

## ХАРАКТЕР ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СТЕКЛООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ $As_2Se_3$ -TlS

*Алиев<sup>1</sup> И.И.*

*Д.х.н., профессор, рук. лаб.*

*К.х.н., вед.н.сопр.*

*Гамидова<sup>1</sup> Ш.А.*

*Инженер химии.*

*Сулейманова<sup>1</sup> М.Г.*

<sup>1</sup>*Институт Катализа и Неорганической Химии*

*им.М.Ф.Нагиева НАН Азербайджана*

*К.х.н., доцент.*

*Алвердиев<sup>2</sup> И.Дж.*

*Преподаватель химии*

*Кахраманов<sup>2</sup> Э.Т.*

<sup>2</sup>*Гянджинский Государственный Университет*

*К.х.н., доцент.*

*Ахмедова<sup>3</sup> Дж.А.*

<sup>3</sup>*Адияманский университет, Турция*

**Аннотация.** Методами физико-химического анализа изучены химическое взаимодействие и стеклообразование в системе  $As_2Se_3$ -TlS и построена ее фазовая диаграмма. Установлено, что фазовая диаграмма системы  $As_2Se_3$ -TlS представляет собой квазибинарное сечение тройной взаимной системы As,Tl/S,Se. Система состоит из двух соединений  $TlAs_2SSe_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$  в соотношении компонентов 1:1 и 1:3. Оба соединения плавятся с открытым максимумом при 305 и 280°C, соответственно. Установлено, что соединение  $TlAs_2SSe_3$  кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a=10,15$ ;  $c=9,12$ ; Å,  $z=6$ ,  $\rho_{\text{плн.}}=6,40 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}}=6,52 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Соединение  $Tl_3As_2S_3Se_3$  кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами решетки:  $a=11,20$ ;  $c=9,23$ ; Å,  $z=4$ , плотность  $\rho_{\text{плн.}}=7,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}}=7,17 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В системе  $As_2Se_3$ -TlS обнаружены две эвтектические точки: координаты 35 мол. % TlS,  $t=250^\circ\text{C}$  и 65 мол. % TlS,  $t=190^\circ\text{C}$ . В системе  $As_2Se_3$ -TlS площадь твердого раствора на основе  $As_2Se_3$  составляет 2.5 мол. % TlS. Во время нормального охлаждения в системе область стеклообразования образуется при 85 мол. % TlS, а при охлаждении в жидком азоте -100 мол. % TlS.

**Abstract.** Chemical interactions and glass formation in the  $As_2Se_3$ -TlS system have been studied by the methods of physicochemical analysis and its phase diagram has been constructed. It was found that the phase diagram of the  $As_2Se_3$ -TlS system is a quasi-binary section of the triple reverse system As,Tl/S,Se. The system consists of two compounds  $TlAs_2SSe_3$  and  $Tl_3As_2S_3Se_3$  in a component ratio of 1: 1 and 1: 3. Both compounds melt with an open maximum at 305°C and 280°C, respectively. It was found that the  $TlAs_2SSe_3$  compound crystallizes in the tetragonal crystal system with lattice parameters:  $a = 10, 15$ ;  $c = 9, 12$ ; Å,  $z = 6$ ,  $\rho_{\text{расч.}} = 6.40 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{x-ray.}} = 6.52 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. The  $Tl_3As_2S_3Se_3$  compound crystallizes in hexagonal crystal system with lattice parameters:  $a=11.20$ ;  $c=9.23$ ; Å,  $z=4$ , density  $\rho_{\text{расч.}}=7.15 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{x-ray.}}=7.17 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. In the  $As_2Se_3$ -TlS system, two eutectic points were found: coordinates 35 mol % TlS,  $t = 250^\circ\text{C}$  and 65 mol % TlS,  $t = 190^\circ\text{C}$ . In the  $As_2Se_3$ -TlS system, the area of the  $As_2Se_3$ -based solid solution is 2.5 mol % TS. With normal cooling in the system, glass forms 85 mol. % TlS, and when cooled in liquid nitrogen - 100 mol. % TlS.

