

Акустооптические свойства сплавов на основе германия, селена, кремния и теллура

© В.С. Хоркин¹, В.Б. Волошинов¹, А.И. Ефимова¹, Л.А. Кулакова²

¹ Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vld_510@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

В окончательной редакции 15.04.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Исследованы акустические, оптические и акустооптические свойства аморфных соединений на основе германия, селена, кремния и теллура. Измерены скорости продольных акустических волн, а также акустооптическое качество для аморфных сплавов на основе теллура на длине волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$. Исследовано акустооптическое качество кристалла германия в случае дифракции на продольных акустических модах вдоль направлений [110] и [111] кристалла.

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

DOI: 10.21883/OS.2020.02.48970.151-19

Введение

Акустооптический 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]. Созданы и широко применяются акустооптические (АО) приборы, которые управляют излучением ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов электромагнитного спектра. В качестве основы для подобных приборов могут выступать такие вещества, как кристалл дигидрофосфата калия (KH_2PO_4), фосфат магния (MgF_2), парателлуриит (TeO_2) и другие [3–5]. Наиболее часто используется кристалл парателлуриита, который обладает хорошими акустооптическими параметрами [4,5]. Однако из-за непрозрачности на длинах волн $\lambda > 5 \mu\text{m}$ этот материал не может применяться для приборов дальнего инфракрасного диапазона. Для создания такого рода приборов могут применяться как оптически изотропные материалы, например, кристалл германия (Ge) [6], так и оптически анизотропные вещества — соединения на основе ртути [7], теллура [8] и др. В последнее время большой интерес вызывают кубические кристаллы на основе галогенидов таллия (KRS-5 и KRS-6). В первую очередь это связано с большим диапазоном прозрачности материалов (до $\lambda = 45 \mu\text{m}$) и высоким коэффициентом АО качества [9–12].

Настоящая работа продолжает цикл исследований аморфных сплавов на основе германия (Ge), селена (Se), кремния (Si) и теллура (Te) [13]. В новых стеклах системы GeSeTe измерены спектры пропускания, а также определены их акустические и АО свойства. Также определены коэффициенты АО качества монокристаллического германия для продольных акустических мод вдоль направлений [110] и [111]. Измерения АО свойств в кристалле и стеклах проводились методом Диксона [14] относительно буфера, созданного на основе образца ТФ-7. Параметры буфера представлены в настоящей работе.

Описание исследованных стекол

В работе исследовалось несколько образцов стекол, состоящих из трех химических элементов — германия, селена и теллура, а также один образец стекла, состоящий из кремния и теллура. В соответствии с принятой ранее классификацией [13] стекла, состоящие из германия, селена и теллура, отнесены к системе GeSeTe, а стекла с химическим составом кремний-селен-теллур — к сплавам, принадлежащим системе SiSeTe. Список исследованных стекол, которым присвоены порядковые номера, представлен в табл. 1. Следует отметить, что некоторые сплавы из табл. 1 были исследованы ранее. Так, для образцов под номерами 2–4 имеются литературные данные об их плотности, скорости акустических волн, показателе преломления и АО качестве [13,15]. Однако данные соединения повторно исследовались для оценки деградации характеристик стекол с течением времени. Стекло под номером 5 из

Таблица 1. Список исследованных стекол на основе германия, селена, кремния и теллура

Порядковый номер образца	Химический состав
1	$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$
2	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$
3	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$
4	$\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$
5	$\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$
6	$\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$

табл. 1 принадлежит системе SiSeTe, и в дальнейшем его параметры сравнивались с литературными данными для сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ (номер 6). Необходимо отметить, что химический состав стекла под номером 5 известен лишь приблизительно. Образец под номером 2 был использован в качестве эталонного для сравнения с параметрами нового стекла $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$. Аналогично образец под номером 6 был использован для сравнения с образцом под номером 5. Так как стекла обладают близким химическим составом, то можно ожидать и схожесть их физических свойств [13].

Измерение пропускания стекол

В начале экспериментального исследования были измерены спектры пропускания исследуемых образцов. Измерения проводились в инфракрасной области электромагнитного спектра с помощью фурье-спектрометра Bruker FRA-106/S (без откачки воздуха). На рис. 1, *a* представлен график зависимости пропускания образцов под номерами 1 (красная кривая) и 2 (синяя кривая) от длины волны светового излучения, а на рис. 1, *b* — коротковолновая часть этого графика при $\lambda = 1\text{--}3\ \mu\text{m}$.

