

НАКОПЛЕНИЕ И ОТЖИГ ОСНОВНЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В p -Si<Ge>

Кузнецов В. И., Лугаков П. Ф., Салманов А. Р., Цикунов А. В.

Изучалось влияние примеси германия на образование и отжиг основных компенсирующих радиационных дефектов (РД) в выращенном методом Чохральского монокристаллическом кремнии p -типа ($\rho=10$ Ом·см). Результаты получены из анализа температурных зависимостей концентрации основных носителей заряда в контрольных и легированных германием до концентрации $\approx 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ кристаллах на различных этапах облучения γ -квантами ⁶⁰Со и последующего изохронного отжига. Установлено, что при облучении образуются два РД с близкими уровнями [$E_g+(0.31 \pm 0.02)$ и $\geq E_g+0.35$ эВ], различающиеся температурой отжига, а соотношение между их концентрациями зависит от наличия германия в кристаллах. Предполагается, что первыми из них являются комплексы углерод—кислород—дивакансия, а вторыми — междуузельный углерод—междуузельный кислород. Особенности накопления и отжига этих РД в p -Si<Ge> объяснены с учетом влияния создаваемых атомами германия упругих напряжений на локализацию в кристаллах примесей углерода и кислорода, диффузию первичных РД при облучении и энергию активации отжига РД.

Германий в решетке кремния создает деформационные напряжения сжатия, что приводит к изменению кинетики накопления при облучении радиационных дефектов (РД) [1-4]. В данном сообщении анализируются результаты по влиянию примеси германия на образование и отжиг основных компенсирующих РД (K -центров) с энергетическим уровнем вблизи $E_g+(0.33 \pm 0.03)$ эВ, сведения о структуре которых неоднозначны [5-9].

Использовались легированные бором кристаллы кремния с удельным электросопротивлением 10 Ом·см. Концентрация германия, вводимого в расплав при выращивании, составляла $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Контрольные образцы Si, полученные при идентичных условиях, не содержали германий. Концентрация кислорода и углерода во всех исследуемых образцах была $\approx 8 \cdot 10^{17}$ и $\leq 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно. Облучение проводилось при $T \leq 50$ °C γ -квантами ⁶⁰Со. На различных этапах облучения и отжига измерялись температурные зависимости коэффициента Холла, из которых рассчитывались значения концентрации, энергетических уровней РД и скорости их образования.

Анализ полученных результатов показал, что температурные зависимости коэффициента Холла после облучения контрольных и содержащих германий кристаллов различаются и могут быть описаны на основании уравнения электронейтральности с учетом образования при облучении двух различных РД с донорными энергетическими уровнями $E_g+(0.31 \pm 0.02)$ и $\geq E_g+0.35$ эВ. На рис. 1 даны дозовые зависимости концентрации этих РД. Как видно, в кристаллах p -Si<Ge> по сравнению с контрольными более эффективно образуются РД с уровнем $\approx E_g+0.31$ эВ, тогда как для РД с уровнем $\geq E_g+0.35$ эВ имеет место обратная закономерность. Различным оказывается и характер отжига этих РД (рис. 2). Так, отжиг РД с уровнем $\geq E_g+0.35$ эВ в исследованных кристаллах происходит в одну стадию при $T=200 \div 300$ °C. Несколько иначе отжигаются РД с уровнем $E_g+0.31$ эВ. В контрольном кремнии наблюдается значительное дообразование их в интервале температур $200 \div 300$ °C, а отжигаются они при $300 \div 500$ °C. В легированных германием кристаллах отрица-

тельная стадия отжига этих РД мала, а отжиг их происходит в два этапа: $200 \div 300$ и $400 \div 500$ °С.

Как известно, при облучении выращенного методом Чохральского *p*-*p*-кремния эффективно образуются комплексы углерод—кислород—дивакансия (COV_2), вносящие в запрещенную зону донорный $\approx E_v + 0.33$ эВ и акцепторный $\geq E_c - 0.43$ эВ уровни [5-7]. Предполагается, что такие комплексы образуются посредством захвата генерируемых облучением вакансий присутствующими

