разрезан (кривая *2*, $L=140$ *см*). На кривой *1* вертикальной чертой отмечена частота, при которой $L_{опт}=\lambda_и/2=22$ *см*.

На фиг. 1 приведены также результаты расчета (кривая *3*) η_Σ исследованной стальной полосы с армированным покрытием по формуле Кервина [5] с учетом зависимости η_Σ от L (длины отрезков, на которые разрезан армирующий слой), полученной в работе [1] для демпфирующей ленты. Расчет произведен для $L=22$ *см*. Расхождение экспериментальных и расчетных данных объясняется тем, что в исследуемой полосе с покрытием не выполняются основные предположения, сделанные в работе [1]: малые потери в вязкоупругом слое и неизменность распределения напряжения в демпфируемой полосе при нанесении на нее покрытия. Коэффициент потерь пластиката «Агат» $\eta_2=0{,}5$, длина изгибной волны стальной полосы с покрытием (λ_Σ) в 3,5 раза превосходит длину изгибной волны стальной полосы без покрытия, что свидетельствует о существенном изменении распределения напряжения в полосе.

При увеличении длины отрезка L значение η_Σ уменьшается, приближаясь к коэффициенту потерь полосы с неразрезным армирующим слоем (фиг. 2, кривая *1*, $L=46$ *см* и кривая *2*, $L=140$ *см*). При уменьшении L значение η_Σ приближается к коэффициенту потерь стальной полосы с однослойным покрытием из пластиката «Агат» (кривая *3*, $L=3$ *см* и кривая *4*).

Таким образом, разрезание армирующего слоя на отрезки оптимальной длины, определяемой в соответствии с теорией, развитой для случая тонких армированных покрытий [1], дает существенное повышение эффективности и для покрытий с относительно толстыми слоями.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parfitt G. G.* The effect of cuts in damping tapes. Int. Cong. Acoust., 4th, Copenhagen, 27—28 aug., 1962.
2. *Кашина В. И., Тютекин В. В.* Экспериментальное исследование армированных вибродемпфирующих конструкций. Акуст. ж., 1967, *13*, 3, 387—390.
3. *Коневалов В. С.* Вибропоглощающее покрытие с механическим креплением и его применение. В сб. Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение. ЛДНТП, 1974, 19—25.
4. *Никифоров А. С., Будрин С. В.* Комбинированное вибропоглощающее покрытие и его применение. В сб. Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение. ЛДНТП, 1974, 15—18.
5. *Kerwin E. M.* Jr. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer. J. Acoust. Soc. America, 1959, *31*, 4, 952—962.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
3 февраля 1978 г.

УДК 666.1:535.343.2

ФОТОУПРУГОСТЬ СТЕКОЛ СИСТЕМЫ Ge — Pb — Bi — O

И. И. Зубринов, Б. М. Коперлес, Я. П. Куценко, В. И. Семенов, И. Д. Турянница, В. В. Цитровский, Д. В. Шелопут

