УДК 534.22

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЕРДЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ГАЛОГЕНИДОВ ТАЛЛИЯ

Белоусов А. П., Лисицкий И. С., Салахитдинов Ф., Сарнацкий В. М., Чарная Е. В., Шутилов В. А.

Выполнены измерения скорости v и коэффициента поглощения α продольных и сдвиговых ультразвуковых волн (УЗВ) в твердых растворах $TlBr_xCl_{1-x}$ и $TlBr_xI_{1-x}$ при различных значениях x. Измерения производились импульсно-фазовым методом и методом брэгговской дифракции света на УЗВ в диапазоне частот 100÷600 МГц. Обсуждены механизмы уменьшения поглощения УЗВ в растворах галогенидов таллия по сравнению с однокомпонентными кристаллами.

Использования твердых кристаллических растворов в технических устройствах имеют определенные преимущества, связанные с возможностью варьировать в широких пределах различные параметры кристаллов [1]. Смешанные кристаллы в настоящее время применяются в инфракрасной технике, акустооптике и акустоэлектронике, в связи с чем изучение их акустических свойств на ультразвуковых частотах приобретает практическое значение. Вместе с тем ультразвуковые исследования твердых растворов представляют интерес и с физической точки зрения. В ряде работ (см. [2] и ссылки в ней) показано, что поглощение ультразвука в смешанных кристаллах может уменьшаться по сравнению с однокомпонентными материалами как за счет сокращения времени фононной релаксации, так и в результате изменения констант ангармонизма. При экспериментальных исследованиях акустических свойств смешанных щелочно-галоидных кристаллов в работах [3, 4] было выявлено уменьшение в них коэффициента поглощения продольных и поперечных ультразвуковых волн (УЗВ). При этом, однако, было отмечено отсутствие полной корреляции с поведением теплопроводности, которая при ахиезеровском механизме поглощения УЗВ должна быть пропорциональной эффективному времени фононной релаксации. Кроме того, в этих работах было обнаружено отклонение от характерной для механизма Ахиезера квадратичной частотной зависимости коэффициента поглощения УЗВ и установлена макронеоднородность акустических свойств смешанных кристаллов.

В настоящей работе представлены результаты исследований акустических свойств твердых растворов галогенидов таллия (ГТ) $TlBr_xCl_{1-x}$ и $TlBr_xI_{1-x}$, а также степени их акустической однородности при различных составах (т. е. значениях x). Среди них составам 42% TlBr : 58% TlI и 30% TlBr : 70% TlCl соответствует минимальная температура плавления на диаграмме состояний и максимальная скорость роста 5; такие кристаллы широко применяются в инфракрасной технике под условным названием КРС-5 и КРС-6 соответственно.