Из рисунка видно, что образец под номером 1 является прозрачным в широком диапазоне длин волн, причем диапазон прозрачности начинается с длины волны $\lambda \approx 1.1\ \mu\text{m}$, а при $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$ пропускание $T = 35\%$. При этом из рисунка следует, что графики прозрачности образцов с химическими составами $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$ качественно похожи и отличаются лишь значениями коэффициента T . Из литературы известно, что при понижении концентрации теллура левая граница области пропускания образца смещается в коротковолновую область спектра [13]. Полученный в ходе исследования результат (рис. 1, *b*) подтверждает выводы работы [13]. Так, образец под номером 1 ($\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$) имеет $T = 40\%$ при $\lambda = 1.35\ \mu\text{m}$, тогда как образец под номером 2 ($\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$) имеет то же пропускание уже при $\lambda = 1.5\ \mu\text{m}$.

Из рис. 1, *a* видно, что оба исследуемых образца имеют полосы резонансного поглощения на длинах волн $\lambda = 8$ и $13\ \mu\text{m}$. Основываясь на литературных данных о спектрах пропускания стекол системы GeSeTe с другими

химическими составами [13], можно сделать предположение о том, что показанные на рис. 1 резонансные полосы поглощения на данных длинах волн связаны с особенностью именно рассматриваемых химических соединений.

Аналогично было проведено изменение спектра пропускания образцов системы SiSeTe. Измерения проводились для трех образцов — $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ (номер 5, зеленая кривая) и двух образцов $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$. Один из образцов $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ был выращен двадцать лет назад (номер 6, красная кривая), и его спектр пропускания известен из литературы [13,15], другой — около сорока лет назад (синяя кривая). Результаты измерения спектров представлены на рис. 2.

Из представленных данных видно, что спектры пропускания образцов с составом $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, выращенные в разное время, качественно не отличаются друг от друга. В частности, совпадают и полосы пропускания, и границы поглощения образцов. Отличие существует лишь в значении пропускания, которое не превышает 5%, что указывает на незначительно отличающееся оптическое качество исследованных образцов. Таким образом, стекло $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ слабо изменяет свои оптические свойства со временем.

Из рис. 2 также видно, что спектр пропускания образца с химическим составом $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ отличается от двух других спектров образцов этой же группы SiSeTe. Видно, что образец $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$ является прозрачным, начиная с длины волны $\lambda = 1.7\ \mu\text{m}$ ($T = 5\%$), в то же время образцы $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ прозрачны, начиная с длины волны $\lambda = 2.1\ \mu\text{m}$ ($T = 5\%$). Полосы поглощения у образцов системы SiSeTe находятся на тех же длинах волн ($\lambda = 9$ и $15\ \mu\text{m}$), однако вид кривых прозрачности вблизи линий поглощения отличается у образцов с различными концентрациями теллура.

Методика измерения параметров стекол

Для измерения акустических и АО параметров стекол требовалось возбуждать в исследуемых образцах стекол продольную акустическую волну. Для возбуждения волн был создан буфер на основе тяжелого флинта ТФ-7, к одной из граней которого был прикреплен пьезоэлектрический преобразователь, а к противоположной грани приклеивался один из исследуемых образцов под номерами 1–5. Из литературы известны параметры тяжелого флинта [16]. Однако данный материал не является широко используемым в акустооптике. Поэтому вначале были проведены измерения АО свойств самого стекла ТФ-7. После этого образец флинта был использован в качестве буфера, относительно которого измерялись теллурические стекла методом Диксона [14].

