

УДК 534.286

©1995

ПОГЛОЩЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЛАНГАСИТА

Г.Д.Мансфельд, В.В.Безделкин, А.Д.Фреик, Е.С.Кучерявая

Институт радиотехники РАН, Москва
(Поступила в Редакцию 12 сентября 1994 г.)

Методом составного резонатора измерены частотные зависимости коэффициента поглощения продольных и поперечных акустических волн в основных кристаллографических направлениях лангасита ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$). В диапазоне частот 1–3 GHz продольные и поперечные акустические волны во всех измеренных кристаллографических направлениях имеют квадратичную частотную зависимость. Полученные значения коэффициента поглощения для всех направлений оказались меньшими или приблизительно равными значениям коэффициента поглощения в монокристаллах кварца. Использование резонаторной методики позволило также изучить факторы, влияющие на добротность резонаторов.

В последние годы появился целый ряд работ, посвященных изучению акустических свойств лангасита ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) [1–3], который считается одним из наиболее перспективных материалов для пьезоэлектроники и техники стабилизации и селекции частоты. По данным [4], лангасит имеет акустические потери меньше, чем кварц, обладая при этом большим коэффициентом электромеханической связи. Однако данные по решеточному поглощению в этом материале носят отрывочный характер [3,4].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования поглощения продольных и поперечных акустических волн в X-, Y- и Z-срезах лангасита в СВЧ-диапазоне, полученные методом составного резонатора, который подробно изложен в [5,6]. Общие потери в резонаторе состоят из решеточных и дополнительных потерь, связанных с дифракцией акустических волн на апертуре преобразователя, с их рассеянием на шероховатостях поверхностей, с уходом энергии из-за непараллельности плоскостей пластины, а также с другими паразитными эффектами. В настоящей работе, чтобы отделить эти дополнительные потери, полные потери, измеренные при комнатной температуре, сравнивались с данными, полученными при гелиевых температурах. Внутренние потери в материале находились из разности между результатами этих измерений. При этом предполагалось, что перечисленные выше паразитные факторы слабо зависят от температуры.

1. Методика эксперимента

Метод составного резонатора основан на измерении частотных особенностей на фазово-частотной характеристике коэффициента отражения электромагнитного сигнала от многочастотного составного резонатора, структура которого показана на рис. 1,а. Составной резонатор состоит из исследуемого слоя (1) (в нашем случае пластина из ланогасита) и пьезоэлектрического преобразователя (2), включающего слой пьезодиэлектрика с металлическими пленочными электродами (3). При определенных легковыполнимых условиях согласования входного и измерительного трактов модуль $|\Gamma|$ и фаза $\text{Arg}(\Gamma)$ коэффициента отражения от такой структуры имеют вид, изображенный на рис. 1,б и с соответственно. Как это подробно показано в [5,6], разница между положениями пиков на фазово-частотной характеристике Δf_n (для резонансной частоты f_n) просто связана с коэффициентом поглощения α . Для сильно поглощающих материалов, когда акустические потери в исследуемом материале вносят подавляющий вклад в общие потери, имеем

$$\alpha = \pi \Delta f_n (v_d)^{-1},$$

где v_d — скорость звука в исследуемом материале. Скорость v_d может быть найдена из измерений разности частот соседних резонансных пиков $f_{n+1} - f_n$ [6]. В случае, если исследуются слабопоглощающие материалы, необходимо учитывать и другие слагаемые потерь, вносимых в общие потери в резонаторе

$$\alpha = \left(\Delta f_n - \frac{\beta'' l v_l}{d} - \frac{\Phi v_d}{d} \right) (v_d)^{-1},$$

где β'' — коэффициент поглощения в пьезодиэлектрике, l — толщина преобразователя, d — толщина исследуемого слоя, v_l — скорость звука

