

Зависимость концентрации дивакансий от содержания германия в сплаве $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при облучении быстрыми и медленными нейтронами

© М.С. Саидов, С.Л. Лутпуллаев, А. Юсупов, И.Г. Атабаев,
Л.И. Хируненко*, Н.А. Матчанов, Д. Саидов, М.У. Хажиев

Физико-технический институт, НПО „Физика-Солнце“ Академии наук Узбекистана,
700084 Ташкент, Узбекистан

* Институт физики Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

E-mail: sirnornur@uzsci.net

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 15 августа 2006 г.)

Представлены результаты исследования зависимости концентрации дивакансий в монокристаллах твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, введенных облучением медленными и быстрыми нейтронами от содержания германия. Показано, что в указанных составах при облучении быстрыми и медленными нейтронами роль аннигиляции первичных радиационных дефектов на атомах германия снижается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Центра науки и технологии Республики Узбекистан (контракт № Ф.2-1-75), а также при частичной поддержке фонда STCU (контракт N 3126).

PACS: 61.80.-x, 61.80.Hg, 81.40.Wx

1. Введение

Известно, что твердый раствор кремний–германий при малых содержаниях германия обладает повышенной радиационной стойкостью [1,2]. Причиной этого является наличие центров аннигиляции первичных радиационных дефектов (ПРД), в роли которых выступают атомы германия. Эксперименты, проведенные на облученных электронами образцах, подтвердили это предположение [3–6]. Однако при существенном увеличении интенсивности введения ПРД реакции аннигиляции на изовалентных примесях могут быть недостаточными для увеличения радиационной стойкости материала. В работах [7–10] исследованы электрофизические свойства твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, облученных нейтронами, и температурные режимы отжига радиационных дефектов и др.

В настоящей работе приводятся результаты исследования радиационного дефектообразования (РДО) в твердых растворах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при облучении быстрыми и медленными нейтронами.

Известной моделью РДО в сплаве $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с малым содержанием германия является модель, выдвинутая Шаховцовым и др. [11], в которой предполагалось, что атомы германия являются центрами аннигиляции ПРД. Модель предсказывала уменьшение концентрации дивакансий при одинаковых дозах облучения пропорционально $1/N_{\text{Ge}}^2$, где N_{Ge} — концентрация германия в сплаве, что и было обнаружено в экспериментах по электронному облучению (рис. 1).

В этой модели скорость введения ПРД полагалась независимой от концентрации германия (рассматривались образцы с малым содержанием германия

до 10^{18} cm^{-3}); теория была развита для электронного облучения.

В нашем случае содержание германия в образцах было порядка $10^{20}–10^{22} \text{ cm}^{-3}$ и скорость введения ПРД в них должна расти с увеличением содержания германия в сплаве. Кроме того, при нейтронном облучении скорость введения ПРД намного выше, чем при электронном облучении. Изменение радиационной стойкости в этом случае будет зависеть от соотношения между ростом скорости введения ПРД и мощности стока через центры аннигиляции (атомы германия) при увеличении содержания германия в сплаве. Таким образом, одной из задач данного исследования является качественная оценка влияния скорости введения ПРД на форму зависимости концентрации дивакансий от содержания германия в облученных образцах. Для этого качественно сравни-

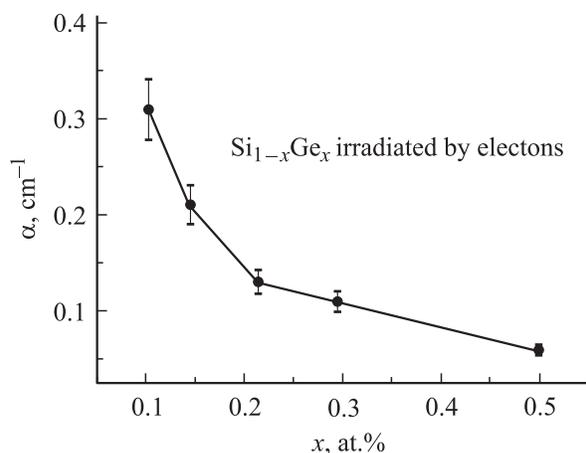


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от состава при электронном облучении по [3].

