

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ПОГЛОЩЕНИИ ГИПЕРЗВУКА В ДИЭЛЕКТРИКАХ

Ю.В.Гуляев, С.Н.Иванов, А.Г.Козорезов,
И.М.Котеллянский, В.В.Медведь

Установлено существование нового явления – зависимости коэффициента поглощения продольных гиперзвуковых волн от поперечного размера макроскопических ($d \gg l_f$, d – толщина пластины, l_f – средняя длина свободного пробега тепловых фононов) диэлектрических пластин.

Как известно, поглощение высокочастотных акустических волн в диэлектриках при выполнении неравенства $\omega\tau_f \gg 1$ (ω – частота акустической волны, τ_f – время жизни тепловых фононов) определяется трехфононными процессами. В частности, за поглощение продольных гиперзвуковых фононов главным образом ответственны процессы $L + L \rightarrow L$. При этом коэффициент поглощения (КП) Γ пропорционален частоте акустической волны и четвертой степени температуры. Отступления от указанных частотной и температурной зависимостей КП, наблюдаемые в экспериментах для ряда диэлектриков и полупроводников, обычно интерпретируются как следствие сильной дисперсии продольных акустических фононов, либо анизотропии упругих модулей третьего порядка, либо связаны с влиянием другого разрешенного процесса $L + T_1 \rightarrow T_2$ [1] (L , T_1 и T_2 указывают поляризацию фононов, участвующих в трехфононном процессе, L – продольный, а T_1 и T_2 – поперечные фононы).

В настоящей работе установлено существование нового явления – размерного эффекта в поглощении гиперзвука в диэлектриках. Показано, что в макроскопических диэлектрических пластинах КП квазипродольных высокочастотных акустических волн в широком диапазоне температуры зависит от поперечного размера пластины. С ограничением размера пластины наблюдается постепенный переход от частотно-температурной зависимости КП вида $\Gamma \sim \omega T^4$ в массивных образцах к набору других зависимостей, характеризующихся с уменьшением попе-

речного размера пластины более слабой зависимостью от частоты акустической волны и более резкой температурной зависимостью. Таким образом, с уменьшением толщины пластины происходит заметное уменьшение решеточного поглощения квазипродольной гиперзвуковой волны.

Исследование размерного эффекта в поглощении гиперзвука были выполнены на кристаллах иттрий – алюминиевого граната $Y_3Al_5O_{12}$ (ИАГ) и алюмомагниевого шпинели $MgAl_2O_4$. Возбуждение и детектирование акустических волн частоты $f = 2,5$ ГГц осуществлялось с помощью текстурированных пьезопреобразователей из окиси цинка, напыленных на торец кристалла, вырезанного в направлении $\langle 110 \rangle$. КП измерялся стандартным эхо-методом по большому (> 10) числу импульсов. Точность измерения абсолютной величины КП звука составляла не менее $0,02$ дБ/см. Типичные размеры кристалла составляли $1 \times 0,4 \times d$ см³, толщина пластины в эксперименте последовательно менялась от $0,4$ до $0,01$ см.

На рис.1 приведены типичные результаты измерений температурных зависимостей КП продольной акустической волны, распространяющейся в массивном образце ИАГ (кривая 1), КП линейно зависит от частоты и пропорционален T^n , где $n \lesssim 4$. В пластине ИАГ с поперечным размером $d = 0,02$ см, вырезанной и затем сошлифованной до указанных размеров из исходного массивного образца, частотная зависимость КП оказывается заметно ослабленной, а более резкая температурная зависимость дается кривой 2.

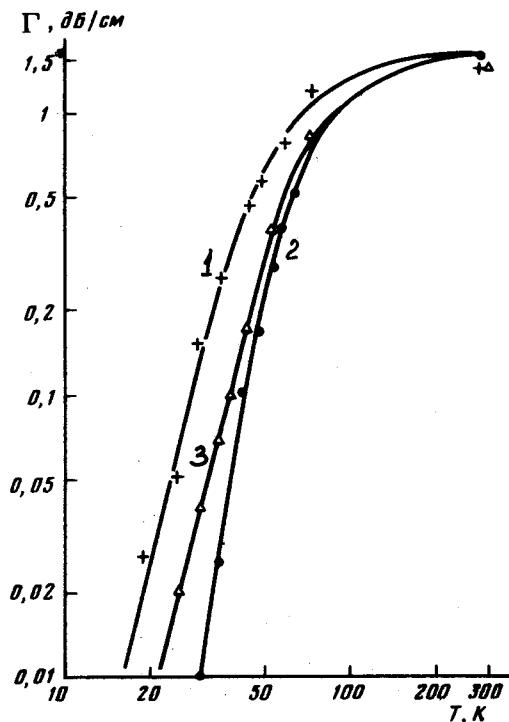


Рис.1. Зависимость поглощения акустических волн в кристалле ИАГ на частоте 2,5 ГГц от температуры: 1 – в массивном образце, 2 – в пластине толщиной 0,02 см, 3 – в той же пластине, покрытой лаком типа ХСЛ

В соответствии с общепринятой процедурой, при обработке экспериментальных результатов мы вычитали из полной величины поглощения остаточные (не зависящие от температуры) потери. При этом, несмотря

ря на то, что остаточные потери в пластинах иногда отличались от соответствующих величин в массивном образце, во всех случаях указанная процедура приводила к полностью воспроизводимым результатам.