**Ключевые слова:** система, стеклообразование, твердый раствор, эвтектика, квазибинарная.

**Key words:** system, glassformation, solid solution, eutectic, quasi-binary.

### Введение

В последнее время интенсивно изучаются стеклообразные халькогениды сложного состава на основе мышьяка. Это вызвано, прежде всего, развитием химии этого класса соединений, а также ростом их практического применения в оптоэлектронике [1-6]. Стекловолокно на основе  $As_2S_3$  и  $As_2Se_3$  широко используется в качестве компактной нелинейной среды романовского усиления и генерации, оптической регенерации и преобразования длины волн [7-10]. Халькогениды таллия, тройные и более сложные фазы на их основе представляют собой фотоэлектрические полупроводниковые материалы [11-14].

Ранее нами исследованы некоторые разрезы тройной и четверной системы с участием халькогенидов мышьяка с халькогенидом таллия [15-20]. Создание новых многокомпонентных стеклообразных и

кристаллических полупроводниковых материалов на основе халькогенидов мышьяка и таллия с заданными характеристиками требует получения надежных данных по фазовым равновесиям в соответствующих системах.

Компоненты системы  $As_2Se_3$ -TlS характеризуются следующими данными: соединение  $As_2Se_3$  плавится с открытым максимумом при  $380^\circ C$  и кристаллизуется в моноклинной сингонии с параметрами решетки:  $a = 12,053$ ;  $b = 9,890$ ;  $c = 4,277 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 90^\circ 28'$ , пр. гр. P21/n [21]. Плотность и микротвердость стеклообразного соединения  $As_2Se_3$  соответственно равны  $\rho = 4,618 \text{ г/см}^3$  и  $H\mu = 1280-1400 \text{ МПа}$ . Соединение TlS плавится инконгруэнтно при  $230^\circ C$  и кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a = 7,78$ ;  $c = 6,81 \text{ \AA}$ ; пр. гр. 14/mcm, плотность  $\rho = 7,62 \text{ г/см}^3$  [22, 23].

#### Экспериментальная часть

Для изучения фазовой диаграммы системы  $As_2Se_3$ -TlS были синтезированы сплавы различного состава. Сплавы системы синтезированы из компонентов  $As_2Se_3$  и TlS. Максимальная температура синтеза составляла  $800^\circ C$ . Охлаждение сплавов проводили медленно. Учитывая перитектический характер образования TlS с целью достижения полноты реакции его отжигали ниже температуры перитектики при  $220^\circ C$  в течение 250ч.

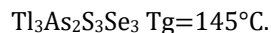
Физико-химический анализ сплавов системы  $As_2Se_3$ -TlS проводили, как в стеклообразном, так и в кристаллическом состоянии.

ДТА сплавов системы был осуществлен на приборе «ТЕРМОСКАН-2» со скоростью нагревания  $5 \text{ град/мин}$ . РФА проводили на рентгеновском приборе модели D2 PHASER с использованием  $CuK_\alpha$ -излучения, с Ni-фильтром. МСА сплавов системы исследовали на микроскопе МИМ-8 на предварительно протравленных шлифах, полированных пастой ГОИ. Для определения границы фазовой области использовался травитель состава  $NaOH + C_2H_5OH = 2:1$ . Микротвердость сплавов системы измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Плотность сплавов системы определяли пикнометрическим методом, в качестве наполнителя применяли толуол.

#### Результаты и их обсуждение

Полученные образцы-компактные, цвет их меняется от темно-черного до черно-серого. Кристаллизацию стеклообразных сплавов контролировали периодическими исследованиями, ДТА, РФА и определением микротвердости. Образцы, богатые  $As_2Se_3$  устойчивы по отношению к воздуху, органическим растворителям и минеральным кислотам. При нагревании минеральные кислоты и щелочи разлагают их.

