

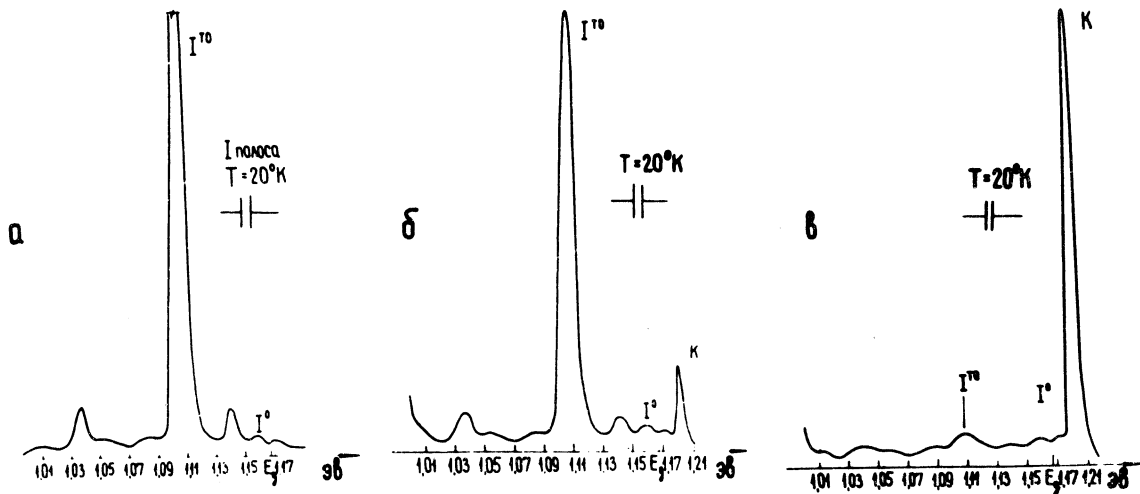
ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ОБЛУЧЕННОГО КРЕМНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ БОЛЬШОЙ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

В. С. Коноплев, А. А. Гишвиц

Исследованию спектров излучательной рекомбинации в кремнии, облученном быстрыми электронами и γ -квантами, посвящен ряд работ [1,2,3]. Эти спектры обычно содержат несколько полос, приписываемых различным дефектам или комплексам. Относительная интенсивность полос зависит от содержания примесей в образце и от условий отжига образца после облучения. Полосы излучения обычно состоят из узкой бесфононной линии и примыкающего к ней колебательного крыла. Энергии бесфононных линий, исследованных в работах [1,2,3], лежат в пределах от 0,49 эв до 1,045 эв.

Нам удалось обнаружить в спектре фотолюминесценции облученного кремния полосу излучения с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны. В работе были исследованы образцы различного удельного сопротивления n - и p -типа с концентрацией кислорода от $5 \cdot 10^{15}$ до 10^{18} см⁻³. Образцы облучались электронами с энергией 0,35 Мэв или 1 Мэв на генераторе Ван-де-Граафа. Доза облучения менялась в пределах от $2 \cdot 10^{15}$ до $3 \cdot 10^{18}$ см⁻². Измерения спектров проводились при температурах 4,2; 20,4; 77,3°К.

На рис. 1 показан спектр фотолюминесценции образца кремния, облученного различными дозами электронов. В результате облучения интенсивность полос собственного рекомбинационного излучения (I^{TO} , I^O и др.) уменьшается, а в области энергий 1,188 эв появляется новая полоса излучения (К-полоса). Эта полоса наблюдается во всех исследованных образцах независимо от их примесного состава. Ее интенсивность возрастает с дозой облучения без насыщения. Независимость интенсивности от примесного состава и отсутствие насыщения позволяют предположить, что К-полоса свя-



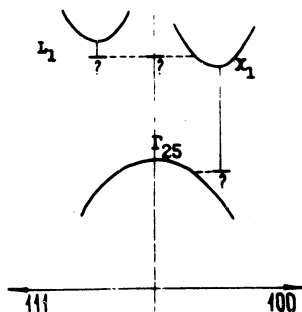
Р и с. 1. Спектры фотолюминесценции кремния n-типа. а) необлученный образец; б) образец, облученный дозой $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; в) образец, облученный дозой $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Γ^{10} и Γ^0 соответствуют аннигиляции свободного экситона с испусканием Γ^0 -фонона и без фонона /5/.

