

Поглощение электромагнитного поля миллиметрового радиодиапазона в совершенных диэлектрических кристаллах

Е. М. Ганапольский

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
Украина, 61085, г. Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12
E-mail: ganap@ire.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 7 июня 2000 г.

Методом шарового диэлектрического резонатора измерены диэлектрические потери в высококачественных кристаллах сапфира, рубина, флюорита и кварца в диапазоне температур 4,2–300 К на частоте 36 ГГц. Коэффициент поглощения электромагнитного поля на длину волны Γ в кристаллах как по порядку величины, так и по температурной зависимости согласуется с теорией Гуревича, рассматривающей поглощение как результат электрофононного взаимодействия поля с акустическими фононами вследствие ангармонизма кристаллической решетки. Установлено, что изученные кристаллы обладают предельно низким поглощением в миллиметровом радиодиапазоне даже при умеренно низких температурах (например, для сапфира $\Gamma \approx 10^{-8}$ при температуре $T \approx 40$ К). Измерено остаточное поглощение электромагнитного поля при низких температурах, которое связано с однофононным процессом поглощения поля на дефектах кристаллической структуры. Установлена корреляция в температурной зависимости поглощения в кристалле между электромагнитным полем и продольным гиперзвуком.

Методом кульового діелектричного резонатора виміряно діелектричні втрати у високоякісних кристалах сапфіра, рубіна, флюорита та кварцу в діапазоні температур 4,2–300 К на частоті 36 ГГц. Коефіцієнт поглинання електромагнітного поля на довжину хвилі Γ в кристалах як по порядку величини, так і по температурній залежності узгоджується з теорією Гуревича, що розглядає поглинання як результат електрофононної взаємодії поля з акустичними фононами внаслідок ангармонізму кристалічної ґратки. Встановлено, що кристали, які вивчаються, мають гранично низьке поглинання в міліметровому радіодіапазоні даже при помірно низьких температурах (наприклад, для сапфіра $\Gamma \approx 10^{-8}$ при температурі $T \approx 40$ К). Виміряно залишкове поглинання електромагнітного поля при низьких температурах, котре пов'язано з однофононним процесом поглинання поля на дефектах кристалічної структури. Встановлено кореляцію в температурній залежності поглинання у кристалі між електромагнітним полем та поздовжнім гіперзвуком.

PACS: 77.22.Gm

Как известно, реальные непроводящие кристаллы обладают достаточно большими диэлектрическими потерями на частотах миллиметрового и субмиллиметрового радиодиапазонов. Природу этих потерь обычно связывают с различными заряженными дефектами, которые служат источником преобразования электромагнитного поля в акустические фононы, составляющие термостат. Эти заряженные дефекты, хаотически расположенные в кристалле, совершают периодическое движение в поле электромагнитной волны. Поскольку заряды непосредственно связаны с кри-

сталлической решеткой, их движение сопровождается излучением акустических фононов. Процесс преобразования электромагнитного поля в фононы, с квантовой точки зрения, можно трактовать как однофононный, при котором поглощение фотона с частотой ω сопровождается рождением одного акустического фонона с той же частотой [1]. (В идеальных кристаллах этот процесс запрещен правилами отбора — законами сохранения энергии и импульса.) Очевидно, что такое прямое преобразование не затрагивает непосредственно весь фононный термостат, поэтому оно не зависит

от температуры. Возможны также и многофононные процессы поглощения электромагнитного поля за счет дефектов кристаллической решетки, рассмотренные в [2]. Поскольку созданные этими дефектами заряды непосредственно связаны с атомами кристаллической решетки, их движение вносит возмущение в фононную систему, которое заключается в изменении функции распределения фононов. При этом возрастание энтропии, необходимое для восстановления теплового равновесия, приводит к поглощению электромагнитного поля. Многофононное поглощение электромагнитного поля в отличие от однофононного может обладать достаточно сильной температурной зависимостью.

Поглощение электромагнитного поля с частотами, меньшими дебаевской частоты, возможно также и в кристаллах, не содержащих дефектов. Как показано в работах Гуревича [3,4], преобразование электромагнитного поля в фононы может происходить за счет так называемого электрофононного взаимодействия. Оно заключается в том, что переменное электрическое поле, поляризуя связанные электроны, изменяет константы взаимодействия атомов решетки в неполярных кристаллах. В полярных кристаллах поле, кроме этого, вызывает относительное смещение подрешеток, что благодаря ангармонизму приводит к изменению взаимодействия между атомами. При этом наиболее эффективны трехфононные процессы поглощения, так как однофононный процесс запрещен законами сохранения. Механизм поглощения является аналогичным поглощению Ахиезера для звука в кристаллах. Электрическое поле волны при электрофононном взаимодействии изменяет частоты акустических фононов за счет решеточного ангармонизма. При этом в фононном газе образуется неравновесное состояние с более высокой энтропией, а необходимая для этого энергия черпается из электромагнитного поля.