Результаты ДТА сплавов системы  $As_2Se_3$ -TlS показали, что почти все фиксированные эффекты на кривых нагревания и охлаждения- необратимые, кроме кристаллической области. На термограммах сплавов системы обнаружено три ряда значений, температура размягчения: для  $As_2Se_3$   $T_g = 180^\circ C$ , для  $TlAs_2S_3Se_3$   $T_g = 165^\circ C$ , а для



Микроструктуру сплавов системы  $As_2Se_3$ -TlS изучали до- и после отжига. Микроскопическое исследование сплавов системы показало, что сплавы в интервале концентраций 0-85 мол. % TlS - стеклообразные, а сплавы из области 85-100 мол. % TlS представляют собой стеклокристаллические включения. После отжига сплавы системы под микроскопом представляют собой только кристаллические включения. Кроме сплавов из области 0-2,5 мол. % TlS и сплавы составов 50 и 75 мол. TlS TlS однофазные, а остальные сплавы - двухфазные. Для определения границы областей гомогенности, соответствующие сплавы системы отжигались при  $100$  и  $200^\circ C$  в течение 3 дней, после этого сплавы закаливались в ледяной воде и были исследованы методом микроструктурного анализа. Установлено, что при комнатной температуре растворимость доходит до 2,3 мол. % TlS, а при температуре эвтектики -  $250^\circ C$  растворимость на основе  $As_2Se_3$  простирается до 6 мол. % TlS.

При измерении микротвердости сплавов системы  $As_2Se_3$ -TlS установлено, что при этом получено четыре ряда значений, которые соответствуют микротвердости  $\alpha$ -фазы (твердые растворы на основе  $As_2Se_3$ ), новых соединений  $TlAs_2S_3Se_3$ ,  $Tl_3As_2S_3Se_3$  и TlS. После отжига микротвердость и плотность сплавов из области стекол заметно отличаются.

С целью уточнения области стеклообразования проводили РФА до- и после отжига. Результаты РФА показали, что до отжига сплавов из области концентраций 0-85 мол. % TlS на дифрактограммах не имеются дифракционных максимумов, а после отжига появляются интенсивные дифракционные максимумы. Установлено, что при медленном охлаждении в системе  $As_2Se_3$ -TlS область стеклообразования простирается до 85 мол. % TlS, а в режиме закалки в жидком азоте - до 100 мол. % TlS.

На основании данных, полученных в результате проведенных исследований построена фазовая диаграмма системы  $As_2Se_3$ -TlS (рис. 1). Диаграмма состояния системы характеризуется наличием двух химических соединений составов  $TlAs_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$ . Оба соединения получают в стеклообразном виде и плавятся конгруэнтно при  $305$  и  $280^\circ C$ , соответственно. Система  $As_2Se_3$ -TlS - частично неквазибинарная. Разрез является диагональным сечением тройной взаимной системы As,Tl//S,Se. Разрезы  $As_2Se_3$ -TlS пересекаются при соотношении компонентов  $1:3 \text{ As}_2\text{S}_3+3\text{TlSe} \leftrightarrow \text{As}_2\text{Se}_3+3\text{TlS}$  в точке пересечения образуется конгруэнтно плавящееся соединение  $Tl_3As_2S_3Se_3$ .

Поэтому обе системы  $As_2S_3-TlSe$  и  $As_2Se_3-TlS$  являются стабильной диагональю тройной взаимной системы  $As, Tl // S, Se$ . В системе  $As_2Se_3-TlS$  образуются соединения с составами  $TlAs_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$ . В системе  $As_2S_3-TlSe$  также образуются подобные соединения  $TlAs_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$

