

06;07

Зависимости концентрации дивакансий при облучении электронами от содержания Ge в сплаве $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 0.1$)

© Н.А. Матчанов

Физико-технический институт НПО „Физика-Солнце“ АН РУз,
Ташкент, Узбекистан
E-mail: sirnornur@uzsci.net

Поступило в Редакцию 4 апреля 2007 г.

Исследованы зависимости концентрации дивакансий от содержания Ge при облучении электронами 5 MeV в сплаве $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в интервале составов $0 < x < 0.10$. Показано, что в исследованном интервале составов вероятности образования первичных радиационных дефектов при облучении электронами слабо зависят от содержания германия.

PACS: 61.82.Fk, 61.80.Fe, 61.82.Bg

Как известно, основными радиационными дефектами в кремнии и в кремний-германий являются дивакансии, которые могут образоваться как при непосредственном облучении (первичные радиационные дефекты — ПРД), так и в результате взаимодействия вакансий при их термической активированной миграции. Дивакансии в кремнии могут существовать в четырех зарядовых состояниях: V_2^- , V_2^+ , V_2^0 , V_2^+ [1–7]. По данным инфракрасного поглощения (ИК) зарядовым состояниям V_2^- , V_2^0 , V_2^+ соответствуют три полосы поглощения вблизи 2500 ($3.97 \mu\text{m}$ или 0.3125 eV) cm^{-1} , 2760 ($3.59 \mu\text{m}$ или 0.345 eV) cm^{-1} и 5560 ($1.78 \mu\text{m}$ или 0.695 eV) cm^{-1} соответственно. Одним из методов оценки концентрации дивакансий в кремнии и сплаве кремний-германий является измерение ИК-поглощения вблизи $k = 5560 \text{ cm}^{-1}$ [1–8]. Так как измерения проводятся в области $h\nu < E_g$, величина коэффициента поглощения α составляет от 1 до десятков cm^{-1} .

Известно, что твердый раствор кремний-германий при малых содержаниях германия обладает повышенной радиационной стойкостью [8,9].

Причиной этого является наличие центров аннигиляции первичных радиационных дефектов, в роли которых выступают изовалентные атомы германия [9]. Эксперименты, проведенные на образцах (содержание германия до 2 at.%), облученных электронами с энергией ~ 3 MeV при фиксированной дозе $\sim 6 \cdot 10^{17}$ e/cm², подтвердили это предположение. Однако при существенном увеличении интенсивности введения первичных радиационных дефектов реакции аннигиляции на изовалентных примесях могут быть недостаточными для увеличения радиационной стойкости материала.

В данной работе приводятся результаты исследования зависимости концентрации дивакансий от содержания Ge в сплаве Si_{1-x}Ge_x ($0 < x < 0.1$) при облучении электронами с энергией 5 MeV при различных дозах.

Монокристаллы твердых растворов Si_{1-x}Ge_x ($0 < x < 0.1$) были выращены методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки на установке JEBZ-3B (Япония) в вакууме 10^{-5} – 10^{-7} Торр. Монокристаллические слитки с переменным составом (т.е. содержание германия растет вдоль кристалла), с ориентацией $\langle 111 \rangle$ имели *p*-тип проводимости. Слитки монокристаллов Si_{1-x}Ge_x были разрезаны на пластины с толщиной ~ 550 μ m. Состав образцов измеряли методом гидростатического взвешивания и рентгеновским микроанализатором „Сатеса“. Удельное сопротивление образцов, которое составляло 150–250 $\Omega \cdot$ cm, измеряли методом четырех зондов. Спектры ИК-поглощения измерялись на спектрометре ИКС-12 при комнатной температуре.

С целью удаления нарушенного слоя и получения правильной формы образцы шлифовались шлифпорошком М14 и М10. При этом с обеих сторон пластин удалены слои не менее чем 50 μ m. После этого пластины полировались с использованием алмазного порошка (диаметр частиц в алмазном порошке меньше, чем 2 μ m) до получения зеркально-гладкой поверхности. Чтобы очистить поверхность и удалить нарушенные слои, образцы подвергались травлению в специальной травильной смеси плавиковой и азотной кислоты (СР-4). После этих процедур образцы имели зеркально-гладкую поверхность и толщину ~ 300 – 400 μ m.

