

Сечения возбуждения линий бора

$\lambda, \text{Å}$	$E_n, \text{см}^{-1}$	$E_v, \text{см}^{-1}$	Переход	$Q(50 \text{ эВ}) \times 10^{-18}, \text{см}^2$	$Q_{\text{max}} \times 10^{-18}, \text{см}^2$	$E_{\text{max}}, \text{эВ}$	Кривые на рис. 2
2088.93	0	47857	$2p^2 P_{1/2}^0 - 2p^2 D_{3/2}$	167	516	12	3
2089.59	16	47857	$2p^2 P_{3/2}^0 - 2p^2 D_{5/2}$				
2496.78	0	40040	$2p^2 P_{1/2}^0 - 3s^2 S_{1/2}$	260	290	20—21	2
2497.73	16	40040	$2p^2 P_{3/2}^0 - 3s^2 S_{1/2}$				
2850.60	—	—	—	27.6	38	12—17	4
3451.41	—	—	$2p^1 P - 2p^2 D^0$	9.5	9.9	60	1

атома бора, так как только эти переходы являются рассеивающими для вышеуказанных состояний. Исходя из структуры спектра атома бора, можно предполагать, что вклад каскадных переходов может оказаться существенным для заселения состояния  $3s^2 S_{1/2}$ ; он будет относительно мал для состояния  $2p^2 D_{3/2}$ .

Литература

- [1] А. Н. Зайдель. Таблицы спектральных линий, 383. «Наука», М., 1977.  
 [2] D. Goorvitch, F. P. J. Valero. *Astrophys. J.*, 171, 643, 1972.  
 [3] В. С. Бороздин, Ю. М. Смирнов, Ю. Д. Шаронов. *Опт. и спектр.*, 43, 384, 1977.

Поступило в Редакцию 26 марта 1981 г.

УДК 535.34 + 548.0 : 546.28

НОВАЯ ПОЛОСА ПОГЛОЩЕНИЯ КОМПЛЕКСА Si—O—Si  
 В КРЕМНИИ

М. А. Ильин

Поведение примеси кислорода в монокристаллическом кремнии изучается уже более двадцати лет [1]. Известен целый ряд комплексов с участием кислорода: комплекс Si—O—Si, в котором междоузельный атом кислорода образует связи с двумя соседними атомами кремния; А-центр; комплекс, проявляющий термодонорные свойства, в состав которого входят несколько атомов кислорода и т. д. Для первого из перечисленных комплексов в литературе приведен целый ряд полос поглощения. Три основные из них, проявляющиеся при температуре  $T \approx 300 \text{ К}$ , наблюдаются вблизи волновых чисел  $\nu = 1203, 1108$  и  $517 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda \approx 8, 9$  и  $19.5 \text{ мкм}$ ). При уменьшении температуры эти сравнительно широкие полосы расщепляются в целую группу значительно более узких полос. В работе [2] обнаружены дополнительные полосы в далекой ИК области спектра ( $\nu \sim 30\text{—}45 \text{ см}^{-1}$ ), построена модель комплекса Si—O—Si и проведен расчет энергий уровней комплекса. Эта модель является в настоящее время общепринятой. Двумя относительными недостатками модели являются [1]: 1) допущение об отсутствии взаимодействия атома кислорода со вторыми и третьими соседними атомами кремния; 2) не очень убедительная трактовка полосы  $19.5 \text{ мкм}$  как полосы симметричных колебаний комплекса, попадающих в резонанс с колебаниями кристаллической решетки кремния.

В настоящей работе обнаружена новая полоса поглощения комплекса Si—O—Si в районе  $\nu \sim 1700 \text{ см}^{-1}$ .

Исследованию подлежали монокристаллы кремния электронного и дырочного типов электропроводности с удельным сопротивлением  $\rho > 20$  Ом·см, полученные методами бестигельной зонной плавки и Чохральского. Некоторые образцы подвергались облучению нейтронами дозой  $\sim 10^{18}$  см $^{-2}$ . Перед проведением оптических измерений образцы были отшлифованы и оптически отполированы пастой АСМ-1. Толщина образцов составляла примерно 1 см.