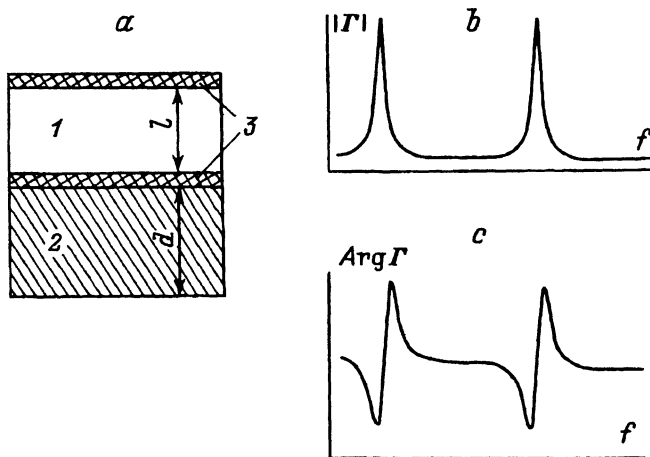


Рис. 1. Структура составного акустического резонатора для измерения акустических параметров исследуемых материалов (а) и частотные зависимости амплитуды $|\Gamma|$ (б) и фазы $\text{Arg}(\Gamma)$ (с) коэффициента отражения электромагнитных волн от резонаторной структуры.

1 — слой пьезоэлектрика, 2 — слой исследуемого материала, 3 — металлические электроды.

в пьезодиэлектрике, Φ — общие паразитные потери за один проход, связанные с дифракцией, отражениями и непараллельностью. Здесь не учитываются потери в металлических электродах, так как обычно из-за малой толщины электродов их вклад в общие потери пренебрежимо мал по сравнению с другими составляющими потерь в резонаторе [5,6].

Для составного резонатора резонансные пики обычно наблюдаются в достаточно широком частотном диапазоне (до нескольких ГГц). Расстояние между соседними резонансными пиками зависит от толщины структуры и составляет 1–10 МГц. Таким образом, используя один и тот же образец, можно измерить частотную зависимость коэффициента поглощения и скорости звука в исследуемом материале для широкого диапазона частот. Важно, что для определения коэффициента для широкого диапазона частот. Важно, что для определения коэффициента поглощения в широком частотном диапазоне требуются только измерения разности частот экстремумов на фазово-частотных характеристиках.

Метод составного акустического резонатора достаточно информативен для изучения дополнительных паразитных потерь, возникающих из-за неидеальности отражения акустических волн от поверхностей резонатора. В отличие от эхометода амплитуда и фаза измеряемого коэффициента отражения электромагнитных волн от резонаторной структуры определяется многократными отражениями акустических волн от плоскостей, ограничивающих составной резонатор.

Для проведения измерений коэффициента поглощения и его частотных зависимостей изготавливались составные резонаторные структуры с использованием плоскопараллельных пластин из лангсита, ориентированных в основных кристаллографических направлениях, с приблизительными размерами: по ширине — 2 мм, длине — 3 мм, толщине — 0.2–0.8 мм. Пластины оптически полировались (по 14 классу). В лучших образцах непараллельность плоскостей поверхностей составляла менее $8''$. Ориентация пластин по отношению к осям была лучше чем 0.3° . Плотность дислокаций составляла не более 10^2 см^{-3} . На пластины наносились тонкопленочные пьезоэлектрические преобразователи, выполненные из ZnO с электродами из Al. Электроды имели толщину 1000 Å. Диаметры преобразователей варьировались от 200 до 600 $\mu\text{м}$. Пленки ZnO для различных образцов имели толщины от 4 до 8 $\mu\text{м}$.

Для нахождения поглощения были проведены измерения особенностей фазово-частотных характеристик коэффициента отражения электромагнитных волн от резонатора, помещенного в специальный держатель, который позволял проводить измерения как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого гелия. При этом были использованы стандартные измерители комплексных коэффициентов передачи P4-37, P4-38 и P4-66. При помощи трансформаторной линии входное сопротивление резонатора рассогласовывалось с измерительным 50-омным трактом, чтобы избежать ошибок, возникающих в случае сильной связи между резонатором и внешней линией [6].