Линейные размеры использованного буфера были равны $19 \times 10 \times 7\ \text{mm}$. К одной из граней стекла ТФ-7 был приклеен пьезоэлектрический преобразователь из

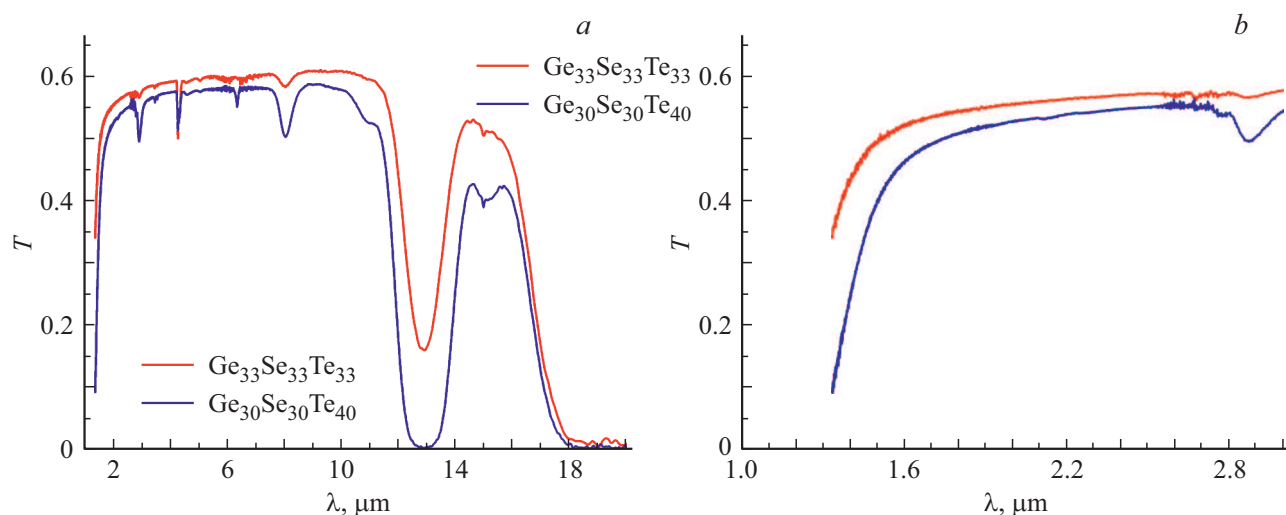


Рис. 1. Спектральная зависимость оптической прозрачности для стекол с химическим составом $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$: (а) во всем исследованном диапазоне, (б) коротковолновая часть исследованного диапазона.

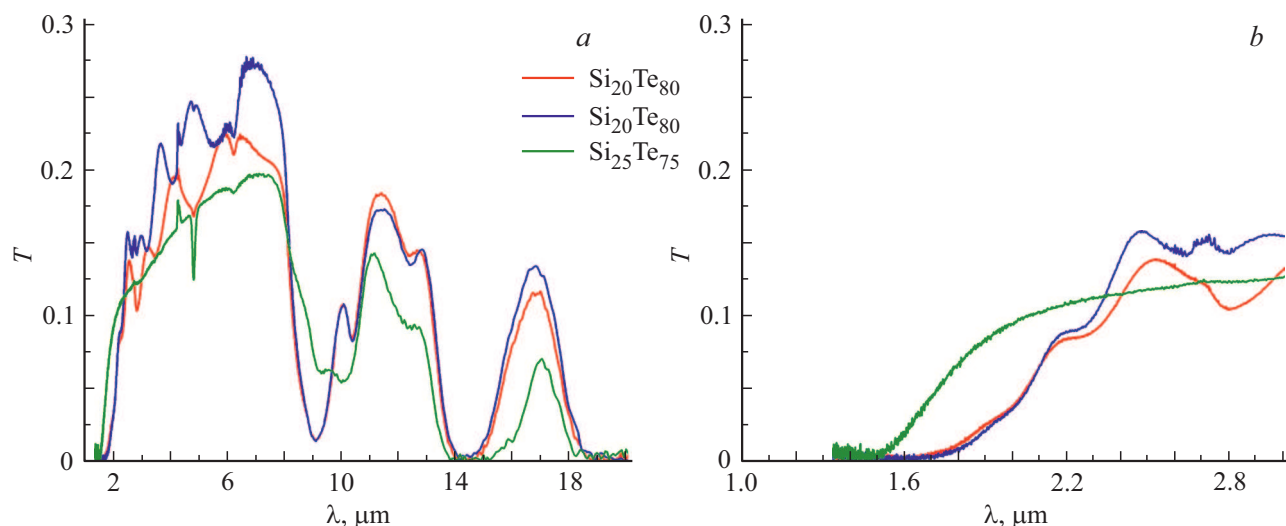


Рис. 2. Спектральная зависимость оптической прозрачности для стекол системы SiTe: (а) во всем исследованном диапазоне, (б) коротковолновая часть исследованного диапазона.

