

Физические свойства сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ с различной степенью структурного совершенства и его применение в акустооптических устройствах

© Л.А. Кулакова[¶], Б.Т. Мелех, Э.З. Яркинд, Н.Ф. Картенко, В.И. Бахарев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 9 ноября 2000 г. Принята к печати 15 ноября 2000 г.)

Представлена методика получения стекол $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ различного структурного совершенства. Получены данные об основных параметрах материала: показателе преломления, коэффициенте оптического поглощения, плотности, теплопроводности и теплоемкости. В широком интервале температур и частот исследованы электрические, акустические и акустооптические свойства, а также дисперсия оптического поглощения полученных сплавов. Проведен сравнительный анализ свойств термообработанных образцов с различными режимами закалки. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых явлений. Показано, что синтезированный сплав является весьма перспективным для изготовления высокоэффективных акустооптических устройств широкого применения. Разработан и испытан высокоэффективный акустооптический модулятор, работающий в широком диапазоне длин волн $\lambda = 1.87\text{--}10.6$ мкм.

1. Введение

Одной из наиболее актуальных проблем физики твердого тела является исследование физических свойств объектов с различной степенью порядка. Важное место в ряду таких объектов занимают аморфные материалы различной физической природы, которые могут содержать нано- и даже микрокристаллические включения. Возникновение таких включений представляет большой интерес, так как может существенно повлиять на многие физические свойства материала. В первую очередь это относится к аморфным материалам, в которых при фазовом переходе "стекло-кристалл" возникает изменение структуры ближнего порядка. Ярким примером такого рода аморфных материалов являются стекла, образующиеся в эвтектической области двойных и тройных систем на основе теллура с элементами III и IV групп. До настоящего момента в литературе наибольшее внимание уделялось изучению собственно процесса стеклообразования в эвтектических областях таких систем [1], а также определению физико-химических параметров полученных стекол [2]. Исследование же физических свойств таких объектов проводилось фрагментарно. В основном это касается некоторых оптических и электрических свойств теллуридных стекол [3]. Проблема, связанная с возникновением в таких материалах системы нанокристаллитов, влияние которых на основные свойства может быть существенно, практически не затрагивалась.

Изучение физических свойств теллуридных стекол имеет весьма важное значение и в связи с открывшимися перспективами их применения в акустооптике, так как первые же наши измерения [4] показали, что $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ на длине волны света $\lambda = 10.6$ мкм обладает рекордно высокой акустооптической эффективностью брэгговской

дифракции. Однако в области оптической прозрачности при $\lambda = 10.6$ мкм сплав $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ заметно проигрывает монокристаллическому Ge — одному из наиболее эффективных и широко используемых акустооптических материалов в инфракрасной области спектра. Поэтому актуальной представляется задача широкого изучения физических свойств теллуридных стекол, в частности выяснения механизма столь высокого оптического поглощения и поиска методов снижения его величины.

В данной работе для решения поставленных задач нами разработаны методы получения стекол системы Si-Te с различной степенью их структурного совершенства. Проведены комплексные исследования физических свойств полученного материала.

2. Методика эксперимента

Синтез стекол $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ проводился в ампулах различных конфигураций:

- 1) с уплощенным концом, толщиной ~ 1 мм,
- 2) цилиндрических, с диаметрами 10–50 мм,
- 3) конусных, с диаметрами 0.5–20 мм.

Закалка расплава производилась в ледяной воде или на воздухе. Для приготовления слитков использовались, как правило, материалы марки "осч", исходные навески весом 2–300 г.

Структурный контроль образцов осуществлялся посредством рентгенографических исследований. При этом решались следующие задачи:

- 1) выявление наличия кристаллизации образцов;
- 2) определение фазового состава кристаллических образований;
- 3) оценка размера кристаллитов основной кристаллической фазы.

Для этого использовалась дифрактометрическая методика анализа поликристаллических материалов и фотографический метод съемки на плоскую пленку с фокуси-

[¶] E-mail: L.Kulakova@shuvpop.ioffe.rssi.ru
Факс: (812)515-67-47
Тел.: (812)515-92-05

ровкой рефлексов в различных интервалах углов Брэгга. Дифрактометрические данные получены на аппарате ДРОН-2 (CuK_α -излучение), для съемок фотометодом использовалась камера РКСО (CuK - и MoK -излучения) с расстояниями образцов–пленка 40 мм и 70 мм. Учитывая ограниченную толщину слоя $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, анализируемую рентгеновским излучением, для получения более объективной картины рентгенограммы снимались в разных точках поверхности образцов.

