

05

Структурная релаксация стеклообразного GeSe₂ при изотермическом отжиге ниже и выше T_g

© Е.В. Александрович,¹ В.С. Минаев,² С.П. Тимошенко²

¹ Институт механики УрО РАН,
426067 Ижевск, Россия

² Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Москва, Россия
e-mail: evalex@udman.ru

(Поступило в Редакцию 29 апреля 2014 г.)

Методами рамановского рассеяния, рентгеновской дифракции и дифференциально-сканирующей калориметрии в температурном диапазоне 300–800 К установлено, что после изотермического отжига порошков стекла GeSe₂ ниже температуры размягчения $T_g = 635 \pm 2$ К фрагменты высокотемпературных полиморфных модификаций, не имеющие дальнего порядка (полиморфоиды НТРМ), распадаются и трансформируются в полиморфоиды низкотемпературной модификации (ЛТРМ) с экзотермическим эффектом. Высокая концентрация в стекле полиморфоидов ЛТРМ и их стабилизация при отжиге ниже T_g способствуют упорядочению и появлению областей когерентного рассеяния от низкотемпературной α -GeSe₂ (3D-формы). При отжиге выше T_g происходит обратная трансформация полиморфоидов ЛТРМ \rightarrow НТРМ с эндотермическим эффектом, приводящая к доминированию в стеклообразном GeSe₂ полиморфоидов НТРМ β -GeSe₂ (2D-формы), и их кристаллизация.

Введение

На протяжении многих лет стеклообразные халькогениды германия привлекают к себе внимание благодаря своим температурно-зависимым свойствам и широкому использованию в интегральных оптических приборах [1].

Диселенид германия имеет несколько кристаллических модификаций, определенных с помощью рамановского рассеяния и рентгенофазового анализа [2–9]: низкотемпературную (ЛТ) α -GeSe₂ с комплексной трехмерной структурой [2], высокотемпературную (НТ) β -GeSe₂ со слоистой двумерной структурой [3] и γ -GeSe₂ модификацию со структурой, подобной SnSe₂ [4]. Стеклообразный или аморфный GeSe₂ (a -GeSe₂) состоит из тетраэдрических структурных единиц GeSe₄, связанных друг с другом в различных областях и через общие вершины, как в ЛТ-фазе, и через общие ребра, как в НТ-фазе GeSe₂ [3].

Структурная релаксация стеклообразного GeSe₂ при его нагревании была изучена в [9–12]. В объемных стеклах GeSe₂ после их отжига выше T_g в течение ~ 100 h были обнаружены кристаллические ЛТ- и НТ-фазы с моноклинной структурой (2D-формой), отличающиеся друг от друга параметрами кристаллической решетки [9–11]. В аморфных пленках GeSe₂ в [12] после их отжига в течение 18 h при различных температурах была выявлена и НТ-фаза (2D-форма), и ЛТ-фаза α -GeSe₂ с орторомбической кристаллической решеткой (3D-формой).

Согласно концепции полимерно-полиморфоидного строения стекла и стеклообразующих жидкостей [13–15] утверждается, что полиморфоиды НТ- и ЛТ-модификаций превращаются в стекле друг в друга, а общепринятая

температура размягчения стекла T_g является температурой реверса T_{w-rev} направления взаимопревращения НТРМ \leftrightarrow ЛТРМ.

В настоящей работе методами рамановского рассеяния, рентгеновской дифракции и дифференциально-сканирующей калориметрии исследовали структурную релаксацию в порошках стекла GeSe₂, отожженных при температурах ниже и выше T_g (T_{w-rev}). Результаты исследований были проанализированы с точки зрения концепции полимерно-полиморфоидного строения стекла и стеклообразующих жидкостей.

Методика эксперимента

Стекла GeSe₂ синтезировали из германия и селена ос. ст. ч. (германий марки ГПЗ-1 и селен марки ОСЧ 17-4, ТУ 6-09-2521-77) в кварцевых ампулах, вакуумированных до 10^{-2} Pa при постоянном перемешивании и температуре 1173 К в течение 20 h. Расплавы закаливали, опуская ампулы в проточную воду.

