

О ВЛИЯНИИ ЯДЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА РАДИАЦИОННОЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В Si<Ge>

Воеводова А. В., Коршунов Ф. П., Соболев Н. А., Стук А. А.

Исследована излучательная рекомбинация (ИР) на дефектах структуры в исходном и ядерно легированном (ЯЛ) Si <Ge>, создаваемых электронным облучением и последующим отжигом.

Обнаружен ряд новых центров ИР, предположительно включающих в свой состав атомы Ge. Различия в спектрах ИР исходных и ЯЛ образцов интерпретируются как результат внутреннего геттерирования примесей в процессе ЯЛ.

Предположение о том, что остаточные дефекты структуры в кремнии, подвергнутом ядерному легированию (ЯЛ), равно как и изовалентные примеси, например Ge, могут служить центрами аннигиляции вакансий и междоузельных атомов, создаваемых облучением, активно исследуются в последние годы [1-3]. Однако выводы, сделанные различными авторами, противоречивы.

Данная работа посвящена изучению влияния ЯЛ и примеси Ge на образование и отжиг центров излучательной рекомбинации (ИР) в кремнии при электронном облучении и последующей термообработке.

В качестве исходного материала использовался монокристаллический кремний *n*-типа, легированный Р в концентрации $N_P = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и Ge (средняя концентрация $N_{Ge} = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ определялась методом нейтронно-активационного анализа). Разброс N_{Ge} по сечению образцов определялся методом рентгено-спектрального микроанализа на приборе Microscan-5 при диаметре электронного зонда $\sim 3 \text{ мкм}$ и составил $(1.0 \div 3.2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрации кислорода и углерода измерялись методом ИК поглощения и составили $N_O = 4 \cdot 10^{16}$, $N_C = (5 \div 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Часть исходного слитка была подвергнута облучению нейтронами в реакторе ВВРц (соотношение потоков тепловых и быстрых нейтронов $R_{Cd} \approx 10$, флюенс тепловых нейтронов $\Phi_{тн} = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, температура образца при облучении $T_{0.5} \approx 60 \text{ }^\circ\text{C}$) и последующей термообработке в хлорсодержащей атмосфере при $820 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. Затем исходный и ЯЛ образцы были облучены 4 МэВ электронами ($\Phi_e = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $T_{0.5} \approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$) и подвергались термообработке в печи на воздухе в температурном диапазоне $100 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $25 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 мин.

Рекомбинационное излучение возбуждалось Ag^+ -лазером ($P_{\text{max}} = 1 \text{ Вт}$), анализировалось решеточным монохроматором и регистрировалось ФЭУ с фотокатодом С-1. Образцы при измерениях находились в гелиевом криостате при 4.2 К .

В спектрах ИР необлученных кристаллов Si<Ge> наблюдаются линии, обусловленные ИР свободных экситонов, а также экситонов и многоэкситонных комплексов, локализованных на узельных атомах фосфора. После облучения на различных стадиях отжига наблюдались узкие бесфононные линии ИР экситонов, связанных на радиационных дефектах (РД). Эти спектры приведены на рис. 1. В них были идентифицированы ряд ранее наблюдавшихся линий, а также новые бесфононные линии *M78—M83* (см. таблицу). Эти новые линии никогда не наблюдались в спектрах ИР облученного кремния, не содержащего примесь Ge, и могут быть приписаны комплексам, включающим атомы Ge. Зависимость интенсивности наиболее ярких линий ИР от T_{70} представлена на рис. 2.

Все линии в спектрах ИР облученного Si<Ge> несколько уширены за счет флуктуаций концентрации Ge по объему кристалла. Для экситонов, связанных на атомах фосфора и известных из литературы дефектных центрах ИР, обнаружен сдвиг линий в длинноволновую область на 0.15 МэВ. Величины сдвига и уширения линий согласуются с данными работы [4]. Линия M80 состоит по крайней мере из двух компонент, которые не разрешаются из-за упомянутого уширения.

