

05:09

Анизотропия диэлектрических потерь в монокристаллах Al_2O_3 и SiO_2

© В.Н. Егоров, В.Л. Масалов, И.Б. Ожогов

Восточно-Сибирский филиал Всероссийского НИИ физико-технических
и радиотехнических измерений, Иркутск

E-mail: egorov@niiftri.irk.ru

Поступило в Редакцию 8 июня 2009 г.

Рассматриваются методика и результаты измерения тангенса угла диэлектрических потерь в интервале температур 80–373 К в одноосных анизотропных монокристаллах Al_2O_3 на частоте 11 GHz, SiO_2 на частоте 39 GHz и в изотропном монокристалле $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) при комнатной температуре на частотах 9–15 GHz. Измерения проведены методом диэлектрического резонатора на азимутальных колебаниях двух классов: HE (квази- E) и EH (квази- H), что позволило выявить анизотропию диэлектрических потерь в монокристаллах Al_2O_3 , SiO_2 . Потери вдоль оптической оси кристаллов существенно ниже потерь в поперечной плоскости в исследованном интервале температур. В монокристалле YAG добротность колебаний обоих классов при близких частотах одинакова, что соответствует изотропным потерям. Диэлектрические потери в YAG возрастают пропорционально частоте.

PACS: 78.20.Ci, 77.22.-d, 84.40.-x

Монокристаллы Al_2O_3 , SiO_2 и $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) имеют в микроволновом диапазоне частот очень малые диэлектрические потери. Сапфир (Al_2O_3) и пьезокварц (SiO_2) обладают одноосной анизотропией вещественной части диэлектрической проницаемости с компонентами ϵ'_{\parallel} , ϵ'_{\perp} вдоль кристаллографической оси и в ортогональной к ней плоскости. Диэлектрические потери в Al_2O_3 и SiO_2 в микроволновом диапазоне были измерены в изотропном приближении в работах [1–3]. Нет, однако, достаточных оснований предполагать в них равными мнимые части диэлектрической проницаемости ϵ''_{\parallel} , ϵ''_{\perp} или значения $\text{tg } \delta_{\parallel} = \epsilon''_{\parallel} / \epsilon'_{\parallel}$ и $\text{tg } \delta_{\perp} = \epsilon''_{\perp} / \epsilon'_{\perp}$. В работе [4] приведены значения $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ сапфира на частоте 170 GHz при комнатной температуре. Данные

по температурным зависимостям $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в Al_2O_3 и SiO_2 отсутствуют.

Малые диэлектрические потери могут быть измерены резонансными методами. Точным измерениям диэлектрических потерь обычно мешают омические потери в металлических стенках резонатора. Использование открытых диэлектрических резонаторов с азимутальными колебаниями типа „шепчущей галереи“ позволяет устранить это ограничение [5]. Излучательная добротность для колебаний этого типа в открытом осесимметричном диэлектрическом резонаторе (ДР) экспоненциально возрастает с ростом азимутального индекса n и может достигать большой величины даже при невысоких значениях ε [5]. При достаточно больших размерах ДР в сравнении с длиной волны λ собственная добротность Q_0 азимутальных колебаний в нем полностью определяется значением $\text{tg } \delta$ материала ДР.

В дисковом (цилиндрическом) ДР существуют два класса азимутальных колебаний с малым излучением: HE_{mnp} (квази- E) и EH_{mnp} (квази- H) моды, где n , m , p — азимутальный, радиальный и продольный индексы (целые числа). Низшими являются азимутальные колебания HE_{n11} , EH_{n11} при $n \gg 1$. При отсутствии диэлектрических потерь в окружающем резонатор пространстве собственная добротность продольно-анизотропного ДР выражается как [6]

$$Q_{0E}^{-1} = K_{1E\parallel}^E \text{tg } \delta_{\parallel} + K_{1E\perp}^E \text{tg } \delta_{\perp} + Q_{rad}^{-1}, \quad (1)$$

$$Q_{0H}^{-1} = K_{1E\parallel}^H \text{tg } \delta_{\parallel} + K_{1E\perp}^H \text{tg } \delta_{\perp} + Q_{rad}^{-1}, \quad (2)$$