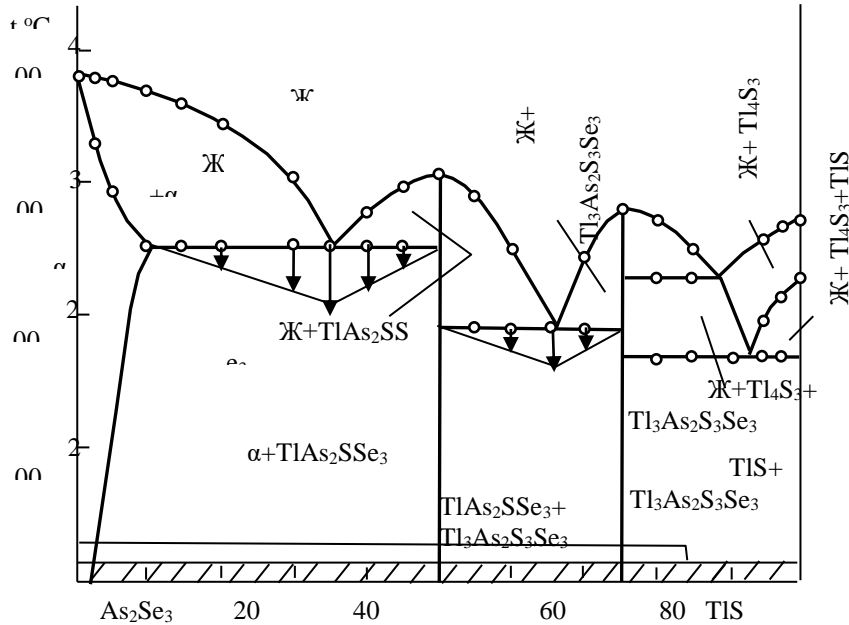


Рис.1. Фазовая диаграмма системы  $As_2S_3-TlSe$ .  
 Область стеклообразования 1- в режиме медленного охлаждения,  
 2- в режиме закалки в жидком азоте.

Результаты ДТА, МСА, РФА, измерения микротвердости и определения плотности подтверждают существование новых фаз:  $TlAs_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$ .

Как видно из табл. 1, 2, до- и после отжига микротвердость и плотность указанных соединений резко отличаются. Для соединения  $TlAs_2S_3Se_3$  в стеклообразном состоянии микротвердость  $H_{\mu} = 840$  МПа и плотность равны  $\rho = 6,25 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а в кристаллическом состоянии -  $H_{\mu} = 720$  МПа,  $\rho = 6,40 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Для  $Tl_3As_2S_3Se_3$  в стеклообразном состоянии  $H_{\mu} = 1050$  МПа,  $\rho = 7,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а в кристаллическом состоянии  $H_{\mu} = 880$  МПа,  $\rho = 7,18 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Полученные данные хорошо согласуются с литературными данными.

На основании экспериментально - вычислительных межплоскостных расстояний и интенсивностей на дифрактограммах исходных соединений и сплавов, содержащих 50 и 75 мол. % TlS (рис.2), из которых следует, что новые дифракционные максимумы, обнаруженных на дифрактограмме указанных сплавов, отличаются от дифракционных максимумов исходных соединений. Это подтверждает образование новой фазы составов  $TlAs_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$ . Установлено, что соединение  $TlAs_2S_3Se_3$  кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a = 10,15$ ;  $c = 9,12$ ; Å,  $z = 6$ ,  $\rho_{\text{п.н.}} = 6,40 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}} = 6,52 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Соединение  $Tl_3As_2S_3Se_3$  кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами решетки:  $a = 11,20$ ;  $c = 9,23$ ; Å,  $z = 4$ , плотность  $\rho_{\text{п.н.}} = 7,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}} = 7,17 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

