_c - 0.21$  эВ — двухзарядная  $V_2^{2-}$ . Дополнительным аргументом в пользу последней точки зрения является совпадение параметров этих центров и общей структуры спектра со спектром, наблюдаемым при облучении электронами [11] (см. вставку на рис. 2). Из сопоставления видно, что оба спектра содержат 3 отчетливо выделенных уровня:  $E_c - 0.17$  эВ,  $E_c - 0.23$  эВ,  $E_c - 0.41$  эВ, а также и четвертый ( $L3$ ), упущенный из рассмотрения в [11]. Действительно, в [7], где этот уровень был идентифицирован путем разложения спектра, определены его параметры:  $E = E_c - 0.48 \pm 0.05$  эВ,  $\sigma_n = (1 \div 15) \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>.

Таким образом, становится возможным сделать вывод об аналогии между радиационными дефектами от электронов и  $\alpha$ -частиц и, согласно основному результату [11], интерпретировать уровни  $E_c - 0.21$  эВ и  $E_c - 0.4$  эВ как принадлежащие дивакансии в различных зарядовых состояниях.

В дополнение к изложенному следует обратить внимание на то обстоятельство, что при одинаковой природе центров 2 и 4 для  $E_c - 0.4$  эВ наблюдается существенно большая концентрация (до 2 раз). Это указывает на то, что данный пик, возможно, образован, кроме уровня  $V_2^-$ , дополнительным, совпадающим по параметрам с  $V_2^-$ , уровнем. Аналогичный факт наблюдался в [12], где путем экспериментов по отжигу при  $T = 150$  °С этот дополнительный уровень идентифицирован как  $E$ -центр.

Что касается ГЦ  $L3$ , то, к сожалению, его интерпретация в настоящее время затруднительна и требует дополнительных исследований.

Относительно наблюдавшихся двух центров в нижней половине з.з. сопоставление с литературными данными приводит к следующим выводам. Во-первых, согласно [13], уровень с меньшей энергией  $E_c + 0.29$  эВ может являться третьим уровнем дивакансии в состоянии  $V_2^+$  с глубиной залегания  $E_c + (0.25 \div 0.28)$  эВ. Однако обнаруженный в данной работе эффект отжига этого центра уже при комнатной температуре в течение нескольких суток противоречит данной модели. Во-вторых, структура из двух уровней с энергиями  $E_c + 0.3$  эВ и  $E_c + 0.36$  эВ наблюдалась в работе [14], где они идентифицировались как центры, образованные углеродными комплексами. Сопоставление с результатами настоящей работы показывает хорошее совпадение по энергии для центра  $E_c + 0.29$  эВ. Кроме того, в [14] указывалось на отмеченный выше отжиг центра  $E_c + 0.3$  эВ при комнатной температуре. Наконец, в пользу общей природы центров  $E_c + 0.29$  и  $E_c + 0.4$  эВ свидетельствует тот факт, что при отжиге первого из них наблюдается эффект возрастания концентрации второго. К сожалению, авторы не располагали данными по концентрации углерода в образцах, что не позволило проследить количественные связи в рамках углеродной модели центров.

В заключение необходимо указать на один экспериментальный факт, относящийся к уровню  $E_c - 0.21$  эВ. На рис. 1, а представлен, как отмечалось, спектр ГЦ  $p^+ - n - n^+$ -структур на основе Si 4. Соответственно на рис. 1, б показана трансформация спектра после облучения образца  $\alpha$ -частицами. Видно, что в основном структура спектра  $\alpha$  ГЦ сохраняется, в частности уровень  $E_c - 0.4$ , однако центр  $E_c - 0.21$  эВ отсутствует. Это обстоятельство, на наш взгляд, находит объяснение исходя из сделанного выше замечания о том, что существенное различие в концентрации уровней дивакансий  $E_c - 0.21$  эВ и  $E_c - 0.4$  эВ связано с наложением спектров дивакансии и  $E$ -центра, имеющих практически совпадающие параметры. В данном случае следует предположить, что термообработка кремния типа 4 привела к формированию в решетке мощных стоков для дивакансий. В результате наиболее вероятным стало образование комплексов  $V$ —мелкий донор ( $V$ —фосфор), наблюдаемых в спектре как центр с  $E_c - 0.4$  эВ.

Отмеченный эффект, по-видимому, следует рассматривать как пример, указывающий на еще одну возможность управления радиационной стойкостью Si путем термических воздействий.

#### Список литературы

- [1] Фон Борани Й., Шмидт Б. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 12. С. 2122—2126.
- [2] Kraner H. W. // IEEE Trans. 1982. V. NS-29. N 3. P. 1088—1091.
- [3] Indusekhar H., Kumar V., Sengupta D. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 93. N 2. P. 645—653.
- [4] Берман Л. С., Ременюк А. Д., Шуман В. Б. // ФТП. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1155—1158.
- [5] Губская В. И., Звягин В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 1. С. 171—173.
- [6] Васильев А. В., Смирнов Л. С., Шаймеев С. С. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 737—739.
- [7] Кузнецов Н. В., Филатов В. Н., Виноградова В. Г. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 609—613.
- [8] Васильев А. В., Смагулова С. А., Шаймеев С. С. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 162—164.
- [9] Walker J. W., Sah C. T. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 10. P. 4587—4605.
- [10] Абакумов В. Н., Перель В. И., Ясевич И. Н. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 1. С. 3—32.
- [11] Ewaraue A. O., Edmund Sun. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 9. P. 3776—3780.

- [12] Brotherton S. D., Bradley P. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 8. P. 5720—5732.
- [13] Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М., 1990. 212 с.
- [14] Берман Л. С., Жепко В. А., Ломасов В. Н., Ткаченко В. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 12. С. 2129—2132.
- [15] Берман Л. С., Маляренко А. М., Ременюк А. Д., Суханов В. Л., Толстобров М. Г. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 5. С. 844—848.
- [16] Алешин А. И., Смирнов Л. С., Стась В. Ф. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 3. С. 551—553.
- [17] Kimerling L. C. // IEEE Trans. 1976. V. NS-23. N 5. P. 1497.
- [18] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М., Петрунин А. П. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 3. С. 532—534.

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

Получена 17.12.1990  
Принята к печати 9.01.1991

---