

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 546.19.23- 683.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СТЕКЛООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ As_2Se_3-TlTe Алиев¹ И.И.

Д.х.н., проф., рук. лаб.

¹Институт Катализа и Неорганической Химии имени М.Ф.Нагиева НАН Азербайджана. Баку.Рзаев² Р.М.

Д.физ.н., проф.

Гашимов² Х.М.

К.х.н., доцент.

²Азербайджанский Государственный Экономический Университет

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.4.95.1622

АННОТАЦИЯ

Методами дифференциально-термического (ДТА), рентгенофазового (РФА), микроструктурного (МСА), а также измерения микротвердости и определения плотности исследовано химическое взаимодействие и стеклообразование в системе As_2Se_3-TlTe и построена ее диаграмма состояния. Установлено, что разрез As_2Se_3-TlTe является квазибинарным сечением четверной системы $As, Tl // Se, Te$. В системе образуются два четверных соединения: $TlAs_2Se_3Te$, плавящиеся инконгруэнтно при $225^\circ C$, и $In_3As_2S_3Te_3$, плавящиеся конгруэнтно при $285^\circ C$. Твердые растворы на основе As_2Se_3 при комнатной температуре достигают 1,6 мол. % $TlTe$, а твердых растворов на основе $TlTe$ практически не обнаружено. Все полученные образцы стеклообразные.

ABSTRACT

Chemical interactions and glass formation in the As_2Se_3-TlTe system have been studied by methods of differential thermal (DTA), X-ray diffraction (XRD), microstructural (MSA), as well as microhardness measurement and density determination, and its state diagram has been constructed. It is established that the section As_2Se_3-TlTe is a quasi-binary section of the quaternary system $As, Tl // Se, Te$. Two quaternary compounds are formed in the system: $TlAs_2Se_3Te$ melting incongruently at $225^\circ C$ and $In_3As_2S_3Te_3$ melting congruently at $285^\circ C$. Solid solutions based on As_2Se_3 at room temperature reach 1.6 mol. % $TlTe$, and practically no solid solutions based on $TlTe$ were found. All obtained samples are glassy.

Ключевые слова: система, эвтектика, микротвердость, плотность, солидус.

Key words: system, eutectic, microhardness, density, solidus.

Введение

Анализ литературы показал, что тройные системы, состоящие из халькогенидов мышьяка и таллия, изучены подробно [1–5], а четверные системы исследованы недостаточно, хотя в области четверных систем проведен ряд исследований [6–9]. Халькогениды мышьяка, как и халькогениды таллия, склонны к стеклообразованию и получают при нормальных условиях. Халькогенидные волокна на основе As_2Se_3 и As_2Se_3 используются для передачи света в среднем ИК-диапазоне и нашли применение в качестве компактной нелинейной среды, позволяющей комбинационное усиление [10] и генерацию [11]. В последние годы фотоэлектрические свойства соединений As_2Se_3 и As_2Se_3 и сплавов на их основе исследованы в работах [12–19]. Исследованы электрофизические и термоэлектрические свойства тройных соединений на основе халькогенидов таллия [20–22]. Ранее нами исследованы четверные системы халькогенидов мышьяка с участием элементов III подгруппы [23–25]. С этой целью новые фазы и сплавы твердых растворов, полученные в результате изучения химического

взаимодействия халькогенидов мышьяка и таллия, могут и являются актуальными материалами для электронной промышленности.

Целью настоящей работы является изучение характера химического взаимодействия и стеклообразования в системе As_2Se_3-TlTe , а также поиска новых полупроводниковых фаз.

Соединение As_2Se_3 плавится с открытым максимумом при $380^\circ C$ и кристаллизуется в моноклинной сингонии с параметрами решетки: $a = 12,053$; $b = 9,890$; $c = 4,277$ Å, $\beta = 90^\circ 28'$, пр. гр. $P2_1/n$ [26]. Плотность и микротвердость стеклообразного соединения As_2Se_3 равны $\rho = 4,618$ г/см³ и $H_\mu = 1400$ МПа, соответственно. Соединение $TlTe$ плавится инконгруэнтно при $300^\circ C$ и кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 12,95$; $c = 6,175$ Å [27,28].

