

СПЕКТР И ПОЛЯРИЗАЦИЯ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Н. В. Алкеев, А. С. Каминский, Я. Е. Покровский

Обнаружено рекомбинационное излучение "горячих" экситонов и исследовано различие поляризации излучения экситонов и конденсированной фазы в кремнии, деформированном в направлении (100).

Известно, что при сжатии кристаллов кремния в направлении (100) два абсолютных минимума зоны проводимости, расположенных вдоль оси деформации, смещаются в область меньших энергий, в то время как энергетическое положение четырех других абсолютных минимумов относительно валентной зоны остается практически неизменным [1]. При возбуждении деформированного кристалла квантами излучения с энергиями, существенно превышающими ширину запрещенной зоны, не-

равновесные электроны распределяются по всем шести минимумам зоны проводимости. Если время релаксации электронов из верхних минимумов в нижние достаточно велико, то возможно связывание электронов, принадлежащих верхним долинам в "горячие" экситоны. Рекомбинационное излучение таких "горячих" экситонов удалось обнаружить экспериментально.

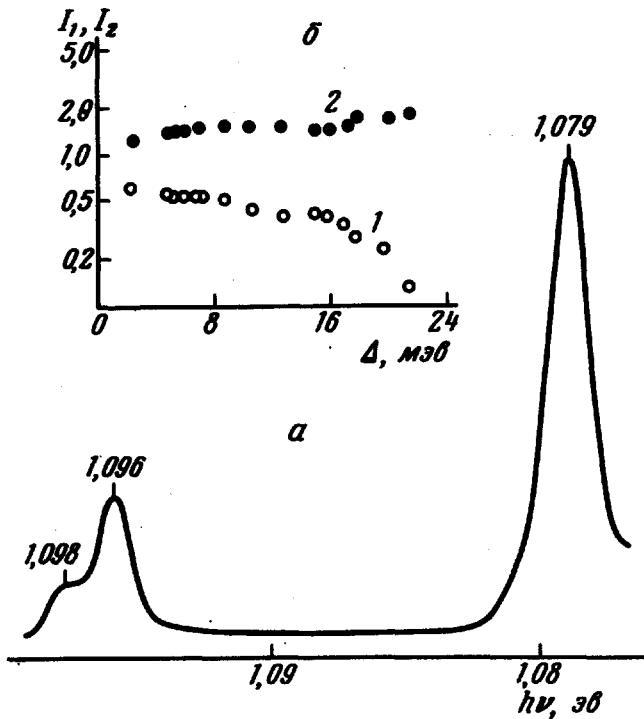


Рис. 1. *a* – LA- и TO-компоненты спектра рекомбинационного излучения кремния при 2°K, малой плотности фотовозбуждения и давления вдоль направления (100) $P = 2000 \text{ кг/см}^2$; *б* – зависимость интенсивности излучения "горячих" (1) и "холодных" (2) экситонов в кремнии от расщепления зоны проводимости Δ при 4,2°K и малой плотности возбуждения

Исследовались образцы чистого кремния, содержавшие бор в концентрации около $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Время жизни свободных экситонов в образцах при 4,2°K составляло около 1 $\mu\text{сек}$. Образцы размером $1,5 \times 1,5 \times 15 \text{ мм}^3$ вырезались вдоль направления (100) и подвергались однородному сжатию вдоль этого направления в устройстве, аналогичном описанному в [1]. Образцы помещались в гелиевую ванну криостата. Квазистационарное возбуждение осуществлялось излучением лазера из арсенида галлия мощностью до 200 мВт . Плотность возбуждения изменялась в широких пределах за счет изменения фокусировки лазера.

На рис. 1, *a* приведена часть спектра рекомбинационного излучения деформированного кремния, соответствующая аннигиляции свободных экситонов с эмиссией продольного (LO) и поперечного (TO) оптических

фононов, записанного при 2°K и малой плотности возбуждения. Из рисунка видно, что помимо пика с энергией $1,079$, соответствующего аннигиляции экситонов, связанных с нижними долинами, в спектре наблюдаются пики с энергиями $1,096$ и $1,098$ эв. Положение и структура этих пиков излучения тождественна спектру аннигиляции свободных экситонов с эмиссией LO и TO фононов в недеформированном кремнии. Отсюда можно заключить, что эти пики обусловлены аннигиляцией "горячих" экситонов, связанных с верхними долинами. Разность энергий между TO -пиком излучения "горячих" и "холодных" экситонов хорошо согласуется со значениями энергетического расщепления зоны проводимости Δ при различных давлениях, определенных в [1]. Неожиданным является отсутствие LO -компоненты в спектре излучения "холодных" экситонов.

На рис. 1, б приведена зависимость интенсивности излучения "горячих" I_1 и "холодных" I_2 экситонов от энергетического расщепления зоны проводимости Δ , соответствующего различным деформациям при $4,2^{\circ}\text{K}$. Из рисунка видно, что I_2 практически постоянна во всем исследованном интервале расщеплений, в то время как I_1 быстро уменьшается при расщеплении Δ , превышающем энергию связи экситона $E_{ex} = 14,7$ мэв [2]. В области небольших давлений $I_1/I_2 \approx 0,3$. Принимая, что I_1/I_2 определяется отношением концентраций экситонов, связанных с четырьмя верхними и двумя нижними долинами, и что время жизни экситонов в образцах в условиях эксперимента 10^{-6} сек, можно оценить междолинное время релаксации экситонов $\approx 10^{-7}$ сек. Быстрое уменьшение I_1 при $\Delta > E_{ex}$ может быть связано с тем, что в этом случае основной уровень энергии "горячих" экситонов попадает в область непрерывного энергетического спектра нижних долин.