Для акустических, оптических и акустооптических измерений образцы размером $4 \times 4 \times 6 \text{ мм}^3$ приготавливались посредством охлаждаемой резки с последующей тонкой шлифовкой и оптической полировкой.

В акустооптических измерениях использовалось явление брэгговской дифракции света на акустической волне. Для измерений акустооптической добротности M_2 использовался метод Диксона [5], в котором с целью исключения влияния оптического поглощения на результаты измерялась интенсивность не только дифрагированного I_1 , но и прямо прошедшего света I_0 . Источниками света служили He–Ne- и CO_2 -газовые лазеры ($\lambda = 3.39$ и 10.6 мкм), а также полупроводниковые лазеры ($\lambda = 1.87$ и 3.3 мкм). Абсолютные измерения проводились при $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$. В качестве эталона использовались монокристаллы Ge. Значения M_2 в других точках спектра получены из соотношения эффективностей дифракции света I_1/I_0 на звуковой волне при неизменной интенсивности звука.

Значения коэффициентов оптического поглощения α в различных областях спектра получены вычислением из данных об оптическом пропускании, полученных как на приборе УР-20, так и непосредственными измерениями пропускания соответствующего лазерного излучения.

Измерения поглощения звука проводились двумя методами. Высокочастотные данные (частота звуковой волны $f = 90\text{--}700 \text{ МГц}$) получены акустооптическим методом ($\lambda = 3.39 \text{ мкм}$), низкочастотные ($f = 14\text{--}150 \text{ МГц}$) — импульсным эхо-методом. Звук возбуждался резонансными пьезопреобразователями из ниобата лития или пьезокерамики, приклеиваемыми к соответствующей грани образца посредством клея "Нонад Стопскав". Использовались как основная частота преобразователя ($f = 30 \text{ МГц}$ — для ниобата лития и 14 МГц — для пьезокерамики), так и его высшие гармоники. Погрешность измерения поглощения не превышала 5%.

Данные о скорости звука получены методом совмещения СВЧ заполнения последовательных эхо-импульсов [6]. Точность абсолютных измерений при этом была около 2%, относительных — 0.01%.

Измерения температурных зависимостей электропроводности σ и акустических свойств проводились в парах жидкого азота, либо жидкого гелия с использованием "холодного пальца". Акустооптические измерения температурных зависимостей поглощения звука проводились в откачиваемом оптическом криостате с "холодным пальцем".

3. Результаты исследований и их обсуждение

Полученные нами образцы синтезированного сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, формой в виде пластинок толщиной 0.8–1 мм или слитков диаметрами 10–50 мм, весом от 2 до 300 г соответственно, имели раковистый излом и не содержали видимых под микроскопом кристаллических включений.

3.1. Рентгеноструктурный анализ

В процессе рентгеновских исследований фокусировка и длительные экспозиции позволили надежно и наглядно установить, что в результате различных режимов охлаждения сплава структура его претерпевает изменения: охлаждение в ледяной воде дает аморфную структуру, а при охлаждении на воздухе в сетке стекла возникает система нанокристаллитов Te. Рентгенограммы не фиксируют никакой преимущественной ориентации кристаллитов, но полировка поверхности приводит к слабой текстуре. Размер кристаллитов оценен по рефлексу (101) теллура, записанному на CuK_α -излучении, и равен $(110 \pm 20) \text{ \AA}$.

Таблица 1. Основные параметры сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ при $T = 300 \text{ К}$

v_l , 10^5 см/с	v_t , 10^5 см/с	ρ , г/см^3	α , $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$	C_p , $\text{кал}/\text{г} \cdot \text{К}$	n ($\lambda = 10.6 \text{ мкм}$)
2.03	1.16	5.03	$1.14 \cdot 10^{-3}$	0.225	3.3

Примечание. v_l , v_t — скорости продольного и поперечного звука.

Измеренные нами основные параметры полученного сплава приведены в табл. 1. Значения показателя преломления n вычислены по измеренной величине угла Брюстера при $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$.