Экспериментальная часть

Сплавы системы As_2Se_3-TlTe получали путем сплавления рассчитанных количеств стехиометрических As_2Se_3 и $TlTe$ в вакуумированных до 0,133 Па кварцевых ампулах при температуре $600^\circ C$.

Исследование проводили методами дифференциального термического (ДТА), рентгенографического (РФА), микроструктурного (МСА) анализом, а также измерением микротвердости и определением плотности.

ДТА сплавов системы был осуществлен на приборе НТР -73 со скоростью 10 град/мин. РФА проводили на рентгеновском приборе модели D2 PHASER в CuK_α - излучении с Ni-фильтром. МСА сплавов системы исследовали на микроскопе МИМ-8 на предварительно протравленных шлифах, полированных пастой ГОИ. Микротвердость сплавов системы измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Плотность сплавов системы определяли пикнометрическим методом, в качестве наполнителя применяли толуол.

Результаты и их обсуждение

Синтез четверных сплавов системы As_2Se_3 -TlTe проводили как из бинарных соединений так и из элементарных компонентов в однотемпературной печи в откачанных до 0.133 Па кварцевых ампулах с вибрационным перемешиванием. Полученные образцы – стеклообразные, имеют черный цвет. Все сплавы устойчивы в воде и воздуху, растворяются лишь в минеральных кислотах (HNO_3 , H_2SO_4) и щелочах (NaOH, KOH). Для получения равновесного состояния сплавы системы подвергали длительному отжигу при 220, 190 и 170°C в течение 950 ч. Режим термической обработки сплавов выбирали на основании диаграммы плавкости, построенной по кривым нагревания неотожженных образцов. Все сплавы системы исследовали до и после отжига (табл. 1 и 2). Для построения диаграммы состояния системы As_2Se_3 - TlTe использовали данные физико-химического анализа после отжига.

ДТА сплавов системы показал, что почти все образцы - стеклообразные. На термограммах сплавов системы, имеются три ряда значений температуры размягчения.

В интервале концентраций 0-50 мол. % TlTe температура размягчения (T_g) изменяется от 180 до 155°C, а в области 50-90 мол.% TlTe, T_g изменяется от 155 до 160°C. Для As_2Se_3 $T_g=180^\circ\text{C}$, для $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$, $T_g =155^\circ\text{C}$ и для $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$, $T_g=160^\circ\text{C}$.

МСА показал, что сплавы системы в интервале концентраций 0-90 мол. % TlTe -стеклообразные. Для системы As_2Se_3 -TlTe обнаружена взаимосвязь между структурой стекла и характером диаграммы состояния. Там, где в структуре стекла преобладают структурные единицы $\text{AsSe}_{3/2}$, при кристаллизации стекол в качестве первичной фазы выделяются кристаллы соединения As_2Se_3 . В области составов, содержащих 30-60 мол. % TlTe, структура стекол определяется структурой $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$. В области концентраций 60-80 мол. % TlTe структура стекол определяется структурой $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$.

Полученные данные по кристаллизационной способности стекол системы As_2Se_3 - TlTe хорошо согласуются с видом диаграммы состояния этой системы: максимальную кристаллизационную способность стекла состава химических соединений, а минимальную - стекла эвтектического состава. МСА сплавов показывает, что сплавы состава 0-1,6 мол. %TlTe, 50 и 75 мол. % TlTe - однофазные, а остальные сплавы - двухфазные.

Микротвердость и плотность сплавов системы TlTe исследовали до- и после отжига (табл. 1, 2). Значения микротвердости и плотности стекол на основе As_2Se_3 изменяются в пределах $H_\mu=(1300-1360)$ МПа, $\rho=(4,62-5,38)\cdot 10^3$ кг/м³, для стекол состава $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$ $H_\mu=(810-850)$ МПа, $\rho=(5,38-6,88)\cdot 10^3$ кг/м³ и для $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ $H_\mu=(990-1020)$ МПа, $\rho=(6,88-7,82)\cdot 10^3$ кг/м³. После длительного отжига микротвердость и плотность для As_2Se_3 составляют $H_\mu=(760-790)$ МПа, $\rho=(5,10-5,76)\cdot 10^3$ кг/м³, для $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$ $H_\mu=(670-720)$ МПа, $\rho=(5,76-7,10)\cdot 10^3$ кг/м³, для $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{Se}_3\text{Te}_3$ $H_\mu=(830-870)$ МПа, $\rho=(7,10-8,00)\cdot 10^3$ кг/м³.

