

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВАКАНСИОННЫХ И МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЕЗДИСЛОКАЦИОННОГО n -КРЕМНИЯ

Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф.

Изучены процессы накопления радиационных дефектов (РД) вакансионного и междоузельного типов в бездислокационных монокристаллах n -кремния ($\rho \approx 100$ Ом·см), выращенных бестигельной зонной плавкой в атмосфере аргона. На различных этапах облучения γ -квантами ^{60}Co ($T_{\text{обл}} \leq 50$ °С) измерялись температурные (80–400 К) зависимости коэффициента Холла и электропроводности. Установлено, что в исследуемых кристаллах (по сравнению с контрольным кремнием, полученным в вакууме и имеющим плотность дислокаций $N_D \approx 2 \cdot 10^4$ см $^{-2}$) скорость введения E -центров ниже, A -центров выше, но суммарная скорость введения РД вакансионного типа меньше. При увеличении интегрального потока γ -квантов эффективность образования A -центров уменьшается, комплексов междоузельный углерод—узловой углерод возрастает, а E -центров изменяется немонотонно. Объяснение полученных результатов дано с учетом того, что при выращивании бездислокационных кристаллов в их объеме формируются мелкие включения, создающие анизотропные деформационные напряжения и окруженные атмосферой фоновых примесей (кислород, углерод). Под воздействием создаваемых включениями полей к ним направленно мигрируют первичные РД, где участвуют в комплексообразовании с примесями или исчезают в результате непрямой аннигиляции.

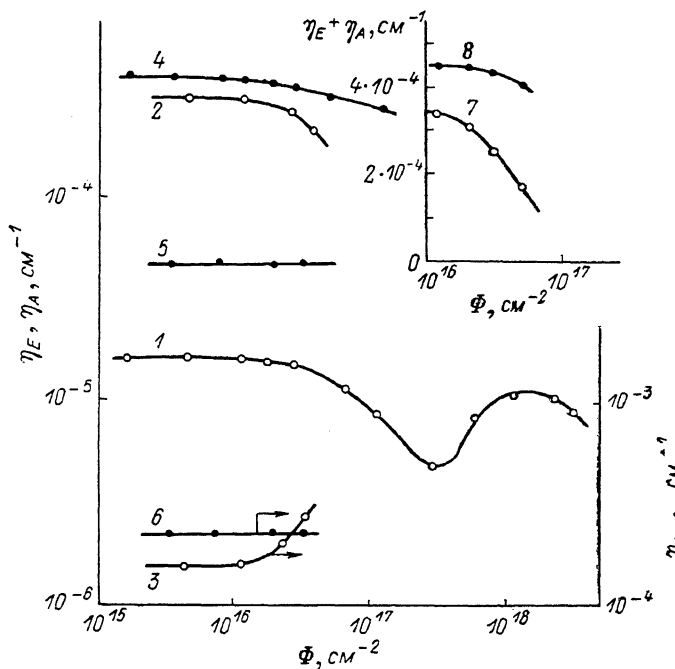
При облучении кремния образуются радиационные дефекты (РД) вакансионного (A -, E -, K -центры, дивакансии) и междоузельного (комплексы междоузельный углерод—узловой углерод $C_I C_S$, междоузельный углерод—междоузельный кислород $C_I O_I$) типов, скорость введения которых зависит от примесного состава и структурного совершенства исходных кристаллов [1–5]. В данной работе изучено влияние ростовых нарушений, формирующихся при получении бездислокационного кремния, на процессы накопления электрически активных РД.

Исследования проводились на монокристаллах бездислокационного n -кремния, выращенного бестигельной зонной плавкой в атмосфере аргона. Селективным травлением в этих образцах никаких дефектов выявлено не было. В качестве контрольного использовался содержащий ростовые дислокации ($N_D \approx 2 \cdot 10^4$ см $^{-2}$) зонный кремний n -типа, полученный в вакууме. Были подобраны образцы с примерно одинаковым исходным удельным сопротивлением $\rho \approx 100$ Ом·см. Концентрация кислорода и углерода, определенная по ИК поглощению, в исследуемых материалах не превышала $3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Облучение осуществлялось γ -квантами ^{60}Co при $T_{\text{обл}} \leq 50$ °С. На различных этапах облучения измерялись температурные (80–400 К) зависимости коэффициента Холла и электропроводности.