Опытные образцы в виде мелкодисперсного порошка стекла GeSe₂ (средний диаметр частиц составлял ~ 150 μ km), компактированного на кварцевом стекле размером $10 \times 10 \times 2$ mm, вносили в разогретую до определенной температуры (593 – 753) ± 1 К диффузионную трубчатую печь IR-07 (Bruker). Каждый образец был подвергнут изотермическому отжигу в атмосфере азота в течение 20 min при различной температуре, после чего вынесен из печи и охлажден до комнатной температуры.

Все отожженные образцы прошли исследования на спектрометре Horiba LabRam HR800 при возбуждении излучением He–Ne-лазера с $\lambda = 632.8$ nm

($h\nu_{\text{exc}} = 1.96 \text{ eV}$) и мощностью излучения $\sim 20 \text{ mW}$ при подобных спектральных параметрах при комнатной температуре. Луч лазера фокусировали в пятно диаметром $6 \mu\text{m}$. Для избежания в образцах фотоструктурных изменений плотность потока энергии при получении спектров Рамана была выбрана $\sim 6 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/cm}^2$. Сбор рассеянного света осуществляли по схеме на отражение (180°). Спектральная ширина щели составляла 2 cm^{-1} .

Фазовый состав отожженных порошкообразных образцов был определен по данным рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 Phaser (Bruker) (излучение — $\text{CuK}\alpha$, длина волны $\lambda = 0.1548 \text{ nm}$).

Характеристические температуры стекла GeSe₂ были оценены из измерений методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) с погрешностью $\pm 2 \text{ K}$ и со скоростью нагревания 10 K/min .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена ДСК-кривая синтезированного стекла GeSe₂, полученная при нагревании до его полной кристаллизации со скоростью 10 K/min . Из рисунка следует, что при этих условиях имеют место два эндотермических ($573\text{--}600$ и $635\text{--}710 \text{ K}$) с минимумами при температурах 595 и $683 \pm 2 \text{ K}$ соответственно и два экзотермических ($600\text{--}635$ и $710\text{--}780 \text{ K}$) с максимумами при температурах 635 и $754 \pm 2 \text{ K}$ соответственно эффекта.

Согласно [16], эндотермический эффект на термограммах стекла при нагревании демонстрирует эффект его размягчения. Начало первого эндотермического эффекта при $T = 573 \pm 2 \text{ K}$ соответствует температуре размягчения стекла Таммана $T_g(T)$ (вязкость

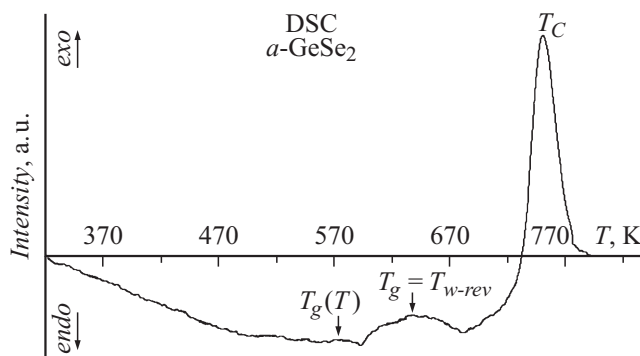


Рис. 1. ДСК-кривая стекла GeSe₂ (скорость нагревания 10 K/min). T_g — общепринятая температура размягчения стекла (вязкость $\eta \sim 10^{12.3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), являющаяся температурой реверса $T_{w\text{-rev}}$ направления взаимопревращения фрагментов структуры различных высокотемпературных и низкотемпературных полиморфных модификаций данного вещества, не имеющих дальнего порядка (полиморфоидов) (НТРМ \leftrightarrow ЛТРМ), $T_g(T)$ — температура размягчения стекла Таммана (вязкость $\eta \sim 10^{15}\text{--}10^{16} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), T_c — температура кристаллизации $a\text{-GeSe}_2$.

