

УДК 621.315

© 1992

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОГО КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО НЕЙТРОНАМИ

*Н. А. Дроздов, Е. В. Мельникова, А. А. Патрин*

Исследовано влияние дислокаций на процессы излучательной рекомбинации на радиационных дефектах в кремнии, облученном реакторными нейтронами. Показано, что центры излучательной рекомбинации радиационной природы разделяются на две группы по отношению к величине плотности дислокаций: стабильные и нестабильные. Обнаружено, что при этом спектральный контур линии  $S$  изменяется с ростом плотности дислокаций, тогда как контур линии  $W$  остается неизменным.

В работе [1, 2] взаимодействие дислокаций и простых комплексов точечных дефектов, сформированных в кремнии облучением  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ , исследовалось по спектрам рекомбинационного излучения (РИ). Облучение реакторными нейтронами по сравнению с  $\gamma$ -квантами дает более богатый набор комплексов точечных дефектов, которые являются центрами излучательной рекомбинации, а также ведет к образованию областей разупорядочения, влияющих на рекомбинационные свойства кристалла [3].

В настоящей работе исследовались процессы излучательной рекомбинации в нейтронно-облученном дислокационном кремнии на разных стадиях изохронного отжига.

Для исследований использовался монокристаллический кремний с удельным сопротивлением 25 Ом·см. Дислокации вводились пластической деформацией методом четырехопорного изгиба при  $T=850^\circ\text{C}$ . Плотность дислокаций варьировалась от  $10^6$  до  $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Облучение проводилось реакторными нейтронами с интегральным потоком  $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Дислокационные облученные и бездислокационные облученные образцы подвергались последовательному 20-минутному изохронному отжигу при температурах 250 и  $400^\circ\text{C}$ . Выбор температуры отжига производился по характерным точкам — максимумам интенсивности соответствующих линий на кривых отжига [4] для кремния, облученного нейтронами. Спектры РИ регистрировались при температуре 4.2 К при квазистационарном оптическом возбуждении светом Ar лазера либо ксеноновой дуговой лампы.

В спектрах РИ исследованных образцов в области 0.75—1.15 эВ наблюдаются линии дислокационной и радиационной природы. Диапазон наблюдения каждой линии в зависимости от плотности дислокаций и температуры отжига различен и определяется природой центра, ответственного за эту линию. Спектральное положение и температура наблюдения каждой из линий приведены в таблице, там же для ранее описанных линий приведен источник информации по трактовке природы соответствующего центра.

На рис. 1 представлено изменение интенсивности линий излучательной рекомбинации радиационной природы для образцов монокристаллов кремния

### Характеристики линий в спектрах РИ

Наименование линии		Энергия головной бесфононной линии, эВ	Диапазон наблюдения, °С	Данные по идентификации	Литературные ссылки
ранее принятое	используемое в наст. раб.				
<i>C</i>	<i>C</i>	0.79	250	C+O+V Si (I)	[7] [6]
	<i>W</i>	1.018	250		
<i>X</i>	<i>H1</i>	0.925	400	O+?	[8]
	<i>H2</i>	0.95	400	3V+O	[9]
	<i>H3</i>	0.992	400	—	
	<i>X</i>	1.04	400	>3V	[8]
	<i>H4</i>	1.095	400	—	
	<i>H5</i>	1.097	400	—	
	<i>H6</i>	1.104	400	—	

с различной плотностью дислокаций. Зависимости построены для линий *C* и *W* после отжига 250 °С, а для линий *X*, *H1*—*H6* после отжига 400 °С в связи

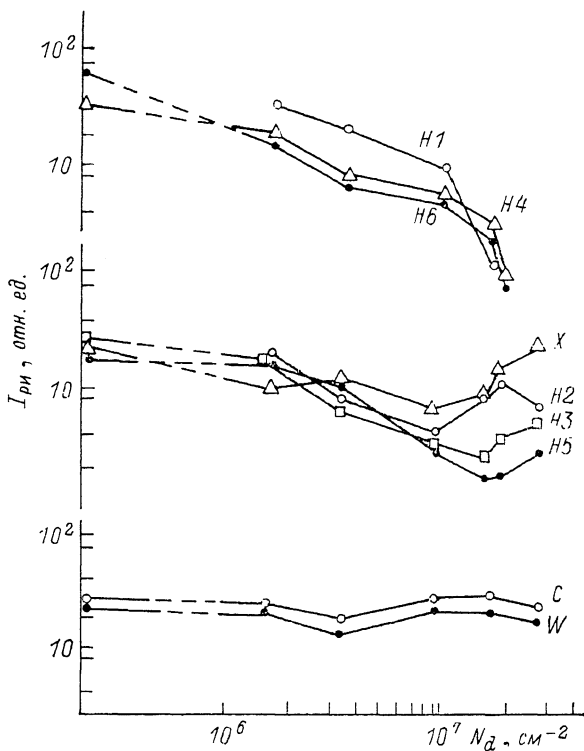


Рис. 1. Зависимость интенсивности РИ от плотности дислокаций для линий радиационной природы в нейтронно-облученном кремнии.

