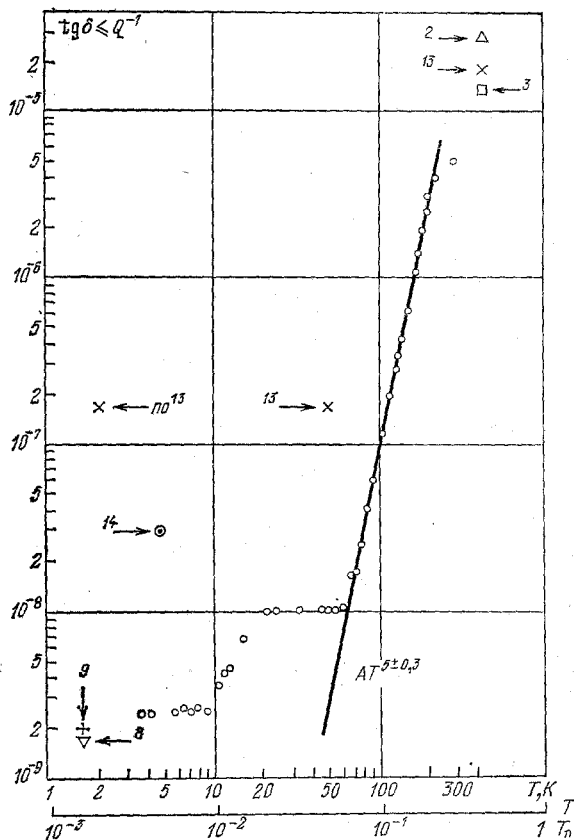


**Х. С. Багдасаров, В. Б. Брагинский, В. И. Панов, В. С. Ильченко.** А н о м а л ь н о м а л а я д и с с и п а ц и я э л е к т р о м а г н и т н ы х волн в совершенных монокристаллах - диэлектриках. Измерения диссипации электромагнитных волн в кристаллах-диэлектриках позволяют получить важную информацию о механизмах диэлектрической релаксации. Ценность этой информации связана с тем, что пока не создана полная теория, позволяющая предсказать величину  $\operatorname{tg} \delta$  кристалла известного состава и структуры. Опубликованные экспериментальные данные по  $\operatorname{tg} \delta$  кристаллов часто противоречивы. Для лейкосапфира  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (лучший из известных СВЧ диэлектриков) разные авторы приводят оценки  $\operatorname{tg} \delta$  от  $1,5 \cdot 10^{-3}$  до  $1,5 \cdot 10^{-5}$  при  $T = 300 \text{ K}^{1-3}$ . С другой стороны, детальный анализ фононной релаксации, проведенный В. Л. Гуревичем<sup>4,5</sup>, показыва-

ет, что диэлектрические потери лейкосапфира — центросимметричного гексагонального ионного кристалла — должны составлять при  $T = 300$  К  $\text{tg } \delta \approx 10^{-6}$  на частоте  $f = 10^{10}$  Гц и убывать с понижением температуры как  $T^5$ . Такое противоречие экспериментальных и теоретических оценок связано, по-видимому, с несовершенством экспериментальных методик и особенностями использованных образцов.

Совершенствование технологии выращивания монокристаллов побудило авторов предпринять детальные измерения  $\text{tg } \delta$  лейкосапфира в широком



интервале температур. Первые измерения, выполненные в 1977 г.<sup>6</sup>, показали, что монокристаллы сапфира, полученные методом направленной кристаллизации, имеют  $\text{tg } \delta < 2 \cdot 10^{-8}$  при  $T = 2$  К на частоте  $f = 3 \cdot 10^9$  Гц. Уточнение этих измерений, выполненных в сверхпроводящих резонаторах (СПР), позволило снизить верхнюю границу потерь до величины  $\text{tg } \delta < 1,5 \cdot 10^{-9}$ <sup>7,8</sup>. Эта оценка, существенно меньшая известных для других диэлектриков, была подтверждена в 1983 г. в работе<sup>9</sup>.

Примененная в<sup>6-9</sup> методика с использованием СПР ограничена узким интервалом температур. Поэтому в последующих измерениях была применена предложенная в 1963 г. В. Ф. Взятыхевым<sup>10</sup> идея использования для измерения малых потерь кольцевых диэлектрических резонаторов с полным внутренним отражением. Добротность  $Q$  таких резонаторов определяется как величиной  $\text{tg } \delta$  вещества резонатора, так и дополнительными потерями, связанными с возможным загрязнением поверхности и рассеянием электромагнитной энергии:

$$Q^{-1} \approx \text{tg } \delta + (\Delta V/V) (\text{tg } \delta)_{\text{пов}} + Q_{\text{рас}}^{-1};$$

