

Акустические и акустооптические свойства стекол $\text{Ge}_a\text{Se}_b\text{Te}_c$ и $\text{Si}_a\text{Se}_b\text{Te}_c$ в случае дифракции на продольных и сдвиговых акустических волнах

© В.С. Хоркин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет,
119991 Москва, Россия

e-mail: vld_510@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

В окончательной редакции 01.07.2021 г.

Принята к публикации 02.07.2021 г.

Исследованы акустические и акустооптические свойства стекол на основе германия, селена, кремния и теллура. Представлены результаты измерений для стекол, в химический состав которых входит германий, селен, теллур (GeSeTe), а также кремний и теллур (SiTe). Приведены основные свойства стекол, такие как скорости продольных и сдвиговых акустических волн, а также величины акустооптического качества M_2 , полученные при дифракции на продольных и сдвиговых акустических волнах на длине волны оптического излучения $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$. Представлены результаты измерения акустического затухания α для продольных и сдвиговых акустических волн в теллурических стеклах на частотах ультразвука в диапазоне $f = 75\text{--}100 \text{ MHz}$.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптическое качество, германий, селен, кремний, теллур, затухание акустических волн.

DOI: 10.21883/OS.2021.10.51496.2417-21

1. Введение

На сегодняшний день акустооптический (АО) эффект широко используется для управления параметрами электромагнитного излучения в оптике, лазерной технике, спектроскопии, а также телекоммуникационных системах и устройствах оптической обработки информации. Акустооптические приборы характеризуются высоким быстродействием, отсутствием механических движущихся элементов, малыми электрическими и оптическими потерями [1,2]. На данный момент уже созданы и нашли широкое применение АО приборы, управляющие излучением ультрафиолетового ($\lambda = 0.01\text{--}0.4 \mu\text{m}$), видимого ($\lambda = 0.4\text{--}0.74 \mu\text{m}$) и ближнего инфракрасного ($\lambda = 0.74\text{--}2.5 \mu\text{m}$) диапазона электромагнитного спектра [3,4]. Зачастую в акустооптике видимого и ближнего инфракрасных диапазонов используются кристаллы парателлуриата (TeO_2), ниобата лития (LiNbO_3), кварца ($\alpha\text{-SiO}_2$) и молибдата кальция (CaMoO_4) [1,2]. Однако при увеличении длины волны оптического излучения и переходе в область среднего ($\lambda = 2.5\text{--}7 \mu\text{m}$) и длинноволнового ($\lambda = 7\text{--}15 \mu\text{m}$) инфракрасного диапазона вопрос об эффективных АО материалах до сих пор остается открытым [5]. Наиболее распространенным материалом является кристалл германия (Ge), однако это кубический, следовательно, оптически изотропный материал, что ограничивает его области применения в акустооптике [1,2,5,6].

На сегодняшний день в качестве основы для АО взаимодействия в среднем и длинноволновом диапазонах в литературе рассматривается много материалов. В их

числе кристалл теллура [7,8], кубические кристаллы на основе галогенидов таллия (KRS) [9–11], а также соединения на основе ртути: каломель, бромид и йодид ртути [12].

В настоящей работе исследуются аморфные сплавы или стекла на основе германия (Ge), селена (Se), кремния (Si) и теллура (Te). Представленные результаты продолжают и дополняют цикл исследований [13,14]. Экспериментально исследованы свойства сдвиговых акустических волн в рассматриваемых стеклах, а также определены коэффициенты АО качества M_2 при дифракции оптического излучения с длиной волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ на сдвиговой волне. Измерены коэффициенты затухания для продольной акустической волны на частоте $f = 100 \text{ MHz}$ и для сдвиговой акустической волны на частоте $f = 75 \text{ MHz}$. Полученные результаты показывают перспективность использования теллурических стекол в качестве основы для АО приборов, управляющих электромагнитным излучением среднего и длинноволнового диапазона.

2. Описание исследованных стекол и методика измерений их свойств

В работе исследовались несколько образцов стекла, состоящих из трех химических элементов: германия (Ge), селена (Se) и теллура (Te), а также один образец стекла, состоящий из кремния (Si), селена (Se) и теллура (Te). Следуя принятой ранее классификации, будем называть стекла, состоящие из германия, селена и

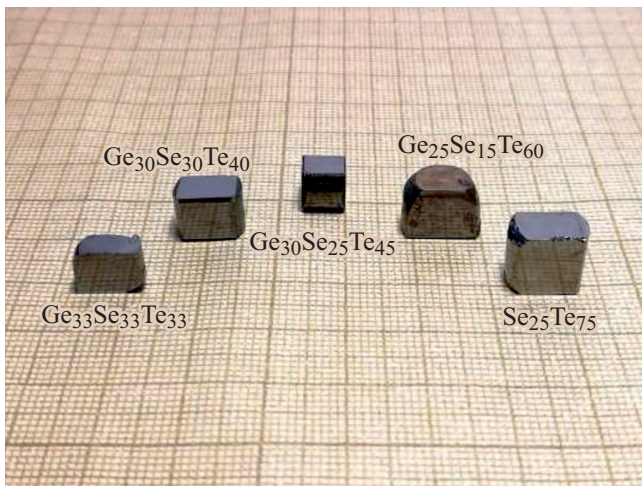


Рис. 1. Общий вид исследуемых стекол на основе германия, селена, кремния и теллура.