Поглощение Гуревича весьма мало по величине и обладает сильной частотной и температурной зависимостями. Так, для неполярных, например гексагональных, кристаллов коэффициент поглощения на длину волны $\Gamma \propto \omega T^5$, где T — температура; для кубических кристаллов $\Gamma \propto \omega^2 T^4$. Например, в сапфире на частоте 36 ГГц поглощение составляет 10^{-5} при комнатной температуре и 10^{-13} при температуре 15 К. Для пьезоэлектрических кристаллов теория [3] предсказывает существенно большее поглощение.

В реальных кристаллах, содержащих дефекты кристаллической структуры, в поглощение дают вклад все перечисленные механизмы. Поэтому

идентификация какого-либо одного из них в общем случае представляет довольно трудную проблему.

Созданная в интересах квантовой электроники технология позволила синтезировать образцы кристаллов сапфира, рубина, флюорита, а также кварца, которые обладают предельно малым числом дефектов структуры. Это дает возможность исследовать их диэлектрические потери в миллиметровом радиодиапазоне и оценить сравнительную эффективность указанных выше механизмов поглощения. В работе описаны результаты изменений температурной зависимости поглощения электромагнитного поля в диапазоне температур от 4,2 до 300 К на частоте 36 ГГц. Для этих измерений был применен разработанный ранее метод шарового диэлектрического резонатора (ШДР), позволяющий измерять предельно малые диэлектрические потери в кристаллах в миллиметровом радиодиапазоне [5]. Суть этого метода в кратком изложении состоит в следующем. В качестве электромагнитного резонатора используется шар, изготовленный из исследуемого материала. Диаметр шара выбирается таким образом, чтобы резонатор представлял собой квазиоптическую резонансную систему, в которой могут быть возбуждены колебания «шепчущей галереи» с радиальным индексом $n > 30$, обладающие сверхвысокой добротностью. Так как ШДР является открытым шаровым диэлектрическим резонатором, в котором поле электромагнитных колебаний «шепчущей галереи» сосредоточено в тонком слое вблизи шаровой поверхности, то декремент затухания этих колебаний очень чувствителен к веществам на поверхности, поглощающим энергию поля. В связи с этим особое внимание было уделено процедуре очистки поверхности шара от посторонних веществ. Резонаторы имели достаточно точную сферическую форму (эллипсоидальность не превышала 20 мкм) и оптически полированную поверхность с неровностями, не превосходящими 0,1 мкм.

Для возбуждения электромагнитных колебаний в ШДР использовалась волноводно-диэлектрическая антенна, которая представляла собой излучающий с торца отрезок прямоугольного волновода, полностью заполненный кристаллом сапфира. Антенна располагалась вблизи поверхности шара с тем, чтобы ее электромагнитное поле совмещалось с полем колебаний «шепчущей галереи» в ШДР, а коэффициент связи находился в пределах 0,3–0,5. Электрическое поле в антенне было ориентировано вдоль кристаллографической оси третьего порядка. В этом случае в ШДР

возбуждались наиболее добротные колебания H типа.

Краткие сведения об использованных образцах.

Сапфир. Образцы этого кристалла, полученные гидротермальным методом раствора в расплаве (метод ГОИ), содержали сравнительно небольшое число дислокаций (10^2 – 10^3 см $^{-2}$), а угол разориентации кристаллографической оси симметрии третьего порядка в микродвойниковых блоках структуры не превышал 1° . Диаметр сапфирового ШДР 28,5 мм.

Рубин. Кристаллы рубина были синтезированы методом Вернейля и содержали примесь хрома с 0,05%-й концентрацией. Поскольку процесс выращивания методом Вернейля является существенно более неравновесным по сравнению с методом ГОИ, эти кристаллы в отношении совершенства кристаллической структуры уступали кристаллам сапфира как по количеству дислокаций, так и по среднему углу разориентации оптической оси в микродвойниковых блоках. Диаметр рубинового ШДР 30,5 мм.

Кварц. Были использованы высококачественные природные кристаллы бразильского кварца типа «экстра» с высокой прозрачностью и малым числом дислокаций. Диаметр кварцевого ШДР 45 мм.

