

электрических сил на генерированные на узкозонной поверхности неравновесные носители, чему способствует увеличение времени жизни носителей с увеличением  $E_g$ . В области полей  $\gamma$  порядка  $-(\delta_n + \delta_p)/2$  на полевой зависимости интегральной мощности излучения  $P/P_0$  имеет место участок наибольшей крутизны (рис. 2), протяженность которого определяется соотношением между  $S_1$  и  $S_2$ . Резкий рост мощности излучения здесь обусловлен как расширением спектральной полосы люминесценции, так и ростом величины интенсивности излучения во всем спектральном диапазоне (рис. 1).

Таким образом, результаты расчета показывают, что по отношению к возникающему при МКЗ рекомбинационному излучению ВЗП проявляют существенные преимущества (более сильное воздействие управляющих полей на форму спектра излучения, большие значения его интегральной мощности) по сравнению с гомозонными образцами.

Авторы выражают благодарность В. И. Стафееву за обсуждение результатов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Савицкий В. Г., Соколовский Б. С., Стодика М. И., Фурман В. В. // УФЖ. 1978. Т. 23. В. 5. С. 792—797.
- [2] Болгов С. С., Малютенко В. К., Пипа В. И. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 9. С. 1677—1681.
- [3] Савицкий В. Г., Соколовский Б. С., Малинич И. З. // Матер. VI Всес. симп. «Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы». Львов, 1983. С. 13—14.
- [4] Болгов С. С., Малютенко В. К., Пипа В. И. // УФЖ. 1986. Т. 20. В. 2. С. 247—252.
- [5] Сагинов Л. Д., Пономаренко В. П., Стафеев В. И. и др. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 1039—1043.
- [6] Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М., 1982. 208 с.

Львовский государственный университет  
им. И. Франко

Получено 28.03.1991  
Принято к печати 31.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

### ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В Si:Ge ПРИ 4.2, 78 и 300 К

Голубев В. Г., Емцев В. В., Клиндер П. М., Кропотов Г. И.,  
Шмарцев Ю. В.

Интерес к изовалентной примеси (ИВП) Ge в кремнии вызван в первую очередь ее влиянием на процессы радиационного дефектообразования. В работах [1,2] было показано, что введение изовалентной примеси германия существенно понижает скорость образования радиационных дефектов в кремнии при комнатной температуре, что, как полагают, обусловлено непрямой аннигиляцией вакансий  $V$  и собственных межузельных атомов  $I$  через эти примесные центры. При низких температурах атомы Ge являются эффективными ловушками вакансий, образуя комплексы  $[GeV]$  [3]. В работе [4] на основании исследований электрических свойств комплекса  $[GeV]$  показано, что германий склонен к кластерированию в кремнии. В настоящем сообщении мы приводим дополнительные экспериментальные данные, свидетельствующие о влиянии примесных кластеров на процессы разделения пар Френкеля в облученном материале.

Исследовались монокристаллы  $n$ -Si, выращенные методом Чохральского и легированные фосфором и германием. Образцы подвергались  $\gamma$ -облучению  $^{60}\text{Co}$  при  $T = 4.2, 78$  и  $300$  К (мощность дозы  $J \approx 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для  $T = 4.2$  и  $78$  К,  $J \approx 1.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для  $T = 300$  К). Для исходных и облученных образцов

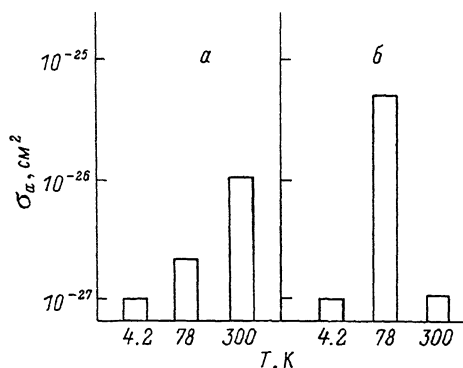


Рис. 1. Сечение образования радиационных дефектов в Si (а) и Si : Ge (б) при различных температурах  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ).