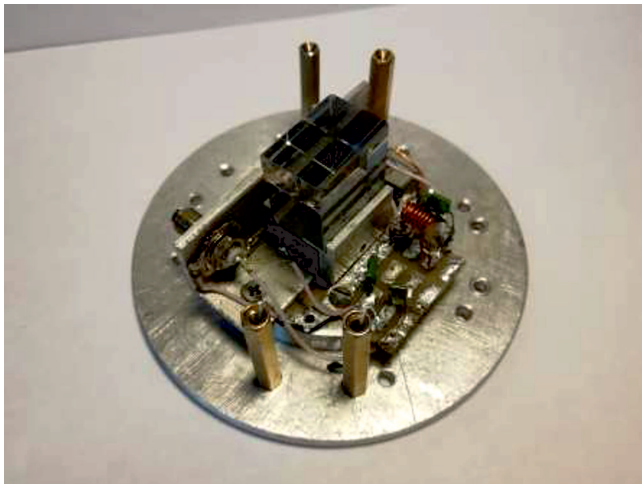


Рис. 2. Общий вид буфера из плавленого кварца (SiO_2).

теллура принадлежащими к системе GeSeTe , а стекла из кремния, селена и теллура — стеклами из системы SiSeTe [13,14]. Общий вид стекол представлен на рис. 1, на котором каждое стекло подписано с учетом его химического состава: $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$, $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$, $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$, $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$. Здесь и далее в работе химический состав стекол указан в процентах, а стекло $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ включает в себя германий, селен и теллур в равных пропорциях.

Для указанного перечня образцов были проведены измерения их акустических и АО свойств. Измерения акустических свойств проводились двумя методами — методом эхо-импульсов и АО методом. Измерение АО качества M_2 проводилось стандартным методом Диксона [1,2]. В качестве материала для буфера был выбран плавленый кварц SiO_2 , к которому были прикреплены два пьезоэлектрических преобразователя. Первый из них возбуждал продольную акустическую волну в диа-

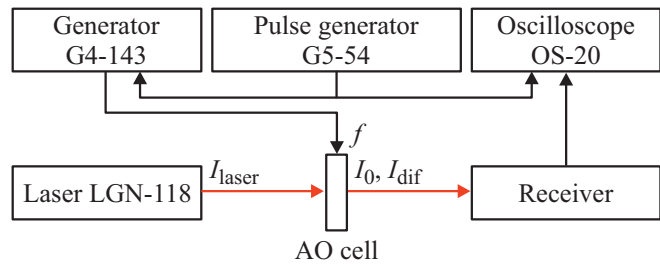


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

пазоне частот $f = 75\text{--}110\text{ MHz}$, второй — сдвиговую акустическую волну в диапазоне частот $f = 55\text{--}75\text{ MHz}$. Фотография используемого буфера приведена на рис. 2.

В ходе экспериментального исследования было проведено измерение коэффициентов акустического затухания продольных α_L и сдвиговых α_S акустических волн, распространяющихся в теллурических стеклах. Данные измерения проводились с помощью АО метода, а их результаты подробно обсуждаются ниже.

Все измерения проводились на установке, схема которой приведена на рис. 3. В качестве источника оптического излучения использовался He–Ne-лазер ЛГН-118, который выдавал излучение на трех длинах волн: $\lambda = 0.63, 1.15, 3.39\ \mu\text{m}$. В работе использовались две длины волны лазера: $0.63\ \mu\text{m}$ для работы с буфером и $3.39\ \mu\text{m}$ для работы с теллурическими стеклами.

Лазерное излучение I_{laser} падало на АО ячейку, которая была закреплена на поворотном столике. Прошедшее I_0 и дифрагированное I_{dif} излучения регистрировались двумя приемниками: для видимого излучения использовался приемник на основе фотодиода, для ИК излучения — приемник на основе германия, легированного золотом ($\text{Ge}:\text{Au}$), который охлаждался жидким азотом. Продольные и сдвиговые акустические волны создавались в буфере при помощи пьезоэлектрических преобразователей, на которые подавался сигнал с частотой f от генератора ВЧ сигналов Г4-143. Внешняя синхронизация для генератора и осциллографа обеспечивалась генератором импульсов Г5-54.