При увеличении плотности возбуждения образцов происходит конденсация экситонов и образуются электрон-дырочные капли с концентрацией $3,7 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ [3]. При сжатии кристалла кремния вдоль оси (100) энергия связи и концентрация носителей заряда в конденсированной фазе несколько уменьшаются до тех пор, пока расщепление зоны проводимости Δ не достигнет энергии Ферми для электронов ≈ 8 мэв [4]. При дальнейшем сжатии электроны конденсированной фазы заполняют лишь нижние долины зоны проводимости, и поэтому изменение энергии связи и концентрации прекращается. Как и следовало ожидать [1], одноосное сжатие приводит к появлению характерной поляризации рекомбинационного излучения кремния. На рис. 2 приведены спектры излучения, записанные для двух направлений поляризации при 2°K и различных давлениях вдоль оси (100). Из рисунка видно, что излучение "горячих" экситонов не поляризовано при любых давлениях, а излучение экситонов, связанных с нижними долинами, частично поляризовано перпендикулярно направлению давления уже при минимальных деформациях. При увеличении деформаций поляризация этого излучения не изменялась. Поляризация излучения конденсированной фазы обнаруживалась лишь при значительно больших давлениях и начиналась с длинноволновой области. По мере увеличения давления поляризация распространялась на всю полосу излучения конденсированной фазы. При расщеплении $\Delta \geq 8$ мэв эта полоса и излучение "холодных" экситонов были поляризованы приблизительно одинаково. Такое изменение поляризации излучения конденсированной фазы при возрастании расщепления зоны проводимости представляется естест-

венным. Действительно, длинноволновая область излучения электрон-дырочных капель возникает преимущественно за счет излучательной рекомбинации электронов с малыми энергиями [3], т. е. принадлежащих к нижним долинам. По мере увеличения расщепления зоны проводимости вклад нижних долин в рекомбинационное излучение возрастает. При расщеплении Δ , превышающем энергию Ферми для электронов в конденсированной фазе, поляризация излучения должна достигать насыщения, так как в этом случае все электроны сосредоточены в нижних долинах.

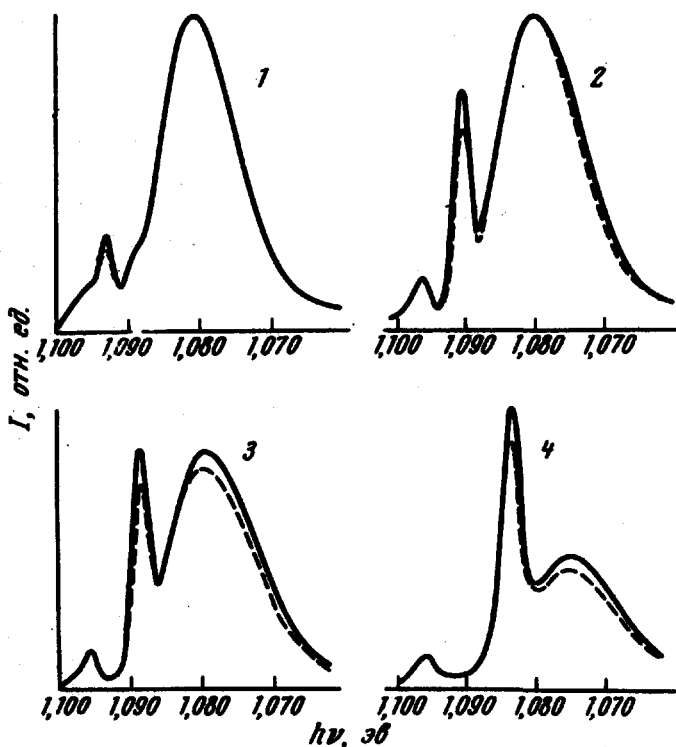


Рис. 2 LA- и TO-компоненты спектра излучения кремния при 2°K и высокой плотности фотовозбуждения. Давление P вдоль (100). 1 - $P = 250 \text{ кг/см}^2$, $\Delta = 3,2 \text{ мэв}$; 2 - $P = 500 \text{ кг/см}^2$, $\Delta = 6,1 \text{ мэв}$; 3 - $P = 820 \text{ кг/см}^2$, $\Delta = 7,9 \text{ мэв}$; 4 - $P = 1500 \text{ кг/см}^2$, $\Delta = 13,1 \text{ мэв}$. Поляризация вдоль направления давления - пунктир, нормально к направлению давления - сплошная линия

Рассмотренные здесь соображения претендуют лишь на качественное объяснение экспериментальных результатов. Для их количественной интерпретации необходимо развитие теории соответствующих электронных переходов в кремнии.

Литература

- [1] I. Balslev. *Phys. Rev.*, 143, 636, 1966.
 - [2] K. L. Shaklee, R. E. Nahory. *Phys. Rev. Lett.*, 24, 942, 1970.
 - [3] А.С.Каминский, Я.Е.Покровский, Н.В.Алкеев. *ЖЭТФ*, 59, 1937, 1970.
 - [4] Б.М.Ашкинадзе, И.П.Крецу, А.В.Патрин, И.Д.Ярошецкий. *ФТП*, 2206, 1970.
-