пьезокерамики ЦТС-19. Частота основной гармоники использованного преобразователя $f = 3$ МГц, однако в эксперименте звук возбуждался на высших гармониках — с девятой по пятнадцатую, что соответствовало частотам ультразвука $f = 27\text{--}45$ МГц. Для более эффективного возбуждения ультразвука была синтезирована цепь электрического согласования. На рис. 3, а представлен график зависимости коэффициента матрицы рассеяния S_{11} преобразователя в зависимости от электрической частоты. На рисунке красной кривой отображены рассчитанные параметры пьезоэлектрического преобразователя, а черной кривой — измеренные параметры. Расчет проводился для рабочего диапазона частот $f = 20\text{--}50$ МГц пьезопреобразователя. Из рис. 3, а видно качественное совпадение теоретических и экспериментальных данных. Наилучшее согласование

в эксперименте достигалось на частоте $f = 27$ МГц, при которой коэффициент матрицы рассеяния двухполосника $S_{11} = -6$ дБ, что соответствует эффективному преобразованию до 75% электрической мощности в мощность ультразвуковой волны.

На рисунке 3, б представлена фотография созданного буфера из тяжелого флинта (ТФ-7), где 1 — буфер (ТФ-7), 2 — исследуемый образец сплава на основе теллура, 3 — пьезопреобразователь, 4 — электрическая схема согласования. Параметры созданного буфера калибровались относительно кристаллического кварца. Для этого были измерены АО качество ТФ-7, а также эффективный размер акустического столба. Измерение коэффициента АО качества стекла ТФ-7 проводилось на длине волны $\lambda = 633$ нм для двух поляризаций оптического излучения — параллельно и перпендикулярно

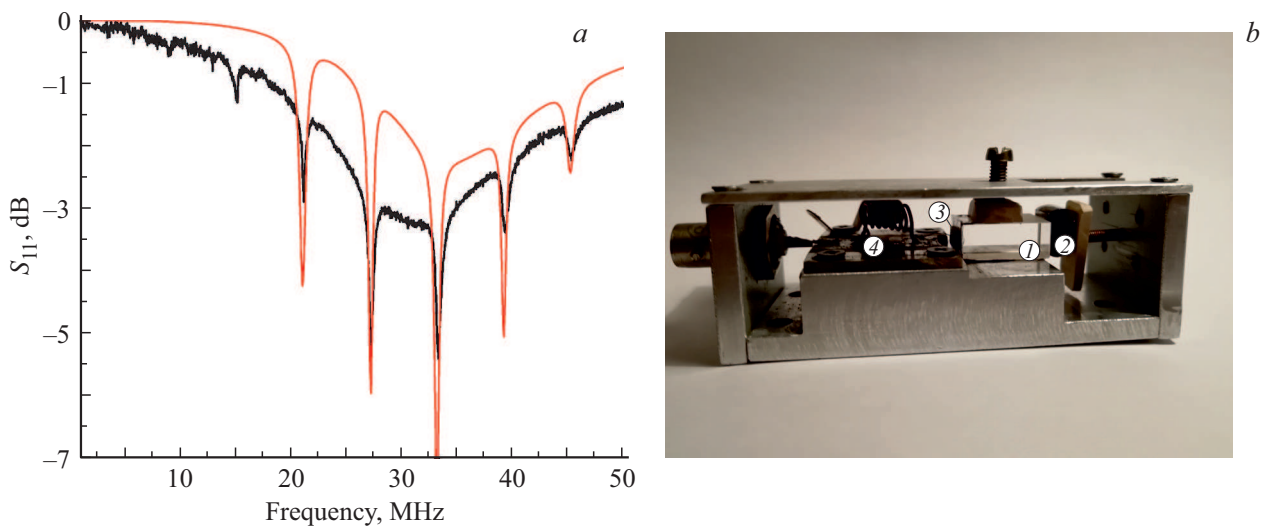


Рис. 3. (а) Зависимость коэффициента матрицы рассеяния S_{11} от частоты, (б) общий вид буфера на основе ТФ-7 с приклеенным образцом (пояснения в тексте).

волновому вектору ультразвука. Получены следующие значения АО качества: $M_{2||} = (5.5 \pm 1) \cdot 10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$ и $M_{2\perp} = (7.4 \pm 1) \cdot 10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$, что в пределах погрешности совпадает с литературными данными [16].