3. Измерение скорости сдвиговых акустических волн в теллурических стеклах

Описанный в предыдущем разделе буфер на основе плавленого кварца SiO_2 использовался для определения фазовой скорости сдвиговых акустических волн в теллурических стеклах. Результаты этих измерений приведены в табл. 1. Также для сравнения и полноты описания физических свойств рассматриваемых сплавов в табл. 1 приведены уже известные из литературы значения скоростей продольных акустических волн [14,15]. Необходимо отметить, что представленные значения скоростей

Таблица 1. Скорость акустических волн в сплавах систем GeSeTe и SiSeTe

Химический состав	Скорость продольных акустических волн [14,15] $v_L, \text{ m/s}$	Скорость сдвиговых акустических волн $v_S, \text{ m/s}$
$Si_{25}Te_{75}$	1920 ± 50	1160 ± 20
$Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$	2230 ± 20	1260 ± 20
$Ge_{30}Se_{30}Te_{40}$	2200 ± 20	1260 ± 30
$Ge_{30}Se_{25}Te_{45}$	2200 ± 30	1230 ± 20
$Ge_{30}Se_{25}Te_{60}$	2050 ± 10	1210 ± 20

сдвиговых акустических волн были измерены методом эхо-импульсов во всех стеклах. В работе также были проведены измерения скоростей АО методом, однако не во всех образцах удалось зарегистрировать АО дифракцию на сдвиговых акустических волнах (более подробно об этом будет идти речь в следующем разделе).

Как следует из представленных в табл. 1 результатов, исследованные стекла обладают достаточно низкими скоростями ультразвука. Так, представленные во втором столбце табл. 1 значения скоростей продольных акустических волн немного превышают величину 2000 m/s. Наибольшее значение скорости продольных волн было получено для стекла с химическим составом $Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$ и оказалось равным $v_L = (2230 \pm 20) \text{ m/s}$, а наименьшее значение — для стекла $Si_{25}Te_{75}$ $v_L = (1920 \pm 50) \text{ m/s}$ [14].

Экспериментально измеренная скорость сдвиговых волн в теллурических стеклах представлена в табл. 1 в третьем столбце. Например, для стекла с химическим составом $Ge_{33}Se_{33}Te_{33}$ она оказалась равной $v_S = (1260 \pm 20) \text{ m/s}$. Полученное значение является максимальным в тех образцах, которые были исследованы в настоящей работе. Минимальное значение было получено для стекла $Si_{25}Te_{75}$ и оказалось равным $v_S = (1160 \pm 20) \text{ m/s}$. Столь низкие значения скоростей сдвиговых акустических волн делают возможным экспериментальное исследование АО взаимодействия в теллурических стеклах на длине волны оптического излучения $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ на сдвиговых акустических волнах.

4. Измерение АО качества в теллурических стеклах

В работе были экспериментально определены АО характеристики стекол, в частности коэффициент АО качества M_2 . В литературе имеются сведения о значениях АО качества в сплавах на основе теллура при дифракции на продольной акустической волне [13–15]. Для простоты восприятия эти значения АО качества представлены в табл. 2 — данные во втором и третьем столбцах взяты из работы [14], данные в четвертом и

пятом столбце взяты из работы [15]. Следует отметить, что в литературе коэффициент АО качества при дифракции на продольной акустической волне приводится для двух состояний поляризации оптического излучения (длина волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$): вектор поляризации параллелен ($M_{2\parallel}$) и ортогонален ($M_{2\perp}$) волновому вектору ультразвука [14,15].

Из представленных в табл. 2 величин следует, что АО качество при дифракции на продольных акустических волнах сильно зависит от поляризации оптического излучения [14]. Из этого можно сделать предположение о том, что численные значения фотоупругих констант p_{11} и p_{12} стекол отличаются друг от друга. Рассчитать напрямую значения фотоупругих констант исходя из представленных в работе [14] величин АО качества M_2 невозможно, так как неизвестны численные значения показателей преломления n на исследуемой длине волны ($\lambda = 3.39 \mu\text{m}$). Однако можно оценить АО качество M_{2S} при дифракции на сдвиговых волнах при помощи следующего выражения:

$$M_{2S} = \frac{((p_{11} - p_{12})/2)^2 n^6}{\rho v_S^3} = (\sqrt{M_{2\parallel}} - \sqrt{M_{2\perp}})^2 \frac{v_L^3}{4v_S^3}. \quad (1)$$

