

аналогичными причинами и в интервале температур, линейно зависящем от E_y , индуцируется новое состояние с неоднородной структурой, отличное от структуры соразмерной и несоразмерной фаз, причем, по-видимому, реализация этого состояния существенно зависит от дефектности образца. Косвенным подтверждением существенной роли дефектов является меньшее аномальное значение диэлектрической проницаемости для образцов, в которых наблюдаются два температурных максимума.

Список литературы

- [1] Sawada S., Shiroishi Y., Yamamoto A. // *Ferroelectrics*. 1978. V. 21. N 1/2/3/4. P. 413—415.
- [2] Gesi K. // *J. Phys. Soc. Jap.* 1985. V. 54. N 7. P. 2401—2403.
- [3] Vanek P., Brezina B., Navrankova M., Biros J. // *Phys. St. Sol. (a)*. 1986. V. 95. P. K101—K103.
- [4] Бржезина Б., Ванек П., Есаян С. Х., Караев А. Д., Леманов В. В. // *ФТТ*. 1986. Т. 28. № 9. С. 2802—2807.
- [5] Hamano K., Ikeda Y., Fujimoto T., Ema K., Hirotsu S. // *J. Phys. Soc. Jap.* 1980. V. 49. N 6. P. 2278—2286.
- [6] Кroupa J., Ivanov N. R., Fousek J. // *Ferroelectrics*. 1988. V. 79. Pt II. N 1/2/3/4. P. 287—290.
- [7] Strukov B. A., Kobayashi J., Uesu Y. // *Ferroelectrics*. 1985. V. 64. Pt II. N 1/2/3. P. 57—64.
- [8] Kobayashi J., Ozeki M., Kimura T., Tsutsumi Y., Tsukiji N., Shinbori E., Nakatsugawa H. // *Ferroelectrics Lett.* 1988. V. 8. N 2. P. 41—48.

Институт кристаллографии АН СССР
Москва
Физический институт АН ЧССР
Прага

Поступило в Редакцию
6 февраля 1989 г.

УДК 539.21

Физика твердого тела, том 31, в. 7, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 7, 1989

ПРИМЕСНАЯ КИСЛОРОДНАЯ МОДА В СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ СПЕКТРАХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

А. А. Волков, Ю. Г. Гончаров, В. П. Калинушкин,
Г. В. Козлов, А. М. Прохоров

При низких температурах ($T < 50$ К) в дальних ИК спектрах монокристаллического кремния в районе 29 см^{-1} наблюдается линия поглощения, связанная с колебаниями примесного кислорода [1].

Параметры примесной моды

$T, \text{ К}$	$\nu_0, \text{ см}^{-1}$	$G, \text{ см}^{-1}$	$\Delta\varepsilon$
20	29.2	2.7	0.00072
10	29.2	1	0.00085
5	29.2	0.9	0.0009

Целью настоящей работы явилось изучение температурного поведения параметров этой моды. Сложность задачи связана с большой добротностью моды. Так, для ее неискаженной регистрации в области температуры жидкого гелия требуется спектральное разрешение лучше 0.01 см^{-1} . Такой возможностью на субмиллиметровых волнах обладает ЛЮВ спектроскопия [2]; с ее использованием и выполнено данное исследование.

В качестве объекта исследований был выбран бездислокационный кремний, выращенный методом Чохральского и легированный бором ($\rho \sim 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), диаметром ≈ 100 мм. Концентрация кислорода, определен-

ная по ИК поглощению, составляла $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Спектры пропускания плоскопараллельного образца кремния толщиной $\approx 2 \text{ мм}$, измеренные на ЛОВ спектрометре «Эпсилон» [2] в коротковолновой части субмиллиметрового диапазона при нескольких температурах, приведены на рис. 1. Исследуемая линия поглощения появляется в них на фоне интерференционных осцилляций, связанных с переотражением рабочего излучения внутри образца.

Проведенная обработка спектров пропускания показала, что форма линии поглощения хорошо описывается моделью осциллятора

$$\epsilon'' = \Delta\epsilon \nu_0^2 G \nu / ((\nu_0^2 - \nu^2)^2 + \nu^2 G^2),$$

где ν_0 — собственная частота, G — затухание, $\Delta\epsilon$ — диэлектрический вклад моды.

Полученные в результате расчетов параметры модели резонансной дисперсии приведены в таблице. Форма линии поглощения $\epsilon''(\nu)$ приведена для двух температур на рис. 2.

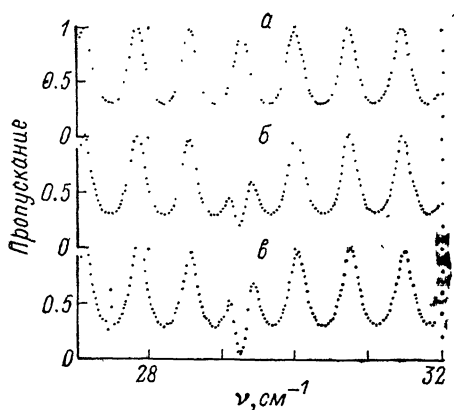


Рис. 1. Спектры пропускания плоскопараллельной пластинки кремния в окрестности примесной моды $\nu_0 = 29.2 \text{ см}^{-1}$. $T = 50$ (а), 21 (б), 12 К (в).

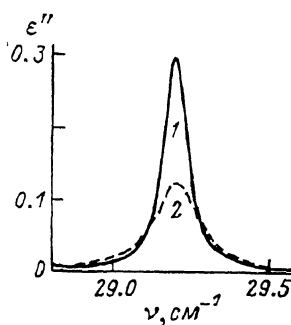


Рис. 2. Форма примесной линии поглощения, рассчитанная по результатам обработки спектров пропускания. $T = 5$ (1) и 20 К (2).