3.2. Электрические свойства

Исследование температурных зависимостей электропроводности на постоянном токе в диапазоне температур 90–400 К в стеклах $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, подвергнутых резкой закалке (образцы в форме пластинок), показало, что циклическая термообработка (ЦТ) до температуры $T \leq T_g$ (T_g — температура стеклования) приводит к появлению дефектов в сетке стекла. Так, если до термообработки в зависимости электропроводности σ от $1/T$ наблюдалось лишь два участка с разным наклоном, то ЦТ приводит к появлению третьего — низкотемпературного участка $\ln \sigma \propto (1/T)^{1/4}$ с энергией активации 0.07 эВ. Этот участок соответствует (в рамках модели Мотта) прыжковой проводимости по дефектам, энергетически близким к уровню Ферми. Вид соответствующих зависимостей представлен на рис. 1 для объемных образцов, как полученных в результате закалки в ледяной воде (кривая 1, слиток $\varnothing \approx 10 \text{ мм}$), так и на воздухе (кривая 2, слиток $\varnothing \approx 30 \text{ мм}$, кривая 3, $\varnothing \approx 10 \text{ мм}$). На первый взгляд,

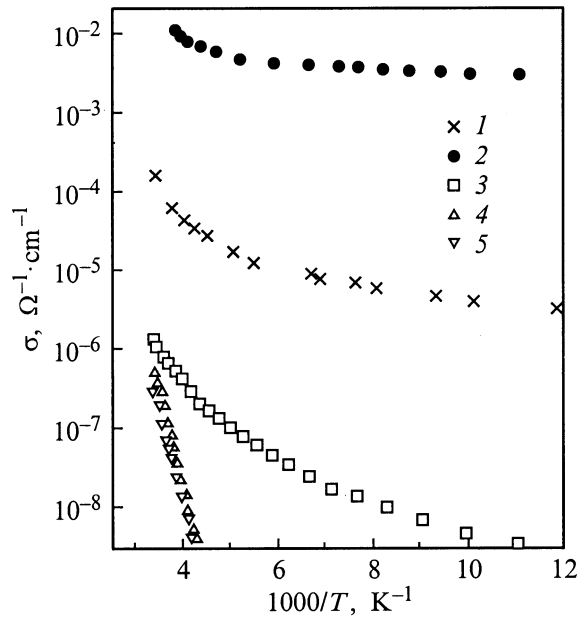


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности образцов сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$, закаленных: 1, 4 — в ледяной воде; 2, 3, 5 — на воздухе. Обработка поверхности: 1–3 — до травления; 4, 5 — после травления.

казалось бы, следовало ожидать соответствующего изменения электропроводности с температурой и в объемных образцах. А именно, наиболее крутой температурный ход зависимости $\sigma(1/T)$ — в аморфном образце, и более пологий, с большей величиной электропроводности — в образце, содержащем нанокристаллиты. Однако предварительные измерения σ не обнаружили подобной корреляции, более того, — в образцах с нанокристаллитами наблюдались как большие, так и меньшие значения электропроводности, чем в аморфных образцах. Анализ причин такого поведения σ показал, что оно является следствием возникновения дефектов в приповерхностном слое в процессе механической обработки образцов. После обработки образцов в полирующем химическом травителе были получены воспроизводимые данные, представленные на рис. 1 (кривые 4,5). Электропроводность в этих образцах отличается незначительно, а энергия активации оказывается равной $E_g \approx 0.45$ эВ.

3.3. Оптические свойства

Исследование оптической прозрачности показало, что она слабо изменяется в рамках каждой серии образцов — как аморфных, так и с нанокристаллитами. Некоторые усредненные дисперсионные зависимости коэффициентов поглощения, полученные из данных о пропускании в приближении неизменности величины показателя преломления во всем диапазоне λ , представлены на рис. 2. Из полученных данных можно сделать ряд выводов.

Во-первых, в образцах с нанокристаллитами оптическое поглощение значительно меньше, чем в аморфных,

и величина его приближается к значению оптического поглощения в монокристаллическом Ge (см. табл. 2). Вызвана ли наблюдаемая картина различными механизмами оптического поглощения или является следствием наличия в аморфном материале относительно крупномасштабных дефектов, обусловленных резкой закалкой, вызывающих рассеяние света и приводящих к уменьшению оптического пропускания, предстоит еще выяснить.

Во-вторых, наблюдается существенный рост дополнительного пика поглощения в области $\lambda \approx 5$ мкм, который, очевидно, следует объяснить появлением нанокристаллитов Te. Природа механизма такого поглощения нуждается в дальнейших исследованиях.