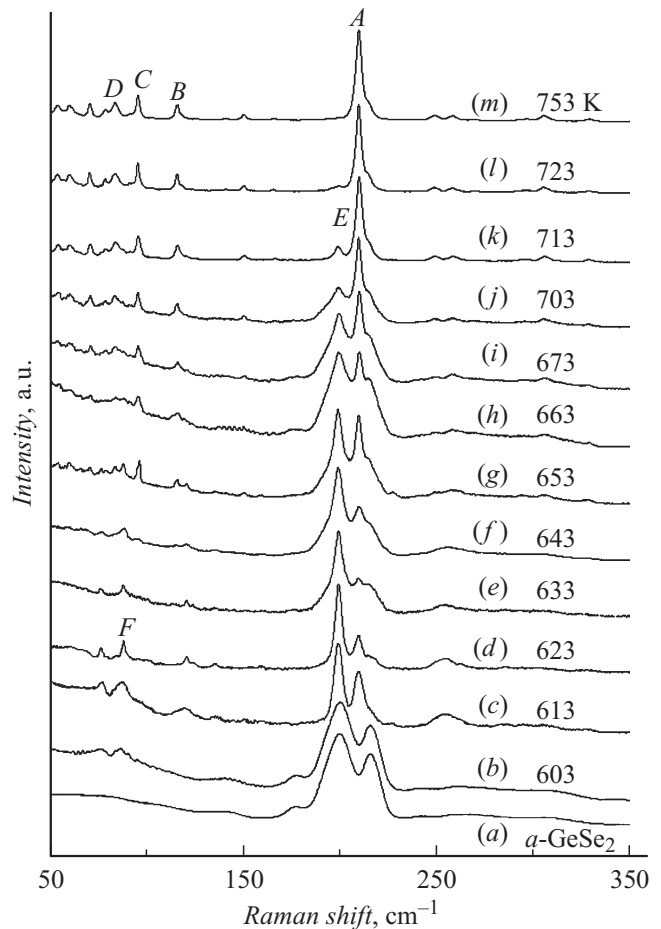


Рис. 2. Рамановские спектры порошков стекол GeSe₂, отожженных при различных температурах ниже ($b\text{--}e$) и выше ($f\text{--}m$) $T_{w\text{-rev}}(T_g) = 635 \pm 2 \text{ K}$ в течение 20 min , (a) — спектр Рамана неотожженного порошка стекла GeSe₂. Температуры отжига показаны на рисунке. Спектры получены в частотном диапазоне $50\text{--}350 \text{ cm}^{-1}$ при комнатной температуре и нормализованы на максимальный пик. Возбуждение излучением He-Ne-лазера с $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ($h\nu_{\text{exc}} = 1.96 \text{ eV}$) и мощностью излучения 20 mW . Линии A, B, C, D относятся к высокотемпературной (HT) фазе со слоистой структурой (2D-форме), а линии E и F — к низкотемпературной (LT) фазе (3D-форме) GeSe₂ [12].

$\eta \sim 10^{15}\text{--}10^{16} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), которая на кривой ДСК имеет более низкое значение, чем общепринятая T_g при $T = 635 \pm 2 \text{ K}$ (начало второго эндотермического эффекта, вязкость $\eta \sim 10^{12.3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) [13,14]. Максимум экзотермического эффекта при $T = 754 \text{ K}$ соответствует температуре кристаллизации стекла T_c . Наши данные по T_g и T_c для стекла GeSe₂ коррелируют с данными, приведенными в [17].

В соответствии с концепцией полимерно-полиморфоидного строения стекла и стеклообразующих жидкостей [13–15] можно предположить, что при нагревании со скоростью 10 K/min в интервале температур $\sim 600\text{--}635 \text{ K}$ (рис. 1) (ниже $T_g(T_{w\text{-rev}})$) неустойчивые при этих температурах полиморфоиды НТРМ