Электронное облучение образцов (в интервале составов $0 < x < 0.1$) производилось микроволновыми электронами с

энергией 5 MeV с тремя дозами облучения $1 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{16}$ e/cm², на стандартном электронном ускорителе (ЭЛУ).

Спектры ИК-поглощения измерены на спектрометре ИКС-12 при комнатной температуре.

При малых коэффициентах поглощения α ($1-3 \text{ cm}^{-1}$) для измерения обычно используют образцы толщиной 1–2 mm. В наших кристаллах сплава имеется градиент концентрации обычно около 10 at.%/cm. Следовательно, образец с толщиной 1 mm имеет разность содержания германия в шайбе около 1 at.%. В связи с этим измерения проводились на образцах толщиной 300–400 μm .

Как известно, моделью радиационного дефектообразования (РДО) в сплаве $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при электронном облучении материала, предсказывающей зависимость концентрации дивакансий от содержания Ge, является модель, выдвинутая В.И. Шаховцовым и др. [10]. Согласно этой модели, процесс РДО рассматривается следующим образом: при облучении вводятся ПРД (междоузельные атомы I, вакансии V и дивакансии V_2), скорость их введения не зависит от содержания германия при малых концентрациях второго компонента. Известно что, атомы Ge в сплаве создают локальные напряжения кристаллической решетки и образуют комплексы GeV (комплекс германий–вакансия) [7,8,10], и при этом рассматриваются следующие реакции:



для концентрации дивакансий N_{V_2} при фиксированной дозе получено выражение вида

$$N_{V_2} = A + \frac{B}{N_{\text{Ge}}^2}, \quad (6)$$

где N_{Ge} — концентрация германия, A и B — величины, зависящие от скорости введения первичных радиационных дефектов, вероятностей реакций (1)–(5), времени жизни I, V, V_2 .

В этой модели скорость введения ПРД полагалась независимой от содержания Ge в сплаве (рассматривались образцы с малым содержанием Ge до 10^{18} cm^{-3}). В наших кристаллах содержание Ge порядка $10^{20-22} \text{ cm}^{-3}$ и скорость введения ПРД линейно зависят от содержания Ge. Кроме того, при высоких интенсивностях введения ПРД ход реакций (1)–(5) может измениться. Поэтому систему уравнений следует решать учитывая тот факт, что в сплаве концентрация Ge $\sim 10^{20-22} \text{ cm}^{-3}$ ($\text{Ge} \gg \text{I}, \text{V}, \text{GeV}, \text{GeV}_2$). Кроме этого, при одинаковых дозах облучения ($\Phi = it$) можем наблюдать различные зависимости $V_2(\text{Ge})$ при разных интенсивностях облучения i . Поэтому при решении уравнений радиационного дефектообразования следует учитывать вклад вышеуказанных фактов.

В работе [11] нами было получено выражение с учетом вышеуказанных фактов. Было показано, что вид зависимостей концентрации дивакансий описывается выражением (7) для облучения быстрыми и тепловыми нейтронами, а также при облучении электронами при малых x :

$$v_2 \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_{V,V}(\alpha_{Si} + \beta_{Si} + x(\beta_{Ge} - \alpha_{Si} - \beta_{Si}))it}{\omega_{V,V} + \frac{\omega_{V,Ge}^2 x^2 N_s^2}{(\alpha_{Si} + \beta_{Si} + x(\beta_{Ge} - \alpha_{Si} - \beta_{Si}))i}} + B, \quad (7)$$

где v_2 — концентрация дивакансий, $\alpha, \beta, \alpha + \beta$ ($\alpha = \alpha_{Si}(1-x)$, $\beta = \beta_{Si}(1-x)$, $\alpha_1 = \alpha_{Ge}x$, $\beta_1 = \beta_{Ge}x$) — скорости введения ПРД для вакансий V, дивакансий V_2 и междоузельных атомов I соответственно; $\omega_{i,j}$ — сечения соответствующих реакций между дефектами; x — атомная доля германия в сплаве; $N_s = 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ — плотность узлов решетки сплава; i — интенсивность радиационного облучения; t — время облучения; C — неопределенная постоянная величина, равная отношению концентраций междоузельных атомов и вакансий на квазистационарном участке РДО. С целью исследования вклада этой зависимости в радиационное дефектообразование в сплаве нами было проведено облучение образцов (в интервале составов $0 < x < 10$) электронами с энергией 5 MeV, тремя дозами облучения $1 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$, $5 \cdot 10^{16} \text{ e/cm}^2$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ e/cm}^2$.

