

Д. ф.-м. н. Д. И. БЛЕЦКАН, В. В. ВАКУЛЬЧАК, к. ф.-м. н. В. И. ФЕДЕЛЕШ

Украина, Ужгородский национальный университет

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ И АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ИХ ОСНОВЕ

Проведены комплексные исследования акустических и акустооптических свойств стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Определены их основные параметры, такие как показатель преломления, плотность, скорости продольной и поперечной ультразвуковых волн, упругооптические коэффициенты, коэффициенты акустооптического качества. Показана возможность использования стеклообразных сульфидов германия $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ в качестве материала светозвукопровода акустооптического модулятора и приведены его основные параметры. В режиме дифракции Брегга модулятор на длине волны 0,633 нм He–Ne-лазера характеризуется следующими параметрами: рабочая частота ультразвука 80 МГц, максимальная полоса модулирующих частот 10 МГц, дифракционная эффективность 40%, быстродействие около 80 нс.

Ключевые слова: халькогенидные стекла, коэффициент акустооптического качества, акустооптический модулятор.

Дифракция света на упругих волнах широко применяется в различных акустооптических устройствах, предназначенных для модуляции и пространственного управления лазерным излучением. При создании акустических модуляторов и дефлекторов решающим фактором является выбор материала светозвукопровода, обладающего определенным набором свойств, от которых зависят качество и эффективность работы таких устройств. Количественную оценку потенциальных возможностей акустооптических (АО) материалов проводят с учетом требований, предъявляемых к техническим характеристикам модулятора, а именно [1, 2]:

- большое значение коэффициента акустооптического качества материала светозвукопровода, определяющего АО-мощность, требуемую для получения необходимой эффективности дифракции;

- высокая скорость ультразвука в среде звукопровода;

- малое поглощение акустических волн в материале светозвукопровода, позволяющее сохранить форму аппаратной функции устройства без заметных искажений;

- высокое оптическое качество материала светозвукопровода, прежде всего оптическая однородность, обеспечивающая желаемое пространственно-частотное разрешение модулятора;

- достаточно большой коэффициент электромеханической связи материала пьезопреобразователя, обеспечивающий возможность получения широкой полосы пропускания модулятора при эффективном электрическом согласовании его входа;

- доступность материала и его стабильность в технологическом, конструктивном и эксплуатационном отношениях.

Наряду с кристаллами [2–4], перспективными материалами для создания акустооптических модуляторов и дефлекторов являются халькогенидные стеклообразные полупроводники [5–9], отличающиеся дешевизной, простотой изготовления и возможностью получения образцов необходимых форм и размеров. Кроме того, стекла обладают изотропными физическими характеристиками, которые можно изменять в широких пределах путем варьирования их химического состава.

Использование халькогенидных стекол в современных акустооптических устройствах, способных работать в видимом диапазоне (0,4–0,7 мкм), сдерживается тем обстоятельством, что стекла подавляющего большинства составов прозрачны в красной, ближней и средней ИК-областях спектра, т. е. акустооптические приборы на их основе способны работать только на длине волны 1,06 и 10,6 мкм. На сегодняшний день наиболее широко используемым материалом для создания акустооптических устройств видимого диапазона являются кристаллы парателлурита (TeO_2), прозрачные в спектральном диапазоне 0,35–5 мкм и обладающие высоким значением коэффициента акустооптического качества [10]. Одним из главных недостатков акустооптических приборов, созданных на базе парателлурита, является их высокая стоимость, обусловленная большими затратами на выращивание объемных кристаллов. Кроме того, кристаллы TeO_2 обладают сильной анизотропией оптических и акусти-

ческих свойств, что усложняет процесс изготовления акустооптических ячеек, и также отражается на себестоимости АО-устройств.

Особый интерес представляет разработка акустооптических материалов на базе оксидных и халькогенидных стекол, прозрачных в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, обладающих высоким коэффициентом акустооптического качества и значительно меньшей, чем кристаллы парателлурита, себестоимостью. К числу таких перспективных материалов, прозрачных в видимой области, относятся стеклообразные сульфиды германия $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, стехиометрический состав которых GeS_2 является наиболее широкозонным ($E_g=3,07$ эВ) [11].

В настоящей работе представлены результаты исследования акустических и акустооптических свойств бинарных халькогенидных стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ и основных параметров акустооптического модулятора, созданного на их основе.

Методика эксперимента

Важным условием для практического использования халькогенидных стекол в качестве светозвукопровода АО-устройства является их оптическая однородность, зависящая, прежде всего, от технологии получения и химической однородности, а также от отсутствия ликвационных явлений в стеклах.