Частота моды, как видно из таблицы, остается практически неизменной во всем интервале существования линии поглощения. Затухание G изменяется с температурой по почти линейному, типичному для фононных мод закону. При температуре жидкого гелия $G \approx 0.1 \text{ см}^{-1}$ и можно ожидать, что при более глубоком охлаждении линия будет и далее обужаться.

Для обсуждения температурного поведения $\Delta\epsilon(T)$ обратимся к результатам теоретической работы [3], в которой рассмотрены колебания межузельного кислорода в решетке кремния. Согласно им, обсуждаемая мода $\nu_0 = 29 \text{ см}^{-1}$ представляет собой симметричную изгибную моду комплекса SiO_2 . Вследствие влияния ротационного движения комплекса колебательные уровни системы неэквидистантны. Мода ν_0 отвечает переходам между основным и первым возбужденным уровнями. Наблюдаемое увеличение диэлектрического вклада моды ν_0 при понижении температуры связано с ростом заселенности основного уровня.

В недавно вышедшей работе [4] при изучении спектров поглощения кремния на Фурье-спектрометре, обеспечивающем разрешение 0.25 см^{-1} , было наблюдено расщепление моды ν_0 . Этот вывод [4] не подтверждается нашими результатами, полученными с разрешением $\approx 0.01 \text{ см}^{-1}$. При всех температурах наблюдаемая нами линия описывается монорезонансной моделью дисперсии и в спектрах отсутствуют какие-либо признаки других близлежащих линий.

Кроме моды ν_0 в дальних ИК спектрах монокристаллического кремния наблюдаются колебания, отвечающие и другим колебательным переходам

на частотах 37.8, 43.2, 49.0 см⁻¹ [1]. Однако в отличие от моды ν_0 все они «вымерзают» при низких температурах вследствие опустошения возбужденных уровней. Высокая добротность и интенсивность моды 29.2 см⁻¹ при низких температурах позволяют развить субмиллиметровый метод контроля концентрации межзельного кислорода в монокристаллическом кремнии. По нашим оценкам, при температуре жидкого гелия линия поглощения ν_0 методом ЛОВ спектроскопии может быть зарегистрирована уже при концентрации межзельного кислорода $\sim 10^{16}$ см⁻³, а при субгелиевых температурах можно, по-видимому, спуститься до еще более низких значений.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Bosomworth D. R., Hayes W., Spray A. R. L., Watkins G. // Proc. R. Soc. London. 1970. V. A 317. P. 133—152.
 [2] Волков А. А., Гончаров Ю. Г., Козлов Г. В., Лебедев С. П., Малыц В. И. // Электронная техника, сер. 1. 1984. № 11 (371). С. 38—41.
 [3] Chen G. S., Schoroder D. K. // Appl. Phys. 1987. V. A4. P. 257—262; 1988. V. 53. N 24. P. 2391—2393.
 [4] Yamada-Haneta H., Oyawa T., Muraishi // J. Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 24. P. 2391—2393.

Институт общей физики АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
9 февраля 1989 г.

УДК 537.94

Физика твердого тела, том 31, в. 7, 1989
Solid State Physics, vol. 31, № 7, 1989

ДВУПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $(\text{NH}_2(\text{CH}_3)_2)_2\text{CuCl}_4$

О. Г. Влох, В. М. Варикаш, З. А. Боброва, В. Б. Капустянык,
И. И. Половинко, С. А. Сеедла

Кристаллы группы $(\text{NH}_2(\text{CH}_3)_2)_2\text{VCl}_4$ (сокращенно $(\text{DMA})_2\text{VCl}_4$) претерпевают сложную последовательность фазовых переходов, зависящую как от сорта ионов $\text{V}(\text{Zn}, \text{Co}, \text{Cu})$ [1-4], так и от модификации, в которой они вырастают [5]. Представляет интерес кристалл $(\text{DMA})_2\text{CuCl}_4$, обладающий при комнатной температуре пространственной группой симметрии $P_{n\text{т}}$ и проявляющий сегнетоэлектрические свойства в температурной области $T_c = 279.5 \text{ K} \div T_1 = 253 \text{ K}$ [1]. Результаты исследований температурных зависимостей относительного линейного расширения и диэлектрической проницаемости указывают на то, что оба фазовых перехода являются переходами первого рода, причем при T_c — несобственный [2, 4].

В настоящей работе методом Сенармона [6] изучены температурные зависимости приращения оптического двуупреломления δ (Δn) (с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-7}$) кристалла $(\text{DMA})_2\text{CuCl}_4$, а также эффективного электрооптического коэффициента $r_{22}^0 = n_0^3 (r_{12} - r_{32})$ в области фазовых переходов. Образцы для измерений ориентировались согласно [4], а температура стабилизировалась с точностью не хуже $\pm 0.01 \text{ K}$. Влияние линейного расширения учитывалось по данным [2].

Как будет показано ниже, двуупреломляющие свойства кристаллов $(\text{DMA})_2\text{CuCl}_4$ зависят от их предыстории. Поэтому на рис. 1 показаны температурные зависимости δ (Δn) для трех главных срезов образцов, отожженных в параэлектрической фазе ($T = 350 \text{ K}$) на протяжении 12 ч, что гарантировало повторимость результатов. Как видно из рис. 1, кроме уже известных ранее переходов при T_1 и T_c , обнаружен еще один фазовый переход при $T_i = 296 \text{ K}$. В области $T > T_i + 5 \text{ K}$ зависимости δ (Δn_i) =