

ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ РЕКОМБИНАЦИЯ В ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ

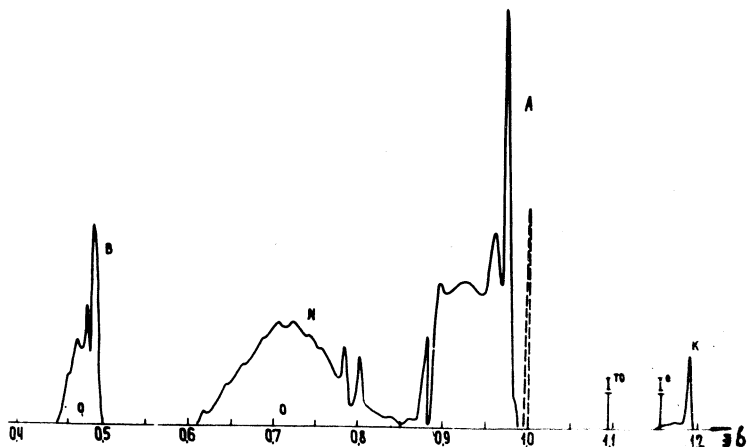
В. Н. Пенин, В. С. Коноплев,
Д. З. Григоров, А. А. Гишпиус

Спектр люминесценции кристаллов кремния, облученных быстрыми электронами, состоит из нескольких полос, относительная интенсивность которых зависит от примесного состава и условий отжига образца /1,2,3/. Данные разных работ о корреляции определенных полос с содержанием в образце различных примесей в ряде случаев противоречивы, что затрудняет идентификацию полос люминесценции с известными типами радиационных дефектов. В настоящей работе исследована зависимость относительной интенсивности полос фотолюминесценции облученного кремния от дозы облучения, содержания кислорода и основной легирующей примеси в образце. Для получения данных об электронной структуре центров проведен детальный анализ низкотемпературных спектров фотолюминесценции.

Измерения спектров фотолюминесценции проводились при температурах 4,2; 20,4 и 77,3°K на образцах n- и p-типа различного удельного сопротивления и с содержанием кислорода от $5 \cdot 10^{14}$ до 10^{18} см^{-3} . Образцы облучались при комнатной температуре электронами с энергией 0,35 Мэв и 1 Мэв, доза облучения менялась в пределах от $2 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Для получения воспроизводимых результатов образцы после облучения выдерживались в течение нескольких часов при комнатной температуре. Было замечено, что при повторных облучениях интенсивность всех полос непосредственно после облучения уменьшается на порядок по сравнению с исходной и затем с течением времени возрастает до величины, соответствующей новой дозе облучения. Этот эффект связан, по-видимому, с возникновением под действием облучения центров рекомбинации, резко уменьшающих время жизни, но довольно быстро отжигающихся при комнатной температуре. Природа этих центров не ясна; ими могут

быть простейшие дефекты решетки — вакансии и междоузлия, поскольку эффект не зависит от примесного состава образца.

Исследованиями нами полосы фотолуминесценции (рис. 1)* можно разделить на две группы, по их зависимости от примесного состава образца и дозы облучения. Полосы А и К наблюдаются во всех об-



Р и с. 1. Полосы луминесценции, наблюдаемые в облученном кремнии.

разцах, независимо от концентрации кислорода и основной легирующей примеси. Интенсивность этих полос возрастает с увеличением дозы облучения, не обнаруживая насыщения вплоть до доз $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Это дает основания предположить, что полосы А и К связаны с собственными дефектами решетки (а возможно, и с одним и тем же дефектом, так как отношение интенсивностей К/А при $20,4^\circ\text{К}$ во всех случаях остается $\approx 0,1$). Из числа собственных дефектов решетки следует прежде всего упомянуть дивакансию, образование которой из двух изолированных вакансий энергетически выгодно /4/. Данные по отжигу /3/ А-полосы подтверждают наше предположение. Едва ли