Измерение характеристик монокристаллического германия

Известно, что монокристаллический германий используется в акустооптике в качестве основы для приборов управления излучением среднего и дальнего ИК диапазонов [1,2,6,17,18]. В данной работе исследовались два образца из германия, которые имели форму прямоугольного параллелепипеда. Одна из граней первого образца была ориентирована ортогонально кристаллографической оси [110], во втором образце — ортогонально кристаллографической оси [111]. Вдоль этих двух направлений в эксперименте возбуждалась продольная акустическая волна. В литературе имеются противоречивые данные о значении АО качества монокристалла германия в указанных направлениях. Изначально в работе [6] было заявлено значение АО качества вдоль направления [111] $M_{2||} = 830 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$, однако в последующих работах была предсказана величина $M_{2||} = 240 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$ [17] и экспериментально получено значение $M_{2||} = 180 \cdot 10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$ [18]. Таким образом, из анализа литературных данных видно, что, несмотря на использование кристалла в АО приборах, вопрос о его фундаментальных характеристиках выяснен не до конца.

Перед началом экспериментального исследования был произведен расчет АО качества германия в случае дифракции на продольной акустической моде, распространяющейся вдоль направлений [110] и [111]. В расчетах были использованы литературные данные о численном

Таблица 2. Экспериментальные значения АО качества германия ($10^{-18} \text{ s}^3\text{g}^{-1}$)

Оси	$M_{2 }$	$M_{2\perp}$	$M_{2 th}$	$M_{2\perp th}$
Ge [110]	120 ± 30	30 ± 10	220	80
Ge [111]	190 ± 40	30 ± 5	240 [17], 180 [18]	35

значении фотоупругих постоянных [1,17]. Расчеты проводились для двух состояний оптической поляризации падающей волны света: параллельно волновому вектору ультразвука (символ ||) и ортогонально (символ \perp). Для квазиортогональной геометрии АО взаимодействия были получены следующие выражения для эффективных фотоупругих констант [1,2,6]. Для продольной акустической волны вдоль [111] эффективная фотоупругая константа оказалась равной:

$$p_{\text{eff}||} = \frac{p_{11} + 2p_{12} + 4p_{44}}{3}, \quad p_{\text{eff}\perp} = \frac{p_{11} + 2p_{12} - 2p_{44}}{3}.$$

Для акустической волны вдоль [110] были проведены расчеты для падающего света вдоль направления $[1\bar{1}0]$ и для направления [001]:

$$p_{\text{eff}||} = \frac{p_{11} + p_{12} + 2p_{44}}{2},$$

$$p_{\text{eff}\perp} = \frac{p_{11} + p_{12} - 2p_{44}}{2} \text{ свет вдоль } [001],$$

$$p_{\text{eff}||} = \frac{p_{11} + p_{12} + 2p_{44}}{2}, \quad p_{\text{eff}\perp} = p_{12} \text{ свет вдоль } [1\bar{1}0].$$

Используя данные выражения, были рассчитаны значения АО качества, которое проверялось при экспериментальном исследовании. А именно в случае дифракции на акустической моде вдоль [110] в эксперименте

свет посылался вдоль направления $[1\bar{1}0]$. Рассчитанные значения АО качества для двух поляризаций светового излучения представлены в табл. 2 в столбцах 4 и 5 соответственно. Экспериментальное исследование монокристаллического германия проводилось на длине волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$, но на данной длине волны буфер на основе ТФ-7 являлся непрозрачным. Поэтому в эксперименте использовались две длины волны излучения He-Не-лазера, а именно $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$ для работы с германием и теллуrowыми стеклами и $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ для работы с буфером.

Исходя из измеренных величин интенсивностей дифракции, были вычислены коэффициенты АО качества для монокристалла германия, которые представлены в табл. 2 в столбцах 2 и 3.

Как видно из табл. 2, полученные данные о величинах АО качества оказались ниже рассчитанных на основании литературных данных [17], но при этом практически совпали с экспериментальными данными работы [18]. Наиболее вероятно, что полученные отличия от литературных данных связаны с различными типами германия (высокоомный и низкоомный). Но при этом, исходя из полученных в эксперименте значений, видно, что величина АО качества для монокристалла германия в исследуемых срезах оказывается достаточно малой и не достигает величин, указанных в работе [6].

