

Зависимость $\eta_{\text{ИК}}^0(\lambda_{\text{лик}})$ при $\rho = \pi/2$ показана штрихпунктиром на рис. 2, б, 4, а. Видно, что в условиях [2] бездисперсионное приближение можно использовать уже при $\Delta_{1,2}/\Gamma \leq 0,5$. По-видимому, дисперсией можно пренебречь и в условиях [5, 6], где, по нашим оценкам, $\Delta_1 \approx \Delta_2 \approx 0,06 \text{ см}^{-1} \ll \Gamma$.

2. Среда с дисперсией. Если $\Delta_{1,2} \approx \Gamma$, то, как видно из рис. 2, б, 4, а, влияние дисперсии весьма существенно, и КПД заметно ниже уровня η^0 . В этом случае КПД с хорошей точностью оценивается по формулам (14). При $\Delta_{1,2} \gg \Gamma$ (рис. 4, б) взаимодействие некогерентно и эффективность преобразования частоты чрезвычайно мала. В этом случае аппроксимация (9) не дает хорошей точности, и формулы (14) лишь качественно передают ход перестроенной кривой.

Многомодовая накачка. Полученные здесь результаты можно обобщить на случай многомодовой накачки [4], удовлетворяющей условию $\Omega T_2 \gg 1$, где Ω — межмодовая частота, T_2 — поперечное время релаксации. Используя результаты [9], можно показать, что молекулярные колебания в этом случае близки к монохроматическим, а выражение для $Q(z)$ имеет структуру, подобную (7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Giordmaine J. A., Kaiser W. Light scattering by coherently driven lattice vibrations.—Phys. Rev., 1966, 144, p. 676—688. [2] Brosnan S. J., Fleming R. N., Herbst R. L., Byer R. L. Tunable infrared generation by coherent Raman mixing in H_2 .—Appl. Phys. Lett., 1977, 30, p. 330—332. [3] Венкин Г. В., Крочик Г. М., Кулюк Л. Л., Малеев Д. И., Хронопуло Ю. Г. Влияние четырехволновых параметрических процессов на динамику стоксовых компонент ВКР.—ЖЭТФ, 1976, 70, с. 1674—1685. [4] Бондаренко С. И., Дьяков Ю. Е., Нехаенко В. А., Никитин С. Ю. К теории генерации ИК-излучения при четырехволновом процессе на основе неколлинеарного ВКР и в резонаторе.—В кн.: Тезисы докл. IX Всес. конф. по когерентной и нелинейной оптике. М., 1978, ч. II, с. 117. [5] Loy M. M. T., Sorokin P. P., Lankard J. R. Generation of 16- μm radiation by four-wave mixing in parahydrogen.—Appl. Phys. Lett., 1977, 30, p. 415—417. [6] Sorokin P. P., Loy M. M. T., Lankard J. R. A 16- μm radiation source utilizing four-wave mixing in cooled parahydrogen gas.—IEEE J. of Quant. Electron., 1977, OE-13, p. 871—875. [7] Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. М.: Изд-во АН СССР, 1965, с. 231. [8] Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1967. [9] Джотян Г. П., Дьяков Ю. Е. Насыщение ВКР при многомодовой накачке.—Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ., Астрон., 1977, 18, с. 70—73.

Поступила в редакцию
09.07.79

УДК 534.013:53.082.72

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ КРУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ ИЗ САПФИРА

В. П. Митрофанов, О. И. Пономарева

(кафедра физики колебаний)

Эксперименты по обнаружению гравитационных волн потребовали разработки высокодобротных механических резонаторов продольных колебаний из монокристаллов сапфира. Эти резонаторы имеют рекордные значения добротности $Q = 2 \cdot 10^8$ при $T = 300 \text{ К}$ и $Q = 5 \cdot 10^9$ при $T = 4,2 \text{ К}$ [1]. Однако для проведения экспериментов по обнаружению пост-ньютоновских гравитационных эффектов необходимо иметь резонаторы крутильных колебаний с предельно высокой добротностью [2].

Данная работа посвящена исследованию свойств резонаторов крутильных колебаний из сапфира, имеющих цилиндрическую форму.