На рис.1 представлены также результаты исследования влияния состояния поверхности пластины на величину и температурную зависимость КП (кривая 3). Указанная зависимость получена при нанесении на широкие боковые поверхности пластины слоя лака типа ХСЛ.

Кривые, аналогичные представленным на рис.1, снимались для набора пластин с толщинами от 0,05 до 0,01 см. Проводя сечение семейства кривых при постоянной температуре, можно проследить уменьшение поглощения акустических волн при уменьшении толщины пластины. Такие зависимости представлены на рис.2, где по оси ординат отложено уменьшение поглощения в пластине (по отношению к массивному образцу) от ее толщины d при температуре 77 К. Во всех случаях имел место линейный режим поглощения звука.

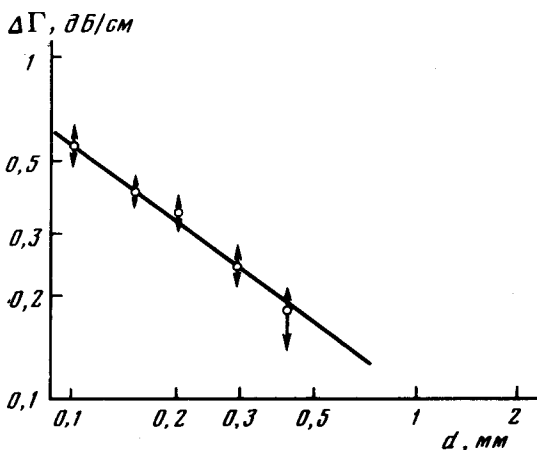


Рис.2. Изменение (уменьшение) поглощения акустических волн в пластинах ИАГ на частоте 2,5 ГГц при $T = 77$ К в зависимости от толщины пластины

В настоящее время принято считать, что основную роль в поглощении продольных гиперзвуковых волн в ИАГ при низких температурах играет процесс $L + L \rightarrow L$ (см., например, [2]), а процесс Херринга $L + T_1 \rightarrow T_2$ не учитывается. Вместе с тем вследствие малой упругой анизотропии в ИАГ (фактор упругой анизотропии равен 1,03) объем области взаимодействия в фазовом пространстве и, следовательно, число фононов эффективно взаимодействующих с продольной гиперзвуковой волной, значительно увеличивается по сравнению со случаем заметной анизотропии или меньшей частоты гиперзвука. В этих условиях вклад процесса Херринга в поглощение увеличивается. Отметим, что асимптотическая формула Херринга $\Gamma \sim \omega^2 T^3$, справедливая для кристаллов кубической симметрии, к которым относится и ИАГ, здесь неприменима. Грубая оценка показывает, что в рассматриваемых условиях $\Gamma \sim \omega^m T^n$ с $1 < m < 1,5$ и $3,5 < n < 4$, что соответствует наблюдаемым зависимостям.

Итак, мы будем предполагать, что в области низких температур (эта область выделяется условием $\omega \tau_f > 1$) в массивных образцах оба рассмотренных механизма дают сопоставимый вклад в поглощение. В об-

ласти более низких температур ($\omega\tau_f \gg 1$) основную роль играет процесс Херринга. Главный вклад в поглощение гиперзвуковых фононов в этом случае вносят поперечные фононы с направлениями в пространстве фононных волновых векторов вблизи точек (или линий) вырождения фононных изоэнергетических поверхностей.

По-видимому, ограничение размера образца приводит к снятию указанного вырождения, что способствует эффективному ослаблению процесса Херринга. В этих условиях Γ начинает сильно зависеть от размера образца, происходит качественная перестройка частотной и температурной зависимостей $\Gamma(\omega, T)$ в широком диапазоне температуры, связанная с переходом к режиму поглощения $L + L \rightarrow L$, который в силу значительной дисперсии продольных акустических фононов в ИАГ характеризуется более резкой температурной зависимостью $\Gamma(T) \sim T^7$ и ослабленной частотной зависимостью (КП практически не должен зависеть от частоты).

Отметим, что в условиях эксперимента для эффективного подавления вклада механизма Херринга в поглощение достаточно небольшого ($\sim 0,2 - 0,3\%$) относительного изменения скоростей поперечных фононов разных поляризации в окрестности точек вырождения.

Приведенная качественная картина арзмерного эффекта в поглощении продольных гиперзвуковых волн не является полной, поскольку она не указывает причин, приводящих к снятию вырождения. В настоящее время в отсутствие экспериментальных данных о дисперсии и временах жизни акустических фононов, а также о константах ангармонизма, однозначного вывода о природе наблюдаемого размерного эффекта сделать нельзя.

Вместе с тем отметим, что если предлагаемая качественная картина явления справедлива, то, измеряя поглощение продольных гиперзвуковых волн в массивных образцах и тонких пластинах при низких температурах, можно выделить в "чистом виде" коллинеарный механизм взаимодействия $L + L \rightarrow L$ и механизм взаимодействия по Херрингу, и определить, таким образом, полный набор констант ангармонизма для исследуемого кристалла, дисперсию продольных акустических фононов и их времена жизни.

Институт радиотехники
и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22 февраля 1980 г.

Литература

- [1] Дж. Такер, В. Рэмpton. Гиперзвук в физике твердого тела, М., изд. Мир, 1975.
- [2] M. Dutoit. K. Appl. Phys., 45, 2836, 1974.