Концентрация примеси германия  $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

проводились измерения температурных зависимостей концентрации электронов проводимости  $n(T)$  в диапазоне 20—300 К. Концентрация ИВП Ge оценивалась по массе лигатуры, добавляемой в шихту при выращивании кристаллов. Концентрации примесей кислорода и углерода определялись по интенсивности полос ИК поглощения и равнялись соответственно 1100 и 607  $\text{см}^{-1}$  [1]. Концентрации примесей в исследованных материалах составляли  $(1-2) \cdot 10^{14}$  (фосфор),  $(0.4-20) \cdot 10^{19}$  (германий),  $(8-11) \cdot 10^{17}$  (кислород) и  $(0.7-1.8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (углерод). Для сравнения использовались также образцы кремния аналогичного примесного состава, но не легированного Ge.

Для исходных и облученных при 78 К образцов также регистрировались спектры фотопроводимости, обусловленной фотовозбуждением основной примеси — фосфора и компенсирующей примеси — бора (в условиях межзонной подсветки). Измерения проводились при  $T=5-20$  К по бесконтактной методике [5] на инфракрасном спектрометре Bruker IFS-113v с разрешением  $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ .

На рис. 1 показаны сечения образования радиационных дефектов акцепторного типа ( $\sigma_a$ ) в Si и в Si:Ge при различных температурах облучения. Прежде всего обращает на себя внимание необычно большое значение  $\sigma_a$  для комплексов [GeV] в Si:Ge при  $T=78$  К ( $\sigma_a \approx 5 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ ), составляющее свыше 50% от расчетного сечения образования пары Френкеля при  $\gamma$ -облучении  $^{60}\text{Co}$  ( $\sigma_F \approx 8 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$  [6]). Это может означать, что процесс разделения пар Френкеля в Si:Ge при 78 К протекает более эффективно по сравнению с контрольным материалом. Анализ спектров фотопроводимости в Si:Ge, облученном при 78 К, независимо указывает на это обстоятельство. Из представленных на рис. 2 спектров фотопроводимости видно, что в результате облучения при 78 К полностью исчезают линии, связанные с фотовозбуждением компенсирующих акцепторов — атомов бора. Этот эффект легко интерпретируется в рамках модели Уоткинса [6] — вытеснение атомов бора из узлов собственным межузельным атомом  $\text{B}_i + (\text{Si})_i \rightarrow \text{B}_i + (\text{Si})_i$ . Оценка сечения образования вторичных радиационных дефектов по этой реакции с участием  $(\text{Si})_i$  также дает величину, близкую к  $\sim 5 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$ . Следует отметить, что спектральные линии бора не восстанавливаются после отжига при 300 К. Полное восстановление линий бора в спектрах фотопроводимости наблюдалось лишь после отжига при 900 °С в течение 30 мин. Высокая температура отжига свидетельствует о том, что межузельные атомы бора, подвижные при  $T > 300$  К, образуют устойчивые комплексы с другими примесными центрами и дефектами кристаллической решетки.

Рассмотрим возможные причины различия сечения образования вторичных радиационных дефектов ( $\sigma_a$ ) при  $T=78$  К в Si и Si:Ge (с близкими значениями