Следует отметить, что в отличие от продольных колебаний колебания кручения на ультразвуковых частотах изучались мало [3], что связано со сложностью их возбуждения и регистрации. Сапфир не обладает ни пьезоэлектрическими, ни магнитными свойствами. Электромагнитный и электродинамический способы возбуждения и регистрации колебаний неприменимы из-за вносимого в резонатор затухания. В данной работе предлагается электростатический способ возбуждения и регистрации крутильных колебаний, как наиболее простой и вносящий в резонатор минимальное затухание.

Исследуемый резонатор представлял собой монокристалл сапфира цилиндрической формы длиной 137 и диаметром 38 мм. Ось цилиндра совпадала с кристаллографической осью L_2 . В кристалле возбуждалась низшая мода крутильных колебаний с частотой 22,7 кГц, имеющая узловую поверхность в середине цилиндра.

Электростатическая раскочка крутильных колебаний осуществлялась следующим образом. На торец цилиндра наносилось химическим способом серебряное покрытие в форме чередующихся секторов, как показано на рис. 1. Параллельно торцу на расстоянии d располагалась металлическая пластина такой же формы, но разрезанная вдоль диаметра. Она устанавливалась так, чтобы металлические сектора пластины были сдвинуты относительно посеребренных секторов на цилиндре и перекрывали примерно половину их площади. При этом возникает составяющая силы, действующая в плоскости торца цилиндра. За счет этой силы возбуждаются крутильные колебания в цилиндре. Дифференцируя выражение для энергии плоского конденсатора по углу кручения, получаем силу и соответственно момент сил M , действующих на цилиндр. Расчет дает следующее выражение:

$$M = \epsilon_0 U^2 R^2 n / 32d, \quad (1)$$

где U — напряжение, подаваемое на пластины, R — радиус цилиндра, n — количество напыленных секторов. Формула (1) справедлива при выполнении неравенства: $n \ll R/d$.

Для нахождения амплитуды колебаний цилиндра использовалась эквивалентная схема представления распределенной системы через колебательную систему с одной степенью свободы. Амплитуда колебаний осциллятора под действием резонансной силы, действующей в течение времени $t \ll Q/\omega$, где Q — добротность осциллятора, вычисляется по формуле

$$\varphi = \varphi_{ст} (\omega t / 2).$$

Здесь φ — амплитуда угла кручения торца цилиндра, ω — собственная частота колебаний осциллятора, $\varphi_{ст}$ — статический угол закручивания торца цилиндра, определяемый из соотношения [4]:

$$\varphi_{ст} = 2M / \pi R^4 \rho l \omega^2,$$

где ρ — плотность кристалла, l — его длина. Таким образом, используя формулу (1), окончательно получаем выражение

$$\varphi = \epsilon_0 U^2 n t / 32 \pi R^2 d \rho l \omega.$$

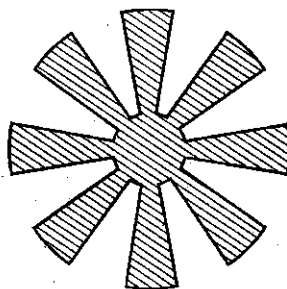


Рис. 1. Форма серебряного покрытия на торцах цилиндра

Чтобы зарегистрировать механические колебания резонатора, необходимо преобразовать их в электрический сигнал. С этой целью на второй торец кристалла наносилось серебряное покрытие, и рядом располагались пластины в полной аналогии с системой возбуждения колебаний. Крутильные колебания стержня приводят к смещению секторов, напыленных на торец кристалла, относительно секторов пластин. Соответственно, меняется и емкость конденсатора. Изменение емкости ΔC связано с амплитудой угла закручивания соотношением:

$$\Delta C = C_p (4n\varphi/\pi),$$

где C_p — емкость конденсатора, образованного серебряным покрытием торца цилиндра и пластинами.