где $K_{1E\parallel}^{E,H} = W_{1E\parallel}^{E,H} / W_{\Sigma}^{E,H}$, $K_{1E\perp}^{E,H} = W_{1E\perp}^{E,H} / W_{\Sigma}^{E,H}$; $W_{1E\parallel}^{E,H}$, $W_{1E\perp}^{E,H}$ — энергия электрического поля продольной (E_{\parallel}) и поперечной (E_{\perp}) компонент вектора E в диэлектрическом диске; $W_{\Sigma}^{E,H}$ — полная запасенная энергия в резонаторе. Индексы E и H относятся к HE_{n11} (квази- E) и EH_{n11} (квази- H) модам. При $Q_{rad}^{-1} \ll \text{tg } \delta$ добротность резонатора $Q_{0,E,H}$ будет определяться диэлектрическими потерями в материале ДР, здесь $\text{tg } \delta$ — наименьшее значение $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$. Различие между Q_{0E} и Q_{0H} для $K_{1E\parallel}^E + K_{1E\perp}^E \approx K_{1E\parallel}^H + K_{1E\perp}^H$ указывает на анизотропию $\text{tg } \delta$ вследствие соотношений $K_{1E\parallel}^E \gg K_{1E\perp}^E$, $K_{1E\parallel}^H \ll K_{1E\perp}^H$ в ДР. Решение

системы (1), (2) относительно $\operatorname{tg} \delta_{\parallel}$, $\operatorname{tg} \delta_{\perp}$ приводит к

$$\operatorname{tg} \delta_{\parallel} = \frac{Q_{0E}^{-1} \cdot K_{1E\perp}^H - Q_{0H}^{-1} \cdot K_{1E\perp}^E}{K_{1E\parallel}^E \cdot K_{1E\perp}^H - K_{1E\parallel}^H \cdot K_{1E\perp}^E},$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\perp} = \frac{Q_{0H}^{-1} \cdot K_{1E\parallel}^E - Q_{0E}^{-1} \cdot K_{1E\parallel}^H}{K_{1E\parallel}^E \cdot K_{1E\perp}^H - K_{1E\parallel}^H \cdot K_{1E\perp}^E}. \quad (3)$$

Коэффициенты $K_{1E\parallel}^E$, $K_{1E\perp}^E$, $K_{1E\parallel}^H$, $K_{1E\perp}^H$ в (3) находились как

$$K_{1E\parallel,\perp}^{E,H} = -2 \frac{\varepsilon_{\parallel,\perp}}{f_0} \left(\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon_{\parallel,\perp}} \right)$$

по модели анизотропного ДР [6] в окрестности резонансной частоты f_0 колебаний HE_{n11} и EH_{n11} . Измерения компонент $\operatorname{tg} \delta_{\parallel}$, $\operatorname{tg} \delta_{\perp}$ проведены в монокристаллах Al_2O_3 и SiO_2 при температуре от ~ 80 до 373 К в X - и K -диапазонах соответственно. Измерения частотной зависимости потерь в изотропном монокристалле YAG с кубической решеткой выполнены в X -диапазоне при комнатной температуре на обеих поляризациях (HE_{n11} и EH_{n11} колебаниях).

В экспериментах использовался скалярный анализатор СВЧ-цепей P2M-40 с частотным разрешением 1 Hz. Дискковый образец (ДР) с параллельной ориентацией оптической и геометрической осей был закреплен на медной оси в центре ДР, где электромагнитное поле колебаний типа „шепчущей галереи“ пренебрежимо мало. Нагреватель и датчик температуры ДР были расположены на медной оси. Возбуждение HE_{n11} и EH_{n11} колебаний с близкими частотами осуществлялось микрополосковой линией на частотах X -диапазона и прямоугольным диэлектрическим волноводом в K -диапазоне. Измеряемый ДР возбуждался как направленный ответвитель в режиме бегущей волны. Значения азимутального индекса n выбирались достаточно большими, с тем, чтобы обеспечить пренебрежимо малые потери энергии ДР на излучение в сравнении с диэлектрическими потерями. Экспериментальная оценка Q_{rad} была выполнена при комнатной температуре в ДР из YAG, Al_2O_3 и SiO_2 для HE_{n11} и EH_{n11} колебаний при небольших n , когда $Q_{rad}^{-1} \geq \operatorname{tg} \delta$. Экспериментальная зависимость собственной добротности Q_0 как функции азимутального индекса n в ДР из YAG приведена на рис. 1. Для значений $n < 10$ собственная добротность Q_0 определяется

