

**ОПТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ В ДИАПАЗОНЕ 10^{12} гц
В КРИСТАЛЛАХ**

*С. А. Басун, А. А. Каплянский, В. А. Рачин,
Р. А. Титов*

В последнее время в ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР проводятся исследования в новом направлении оптоакустики, связанном с оптическим детектированием высокочастотных акустических фононов в диапазоне 10^{12} гц. Используемая экспериментальная техника, впервые предложенная в работе [1], сочетает в себе метод тепловых импульсов [2] и методы люминесцентных исследований активированных кристаллов. В настоящей работе на примере рубина $Al_2O_3:Cr^{3+}$ рассматриваются различные проявления резонансного взаимодействия фононов частоты 10^{12} гц с примесными ионами в кристаллах.

Идея экспериментов иллюстрируется фиг. 1. Ориентированный монокристалл Al_2O_3 с примесью 0,05% Cr размером $5 \times 5 \times 15$ мм помещен в жидкий гелий, находящийся под откачкой при температуре $T \approx 1,8^\circ K$. Через тонкопленочный нагреватель H с частотой повторения 100 кгц пропускаются импульсы тока продолжительностью 20–100 нсек. При этом в кристалл инжектируются фононы со средней частотой $\nu_{max} \sim 3kT_n/h$ (k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, T_n – температура нагревателя, при $T_n = 15^\circ K$ $\nu_{max} = 10^{12}$ гц). Фононы баллистически распространяются по кристаллу в виде тепловых импульсов [2].

Вводимый по световоду S луч света L через U -полосу поглощения ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ возбуждает ионы Cr^{3+} в дублетное $\bar{E}-2\bar{A}$ метастабильное 2E -состояние, из которого затем происходит ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ люминесценция (см. фиг. 2). Расстояние Δ между уровнями $\bar{E}-2\bar{A}$ равно 29 см^{-1} , что соответствует частоте $0,87 \cdot 10^{12}$ гц. Световод S' проецирует на щель двойного монохроматора, настроенного на R_2 -линию ($2\bar{A} \rightarrow {}^4A_2$), излучение из малого ($\sim 0,3 \text{ мм}^3$) объема d , находящегося на расстоянии l от H .

При $T = 2^\circ K$ практически заселен только нижний подуровень \bar{E} и в люминесценции доминирует переход $\bar{E} \rightarrow {}^4A_2$ (R_1 -линия). При прохождении через детектирующий объем d теплового импульса за счет резонансного поглощения фононов $0,87 \cdot 10^{12}$ гц происходят переходы $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$ и в люминесценции возникает импульс R_2 -излучения ($2\bar{A} \rightarrow {}^4A_2$). Специальная система фотоэлектрической регистрации с накоплением сигналов в многоканальном анализаторе позволяет измерять временной ход интенсивности I импульса R_2 , который при малом поглощении в детекторе имеет вид $I_{R_2}(t) \sim n_0(t) \alpha N^*$. Здесь $n_0(t)$ – число фононов частоты $0,87 \cdot 10^{12}$ гц в объеме d ; N^* – концентрация возбужденных ионов Cr^{3+} ; α – полное сечение поглощения на один ион.

Очевидно, метод позволяет регистрировать фононы с определенной (резонансной) частотой ν , волновым вектором q (определяется направлением $H-d$) и поляризацией u (определяется временем прихода фононов на детектор: $t = l/\nu$, где ν – скорость продольных или поперечных фононов). Для устранения фононов, отраженных от стенок образца, и сужения импульсов на образце сделаны периферические надрезы K ; таким образом в область d попадают в основном баллистические фононы, распространяющиеся по линии $H-d$ (коллимация фононов). Описанным методом был выполнен ряд исследований.