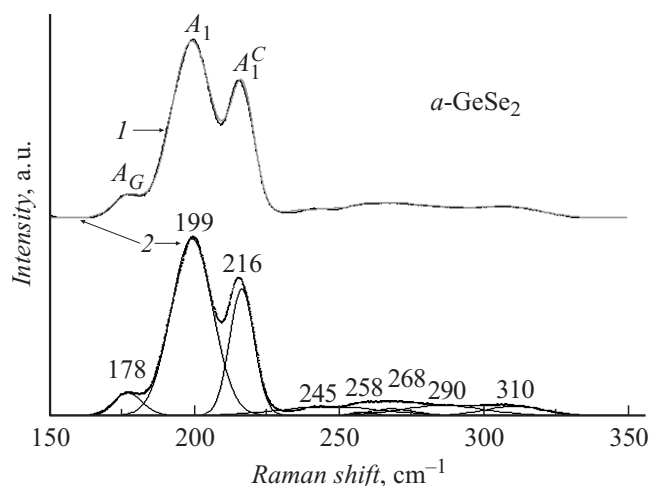


Рис. 3. Разложение спектра Рамана порошка стекла GeSe_2 (без отжига) на гауссовские компоненты. I — экспериментальный, 2 — рассчитанный результирующий. A_G -мода — слабая связь Ge–Ge [19], A_1 — колебания тетраэдров $\text{GeSe}_{4/2}$ в ЛТ α - GeSe_2 с обобщенными вершинами (3D-форме), A_1^C (216 cm^{-1}) — колебания мостиковых битетраэдров $\text{Ge}_2\text{Se}_{8/2}$ в НТ β - GeSe_2 (2D-форме) [8].

распадаются и превращаются в полиморфоиды ЛТРМ (НТРМ \rightarrow ЛТРМ) с выделением тепла (экзоэффект). За экзоэффектом следует эндоэффект ($635\text{--}710 \text{ K}$) с экстремумом при $T = 683 \text{ K}$, являющийся эффектом превращения полиморфоидов ЛТРМ \rightarrow НТРМ.

На рис. 2 показаны спектры Рамана образцов GeSe_2 , отожженных при температурах ниже и выше T_g ($T_{w\text{-rev}} = 635 \pm 2 \text{ K}$). Спектры получены в диапазоне частот $50\text{--}350 \text{ cm}^{-1}$ при комнатной температуре. Все полученные Раман-спектры расшифрованы с помощью программы PeakFit путем разложения их на гауссовские компоненты.

В результате проведенных исследований на спектрах Рамана в спектральном диапазоне $150\text{--}350 \text{ cm}^{-1}$ замечены наиболее интенсивные колебательные моды: 178 (A_G), $199\text{--}200$ (A_1), 216 (211) (A_1^C) cm^{-1} (рис. 3, 4). Моды 178 , 198 , 216 cm^{-1} проявляются в стеклообразном GeSe_2 [18]. Мода A_G характеризует слабую связь Ge–Ge [19], а мода A_1 (рис. 2, пик E; рис. 3, 4) — колебания тетраэдров $\text{GeSe}_{4/2}$ в ЛТ- GeSe_2 с обобщенными вершинами (3D-форму) [8,12,20,21]. Согласно [5], A_1^C -мода (рис. 2, пик A; рис. 3) представляет собой 2 моды: сильную моду 211 cm^{-1} , относящуюся к колебаниям цепочек тетраэдров $\text{GeSe}_{4/2}$, связанных общими вершинами, и слабую моду 216 cm^{-1} , относящуюся к колебаниям мостиковых битетраэдров $\text{Ge}_2\text{Se}_{8/2}$, как в НТ- GeSe_2 (2D-форме). Сосуществование мод A_1 и A_1^C в стеклообразном GeSe_2 свидетельствует о наличии в стекле полиморфоидов двух кристаллических форм GeSe_2 — НТ и ЛТ [8].

На рамановских спектрах отожженных образцов имеются также моды низкой интенсивности: 245 (одиночные кольца Se_8) и 290 (связи Ge–Se–Ge) [22], $250\text{--}256$ (линия, характерная для высокой концентрации колец

Se_8) и $257\text{--}260$ (растягивающие колебания в цепочках Se_n) [23], 252 , 268 , 297 и 307 cm^{-1} (колебания связей в НТ- GeSe_2) [24].