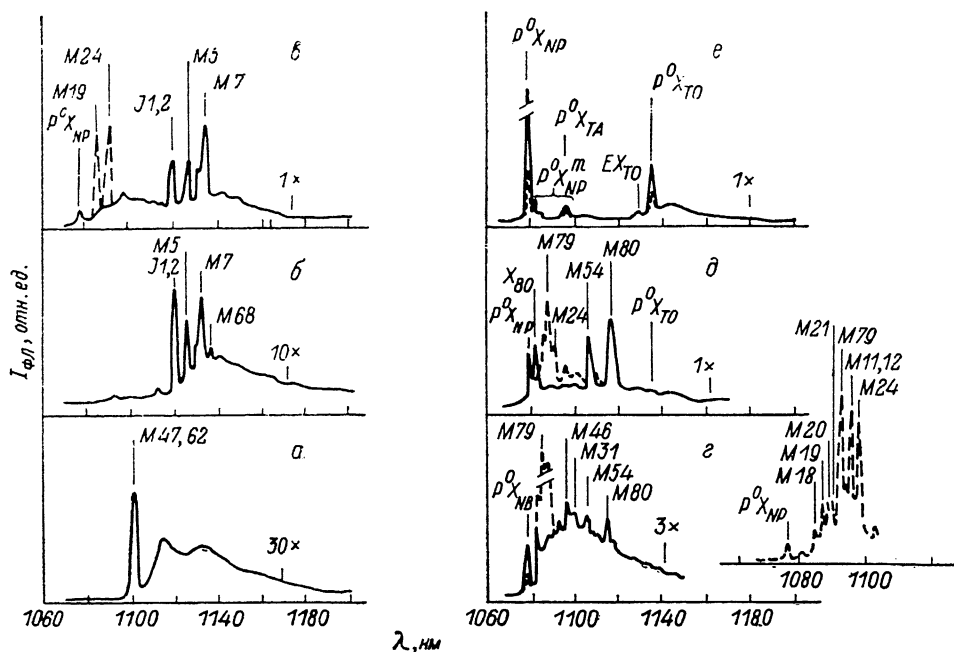


Рис. 1. Спектры ИР облученного Si<Ge> на различных стадиях отжига.

T_{TO} , °C: а — 20, б — 350, в — 450, г — 500, д — 575, е — 700. Спектральное разрешение 1.3 нм. На вставке к спектру г представлен фрагмент спектра, зарегистрированный с разрешением 0.25 нм. Сплошные кривые — спектры ЯЛ образцов, штриховые — спектры исходных образцов. P^0X и P^0X^m — экситоны и многоэкситонные комплексы, связанные на уловных атомах фосфора. Индексы NP, TA, LO, TO обозначают бесфононные (NP) переходы и переходы с испусканием TA-, LO- и TO-фононов соответственно.

В целом спектры ИР исходных и ЯЛ образцов очень схожи (рис. 1). Совпадают все стадии отжига. Однако наблюдаются и различия, наиболее неожиданным из которых является исчезновение линий M11, 12, 19, 24 в спектрах ЯЛ серии образцов по сравнению с исходными образцами. Интенсивность некоторых других линий (M8, 54, 79) уменьшается в 2—3 раза. В ЯЛ материале различается также набор центров безызлучательной рекомбинации. Это видно из сравнения зависимости от T_{TO} абсолютной интенсивности линий X_{80} , M54, M80 с их интенсивностью, нормированной на интенсивность линии свободного

Характеристики линий ИР в облученном электронами Si<Ge>

Линия	$h\nu$, эВ	T_{TO} , °C	Литература	Линия	$h\nu$, эВ	T_{TO} , °C	Литература
J1	1.1067	300÷500	[9]	M46	1.1291	375÷500	[10]
J2	1.1075	300÷500		M54	1.1196	500÷650	
M5	1.1010	325÷450	M56	1.1140	325÷450		
M7	1.0944	325÷450	M68	1.0902	325÷450		
M11	1.1379	450÷575	[9]	M78	1.1460	525÷575	—
M12	1.1376	450÷575		M79	1.1397	450÷575	—
M18	1.1446	500÷550		M80	1.1107	450÷650	—
M19	1.1429	425÷575		M81	1.075	525÷575	—
M24	1.1364	375÷600		M82	1.071	525÷575	—
M26	1.1315	500÷625		M83	1.068	525÷575	—
				X_{80}	1.1469	475÷650	[5]

экситона, для исходных и ЯЛ образцов (рис. 2). Но ни одна из линий, за исключением линий экситонов, связанных на узельном фосфоре, не увеличивается по интенсивности в ЯЛ образцах по сравнению с исходными. Отсюда, в частности, следует, что ни один из наблюдаемых центров ИР не включает фосфор, поскольку его концентрация увеличивается в результате ЯЛ на порядок. Это не согласуется со сделанным в работе [5] предположением о том, что центры