с тем, что именно после этих температур отжига интенсивность РИ соответствующих линий принимает максимальное значение [4].

Из рис. 1 видно, что линии *C* и *W* слабо изменяются по интенсивности с ростом плотности дислокаций, тогда как линии *X*, *H1*—*H6* при этом падают по интенсивности и, таким образом, центры излучательной рекомбинации,

связанные с данными линиями, разделяются на две группы по отношению к величине плотности дислокаций: стабильные и нестабильные.

Отметим, что стабильные центры *C* и *W* характеризуются плотной структурой упаковки их в кристаллической решетке: так, центр *W* представляет собой междоузельный центр —  $\langle 111 \rangle$  расщепленное внедрение [5], а центр *C* — моноклинный *I* центр, состоящий из атома кислорода, атома углерода и вакансии [6].

В отличие от данных центров нестабильные центры *H2* и *X* содержат в своем составе 3 и более вакансии [7]. Центры *H1*, *H3*—*H6* не идентифицированы, однако по аналогии с центрами *H2* и *X* можно предположить, что они также имеют рыхлую структуру.

Среди нестабильных центров можно выделить два типа центров, четко различающихся по зависимости интенсивности РИ от плотности дислокаций. Интенсивность РИ центров *H1*, *H4*, *H6* уменьшается более чем на порядок, практически до предела регистрации при возрастании плотности дислокаций до  $1.5 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup>. Интенсивность РИ центров *X*, *H2*, *H3*, *H5* падает на полпорядка до плотности дислокаций  $10^7$ — $1.5 \times 10^7$  см<sup>-2</sup>, после чего вновь возрастает в 2—3 раза.

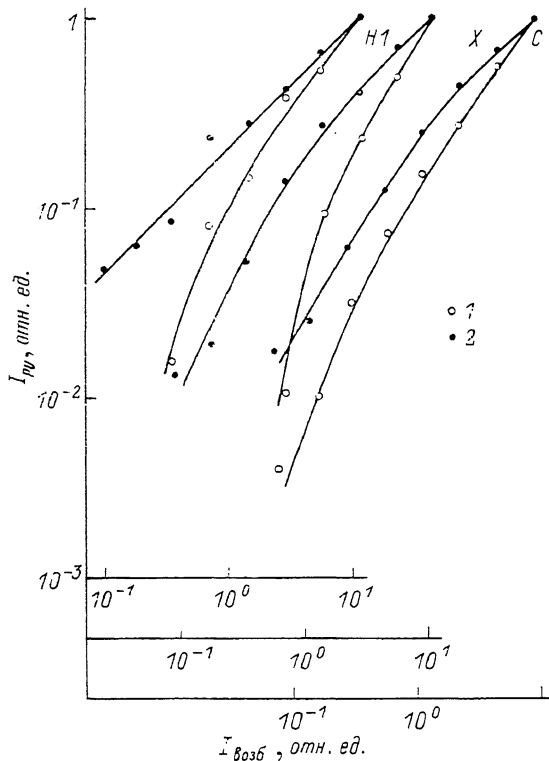


Рис. 2. Изменение интенсивности РИ линий радиационной природы в дислокационном кремнии при изменении уровня оптического возбуждения.  $N_d=0$  (1) и  $2 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup> (2).

Нестабильность центров указывает на то, что при отжиге 400 °С, после которого наблюдаются нестабильные центры, проявляются свойства дислокаций как стоков, к которым мигрируют осколки радиационных дефектов, распадающихся при отжиге (например, *C* и *W*); следовательно, увеличение плотности дислокаций в образце снижает образование более высокотемпературных дефектов, таких как центры излучательной рекомбинации *X*, *H1*—*H6*. Природа центров первого типа, по-видимому, такова, что при повышенных плотностях дислокаций центры не образуются вследствие рыхлости своей структуры и слабых связей между составляющими их частями. Поля упругих напряжений при повышенных плотностях дислокаций при отжиге растягивают составляющие части центров этого типа, препятствуя их образованию. Осколки радиационных дефектов, которые ранее шли на образование центров первого типа, теперь будут уходить частично на дислокации, частично участвовать в образовании центров второго типа.

Необходимо отметить, что в принципе отождествление зависимостей концентрации соответствующего центра от какого-либо фактора (в данном случае

от плотности дислокаций) с зависимостью интенсивности соответствующей линии РИ справедливо лишь в том случае, когда рекомбинационные параметры центра остаются стабильными. В конкретных условиях на стабильность рекомбинационных параметров указывает достаточная стабильность формы спектра излучения для наблюдаемых линий в спектре РИ. Кроме того, необходимо учитывать возможность различной реакции для интенсивности различных центров за счет уменьшения времени жизни, по мере увеличения плотности дислокаций  $N_d$  в связи с возможным изменением при этом потоков носителей к рекомбинационным центрам.