Конденсатор входил в схему емкостного датчика, который преобразовывал изменения емкости в электрический сигнал. Использовались

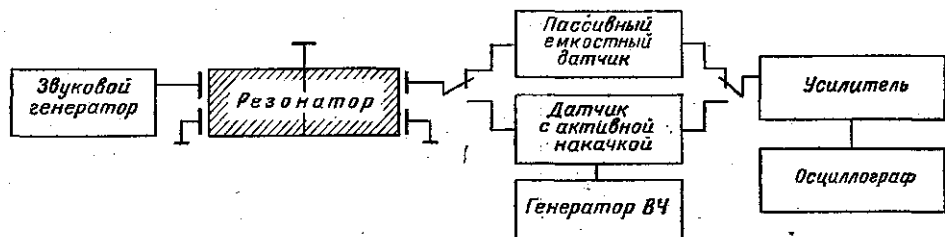


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования крутильных колебаний цилиндра

два датчика: пассивный и активный. Датчик активного типа, т. е. с высокочастотной накачкой, является более чувствительным. Однако он может вносить в резонатор дополнительное положительное или отрицательное затухание [5]. В связи с этим активный датчик использовался только для возбуждения колебаний, а для точного определения добротности резонатора использовался обычный пассивный емкостный датчик типа конденсаторного микрофона.

Изменение напряжения ΔU на выходе датчика при регистрации крутильных колебаний с амплитудой φ определяется формулами:

$$\Delta U = \frac{1}{2} U_{\sim} Q_e \frac{C_p}{C_p + C_{\pi}} \frac{4n\varphi}{\pi}$$

в случае активного датчика,

$$\Delta U = E \frac{C_p}{C_p + C_{\pi}} \frac{4n\varphi}{\pi}$$

в случае пассивного датчика, где U_{\sim} — напряжение в резонансном контуре активного датчика, Q_e — его добротность, E — напряжение батареи, включенной в цепь пассивного емкостного датчика, C_{π} — паразитная емкость схемы. Отличие данных формул от аналогичных выражений для электростатического способа регистрации продольных колебаний заключается в дополнительном множителе $\sim nd/R$.

Блок-схема системы возбуждения и регистрации крутильных колебаний в сапфировых резонаторах изображена на рис. 2. Резонатор помещался в вакуумную камеру, чтобы исключить передачу энергии от резонатора молекулам воздуха. Для возбуждения колебаний на пластины раскочки подавалось напряжение от звукового генератора, частота

которого была равна половине собственной частоты крутильных колебаний резонатора. Амплитуда напряжения на пластинах составляла 700 В. Между пластинами и торцами кристалла устанавливались зазоры 0,2—0,3 мм. Раскачка производилась в течение 2—3 с. Это время определялось точностью установки частоты генератора раскачки. При этих условиях амплитуда колебаний резонатора достигала значения $\varphi = 10^{-7}$ рад. Колебания резонатора регистрировались емкостным датчиком, сигнал усиливался и подавался на осциллограф. Добротность резонатора определялась по времени затухания его свободных колебаний.

Деформации кручения в сапфире сопровождаются продольными деформациями, возникающими из-за анизотропии кристалла, так что узловая поверхность крутильной моды имеет сложную форму. Важно, что частоты других мод существенно отличались от интересующей нас частоты крутильной моды, и поэтому не наблюдалась перекачка энергии в другие моды, приводящая к уменьшению добротности.

Были проведены измерения добротности описанного выше резонатора крутильных колебаний из сапфира. Поверхность кристалла тщательно полировалась, резонатор подвергался отжигу в вакууме при температуре 1400 К. Это позволило свести к минимуму потери энергии в нарушенном обработкой поверхностном слое кристалла. Наименьшее затухание было получено, когда резонатор подвешивался в петле из шелковой нити или тонкой вольфрамовой проволоки так, чтобы плоскость подвеса проходила через геометрический центр стержня, поэтому он находился в положении равновесия.

Основной причиной поглощения ультразвуковых волн в совершенных кристаллах являются фонон-фононные взаимодействия в поле звуковой волны. Для оценки затухания используем известное выражение [6]:

$$Q^{-1} = \frac{Tc\hat{\gamma}^2}{\rho V^2} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (2)$$

где T — абсолютная температура, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность кристалла, V — скорость упругой волны, τ — время релаксации фононных мод, $\hat{\gamma}$ — величина, характеризующая ангармонизм колебаний решетки, приближенно равная постоянной Грюнайна. Подставляя в формулу (2) численные значения параметров сапфирового резонатора, получаем $Q(300 \text{ К}) = 2,5 \cdot 10^9$.