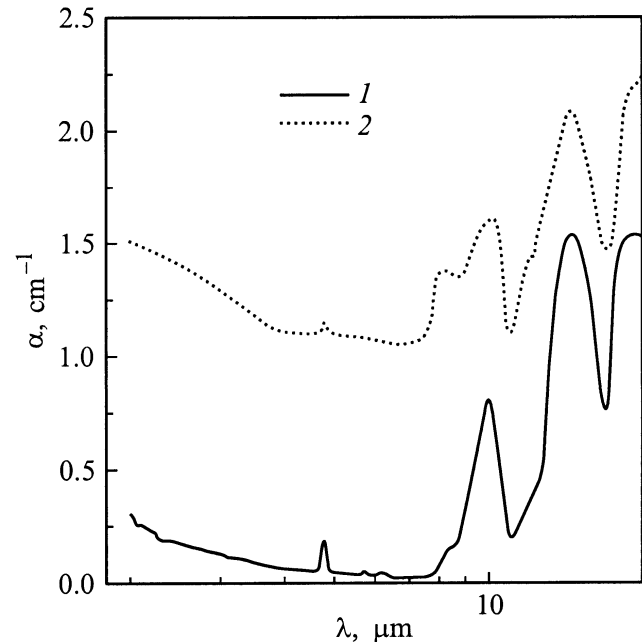


Рис. 2. Дисперсия коэффициента оптического поглощения. Образцы: 1 — с нанокристаллитами, 2 — аморфные.

В-третьих, край оптического поглощения в образцах с нанокристаллитами смещается в более коротковолновую область.

3.4. Акустические свойства

С целью исследования влияния наблюдаемых структурных изменений на упругие свойства нами измерены температурные и частотные зависимости коэффициента поглощения звука α_{ac} , величина и температурные зависимости скорости звука ν , а также нелинейные упругие параметры исследуемого сплава.

Во всех исследованных образцах обращает на себя внимание (рис. 3) большая, практически не зависящая от структуры, величина поглощения звука. Частотная зависимость α_{ac} для всех образцов имеет линейный характер. При этом, как показали температурные измерения, значение коэффициента поглощения в широком интервале температур (30–300 К) не зависит от T .

Таблица 2. Акустооптические параметры сплава Si–Te и других материалов в инфракрасной области спектра при $T = 300$ К

Материал	Область прозрачности, мкм	α , см^{-1}	α_{ac} , дБ/см ($f = 100$ МГц)	λ , мкм	Поляризация света	$(M_2)'$
Сплав $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$	1.7–13	0.75	8	10.6		3500
				3.39		3200
				1.87		2800
Ge	2–20	0.06	0.3	10.6		540*
As_2Se_3	0.9–11			1.15		700**
α -Se	1–20			1.15	\perp	776***
				10.6	\perp	692***

Примечание. $(M_2)' = M_2/M_2''$, где $(M_2)'' = 1.56 \cdot 10^{-18} \text{ c}^3/\text{г} = M_2$ — для кварцевого стекла. Поляризация света указана относительно направления распространения звука. Данные из других публикаций: * — [7], ** — [8,9], *** — [10].

Анализ возможных механизмов поглощения, их количественного и качественного соответствия нашим данным, подробно изложенный в работе [11], показал, что все наблюдаемые особенности не могут быть объяснены типичным (для кристаллов в этой области частот) ахизеровским механизмом, отражающим взаимодействие звука с тепловыми фононами. Нами показано, что наблюдаемое в исследуемых стеклах акустическое поглощение, которое имеет линейную (отличную от квадратичной — ахизеровской) частотную зависимость (рис. 3), не зависит от температуры и на 2–3 порядка больше поглощения, обусловленного ангармонизмом фононной системы, является следствием специфического строения стекол, обладающего системой дефектов с широким распределением времен релаксации, близким к равномерному. В этой роли может выступать система дефектов,

описываемая двухъямным потенциалом с широким распределением времен термоактивационной релаксации, обусловленным широким распределением высот энергетических барьеров ($\Delta V = V_{\text{max}} - V_{\text{min}} \gtrsim 0.25 \text{ эВ}$). Выяснение природы и конфигурация этих дефектов — задача дальнейших исследований.

Измерения скорости звука с целью исследования влияния системы нанокристаллитов Te на упругие свойства исследуемых стекол показали, что и величина, и температурные зависимости скорости (рис. 4) во всех исследованных образцах одинаковы с точностью до 1%. Этот результат дает основание сделать вывод о том, что влияние нанокристаллитов на линейные упругие свойства является несущественным. Анализ, проведенный в работе [12], показал, что следствием широкого распределения системы дефектов, определяющих поглощение звука, является то, что вклад таких дефектов в изменение скорости звука с температурой оказывается также несущественным. Расчет ангармонического вклада, обусловленного взаимодействием звуковой волны с тепловыми фононами, показал [11] (рис. 4, кривая 3), что именно таким взаимодействием определяются наблюдаемые температурные зависимости скорости звука, если принять значение усредненной константы Грюнайзена $\bar{\gamma} = 1.45$.