Результаты данных расчетов представлены в табл. 3 во втором столбце для всех исследуемых стекол (M_{2S}^*). В третьем столбце табл. 3 представлены полученные экспериментальные данные о величине АО качества (M_{2S}), которые были получены методом Диксона относительно буфера на плавленом кварце SiO_2 . Обработка полученных экспериментальных данных проводилась по формуле, в которой учитываются как разные длины волн, используемые для работы с буфером ($\lambda_b = 0.63 \mu\text{m}$) и с теллурическими стеклами ($\lambda_x = 3.39 \mu\text{m}$), так и разные области АО взаимодействия в буфере (l_b) и в теллурических стеклах (l_x):

$$\frac{M_{2x}}{M_{2b}} = \sqrt{\frac{I_4 I_5}{I_1 I_3}} \frac{I_o^b}{I_o^x} \left(\frac{\lambda_x \cos \theta_x}{\lambda_b \cos \theta_b} \right)^2 \frac{l_b}{l_x}, \quad (2)$$

где M_{2x} и M_{2b} — коэффициенты АО качества исследуемого образца и буфера, I_1 и I_3 — интенсивности дифрагированного излучения на прямой и отраженной акустических волнах при дифракции в буфере, I_4 и I_5 — интенсивности дифрагированного излучения на прямой и отраженной акустических волнах при дифракции в исследуемом образце, I_o^b — интенсивность излучения, прошедшего через буфер, на длине волны λ_b , I_o^x — интенсивность излучения, прошедшего через исследуемый образец, на длине волны λ_x , θ_b и θ_x — углы Брэгга при дифракции в буфере и в исследуемом образце соответственно.

Из представленных в табл. 3 результатов видно, что в стеклах системы GeSeTe и SiSeTe наблюдается достаточно эффективное АО взаимодействие на сдвиговых акустических волнах. Максимальный коэффициент АО качества, достигающий значения $(90 \pm 10) \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,

Таблица 2. Коэффициент АО качества при дифракции на продольной акустической волне для стекол систем SiSeTe и GeSeTe

Химический состав	$M_{2\parallel}, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$, [14]	$M_{2\perp}, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$, [14]	$M_{2\parallel}, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$, [15]	$M_{2\perp}, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$, [15]
Si ₂₅ Te ₇₅	1200 ± 200	800 ± 100	—	—
Ge ₃₃ Se ₃₃ Te ₃₃	380 ± 80	300 ± 40	—	—
Ge ₃₀ Se ₃₀ Te ₄₀	420 ± 80	240 ± 40	500	420
Ge ₃₀ Se ₂₅ Te ₄₅	440 ± 80	240 ± 40	680	580
Ge ₂₅ Se ₁₅ Te ₆₀	1300 ± 250	700 ± 100	1320	1100

Таблица 3. Коэффициент АО качества при дифракции на сдвиговой акустической волне для стекол систем SiSeTe и GeSeTe

Химический состав	$M_{2S}^*, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$	$M_{2S}, 10^{15} \text{ s}^3/\text{kg}$
Si ₂₅ Te ₇₅	45	65 ± 10
Ge ₃₃ Se ₃₃ Te ₃₃	2	—
Ge ₃₀ Se ₃₀ Te ₄₀	35	23 ± 2
Ge ₃₀ Se ₂₅ Te ₄₅	45	—
Ge ₂₅ Se ₁₅ Te ₆₀	110	90 ± 10

был получен для стекла Ge₂₅Se₁₅Te₆₀. Из литературы известно, что рассматриваемые стекла обладают достаточно большим диапазоном оптической прозрачности $\lambda = 1.5\text{--}20 \mu\text{m}$ [13–15], что делает рассматриваемые стекла перспективными для использования в акустооптике.

Также необходимо отметить и неплохое совпадение рассчитанных оценочных величин АО качества M_{2S}^* (табл. 3, второй столбец) с экспериментально измеренными величинами M_{2S} (табл. 3, третий столбец). Данное совпадение подтверждает правильность полученных результатов о величине АО качества M_2 при дифракции и на продольных, и на сдвиговых акустических волнах в теллурических стеклах [14]. Следует отметить, что, исходя из оценочных величин M_{2S}^* в стекле Ge₃₃Se₃₃Te₃₃ значение АО качества при дифракции на сдвиговой акустической волне не превышает несколько единиц: $M_{2S}^* = 2 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$. Из-за низкого значения АО качества экспериментальное исследование на сдвиговой акустической волне с данным стеклом не проводилось. Также в ходе выполнения работы не удалось измерить АО качество в стекле Ge₃₀Se₂₅Te₄₅, что связано с техническими сложностями при поиске и регистрации отраженных импульсов в исследуемом стекле и буфере. Таким образом, из пяти исследовавшихся в работе стекол АО дифракцию на сдвиговых волнах удалось наблюдать только в трех из них. Этим объясняется тот факт, что в предыдущем разделе при описании скоростей сдвиговых акустических волн в стеклах были приведены величины, полученные методом эхо-импульсов, а не АО методом.