зана с собственными (но не обязательно простыми) дефектами кристаллической решетки.

Интенсивность К-полосы возрастает при повышении температуры от 4,2 до 20,4°К, а затем уменьшается при повышении температуры до 77,3°К. К-полоса состоит из довольно узкой линии и более широкого крыла, максимумы которого смещены на $1,6 \cdot 10^{-2}$ эв и $3,4 \cdot 10^{-2}$ эв в сторону меньших энергий от этой линии. Ширина линии при температурах 4,2 и 20,4°К составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$ эв. Максимум линии сдвигается в сторону меньших энергий на величину $1,5 \cdot 10^{-3}$ эв при изменении температуры от 20,4 до 77,3°К. Это примерно в 3 раза меньше, чем изменение ширины запрещенной зоны кремния в том же интервале температур.

Для объяснения обнаруженной нами несобственной люминесценции с энергией квантов большей E_g кажется уместным привлечь представления о локальных уровнях, связанных с различными экстремумами зоны проводимости (см., например, обзорный доклад В. Пола /4/). Хотя теория таких уровней развита пока недостаточно, тем не менее можно пользоваться некоторыми ее выводами, состоящими, в частности, в том, что при определенных условиях у примесных атомов существуют электронные состояния, описываемые преимущественно с помощью функций Блоха, соответствующих только какой-нибудь одной группе экстремумов зоны проводимости, эквивалентных по свойствам симметрии. При приложении к кристаллу давления такие электронные состояния должны двигаться вместе с теми экстремумами, с которыми они связаны в указанном выше смысле /4/. Можно предположить, что дефект, ответственный за появление К-полосы, вносит в энергетический спектр кремния глубокий уровень, связанный, например, с группой экстремумов, находящихся в точке L К-пространства (направление III). Энергия электрона в этом состоянии совпадает с уровнями энергии непрерывного спектра, соответствующего абсолютным минимумам зоны проводимости вблизи точки X (направление 100, Рис. 2). Наши данные не позволяют заключить, с каким именно экстремумом зоны проводимости (или с валентной зоной) связан указанный уровень (т.е. какое из показанных на рис. 2 состояний реализуется в нашем случае). Для выяснения этого необходимы опыты, в которых проявляются свойства симметрии центра люминесценции (например, одноосное сжатие).

Интересно отметить, что в области энергии $\hbar\nu \approx E_g$ помимо К-полосы в облученном кремнии нами были обнаружены весьма слабые полосы люминесценции, энергия которых близка к энергии полос,



Р и с. 2. Возможное расположение электронного уровня, обсуждаемое в статье. (Масштаб взаимного расположения зон не соблюден).

наблюдаемых в необлученном кремнии и связанных с аннигиляцией свободных экситонов (рис. 1а). Характер оптических переходов, ответственных за появление этих полос, и их связь с К-полосой в настоящее время неясны.

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 А. В. Юневич. Физ. Техн. Полуупр., 1, 353 (1967).
2. R. I. Spry, W. D. Compton. Phys. Rev., 175, 1010 (1968).
3. E. S. Johnson, W. D. Compton. Rad. Effects, 2, 89 (1971).
4. В. Пол. Труды IX Междунар. конф. по физике полуупр., 1968 г. Т. I, стр. 17-28 (изд-во "Наука", 1969 г.).
5. P. J. Dean, J. R. Haynes, W. F. Flood. Phys. Rev., 161, 711 (1967).