ваются результаты по РДО в сплаве при облучении электронами (рис. 1) [3], тепловыми и быстрыми нейтронами, когда интенсивность введения ПРД различается на порядки.

2. Методика и эксперимент

Монокристаллы твердых растворов были выращены методом электронно-лучевой зонной плавки в вакууме (10^{-6} – 10^{-7} Torr) на установке JEBZ-3B (Japan). Монокристаллические слитки $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ выращивались от затравок из монокристаллического кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ со скоростью роста $0.75 \cdot 10^{-4}$ cm/s. При этом скорость вращения нижнего штока составляла $\sim 3.5 \cdot 10^{-2}$ c/s. Затем слитки разрезались на пластины толщиной 0.7–1.2 mm. Образцы получались дырочного типа проводимости с удельным сопротивлением 150–250 $\Omega \cdot \text{cm}$. Состав образцов контролировался методом гидростатического взвешивания, который позволяет определить плотность образцов с точностью ± 0.005 [12], и на рентгеновском микроанализаторе „Самес“. Состав исследуемых кристаллов изменялся от 0.5 до 25 at.%. При этом градиент концентрации германия был постоянным и составлял ~ 0.079 at.fraction/cm.

Облучение нейтронами проводилось в „мокром“ канале реактора ВВР. Спектры ИК-поглощения измерялись на Фурье-спектрометре IFS-113V при комнатной температуре.

3. Результаты

Для оценки концентрации радиационных дефектов (дивакансий) нами было использовано значение коэффициента ИК-поглощения в области поглощения дивакансий (коэффициент поглощения полагался прямо пропорциональным концентрации радиационных дефектов). На рис. 2, 3 приведены зависимости коэффициента поглощения от состава образцов после облучения быстрыми и медленными нейтронами. Доза облучения составляла 10^{18} neutron/cm².

Как видно, при облучении нейтронами концентрация дивакансий возрастает с ростом концентрации Ge, т.е. в противоположность данным по электронному облучению радиационная стойкость материала не растет с ростом содержания германия. При облучении быстрыми нейтронами концентрация дивакансий монотонно растет: видимо, скорость введения ПРД настолько высока, что процессы их аннигиляции на атомах германия практически не проявляются. Однако при облучении медленными нейтронами при содержании германия свыше 8 at.% концентрация дивакансий начинает снижаться. Таким образом, при указанных составах рост скорости введения ПРД компенсируется ростом скорости аннигиляции их на изовалентных примесях германия [13].

Измерены также зависимости максимума поглощения дивакансий в сплаве, облученном медленными и бы-

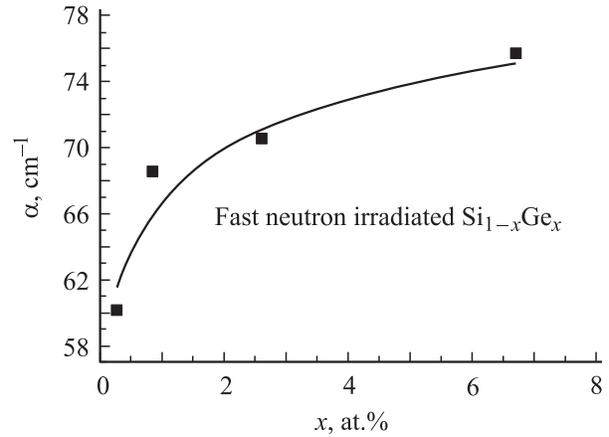


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения от состава при облучении быстрыми нейтронами.

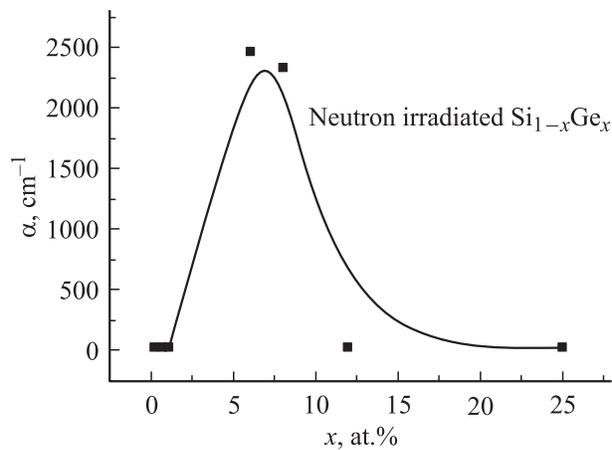


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от состава при облучении медленными нейтронами.