Частотные зависимости полных потерь в резонаторе измерялись вначале при комнатной температуре, а затем при температуре жидкого гелия. Разность между этими значениями рассматривалась как потери в исследуемом материале. По оценкам [6], внутренними потерями в пленках ZnO для исследуемого диапазона частот фактически во многих случаях можно пренебречь.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Экспериментальные частотные зависимости коэффициентов поглощения продольных и поперечных акустических волн в монокристаллах лангсита для Z -, X -, Y -срезов представлены соответственно на рис. 2, 3, 4.

На рис. 2, *a* показана частотная зависимость коэффициента поглощения продольных волн в кристалле Z -среза. В качестве примера показаны общие потери продольной моды (верхняя кривая I), пунктирная прямая — дифракционные потери, вычисленные в соответствии с [7]. Нижняя экспериментальная прямая II соответствует чистому решеточному поглощению, полученному после вычитания из кривой I для общих потерь частотной зависимости потерь при температуре жидкого гелия. Наклон прямой II в двойном логарифмическом масштабе соответствует квадратичной частотной зависимости, характерной для ахизеровского рассеяния акустических волн на тепловых фононах. Для сравнения крестиками 1 и 2 показаны данные по поглощению в кварце [7,8]. Из сравнения этих значений с измеренной кривой II следует, что коэффициент поглощения продольных волн в лангсита по порядку равен поглощению в кварце. На рис. 2, *b* представлена частотная зависимость коэффициента поглощения поперечных волн в Z -среза. Подобно продольным волнам для этого кристаллографического направления, значения коэффициента поглощения поперечных

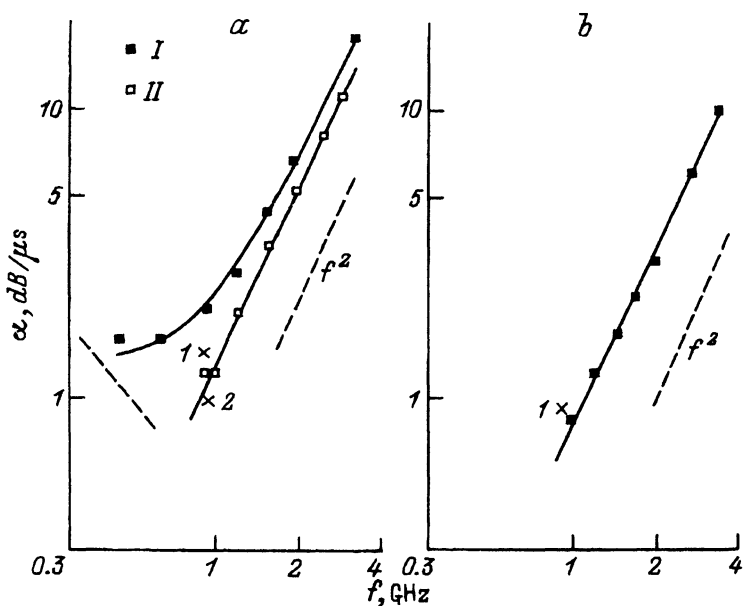


Рис. 2. Частотная зависимость поглощения акустических волн в Z -срезу лангсита:

a) — коэффициент поглощения продольных волн: I — полные потери, пунктирная прямая — рассчитанные дифракционные потери, II — решеточные потери в материале, крестики 1, 2 — данные поглощения продольных волн в кварце [7,8];

b) — коэффициент поглощения поперечных акустических волн: крестик 1 — данные для поперечных волн из [9].