Как уже говорилось выше, при значительном содержании германия в сплаве вероятности реакций между первичными радиационными дефектами могут зависеть от состава. Концентрацию дивакансий в от-

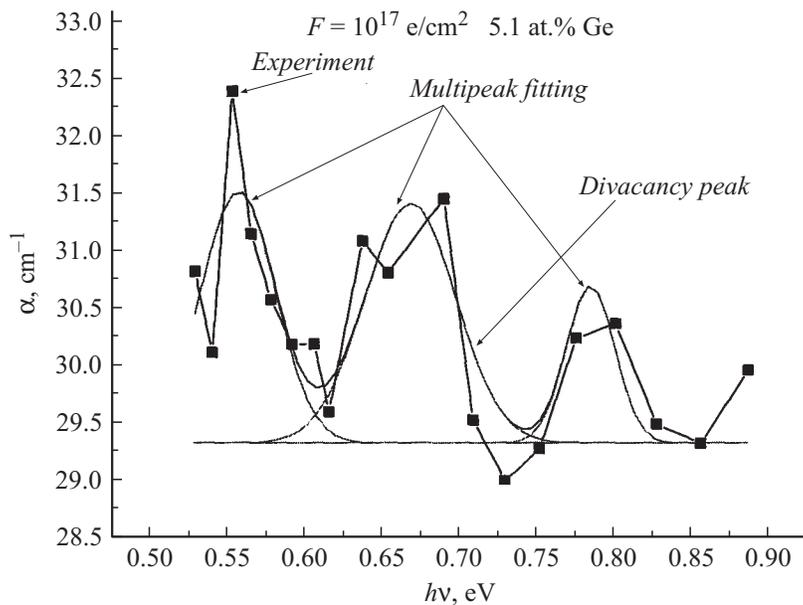


Рис. 1. ИК-спектр образца с содержанием германия 5.1 at.%.

носительных единицах определяли по данным ИК-поглощения в полосе поглощения дивакансий. На рис. 1, 2 приведены спектры ИК-поглощения некоторых образцов сплава, облученных электронами.

В качестве оценки концентрации дивакансий авторы [10] брали высоту пика поглощения дивакансий. При этом коэффициент поглощения полагался прямо пропорциональным концентрации радиационных дефектов. Однако, как показано в ряде исследований [12,13], пики оптического поглощения уширяются в сплавах и твердых растворах из-за нарушения трансляционной симметрии решетки и флуктуаций состава. Это уширение сильно проявляется при большом содержании германия в сплаве. В таких случаях для оценки обычно используется не высота пика, а ее площадь. В связи с этим нами был ранее проведен перерасчет некоторых экспериментальных данных по ИК-поглощению дивакансий в сплавах [14]. Оказалось, что при использовании площади пика в качестве оценки концентрации дивакансий вид полученных в