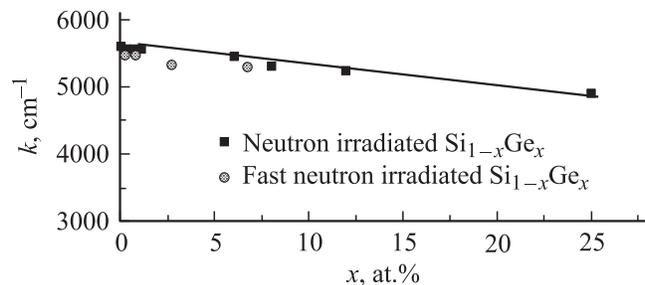


Рис. 4. Смещение максимума пика поглощения дивакансий в зависимости от состава твердого раствора при облучении медленными и быстрыми нейтронами.

стрыми нейтронами, от состава кристалла в интервале составов от 0.5 до 25 at.% (рис. 4).

Сравнение показывает, что смещение пиков в пределах экспериментальной ошибки совпадает при облучении как быстрыми, так и медленными нейтронами. Оно составляет приблизительно $28 \text{ cm}^{-1}/\text{at.}\%$

(или $0.0028 \text{ eV/at.}\%$), что находится в хорошем соответствии с изменением ширины запрещенной зоны сплава ($0.0023 \text{ eV/at.}\%$).

4. Заключение

Таким образом, получены экспериментальные зависимости концентрации дивакансий в нейтронно облученных образцах сплава кремний–германий в зависимости от содержания германия в интервале составов $0.005 < x < 0.25$. Показано, что при указанных составах при облучении быстрыми и медленными нейтронами роль аннигиляции ПРД на атомах германия снижается, что приводит к расхождению с моделью, развитой в [3].

Список литературы

- [1] M. Gluck, J. Hersener, H.G. Umbach, J. Rappich. *Solid State Phenomena* **57-58**, 413 (1997).
- [2] L.I. Khirunencko, Yu. V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.V. Abrosimov, M. Hohne, W. Shroeder. *Solid State Phenomena* **69-70**, 209 (1999).
- [3] И.Г. Атабаев, М.С. Саидов, Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.К. Шинкаренко, Л.И. Шпинар, А. Юсупов. *ФТП* **21**, 570 (1987).
- [4] Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.В. Шумов. *ФТП* **32**, 132 (1998).
- [5] И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов. В кн.: *Фотоэлектрические явления в полупроводниках*. Ташкент (2004). С. 100.
- [6] I.G. Atabaev, N.A. Matchanov, E.N. Bakhranov, M. Hajiev, D.S. Saidov. In: *Book of abstracts of the 20th general conf. of the condensed matter division of the european physical society*. Prague (2004). P. 118.
- [7] А.Г. Забродский, М.С. Саидов, И.Г. Атабаев, В.А. Евсеев, Р.Ф. Коноплева, В.А. Чеканов, А. Юсупов. *ФТП* **20**, 2042 (1986).
- [8] А.Г. Забродский, В.А. Евсеев, Р.Ф. Коноплева, В.А. Чеканов, М.С. Саидов, А. Юсупов, И.Г. Атабаев. *Письма в ЖТФ* **10**, 495 (1984).
- [9] А.Г. Забродский, В.А. Евсеев, Р.Ф. Коноплева, В.А. Чеканов, М.С. Саидов, А. Юсупов, И.Г. Атабаев. *ФТП* **20**, 2052 (1986).
- [10] I.S. Shlimak, V.V. Emtsev. *Phys. Stat. Sol. (b)* **47**, 325 (1971).
- [11] Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.К. Шинкаренко, Л.И. Шпинар, И.И. Ясковец. *ФТП* **21**, 562 (1987).
- [12] Э. Бонштендт-Куплетская. *Определение удельного веса минералов*. Изд-во АН СССР, М. (1951).
- [13] И.Г. Атабаев, Н.А. Матчанов, Д.Ш. Саидов, М.У. Хажиев. В сб.: *Тр. науч. конф. „Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников“*. Андижан (2005). С. 19.