Исследуемые образцы представляли собой гомогенные, рентгеноаморфные, визуально прозрачные стекла $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ ($17 \leq x \leq 36$), синтезированные из элементарных компонентов высокой степени чистоты в вакуумированных кварцевых ампулах. На процессы стеклообразования существенно влияет химическое разупорядочение в расплаве. Максимальная скорость охлаждения, необходимая при стеклообразовании образцов, богатых германием, достигает 17 К/с. При незначительном отклонении от стехиометрического состава GeS_2 в сторону избытка серы ($\text{GeS}_{2,01}$) скорость охлаждения понижается до 3 К/с [12]. Способность к стеклообразованию в системе «Ge — S» максимальна для составов, близких к эвтектике [13].

В процессе синтеза стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ очень важно предотвратить попадание кислорода. Для синтеза стекол использовали чистую дегазированную порошкообразную серу и кристаллический германий, а условия синтеза подбирали таким образом, чтобы образующиеся в результате реакций следы SO_2 , GeO , GeO_2 удалялись вакуумной возгонкой (дистилляцией) или откачкой в вакууме. Присутствие оксидов в расплавах системы $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ является нежелательным ввиду того, что даже весьма малые их количества способствуют кристаллизации расплавов в этой системе при охлаждении, являясь центрами кристаллизации. Кроме того, данные примеси обуславливают появление в стекле пузырей и свилей, а также примесных полос погло-

щения, значительно снижающих оптические характеристики стекол. Плотность стекол измеряли гидростатическим взвешиванием в толуоле, а показатель преломления — эллипсометрическим методом [14].

Акустические и акустооптические измерения выполнены на однородных отожженных образцах размером $10 \times 6 \times 6$ мм, вырезанных из объемных слитков с последующей тонкой шлифовкой и оптической полировкой плоскопараллельных торцов и двух боковых граней. Исследования акустооптических свойств проводили на длине волны излучения He—Ne-лазера $0,63$ мкм. Скорость распространения продольных и поперечных ультразвуковых (УЗ) волн определяли акустооптическим методом [15] по измеренному частотному интервалу Δf между соседними максимумами дифракционных картин при возбуждении УЗ-волн в образце. Коэффициент затухания ультразвука определяли методом оптического зондирования.

Для измерения коэффициента акустооптического качества M_2 — основного параметра акустооптического материала — использовали метод Диксона — Коэна [16], позволяющий проводить измерения как на продольных, так и на поперечных акустических волнах. Согласно этому методу, интенсивность дифрагированного света измеряют в эталонном и исследуемом образцах при прохождении через них акустического импульса в прямом (I_1 и I_4) и обратном (после отражения от свободной грани, I_3 и I_5) направлениях, а коэффициент акустооптического качества образца $M_{2\text{обр}}$ рассчитывают по формуле

$$M_{2\text{обр}} = M_{2\text{эт}} \frac{I_4 I_5}{I_1 I_3}. \quad (1)$$

В качестве эталонного образца использовали плавный кварц, коэффициент акустооптического качества $M_{2\text{эт}}$ которого известен.

Акустооптическая ячейка представляет собой светозвукопровод прямоугольной формы из халькогенидного стекла $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, торцевая грань которого приклеена к эталонному образцу из кварца с преобразователем. При создании АО-устройств важную роль играет пьезоэлектрический преобразователь и способ его крепления к акустической среде. В качестве пьезоэлектрического преобразователя была использована монокристаллическая пластина из ниобата лития LiNbO_3 36° Y-среза для возбуждения продольных звуковых волн и 163° Y-среза для возбуждения поперечных. Источником электрической мощности служил генератор Г4-44. При низких рабочих частотах (менее 120 МГц) для крепления преобразователя к исследуемому образцу используют эпоксидную смолу [2]. Ее акустический импеданс удалось повысить путем добавок порошкообразных наполнителей из алюминия и вольфрама. Для компенсации емкостной реактивной проводимости преобразователя и согласования его эквивалентного сопротивления с

внутренним сопротивлением генератора использован резонансный контур. Схемы согласования пьезопреобразователя с генератором электрических колебаний приведены в [2, 17].

Исследование стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$

Коэффициент акустооптического качества материала, характеризующий внутреннюю эффективность дифракции независимо от геометрии взаимодействия, вычисляется по формуле [18]

$$M_2 = n^6 p_{ij}^2 / (\rho v^3), \quad (2)$$

где n — показатель преломления;

p_{ij} — упругооптическая константа;

ρ — плотность;

v — скорость звуковой волны;

i, j — индекс поляризации света и индекс деформации в матричном представлении (в случае стекла $i, j=1, 2, 4$).

Как видно из анализа этого соотношения, наиболее перспективными для создания акустооптических модуляторов являются материалы с большим показателем преломления и малой скоростью звука, что характерно для стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Из приведенных в таблице данных видно, что коэффициент акустооптического качества стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ большинства составов примерно на два порядка больше, чем плавленого кварца. Причиной тому как раз и является тот факт, что в стеклах больший показатель преломления сочетается с меньшей скоро-

стью УЗ-волн, по сравнению с этими же параметрами плавленого кварца.