Экспериментально полученное значение добротности при комнатной температуре равно $Q = 7,5 \cdot 10^7$. Отличие от расчетного значения, по видимому, обусловлено неполным устранением потерь в подвесе и поверхностном слое резонатора.

При понижении температуры эти потери уменьшаются. Таким образом, резонаторы крутильных колебаний из сапфира могут иметь добротность при низких температурах, сравнимую с добротностью сапфировых резонаторов продольных колебаний.

Авторы благодарят В. Б. Брагинского за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Багдасаров Х. С., Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Шиян В. С. Высокодобротный механический резонатор из монокристалла сапфира.—Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1977, 18, № 1, с. 98—100. [2] Braginsky V. B., Caves C. M., Thorne K. S. Laboratory experiments to test relativistic gravity.—Phys. Rev. D, 1977, 15, p. 2047—2068. [3] Физическая акустика. Под ред. У. Мэсона. М.: Мир, 1966, т. I, ч. А, с. 363. [4] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.

УДК 535.375+535.853.11

ИЗУЧЕНИЕ НАЛОЖИВШИХСЯ ЛИНИЙ КР В ЦИКЛОГЕКСАНЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Л. С. Асланян, А. Ф. Бункин, С. А. Чупрына

(кафедра общей физики и волновых процессов)

1. В комбинационном рассеянии (КР) света вследствие частичного или полного перекрывания нескольких близких по частоте линий образуются широкие полосы, разрешение которых методом спонтанного КР часто оказывается затруднительным. Выяснение структуры этих полос представляет собой весьма актуальную задачу в молекулярной спектроскопии, так как именно такая ситуация реализуется в системах с сильными водородными связями, в ряде углеводов, в биологических макромолекулах [1—2].

Решение этой задачи во многих случаях может быть достигнуто методами нелинейной лазерной спектроскопии. Как было показано в [3], поляризационная четырехфотонная спектроскопия (или когерентная эллипсометрия (КЭ)) комбинационного рассеяния света при разрешении наложившихся линий КР обладает рядом преимуществ по сравнению как со спонтанной, так и с активной спектроскопией КР (АСКР). В настоящей работе сообщается о применении КЭ для разрешения комбинационно-активной полосы 1445 см^{-1} циклогексана. Литературные данные о числе линий в полосе 1445 см^{-1} расходятся. Согласно [1, 4] эта полоса состоит из двух компонент, неразрешимых в КР, тогда как по данным [5—7] число линий равно трем. Кроме того, насколько нам известно, в литературе отсутствует спектроскопическая информация об отдельных компонентах этой полосы.

В работе [8] был получен спектр этой же полосы циклогексана методом АСКР, однако разрешить ее структуру автору не удалось. Применение поляризационной методики позволило нам найти три составляющие внутри полосы 1445 см^{-1} циклогексана, а моделирование спектра на ЭВМ — оценить их спектроскопические параметры (см. ниже). С помощью моделирования на ЭВМ изучены также предельные возможности разрешения в КЭ (см. п. 2).

2. Когерентная эллипсометрия КР света является одним из вариантов широко применяемого метода АСКР [10]. В КЭ сфазированные с помощью бигармонической накачки ω_1, ω_2 молекулярные колебания зондируются пробным лучом частоты ω (часто удобно использовать $\omega = \omega_1$). Измеряется дисперсия параметров поляризации излучения с частотой $\omega_a = 2\omega_1 - \omega_2$ при сканировании $\omega_1 - \omega_2$ вблизи Ω_R . Здесь Ω_R — частота избранного комбинационно-активного перехода. Ранее этот метод уже применялся для точного определения спектроскопических параметров уединенных линий КР и для разрешения наложившихся линий [3], однако для дальнейших аналитических приложений важным является выяснение предельных возможностей разрешения в КЭ.