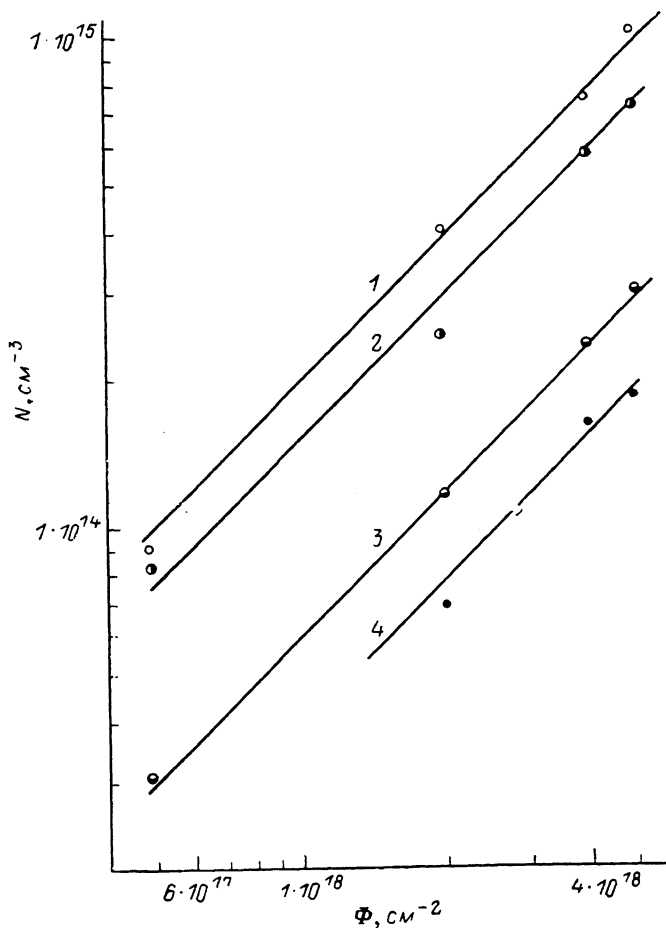


Рис. 1. Дозовые зависимости концентрации РД.

Материал: 1, 3 — контрольный *p*-кремний, 2, 4 — *p*-Si(Ge). Энергия ионизации РД, эВ: 1, 4 — $\geq E_v + 0.35$, 2, 3 — $\approx E_v + 0.31$.

в объеме кристалла ассоциациями узловой углерод—междоузельный кислород (C_2O_i) либо присоединением подвижных при $T \geq 330$ К междоузельных атомов углерода к А-центрам [5, 6, 10, 11]. При отжиге комплексов COV_2 обычно наблюдается стадия их дообразования в интервале температур $150 \div 300$ °С, а полный отжиг и восстановление исходных значений концентрации и времени жизни носителей заряда имеют место при $T \geq 450$ °С [6]. Подобным образом отжигаются и РД с уровнем у $E_v + 0.31$ эВ в контрольных кристаллах, что дает основание идентифицировать этот дефект как комплекс COV_2 .

В процессе выращивания кристаллов *p*-Si(Ge) вблизи атомов германия из-за создаваемых ими упругих напряжений могут формироваться ассоциации C_2O_i , за счет чего снимается степень деформации кристалла. Так как такие ассоциации находятся в «напряженной» области решетки, они являются эффективными стоками для возникающих при облучении вакансий. По этой причине в *p*-Si(Ge) и наблюдаются более высокие скорости образования комплексов COV_2 по сравнению с контрольными образцами (рис. 1, кривые 2, 3).

Сложный характер отжига этих комплексов в p -Si⟨Ge⟩ связан, по нашему мнению, со следующими обстоятельствами. Отрицательная стадия отжига ($T=100\div 230$ °C), как и в контрольном материале, вызвана дообразованием комплексов COV_2 , а отжиг их происходит при $T > 250$ °C, причем на первом этапе ($T=250\div 300$ °C), по-видимому, распадаются дефекты, локализованные вблизи атомов германия и находящиеся под воздействием их упругих полей.