По измеренным значениям коэффициента акустооптического качества M_2 для двух различных направлений вектора поляризации $\mathbf{E}$ световой волны — параллельно ($M_{2\parallel}$) и перпендикулярно ($M_{2\perp}$) направлению распространения ультразвука — определены упругооптические коэффициенты p_{11} и p_{12} , значения которых приведены в **таблице**.

В акустооптических устройствах требуется не просто наличие определенной эффективности дифракции, а необходимо ее обеспечить в некоторой полосе частот Δf . С учетом этого, эффективность дифракции определяется другим параметром качества, который объединяет в себе основные требования, предъявляемые к свойствам материалов для акустооптических устройств [19]:

$$M_1 = n^7 p^2 / (\rho v). \quad (3)$$

Наконец, существует третье определение коэффициента акустооптического качества, предложенное Диксоном [16]:

$$M_3 = n^7 p^2 / (\rho v^3). \quad (4)$$

Из выражений (2) — (4) следует, что значения M_1 , M_2 и M_3 максимальны у материалов с высоким показателем преломления, большим упругооптическим коэффициентом, малыми значениями плотности и скорости ультразвука.

Акустооптические свойства стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ различного состава и параметры модулятора

Состав	Плавленый кварц [10]	$\text{Ge}_{34}\text{S}_{66}$	$\text{Ge}_{33}\text{S}_{67}$	$\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$	$\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$	$\text{Ge}_{17}\text{S}_{83}$
Область прозрачности, мкм	0,2 — 4,5	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11
λ , мкм	0,633	0,633	0,633	0,633	0,633	0,633
ρ , г/см ³	2,20	2,790	2,750	2,680	2,570	2,390
n	1,457	2,16	2,11	2,14	2,12	2,01
v_L , м/с	5960	2714	2728	2537	2467	2314
v_S , м/с	3760	1774	1516	1441	1362	1278
$M_{1\parallel}$, 10^{-8} м ² ·с/кг	8,05	193	135	167	146	70
$M_{2\parallel}$, 10^{-15} с ³ /кг	1,56	117	88	114	113	65
$M_{3\parallel}$, 10^{-11} м ² ·с/кг	1,35	70	49	64	62	55
p_{11}	0,121	0,260	0,226	0,246	0,226	0,167
p_{12}	0,270	0,257	0,219	0,239	0,220	0,166
p_{44}	−0,075	0,002	0,004	0,004	0,003	0,001
$\alpha_{\text{ак}}$, дБ/см ($f = 100$ МГц)	—	2,41	1,48	2,15	2,32	2,5
τ , нс	—	74	74	79	81	86
Δf_m , МГц	—	10,2	10,2	9,5	9,3	8,7
f_0 , МГц	—	83	84	78	76	71
$\eta \Delta f_m$, 10^3 МГц/Вт	—	6,14	4,54	5,49	5,29	2,71

Важным параметром АО-материала является скорость распространения ультразвуковой волны, знание которой позволяет определить его фотоупругие и акустооптические свойства. Для оценки возможности использования стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ в качестве материала светозвукопровода АО-устройства необходимо кроме скорости ультразвука знать и другие параметры, определяющие коэффициенты акустооптического качества материала M_1 , M_2 , M_3 . В таблице приведены значения плотности, показателя преломления, скоростей распространения продольной (v_L) и поперечной (сдвиговой) (v_S) УЗ-волн, упругооптических коэффициентов, позволившие рассчитать по формулам (3), (4) значения M_1 , M_3 и другие акустооптические параметры стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$.

Наиболее чувствительной к качеству материала светозвукопровода характеристикой является частотная зависимость коэффициента акустического затухания $\alpha_{\text{ак}}$. Результаты измерений затухания продольных УЗ-волн в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, проведенных методом оптического зондирования в частотном диапазоне от 30 до 120 МГц при комнатной температуре, приведены на рис. 1. В этом частотном диапазоне характерно небольшое затухание ультразвука, зависящее от состава стекла. Для стеклообразного GeS_2 и стекол, обогащенных серой, коэффициент акустического затухания возрастает с увеличением частоты и описывается зависимостью $\alpha_{\text{ак}} = \alpha_0 f^m$, где $1 < m < 2$.

Авторы [5], анализируя поведение коэффициента акустического затухания для бинарных и тройных халькогенидных стекол в зависимости от их структуры, пришли к заключению, что наименьшие значения $\alpha_{\text{ак}}$ имеют стекла, структура ближнего порядка которых сформирована тригональными и тетраэдрическими структурными единицами. Структура стехиометрическо-

го стеклообразного GeS_2 сформирована исключительно тетраэдрами $[\text{GeS}_4]$, увязанными в цепочку, и действительно, это стекло имеет наименьшее значение $\alpha_{\text{ак}} = 1,48$ дБ/см. Для сравнения укажем, что для стеклообразного As_2S_3 с тригональной структурой ближнего порядка $\alpha_{\text{ак}} = 4,7$ дБ/см [5], что в три раза больше, чем для стеклообразного дисульфида германия. Нарушение стехиометрии стекол по отношению к стехиометрическому составу GeS_2 в сторону избытка германия сопровождается образованием кроме тетраэдрических $[\text{GeS}_4]$ еще и октаэдрических $[\text{GeS}_6]$ структурных единиц, что приводит к росту $\alpha_{\text{ак}}$. Аналогичное увеличение коэффициента акустического затухания наблюдается также при нарушении стехиометрии в сторону избытка серы, что также связано с изменением структуры стекол. Введение сверхстехиометрической серы приводит к появлению в структурной сетке стекол восьмиатомных серных колец (S_8).