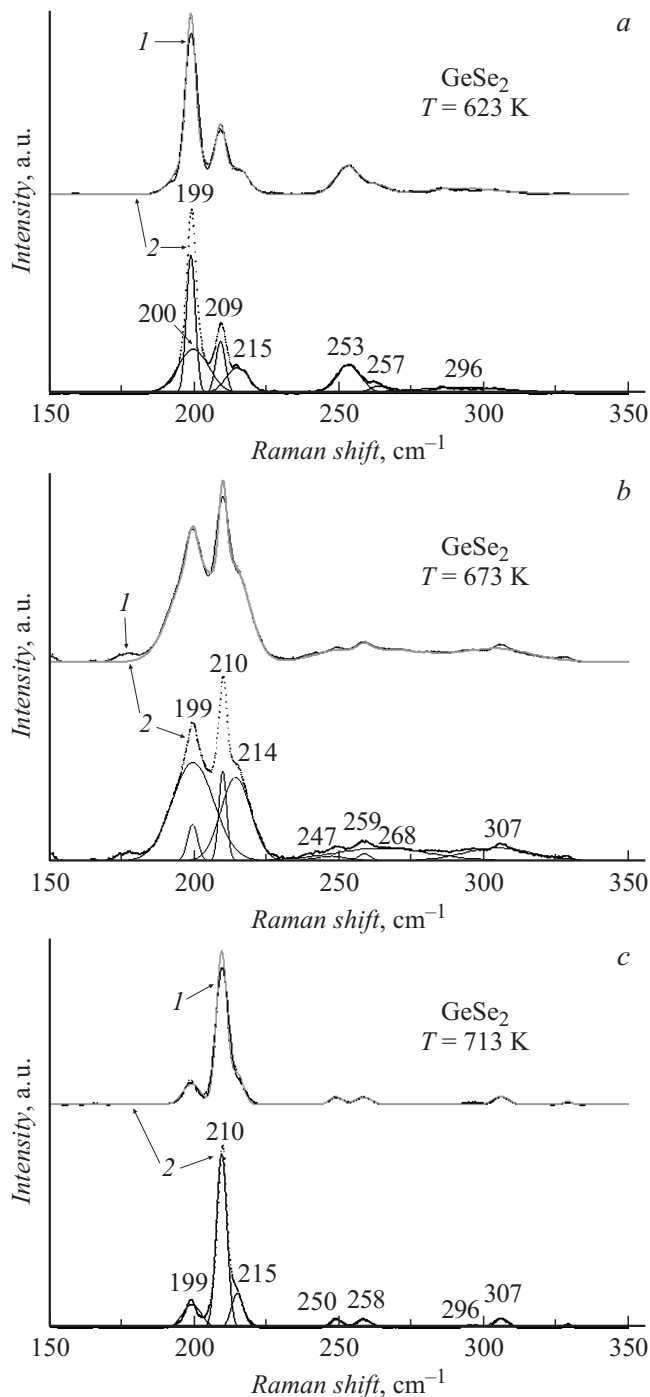


Рис. 4. Разложение спектров Рамана на гауссовские компоненты порошков стекла GeSe_2 , отожженных в течение 20 min при различных температурах: a — 623 , b — 673 , c — 713 K . I — экспериментальный, 2 — рассчитанный результирующий. A_1^C -мода представляет собой 2 моды: сильную моду 211 cm^{-1} , относящуюся к колебаниям цепочек тетраэдров $\text{GeSe}_{4/2}$, связанных общими вершинами, и слабую моду 216 cm^{-1} , относящуюся к колебаниям мостиковых битетраэдров $\text{Ge}_2\text{Se}_{8/2}$, в НТ β - GeSe_2 (2D-форме) [8].

Замечено, что порошкообразные образцы, отожженные до ~ 600 К в течение 20 min, имеют спектры Рамана, подобные спектру неотожженного образца (рис. 2, *a*), который, в свою очередь, идентичен рамановскому спектру стекла GeSe₂, приведенному в [9,25]. При температурах отжига ниже 600 К соотношение интегральных интенсивностей мод A₁ и A₁^C (концентрационное соотношение полиморфоидов (КСП) 3D- и 2D-форм) в стекле остается практически неизменным.

При T_{anneal} → T_g(T_{w-rev}) (635 ± 2 К) на рамановских спектрах появляется линия F, приписываемая ЛТ-фазе (3D-форме) [12] (рис. 2, *c-e*). Соотношение интегральных интенсивностей мод I(A₁)/I(A₁^C), нормализованное на подобное отношение при T = 293 К, становится больше 1 (рис. 5). Это указывает на то, что в стеклообразном GeSe₂ полиморфоиды 3D-формы (мода A₁) начинают доминировать над полиморфоидами 2D-формы (мода A₁^C) в большей степени, чем в неотожженном образце. Концентрация полиморфоидов ЛТРМ резко увеличивается (рис. 2, *d-e*; рис. 5) за счет распада неустойчивых при этих температурах полиморфоидов НТРМ и превращения НТРМ → ЛТРМ, имеющего экзотермический эффект (рис. 1).