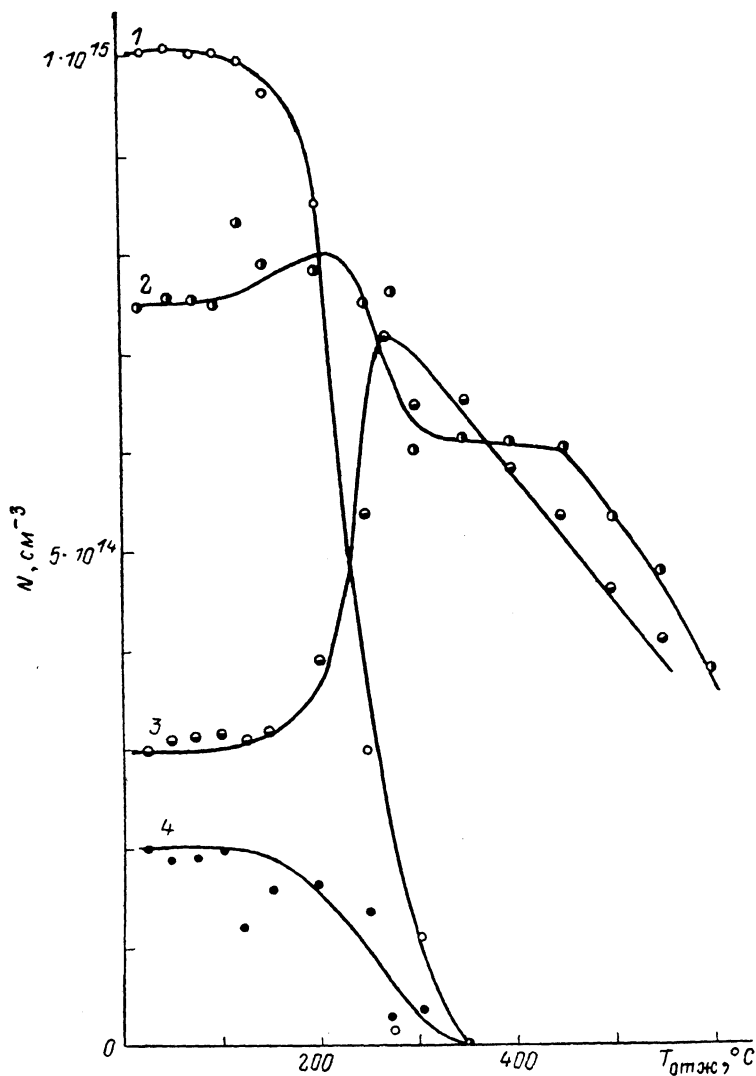


Рис. 2. Исохронный отжиг РД.
Обозначения те же, что и на рис. 1.

Это обусловлено изменением энергии активации отжига комплексов COV_2 из-за уменьшения энергий связи и миграции компонентов, что и приводит к понижению их температуры отжига. При более высокой температуре ($T > 400$ °C) отжигаются дефекты, сформированные вдали от атомов германия в «ненапряженной» решетке. Поэтому температура их отжига близка к температуре отжига этих комплексов в контрольном кремнии.

Дефекты с энергетическим уровнем $> E_v + 0.35$ эВ, отжигающиеся в интервале температур $200\div 300$ °C, могут быть идентифицированы, на наш взгляд, как комплексы междоузельный углерод—междоузельный кислород (C_iO_i) [8, 9], которые в кремнии, как считается, образуются путем присоединения подвиж-

ных междоузельных атомов углерода к междоузельным атомам кислорода. В p -Si<Ge> значительная часть атомов углерода локализована вблизи германия в ассоциациях C_2O_2 , а в узловом положении его концентрация мала. Поэтому узловой углерод в p -Si<Ge> не может быть основным стоком для генерируемых облучением междоузельных атомов кремния, в результате чего должна уменьшаться скорость введения атомов междоузельного углерода, а тем самым комплексов C_2O_2 , что и наблюдается в эксперименте (рис. 1). Заметим, что другим возможным механизмом образования комплексов C_2O_2 может быть захват междоузельного атома кремния ассоциацией C_2O_2 . Однако в p -Si<Ge> эти ассоциации локализованы преимущественно вблизи атомов германия, упругие поля которых отталкивают междоузельные атомы кремния, что также должно в итоге приводить к уменьшению скорости образования комплексов C_2O_2 .

Комплексы C_2O_2 в кремнии формируются вдали от атомов германия, поэтому в отличие от комплексов COV_2 и интервал температур их отжига в p -Si<Ge> совпадает с интервалом температур отжига этих комплексов в контрольном кремнии. Высвобождающиеся при отжиге комплексов C_2O_2 междоузельные атомы углерода могут взаимодействовать с A -центрами, что приводит к дообразованию комплексов COV_2 . Поскольку в p -Si<Ge> концентрация комплексов C_2O_2 меньше, чем в контрольном материале, в последнем дообразуется больше комплексов COV_2 .

Таким образом, полученные результаты показывают, что в выращенном методом Чохральского p -кремнии при облучении образуются два типа РД с близкими энергетическими уровнями [$E_v + (0.31 \pm 0.02)$ и $\geq E_v + 0.35$ эВ], которые обычно идентифицировались как один дефект (K -центр). Эти дефекты отжигаются в разных интервалах температур и, как установлено [11, 12], различаются коэффициентами захвата неравновесных носителей заряда. Соответствие скоростей образования комплексов COV_2 и C_2O_2 зависит от состояния примесей кислорода и углерода (изолированных или связанных в ассоциации) и распределения их по кристаллу, т. е. определяется условиями роста кристаллов.

Список литературы

- [1] Соловьева Е. В., Мильвидский М. Г. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 11. С. 2022—2024.
- [2] Кустов В. Е., Мильвидский М. Г., Семенов Ю. Г., Туровский Б. М., Шаховцов В. И., Шивдич В. Л. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 2. С. 270—274.
- [3] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шингаренко В. К., Шпинар Л. И., Ясковед И. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562—565.
- [4] Блецкан Н. И., Кузнецов В. И., Лугаков П. Ф., Салманов А. Р., Цикунов А. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2223—2226.
- [5] Lee Y. H., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [6] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А., Шуша В. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 401—404.
- [7] Ferenczi G., Lodos C. A., Pavelka T., Somogyi M., Mertens A. // Def. Semicond. Trans. Techn. Publ. Ltd. Switzerland, 1986. P. 947—951.
- [8] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мушин Л. И., Ткачев В. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 4. С. 776—780.
- [9] Trombetta J. M., Watkins G. D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 14. P. 1103—1105.
- [10] Lugakov P. F., Lukyanitsa V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 83. P. 521—528.
- [11] Mooney P. M., Cheng L. J., Suli M., Gerson J. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. B. 1977. V. 15. N 8. P. 3836—3843.
- [12] Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф., Филиппов И. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 4. С. 748—751.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получена 6.03.1989
Принята к печати 17.04.1989