Табл. 1.

Состав, результаты ДТА, измерения микротвердости и определения плотности сплавов системы As_2Se_3 -TlTe до отжига (стеклообразные)

Состав, мол %		Термические эффекты, °C	Плотность, 10 ³ кг/м ³	Микротвердость фаз, МПа			
As_2Se_3	TlTe			α	$\text{TlAs}_2\text{S}_3\text{Te}$	$\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$	TlTe
P=0,20 Н					P=0,10 Н		
100	0.0	180,380	4,62	1300	-	-	-
97	3.0	180,375	4,70	1350	-	-	-
95	5,0	175,270,370	4,85	1360	-	-	-
90	10	170,225,355	5,05	1370	850	-	-
80	20	170,225,335	5,38	1370	840	-	-
70	30	160,225,310	5,75	1360	830	-	-
60	40	155,225,290	6,15	1360	840	-	-
50	50	155,225,250	6,55	-	820	-	-
45	55	155,200,225	6,70	-	810	-	-
40	60	155,200,215	6,88	-	810	1020	-
38	62	155,200	6,78	-	-	1020	-
30	70	160,200,260	7,28	-	-	1020	-
25	75	160,285	7,52	-	-	1000	-
20	80	160,175,250,270	7,66	-	-	1010	-

15	85	160,175,250	7,70	-	-	990	-
12	88	160,175	7,82	-	-	-	810
10	90	160,175,210,350	8,00	-	-	-	810
5,0	95	175,265,410	8,15	-	-	-	810
3.0	97	175,230,435	8,28	-	-	-	810
0.0	100	300,453	8,43	-	-	-	810

Табл. 2.

Состав, результаты ДТА, измерения микротвердости и определения плотности сплавов системы As₂Se₃-TlTe после отжига (кристаллические)

Состав, мол %		Термические эффекты, °С	Плотность, 10 ³ кг/м ³	Микротвердость фаз, МПа			
As ₂ Se ₃	TlTe			α	TlAs ₂ S ₃ Te	Tl ₃ As ₂ S ₃ Te ₃	TlTe
				P=0,10 Н			P=0,2 Н
100	0.0	380	5,10	760	-	-	-
97	3.0	300,375	5,25	790	-	-	-
95	5,0	270,370	5,31	790	-	-	-
90	10	225,355	5,43	790	720	-	-
80	20	225,335	5,76	790	720	-	-
70	30	225,310	6,09	790	710	-	-
60	40	225,290	6,40	790	700	-	-
50	50	225,250	6,78	-	680	-	-
45	55	200,225	6,95	-	680	-	-
40	60	200,215	7,10	-	Эвтек.	Эвтек.	-
30	70	200,260	7,40	-	-	830	-
25	75	285	7,62	-	-	850	-
20	80	175,250,270	7,76	-	-	860	-
15	85	175,250	7,92	-	-	-	-
12	88	175	8,00	-	-	Эвтек.	Эвтек.
10	90	175,210,350	8,09	-	-	-	-
5,0	95	175,265,310	8,19	-	-	-	810
3.0	97	175,290,435	8,35	-	-	-	810
0.0	100	300,453	8,43	-	-	-	800

С целью уточнения области стеклообразования снимали дифрактограммы до- и после отжига. Результаты РФА показали, что в интервале концентраций 0-80 мол. %TlTe на дифрактограммах не наблюдаются дифракционных максимумов. После длительного отжига нам не удалось закристаллизовать сплавы. Поэтому была предпринята попытка добиться полной кристаллизации, подвергнув сплавы предварительно в порошок, а затем отжигу. Сначала температуру поднимали до 80-100°C и несколько суток выдерживали при той же температуре, поднимали до кристаллизационной точки и отжигали в течение 1100 ч. После этого снимали дифрактограммы. На дифрактограммах этих сплавов появляются интенсивные дифракционные максимумы. Установлено, что область стеклообразования в системе As₂Se₃-TlTe получается больше, чем в системе As₂Se₃-TlS. По

идее при переходе TlS→TlTe происходит металлизация химических связей. Поэтому должна быть уменьшаться область стеклообразования в ряду TlS→TlTe. По-видимому, в системе As₂Se₃-TlTe образуются новые структурные единицы, которые обладают более жесткой ковалентной связью.