Интересными в этом плане представляются результаты, полученные нами при исследовании нелинейных упругих свойств. Анализ пространственного развития спектра акустического потока (рис. 5), проведенный в работе [11], показал, что в нанокристаллических образцах нелинейный упругий коэффициент Γ , определяемый скоростью нарастания второй гармоники, имеет аномально большую величину $\Gamma \approx 30$, в то время как в аморфных образцах $\Gamma \approx 2.77$. Учитывая, что по величине нелинейного упругого коэффициента можно определить константу Грюнайзена соответствующей фононной моды $\gamma_l = \Gamma/2$ [13], получаем $\gamma_l^{(n)} = 15$ для нанокристаллических и $\gamma_l^{(a)} = 1.39$ для аморфных образцов. Сравнивая эти значения γ_l с приведенным выше значением $\bar{\gamma}$, полученным из данных по зависимости $v(T)$, можно сказать, что величина $\gamma_l^{(a)} \approx \bar{\gamma} \approx 1.4$ действительно является

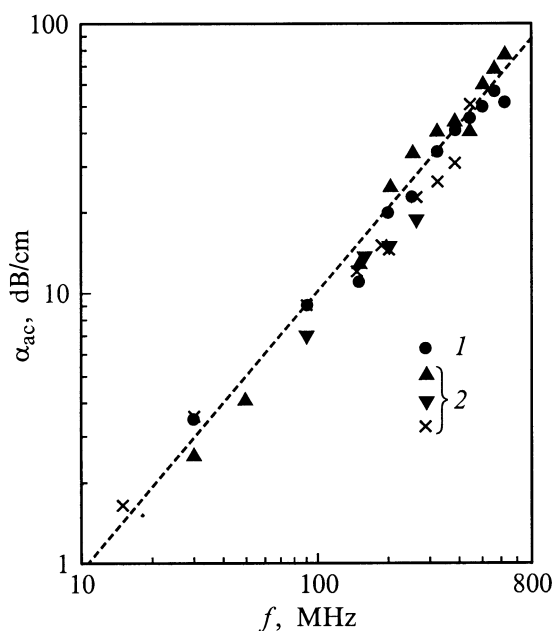


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения звука. Образцы: 1 — аморфные, 2 — с нанокристаллитами. Штриховая прямая: $\alpha_{\text{ac}} \propto f$.

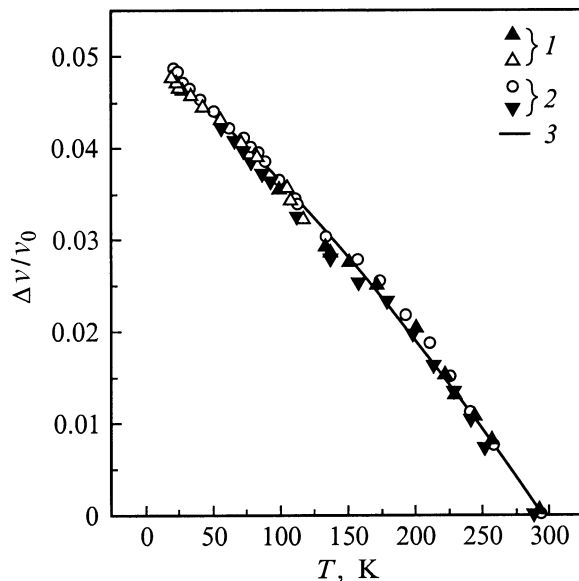


Рис. 4. Температурная зависимость скорости звука v . Образцы: 1 — аморфные, 2 — с нанокристаллитами, 3 — расчетная зависимость вклада фоновых мод.

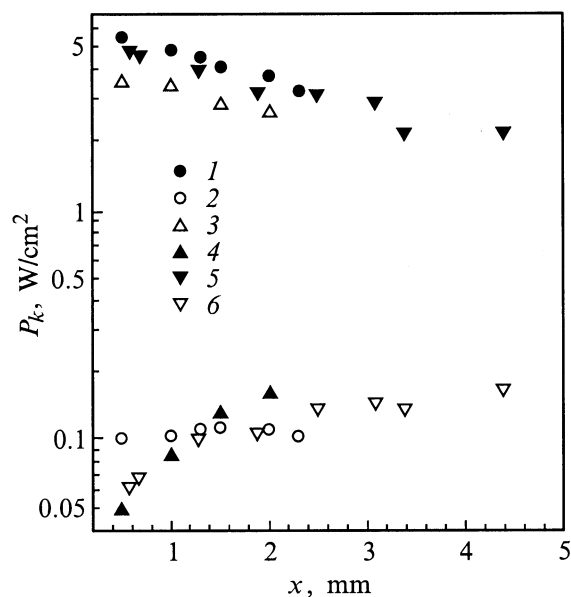


Рис. 5. Изменение интенсивности компонент основной частоты (P_1) и второй гармоники (P_2) в зависимости от расстояния от входного преобразователя; 1, 3, 5 — P_1 , 2, 4, 6 — P_2 . Образцы: 1, 2 — аморфные, 3–6 — с нанокристаллитами.