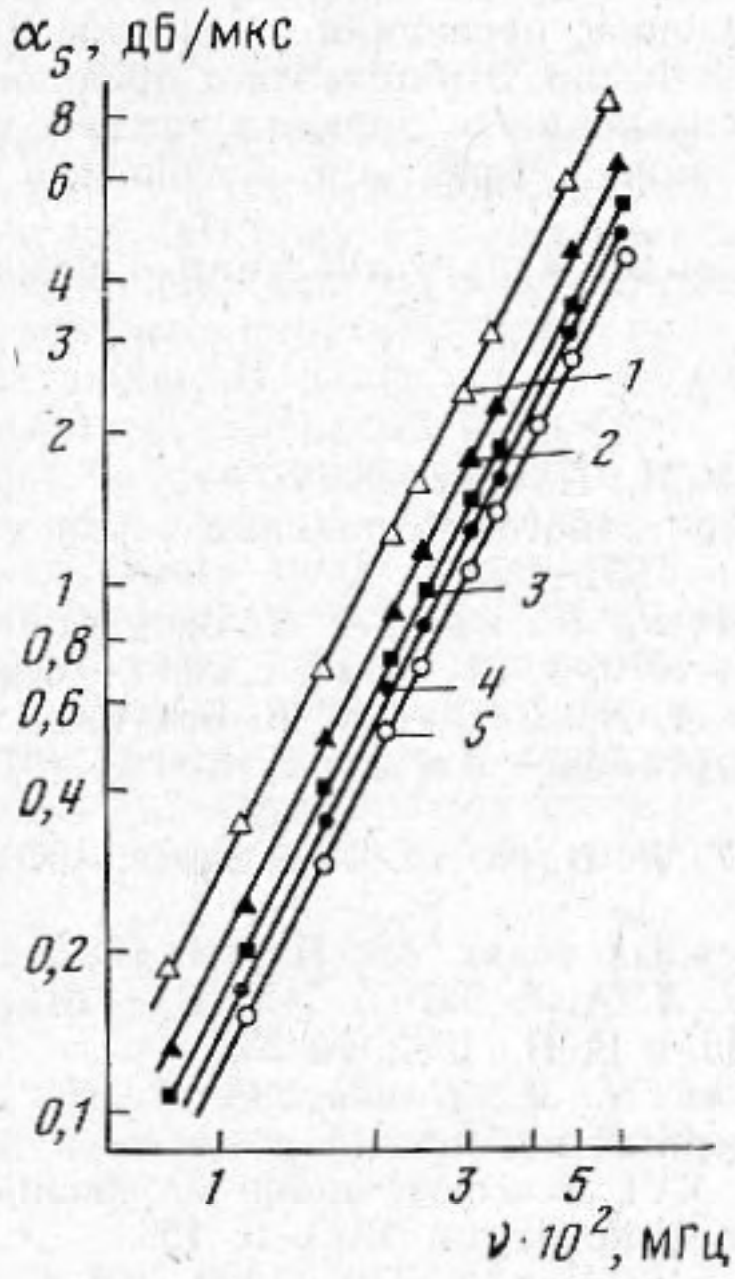
Измерения скорости v и коэффициента поглощения α УЗВ различной поляризации проводились на частотах 100÷600 МГц при комнатной температуре методом брэгговской дифракции света [6] с использованием гелий-неонового лазера. Погрешность измерений скорости звука не превышала 0,3%, а коэффициента поглощения — 5%. Исследуемые образцы имели форму параллелепипедов с размерами 5×6×12 мм^3, вырезанных по плоскостям спайкости вдоль кубических осей (растворы галогенидов таллия обладают пространственной решеткой типа CsCl с симметрией $m3m$) с отклонением от них не более 1°. Кристаллы галогенидов таллия выращивались методом Стокбаргера. Для улучшения акустических характеристик выращенные образцы подвергались предварительному отжигу при температуре 260° С в течение 24 ч с последующим медленным охлаждением со скоростью (5—8) град/ч до комнатной температуры. Ультразвуковые колебания в них возбуждались с помощью пьезокварцевых пластинок, а также широкополосных пьезопреобразователей из йодата лития [7].

Исследования частотной зависимости поглощения показали, что во всех образцах галогенидов таллия она в пределах погрешности хорошо подчиняется квадратичному закону как для продольных, так и для поперечных УЗВ. В качестве примера на фиг. 1 приведены данные измерений коэффициента поглощения сдвиговых волн как функции частоты ν в твердых растворах $TlBr_xCl_{1-x}$. Аналогичные результаты получены и для кристаллов $TlBr_xI_{1-x}$.