Горюнова и Коломиец показали, что наиболее важной чертой, определяющей структуру и устойчивость халькогенидных стекол, является относительный вклад ковалентной связи. Построенная на основании данных физико-химического исследования диаграмма состояния системы As₂Se₃-TlTe показана на рис. 1. Диаграмма состояния системы As₂Se₃-TlTe - частично квазибинарная. В системе As₂Se₃-TlTe образуются два новых химических соединения, инконгруэнтно плавящиеся при 225°C TlAs₂Se₃Te и конгруэнтно - при 285°C Tl₃As₂S₃Te₃.

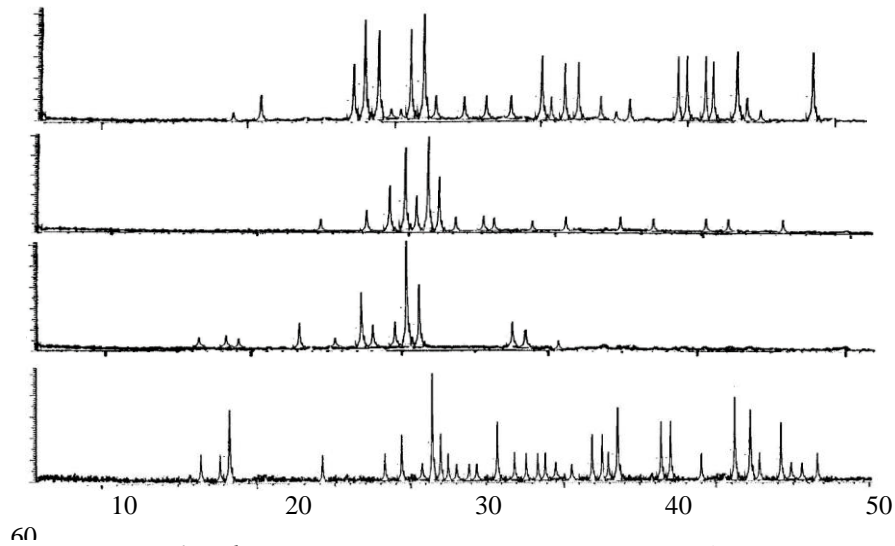


Рис. 1. Дифрактограммы сплавов системы As_2Se_3-TlTe .
 1- As_2Se_3 , 2-50 ($TlAs_2Se_3Te$), 3-75($Tl_3As_2S_3Te_3$), 4-100 мол. % $TlTe$.

Следует, что новые дифракционные максимумы, обнаруженные на дифрактограммах сплавов, содержащих 50 и 75 мол. % $TlTe$, отличаются от дифракционных максимумов исходных соединений (рис. 1). Полученные результаты

доказывают, что в системе As_2Se_3-TlTe образуются новые соединения составов $TlAs_2Se_3Te$ и $Tl_3As_2S_3Te_3$. Индивидуальность соединений $TlAs_2Se_3Te$ и $Tl_3As_2S_3Te_3$ подтверждена методами физико-химического анализа.