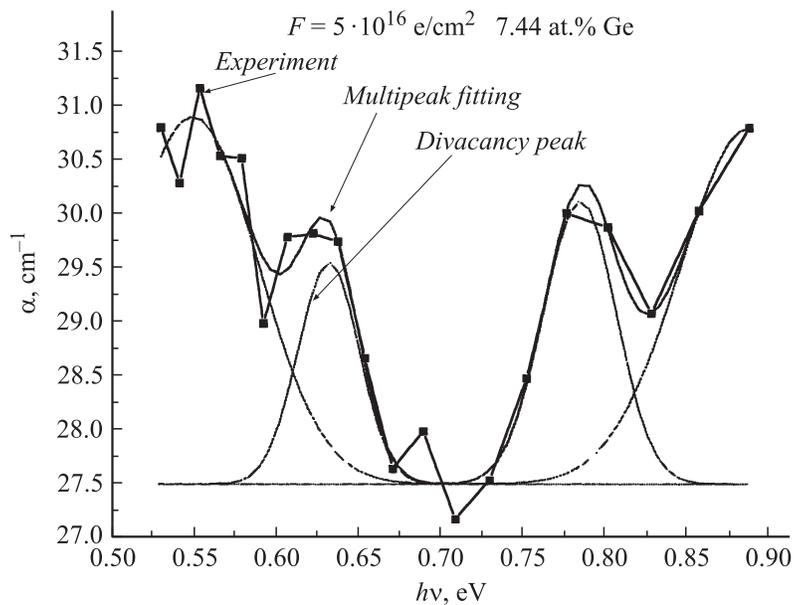


Рис. 2. ИК-спектр образца с содержанием германия 7.44 at.%.

относительных единицах зависимостей не меняется. Следует отметить, что уширение пиков поглощения приводит к более полному их перекрытию, что может привести к „кажущему“ уменьшению высоты пика и к ошибочному заключению о снижении концентрации дивакансий.

В связи с этим нами проводилась компьютерная подгонка данных ИК-поглощения. При этом положения пиков дивакансий нами задавались по данным, полученным ранее нами на Фурье-спектрометре IFS-113V [11,15].

На рис. 1, 2 представлены результаты компьютерной подгонки. Во всех исследованных образцах в спектре ИК-поглощения, около пика дивакансий ($k = 5560 \text{ cm}^{-1}$, $1.78 \mu\text{m}$ или 0.695 eV) наблюдается еще два пика: 0.55 eV ($k = 4400 \text{ cm}^{-1}$) и 0.78 eV ($k = 6240 \text{ cm}^{-1}$). Компьютерная подгонка осуществлялась с учетом этих двух ближайших соседних пиков поглощения от других дефектов кристалла. Более дальние

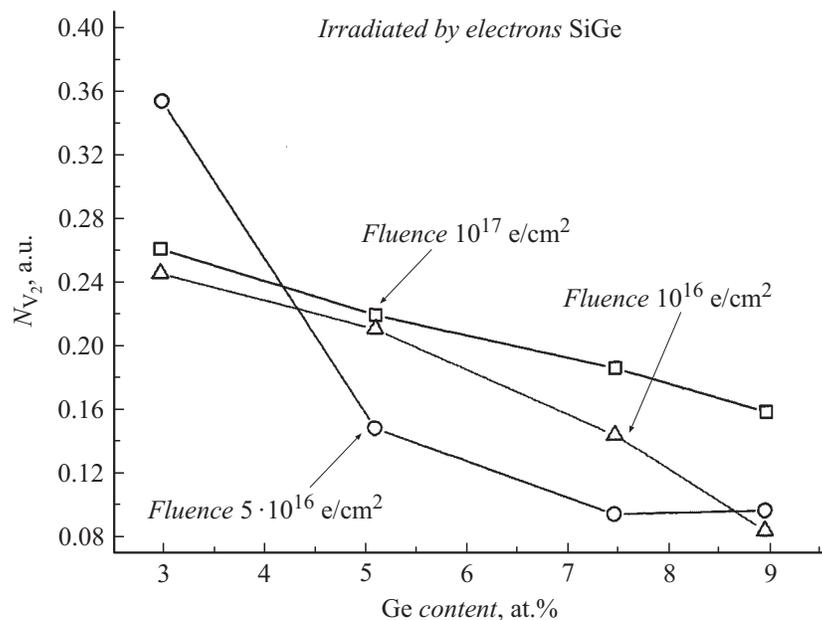


Рис. 3. Зависимость концентрации дивакансий в сплаве от состава сплава для различных доз облучения.

пики нами не учитывались при подгонке, полагалось, что перекрытие дальних пиков несущественно. Как видно из рисунков, вид зависимости в пределах экспериментальной ошибки совпадает с зависимостями, полученными для кристаллов с малым содержанием германия.