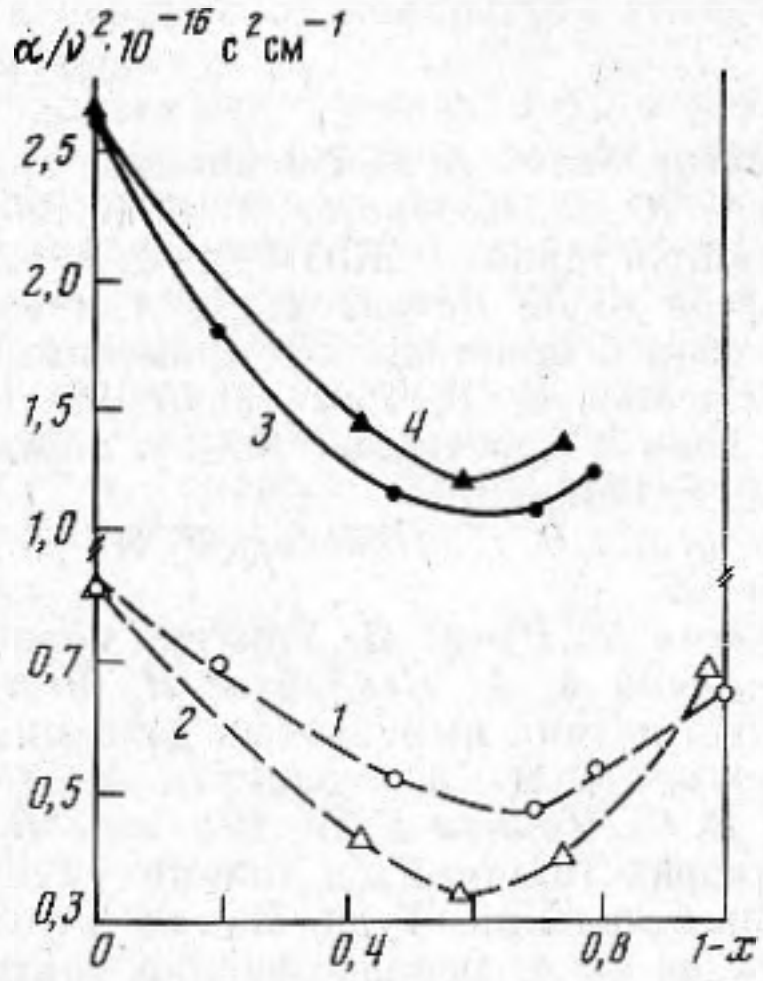
Метод брэгговской дифракции допускает локальные измерения акустических характеристик на небольших участках образцов [4]. Такие измерения позволили выявить неоднородность поглощения УЗВ во всех рассматриваемых твердых растворах, связанную, по-видимому, с макронеоднородностью состава, а также с блочностью образцов. При этом степень неоднородности поглощения УЗВ оказалась сильно зависящей от состава и была минимальной в растворах КРС-5 и КРС-6. Вместе с тем результаты исследований ядерного магнитного резонанса (ЯМР) показали, что эти растворы обладают максимальной микронеоднородностью состава, т. е. разбросом значений x в пределах элементарной ячейки [8]. Таким образом, в твердых растворах галогенидов таллия максимальная микронеоднородность состава коррелирует с минимальной макронеоднородностью, отражающейся в локальном поглощении УЗВ. В отличие от поглощения, неоднородности скорости звука в пределах погрешности измерений, а также зависимости ее от частоты, т. е. дисперсии, обнаружено не было.

В таблице представлены результаты измерений скорости и коэффициента поглощения (измеренных на участках с наименьшим поглощением) продольных и по-

перечных УЗВ вдоль кубической оси для всех исследованных кристаллов. По данным скорости звука и плотности вычислены модули упругости этих кристаллов, которые приведены в последних строчках таблицы. При этом значения модулей C_{12} получены при учете дополнительных измерений скорости звука и модулей C_{11} и C_{44} на специальных срезах [9], позволяющих определить все три модуля упругости. Следует отметить, что в связи с широким применением кристаллов КРС в акустооптике их акустические характеристики измерялись в ряде работ (см. [10, 11] и



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость коэффициента поглощения α сдвиговых волн в кристаллах $TlBr_xCl_{1-x}$ от частоты ультразвука (масштаб по обеим осям логарифмический): *1* – TlBr, *2* – $TlBr_{0,8}Cl_{0,2}$, *3* – $TlBr_{0,2}Cl_{0,8}$, *4* – $TlBr_{0,52}Cl_{0,48}$, *5* – КРС-6 ($TlBr_{0,3}Cl_{0,7}$)