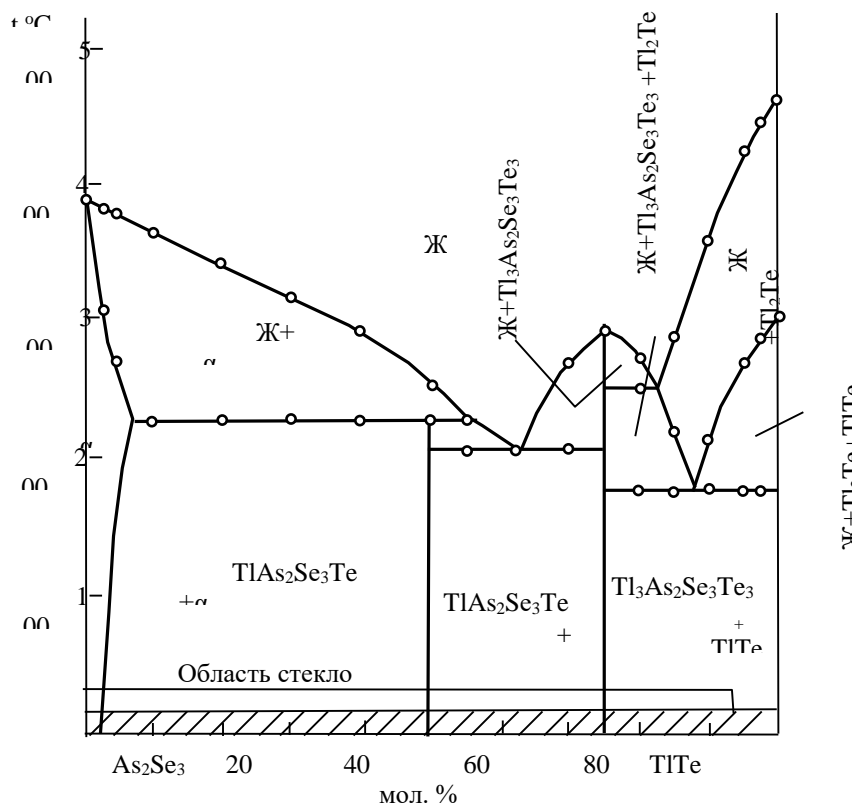


Рис. 1. Диаграмма состояния системы As_2Se_3-TlTe .
 Область стеклообразования, полученная в режиме медленного охлаждения (1) и в режиме закалки в жидком азоте (2).

Существование указанных соединений подтверждено также РФА.

Для соединений $TlAs_2Se_3Te$ и $Tl_3As_2S_3Te_3$ вычислены параметры решетки. Установлено, что $TlAs_2Se_3Te$ кристаллизуется в тетрагональной

сингонии с параметрами решетки: $a=10,66$; $c=9,05$ Å, $z=6$, $\rho_{\text{пикл.}}=6,78 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{рент.}}=6,87 \cdot 10^3$ кг/м³. Аналогичным методом установлено, что $\text{ТlAs}_2\text{S}_3\text{Te}_3$ кристаллизуется в гексагональной сингонии с параметрами: $a=11,72$; $c=9,75$ Å, $z=4$, $\rho_{\text{пикл.}}=7,62 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{рент.}}=7,82 \cdot 10^3$ кг/м³. Ликвидус системы $\text{As}_2\text{Se}_3\text{-ТlTe}$ состоит из пяти ветвей первичной кристаллизации: α -твердых растворов на основе As_2Se_3 , $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$, $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$, TlTe и Tl_2Te . Соединения $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$ и $\text{In}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$ между собой образуют эвтектику при 200°C, состав которой - 62 мол. % TlTe . Первичная

кристаллизация $\text{In}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$ и Tl_2Te заканчивается в перитектоидной точке, состава 82 мол. % TlTe при 250°C. Тройная эвтектика отвечает составу 88 мол. % TlTe и плавится при 175°C. В интервале 0-50 мол. % TlTe ниже линии солидуса совместно кристаллизуются и ($\alpha + \text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$) а в интервале 50-75 мол. % TlTe ниже линии солидуса сплавы представляют собой смесь двух фаз $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$ и $\text{In}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$. Часть диаграммы в интервале концентраций 75-100 мол. % TlTe частично квазибинарная, ниже линии солидуса совместно кристаллизуются $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3 + \text{TlTe}$.

Табл. 3.

Рентгеновские данные соединений $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$, $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$, межплоскостные расстояния (d), интенсивности (I) и индексы решетки (hkl)