характеристикой ангармонизма фоновой системы и не зависит существенным образом от исследуемой нами системы нанокристаллитов.

Большое значение $\gamma_i^{(n)} = 15$, измеренное нами в нанокристаллических образцах, обусловлено, по нашему мнению, ангармонизмом сил связи на границах нанокристаллитов, который и приводит к генерации второй гар-

моники звуковой волны, но вклад его в усредненный параметр Грюнайзена незначителен. Похожие результаты были получены для слоистых кристаллов в работе [14].

3.5. Акустооптические свойства

Известно, что эффективность брэгговской дифракции света на ультразвуковых волнах определяется параметром акустооптической добротности M_2 . В линейном режиме (малые интенсивности звука)

$$I_1 = (1/2)I_0M_2P(\pi d/\lambda \cos \theta)^2, \quad (1)$$

$$(M_2)_{ik} = n_i^6 p_{ik}^2 / (\rho v_k^3), \quad (2)$$

где P — интенсивность звука, λ — длина волны света, d — ширина акустического пучка, θ — угол падения света, n_i — показатель преломления, p_{ik} — компонента фотоупругого тензора, ρ — плотность кристалла, v_k — скорость звуковой волны; $i, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, i — индекс поляризации света, k — индекс деформации в матричном представлении.

Как видно из соотношения (2), наиболее перспективными для создания акустооптических модуляторов являются материалы с большим показателем преломления и малой скоростью звука, что весьма характерно для полученного сплава (см. табл. 1). Действительно, как указано выше, наши измерения [4] показали, что при $\lambda = 10.6$ мкм соединение $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ обладает рекордно высокой акустооптической эффективностью брэгговской дифракции (табл. 2). Но в величине оптической прозрачности в этой области спектра полученное нами соединение существенно проигрывало монокристаллическому Ge (см. табл. 2), который широко используется

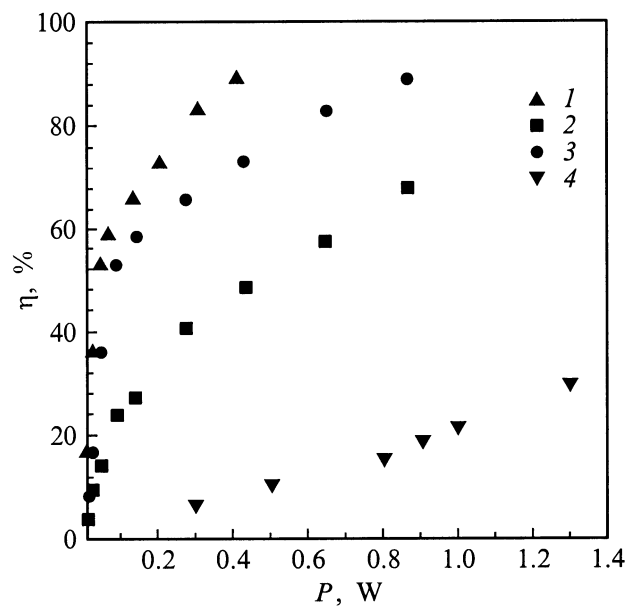


Рис. 6. Зависимость глубины модуляции от акустической мощности в различных областях ИК спектра, λ , мкм: 1 — 1.87, 2 — 3.3, 3 — 3.39, 4 — 10.6.

в различного рода практических устройствах. Поэтому актуальной представлялась задача, с одной стороны, определения фотоупругих свойств и оптической прозрачности материала в другой области ИК спектра, а с другой — выявления механизма столь высокого оптического поглощения в исследуемых стеклах и поиска методов снижения его величины.

С целью изучения фотоупругих свойств исследуемых стекол нами были измерены параметры акустооптической добротности в широком интервале ИК диапазона ($\lambda = 1.87, 3.3, 3.39$ и 10.6 мкм). Эти измерения показали, что стекла $Si_{20}Te_{80}$ обладают рекордно высокой акустооптической эффективностью во всем исследованном диапазоне длин волн (рис. 6, табл. 2) и являются прекрасным материалом для создания акустооптической ячейки.