Фиг. 2. Концентрационная зависимость величины α/ν^2. По вертикальной оси значения α/ν^2 отложены в единицах 10^{-16} см$^{-1}$с^2: *1*, *2* – продольные колебания в системах $TlBr_xCl_{1-x}$ и $TlBr_xI_{1-x}$, *3*, *4* – сдвиговые колебания в тех же системах

соответствующие ссылки). Между данными этих измерений, однако, существует значительный разброс, связанный, по-видимому, с различной технологией выращивания, отклонением состава, тепловой предысторией и т. д. Рассчитанные из наших измерений значения модулей упругости в кристаллах КРС-5 и КРС-6 также несколько отличаются от имеющихся в литературе данных. Остальные результаты, приведенные в таблице, получены в настоящей работе впервые. Из них следует концентрационная зависимость значений α/ν^2, показанная для УЗВ обеих поляри-

Акустические характеристики кристаллов галогенидов таллия

	TlCl	$TlCl_{0,8}Br_{0,2}$	КРС-6	$TlCl_{0,48}Br_{0,52}$	$TlCl_{0,2}Br_{0,8}$	TlBr	$TlBr_{0,58}I_{0,42}$	КРС-5	$TlBr_{0,26}I_{0,74}$	TlI+2% CsI
$v_L \cdot 10^5$, см$^{-1}$ с	2,42	2,38	2,33	2,27	2,26	2,23	2,16	2,13	2,12	2,11
$v_s \cdot 10^5$, см$^{-1}$ с	1,03	1,05	1,02	1,02	1,02	1,0	0,93	0,92	0,89	0,88
α_L, дб·см$^{-1}$	13,8	10,8	9,75	11,0	16,5	16,6	8,60	6,85	8,20	14,2
α_s, дб·см$^{-1}$	–	24,2	20,8	21,3	33,2	48,6	26,3	22,8	28,0	–
α_L/ν^2 10^{-16}, см·с^2	0,68	0,53	0,48	0,54	0,72	0,82	0,42	0,34	0,40	0,70
α_s/ν^2 10^{-16}, см·с^2	–	1,31	1,12	1,16	1,80	2,62	1,46	1,20	1,50	–
ρ, г·см$^{-3}$	7,02	7,10	7,19	7,22	7,36	7,42	7,36	7,37	7,30	7,37
$C_{11} \cdot 10^{11}$, дин·см$^{-2}$	4,11	4,01	3,88	3,73	3,76	3,70	3,42	3,33	3,28	3,28
$C_{44} \cdot 10^{11}$, дин·см$^{-2}$	0,82	0,77	0,75	0,75	0,76	0,75	0,63	0,63	0,58	0,56
$C_{12} \cdot 10^{11}$, дин·см$^{-2}$	1,56	–	1,19	–	–	1,49	–	1,54	–	–

Примечание. Индексы L и s относятся соответственно к продольным и сдвиговым волнам, данные по α приведены для частоты 450 Мгц.

заций на фиг. 2. Как видно из этой фигуры, минимальное поглощение УЗВ в растворах галогенидов таллия приходится на составы КРС-5 и КРС-6, причем относительное уменьшение величин α/ν^2 в них по сравнению с однокомпонентными кристаллами для продольных и сдвиговых УЗВ практически одинаково. Этот факт свидетельствует о значительном уменьшении в кристаллах КРС времени неупругой фононной релаксации [12]. Причиной такого уменьшения может служить микронеоднородность состава, вытекающая из данных ЯМР [8]. С другой стороны, как уже отмечалось, растворы КРС-5 и КРС-6 по сравнению с другими составами галогенидов таллия имеют минимальную температуру плавления; последняя же в определенной степени коррелирует с величиной констант Грюнайзена. Это позволяет предположить, что уменьшение поглощения УЗВ в КРС по сравнению с другими таллийсодержащими растворами может быть обусловлено также эффектами ослабления ангармонизма.