$\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$					$\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$			
№	I, %	$d_{\text{экс.}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч.}}, \text{Å}$	hkl	I, %	$d_{\text{экс.}}, \text{Å}$	$d_{\text{выч.}}, \text{Å}$	hkl
1	7	5,3300	5,3301	200	12	3,5516	3,5714	211
2	9	4,7678	4,7677	210	20	3,2527	3,2530	003
3	7	4,5268	4,5268	002	44	3,1012	3,0979	103
4	23	3,7687	3,7689	220	86	3,0177	3,0165	212
5	6	3,5536	3,5533	330	36	2,9300	2,9298	220
6	50	3,2686	3,2651	212	100	2,8503	2,8444	113
7	19	3,1589	3,1591	311	56	2,8002	2,8149	310
8	21	3,0177	3,0178	003	16	2,6985	2,7047	311
9	100	2,9565	2,9566	320	16	2,5334	2,5375	400
10	55	2,8950	2,8964	222	12	2,5125	2,5118	222
11	21	2,3842	2,3836	420	10	2,3321	2,3237	321
12	18	2,3553	2,3551	223	16	2,2054	2,2115	410
13	6	2,2187	2,2189	104	16	2,0300	2,0298	500
14					12	1,9545	1,9518	330
15					12	1,8216	1,8230	510
16					12	1,7739	1,7851	242
17					12	1,6288	1,6265	006

Заключение

Таким образом, построена диаграмма состояния системы $\text{As}_2\text{Se}_3\text{-ТlTe}$. Система – частично квазибинарная. В системе образуются два промежуточных соединения: $\text{TlAs}_2\text{Se}_3\text{Te}$ плавящееся инконгруэнтно при 225°C и $\text{Tl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Te}_3$ конгруэнтно плавящееся при 285°C. Соблюдая условия количественного ДТА для определения состава эвтектики были построены треугольники Таммана. Установлено, что состав эвтектики отвечает 62 мол. % TlTe и температура 225°C. В системе при медленном охлаждении область стеклообразования простирается до 90 мол. % TlTe , а в режиме закалки в жидком азоте - 100 мол. % TlTe . Твердые растворы на основе As_2Se_3 доходят до 1,6 мол. % TlTe , а на основе TlTe практически не установлены.

Список литературы

1. Любин В.М., Фомина В.И. Фотоэлектрическое и катодоэлектронное состояние в слоях $\text{Tl}_2\text{Se-As}_2\text{Se}_3$ // ФТТ, 1963, т.5, №12, с.3367-3372.
 2. Кириленко В.В., Дембовский С.А., Поляков Ю.А. Оптические свойства стекол в системах $\text{As}_2\text{S}_3\text{-ТlS}$ и $\text{As}_2\text{Se}_3\text{-ТlSe}$ // Известия АН СССР.

Неорганические материалы, 1975, т.11, №11, с.1923-1928.

3. Кириленко В.В., Никитин В.К., Дембовский С.А. Стеклообразование и особенности химического взаимодействия в халькогенидных системах $\text{As}_2\text{X}_3\text{-Тl}_2\text{X}$ // Известия АН СССР. Неорганические материалы, 1975, т.11, №11, с.1929-1935.

4. Алиев И.И., Бабанлы М.Б., Фарзалиев А.А. Оптические и фотоэлектрические свойства тонких пленок стекол $(\text{As}_2\text{Se}_3)_{1-x}(\text{TlSe})_x$ ($x=0,05-0,10$) // XI Международная конференция по физике и технологии тонких пленок. Иваново-Франковск, Украина, 7-12 мая, 2007, с. 86.

5. Flaschen S.S., Pearson A.F., Northover W.R. Formation and properties of low-melting glasses in the ternary systems As-Tl-S , As-Tl-Se and As-Se-S // J. Amer. Chem. Soc., 1960, v. 43, No1, p. 271-278.

6. Алиев И.И., Фарзалиев А.А., Алиев И.Г., Магаммедрагимова Р.С., Велиев Дж.А. Фазовые равновесия и стеклообразование в системе $\text{As}_2\text{S}_3\text{-ТlAs}_2\text{S}_2\text{Se}_2$ // Химические проблемы, 2008, № 1, с. 215-218.

7. Алиев И.И., Алиев И.Г., Фарзалиев А.А., Велиев Дж.А. Характер взаимодействия и стеклообразования в системе $\text{TlAs}_2\text{S}_4\text{-Тl}_3\text{As}_2\text{S}_3\text{Se}_3$ // Журн. неорган. химии. 2008.т.53.№6.с.1037-1039.