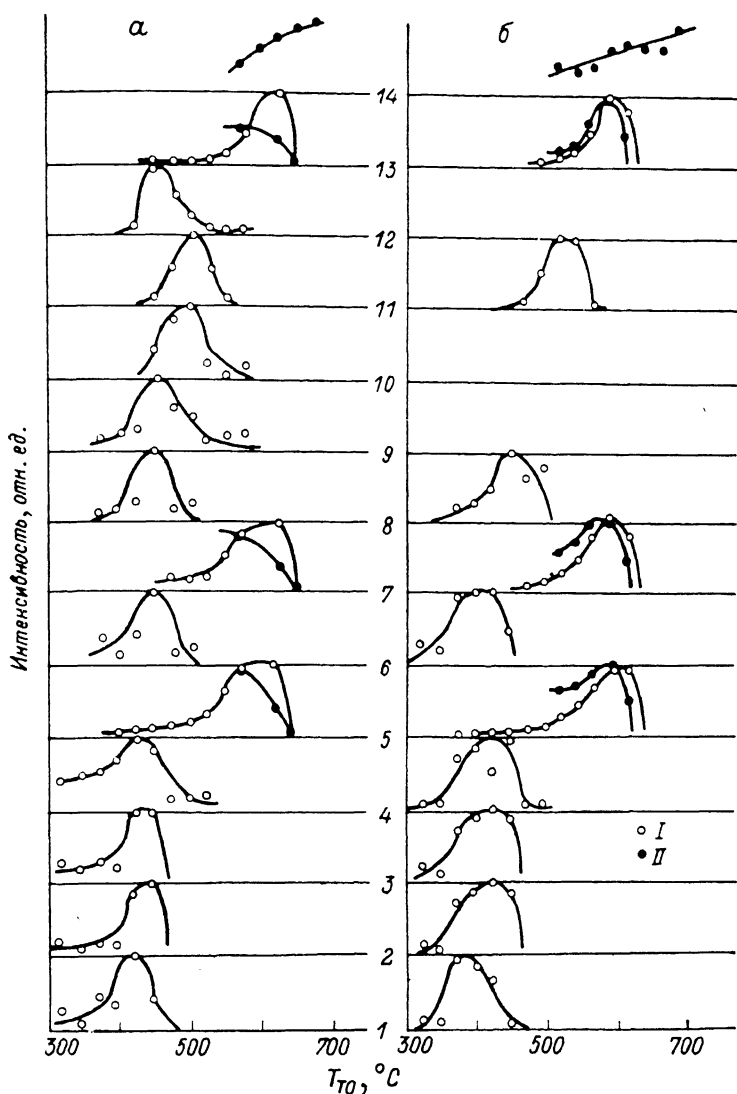


Рис. 2. Зависимость от температуры термообработки интенсивности линий ИР в облученных электронами кристаллах исходного (а) и ЯЛ Si<Ge> (б).

Линии: 1 — M68, 2 — J17, 3 — M5, 4 — J1, 2, 5 — M80, 6 — M56, 7 — M54, 8 — M46, 9 — M24, 10 — M19, 11 — M79, 12 — M11, M12, 13 — X₈₀, 14 — P⁰X₇₀. I — интенсивность линий ИР, нормированная на максимум, II — отношение интенсивности данной линии к линии TO-повторения свободного экситона.

X₈₀, M11, 12, 19, 24 содержат фосфор. В то же время очевидно, что эти центры не являются собственными дефектами кристаллической решетки Si, а включают в свой состав некую примесь. Отсутствие линий M11, 12, 19, 24 в образцах ЯЛ серии заставляет предположить, что эта примесь в процессе нейтронного облучения и термообработки в геттерирующей атмосфере связывается в комплексы и не принимает участия в радиационном дефектообразовании при последующем электронном облучении. Отметим, что в работе [6] предполагалось внутреннее геттерирование компонент пар Френкеля (вакансий и междоузельных атомов)

в облучаемом ЯЛ кремнии. Это предположение было затем опровергнуто тщательной экспериментальной проверке в [7]. По-видимому, как в [6], так и в данной работе имеет место геттерирование именно примесных атомов.

Авторы выражают признательность Л. П. Получанкиной за проведение рентгеновского микроанализа образцов.

Список литературы

- [1] Бугай А. А., Максименко В. М., Туровский Б. М. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 11. С. 2020—2023.
- [2] Хируненко Л. И., Шаховцов В. И., Шинкаренко В. К. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 3. С. 562—565.
- [3] Кучинский П. В., Ломако В. М., Рутковский И. З. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 634—637.
- [4] Лопатин А. Б., Покровский Я. Е. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 8. С. 2373—2378.
- [5] Каминский А. С., Лейферов Б. М., Сафонов А. Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 4. С. 961—970.
- [6] Колковский И. И., Шуша В. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 11. С. 1974—1977.
- [7] Коршунов Ф. П., Маркевич В. П., Медведева И. Ф. и др. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук. 1988. № 4. С. 61—64.
- [8] Sauer R., Weber J. // Physica. 1983. V. 116B. P. 195—209.
- [9] Коршунов Ф. П., Соболев Н. А., Шераухов В. А. // Тез. докл. VIII Межд. совещ. по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердых телах. Варна, 1987. С. 71.
- [10] Соболев Н. А., Шераухов В. А. // Физика, технология и производство полупроводниковых приборов. Вильнюс, 1987. С. 100.

Институт физики твердого тела
и полупроводников АН БССР
Минск

Получена 4.01.1989
Принята к печати 20.02.1989