На рис. 3 приведена зависимость концентрации дивакансий в сплаве от состава сплава для различных доз облучения. Как видно из рисунка, концентрация дивакансий в сплаве слабо зависит от содержания германия в сплаве.

Из выражения (7) следует, что увеличение интенсивности введения ПРД (ростом i) приводит к снижению вклада атомов германия ПРД. Здесь атомы Ge выступают как центры аннигиляции ПРД. При этом скорость введения ПРД растет с ростом содержания Ge в сплаве. В результате концентрация дивакансий медленно снижается с ростом

содержания Ge в сплаве $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рис. 3) и экспериментальные данные по облучению сплава электронами в интервале состава $0 < x < 0.10$ находятся в согласии с выражением (7).

Таким образом, показано, что с ростом скорости введения ПРД (с ростом i) вклад атомов германия как центров аннигиляции ПРД снижается, а скорость введения ПРД растет в сплаве в интервале составов $0 < v < 0.1$. В результате вероятность образования ПРД при облучении электронами слабо зависит от содержания германия. Полученные экспериментальные результаты находятся в согласии с выражением (7) при облучении сплава электронами с энергией 5 MeV при различных дозах.

Работа финансируется фондом поддержки фундаментальных исследований Узбекистана (контракт № Ф.2-1-75) и при частичной поддержке фонда УНТЦ (контракт № 3126).

Автор выражает глубокую признательность И.Г. Атабаеву за полезные дискуссии по работе и Д.Ш. Саидову за оказанную помощь при проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Watkins G.D., Corbett J.W.* // Physical Review. 1965. V. 138. P. A543–A555.
- [2] *Corbett J.W., Watkins G.D.* // Physical Review. 1965. V. 138. P. A555–A560.
- [3] *Young R.C., Corelli J.C.* // Physical Review. 1972. V. B5. P. 1455–1467.
- [4] *Cheng L.J., Corelli J.C., Corbett J.W., Watkins G.D.* // Physical Review. 1966. V. 152. P. 761–774.
- [5] *Svensson B.G., Willander M.* // Journal of Applied Physics. 1987. V. 62. Is 7. P. 2758–2762.
- [6] *Смирнов Л.С.* Вопросы радиационной технологии полупроводников. Новосибирск: Наука, 1980. С. 20.
- [7] *Емцев В.В., Машовец Т.В.* Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь, 1981. С. 42.
- [8] *Помозов Ю.В., Соснин М.Г., Хируненко Л.И., Абросимов Н.В., Шредер В.* // ФТП. 2001. Т. 35. В. 8. С. 927–931.
- [9] *Atabaev I.G., Saidov M.S., Yusupov A., Khirunenko L.I., Shakhovtsov V.I., Shinkarenko V.K., Shpinar L.I.* // Sov. Phys. Semicond. 1987. V. 21. N 3. P. 350–351.
- [10] *Хируненко Л.И., Шаховцов В.И., Шинкаренко В.К., Шпинар Л.И., Ясковец И.И.* // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562–565.

- [11] *Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д.Ш., Хажиев М.У.* // Конференция по фундаментальным и прикладным проблемам физики полупроводников. Андижан, 2005, 20–21 декабря. С. 19–21. (*Atabaev I.G., Matchanov N.A., Saidov M.S., Yusupov A., Saidov D.Sh.* // Computational Materials Science. 2007).
- [12] *Саидов М.С., Атабаев И.Г.* и др. // ДАН РУз. 1986. № 3. С. 24–25.
- [13] *Gosand A.E., Spitzer W.G.* // J. of Appl. Phys. 1971. V. 42. N 13. P. 5241–5249.
- [14] *Атабаев И.Г., Матчанов Н.А., Саидов Д.С., Хажиев М., Салиев Т.М.* // Материалы конференции, посвященной Году физики-2005 „Физика в Узбекистане“. 27–28 сентября, 2005. С. 48–50.
- [15] *Саидов М.С., Лутпуллаев С.Л., Юсупов А., Атабаев И.Г., Хируненко Л.И., Матчанов Н.А., Саидов Д., Хажиев М.У.* // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 9. С. 1582–1584.