здесь  $\Delta V$  — объем поверхностного загрязнения,  $V$  — объем резонатора,  $(\text{tg } \delta)_{\text{пов}}$  — тангенс угла потерь вещества на поверхности, а  $Q_{\text{рас}}$  определяется совокупным рассеянием энергии, связанным с конечностью размеров и нерегулярностями резонатора, — плавными неоднородностями, шероховатостями и блочной структурой кристалла. Вычисления<sup>11</sup> показывают, что качество современных монокристаллов сапфира позволяет реализовать чувствительность измерений  $\text{tg } \delta \leq 10^{-10}$  даже при умеренных требованиях к технологии изготовления резонаторов. Таким методом были получены новые экспериментальные оценки потерь в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  на частоте  $f \approx 10^{10}$  Гц<sup>12</sup>:  $\text{tg } \delta \leq 4 \cdot 10^{-6}$  при  $T = 300$  К,  $\text{tg } \delta \leq 1,6 \cdot 10^{-8}$  при  $T = 78$  К и  $\text{tg } \delta \leq 1,6 \cdot 10^{-9}$  при  $T = 10$  К. Детальная разработка метода кольцевого диэлектрического резонатора позволила конкретизировать условия реализации высокой чувствительности измерений  $\text{tg } \delta$ . Установлено, например, что для

устранения эффекта радиационных потерь на уровне  $Q_{\text{рас}}^{-1} \approx 10^{-9}$  достаточно обеспечить точность геометрической формы и гладкость поверхности на уровне  $\Delta d/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$  ( $\Delta d/d$  — относительный размер геометрических нерегулярностей). Исключение эффекта загрязнения поверхности на том же уровне требует многочасовой обработки резонатора в нагретых агрессивных средах и тщательного безмасляного вакуумирования кристалата.

Авторами были проведены детальны измерения температурной зависимости добротности кольцевых резонаторов из лейкосапфира в диапазоне 3,5—300 К на частоте  $f \approx 4 \cdot 10^{10}$  Гц (см. рисунок). В интервале 60—250 К поведение  $Q^{-1}$  с хорошей точностью удовлетворяет зависимости  $\text{tg } \delta \sim T^{5 \pm 0,3}$ , которая предсказана В. Л. Гуревичем для гексагональных кристаллов<sup>4,5</sup>. Этот результат, по нашему мнению, может рассматриваться как подтверждение определяющей роли фундаментальных механизмов потерь в этой области температур. С понижением температуры отчетливо проявляются два плато ( $Q^{-1} \approx 2,5 \cdot 10^{-9}$  для  $3,5 \text{ К} \leq T \leq 10 \text{ К}$  и  $Q^{-1} \approx 4 \cdot 10^{-8}$  для  $25 \text{ К} \leq T \leq 60 \text{ К}$ ). Отклонение от закона  $\text{tg } \delta \sim T^5$  при  $T < 60 \text{ К}$ , по-видимому, связано с дефектами и примесями использованных монокристаллов.

Можно ожидать, что с дальнейшим ростом совершенства монокристаллов удастся исключить нефундаментальные механизмы потерь при  $T < 60 \text{ К}$  и достигнуть при температуре жидкого гелия величин  $Q \approx 10^{12}$ . Такие добротности позволят осуществить целый ряд интересных физических экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина.— М.: Атомиздат, 1976.
2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1.— М.: Высшая школа, 1970.
3. Courtney W. E.— IEEE Trans. MTT, 1970, v. MTT-18, p. 476.
4. Гуревич В. Л.— ФТТ, 1979, т. 21, с. 3453.
5. Гуревич В. Л. Кинетика фононных систем.— М.: Наука, 1980.
6. Багдасаров Х. С., Брагинский В. Б., Зубицтов П. И.— Письма ЖТФ, 1977, т. 3, с. 57.
7. Braginsky V. B., Rapov V. I.— IEEE Trans. Magn., 1979, v. MAG-15; p.30.
8. Braginsky V. B., Rapov V. I., Vasiliev S. I.— Ibid., 1981, v. MAG-17, p. 955.
9. Strauer D. M., Dick G. I., Tward E.— Ibid., 1983, v. MAG-19, p. 311.
10. Взятых В. Ф. Авторское свидетельство № 153948 (СССР), Бюлл. изобретений, 1963.
11. Брагинский В. Б., Вятчанин С. П.— ДАН СССР, 1980, т. 252, с. 584.
12. Брагинский В. Б., Панов В. И., Тимашов А. В.— Ibid., 1982, т. 267, с. 74.
13. Blair D. G., Evans I. N.— J. Phys. Ser. D, 1982, v. 15, p. 1651.
14. Mittag K., Hietschold R., Vetter J., Pioseryk B.— In: Proc. of Proton Linear Accelerators Conference.— Batavia, Ill., 1970.— P. 257.