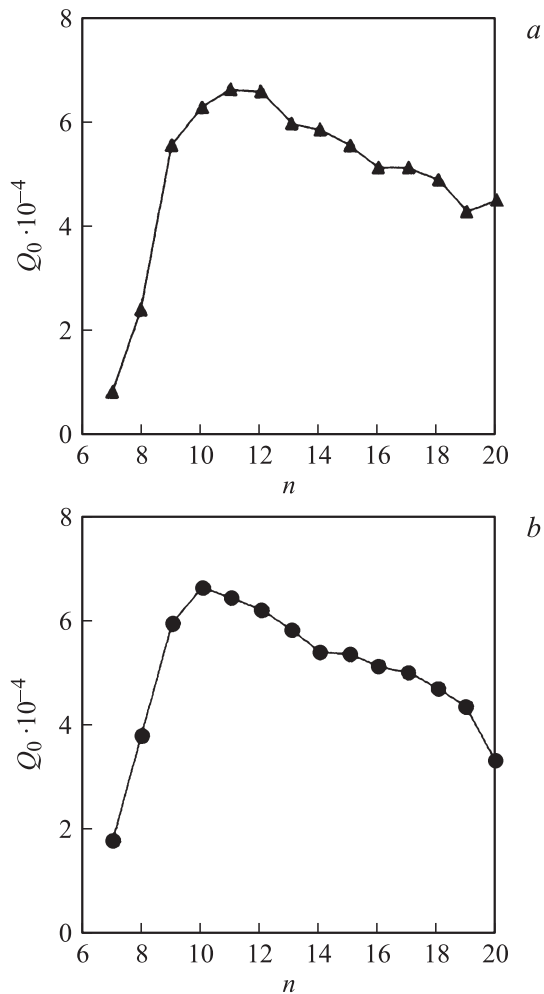


Рис. 1. Собственная добротность ДР из YAG в зависимости от азимутального индекса n колебаний HE_{n11} (a) и EH_{n11} (b).

излучательными потерями, которые экспоненциально уменьшаются с ростом n . Для достаточно больших $n > 12$ выполняется соотношение $\text{tg } \delta \approx Q_0^{-1}$. Это значение $\text{tg } \delta$ было использовано при расчете излуча-

Таблица 1. Характеристики ДР из SiO₂ с размерами $D = 29.983$ mm, $L = 7.985$ mm

HE_{n11}					EH_{n11}				
n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	Q_0	n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	Q_0
22	39.87685	39.85336	-0.059	55800	20	38.73932	38.59652	-0.370	33600

тельных потерь Q_{rad}^{-1} для исключения диэлектрических потерь из полных потерь энергии в резонаторе. Аппроксимация экспериментальных результатов в координатах $\log Q_{rad}$, n показала хорошее совпадение с линейной зависимостью.

Диск из монокристаллического SiO₂ с параллельной ориентацией кристаллографической и геометрической осей имел диаметр $D = 29.983$ mm и высоту $L = 7.958$ mm. Для измерения температурных зависимостей компонент $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ использовались колебания $HE_{22,1,1}$ и $EH_{20,1,1}$. Их расчетные резонансные частоты f_{cl} , экспериментальные резонансные частоты f_{ex} , относительная погрешность расчета $\delta f = (f_{ex} - f_{cl})/f_{ex}$ и собственная добротность Q_0 при температуре 293 К приведены в табл. 1. Коэффициенты $K_{1E\parallel}^E$, $K_{1E\perp}^E$, $K_{1E\parallel}^H$, $K_{1E\perp}^H$ для этих колебаний имели значения $K_{1E\parallel}^E = 0.910$, $K_{1E\perp}^E = 0.070$, $K_{1E\parallel}^H = 0.026$, $K_{1E\perp}^H = 0.940$. Результаты измерения $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ при температуре 77–373 К приведены на рис. 2, а. Другой образец монокристалла SiO₂ с размерами $D = 35.0$ mm, $L = 4.67$ mm исследовался при температуре 290–360 К на колебаниях $HE_{21,1,1}$, $EH_{21,1,1}$ и $HE_{22,1,1}$, $EH_{22,1,1}$. Значения $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в двух исследованных образцах близки при одинаковой температуре и частоте.

Температурная зависимость $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в монокристалле Al₂O₃ исследовалась в ДР с размерами $D = 58.38$ mm, $L = 8.15$ mm. Для измерения в диапазоне температур 85–373 К использовались колебания $HE_{16,1,1}$ и $EH_{15,1,1}$. Их расчетные и экспериментальные резонансные частоты, относительная погрешность расчета частот и собственная добротность Q_0 при комнатной температуре приведены в табл. 2. Коэффициенты $K_{1E\parallel}^E$, $K_{1E\perp}^E$, $K_{1E\parallel}^H$, $K_{1E\perp}^H$ для этих колебаний имели значения $K_{1E\parallel}^E = 0.682$, $K_{1E\perp}^E = 0.292$, $K_{1E\parallel}^H = 0.133$, $K_{1E\perp}^H = 0.850$. Температурные зависимости $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ показаны на рис. 2, б. С понижением