Подтверждение слабого влияния  $N_d$  на интенсивность линий за счет лишь этого фактора получено из анализа зависимостей интенсивности линий РИ от интенсивности оптического возбуждения кристалла светом аргонового лазера мощностью до 1 Вт в пучке диаметром 1 мм. Полученные результаты (рис. 2) показывают, что ход этих зависимостей для различных линий одноптипен в соответствующем диапазоне дислокационной плотности. Следовательно, влияние роста плотности дислокаций лишь на деградацию времени жизни и, как следствие, уменьшение притока неравновесных носителей на все наблюдаемые центры радиационной природы имеют одноптипный характер.

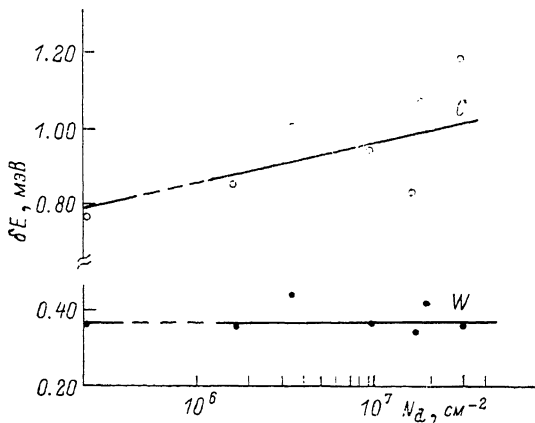


Рис. 3. Зависимость полуширины ( $\delta E$ ) линий  $C$  и  $W$  от плотности дислокаций для нейтронно-облученного кремния.

Изменение уровня оптического возбуждения можно рассматривать как аналог (частного) проявления влияния дислокаций на время жизни по мере изменения их плотности [8].

В то же время независимость интенсивности  $C$  и  $W$  линий (с точностью до 1.5—2 раз) от  $N_d$  свидетельствует о том, что в облученных образцах с плотностью дислокаций  $2-3 \cdot 10^7$  см<sup>-2</sup> дислокации не влияют на реальное время жизни (по крайней мере при 4.2 К). Зависимости интенсивности линий РИ в этих условиях отражают концентрацию центров.

В то же время тонкая структура спектральных линий может зависеть от плотности дислокаций.

Для стабильного центра  $C$  наблюдается изменение спектрального контура линии, связанной с этим центром по мере роста плотности дислокаций в образцах (рис. 3). Этот результат качественно аналогичен полученному в [1, 2]: наблюдается увеличение полуширины линии с ростом плотности дислокаций более чем на порядок — полуширина линии увеличивается с 0.8 до 1.2 мэВ. При этом необходимо отметить, что в бездислокационном нейтронно-облученном кремнии полуширина линии 0.79 эВ составляет 0.8 мэВ, тогда как в случае  $\gamma$ -облучения она равна 0.09—0.11 мэВ [1, 9]. Это повышенное значение исходной полуширины линии может быть обусловлено наличием областей разупорядочения, возникающих при нейтронном облучении, и, как следствие, появлением полей упругих напряжений, связанных с областями разупорядочения.

В противоположность центру  $C$  центр  $W$  характеризуется практически неизменностью спектрального контура соответствующей ему линии 1.018 эВ во всем интервале используемых плотностей дислокаций. Малая чувствительность

центра  $W$  к возрастанию плотности дислокаций указывает на то, что величины полей упругих напряжений малы по сравнению с полями упругих напряжений на тех участках областей разупорядочения, где локализован центр  $W$ ; в силу этого влияние дислокаций на контур спектральной линии  $W$  находится ниже предела регистрации. Это согласуется с литературными данными о том, что центр  $W$  является центром междоузельного типа и локализуется по краям областей разупорядочения [6], где величины полей упругих напряжений исходно велики.

#### Список литературы

- [1] Дроздов Н. А., Мельникова Е. В., Патрин А. А. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 7. С. 2262—2264.
- [2] Patrin A. A., Drozdov N. A., Melnikova E. V. // Rad. Eff. 1988. V. 107. N 1. P. 1—8.
- [3] Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / Под ред. Дж. Миза: Пер. с англ. М., 1972. 264 с.
- [4] Сафронов Л. Н. // Сб. «Радиационные эффекты в полупроводниковых материалах» / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1979. 224 с.
- [5] Davies G., Lightowlers E. C., Ciechanovska Z. E. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1987. V. 20. P. 171—205.
- [6] Thonke K., Hangleiter A., Wagner J., Sauer R. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1985. V. 18. N 26. P. L795—L801.
- [7] Tkachev V. D., Mudryi A. V. // Rad. Eff. Semicond. Int. Conf. Dubrovnik, 1976. P. 231—243.
- [8] Родес Р. Г. Несовершенства и активные центры в полупроводниках: Пер. с англ. М., 1968. 374 с.
- [9] Hare A. R. G., Davies G., Collins A. T. // J. Phys. 1972. V. C5. P. 1265—1270.

Белорусский государственный  
университет им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию  
7 июля 1991 г.  
В окончательной редакции  
1 октября 1991 г.