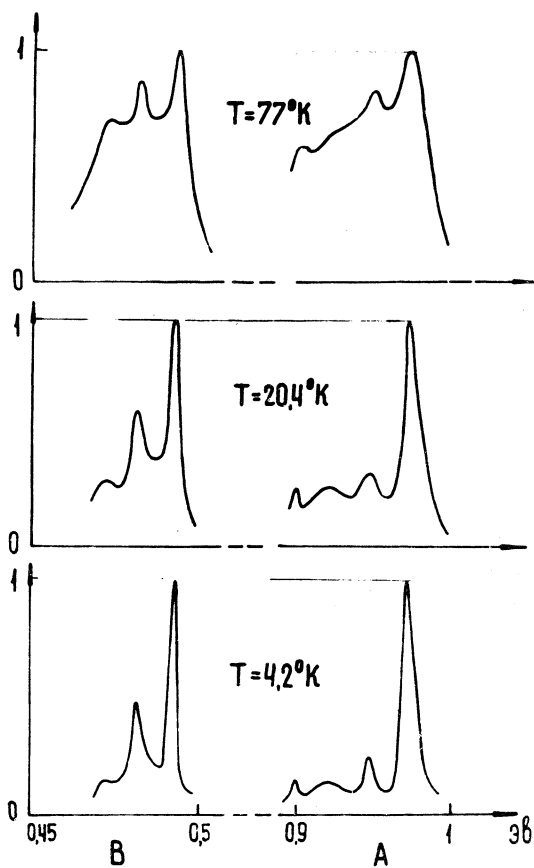
* Пунктиром на рис. 1 показана линия ($E_{\text{max}} = 0,99 \text{ эВ}$), связанная с центром, отжигающимся при $T = 77,3^\circ\text{К}$ и, возможно, включающим примесь. Наблюдается только после первичного облучения образца слабым потоком $\Phi \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

можно предположить, что изолированные вакансии могут быть ответственны за появление полос А и К. Как известно, точечные дефекты довольно подвижны /5,6/ и в процессе миграции образуют комплексы, к числу которых относятся дивакансии и ассоциации вакансий с различными примесями.

Полосы В и И наблюдаются только в образцах с большой концентрацией кислорода. Их интенсивность насыщается с увеличением дозы, а при дозах $\approx 5 \cdot 10^{17}$ см⁻² начинает убывать. Отсюда можно сделать вывод, что полосы В и И связаны со сложными дефектами, в состав которых входит кислород.

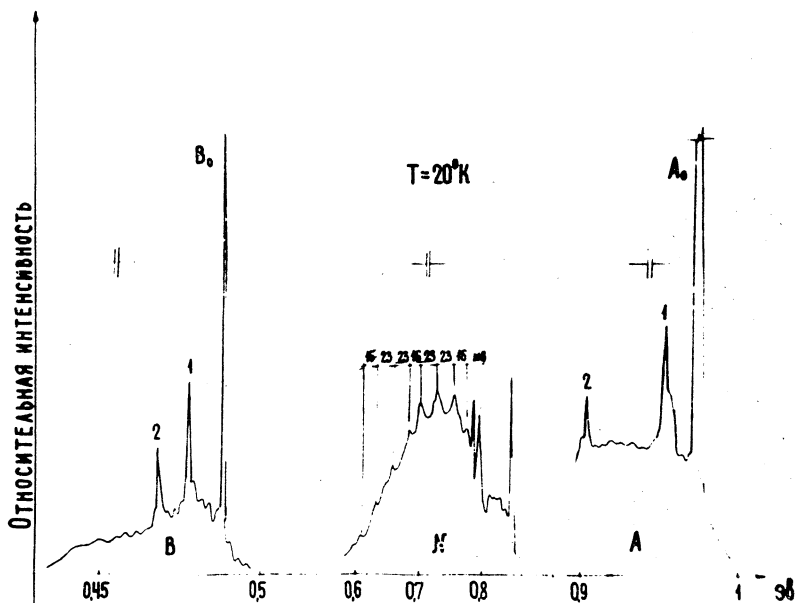
При температуре 77,3°K полосы А и В состоят из узких линий (A_0 и B_0), к которым со стороны меньших энергий примыкают довольно широкие колебательные крылья. При понижении температуры на фоне этих крыльев выступают узкие линии (A_I и B_I) (рис. 2). При этом отношение интенсивностей A_0/A_I и B_0/B_I постоянно во всех образцах при фиксированной температуре. Увеличение относительной интенсивности узких линий по сравнению с фоном при понижении температуры характерно для бесфононных электронных переходов /7/. Ширина узких линий (для линии A_0 и B_0 ширины при 20,4°K составляют $0,3 \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$ эв, т.е. $\approx 0,2$ кТ) позволяет утверждать, что эти переходы являются внутрицентровыми. Основные состояния оказываются расщепленными в случаях полос А и В. Величина расщепления составляет, соответственно, $18 \cdot 10^{-3}$ и $12 \cdot 10^{-3}$ эв. (Утверждение о том, что линии A_0 и A_I (или B_0 и B_I) связаны с расщеплением основного, а не возбужденного состояния, основано на том, что в последнем случае при понижении температуры должно происходить резкое уменьшение интенсивности A_0 и B_0 , что не наблюдается на опыте). Не исключено, что электронная структура рассматриваемых центров сложнее. На рис. 3 показаны спектры, снятые с разрешением $\leq 2,5 \cdot 10^{-3}$ эв; обнаруживается тонкая структура полос А и В. В частности, линии A_I и B_I оказываются состоящими не менее чем из двух линий каждая. Возможно, что это связано с небольшим расщеплением возбужденного состояния.

