

СТРУКТУРА СТЕКОЛ ГЕРМАНИЙ-СЕРА, ГЕРМАНИЙ-СЕЛЕН И ГЕРМАНИЙ-ТЕЛЛУР

Методом мессбауэровской спектроскопии на изотопах ^{129}Te (^{129}I) и ^{119}Sn показано, что стекла $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$, обогащенные халькогеном ($x \geq 0,66$), построены из структурных единиц, включающих двухкоординированные атомы халькогена X в цепочках типа $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ и $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$, тогда как германий в этих стеклах только четырехвалентен и четырехкоординирован, причем в локальном окружении атомов германия находятся только атомы халькогена. Стекла $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$, обедненные халькогеном, построены из структурных единиц, включающих двух- и трехкоординированные атомы халькогена (соответственно в цепочках типа $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ и $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$), тогда как германий в этих стеклах стабилизируется как в четырехвалентном и четырехкоординированном состоянии, так и в двухвалентном и трехкоординированном состоянии, причем в локальном окружении атомов германия находятся только атомы халькогена.

Ключевые слова: локальная структура, халькогенидные стекла, мессбауэровская спектроскопия.

V. Bordovsky, N. Anisimova, A. Marchenko, H. M. Ali, P. Seregin

GERMANIUM-SULFURS, GERMANIUM-SELENIUM AND GERMANIUM-TELLURIUM GLASS STRUCTURE

By Mossbauer spectroscopy method on ^{129}Te (^{129}I) and ^{119}Sn isotopes it is shown, that chalcogenide enriched ($x \geq 0,66$) glasses $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ and $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ are constructed of the structural units including two co-ordinate atoms of chalcogenide X in chains of the type $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ и $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$, whereas Germanium in these glasses is only tetravalent and four co-ordinate, and in a local environment of Germanium atoms there are chalcogenide atoms only. Chalcogenide impoverished glasses $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ and $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$, are constructed of $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ and $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ structural units including two (in $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ chain types) and three co-ordinate chalcogenide atoms (in $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ chain

types). Germanium in these glasses is stabilized in tetravalent and four co-ordinate states or in bivalent and three co-ordinate states, and in a local environment of Germanium there are chalcogenide atoms only.

Keywords: local structure, chalcogenide glasses, Mossbauer spectroscopy.

Известно, что физико-химические свойства стеклообразных полупроводников определяются их локальной структурой и поэтому экспериментальное определение структуры ближнего порядка стекол является актуальной задачей [3, с. 143]. Широкое использование в подобных исследованиях находит мессбауэровская спектроскопия. Поскольку число мессбауэровских изотопов, пригодных для структурно-химических исследований, невелико, то целесообразно развитие мессбауэровских исследований с использованием примесных атомов, когда мессбауэровский изотоп вводится в стекла в качестве «метки» и по его поведению делаются выводы о локальной структуре стекол [2, с. 706].

Настоящая работа посвящена исследованию локальной структуры атомов халькогена в стеклообразных полупроводниках систем германий-сера, германий-селен и германий-теллур ($\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$) методом эмиссионной мессбауэровской спектроскопии на примесных атомах ^{129}Te (^{129}I), которые вводились в структуру стекла методом ядерной трансмутации. С этой целью стекла синтезировались с использованием радиоактивного изотопа ^{129}Te после распада которого в узлах халькогена образовывался зонд ^{129}I , параметры мессбауэровского спектра которого несут информацию о природе локального окружения атомов халькогенов. Для получения информации о природе локального окружения атомов германия использовалась абсорбционная мессбауэровская спектроскопия на изотопе ^{119}Sn .

Методика эксперимента.

Стекла синтезировались из элементарных веществ в вакуумированных до 10^{-3} мм рт. ст. тонкостенных кварцевых ампулах при 950°C с последующей закалкой расплава (~ 1 г) в воду. Стеклообразное состояние фиксировали по отсутствию включений, отсутствию линий на дебаеграммах и раковистому излому. Для исследований были выбраны стекла составов $\text{Ge}_{20}\text{S}_{90}$, $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, $\text{Ge}_{40}\text{S}_{60}$, $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{90}$, $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70}$, $\text{Ge}_{40}\text{Se}_{60}$, $\text{Ge}_{20}\text{Te}_{80}$, а также стекла $\text{Ge}_{28,5}\text{Pb}_{15}\text{S}_{56,5}$, $\text{Ge}_{27}\text{Pb}_{17}\text{Se}_{56}$ и аморфный сплав $\text{Ge}_{50}\text{Te}_{50}$. Мессбауэровские источники ^{129}Te (^{129}I) готовились путем плавления готовых стекол, причем в шихту добавлялся препарат безносительного ^{129}Te . Последний получали путем облучения обогащенного до 98% изотопа ^{128}Te потоком нейтронов $\sim 2,10^{20}$ см $^{-2}$, последующего растворения облученного препарата в H_2O_2 и хроматографического выделения ^{129}Te . Концентрация ^{129}Te во всех образцах была порядка 10^{16} – 10^{17} см $^{-3}$.