На дифрактограммах порошкообразных образцов после изотермического отжига в течение 20 min при T_{anneal} → T_g(T_{w-rev}) (635 ± 2 К) в угловом диапазоне 2θ = 5–100° на фоне аморфного галло появляются линии отражения, близкие к линиям отражения от кристаллической фазы орторомбического ЛТ α-GeSe₂ (пространственная группа Pmmn, параметры кристаллической решетки: a = 0.6953 nm, b = 1.222 nm, c = 2.304 nm [PDF 00-016-0080] [2]) (рис. 6, *a*). Вероятно, высокая концентрация в стекле полиморфоидов ЛТРМ и их стабилизация при отжиге ниже T_g(T_{w-rev})(T_{anneal} < T_c)

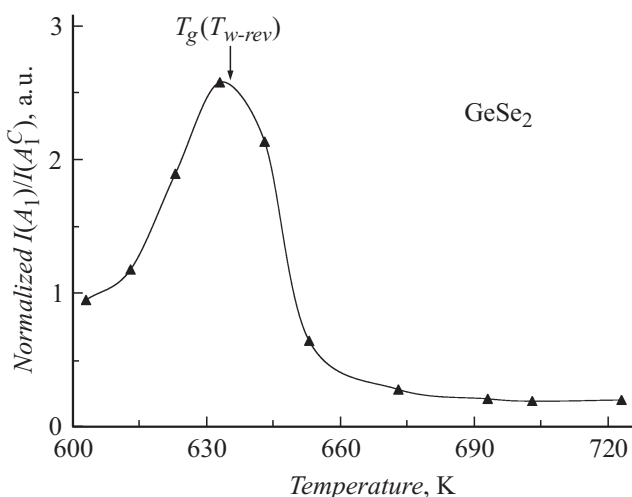


Рис. 5. Отношение интегральных интенсивностей моды A₁ (ЛТРМ) к моде A₁^C (НТРМ) как функции температуры. Данные взяты из Рамановских спектров порошков стекла GeSe₂, полученных после их изотермического отжига. Отношения нормализованы к подобному отношению при T = 293 К. Ошибки находятся в пределах символов.

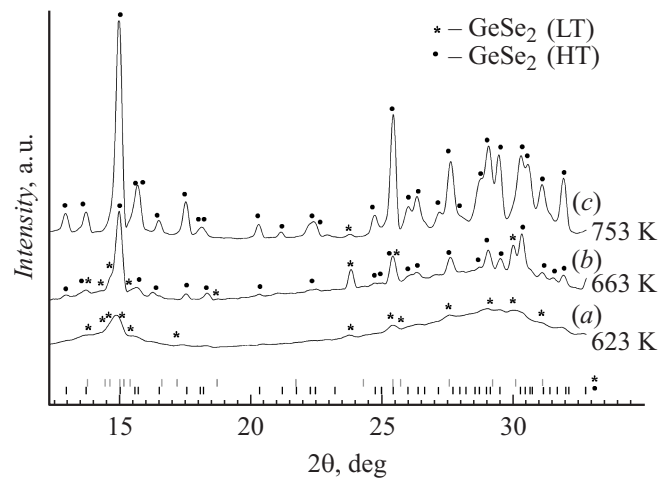


Рис. 6. Дифрактограммы порошков стекла GeSe₂, отожженных при различных фиксированных (±1 К) температурах в интервале 593–753 К (*a-c*) с шагом 10 К в течение 20 min в атмосфере азота. Температуры отжига показаны на рисунке. Дифрактограммы нормализованы на интенсивность максимального пика. * и • — линии отражений от кристаллических решеток ЛТ (3D-формы) и НТ (2D-формы) фаз GeSe₂, соответственно. Внизу показаны штрихрентгенограммы данных фаз ([PDF 01-071-0117] и [PDF 00-016-0080], соответственно).

способствуют упорядочению и появлению областей когерентного рассеяния. В [26] в наноразмерных аморфных пленках Ge–Se были также обнаружены неравновесные ЛТ кристаллические фазы, застabilизированные в стеклообразной матрице.

Стабильность 3D-формы заметили также в [12] при отжиге аморфных пленок GeSe₂ ниже T_g(T_{w-rev}). Наши результаты коррелируют с результатами этой работы, где после отжига в течение 18 h при T_{anneal} < T_g(T_{w-rev}) в образцах была также обнаружена кристаллическая фаза ЛТ α-GeSe₂ с атомным окружением, подобным окружению фазы α-GeSe₂.