Флюорит. Образцы кристаллов флюорита были синтезированы гидротермальным методом и обладали высокой однородностью и прозрачностью. В них содержалась примесь европия с 0,01%-й концентрацией. Диаметр ШДР из флюорита 29 мм.

Метод измерения добротности ШДР, по величине которой определялся коэффициент поглощения электромагнитного поля, описан ранее [6,7]. Результаты измерений приведены на рис. 1, 2. Прежде всего следует отметить качественное согласие данных эксперимента с выводами теории Гуревича. Было установлено, и это является одним из основных результатов, что изученные кристаллы обладают предельно малым поглощением электромагнитного поля миллиметрового радиодиапазона даже при умеренно низких температурах. Так, например, для сапфира поглощение, которое при комнатной температуре составляет 10^{-5} , при охлаждении кристалла до 40 К достигает 10^{-8} .

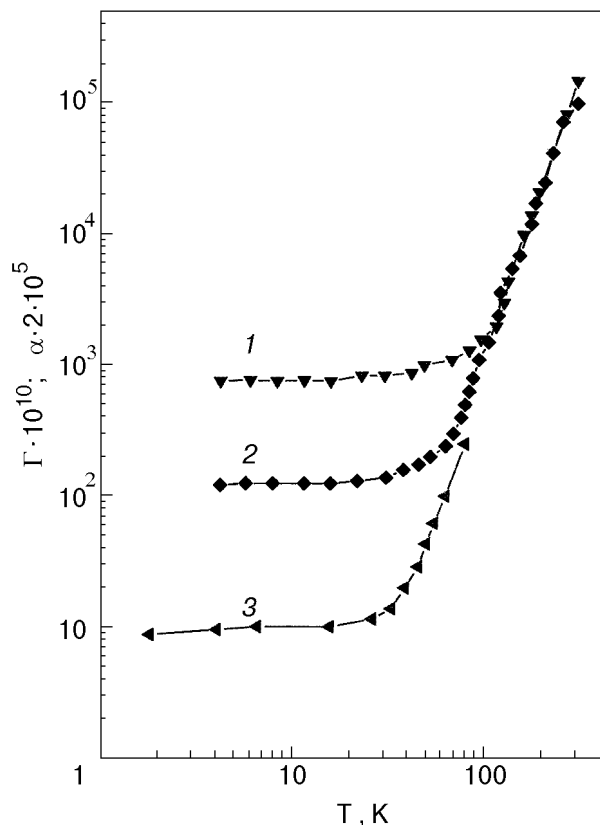


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного поля Γ в рубине (1) и сапфире (2). Температурная зависимость поглощения гиперзвука на длину волны α в сапфире (3) на частоте 3 ГГц [9].

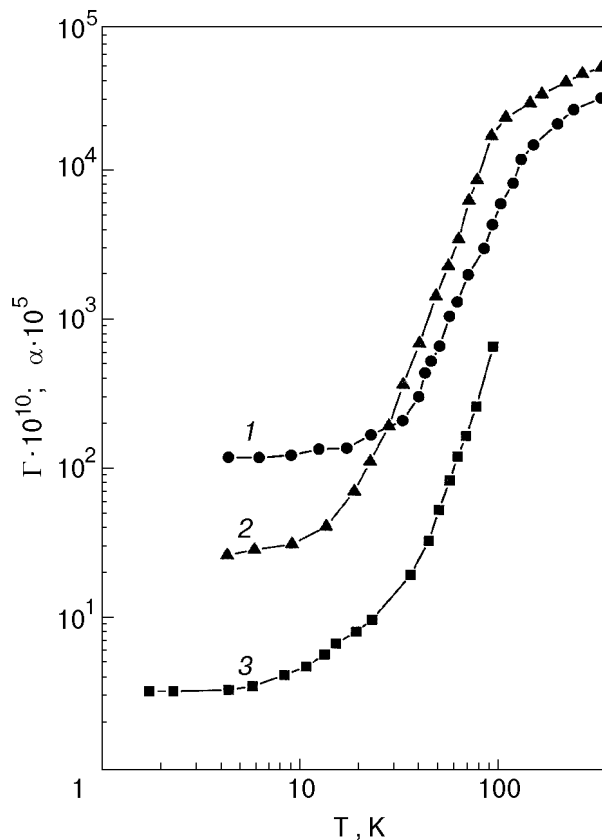


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного поля Γ во флюорите (1), кварце (2). Температурная зависимость поглощения гиперзвука α в кварце (3) на частоте 3 ГГц [9].