Измерения спектров пропускания проводились при температурах  $T$ , равных 80 и 300 К, на двухлучевом спектрофотометре УР-20 в неполяризованном свете дифференциальным способом. В канал сравнения помещался высокоомный образец монокристаллического кремния с концентра-

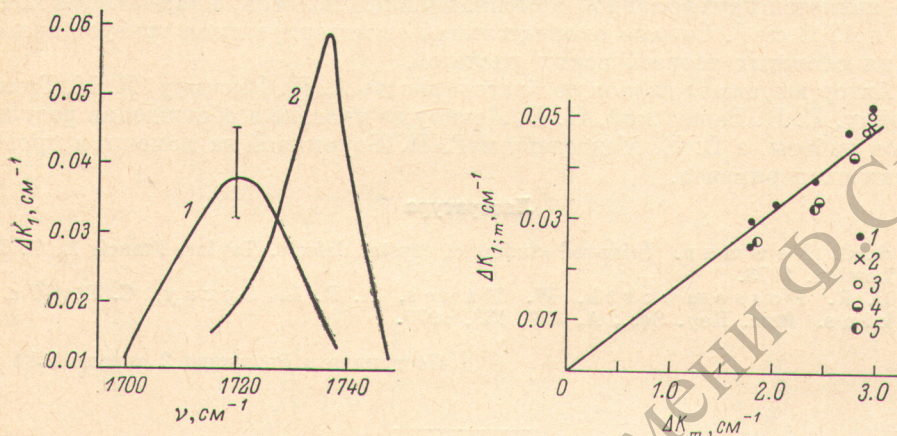


Рис. 1. Спектр поглощения комплекса Si—O—Si в монокристаллическом кремнии.  
 $T$ , К: 1 — 300, 2 — 80.

Рис. 2. Зависимость величины коэффициента поглощения  $\Delta K_{1;m}$  в максимуме полосы вблизи  $\nu \sim 1700$  см $^{-1}$  от величины коэффициента поглощения  $\Delta K_m$  в максимуме полосы 1108 см $^{-1}$ .

1 — исходный, 2 — облученный нейтронами; термообработанный при температуре 1100° С в течение: 3 — 5, 4 — 10, 5 — 2 ч.

циями кислорода  $N_{\text{к.о.}} \leq 4 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$  и углерода  $N_{\text{у}} < 10^{15}$  см $^{-3}$  по данным активационного анализа. По измеренным спектрам пропускания общепринятым методом с учетом многократных отражений были рассчитаны спектры поглощения.

Проведенные исследования показали, что в спектрах поглощения образцов, выращенных методом Чохральского и имеющих концентрацию оптически активного (т. е. межузельного) кислорода  $N_{\text{к.о.}} \geq 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , всегда присутствует полоса поглощения вблизи  $\nu \sim 1700$  см $^{-1}$ . Типичные зависимости коэффициента дополнительного поглощения в пределах полосы (за вычетом фонового поглощения кристаллической решетки кремния)  $\Delta K_1$  образца кремния, выращенного методом Чохральского, от волнового числа  $\nu$  приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что при уменьшении температуры от 300 до 80 К полоса смещается в область больших  $\nu$  и коэффициент поглощения в максимуме полосы  $\Delta K_{1;m}$  увеличивается примерно в 1.6 раза. Максимум полосы расположен при  $\nu = (1720 \pm 5)$  см $^{-1}$  для  $T = 300$  К и при  $\nu = (1737 \pm 5)$  см $^{-1}$  для  $T = 80$  К.

Наблюдения показали следующее.