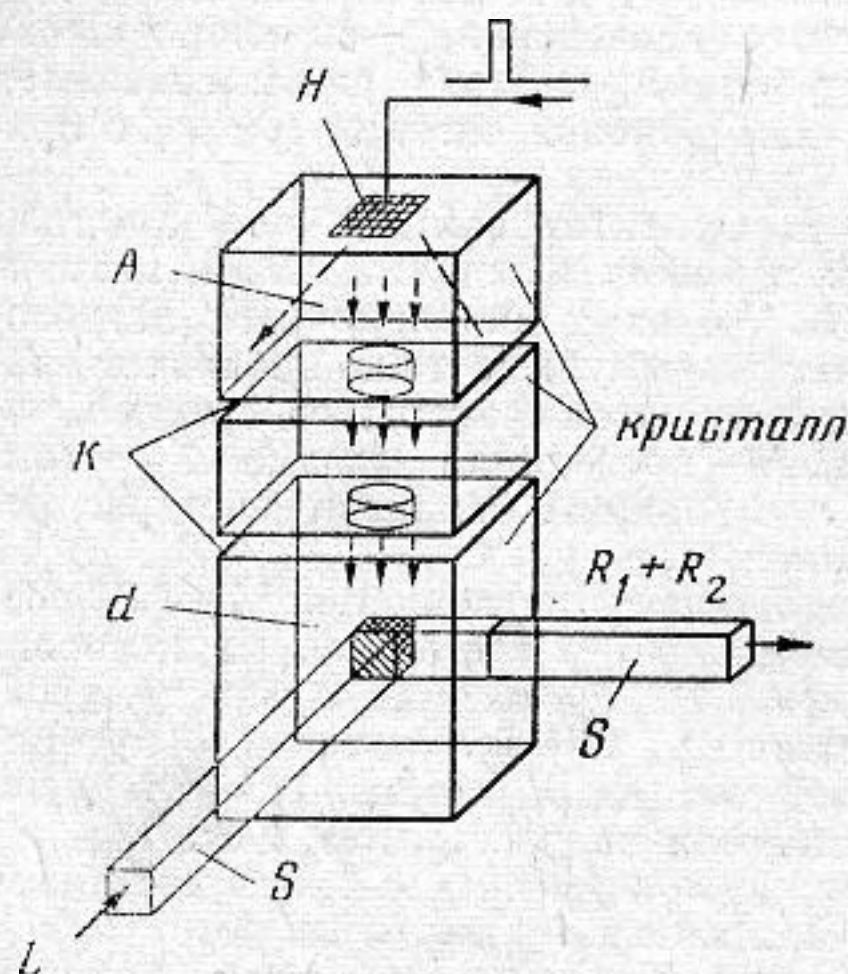
Изучалась анизотропия поглощения фононов, связанная с правилами отбора [3]. Было обнаружено, что форма R_2 -импульса зависит от направления волнового вектора фононов q относительно тригональной оси C_3 кристалла. При $q \perp C_3$ наблюдались импульсы от продольных и поперечных фононов, а при $q \parallel C_3$ – только от поперечных фононов. Таким образом, при $q \parallel C_3$ продольные фононы частоты $0,87 \cdot 10^{12}$ гц не индуцируют перехода $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$. Этот факт согласуется с теоретико-групповыми правилами отбора для этого перехода. Действительно, произведение $\bar{E} \times 2\bar{A}$ не содержит представления, по которому преобразуется деформация ϵ_{zz} , сопровождающая продольную волну $q \parallel C_3$ (напомним, что переходы вызываются периодической модуляцией кристаллического поля при деформации решетки звуковой волной).

С помощью зеемановского фононного спектрометра исследовалась ширина линии фононного поглощения $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$ [4]. Использовалось то обстоятельство, что внешнее магнитное поле $\mathcal{H} \parallel C_3$ расщепляет крамерсовы уровни \bar{E} и $2\bar{A}$ в дублеты с шириной $\delta = g\beta\mathcal{H}$, где β – магнетон Бора; $g_1(\bar{E}) = 2,42$, $g_2(2\bar{A}) = 1,46$ (см. фиг. 2). В результате переходам $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$ отвечают четыре частоты $\nu_i = \nu_0 \pm \frac{1}{2}(g_1 \pm g_2)\beta\mathcal{H}$, где $\nu_0 = 0,87 \cdot 10^{12}$ гц.

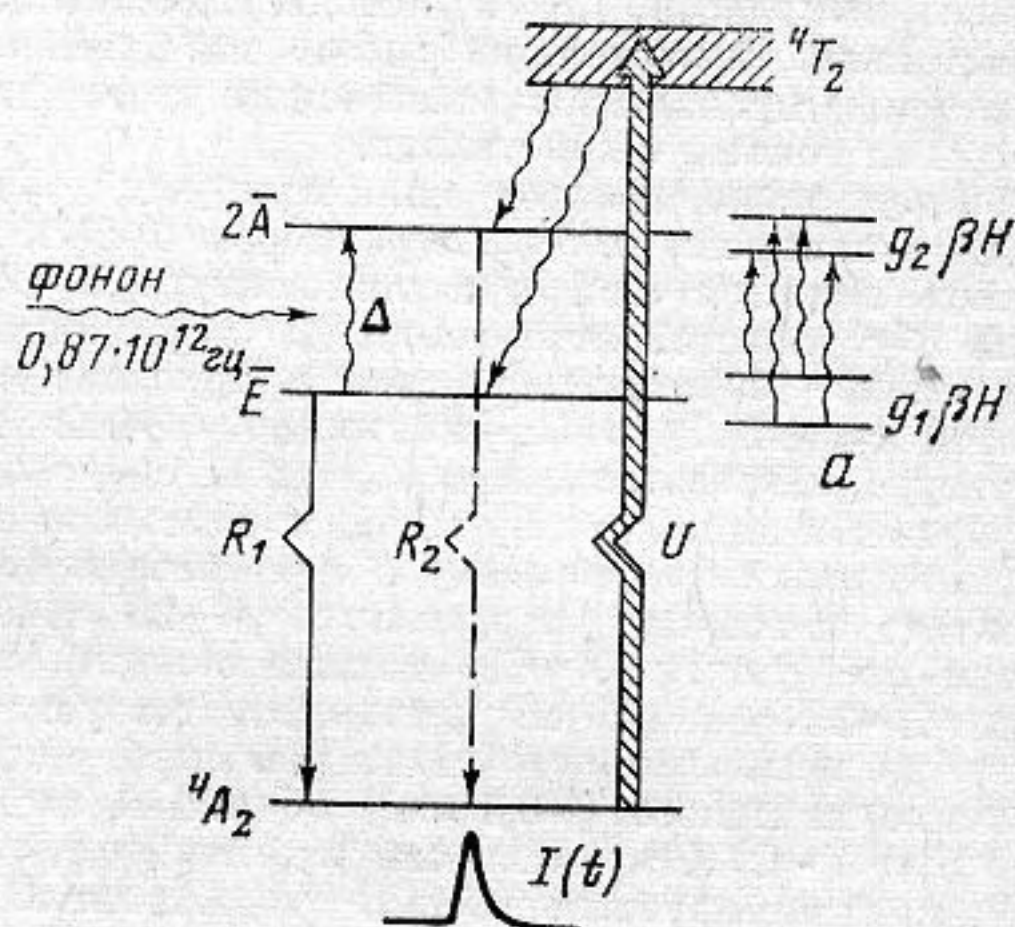
Следовательно, система возбужденных ионов Cr^{3+} в поле резонансно взаимодействует не с фононами $0,87 \cdot 10^{12}$ гц, а с фононами четырех других близких частот. В экспериментах с полем на пути фононного импульса между H и d в области A дополнительной подсветкой ионы Cr^{3+} частично переводились в возбужденное состояние. Эти ионы резонансно поглощают фононы $0,87 \cdot 10^{12}$ гц, что приводит к ослаблению потока фононов и уменьшению R_2 -сигнала в детекторе. Помещение одного из