Критерием, определяющим режим работы акустооптического устройства, является безразмерный параметр [20, 21]

$$Q = 2\pi \frac{\lambda L}{\Lambda^2}, \quad (5)$$

где L — длина области взаимодействия света с акустическим пучком. В условиях низких частот при $Q \ll 1$ преобладает режим Рамана — Ната, а при $Q \gg 1$ — брегговской дифракции [21]. Для стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ при длине взаимодействия $L = 6 - 9$ мм и центральной рабочей частоте $f_0 = 80$ МГц значения параметра Q находятся в пределах 2,8 — 3,4. Таким образом, созданные на базе стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ акустооптические устройства работают в режиме, близком к брегговской дифракции.

Акустооптический модулятор

Анализ полученных результатов позволил заключить, что составы стекол $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ и $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ являются оптимальными для изготовления светозвукопроводов.

В продолжение исследований стекол авторами был разработан и испытан АО-модулятор на длину волны He — Ne-лазера $\lambda = 0,633$ мкм, который содержит светозвукопровод, изготовленный из $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ в виде параллелограмма размером $10 \times 6 \times 6$ мм с двумя боковыми гранями оптического качества для ввода и вывода оптического излучения. К одной торцевой грани светозвукопровода прикреплен ультразвуковой излучатель в виде пластины ($5 \times 1,2$ мм) из кристалла ниобата лития 36° Y-среза для возбуждения продольных акустических волн.

Основные характеристики АО-ячейки определяются свойствами среды, в которой происходит взаимодействие света и звука, а также размером области взаимодействия. Одной из важ-

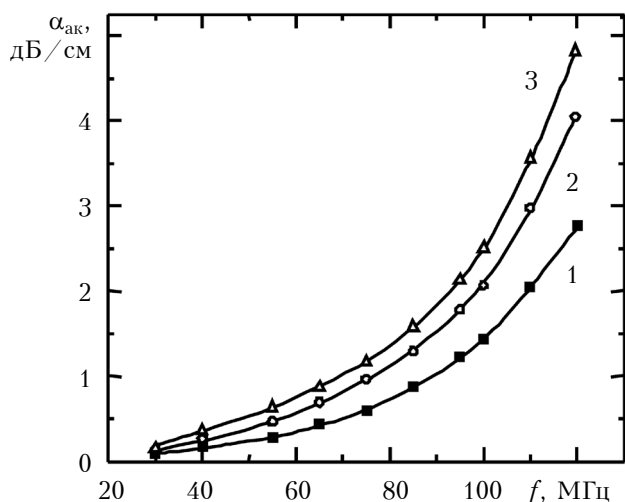


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента акустического затухания стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ различного состава:
1 — $x=33$; 2 — $x=30$; 3 — $x=17$

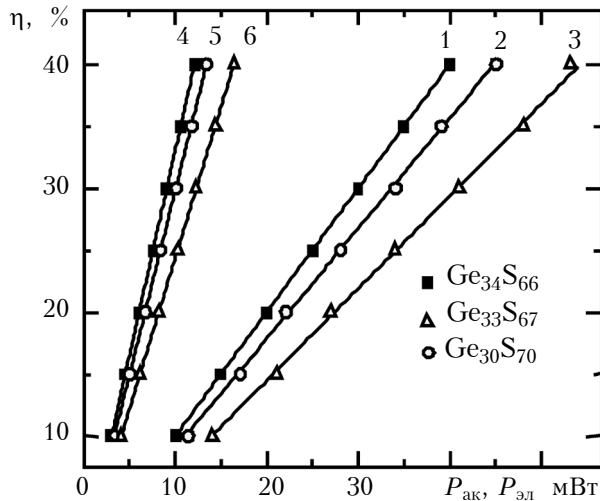


Рис. 2. Зависимость эффективности акустооптической дифракции света на продольной УЗ-волне в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ от мощности управляемого ВЧ электрического (1–3) и акустического (4–6) сигналов