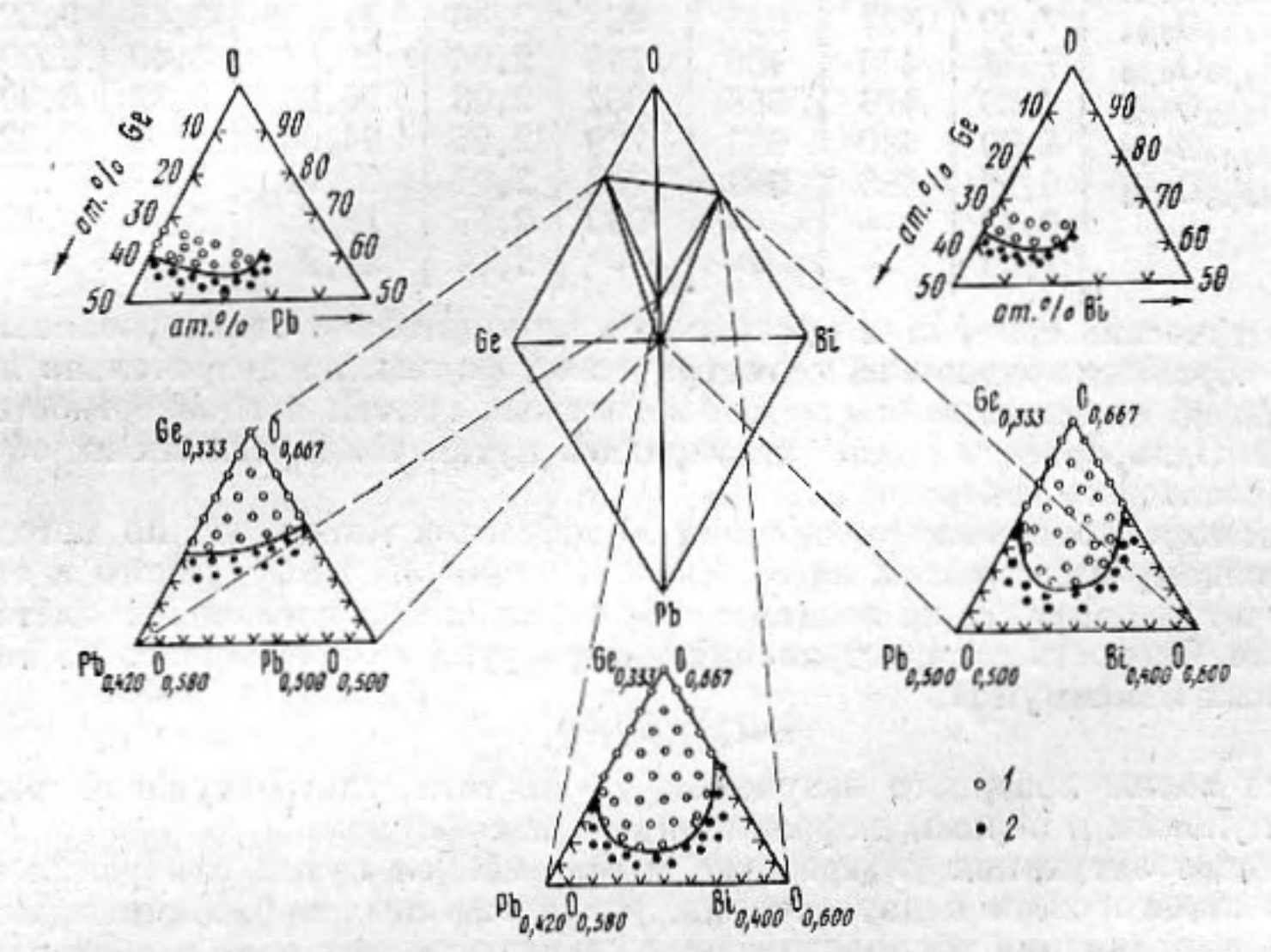
В настоящее время явление дифракции света на упругих волнах широко используется для сканирования и модуляции лазерного излучения. Применение в акустооптических устройствах халькогенидных стекол, несмотря на высокие значения их параметров фотоупругости, ограничено из-за относительно небольшой области их прозрачности в видимой части спектра (не более 2,4 *эв*); вследствие этого они используются, главным образом, для дефлекции He – Ne-лазера с $\lambda=0{,}63$ *мкм*. К другим недостаткам халькогенидных стекол следует отнести большое затухание в них ультразвуковых волн, низкие температуры стеклования и плавления, недостаточную устойчивость к воздействию агрессивных сред. Поэтому для акустооптических устройств, работающих в интервале длин волн 0,4–0,6 *мкм*, используются монокристаллы ниобата лития, германата свинца и некоторых других соединений, которые, обладая менее обильным акустооптическим взаимодействием, чем халькогенидные стекла, характеризуются меньшими акустическими потерями. Однако получение высококачественных монокристаллов больших размеров связано с существеными трудностями, поэтому изготовление стекол с параметрами, близкими к оксидным кристаллам, было бы весьма полезным.

Целью настоящей работы являлось установление границ стеклообразования в системе Ge — Pb — Bi — O, а также исследование основных физико-химических и акустооптических свойств стекол.

Синтез стекол проводился в толстостенном платиновом тигле, помещенном в вакуумированный до 10^{-3} *мм* рт. ст. кварцевый реактор. Исходными компонентами были германий марки «ос. ч», висмут – «ос. ч», свинец – «хч» и их соединения с кислородом: GeO_2, Bi_2O_3, PbO, Pb_3O_4. Реакция взаимодействия между исходными компо-

нентами начинается уже в твердой фазе, что позволило применить метод твердофазового синтеза с последующей вакуумной плавкой.