5. Измерение затухания продольных и сдвиговых акустических волн в теллурических стеклах

В ходе экспериментального исследования АО взаимодействия в теллурических стеклах были проведены измерения с целью оценки коэффициента затухания продольной α_L и сдвиговой α_S ультразвуковых волн. Измерения проводились АО методом, суть которого заключается в измерении интенсивности дифрагированного света в зависимости от расстояния до возбудителя ультразвука [16–18]. В качестве возбудителя ультразвука использовался буфер, параметры которого были описаны выше в разд. 2. Измерения коэффициентов затухания акустических волн проводились на фиксированных частотах ультразвука, которые составили для продольной акустической волны $f = 100 \text{ MHz}$, а для сдвиговой — $f = 70 \text{ MHz}$. Важно отметить, что все измерения проводились при малой акустической мощности P_a , следовательно, интенсивность дифрагированного света пропорциональна приложенной акустической мощности: $I_d \sim P_a$ [1,2,16–18].

Из теории известно, что зависимость интенсивности дифрагированного излучения от расстояния может быть аппроксимирована законом Бугера [16–18]:

$$I_d = I_{d \max} \exp(-\alpha L) \quad (3)$$

или в случае малого затухания линейной зависимостью

$$I_d = I_{d \max} \exp(-\alpha L) \approx I_{d \max}(1 - \alpha L), \quad (4)$$

где $I_{d \max}$ — интенсивность дифрагированного излучения вблизи возбудителя ультразвука, I_d — интенсивность дифрагированного излучения на расстоянии L от возбудителя, α — коэффициент затухания ультразвука [cm^{-1}].

Результаты измерений представлены на рис. 4, *a–e* для продольной акустической волны и на рис. 5, *a–d* для сдвиговой акустической волны. На всех зависимостях экспериментальные данные представлены точками, а их интерполяция — сплошными линиями. Также на графиках имеется вертикальная штриховая линия, которая отображает границы исследованного стекла. Резкое уменьшение интенсивности дифрагированного света вблизи штриховой линии связано не с затуханием