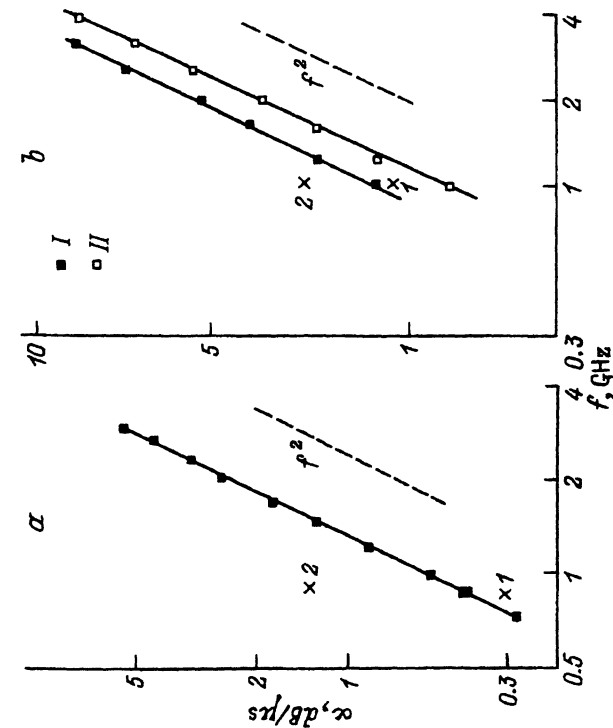


Рис. 3. Частотная зависимость поглощения акустических волн в X-срезах лангсита.
 а) — коэффициент поглощения продольных волн: крестик 1 — данные, полученные эхометодом [4], крестик 2 — коэффициент поглощения для кварца [8];
 б) — коэффициент поглощения поперечных быстрой (I) и медленной (II) мод акустических волн, крестики 1, 2 — коэффициенты поглощения в кварце для быстрой и медленной мод соответственно.

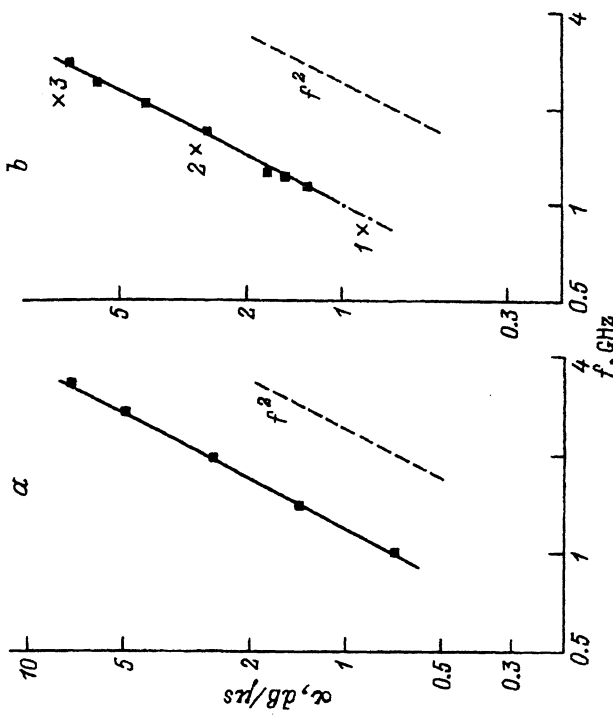


Рис. 4. Частотная зависимость поглощения акустических волн в Y-срезах лангсита.

а) — коэффициент поглощения квазипродольных волн;
 б) — коэффициент поглощения поперечной медленной моды: крестик 1 — значение коэффициента поглощения продольных волн, полученные эхометодом [4], крестики 2, 3 — данные, полученные нами для поперечных волн в ВГ и АТ срезах кварца.

Измеренные значения скоростей звука и приведенных коэффициентов поглощения для основных кристаллографических направлений лангасита

Направление распространения и поляризация	Скорость звука, 10^3 м/с	Поглощение, $\text{dB}/(\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2)$
X-продольные	5.78 ± 0.01	0.52 ± 0.05
X-быстрые поперечные	3.31 ± 0.01	1.31 ± 0.05
X-медленные поперечные	2.34 ± 0.01	0.71 ± 0.05
Z-продольные	6.75 ± 0.01	1.30 ± 0.05
Z-поперечные	3.01 ± 0.01	0.85 ± 0.05
Y-квазипродольные	5.79 ± 0.01	0.75 ± 0.05
Y-медленные поперечные	2.77 ± 0.01	1.05 ± 0.05

волн в лангасите приблизительно равны поглощению в кварце (крестик 1 на рис. 2, *b*), рассчитанному в соответствии с [9].