Взвешенные на аналитических весах компоненты тщательно перетирались в агатовой ступке. Смешивающим агентом, инертным к данным окислам, был ацетон марки «осч». Приготовленная таким образом шихта после высушивания и прокаливания до постоянного веса вакуумировалась и отжигалась при температуре от 600 до 800° С в зависимости от состава в течение 3–5 *час.* Затем температура поднималась до значения, лежащего выше точки плавления наиболее тугоплавкого компонента (1120° С). Охлаждение расплава проводилось как в потоке воздуха со скоростью 100 *град/мин*, так и в режиме медленного охлаждения 1–2 *град/мин.* Составы, близкие к соединению GeO_2, были получены в стеклообразном состоянии при охлаждении со скоростью меньшей чем 0,01 *град/мин.* Применение твердофазового синтеза и использование теплового затвора позволило избежать потерь легковозгоняющихся компонент.



Область стеклообразования в системе Ge—Pb—Bi—O. *1* — стеклообразные сплавы, *2* — кристаллические сплавы

Нами были получены массивные образцы, окраска которых в зависимости от состава и температуры синтеза изменялась от прозрачной (бесцветной) до темно-красной, почти черной. Изменение окраски стекол в зависимости от условий получения, по-видимому, объясняется наличием ликвации в высокогерманатной области сплавов, прилегающих к разрезу $Ge_{0,33}O_{0,67}$–$Bi_{0,40}O_{0,60}$.

Критериями суждения о стеклообразном состоянии служили: раковистый излом, отсутствие линий на дебаеграммах, наличие температурного интервала стеклования. Область стеклообразования в четверной системе Ge — Pb — Bi — O исследовалась по следующим разрезам: Ge — Pb — O; Ge — Bi — O; $Ge_{0,33}O_{0,67}$ — $Pb_{0,42}O_{0,58}$ — $Pb_{0,50}O_{0,50}$; $Ge_{0,33}O_{0,67}$ — $Pb_{0,42}O_{0,58}$ — $Bi_{0,40}O_{0,60}$; $Ge_{0,33}O_{0,67}$ — $Pb_{0,50}O_{0,50}$ — $Bi_{0,40}O_{0,60}$.

По положению области стекол (см. фигуру) видно, что главная роль в стеклообразовании принадлежит GeO_2. Высокая поляризуемость германия, согласно [1], придает его связям с кислородом ковалентный характер, благодаря чему системы, содержащие окись германия, весьма склонны к стеклообразованию. Расширение области стекол при введении окислов PbO и Bi_2O_3, не являющихся стеклообразователями, вызвано тем, что их взаимодействие с GeO_2 и между собой вызывает значительное усложнение структуры расплава в результате сплетения звеньев одних структурных единиц с другими. Сложная структура расплава в сочетании со сравнительно низкой температурой ликвидуса в области эвтектик [2, 3] обусловливает его пониженную текучесть и повышенные значения энергии активации смещения и перегруппировок атомов, что в свою очередь препятствует переходу структурных элементов в необходимое для кристаллизации состояние и создает таким образом благоприятные условия для образования стекла.

Были исследованы некоторые физико-химические свойства стекол: плотность d, температура стеклования t_c, температура кристаллизации $t_{кр}$, температура плавления $t_{пл}$ и показатель преломления n. Как следует из таблицы, в зависимости от соотношения взятых инградиентов физико-химические параметры стекол изменяются в следующих пределах: плотность от 3,55 до 8,00 *г/см*^{3}, температура стеклования от 440 до 590° С, температура кристаллизации от 486 до 718° С и показатель преломления от 1,69 до 2,25.

Состав стекла	d, г/см³	t_c, °C	$t_{кр}$, °C	$t_{пл}$, °C	n	$M_2 \cdot 10^{-18}$, г⁻¹сек³	$v \cdot 10^5$, см/сек	$P_{ср}$	$\alpha_{70\ МГц}$, дб/см
$Ge_{0,33}Pb_{0,00}Bi_{0,00}O_{0,67}$	3,55	590	718	1115	—	—	—	—	3,8
$Ge_{0,31}Pb_{0,04}Bi_{0,00}O_{0,65}$	4,32	564	693	1089	1,69	4,09	3,62	0,19	4,2
$Ge_{0,27}Pb_{0,09}Bi_{0,00}O_{0,64}$	5,40	558	670	991	1,82	7,95	3,53	0,23	4,8
$Ge_{0,24}Pb_{0,13}Bi_{0,00}O_{0,63}$	6,12	545	637	804	1,91	15,07	3,45	0,28	5,8
$Ge_{0,20}Pb_{0,20}Bi_{0,00}O_{0,60}$	6,85	523	618	787	2,06	31,40	3,31	0,32	3,5
$Ge_{0,28}Pb_{0,00}Bi_{0,06}O_{0,66}$	5,17	563	636	1056	1,75	3,00	3,61	0,16	4,0
$Ge_{0,23}Pb_{0,00}Bi_{0,12}O_{0,65}$	6,45	538	627	1018	1,86	6,10	3,59	0,21	4,7
$Ge_{0,18}Pb_{0,00}Bi_{0,18}O_{0,64}$	7,20	521	605	968	2,06	21,70	3,45	0,29	5,2
$Ge_{0,16}Pb_{0,19}Bi_{0,09}O_{0,56}$	7,18	440	486	748	2,04	22,98	3,40	0,30	5,8
$Ge_{0,16}Pb_{0,12}Bi_{0,12}O_{0,60}$	7,20	476	558	662	2,08	26,05	3,39	0,30	5,6
$Ge_{0,16}Pb_{0,06}Bi_{0,16}O_{0,62}$	8,00	480	683	729	2,25	44,00	3,35	0,32	5,1
$Ge_{0,20}Pb_{0,10}Bi_{0,08}O_{0,62}$	6,75	486	653	738	2,01	20,91	3,38	0,27	—
$Bi_{12}GeO_{20}$	9,90	—	—	960	2,55	10,7	3,42	0,12	—
$Pb_5Ge_3O_{11}$	7,33	—	—	—	2,11	22,2	—	—	