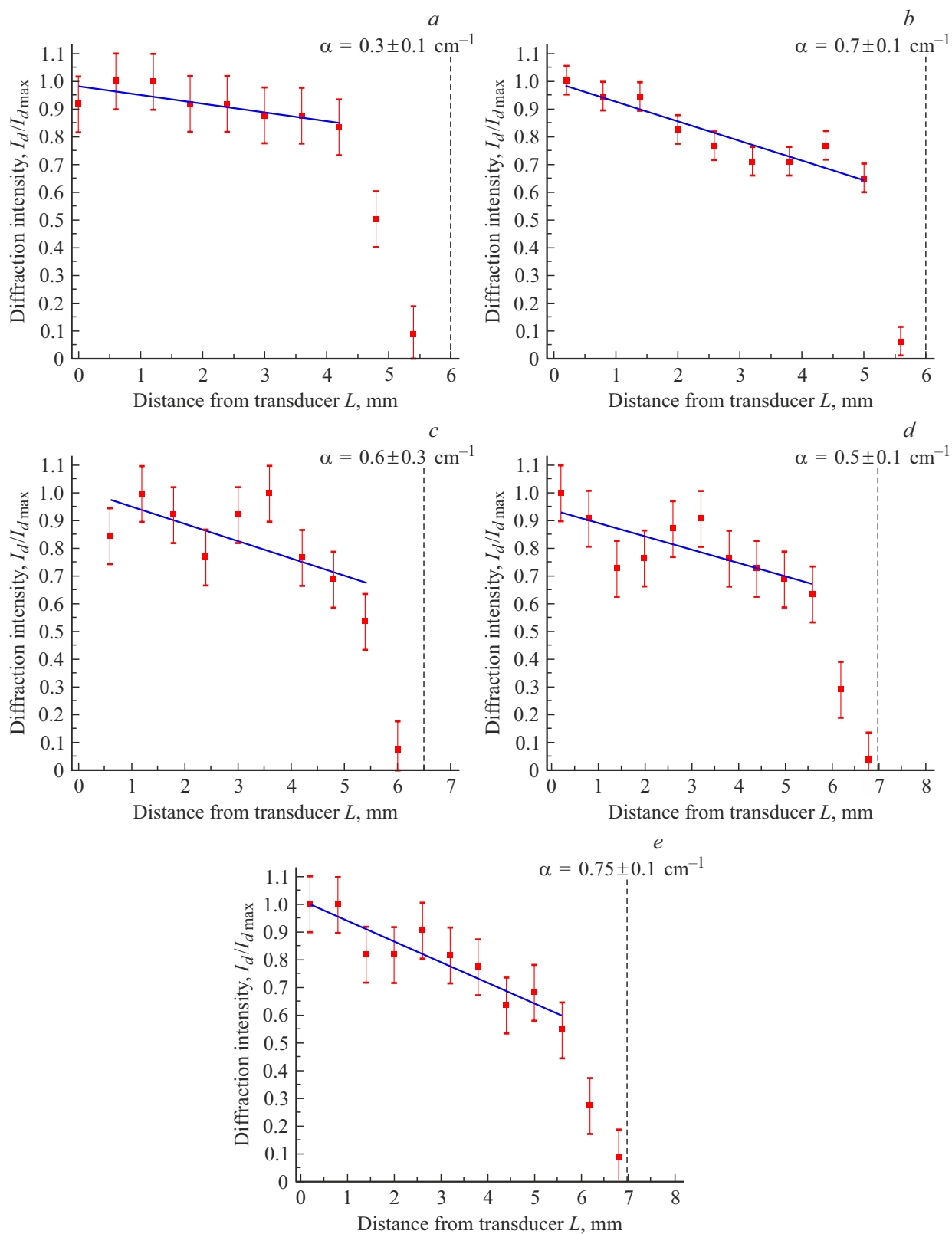


Рис. 4. Зависимости интенсивности дифракции от расстояния до возбудителя ультразвука при АО взаимодействии на продольной акустической волне в теллурических стеклах с разным химическим составом: (a) $GeSeTe$, (b) $Ge_{30}Se_{30}Te_{40}$, (c) $Ge_{30}Se_{25}Te_{45}$, (d) $Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$, (e) $Si_{25}Te_{75}$.