нейших характеристик модулятора является полоса модуляции Δf [10]. Для обеспечения наибольшей полосы модуляции оптического пучка АО-модулятором и достижения высокой контрастности необходимо четко сфокусировать оптический луч в области его взаимодействия с акустической волной, т. е. предельно уменьшить размеры области взаимодействия. При этом наибольшая полоса модуляции получается в том случае, когда перетяжка пучка находится в центре области взаимодействия. Оптимальные размеры светового луча выбирают, исходя из условия $b=b_{\text{опт}}s$, где s — коэффициент запаса; $b_{\text{опт}}=2v/(\pi f_0)$ — радиус перетяжки, при которой прошедший и дифрагированный лучи перекрываются на уровне $1/e^2$ по интенсивности (e — число Эйлера) [23]. Для АО-модулятора с активным элементом из стеклообразного $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ $b_{\text{опт}}=1,1 \cdot 10^{-4}$ м. Ширина H акустопреобразователя выбрана с коэффициентом запаса $s_1=5$: $H=2s_1b_{\text{опт}}=1,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Полоса модулирующих частот на уровне 0,5 от максимальной интенсивности связана с временем τ ($\tau=2b/v$) прохождения фронта акустической волны через падающую световую волну [23]:

$$\Delta f_m = 0,375v/b = 0,75\tau. \quad (8)$$

При разработке АО-модуляторов важное значение имеет произведение эффективности дифракции на полосу модуляции [23]:

$$\eta_1 \Delta f_m \approx 3,43 \cdot 10^{-5} \cdot n v m_2 / (s s_1 \lambda^3), \quad (9)$$

где η_1 — эффективность, отнесенная к 1 Вт СВЧ-мощности. Рассчитанные основные параметры АО-модуляторов на базе стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ приведены в таблице.

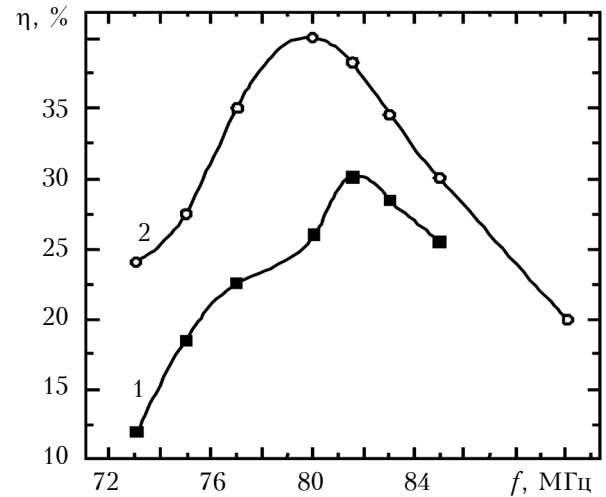


Рис. 3. АЧХ модулятора, измеренная при постоянной мощности $P_{\text{эл}} = 40$ мВт (1) и при условии согласования акустических импедансов материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя (2)

Помимо полосы модуляции Δf , другим важным параметром модулятора является потребляемая электрическая мощность $P_{\text{эл}}$ и управляющая акустическая мощность $P_{\text{ак}}$, определяющие эффективность модуляции. Эффективность акустооптического взаимодействия реализуется при выполнении условия фазового синхронизма и определяется параметром $\eta=I/I_0$ — отношением интенсивности дифрагированного света I к интенсивности I_0 падающего на ячейку монохроматического излучения с длиной волны λ , соответствующей условию Брегга. Эффективность зависит от мощности акустической волны, размеров области акустического взаимодействия, а также от коэффициента акустооптического качества M_2 среды, в которой это взаимодействие происходит.

Зависимость эффективности акустооптической дифракции света на продольной УЗ-волне в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ от мощности высокочастотного электрического сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь АО-ячейки, приведена на рис. 2. Из этого рисунка видно, что в зависимости от состава стекол, для достижения одного и того же значения эффективности дифракции требуется различная электрическая мощность. Так, для стекла состава $\text{Ge}_{34}\text{S}_{66}$ при $P_{\text{эл}}=40$ мВт эффективность дифракции составляет 40%, а для достижения этого же значения η для стекол с большей молярной долей серы требуется большая $P_{\text{эл}}$.

Как видно из приведенной на рис. 3 амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) модулирующего устройства, построенного на основе стекла $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, при постоянном уровне входной мощности 40 Вт максимальная дифракционная эффективность достигается на частоте модуляции около 80 МГц (кривая 1). При согласо-

нии акустических импедансов материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя обеспечивается симметричность амплитудно-частотной характеристики (кривая 2).

Заключение

Акустооптические исследования стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ показали, что они являются перспективным материалом для изготовления светозвукопроводов акустооптических устройств управления лазерным излучением в видимой области спектра.

Исходя из технологических особенностей получения стекол высокого оптического качества, предложено для создания АО-модуляторов использовать стекла двух составов — $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ и $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$, обладающих высоким оптическим совершенством и пропусканием в спектральной области 0,4–11 мкм, умеренным акустическим поглощением (2–3 дБ/см). Коэффициент акустооптического качества M_2 стекол таких составов примерно в 100 раз больше, чем у плавленого кварца.