Авторы благодарят И. Н. Каневского за помощь в приготовлении образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Китайгородский А. И.* Смешанные кристаллы. М.: Наука, 1983. 277 с.
2. *Гуляев Ю. В., Козорезов А. Г.* К теории решеточного поглощения звука в «грязных» кристаллах.– ЖЭТФ, 1982, т. 82, № 5, с. 1551–1561.
3. *Леманов В. В., Петров А. В., Ахмеджанов Ф. Р., Насыров А. Н.* Затухание упругих волн в кристаллах с примесями.– ФТТ, 1979, т. 21, № 12, с. 3671–3676.
4. *Ахмеджанов Ф. Р., Леманов В. В., Насыров А. Н., Петров А. В.* Затухание упругих волн в кристаллах NaCl с помощью марганца.– Письма в ЖЭТФ, 1978, т. 4, № 18, с. 1037–1076.
5. *Доладугина В. С., Ольская М. А., Дарвойд Т. И.* Науч. тр. Гиредмета, 1970, т. 29, с. 89–94.
6. *Дьелесан Э., Руайс Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 425 с.
7. *Абрамович А. А., Недбай А. И., Шутилов В. А.* А. с. 937047 (СССР).– Широкополосный датчик импульсных давлений. Опубл. в Б. И., 1982, № 23.
8. *Кулешов А. А., Микушев В. М., Сарнацкий В. М., Каневский И. Н., Лисицкий И. С., Чарная Е. В., Шутилов В. А.* Ядерный магнитный резонанс в твердых растворах галогенидов таллия.– Тез. докл. XVI Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. Тула, Изд-во Тульского пединститута, 1983, с. 153.
9. *Шутилов В. А.* Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 280 с.
10. *Авдиенко К. И., Сапожников В. К., Семенов В. И., Шелопут Д. В.* Фотоупругие постоянные монокристаллов КРС-6.– Автометрия, 1977, т. 5, № 1, с. 79–82.
11. *Мастихин В. М., Богданов С. В., Дарвойд Т. И., Лисицкий И. С., Сапожников В. К., Шелопут Д. В.* Акустооптические характеристики монокристаллов КРС-5.– Оптико-мех. пром-сть, 1977, т. 8, вып. 1, с. 36–37.
12. *Гуляев Ю. В., Иванов С. Н., Козорезов А. Г., Котелянский И. М., Медведь В. В., Ахметов С. Ф., Давыдченко А. Г.* Поглощение продольных высокочастотных акустических волн в кристаллах $Y_{3-x}Lu_xAl_5O_{12}$.– ЖЭТФ, 1983, т. 84, № 2, с. 672–678.

Ленинградский государственный
университет им. А. А. Жданова

Поступило в редакцию
10.XII.1985

УДК 534.222.2

ОБ ОБРАЩЕНИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Брысев А. П., Стрельцов В. Н.

В последнее время большое внимание привлекают исследования обращения волнового фронта (ОВФ) звуковых пучков во внешних силовых полях. Среди различных возможных механизмов ОВФ звука особый интерес представляют процессы, приводящие к обращению волнового фронта с одновременным усилением пучков. Подобное обращение с усилением может быть достигнуто, например, при однородной временной модуляции скорости звука в среде [1]. Однако, практическая реализация достаточно глубокой модуляции встречает серьезные затруднения. В связи с этим представляется перспективным изучение другой возможности, состоящей в предварительном (без усиления) ОВФ пучка с последующим его усилением традиционными методами. Отметим, что подобная схема широко применяется в оптике.

В настоящей работе рассматриваются возможности ОВФ звука в плазмоподобных средах за счет геликон-фононного взаимодействия во внешнем переменном магнитном поле и прямого взаимодействия этого поля с ионной компонентой. Наиболее интересным с практической точки зрения является случай взаимодействия в плазме твердого тела. Поэтому в дальнейшем, для определенности, будем рассматривать именно эту возможность, причем будем предполагать, что геликон-фононное взаимодействие осуществляется за счет пьезоэффекта (для полупроводников такой механизм является, как правило, наиболее сильным). Во избежание громоздкости далее