Следует отдельно отметить, что появление нанокристаллитов в сетке стекла не сказывается заметным образом на величине M_2 .

4. Акустооптический модулятор

На основании проведенных исследований нами был разработан и испытан высокоэффективный акустооптический модулятор, работающий в диапазоне длин волн $\lambda = 1.87-10.6$ мкм.

Модулятор состоит из акустооптической ячейки размером $\sim 5 \times 5 \times 5$ мм³, резонансного пьезоэлектрического преобразователя (40–150 МГц), приклеиваемого к торцу ячейки (апертура звукового луча ~ 2.5 мм), и высокочастотного генератора. Как уже упоминалось выше, в качестве источников света использовались как газовые, так и полупроводниковые лазеры:

а) газовые лазеры: $\lambda = 10.6$ мкм (CO_2) и $\lambda = 3.39$ мкм (He–Ne) мощностью ~ 5 Вт и 100 мВт соответственно; б) диодный лазер: $\lambda = 3.3$ мкм, охлаждаемый жидким азотом на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InGaAsSb ($\lambda = 3.3$ мкм, мощностью ~ 40 мВт в импульсе при $I = 6$ А, $\tau = 5$ мкс, $f = 500$ Гц). Излучение отводилось с помощью оптического волокна на основе As_2S_3 ; в) диодный лазер: $\lambda = 1.87$ мкм, работающий при комнатной температуре на основе двойной гетероструктуры GaInAsSb/GaAlAsSb, выращенной на подложке GaSb, (мощность ~ 1 мВт в импульсе при $\tau \approx 1$ мкс, $f = 50$ Гц).

Для каждой из областей ИК диапазона применялся соответствующий фотоприемник: а) $\lambda = 1.87$ мкм — быстродействующий $p-i-n$ -фотодиод; б) $\lambda = 3.3$ мкм, 3.39 мкм — охлаждаемый жидким азотом InSb-фотодиод; в) $\lambda = 10.6$ мкм — охлаждаемый жидким азотом HgTeCdTe-фотодиод.

Из прямых измерений и из наших оценок получено значение коэффициента акустооптической эффективности $M_2 = 5.46 \cdot 10^{-15}$ с³/г ($\lambda = 10.6$ мкм) (см. табл. 2), которое в 7–8 раз превышает величину M_2 для широко используемых в ИК акустооптике монокристаллов Ge.

Исследование модулятора показало, что в более коротковолновой области ИК диапазона ($\lambda = 1.87$ мкм, $\lambda = 3.3$ мкм) M_2 слегка уменьшается (на 10–30%). Однако, благодаря увеличению эффективности дифракции как $1/\lambda^2$ при переходе в соответствующую область, возможно достижение глубины модуляции 90% уже при акустической мощности 0.5 Вт (см. рис. 6).

Изменение времени задержки модулирующего звукового импульса создает возможность выделения из светового импульса требуемого участка. Это важно при больших рабочих токах полупроводникового лазера, когда за время импульса происходит изменение длины волны излучения за счет токового разогрева лазера. Дополнительная модуляция с помощью акустооптического модулятора позволяет выделить короткий сигнал "монокроматического" излучения с нужной длиной волны в пределах, определяемых импульсным разогревом лазера.

Благодаря большой акустооптической эффективности и достаточно высокому быстродействию (~ 0.3 мкс) модулятор может быть использован как для отклонения и модуляции непрерывного излучения, так и в диодной лазерной спектроскопии для селекции мод.

5. Заключение

Таким образом, в работе установлено, что в результате различных режимов охлаждения сплава структура его претерпевает изменения: охлаждение в ледяной воде дает аморфную структуру, а при охлаждении на воздухе в сетке стекла возникает система нанокристаллитов Te размером, как правило, около 100 Å.

Исследования электрических свойств показали, что такая система кристаллитов не является причиной изменения электропроводности в результате термоциклирования в тонких образцах. В объемных образцах также нет прямой корреляции температурной зависимости электропроводности с изменениями структуры из-за различных режимов закалки. Выяснение механизма наблюдаемых изменений электропроводности является предметом дальнейших исследований.

Возникновение нанокристаллитов не приводит к заметному ухудшению акустооптической эффективности, а также к изменению поглощения и скорости звука. На основании анализа данных о температурных и частотных зависимостях поглощения и скорости звука показано, что усредненная константа Грюнайзера, характеризующая ангармонизм фононной системы сетки стекла, имеет величину $\bar{\gamma} \approx 1.4$ и не зависит существенным образом от исследуемой нами системы нанокристаллитов.