Исследование сплавов на основе теллура

Перед измерением АО качества сплавов на основе германия, селена, кремния и теллура были измерены плотность и скорость продольных акустических волн для образцов под номерами 1, 2, 5 и 6. В литературе нет данных о параметрах сплавов под номерами 1 и 5, однако имеется информация о параметрах соединений с близким химическим составом.

Измерение плотности сплавов на основе теллура

Измерение плотности проводилось стандартным методом взвешивания образца в воздухе и в воде. Результаты измерений представлены в табл. 3. В частности, из табл. 3 видно, что плотность образца под номером 1 $\rho = 4.92 \pm 0.15 \text{ g cm}^{-3}$, что несколько меньше плотности образца под номером 2: $\rho = 5.02 \pm 0.09 \text{ g cm}^{-3}$ [15]. Это согласуется с предположением, высказанным в [13], что плотность образцов уменьшается с уменьшением процентной концентрации теллура. Различие в точности измерений плотности связано с ошибкой в определении линейных размеров.

Таблица 3. Экспериментальные и литературные данные о плотности исследуемых сплавов

№	Химический состав	Плотность ρ , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	[15]
1	$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$	4.92 ± 0.15	–
2	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$	5.02 ± 0.09	5.01
5	$\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$	5.06 ± 0.06	–
6	$\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$	–	5.03

Таблица 4. Скорости продольных волн (m/s) в исследуемых сплавах

№	Химический состав	Скорость продольных акустических волн	[15]
1	$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$	2230 ± 20	–
2	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$	2200 ± 20	2400
5	$\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$	2000 ± 20	–
6	$\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$	2050 ± 20	2030

Таблица 5. Значения АО качества ($10^{-18} \text{ s}^3 \text{g}^{-1}$) сплавов на основе теллура

№	Химический состав	$M_{2\parallel}$	$M_{2\perp}$	$M_{2\parallel}$, [15]	$M_{2\perp}$, [15]
1	$\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$	390 ± 130	290 ± 60	–	–
2	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$	420 ± 100	240 ± 40	500	420
3	$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{25}\text{Te}_{45}$	440 ± 100	240 ± 40	680	580
4	$\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$	1330 ± 300	700 ± 160	1320	1100
5	$\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$	1150 ± 400	770 ± 150	–	–
6	$\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$	–	–	–	880

Измерение акустических свойств сплавов на основе теллура

Измерение скорости продольных акустических волн проводилось для образцов под номерами 1, 2, 5 и 6 двумя методами: методом эхо-импульсов и АО методом. Результаты измерений совпали в пределах погрешности, а в табл. 4 приведены результаты только для АО метода как более точного. Из представленных результатов видно, что экспериментальные данные для системы SiSeTe совпали со значениями, имеющимися в литературе [15]. Однако для системы GeSeTe экспериментальные и литературные данные о скорости продольных акустических волн не совпадают даже в пределах погрешности.

Измерение АО свойств сплавов на основе теллура

Были измерены АО качества стекол под номерами 1–6 по методике, аналогичной методике измерения АО качества германия. Измерения проводились для двух поляризаций оптического излучения на длине волны $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$. Результаты экспериментального исследо-

вания представлены в табл. 5 в столбцах 3 и 4, а в столбцах 5 и 6 представлены литературные данные о коэффициентах АО качества из [15]. Из таблицы видно, что результаты измерения АО качества лишь частично совпадают с имеющимися литературными данными в пределах погрешности. Из табл. 3 видно, что коэффициент АО качества достаточно сильно зависит от поляризации оптического излучения. Так, например, для образца под номером 4 (химический состав $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$) отличие составляет около двух раз. Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что отличие фотоупругих констант p_{11} и p_{12} достигает 30% в зависимости от рассматриваемого образца. Это означает, что в указанных образцах возможно эффективное акустооптическое взаимодействие на сдвиговых акустических волнах с эффективной фотоупругой константой $p_{\text{eff}} = 0.5(p_{11} - p_{12})$.