8. 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.
9. Заргарова М.И., Мамедов А.Н., Аждарова Дж.С., Ахмедова (Велиев) Дж.А., Абилов Ч.И. Справочник: Неорганические вещества, синтезированные и исследованные в Азербайджане. Баку. Изд. Элм. 2004.462 с.
10. Fu L.B., Fuerbach A., Littler I.C.M., and Eggleton B.J., Efficient optical pulse compression using Chalcogenide single-mode fibers, *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. P. 081116.
11. 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. P 7637-7640.
12. 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.
13. Lovu M., Shutov S., Rebeja S., Colomeycu E., Popescu M. Effect of metal additives on photodarkening kinetics in amorphous As_2Se_3 films // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2000. V. 2, Issue: 1. P 53-58.
14. Jun J. Li Drabold. D. A.. Atomistic comparison between stoichiometric and nonstoichiometric glasses: The cases of As_2Se_3 and As_4Se_4 // *Phys. Rev.* 2001, V. 64. P. 104206-104213.
15. Hineva T., Petkova T., Popov C., Pektov P., Reithmaier J. P., Funrman-Lieker T., Axente E., Sima F., Mihailescu C. N., Socol G., Mihailescu I. N. Optical study of thin $(As_2Se_3)_{1-x}(AgI)_x$ films // *Journal of optoelectronics and Advanced Materials.* 2007.V. 9. No. 2. February. P. 326 – 329.
16. Seema Kandpal, Kushwaha R. P. S.. Photoacoustic 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.
17. Andriesh A.M., Verlan V. I. Donor- and acceptor-like center revealing by Photoconductivity of amorphous thin As_2Se_3 films // *Journal of Optoelectronic and Advanced Materials* 2001. V. 3. No. 2, June. P. 455 – 458.
18. Verlan V. I. Native centers of electron and hole traps in thin amorphous films As_2S_3 AND As_2Se_3 // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2003. V. 5. No. 5. P. 1121 – 1134.
19. Дж. А. Ахмедова Электрофизические и фотоэлектрические свойства стекол $(As_2Se_3)_{1-x}(CdSe)_x$ ($X = 0.01, 0.03, 0.05$) // *Неорганические материалы*, 2019. Т. 55. № 5. С. 544-546.
20. Selahattin Ozdemir, Mahmut Bucurgat. Photoelectrical properties of $TlGaSe_2$ Single Crystals // *Solid State Sciences* 2014. V.33. P. 26-30. DOI:10.1016/j.solidstatesciences.2014.04.006
21. Alexander K Fedotov, M.I.Tarasik, T. G. Mammadov, Ivan Svito et.al. Electrical properties of the layered single crystals $TlGaSe_2$ and $TlInS_2$ // *Przeglad Elektrotechniczny.* 2012. V. 88(7a). P. 301-304.
22. Panich A.M. Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors // *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2008. V.20. P. 203-31.
23. Алиев И.И., Бабанлы К.Н., Ахмедова Дж.А., Мурсакулов Н.Н., Шахбазов М.Г., Гашимов Х.М. Исследование фазообразование в системе $As_2S_3-In_2Te_3$ и свойства полученных фаз // *Евразийский Союз Ученых* 2021. Т.1. № 9(90). С. 25-29.
24. Алиев И. И., Ахмедова Дж А., Кахраманов Э. Т. Характер химическое взаимодействие и стеклообразование в системе $As_2Se_3-In_2Te_3$ // *Научный журн. Архивариус.* 2021. Т: 7. №: 9 (63) С. 18-22.
25. Алиев И. И., Аждарова Д.С., Максудова, Т.Ф. Мехтиева С.А., Кахраманов Э.Т., Ахмедова Дж.А., Шахбазов М.Г. Характер взаимодействия и стеклообразования в системе // *Евразийский Союз Ученых* 2021. Т.1. № 12 (93). С. 39-44.
26. Хворостенко А.С. Халькогениды мышьяка. Обзор из серии "Физические и химические свойства твердого тела". - М., 1972. 92 с.
27. Федоров П.И., Мохосоев М.В., Алексеев Ф.П. Химия галлия, индия и таллия. Изд. Наука. Сибирское Отделение. Новосибирск. 1977. 222 с.
28. Диаграмма состояния двойных металлических систем: Справочник: В3 т.:Т.3.Кн. 2/Под общ. ред. Н.П.Лякишева. -М.: Машиностроение. 2000.-448 с.