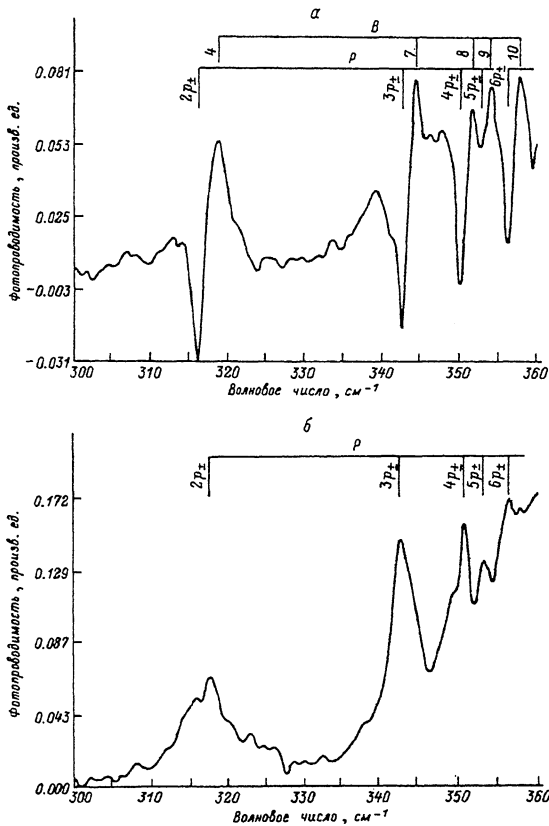


Рис. 2. Спектры фотопроводимости Si : Ge в исходном состоянии (а) и после  $\gamma$ -облучения при 78 К (б).

Концентрация примеси германия  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Измерения проводились при  $T = 15.9 \text{ К}$  в условиях межзонной подсветки. Идентификация линий фотовозбуждения фосфора и бора — по данным [1<sup>1</sup>] и [1<sup>2</sup>] соответственно.

концентраций кислорода и углерода). Величина  $\sigma_a$  в контрольном Si для А-центров хорошо совпадает с данными для легированного n-Si [7,8]. Отсюда следует, что резкое увеличение  $\sigma_a$  в Si : Ge по сравнению с контрольным материалом обусловлено более эффективным разделением первичных дефектов (пар Френкеля) при наличии изовалентной примеси. Воздействие примеси германия на первичное дефектообразование происходит, как нам представляется, за счет упругой деформации, вызванной введением ИВП (включая и флексоэлектрический эффект [9]), что феноменологически проявляется в уменьшении радиуса аннигиляции пар Френкеля. Последнее в свою очередь может реализоваться только при неоднородном распределении ИВП, так как среднее пространственное разделение компонентов в парах Френкеля составляет две—три постоянных решетки (см., например, [10]).

Для Si : Ge, облученного при  $T = 4.2 \text{ К}$ , сечение дефектообразования (определенное по скорости введения изолированных вакансий) практически не отличается от соответствующего значения для контрольного материала (рис. 1). При уменьшении температуры облучения радиус аннигиляции пары Френкеля значительно возрастает (см., например, [10]), что существенно ослабляет влияние упругих напряжений, связанных с германием.

При комнатной температуре облучения примесные атомы германия, как уже указывалось выше, являются эффективным каналом не прямой аннигиляции свободных компонентов пар Френкеля и, как видно из рис. 1, сечение образования

торичных дефектов (А-центров) уменьшается по сравнению с контрольным материалом.

Авторы глубоко признательны Б. А. Андрееву за участие в проведении оптических экспериментов и обсуждение полученных результатов и Р. Ф. Витман за измерение спектров ИК поглощения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мильвидский М. Г., Хируненко Л. И., Шаховцов В. И. // Препринт ИФ АН УССР. Киев, 1986. № 28.
- [2] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. И., Шпинар Л. И., Ясковец И. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562—565.
- [3] Watkins G. D. // Trans. IEEE. 1969. V. NS-16. N 6. P. 13—18.
- [4] Емцев В. В., Клиггер П. М., Фистуль В. И., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 6. С. 997—1003.
- [5] Андреев Б. А., Иконников В. Б., Максимов Г. А., Шмагин В. Б. // Высокочистые вещества. М., 1987. № 1. С. 138—143.
- [6] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
- [7] Gregory V. L., Barnes C. E. // Rad. Eff. Semicond. / Ed. by F. L. Vook. N. Y., 1968. P. 124—135.
- [8] Stein H. J., Vook F. L. // Phys. Rev. 1967. V. 163. P. 790.
- [9] Михнович В. В. // Автореф. докт. дис. Л., 1990.
- [10] Емцев В. В., Машовец Т. В., Михнович В. В. // ФТП. 1992. Т. 26. В. 1. С. 22—44.
- [11] Бейнихес И. Л., Коган Ш. М. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. В. 7. С. 285.
- [12] Onton A., Fisher P., Ramdas A. K. // Phys. Rev. 1967. V. 163. P. 696.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Получено 18.10.1991  
Принято к печати 31.10.1991