Выводы и результаты

В ходе анализа изучены оптические, акустические и акустооптические свойства аморфных соединений на основе германия, селена, кремния и теллура. Впервые экспериментально исследованы параметры двух соединений $\text{Ge}_{33}\text{Se}_{33}\text{Te}_{33}$ и $\text{Si}_{25}\text{Te}_{75}$, а также проведено сравнение полученных результатов с литературными данными для стекол с близкими химическими составами. Измерены зависимости оптической прозрачности стекол химического состава SiSeTe и проведена оценка их деградации со временем. Дополнительно были экспериментально определены плотность и скорость продольных акустических волн в исследованных образцах.

Для сопоставления полученных результатов для стекол на основе теллура с параметрами других известных материалов для инфракрасной области спектра был исследован монокристалл германия. В ходе исследования было экспериментально определено АО качество Ge при дифракции на продольных акустических модах вдоль направлений [110] и [111] кристалла. Полученные значения АО качества оказались невелики и составили $M_2 = (190 \pm 40) \cdot 10^{-18} \text{ s}^3 \text{ g}^{-1}$ для акустической моды вдоль оси [111] и $M_2 = (120 \pm 30) \cdot 10^{-18} \text{ s}^3 \text{ g}^{-1}$ для акустической моды вдоль оси [110].

По аналогичной методике были измерены коэффициенты АО качества нескольких сплавов на основе теллура в случае дифракции на продольной акустической моде. Наибольшее значение АО качества было получено для образца с химическим составом $\text{Ge}_{25}\text{Se}_{15}\text{Te}_{60}$, для которого $M_2 = (1330 \pm 300) \cdot 10^{-18} \text{ s}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Экспериментально обнаруженные большие значения коэффициента акустооптического качества, а также широкий диапазон прозрачности сплавов на основе германия, селена и теллура делает их перспективными АО материалами для среднего и дальнего инфракрасного диапазона.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них 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.
- [2] Goutzoulis A., Pape D. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. NY: Dekker, 1994.
- [3] Gupta N., Voloshinov V.B. // J. Opt. 2014. V. 16. N 3. P. 035301. doi 10.1088/2040-8978/16/3/035301
- [4] Gupta N., Voloshinov V.B. // Appl. Opt. 2007. V. 46. N 7. P. 1081. doi 10.1364/AO.46.001081
- [5] Voloshinov V.B., Yushkov K.B., Linde B. // J. Opt. A. 2007. V. 9. P. 241. doi 10.1088/1464-4258/9/4/006
- [6] Abrams R.L., Pinnow D.A. // Appl. Phys. 1970. V. 41. N 7. P. 2765. doi 10.1063/1.1659312
- [7] Gupta N. // Appl. Opt. 2009. V. 48. N 7. P. C151. doi 10.1364/AO.48.00C151
- [8] Gupta N., Voloshinov V.B., Knyazev G.A., Kulakova L.A. // J. Opt. 2012. V. 14. N 3. P. 035502. doi 10.1088/2040-8978/14/3/035502
- [9] Кристаллы галогенидов таллия: получения свойства и применение /Под ред. Богданова С.В. Наука, 1989. 150 с.
- [10] Gottlieb M., Isaacs T.J., Feichtner J.D., Roland G.W. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 12. P. 5145. doi 10.1063/1.1663207
- [11] Suhre D.R., Villa E. // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 12. P. 2340. doi 10.1364/AO.37.002340
- [12] Voloshinov V.B., Porokhovnichenko D.L., Dyakonov E.A. // Ultrasonics. 2018. V. 88. P. 207. doi 10.1016/j.ultras.2018.04.002
- [13] Voloshinov V.B., Gupta N., Kulakova L.A., Khorkin V.S., Melekh T.B., Khyazev G.A. // J. Opt. 2016. V. 18. N 2. P. 025402. doi 10.1088/2040-8978/18/2/025402
- [14] Dixon R.W., Kohen M.G. // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 8. N 8. P. 205. doi 10.1063/1.1754556
- [15] Кулакова Л.А., Мелех Б.Т., Грудинкин С.А., Данилов А.П. // ФТТ. 2013. Т. 47. № 10. С. 1435.
- [16] Клюдзин В.В., Кулаков С.В., Разживин Б.П., Ульянов Г.К. // ОМП. 1972. № 1. С. 3.
- [17] Feldman A., Waxler R.M., Horowitz D. // Appl. Phys. 1978. V. 49. N 4. P. 2589. doi org/10.1063/1.325076
- [18] Fox A.J. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 4. P. 2040.