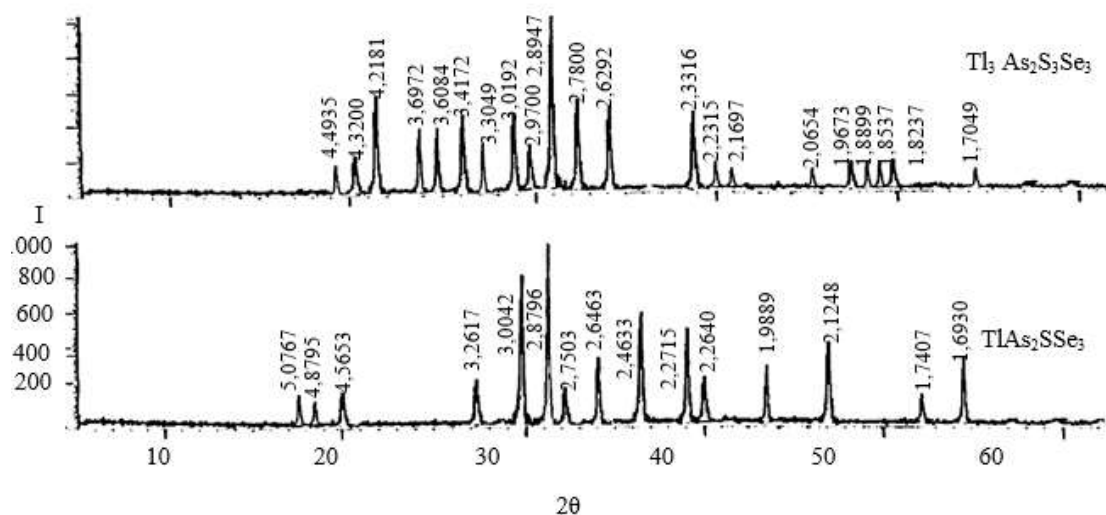


Рис. 2. Дифрактограммы сплавов соединений  $TlAs_2SSe_3$ ,  $Tl_3As_2S_3Se_3$ .

Табл.1.

Рентгенографические данные соединений  $TlAs_2SSe_3$ ,  $Tl_3As_2S_3Se_3$

$TlAs_2SSe_3$						$Tl_3As_2S_3Se_3$				
№	I %	$d_{\text{экс.}}, \text{Å}$	h	k	l	I%	$d_{\text{экс.}}, \text{Å}$	h	k	l
1	16	5,0767	2	0	0	17	4,4935	0	0	2
2	12	4,8795	1	1	1	21	4,3200	2	0	1
3	20	4,5653	2	1	0	56	4,2181	1	0	2
4	26	3,2617	0	0	0	35	3,6972	2	1	0
5	84	3,0042	3	0	1	35	3,6084	1	1	2
6	100	2,8796	3	1	1	42	3,4172	2	1	1
7	24	2,7503	2	0	2	28	3,3049	3	0	0
8	46	2,6463	2	1	2	42	3,0192	3	0	1
9	60	2,4633	4	1	0	25	2,9700	1	0	3
10	54	2,2715	4	0	1	100	2,8947	2	1	2
11	24	2,2640	4	2	0	53	2,7800	2	2	0
12	32	2,1248	3	2	2	49	2,6292	2	0	3
13	44	1,9889	5	1	0	42	2,3316	0	0	4
14	14	1,7407	5	3	0	14	2,2315	3	2	0
15	36	1,6930	1	0	4	10	2,1697	3	2	1
16						10	2,0654	4	1	1
17						17	1,9673	2	1	4
18						14	1,8899	3	0	4
19						14	1,8537	0	0	5
20						17	1,8237	1	0	5
21						10	1,7049	5	1	1