Параметры акустооптического модулятора видимого диапазона на основе стекол указанного состава следующие: рабочая частота ультразвука 80 МГц, максимальная полоса модулирующих частот 10 МГц, дифракционная эффективность 40%, быстродействие примерно 80 нс. При этом немаловажным является и то, что для получения эффективной модуляции требуется малая мощность управляемого электрического сигнала — 40 мВт, что облегчает тепловой режим модулятора и позволяет обойтись без принудительного охлаждения модуляционного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acoustooptic materials // IEEE J. of Quantum Electronics. — 1970. — Vol. 6, N 4. — P. 223–228. — DOI: 10.1109/JQE.1970.1076441
2. Uchida N., Niidzaki N. Acousto-optic deflection materials and techniques // Proceedings of the IEEE. — 1973. — Vol. 61, N 8. — P. 1073–1092. — DOI: 10.1109/PROC.1973.9212
3. Пат. 77305 України. Застосування монокристала напівпровідникового твердого розчину селеніду галію-індію ($\text{Ga}_{0,3}\text{In}_{0,7}$) $_2\text{Se}_3$ як матеріалу для акустооптичного модулятора лазерного випромінювання / І. П. Студеньак, М. Краньчеч, В. І. Феделеш. — 2006. — Бюл. № 11.
4. Пат. 2476916 России. Акустооптический модулятор / М. М. Мазур, В. Э. Пожар, А. А. Павлюк, В. И. Пустовойт, Л. И. Мазур, В. Н. Шорин. — 27.02.2013.
5. Поляков Ю.В., Маковская З.Г., Дембовский С.А., Дерюгин И.А., Талалаев М.А. Критерии отбора стеклообразных халькогенидных материалов для использования в акустооптических устройствах // Изв. АН СССР Неорган. материалы. — 1981. — Т. 17, № 7. — С. 1166–1171.
6. Laine M., Seddon A. B. Chalcogenide glasses for acousto-optic devices // J. Non-Cryst. Solids. — 1995. — Vol. 184, N 30–35. — P. 30–35. — DOI: 10.1016/0022-3093(94)00687-3
7. Kulakova L. A., Melekh B. T., Bakharev V. I., Kudoyarova V. Kh. Synthesis and physical properties of

$\text{Si}(\text{Ge})-\text{Se}-\text{Te}$ glasses // J. Non-Cryst. Solids. — 2006. — Vol. 352, N 9–20. — P. 1555–1559. — DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2006.01.030

8. Кулакова Л.А., Мелех Б.Т., Грудинкин С.А., Данилов А.П. $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}$ и $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}-\text{S}$ -сплавы — новые материалы для акустооптических устройств ближнего, среднего и дальнего инфракрасных диапазонов // ФТП. — 2013. — Т. 47, № 10. — С. 1435–1439.

9. Адрианова И.И., Айю Л.Г., Аснис Л.Н., Кислицкая Е.А., Кокорина В.Ф. Акустооптические свойства стекол систем $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}$ и $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}-\text{Sb}$ // Акустический журнал. — 1976. — Т. 22, № 3. — С. 449–451.

10. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. — Москва: Радио и связь, 1985.

11. Блецкан Д. И. Край фундаментального оптического поглощения стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$ // Физика и химия стекла. — 1986. — Т. 12, № 3. — С. 368–370.

12. Voigt B. Über Glasbildung und Eigenschaften von Chalkogenidsystemen. XVII. Zur Glaschemie des Germaniumdisulfides // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. — 1978. — Bd 447, N 1. — S. 153–160. — DOI: 10.1002/zaac.19784470117

13. Блецкан Д. И. Кристаллические и стеклообразные халькогениды Si, Ge, Sn и сплавы на их основе. — Ужгород: Закарпаття, 2004.

14. Тягай В. А., Растрененко Н. О., Попов В. Б., Блецкан Д. И., Січка М. Ю. Еліпсометрія склоподібних халькогенидів германію змінного хімічного складу // Український фізичний журнал. — 1976. — Т. 21, № 8. — С. 1265–1269.

15. Богданов С.В. Акустооптические методы измерения скорости звука. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.

16. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate // Applied Physics Letters. — 1966. — Vol. 8, N 8. — P. 205–207. — DOI: 10.1063/1.1754556

17. Зусман М.И., Манешин Н.К., Парыгин В.Н. Модуляция 10 мкм излучения с помощью ультразвука // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика-Астрономия. — 1972. — Т. 13, № 2. — С. 190–194. [Modulation of 10 μm radiation using ultrasonics] (in Russian)

18. Smith T.M., Korpel A. Measurement of light-sound interaction efficiencies in solids // IEEE J. of Quantum Electronics (Correspondence). — 1965. — Vol. QE-1, N 6. — P. 283–284. — DOI: 10.1109/JQE.1965.1072224

19. Gordon E.I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Applied Optics. — 1966. — Vol. 5, N 10. — P. 1629–1639. — DOI: 10.1364/AO.5.001629

20. Korpel A. Acousto-optics — a review of fundamentals // Proceedings of the IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 48–53. — DOI: 10.1109/PROC.1981.11919

21. Yang E.H., Shikay YAO. Design considerations for acousto-optic devices // Proceedings of the IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 54–64. — DOI: 10.1109/PROC.1981.11920

22. Klein W.R., Cook B.D. Unified approach to ultrasonic light diffraction // Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on. — 1967. Vol. 14, N 3. — P. 123–134. — DOI: 10.1109/T-SU.1967.29423

23. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — Москва: Сов. радио, 1978.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 19.07 2014 г.*

Д. І. БЛЕЦКАН, В. В. ВАКУЛЬЧАК, В. І. ФЕДЕЛЕШ

Україна, Ужгородський національний університет

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

АКУСТООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ ТА АКУСТООПТИЧНИЙ МОДУЛЯТОР НА ЇХ ОСНОВІ

Проведено комплексні дослідження акустичних та акустооптичних властивостей стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Визначено їх основні параметри, а саме показник заломлення, густину, швидкість позожджньої та поперечної ультразвукових хвиль, пружнооптичні коефіцієнти, коефіцієнти акустооптичної якості. Показано можливість використання склоподібних сульфідів германію $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ як середовища світлозвукпроводу акустооптичного модулятора і наведено його основні параметри. У режимі дифракції Брегга модулятор на довжині хвилі 0,633 нм He—Ne-лазера характеризується наступними параметрами: робоча частота ультразвуку 80 МГц, максимальна смуга моделюючих частот 10 МГц, дифракційна ефективність 40%, швидкодія близько 80 нс.

Ключові слова: халькогенідні стекла, коефіцієнт акустооптичної якості, акустооптичний модулятор.

DOI: 10.15222/TKEA2014.5-6.24

D. I. BLETSKAN, V. V. VAKULCHAK, V. I. FEDELESH

UDC 534.2:535.323

Ukraine, Uzhgorod National University

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

ACOUSTO-OPTIC PROPERTIES OF $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ GLASSES AND ACOUSTO-OPTIC MODULATOR ON THEIR BASIS

The investigation of acousto-optic properties of $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ glasses, which had shown that they are perspective light-sound material for manufacturing of acousto-optic devices for controlling the laser radiation in the visible spectral region was performed. Taking into account the technological conditions for synthesis of glasses with optical quality the two optimal compositions, $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ and $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$, were proposed for fabrication of optical-acoustic modulator. These compositions possess the high optical perfection and transmission in the spectral range of 0.4–11 μm , the moderate optical absorption of 2–3 dB/cm, their acoustic quality factor ~100 times exceeds those of quartz. The construction and main parameters of the acousto-optic modulator based on $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ and $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ glasses as light-sound material and the converter is a plate of lithium niobate single crystal were described. In Bragg diversion mode the modulator has the maximum bandwidth of the modulating frequencies – 10 MHz, the diffraction efficiency – 40%, the speed – near 80 nanoseconds.

It is also important to note that the effective modulation is obtained with the low power (40 mW) controlled electrical signal, which facilitates a thermal mode of the modulator and allows working without the forced cooling of the modulation element.

Keywords: chalcogenide glass, acousto-optical quality factor, acousto-optic modulator.

REFERENCES

1. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acousto-optic materials. *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1970, vol. 6, no 4, pp. 223-228. DOI: 10.1109/JQE.1970.1076441
2. Uchida N., Niidzaki N. Acousto-optic deflection materials and techniques. *Proceedings of the IEEE*, 1973, vol. 61, no 8, pp. 1073-1092. DOI: 10.1109/PROC.1973.9212
3. *Pat. 77305 UA*. [Use of monocrystals of semiconductor solid gallium and indium selenide solution as material for optoacoustic modulators of laser radiation]. I. P. Studeniak, M. Krancec, V. I. Fedelelesh. 2006, bul. 11.
4. *Pat. 2476916 RU*. [Acousto-optic modulator]. M.M. Mazur, V.E. Pozhar, A.A. Pavlyuk, V.I. Pustovoyt, L.I. Mazur, V.N. Shorin. 27.02.2013.
5. Polyakov Yu.V., Makovskaya Z.G., Dembovskii S.A., Deryugin I.A., Talalaev M.A. [Criteria for the selection of glassy chalcogenide materials for use in acousto-optic devices]. *Izvestiya AN SSSR Neorganicheskie materialy*, 1981, vol. 17, no 7, pp. 1166–1171. (in Russian)
6. Laine M., Seddon A. B. Chalcogenide glasses for acousto-optic devices. *J. Non-Cryst. Solids*, 1995, vol. 184, no 30-35, pp. 30-35. DOI: 10.1016/0022-3093(94)00687-3
7. Kulakova L. A., Melekh B. T., Bakharev V. I., Kudoyarova V. Kh. Synthesis and physical properties of $\text{Si}(\text{Ge})-\text{Se}-\text{Te}$ glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, vol. 352, no 9-20, pp. 1555-1559. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2006.01.030
8. Kulakova L.A., Melekh B. T., Grudinkin S.A., Danilov A.P. $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}$ and $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}-\text{S}$ alloys as new materials for acousto-optic devices of the near-, mid-, and far-infrared spectral region. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 10, pp. 1426-1431. doi:10.1134/S1063782613100199
9. Adrianova I.I., Aio L.G., Asnis L.N., Kislytskaya E.A., Kokorina V.F. Acousto-optical properties of glasses of systems $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}$ and $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}-\text{Sb}$. *Acoustic journal*, 1976, vol. 22, no 3, pp. 449-451. (in Russian)
10. Balakshii V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical basis of acousto-optics]. Moscow, Radio i svyaz', 1985, 280 p. (in Russian)