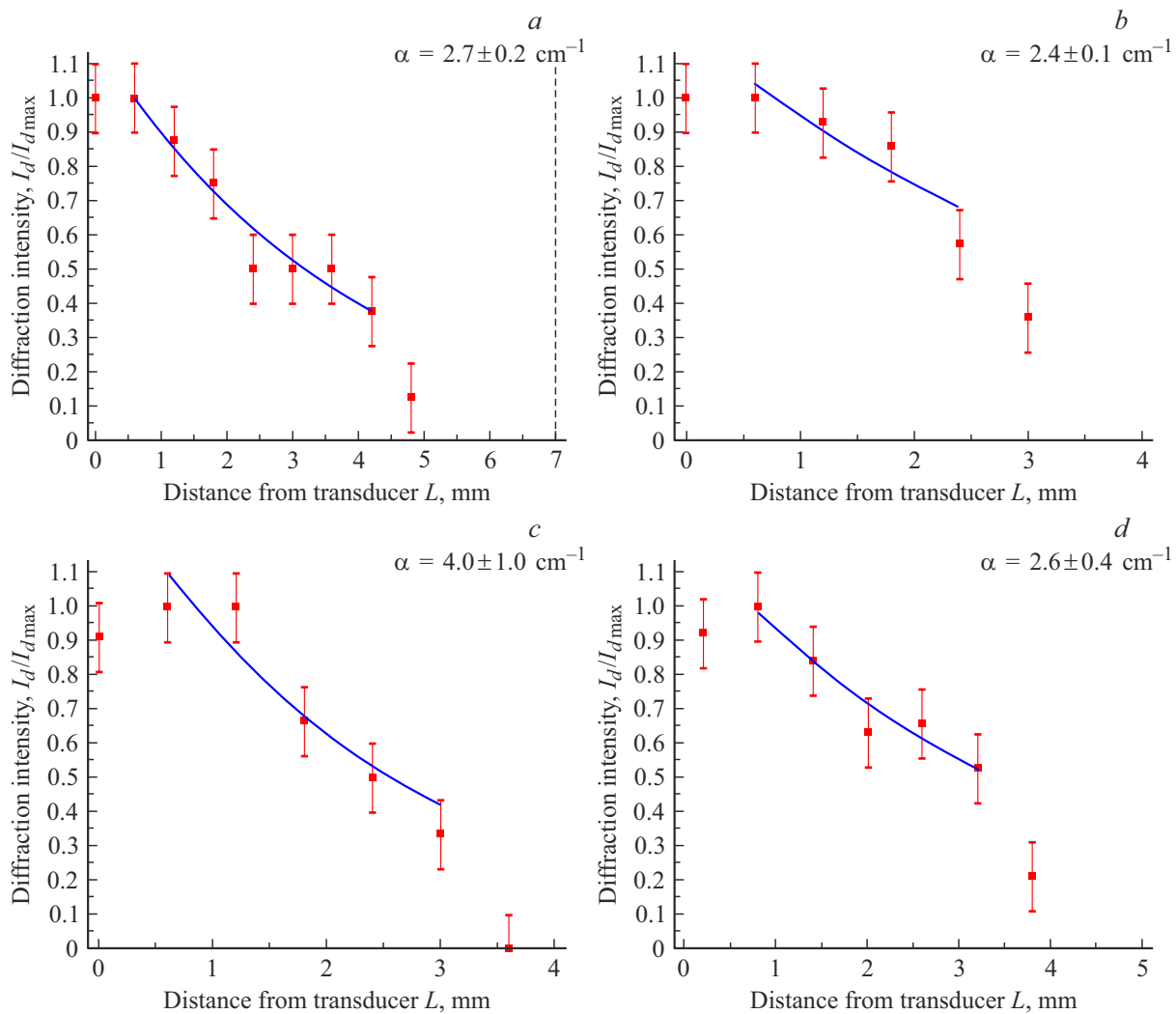


Рис. 5. Зависимости интенсивности дифракции от расстояния до возбуждателя ультразвука при АО взаимодействии на сдвиговой акустической волне в теллурических стеклах с разным химическим составом: (a) $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$, (b) $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$, (c) $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$, (d) $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$.

ультразвуковой волны, а с уменьшением области АО взаимодействия.

Из представленных зависимостей видно, что исследованные теллурические стекла обладают достаточно малым коэффициентом акустического затухания для продольных акустических волн (α_L). Поэтому при обработке экспериментальных данных была использована формула (4), а параметры аппроксимации приведены на каждом из графиков. Итоговые результаты представлены в табл. 4 во втором и третьем столбцах для продольных акустических волн.

Результаты аналогичных измерений для сдвиговых волн представлены на рис. 5, *a–d*, а итоговые результаты — в табл. 4 в четвертом и пятом столбцах. Отметим, что измерения для сдвиговых волн были аппроксимированы по формуле (3).

В литературе имеются значения коэффициента затухания для продольной акустической волны в зависимости

от химического состава стекол системы GeSeTe [11]. Они приведены в четвертом столбце в табл. 4 [11]. Из полученных результатов видно, что стекла обладают относительно малым затуханием для продольных акустических волн на частоте $f = 100 \text{ MHz}$. Максимальный коэффициент затухания был получен для стекла $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ и составил $\alpha_L = 3.2 \text{ dB/cm}$. Однако для сдвиговых волн коэффициент затухания составляет уже достаточно большую величину, в среднем около 10 dB/cm , что необходимо учитывать при разработке АО устройств на основе теллурических стекол. Важно отметить, что большая погрешность экспериментальных результатов для стекла $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$ наиболее вероятно связана с неоднородностью его свойств по объему стекла. Также из зависимостей, представленных на рис. 4, 5, следует, что измерения проводились на достаточно малых длинах распространения акустических волн, что напрямую следует из небольших размеров самих образцов ($\sim 5 \text{ mm}$).

Таблица 4. Коэффициенты затухания продольных и сдвиговых акустических волн для стекол систем SiSeTe и GeSeTe

Химический состав	Затухание продольной волны α_L , cm^{-1}	Затухание продольной волны α_L , dB/cm	Затухание продольной волны α_L , dB/cm [11]	Затухание сдвиговой волны α_S , cm^{-1}	Затухание сдвиговой волны α_S , dB/cm
Si ₂₅ Te ₇₅	0.75 ± 0.1	3.2 ± 0.4	7	2.7 ± 0.2	13 ± 1
Ge ₃₃ Se ₃₃ Te ₃₃	0.3 ± 0.1	1.3 ± 0.4	—	—	—
Ge ₃₀ Se ₃₀ Te ₄₀	0.7 ± 0.1	3.0 ± 0.4	—	2.4 ± 0.2	10.5 ± 0.5
Ge ₃₀ Se ₂₅ Te ₄₅	0.6 ± 0.3	2.6 ± 1.3	—	4.0 ± 1.0	17 ± 4
Ge ₂₅ Se ₁₅ Te ₆₀	0.5 ± 0.1	2.2 ± 0.4	2	2.6 ± 0.4	11 ± 2

Поэтому для получения более точных результатов необходимо проведение серии аналогичных измерений на образцах теллурических стекол с большими геометрическими размерами.

6. Результаты и выводы

Представлены результаты экспериментального исследования стекол на основе германия, селена, кремния и теллура. Впервые определены скорости сдвиговых акустических волн в стеклах систем GeSeTe и SiSeTe. Наибольшая скорость была получена для стекла с химическим составом Ge₃₃Se₃₃Te₃₃ и оказалась равной 1260 ± 20 м/с. Столь низкие абсолютные значения скоростей сдвиговых волн делают стекла перспективными материалами для акустики и акустооптики, например для построения на их основе линий акустической задержки.