Наличие кристаллитов существенным образом проявляется в изменении нелинейных упругих свойств. Проведенные исследования выявили наличие аномально большого ангармонизма сил связи ($\gamma_l^{(n)} \approx 15$) на границах с нанокристаллитами, что помимо фундаментального значения для понимания характера соответствующих сил связи, имеет прикладное значение. Возможность регистрации генерации высших гармоник ультразвуковой

волны, возникающей вследствие вышеупомянутого большего ангармонизма сил связи, может служить методом диагностики наличия в сетке сплава системы нано- и микрокристаллитов.

В результате исследования оптических свойств сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ нами обнаружено существенное увеличение его оптической прозрачности в образцах, охлажденных на воздухе и включающих в себя систему нанокристаллитов. Этот результат следует особенно подчеркнуть, поскольку он определяет метод получения сплава, сравнимого по этому параметру с лучшими оптическими ИК материалами, такими как монокристаллический Ge. Последнее обстоятельство становится особенно значимым при создании акустооптических модуляторов, если учесть обнаруженную нами в исследуемом сплаве рекордно высокую акустооптическую эффективность.

Исследование комплекса свойств полученного сплава $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ дало возможность создать на его основе высокоэффективный акустооптический модулятор, позволяющий управлять оптическим ИК излучением в широком диапазоне длин волн (отклонение, модуляция, селекция лазерных мод).

Авторы благодарны В.Х. Кудояровой за помощь в проведении измерений оптического пропускания исследуемых стекол, А.Б. Матвееву за предоставление диодного лазера ($\lambda = 3.3$ мкм) для проведения измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-02-18305).

Список литературы

- [1] П.П. Серегин, Э.Ю. Тураев, А.А. Андреев, Б.Т. Мелех. *Физика и химия стекла*, **5** (3), 375 (1979).
- [2] М.С. Аблова, А.А. Андреев, Б.Т. Мелех, З.В. Маслова, Р.М. Индрисова, Т.Б. Жукова. *Физика и химия стекла*, **14** (3), 413 (1988).
- [3] Б.Т. Мелех, М.С. Аблова, И.Б. Берман, Т.Б. Жукова, З.В. Маслова. *Матер. конф. "Некристаллические полупроводники-89"* (Ужгород, Украина, 1989) т. 1, с. 136.
- [4] Ю.В. Илисавский, Л.А. Кулакова, Б.Т. Мелех, Э.З. Яхкинд. *Акуст. журн.*, **40** (2), 307 (1994).
- [5] R.W. Dixon. *IEEE J. Trans.*, **QE-3** (2), 85 (1967).
- [6] E.J. Papadakis. *J. Ac. Soc. Amer.*, **42** (5), 1045 (1967).
- [7] D.A. Pinnow. *IEEE J. Trans.*, **QE-6**, 223 (1970).
- [8] Y. Ohmachi, N. Uchida. *Appl. Phys.*, **43** (4), 1709 (1972).
- [9] Ю.К. Ребрин. *Управление оптическим лучом в пространстве* (М., Сов. радио, 1977).
- [10] S. Fukuda, T. Shiosaki, A. Kawabata. *Jap. J. Appl. Phys.*, **19** (11), 2075 (1980).
- [11] Л.А. Кулакова. *Физика и химия стекла*, **26** (6), 839 (2000).
- [12] Ю.В. Илисавский, Л.А. Кулакова, В.В. Тихонов. *ФТТ*, **31** (8), 153 (1989).
- [13] У. Мэзон. *Физическая акустика* (М., Мир, 1968) т. 3, ч. Б, с. 313.
- [14] Л.А. Кулакова. *ФТТ*, **42** (1), 51 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Physical properties of the $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ alloy of different structural perfection and its application for acoustooptic devices

L.A. Kulakova, B.T. Melekh, E.Z. Yakhkind, N.F. Kartenko, V.I. Baharev, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ glasses of various structural perfection fabrication techniques are presented. The data on the basic parameters of the material are obtained: the refraction parameter, the coefficient of optical absorption, density, the thermoconductivity and the heatcapacity. Electrical, acoustic and acoustooptic properties and also optical absorption dispersion of the alloys obtained are investigated in a wide range of temperatures and frequencies. The comparative analysis of the properties of thermocircled and hardened in different way samples has been carried out. The feasible mechanisms of the phenomena are discussed. It is shown, that the alloys are very promising in fabrication of different effective acoustooptic devices. The modulator based on the $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ acoustooptic cell and operating in the 1.87–10.6 μm light wavelength range has been manufactured and tested.