Ликвидус системы  $As_2Se_3$ -TlS состоит из 5 ветвей первичной кристаллизации  $\alpha$ -твердых растворов на основе  $As_2Se_3$ ,  $TlAs_2SSe_3$ ,  $Tl_3As_2S_3Se_3$  и TlS. Часть диаграммы состояния системы  $\alpha$  +  $TlAs_2SSe_3$  образует эвтектику состава 35 мол. % TlS и плавится при 250°C. Соединения  $TlAs_2SSe_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$  между собой образуют эвтектику состава 65 мол.% TlS и плавятся при 190°C. В интервале концентраций 75-100 мол.% TlS выше температуры солидуса начинается трехфазное равновесие. Ниже линии солидуса совместно кристаллизуются фазы  $\alpha$  +  $TlAs_2SSe_3$ ,  $TlAs_2SSe_3$ + $Tl_3As_2S_3Se_3$  и  $Tl_3As_2S_3Se_3$  + TlS. Состав тройной эвтектики отвечает 92 мол. % TlS при 170°C. Состав эвтектики уточнен методом построения треугольника Таммана, отвечает 35 и 65 мол. % TlS при 250 и 180°C, соответственно.

#### Закключение

Таким образом, изучено взаимодействие  $As_2Se_3$  с TlS и построена диаграмма состояния системы  $As_2Se_3$ -TlS. Обнаружено, что в системе  $As_2Se_3$ -TlS образуются два стеклообразных соединения составов  $TlAs_2S_3Se$  и

$Tl_3As_2S_3Se_3$ . Оба соединения плавятся конгруэнтно при 305 и 280°C, соответственно. Установлено, что соединение  $TlAs_2SSe_3$  кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки:  $a=10,15$ ;  $c=9,12$ ; Å,  $z=6$ ,  $\rho_{\text{лин.}}=6,40 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}}=6,52 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Соединение  $Tl_3As_2S_3Se_3$  кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами решетки:  $a=11,20$ ;  $c=9,23$ ; Å,  $z=4$ , плотность  $\rho_{\text{лин.}}=7,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{рент.}}=7,17 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. В системе на основе  $As_2Se_3$  образуются твердые растворы, которые достигают 2,5 мол. % TlS, а твердых растворов на основе TlS практически не обнаружено. Выявлено, что в системе присутствуют обширные области стеклообразования. При медленном охлаждении область стеклообразования простирается до 85 мол. % TlS, а в режиме закалки в жидком азоте - до 100 мол. % TlS.