Олово в виде обогащенного до 92% изотопа ^{119}Sn вводилось в исходную шихту (его концентрация составляла 0,5 ат%).

При измерении мессбауэровских спектров ^{129}Te (^{129}I) поглотителем служил K^{129}I с поверхностной плотностью 15 мг/см 2 по ^{129}I . Изомерные сдвиги приводятся относительно спектра KI. Стандартный источник Zn^{129}Te с использованным поглотителем имел спектр в виде одиночной линии шириной $G = 0,72 \pm 0,04$ мм/с, которая принималась за аппаратную ширину спектральной линии ^{129}I .

При измерении мессбауэровских спектров ^{119}Sn источником служил $\text{Ca}^{119\text{m}}\text{SnO}_3$, поверхностная плотность поглотителей составляла $0,1 \text{ мг/см}^2$ по ^{119}Sn . Изомерные сдвиги спектров ^{119}Sn приведены относительно CaSnO_3 . Стандартный поглотитель CaSnO_3 такой же поверхностной плотности с использованным источником имел спектр в виде одиночной линии с шириной $G = 0,80 \text{ мм/с}$, которая принималась за аппаратную ширину спектральной линии ^{119}Sn .

Экспериментальные результаты и обсуждение.

Типичные мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ стекол приведены на рис. 1–3, а мессбауэровские спектры ^{119}Sn — на рис. 4–6. Параметры спектров сведены в таблицах 1 и 2.

Для всех стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$, обогащенных халькогеном ($x \geq 0,66$), мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ представляют собой наложение двух квадрупольных мультиплетов I и II (см. рис. 1а, б, 2а, б, 3а).

Рис. 1. Мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ стекол $\text{Ge}_{20}\text{S}_{90}$ (а), $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ (б), $\text{Ge}_{40}\text{S}_{60}$ (в).

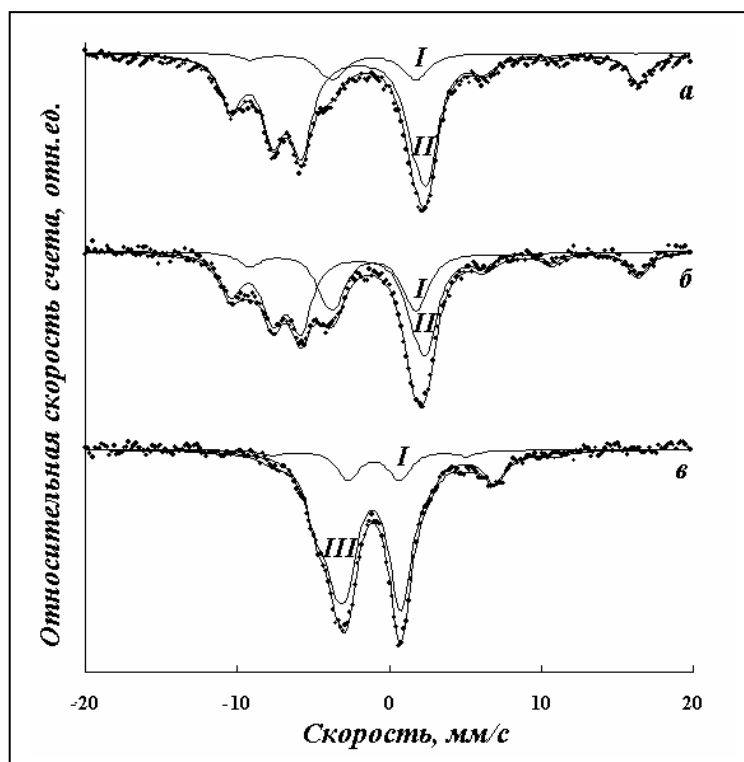
Показано разложение спектров на мультиплеты I (отвечает двухкоординированной сере в цепочках



II (отвечает двухкоординированной сере в цепочках



и III (отвечает трехкоординированной сере в



Квадрупольный мультиплет I с меньшими значениями изомерного сдвига IS и постоянной квадрупольного взаимодействия (по модулю $|C|$) отвечает атомам ^{129}I , которые образуют химические связи только с атомами германия в своем ближайшем окружении. Для этого мультиплета наблюдается отрицательная величина C , и, следовательно, он относится к атомам ^{129}I , замещающим атомы двухкоординированного халькогена X в цепочках типа $\cdot\text{Ge}-\text{X}-\text{Ge}\cdot$. Аналогич-

ные структурные единицы наблюдаются в кристаллических GeSe_2 и GeS_2 , причем степень искажения для них в кристалле и в стекле одинакова, что и приводит к близости величин C для кристаллических GeS_2 , GeSe_2 и стекол. Отметим, что мессбауэровские спектры ^{129}I кристаллических соединений GeS_2 и GeSe_2

представляют собой наложение двух квадрупольных мультиплетов, что отражает факт присутствия в исследованных образцах второй фазы.