Поглощение акустических волн в X-направлении также пропорционально f^2 (рис. 3, *b*). Измеренные потери в случае продольных волн (рис. 3, *a*) совпадают в пределах экспериментальной погрешности с данными, полученными эхометодом [5] (крестик 1 на рис. 3, *a*). Частотная зависимость коэффициента поглощения поперечных волн в X-направлении показана на рис. 3, *b*. Верхняя и нижняя экспериментальные прямые I и II соответствуют быстрой и медленной модам. Потери в кварце для этого же направления заметно выше, чем в лангасите (крестик 2 для продольных волн на рис. 3, *a* и крестики 1 и 2 на рис. 3, *b* для быстрой и медленной поперечных волн соответственно) [7-9].

Экспериментальные данные для Y-среза представлены на рис. 4, *a, b* соответственно для продольных и поперечных волн. В обоих случаях наблюдается квадратичная зависимость коэффициента поглощения от частоты. Важные для практики значения поглощения для термостабильной медленной поперечной Y-моды совпали с данными, полученными эхометодом [5] (крестик 1 на рис. 4, *b*). Кривая расположена ниже, чем измеренные нами значения для ВТ (крестик 2) и АТ (крестик 3) срезов кварца.

Экспериментальные значения коэффициента поглощения, выраженные в стандартных единицах $\text{dB}/(\mu\text{s} \cdot \text{GHz}^2)$, представлены в таблице. Таким образом полученные экспериментальные значения коэффициентов поглощения продольных и поперечных акустических волн в основных кристаллических направлениях лангасита показывают, что поглощение звука в монокристаллах лангасита меньше или приблизительно равно поглощению акустических волн в кварце для тех же направлений и поляризаций. Коэффициент поглощения для измеренных направлений и поляризаций имеет квадратичную зависимость от частоты в соответствии с теорией рассеяния на тепловых фонах Ахиезера. Отметим, что использованный метод позволяет оценить дополнительные потери, возникающие в резонаторах из-за дифракции акустических волн, непараллельности и шероховатости поверхностей.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Гуляеву за поддержку работы и И.М. Котелянскому за изготовление преобразователей к исследуемым образцам.

Список литературы

- [1] Kosinski J.A. Proc of the 6th Conference «Acoustoelectronics'93». Varna, Bulgaria (September 19-25, 1993), P. 61-74.
- [2] Gualtieri J.G., Kosinski J.A., Ballato A. Proc of the 7th Europ. Frequency and Time Forum. Neuchatel, Switzerland (March 16-18, 1993), P. 231-234.
- [3] Kaminski A.A., Silvestrova I.M., Sarkisov S.E. Phys. Stat. Sol. (a), **80**, 607 (1983).
- [4] Kaminski A.A., Belokoneva E.L., Mill B.V., Pisarevskii Yu.V., Sarkisov S.E., Silvestrova I.M., Butashin A.V., Khodzhabagyan G.G. Phys. Stat. Sol. (a) **86**, 345 (1984).
- [5] Mansfeld G.D., Freik A.D., Krutov B.N. Proc. of the 7th Europ Frequency and Time Forum. Neuchatel, Switzerland (March 16-18, 1993), P. 261-266.
- [6] Крутов Б.Н., Мансфельд Г.Д., Фрейк А.Д. Акуст. журн. **40**, 4, 633 (1994).
- [7] Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных приборов. М. (1981), 184 с.
- [8] Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. N. Y. London-Sydney-Toronto (1973), V. 1, 425 p.
- [9] Lamb J., Richter J. Proc. Roy. Soc. **A293**, 479 (1966).