В [11] было установлено, что объемные стекла GeSe₂ являются устойчивыми к кристаллизации и, чтобы их закристаллизовать, необходим температурный отжиг в течение ~ 60–100 h. Авторами [9–11] при T_{anneal} > T_g был осуществлен отжиг объемного стекла GeSe₂, при котором оно полностью кристаллизовалось в ЛТ- и (или) НТ-фазу GeSe₂ с моноклинными кристаллическими решетками (2D-формой).

При нагревании наших образцов при T_{anneal} > T_g(T_{w-rev}) (635 ± 2 К), как и в [9–11], стеклообразный GeSe₂ переходит в область стабильности полиморфоидов НТРМ и нестабильности полиморфоидов ЛТРМ. До ~ 650 К полиморфоиды 3D-формы еще доминируют над полиморфоидами 2D-формы (рис. 2, *f*; рис. 5), как и в неотожженном образце (рис. 2, *a*), но уже активно переходят в последние (ЛТРМ → НТРМ) с поглощением тепла (эндоэффект с экстремумом при T = 683 К) (рис. 1). При T_{anneal} > 650 К соотношение интегральных интенсивностей мод I(A₁)/I(A₁^C) (КСП ЛТРМ/НТРМ)

становится меньше, чем в неотожженном образце, и при $T_{\text{anneal}} = 653$ К интегральные интенсивности мод A_1 и A_1^C становятся равными друг другу (рис. 2, *g*).

При дальнейшем повышении T_{anneal} в стеклообразном GeSe_2 начинают преобладать полиморфоиды 2D-формы (A_1^C) (рис. 2, пик *A*; рис. 4, *b-c*; рис. 5). На рамановских спектрах появляются линии *B, C, D*, приписываемые [12] к НТ $\beta\text{-GeSe}_2$ (рис. 2, *g-m*). На дифракционных картинах отожженных образцов GeSe_2 (рис. 6, *b-c*) появляются отражения от моноклинного НТ $\beta\text{-GeSe}_2$ (пространственная группа $P21/c$, параметры кристаллической решетки: $a = 0.7016$ nm, $b = 1.6796$ nm, $c = 1.1831$ nm, $\beta = 90.65^\circ$ [PDF 01-071-0117] [3]). При $T_{\text{anneal}} > 710$ К на дифрактограммах имеются линии отражения только от НТ $\beta\text{-GeSe}_2$ (рис. 6, *c*). При $T_{\text{anneal}} \rightarrow T_c$ имеет место полная кристаллизация образцов (рис. 1, рис. 2, *m*).

Заключение

На основе концепции полимерно-полиморфоидного строения стекла и стеклообразующих жидкостей проведен сравнительный структурный анализ результатов исследований методами рамановского рассеяния, рентгеновской дифракции и дифференциально-сканирующей калориметрии порошков стекла GeSe_2 , отожженных при различных температурах ниже и выше T_g ($T_{w\text{-rev}} = 635 \pm 2$ К).

Обнаружено, что температурная зависимость нормализованного соотношения интегральных интенсивностей $I(A_1)/I(A_1^C)$ (КСП НТРМ/ЛТРМ) в стекле является немонотонной. При изотермическом отжиге ниже T_g ($T_{w\text{-rev}}$) полиморфоиды НТРМ распадаются и трансформируются в полиморфоиды ЛТРМ (НТРМ \rightarrow ЛТРМ) с выделением тепла (экзоэффект) вплоть до появления областей когерентного рассеяния ЛТ- GeSe_2 (3D-формы). При этом нормализованное отношение $I(A_1)/I(A_1^C) > 1$.

При отжиге образцов при температурах выше T_g ($T_{w\text{-rev}}$) происходит обратная трансформация ЛТРМ \rightarrow НТРМ с поглощением тепла (эндоэффект), вызывающая доминирование полиморфоидов НТРМ (2D-формы) в стеклообразном GeSe_2 и их кристаллизацию (нормализованное отношение $I(A_1)/I(A_1^C) < 1$).