В целом это согласуется с оценочными формулами, приведенными в [3,4], а также с данными по сапфиру [8], полученными менее надежным по сравнению с [5,6] методом. Что касается экспериментальных данных по диэлектрическим потерям в миллиметровом радиодиапазоне при низких температурах в кристаллах рубина, кварца и флюорита, то ранее они фактически отсутствовали. Это обстоятельство было связано не столько со сравнительно малой доступностью совершенных кристаллов, сколько с тем, что эффективный метод измерения предельно малых диэлектрических потерь [5,6] в миллиметровом диапазоне появился сравнительно недавно.

Более высокий уровень диэлектрических потерь в кварце и флюорите по сравнению с сапфиром можно объяснить более низкой температурой Дебая в этих кристаллах. Превышение потерь в кварце над потерями во флюорите также соответствует выводам теории о роли центра симметрии в поглощении электромагнитного поля [3]. С понижением температуры кристалла диэлектрические потери резко уменьшаются. Закон изменения поглощения с температурой для сапфира, рубина и кварца близок к T^5 , а для флюорита к $T^{3,5}$, что находится в соответствии с теорией. Резкое уменьшение поглощения электромагнитного поля наблюдается лишь до определенной температуры, которая в случае сапфира и рубина составляет 50–60 К, а для флюорита и кварца эти температуры равны 40 и 20 К соответственно. При охлаждении кристалла ниже этой температуры резкий спад поглощения замедляется и кривая температурной зависимости выходит на плато. Не зависящее от температуры поглощение в области плато можно назвать остаточным поглощением (ОП) электромагнитного поля. Поскольку поглощение гиперзвуковой волны в диэлектрическом кристалле непосредственно связано с трехфононным процессом взаимодействия фононов за счет ангармонизма, то температурные зависимости поглощения электромагнитного поля, связанного с ангармонизмом колебаний кристаллической решетки, и поглощения гиперзвука должны быть подобны. Это демонстрируется на рис. 1, 2, где приведены соответствующие кривые температурной зависимости поглощения продольного гиперзвука [9].

Измеренная величина ОП фактически определяет достижимый минимальный уровень потерь

электромагнитного поля, который имеет место в совершенных диэлектрических кристаллах. Поскольку ОП не зависит от температуры, можно предполагать, что оно связано с однофононным процессом поглощения на примесях и других микроскопических дефектах кристалла. Об этом свидетельствует более высокий уровень ОП в содержащем примесные центры хрома рубине по сравнению с сапфиром.

1. Б. М. Гарин, *Препринт № 2 (477)*, Москва, ИРЭ АН СССР (1988).
2. H. Poulet and J. P. Mathieu, *Spectres de vibration et symetrie des cristaux*, Gordon and Breach, Paris-Londres – New York (1970); А. В. Галдецкий, Б. М. Гарин, *Препринт № 17 (320)*, Москва, ИРЭ АН СССР (1973).
3. В. Л. Гуревич, *Кинетика фононных систем*, Наука, Москва (1980).
4. В. Л. Гуревич, *ФТТ* **21**, 3453 (1979).
5. Е. М. Ганапольский, А. В. Голук, А. П. Королюк, *ФНТ* **19**, 1255 (1993).
6. Е. М. Ganapolskii and A. V. Goluk, *Meas. Sci. Technol. (UK)* **8**, 1016 (1997).
7. Е. М. Ganapolskii, A. V. Goluk, and A. P. Korolyuk, *Phys. Rev.* **B51**, 11962 (1995).
8. V. B. Braginsky, V. S. Ilchenko, and Kh. S. Bagdassarov, *Phys. Lett.* **A120**, 360 (1987).
9. Е. М. Ганапольский, А. П. Королюк, В. В. Тараканов, *ЖЭТФ* **82**, 182 (1982).

Absorption of microwave band electromagnetic field in perfect dielectric crystals

E. M. Ganapolskii

The dielectric losses in high-quality crystals of sapphire, ruby, fluorite and quartz were measured by the sphere dielectric resonator method in the temperature range 4.2–300 K at 36 GHz. The absorption coefficient of an electromagnetic field per wave length Γ in the crystals is correlated with the predictions of Gurevich theory both in the order of magnitude and a temperature dependence. The latter considers absorption as result of electrophonon field interaction with acoustic phonons due to the crystal lattice anharmonicity. It is found that the crystals measured have extremely low absorption in the microwave range at moderately low temperatures (for example, in sapphire $\Gamma \approx 10^{-8}$ at $T \approx 40$ K). The correlation in temperature dependence of absorption in a crystal between electromagnetic field and longitudinal hypersound was established.