Кроме того, для указанных стекол было проведено измерение коэффициента АО качества при дифракции на сдвиговой акустической волне. Максимальный коэффициент АО качества был получен для стекла Ge₂₅Se₁₅Te₆₀ и оказался равен $(90 \pm 10) \cdot 10^{-15}$ с³/кг. Это показывает перспективность использования теллурических стекол в акустооптике ближнего, среднего и длинноволнового ИК диапазонов, например, в качестве альтернативы монокристаллу германия (Ge). Кроме того, полученные результаты подтверждают достаточно сильное различие в численных значениях фотоупругих констант p_{11} и p_{12} в рассматриваемых сплавах.

Также представлены результаты измерений затухания продольных и сдвиговых акустических волн. Экспериментально получено, что коэффициент затухания продольных волн с частотой $f = 100$ МГц является достаточно малым и составляет в среднем 3 dB/cm. Вместе с тем впервые установлено, что коэффициент затухания для сдвиговых акустических волн на частоте ультразвука $f = 70$ МГц варьирует около 10 dB/cm. Полученные значения затухания ультразвуковых волн необходимо учитывать при проектировании АО устройств для среднего и длинноволнового ИК диапазонов на основе теллурических стекол.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 19-12-00072.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.; Balakshy V.I., Parygin V.N., Chirkov I.E. Physical Principles Of Acousto-Optics. M.: Radio&Svyaz, 1985.
- [2] Ярув А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987; Yariv A., Yeh P. Optical Waves in Crystals. NY: Wiley, 1982.
- [3] Большая Российская энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 2004–2017.
- [4] Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988–1998.
- [5] Gupta N. // Proc. SPIE. 2014. V. 9100. P. 1–10. doi 10.1117/12.2054050
- [6] Fox A.J. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 4. P. 2040–2041. doi 10.1364/AO.24.002040
- [7] Voloshinov V.B., Khorkin V.S., Kulakova L.A., Gupta N. // J. Phys. Commun. 2017. V. 1. N 2. P. 025006. doi 10.1088/2399-6528/aa86ba
- [8] Khorkin V.S., Voloshinov V.B. // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECOMF). 2019. P. 1–4. doi 10.1109/WECOMF.2019.8840138
- [9] Voloshinov V.B., Khorkin V.S., Kuznetsov M.S., Subbotin K.A. // Proc. SPIE. 2019. V. 11210. P. 112100E. doi 10.1117/12.2540343
- [10] Voloshinov V.B., Khorkin V.S., Kuznetsov M.S., Subbotin K.A. // Proc. Mtgs. Acoust. (POMA). 2020. V. 38. N 1. P. 045019–045026. doi 10.1121/2.0001103
- [11] Voloshinov V.B., Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A. // Opt. Eng. 2017. V. 56. N 8. P. 087102. doi 10.1117/1.OE.56.8.087102
- [12] Dyakonov E.A., Porokhovnichenko D.L., Ryu J., Balakshy V.I. // Appl. Opt. 2021. V. 60. P. 2348–2353. doi 10.1364/AO.417401

- [13] *Voloshinov V.B., Gupta N., Kulakova L.A., Khorkin V.S., Melekh T.B., Knyazev G.A.* // *J. Opt.* 2016. V. 18. P. 025402–025411. doi 10.1088/2040-8978/18/2/025402
- [14] *Хоркин В.С., Волошинов В.Б., Ефимова А.И., Кулакова Л.А.* // *Опт. и спектр.* 2020. Т. 128. В. 2. С. 250–255. 10.21883/OS.2020.02.48970.151-19; *Khorkin V.S., Voloshinov V.B., Efimova A.I., Kulakova L.A.* // *Opt. Spectrosc.* 2020. V. 128. P. 244–249. doi 10.1134/S0030400X20020101
- [15] *Кулакова Л.А., Мелех Б.Т., Грудинкин С.А., Данилов А.П.* // *ФТП.* 2013. Т. 47. № 10. С. 1435–1439; *Kulakova L.A., Melekh B.T., Grudinkin S.A., Danilov A.P.* // *Semiconductors.* 2013. V. 47. N 10. С. 1426–1431.
- [16] *Voloshinov V.B., Lemyaskina E.A.* // *Act. Phys. Slov.* 1996. V. 46. N 6. P. 733–738.
- [17] *Mantsevich S.N., Kostyleva E.I.* // *Ultrasonics.* 2019. V. 91. P. 45–51. doi 10.1016/j.ultras.2018.07.016
- [18] *Mantsevich S.N., Kostyleva E.I.* // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. P. 6796–6802. doi 10.1364/AO.399409