11. Bletskan D. I. The fundamental optical absorption edge glass $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$. *Glass Physics and Chemistry*, 1986, vol. 12, no 3, pp. 368-370.
12. Voigt B. Über Glasbildung und Eigenschaften von Chalkogenidsystemen. XVII. Zur Glaschemie des Germaniumdisulfides. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 1978, Bd 447, no 1, pp. 153-160. DOI: 10.1002/zaac.19784470117
13. Bletskan D. I. *Kristallicheskie i stekloobraznye khal'kogenidy Si, Ge, Sn i splavy na ikh osnove* [Crystalline and glassy chalcogenides of Si, Ge, Sn and alloys based on them: Monograph]. Uzhgorod, Zakarpattya, 2004, 292 p. (in Russian)
14. Tyagai V. A., Rastrenenko N. O., Popov V. B., Bletskan D. I., Sichka M. Yu. Ellipsometry glassy chalcogenides germanium variable chemical composition. *Ukr. J. Phys.*, 1976, vol. 21, no 8, pp. 1265-1269. (in Ukrainian)
15. Bogdanov S.V. *Akustoopticheskie metody izmereniya skorosti zvuka*. [Acousto-optic methods for measuring the speed of sound] Novosibirsk, Publishing House SB RAS, 2013, 142 p. (in Russian)
16. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. *Applied Physics Letters*, 1966, vol. 8, no 8, pp. 205-207. DOI: 10.1063/1.1754556
17. Zusman M.I., Maneshin N.K., Parygin V.N. [Modulation of 10 μm radiation using ultrasonics]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika-Astronomiya*, 1972, vol. 13, no 2, pp. 190-194. (in Russian)
18. Smith T.M., Korpel A. Measurement of light-sound interaction efficiencies in solid. *IEEE J. of Quantum Electronics (Correspondence)*, 1965, vol. QE-1, no 6, pp. 283-284. DOI: 10.1109/JQE.1965.1072224
19. Gordon E.I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices. *Applied Optics.*, 1966, vol. 5, no 10, pp. 1629-1639. DOI: 10.1364/AO.5.001629
20. Korpel A. Acousto-optics — a review of fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no 1, pp. 48-53. DOI: 10.1109/PROC.1981.11919
21. Yang E.H., Shikay YAO. Design considerations for acousto-optic devices. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no 1, pp. 54-64. DOI: 10.1109/PROC.1981.11920
22. Klein W.R., Cook B.D. Unified approach to ultrasonic light diffraction. *Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on*, 1967, vol. 14, no 3, pp. 123-134. DOI: 10.1109/T-SU.1967.29423
23. Magdich L.N., Molchanov V.Y. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acousto-optical devices and their application]. Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 112 p. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами.— Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2013.

Приведены принципы построения и функционирования сетей связи с подвижными объектами при использовании сотовой структуры зоны покрытия; основы организации многостанционного доступа с различными видами разделения сигналов; технические характеристики цифровых стандартов систем подвижной радиосвязи, получивших широкое признание в мировой практике. Исследуются различные модели распространения радиоволн вблизи поверхности земли, которые используются для расчетов уровня сигнала на входе приемников базовых и мобильных станций. Большое внимание уделяется вопросам анализа внутрисистемных помех и методам их уменьшения. Приводятся расчетные формулы для определения отношения сигнал/помеха в любой точке соты, а также для контроля степени изменения этого отношения при перемещении мобильной станции в пределах соты. Впервые в систематизированном виде изложены основы геометрии сотовых структур. С позиции теории массового обслуживания рассмотрены элементы проектирования сотовых сетей подвижной радиосвязи. Теоретический материал иллюстрируется большим количеством числовых примеров. При подготовке данного пособия основное внимание было направлено на доступность представления разнообразного и сложного материала. Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов и специалистов в области проектирования, разработки и тестирования сотовых сетей радиосвязи с подвижными объектами.