#### Список литературы

1. Anisimova N.I., Bovdovsky G.H., Castro R. A. The Photoinduced Change of Dissolution Ratio in  $As_2S_3$  Glasses // Radiation Effects and Diffusion in Solids. 200. V.156. №4. С. 365-369.
2. Hari P., Cheneya C., Luepkea G., Singha S., Tolka N., Sanghera J.S., Aggarwal D. Wavelength selective materials modification of bulk  $As_2S_3$  and  $As_2Se_3$  by free electron laser irradiation // Journal of Non-Crystalline Solids. 2000. V. 270. P.265-268.
3. Dinesh Chandra SATI, Rajendra KUMAR, Ram Mohan MEHRA Influence of Thickness Oil Optical Properties of a:  $As_2Se_3$  Thin Films // Turk J Phys. 2006. V.30. P.519- 527.
4. Iovu M., Shutov S., Rebeja S., Colomeyco E., Popescu M. Effect of metal additives on photodarkening in amorphous  $As_2Se_3$  films // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2000.V.2. №1. p.53-58.
5. Babaev A.A, Muradov R., Sultanov S.B, Askhabov A.M. Influence of preparation conditions on the optical and photoluminescent properties of glassy  $As_2S_3$  // Inorgan. materials. 2008. V.44. No. 11. P. 1187-1201.
6. Littler I. C. M., Fu L. B., Mägi E. C., Pudo D., Eggleton B. J. Widely tunable, acusto-optic resonances in chalcogenide  $As_2Se_3$  fiber // J. OPTICS EXPRESS. 2006. V. 14. No. 18. P. 8088-8095.
7. Seema Kandpal Kushwaha R. P. S. Photo acoustic spectroscopy of thin films of  $As_2S_3$ ,  $As_2Se_3$  and  $GeSe_2$  // Indian Academy of Sciences. PRAMANA journal of physics. 2007. V. 69. No 3. P. 481-484.
8. Fu L.B., Rochette M., Ta'eed V., Moss D., and Eggleton B.J. "Investigation of self-phase modulation based optical regeneration in single mode  $As_2Se_3$  Chalcogenide glass fiber // Opt. Express. 2005. V.13. 7637.
9. Slusher R.E., Lenz G., Hodelin J., Sanghera J., Shaw L.B., and Aggarwal I.D. Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity  $As_2Se_3$  Chalcogenide fibers // J. Opt. Soc. Am. 2004. B 21. P.1146-1155.
10. Jackson S.D. and Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser // Appl. Phys. Lett., 2006. V.88. 221106.
11. Sardarly R.M., Samedov O.A., Alieva N.A., Abdullayev A.P., Huseynov E.K., Hasanov I.S., Salmanov F.T., On the Polarization Caused by Bulk Charges and the Ionic Conductivity in  $TlInSe_2$  Crystals // Semiconductors. 2014, V. 48. No. 4. P. 442-447.
12. Alekperov O. Z., Najafov A. I., Nakhmedov E., Samedov O. A., Aliyeva N. A., and Jafarova G. . High-temperature phase transitions in  $TlInTe_2$  crystals // Journal of Applied Physics. 2018. V.123. P. 135701; <https://doi.org/10.1063/1.5018128>
13. Sardarly R. M., Samedov O. A., Abdullaev A. P., Salmanov F. T., Alekperov O. Z., Huseynov E. K., and Aliyeva N. A. Superionic Conductivity and Switching Effect with Memory in  $TlInSe_2$  and  $TlInTe_2$  Crystals // Semiconductors. 2011. V. 45. No. 11. P. 1387-1390.
14. Henkel W., Hochheimer H., Carlone C., Werner A., Ves S., Schnering H. V. High-pressure Raman Study of The Ternary Chalcogenides  $TlGaS_2$ ,  $TlGaSe_2$ ,  $TlInS_2$ , and  $TlInSe_2$  // Physical Review 1982. T. 26., P. 3211-3221.
15. Рустамов П.Г., Алиев И.И., Ильясов Т.М., Абилов Ч.И. Фотоэлектрические свойства стекол системы  $As_2Se_3 - Tl_2Te$  // Материалы конференции «Аморфные полупроводники», РАН, София, 1984., с.162-163.
16. Алиев И.И., Ильясов Т.М. Система  $As_2Se_3-T_2S$  // Известия АН СССР. Неорган. материалы. 1987. Т. 24. № 5. С. 867-868.
17. Алиев И.И., Гуршумов А.П., Алиев О.М., Кулиев Б.Б., Юсипов Ю.А. Исследование разреза  $As_2S_3-In_2Se_3$  //Сборник Новые неорганические материалы. Баку. 1992. С. 86-88.
18. Алиева Р.А., Бабанлы И.М., Елчиев Я.М., Алиев И.И. Фазовые равновесия в системах  $TlSe-Tl_5Se_2J$  и  $Tl_6Se_4J_4 -TlSe$  Журн. Хим. проблемы. 2005. № 4. С. 115-117.
19. Велиев Дж.А., Алиев И.И., Мамедова А.З. Фазовое равновесие в системе  $As_2S_3-TlSe$  // Журн. неорган. химии. 2007. Т.52. № 2. С. 312-315.
20. Фарзалиев А.А., Алиев И.И., Алиев О.М., Алиев И.Г. Фазообразование в системе  $As_2Se_3-TlSe$  // Химические Проблемы. 2006. № 2. С. 284-287.
21. Хворостенко А.С. Халькогениды мышьяка. Обзор из серии "Физические и химические свойства твердого тела". - М., 1972. 92 с.
22. Федоров П.И., Мохосоев М.В., Алексеев Ф.П. Химия галлия, индия и таллия. Новосибирск: Изд. Наука. 1977. 221 с.

23. Диаграмма состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.:Т. 3. Кн. 2 / Под общ. Ред. Н.П.Лякишева.- М.: Машиностроение. 2000.-448 с.