1. Величина  $\Delta K_{1;m}$  для всех исследованных образцов с  $N_{\text{к.о.}} \geq 6 \times 10^{17}$  см $^{-3}$  прямо пропорциональна коэффициенту поглощения в максимуме основной полосы поглощения кислорода  $\Delta K_m$  в районе  $\nu \sim 1100$  см $^{-1}$ . На рис. 2 показаны экспериментальные точки, соответствующие измерениям одиннадцати типичных образцов кремния и проведена градуировочная прямая, проходящая через начало координат.

2. При переводе с помощью облучения нейтронами или высокотемпературных термообработок части атомов кислорода из твердого раствора (т. е. комплексов Si—O—Si) в оптически неактивное состояние зависимость, указанная на рис. 1, не нарушается.

3. В спектрах поглощения образцов, полученных методом бестигельной зонной плавки (т. е. при  $N_K \leq 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), полоса при  $\nu \sim 1700 \text{ см}^{-1}$  отсутствует.

4. Величина  $\Delta K_{1, m}$  не зависит от типа электропроводности и удельного сопротивления исследованных монокристаллов.

На основании приведенных фактов можно предположить, что полоса при  $\nu \sim 1700 \text{ см}^{-1}$  связана с колебаниями комплекса Si—O—Si. Возможно, она является двухфононной комбинационной полосой, включающей моды 517 и 1203  $\text{см}^{-1}$ . Однако окончательная ее интерпретация требует проведения сложных теоретических расчетов.

Автор выражает глубокую благодарность А. И. Рыскину, П. М. Гринштейну, Е. П. Рашевской, Н. Б. Левину за участие в обсуждении результатов работы, а В. Е. Медведеву и Г. П. Борониной за помощь в проведении эксперимента.

#### Литература

- [1] R. C. Newman. Infra-red studies of crystal defects. Taylor, Francis L. T. D. London, 1973.  
[2] D. R. Bossomworth, W. Hayes, A. R. L. Spray, C. D. Watkins. Proc. Roy. Soc., A, 317, 133, 1970.

Поступило в Редакцию 2 апреля 1981 г.

УДК 535.375+535.372

### ЭФФЕКТ ШПОЛЬСКОГО В СПЕКТРАХ ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

В. Л. Богданов и В. П. Ключков

При исследованиях [1-5] свечения жидких растворов органических веществ из короткоживущих высших электронных состояний ( $S_n$ ) методом последовательного поглощения двух фотонов ( $S_0 \xrightarrow{\nu_1} S_1 \xrightarrow{\nu_2} S_n$ ) был обнаружен ряд полос, расположенных в антистоксовой области перехода  $S_n \rightarrow S_0$ , положение которых определяется эффективной частотой возбуждения  $\nu_s$  ( $\nu_s = \nu_{01}^{00} + \nu_2$ , где  $\nu_{01}^{00}$  — частота 0,0-перехода  $S_0 \rightarrow S_1$ ). В [1, 4, 5] эти полосы трактовались как антистоксовское резонансное электронно-колебательное комбинационное рассеяние (РЭКР), а в [2, 3] — как люминесценция с отдельных колебательных уровней (в предположении, что время колебательной релаксации больше  $\tau_n$  — времени жизни состояния  $S_n$ , которое обычно имеет величину  $\sim 10^{-12} - 10^{-14}$  с). Исследованиями зависимости спектров квазиравновесной люминесценции из состояний  $S_n$  от эффективной частоты возбуждения было показано [5], что предположение [2, 3] маловероятно. Как правило, в сложных молекулах скорости внутримолекулярной колебательной релаксации превышают величину  $1/\tau_n$ .

При интерпретации коротковолновой части спектра вторичного свечения, возбуждаемого ступенчатым методом, как электронно-колебательное рассеяние, сравнительно большую ширину полос ( $\sim 200 - 700 \text{ см}^{-1}$ ) можно приписать неоднородному многоцентровому уширению, определяющему ширину 0,0-полосы перехода  $S_0 \rightarrow S_1$  ( $\nu_{01}^{00}$ ). При таком предположении для растворов, у которых реализуются условия Шпольского [6]