Для центров, ответственных за появление полос А, В и К (последняя описана в /8/), характерно сравнительно слабое электрон-фононное взаимодействие, т.е. большая относительная интенсивность бесфононных линий. В случае И-полосы ситуация иная (рис. 3). Ширина И-полосы составляет 0,150 эв. Эта полоса, по-види-



Р и с. 2. Зависимость структуры полос А и В от температуры.

тому, перекрывается с С-полосой /1,2/, поскольку со стороны больших энергий имеются два максимума с энергиями, совпадающими с максимумами С-полосы. Поскольку ширина С-полосы не более 0,07 эв, то можно считать, что с длинноволновой стороны полосы **И** пере-



Р и с. 3. Тонкая структура полос А, В и И.

крытие отсутствует. В этой области имеется несколько максимумов, разделенных энергиями 0,016 эв (ТА-фонон) и 0,023 эв. Последняя близка к энергии фонона, связанного с междолинным рассеянием электрона /9/.

Необходимо отметить, что ввиду внутрицентрового характера оптических переходов в случае А и В положение соответствующих энергетических уровней в запрещенной зоне не может быть определено непосредственно из спектров фотолуминесценции. Это затрудняет сопоставление наших данных с данными других авторов /10/. Для такого сопоставления и получения дополнительных данных о природе центров луминесценции необходимы опыты, в которых проявляются

свойства симметрии этих центров (одноосное сжатие, магнитное поле).

В заключение авторы выражают благодарность Б. М. Вулу и В. С. Вавилову за интерес к работе и обсуждение результатов.

Поступила в редакцию 15 ноября 1971 года.

После переработки 20 апреля 1972 года.

Л и т е р а т у р а

1. М. В. Бортник, В. Д. Ткачев и Л. В. Кухневич. Физ. Техн. Полупр., I, 353 (1967).
2. R. J. Spry, W. D. Compton. Phys. Rev., 175, 3 (1968).
3. E. S. Johnson, W. D. Compton. Rad. Effects, 2, 89 (1971).
4. М. Томпсон. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. (Перев. с англ.) "Мир", Москва, 1971 г.
5. G. D. Watkins. Radiation Effects in Semiconductors. Proc. of the Santa Fe Conf. on Rad. Eff. in Semicond., 1967, p.67. (Plenum Press, New York, 1968).
6. G. D. Watkins. Radiation Damage in Semiconductors. 7-th Int. Conf. on the Phys. of Semicond. p.97 (Dunod, Paris, 1965).
7. К. К. Ребане. Элементарная теория колебательной структуры спектров примесных центров кристаллов. "Наука", Москва, 1968 г.
8. В. С. Коноплев, А. А. Гиппиус. Краткие сообщения по физике № 8, 13 (1972).
9. P. J. Dean, J. R. Haynes, W. F. Flood. Phys. Rev., 161, 3 (1967).
10. G. D. Watkins, J. W. Corbett. Phys. Rev., 138, 2A, (1965).