объемов (A или d) в магнитное поле ведет к «рассогласованию» спектральных резонансных характеристик A или d и, следовательно, к восстановлению сигнала. Изучение полевой зависимости эффекта позволяет оценить ширину линии фононного поглощения $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$: $\Delta\nu \sim 0,1 \text{ см}^{-1}$, которая соответствует вероятности T_1^{-1} испускания фононов $2\bar{A} \rightarrow \bar{E}$, равной $T_1^{-1} \sim 3 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$.

Исследовалась резонансная флуоресценция фононов [5]. Большая величина T_1^{-1} по сравнению со временем τ излучательного (R_2) ухода из $2\bar{A}$ ($\tau^{-1} \approx 10^3 \text{ сек}^{-1}$) приводит к тому, что ионы, поглотившие фононы $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$ из теплового импульса, с подавляющей вероятностью возвращаются из $2\bar{A}$ в \bar{E} также с испусканием фонона $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$. Подобное резонансное испускание (флуоресценция) фононов из объема A было зафиксировано в детекторе d . В этих опытах объем A возбуждался очень сильно ($N^* \approx 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$), так что фононы многократно поглощались и испускались в объеме A , прежде чем выходили из него («прилипание» фононов [1]). Большая



Фиг. 1. Схема эксперимента



Фиг. 2. Схема уровней и переходов в кристалле рубина

временная задержка и отличала на опыте флуоресцентные фононы от фононов исходного теплового импульса.

В опытах по высвобождению плененных фононов в магнитном поле [4] использовалось интенсивное оптическое возбуждение детектирующего объема d , в результате чего фононы «прилипали» в нем [1] и время наблюдаемого R_2 -импульса было сильно затянутым. При наложении на область d магнитного поля это время существенно сокращалось. Эффект объясняется расщеплением фононной линии $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$ в квартет. В результате этого спектральный коэффициент поглощения уменьшается, объем становится «прозрачным» и фононы быстро покидают его без прилипания.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. F. Renk, J. Deisenhofer. Imprisonment of Resonant Phonons Observed with a New Technique for the Detection of 10^{12} — Hz Phonons. Phys. Rev. Lett., 1971, 26, 13, 764—766.
2. Р. Гутфельд. Распространение тепловых импульсов. Сб. Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, т. V. М., «Мир», 1973, 267—329.
3. А. А. Каплянский, С. А. Басун, В. А. Рачин, Р. А. Титов. Анизотропия резонансного поглощения высокочастотных фононов $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$ в возбужденном состоянии ионов Cr^{3+} в рубине. Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, 7, 438—441.
4. А. А. Каплянский, С. А. Басун, В. А. Рачин, Р. А. Титов. Оптическое детектирование резонансного поглощения и прилипания высокочастотных фононов $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$ в рубине во внешнем магнитном поле. Письма в ЖТФ, 1975, 1, 13, 628—632.
5. А. А. Каплянский, С. А. Басун, В. А. Рачин, Р. А. Титов. Оптическое детектирование флуоресценции высокочастотных фононов $0,87 \cdot 10^{12} \text{ гц}$ в кристаллах рубина. Физ. тв. тела, 1975, 17, 12, 3661—3663.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Академии наук СССР

Поступила
18 декабря 1975 г.