Из их анализа, выполненного с использованием дифференциальной методики [6], следует, что во всех исследуемых кристаллах энергетический спектр уровней основных компенсирующих РД одинаков. При этом наиболее эффективно образуются E -, A -центры и комплексы $C_I C_S$, вносящие в запрещенную зону акцепторные энергетические уровни $E_c - 0.43, 0.19$ и 0.16 эВ [1–4]. На рисунке приведены дозовые зависимости скоростей образования $\eta = N/\Phi$ этих РД (N — концентрация дефектов, Φ — интегральный поток γ -квантов). Как видно, по сравнению с контрольными в исследуемых кристаллах имеют

место следующие особенности: 1) скорость образования E -центров (η_E) ниже, а A -центров (η_A) выше; 2) меньше суммарная скорость образования РД вакансионного типа ($\eta_E + \eta_A$); 3) при увеличении Φ скорость образования A -центров уменьшается, а комплексов $C_I C_S$ возрастает; 4) η_E немонотонно изменяется с ростом Φ .

В зависимости от условий выращивания (скорость, осевой температурный градиент) бездислокационного кремния в его объеме образуются микродефекты [7] или не выявляемые селективным травлением мелкие включения (дефекты) [8, 9]. Можно предположить, что последние возникают при «замораживании» первичных междоузельных кластеров [10] и являются предшественниками (зародышами) свирлевых дефектов (прежде всего D -типа) [11]. Как и микродефекты [12], включения могут иметь атмосферу из фоновых примесей (кис-



Дозовые зависимости скоростей образования радиационных дефектов в исследуемых (кривые 1—3, 7) и контрольных (4—6, 8) кристаллах.

1, 4 — E -центры; 2, 5 — A -центры; 3, 6 — комплексы $C_I C_S$; 7, 8 — E - и A -центры.

лород, углерод), а в кристаллической решетке кремния они создают анизотропные поля упругих напряжений, под воздействием которых к таким включениям направленно мигрируют генерируемые облучением вакансии и собственные междоузельные атомы. Здесь они участвуют в комплексообразовании с присутствующими примесями, и поэтому в исследуемых кристаллах уменьшается скорость образования E -центров в матрице, а A -центры и комплексы $C_I C_S$ накапливаются преимущественно вблизи включений, где велика локальная концентрация кислорода и углерода ($\geq 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ согласно оценкам с учетом данных о скоростях введения этих РД). Из-за этого распределение A -центров и комплексов $C_I C_S$ по кристаллу оказывается неравномерным (в виде скоплений), в результате чего при облучении исследуемых кристаллов наблюдается более сильное (в 3—5 раз по сравнению с контрольными образцами) изменение холловской подвижности носителей заряда ($T_{взм} = 80 \text{ К}$), которая весьма чувствительна не только к концентрации рассеивающих центров, но и к их пространственному распределению.

Суммарные скорости введения вакансионных комплексов ($\eta_E + \eta_A$), как отмечалось, в исследуемых кристаллах оказываются более низкими, чем в контрольных. Это свидетельствует о том, что в кремнии, полученном зонной плавкой в атмосфере аргона, часть первичных РД исчезает (из-за их аннигиляции

или ухода на неконтролируемые стоки), не участвуя в образовании стабильных комплексов. Так как разница между значениями $\eta_E + \eta_A$ в исследуемых и контрольных образцах возрастает при увеличении Φ (кривые 7, 8), то это указывает на эффективное исчезновение первичных РД за счет их непрямой аннигиляции [13], когда по мере накопления вблизи включений А-центров и комплексов $C_I C_S$ растет доля взаимодействующих с ними собственных междоузельных атомов и вакансий.