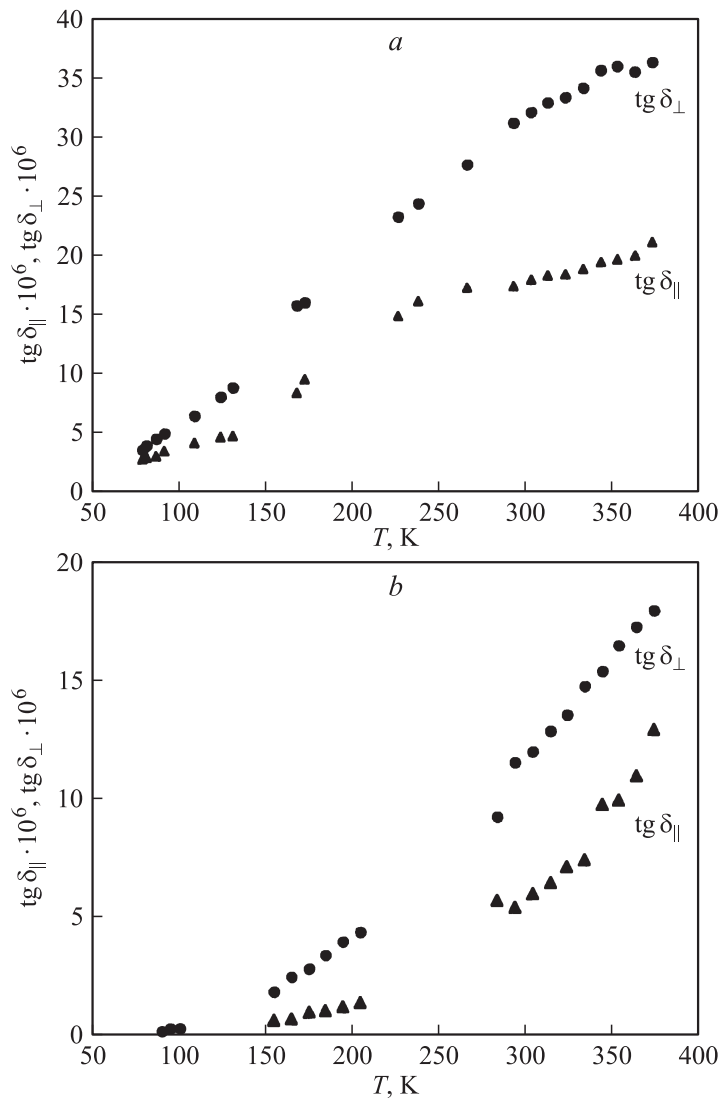


Рис. 2. Температурная зависимость $\text{tg } \delta_{\parallel}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в монокристаллах SiO_2 на частоте 39 GHz (a) и Al_2O_3 на частоте 11 GHz (b).

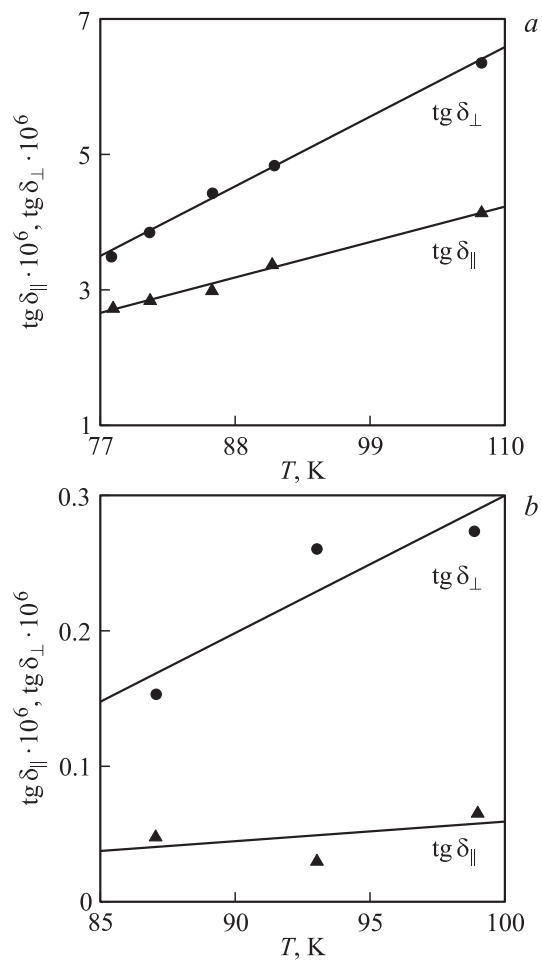


Рис. 3. Температурная зависимость $\text{tg } \delta_{||}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в SiO_2 (a) и Al_2O_3 (b) в криогенной области.