Авторы выражают благодарность Д.Г. Калюжному и К.Г. Михееву за помощь при проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Ibrahim M.M., Balboul M.R., Fayek S.A., Soliman M.A. // J. Non-Cryst. Solids. 2011. Vol. 357. N 10. P. 2035–2038.
- [2] Лю Цюнь-хуа, Пашилкин А.С., Новосёлова А.В. // ЖНХ. 1962. Т. 7. N 9. С. 2159–2161.
- [3] Dittmar G., Schäfer H. // Acta Crystallogr. (B). 1976. Vol. 32. P. 2726–2728.
- [4] Блецкан Д.И., Герасименко В.С., Сичка М.Ю. // Кристаллография. 1979. Т. 24. N 1. С. 83–89.

- [5] Popovic Z.V., Stolz H.J. // Phys. Stat. Sol. B. 1981. Vol. 108. N 1. P. 153–163.
- [6] Popovic Z.V., Gajic R. // Phys. Rev. (B). 1986. Vol. 33. N 8. P. 5878–5879.
- [7] Inoue K.K., Matsuda O., Murase K. // Sol. Stat. Commun. 1991. Vol. 79. P. 905–910.
- [8] Bridenbaugh P.M., Espinosa G.P., Griffiths J.E., Phillips J.C., Remeika J.P. // Phys. Rev. B. 1979. Vol. 20. N 10. P. 4140–4144.
- [9] Sakai K., Uemoto T., Yokoyama H., Fukuyama A., Yoshino K.T., Ikari T., Maeda K. // J. Non-Cryst. Sol. 2000. Vol. 266–269. P. 933–937.
- [10] Sakai K., Maeda K., Yokoyama H., Ikari T. // J. Non-Cryst. Sol. 2003. Vol. 320. P. 223–230.
- [11] Sakai K., Yoshino K., Fukuyama A., Yokoyama H., Ikari T., Maeda K. // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. P. 1058–1061.
- [12] Inoue K., Kawamoto K., Murase K. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. Vol. 95–96. P. 517–524.
- [13] Minaev V.S., Timoshenkov S.P., Kalugin V.V., Kovalev S.I., Novikov S.N., Vasiliev V.P. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2009. Vol. 11. N 12. P. 1950–1953.
- [14] Minaev V.S., Timoshenkov S.P., Kalugin V.V. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2011. Vol. 13. N 11–12. P. 1393–1399.
- [15] Minaev V.S., Timoshenkov S.P., Kalugin V.V., Novikov S.N. // Adv. Mater. Research. 2008. Vol. 39–40. P. 123–125.
- [16] Тамман Г. Стеклообразное состояние. / М.-Л.: ОНТИ, 1935. 136 с.
- [17] Виноградова Г.З. Стеклообразование и фазовые равновесия в халькогенидных системах. Двойные и тройные системы / Под ред. В.Б. Лазарева. М.: Наука, 1984. 176 с.
- [18] Murase K., Inoue K. Desordered semiconductors / Ed. By M.A. Kastner, G.A. Thomas, S.R. Ovshinsky. NY: Plenum, 1987. 297 p.
- [19] Matsuda O., Inoue K., Nakane T. and Murase K. // J. Non-Cryst. Sol. 1992. Vol. 150. N 1–3. P. 202–206.
- [20] Kumagai N., Shirafuji J., Inuishi Y. // J. Phys. Soc. Jpn. 1977. Vol. 42. P. 1262–1268.
- [21] Inoue K., Matsuda O., Murase K. // J. Non-Cryst. Sol. 1992. Vol. 150. N 1–3. P. 197–201.
- [22] Goyal D.R., Maan A.S. // J. Non-Cryst. Sol. 1995. Vol. 183. P. 182–185.
- [23] Wang Y., Murase K. // J. Non-Cryst. Sol. 2003. Vol. 326–327. P. 379–384.
- [24] Popovic Z.V., Jaksic Z., Raptis Y.S., Anastassakis E. // Phys. Rev. (B). 1998. Vol. 57. N 6. P. 3418–3422.
- [25] Mitkova M., Kozicki M.N., Kim H.C., Alford T.L. // J. Non-Cryst. Sol. 2006. Vol. 352. P. 1986–1990.
- [26] Александрович Е.В., Степанова Е.В., Вахрушев А.В., Александрович А.Н., Булатов Д.Л. // ЖТФ. 2013. Vol. 83. N 9. P. 50–55.