При облучении зонного *n*-кремния, содержащего ростовые дислокации до $N_D \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, наблюдается примерное равенство скоростей введения РД вакансионного и междоузельного типов ($\eta_E + \eta_A \approx \eta_{C_I C_S}$) [14]. Во всех исследуемых нами кристаллах, как следует из приведенных на рисунке результатов, $\eta_E + \eta_A > \eta_{C_I C_S}$. Связано это может быть с тем, что здесь помимо комплексов $C_I C_S$ накапливаются и другие РД междоузельного типа, которые в условиях эксперимента являются нейтральными. Ими могут быть комплексы $C_I O_I$ [5], вносящие донорный энергетический уровень в нижнюю половину запрещенной зоны ($\sim E_g + 0.35 \text{ эВ}$). Если считать, что весь междоузельный углерод C_I при $T \geq 50^\circ \text{C}$ перестроился в комплексы $C_I C_S$ и $C_I O_I$, то $\eta_E + \eta_A \approx \eta_{C_I C_S} + \eta_{C_I O_I}$. Тогда представляется возможным оценить скорость образования комплексов $C_I O_I$ ($\eta_{C_I O_I}$) в исследуемых кристаллах, которая оказалась равной $1.8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Характерно, что с ростом интегрального потока γ -квантов $\eta_{C_I O_I}$ уменьшается (как и η_A), но зато увеличивается $\eta_{C_I C_S}$. Это обусловлено тем, что увеличение Φ приводит к уменьшению концентрации атомов кислорода в примесной атмосфере включений из-за накопления А-центров и комплексов $C_I O_I$, в силу чего междоузельные атомы углерода более эффективно взаимодействуют с узловым углеродом.

Атомы основной легирующей примеси (фосфора) не входят в состав примесной атмосферы включений, но некоторая их часть может находиться в зоне действия полей упругих напряжений, создаваемых включениями. Поэтому в исследуемом материале на начальных этапах облучения при направленной миграции первичных РД *E*-центры образуются преимущественно в окрестности включений. Но уже при достаточно малых Φ ($\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) здесь происходит ионизация атомов фосфора, в силу чего и наблюдается уменьшение η_E на начальных потоках облучения. Однако при дальнейшем увеличении Φ имеет место некоторое возрастание η_E . Накопление вакансионных и междоузельных комплексов вблизи включений приводит к компенсации создаваемых ими полей упругих напряжений, в результате чего *E*-центры образуются преимущественно в матрице кристалла, и η_E сначала растет, а затем уменьшается ($\Phi > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$), когда уровень Ферми при облучении смещается к середине запрещенной зоны [15].

В заключение заметим, что установленные особенности в процессах накопления РД имеют место также в бездислокационных кристаллах *n*-Si, полученных методом зонной плавки в вакууме, но проявляются здесь менее четко. Очевидно, при выращивании в аргоне условия и режимы роста (прежде всего соотношение скорости и осевого градиента температуры) оказываются наиболее оптимальными для формирования мелких включений, создающих деформационные напряжения в кристаллической решетке кремния. Такие включения могут быть зародышами для некоторых типов микродефектов, выявляемых селективным травлением.

Список литературы

- [1] Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1980. 294 с.
- [2] Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1961. V. 121. N 4. P. 1001—1014.
- [3] Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1964. V. 134A. N 5. P. 1359—1377.
- [4] Watkins G. D., Brower K. L. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36. N 22. P. 1329—1332.
- [5] Trombetta J. M., Watkins G. D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 14. P. 1103—1105.
- [6] Hoffman H. // J. Appl. Phys. 1979. V. 19A. N 3. P. 307—312.
- [7] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 472 с.
- [8] Колковский И. И., Лугаев П. Ф., Шуша В. В. // ФТП. 1979. Т. 23. В. 5. С. 885—887.

- [9] Junichi C. // Def. Prop. Semicond.: Def. Eng. Symp. Def. Qual. Semicond. Tokyo et al. 1987. P. 143—153.
- [10] Voronkov V. V. // J. Cryst. Growth. 1982. V. 59. P. 625—643.
- [11] Шейхет Э. Г., Червоный П. Ф., Фалькевич Э. С. // Высокочист. вещества. 1989. № 2. С. 50—55.
- [12] Критская Т. В., Неймарк К. Н., Шкляр Б. Л. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1986. Т. 22. В. 6. С. 1038—1039.
- [13] Болотов В. В., Васильев А. В., Смирнов Л. С. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 9. С. 1787—1789.
- [14] Литвинко А. Г., Макаренко Л. Ф., Мурин Л. И., Ткачев В. Д. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 4. С. 776—780.
- [15] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 581.

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

Получена 27.06.1990
Принята к печати 10.09.1990