температуры обе компоненты значительно убывают. На рис. 3 отдельно приведены температурные зависимости $\text{tg } \delta_{||}$, $\text{tg } \delta_{\perp}$ в SiO_2 и Al_2O_3 в криогенной области. Значительное превышение $\text{tg } \delta_{\perp}$ над $\text{tg } \delta_{||}$ сохраняется во всем диапазоне температур.

Таблица 2. Характеристики ДР из Al_2O_3 с размерами $D = 58.38$ mm, $L = 8.15$ mm

HE_{n11}					EH_{n11}				
n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	Q_0	n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	Q_0
16	11.2175	11.2714	0.48	155700	15	11.4720	11.4950	0.20	94050

Таблица 3. Характеристики ДР из YAG с размерами $D = 49.953$ mm, $L = 9.930$ mm и частотная зависимость $\text{tg } \delta$ для двух поляризаций

HE_{n11}					EH_{n11}				
n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	$\text{tg } \delta \cdot 10^6$	n	f_{cl} , GHz	f_{ex} , GHz	$\delta f \cdot 10^2$	$\text{tg } \delta \cdot 10^6$
11	9.50619	9.62301	1.21	15.5	10	9.19988	9.10991	-0.99	15.4
12	10.09806	10.2048	1.05	15.6	11	9.82005	9.74001	-0.82	15.9
13	10.69362	10.7914	0.91	17.1	12	10.43958	10.3677	-0.69	16.4
14	11.29212	11.3817	0.79	17.4	13	11.05854	10.9936	-0.59	17.5
15	11.89295	11.9752	0.69	18.4	14	11.67701	11.6183	-0.51	18.8
16	12.49566	12.5716	0.60	19.8	15	12.29503	12.2414	-0.44	18.9
17	13.09986	13.1699	0.53	19.8	16	12.91261	12.8640	-0.38	19.8
18	13.70526	13.7702	0.47	20.6	17	13.52980	13.4853	-0.33	20.3
19	14.31162	14.3720	0.42	23.6	18	14.14660	14.1057	-0.29	21.5
20	14.91875	14.9750	0.38	22.4	19	14.76303	14.7253	-0.26	23.2

Резонатор из монокристалла YAG имел размеры $D = 49.953$ mm, $L = 9.930$ mm. Измерялись его резонансные частоты и значения собственной добротности на HE_{n11} и EH_{n11} колебаниях. Расчетные значения резонансных частот f_{cl} , экспериментальные результаты и рассчитанные по (3) значения $\text{tg } \delta$ приведены в табл. 3. Как видно из табл. 3, в изотропном монокристалле YAG значения $\text{tg } \delta$ для обеих поляризаций близки между собой на близких частотах и сохраняется приближительное постоянство произведения $f^{-1} \text{tg } \delta$.

Таким образом, экспериментально обнаружена значительная анизотропия диэлектрических потерь в монокристаллах Al_2O_3 и SiO_2 , более сильная, чем анизотропия вещественных частей диэлектрической проницаемости. В обоих монокристаллах, в противоположность соот-

ношению $\varepsilon_{\parallel} > \varepsilon_{\perp}$, выполняется $\operatorname{tg} \delta_{\perp} > \operatorname{tg} \delta_{\parallel}$. Отношение $\operatorname{tg} \delta_{\perp} / \operatorname{tg} \delta_{\parallel}$ в интервале температур 80–373 К находится в пределах 1.3–1.9 для SiO_2 и 3.5–1.6 для Al_2O_3 .

Список литературы

- [1] Брагинский В.Б., Панов В.И., Тимашов А.В. // ДАН СССР. 1982. Т. 267. № 1. С. 74.
- [2] Буньков С.Н., Вторушин Б.А., Егоров В.Н. и др. // РЭ. 1987. № 5. С. 1071.
- [3] Егоров В.Н., Константинов В.И., Подсосонная О.В. // Тез. докл. Всесоюз. симп. „Квантовые стандарты частоты радио- и оптического диапазонов“. 27–29 мая 1987 г. М.: ФИАН, 1987. С. 72.
- [4] Власов С.Н., Копосова Е.В., Паришин В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 5. С. 615.
- [5] Добромислов В.С., Взятыешев В.Ф. // Тр. Моск. энерг. ин-та. 1973. В. 161. С. 78.
- [6] Егоров В.Н. // ПТЭ. 2007. Т. 50. № 2. С. 5–38.