Акустооптические измерения проводились на тщательно отшлифованных и отполированных образцах правильной геометрической формы, предварительно подвергнутых контролю на параллельность противоположных граней и плоскостность рабочих поверхностей. Однородность стекол проверялась путем зондирования их объема тонким пучком квантового генератора ЛГ-75.

Критерий акустооптического качества M_2 образцов измерялся по методу Диксона [4], состоящему в сравнении абсолютных величин M_2 исследуемого и эталонного образцов с учетом поправок на неодинаковое отражение и поглощение света в образце и в эталоне. Скорость распространения ультразвука v определялась по положению дифракционных максимумов:

$$v = \lambda f / 2 \sin \theta,$$

где λ – длина волны лазерного излучения, f – частота ультразвуковой волны, θ – угол между нулевым и первым дифракционным максимумом.

Коэффициент затухания ультразвука α был найден путем измерения интенсивности I рассеянного света в двух точках, расположенных на различных расстояниях x_1 и x_2 вдоль направления распространения ультразвуковых волн в образце:

$$\alpha = \frac{10}{x_2 - x_1} \lg \frac{I(x_1)}{I(x_2)}.$$

Показатели преломления n исследуемых образцов измерялись методами призмы. В таблице приведены основные акустооптические параметры стекол четверной системы Ge — Pb — Bi — O и кристаллов $Bi_{12}GeO_{20}$ и $Pb_5Ge_3O_{11}$. Как видно из таблицы, по мере увеличения содержания в составах стекол тяжелых ионов свинца и висмута их показатели преломления возрастают, а скорость распространения ультразвуковых волн уменьшается, что обусловливает рост критерия акустооптического качества.

Значения средней составляющей фотоупругости образцов $P_{ср}$ рассчитывались по формуле

$$P_{ср} = \left(\frac{M_2 \rho v^3}{n^6} \right)^{1/2}.$$

Анализ зависимости величины $P_{ср}$ от состава показывает, что введение свинца приводит к более существенному росту средней составляющей фотоупругости, чем введение висмута. По-видимому, причиной этого является не столько увеличение показателя преломления исследуемых стекол из-за увеличения их плотности, сколько изменение поляризуемости в результате входящих в их состав ионов свинца.

Высокие температуры размягчения наряду с критерием акустооптического качества, достигающего в отдельных составах стекол значений $44 \cdot 10^{-18}$ *г⁻¹ сек³*, а также сравнительно низкое затухание ультразвука позволяют считать эти материалы перспективными для использования в качестве светозвукопроводов акустооптических устройств управления лазерным излучением в области длин волн от 0,4 до 0,6 *мкм*.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Роусон Г.* Неорганические стеклообразующие системы. М., «Мир», 1970, стр. 312.
2. *Сперанская Е. И.* Форма и природа германатов свинца. Ж. неорган. химии, 1960, *5*, 2, 421—432.
3. *Сперанская Е. И., Аршакуни А. А.* Система окись висмута — двуокись германия. Ж. неорган. химии, 1964, *9*, 2, 414—421.
4. *Dixon R. W., Cohen M. G.* A new technique for meassuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. Appl. phys. letters, 1968, *8*, 8, 205—207.

Ужгородский государственный университет

Поступила
29 сентября 1977 г.
После исправления
15 февраля 1978 г.