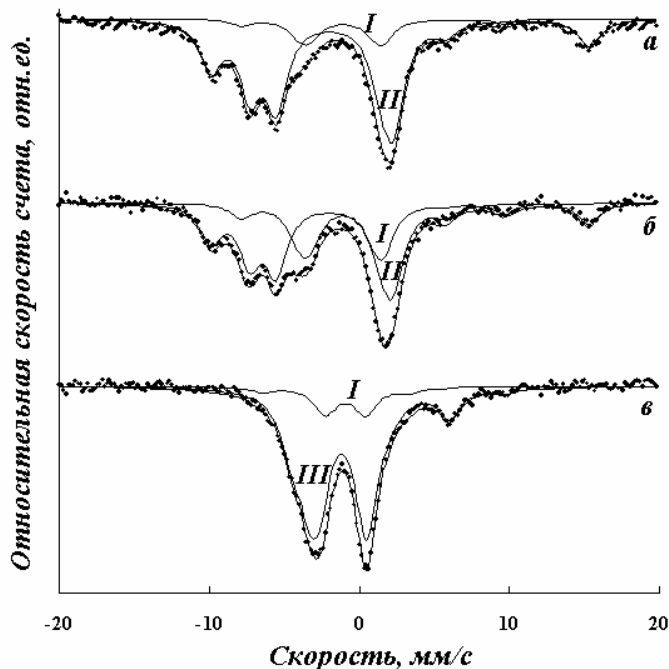


Рис. 2. Мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ стекол $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{90}$ (а), $\text{Ge}_{30}\text{Se}_{70}$ (б), $\text{Ge}_{40}\text{Se}_{60}$ (в). Показано разложение спектров на мультиплеты I (отвечает двухкоординированному селену в цепочках -Ge-Se-Ge-), II (отвечает двухкоординированному селену в цепочках -Ge-Se-Se-Ge-) и III (отвечает трехкоординированному селену в цепочках -Ge-Se-Ge-).

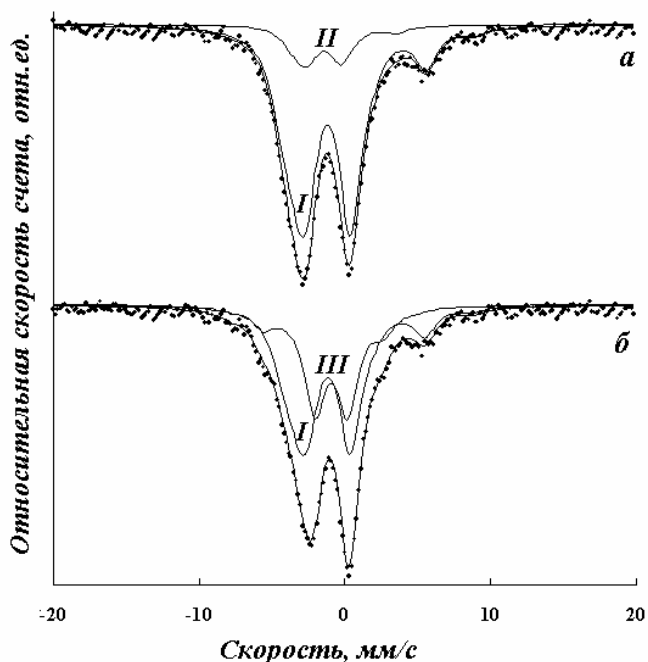


Рис. 3. Мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ стеклообразного сплава $\text{Ge}_{20}\text{Te}_{80}$ (а) и аморфного сплава $\text{Ge}_{50}\text{Te}_{50}$ (б). Показано разложение спектров на мультиплеты I (отвечает двухкоординированному теллуру в цепочках -Ge-Te-Ge-), II (отвечает двухкоординированному теллуру в цепочках -Ge-Te-Te-Ge-) и III (отвечает трехкоординированному теллуру в цепочках -Ge-Te-Ge-).

Квадрупольный мультиплет II с большими значениями IS и |C| следует отнести к атомам ^{129}I , которые образуют химические связи с атомами халькогена в своем ближайшем окружении. Близкие величины IS и C наблюдаются для эмиссионных мессбауэровских спектров $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ в сере и селене. Для этого мультиплета также наблюдается отрицательная величина C и, следовательно, он относится к атомам ^{129}I , замещающим атомы двухкоординированного халькогена в цепочках типа $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$. Очевидно, что после радиоактивного превращения ^{129}Te дочерний атома иода в таких цепочках образует химическую связь только с атомами халькогена. Отметим, что по мере уменьшения индекса x площадь под спектром II для стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ уменьшается, что отражает факт уменьшения содержания цепочек $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$ в структуре стекол.

Для стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$, обедненных халькогеном ($x < 0,66$), мессбауэровские спектры $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ также представляет собой наложение двух квадрупольных мультиплетов, но различающихся знаком постоянной квадрупольного взаимодействия (рис. 1в, 2в). Квадрупольный мультиплет I с большим значением |C|, как и в предыдущих случаях, следует отнести к атомам ^{129}I , которые образуют химические связи с атомами германия в своем ближайшем окружении. Для этого спектра наблюдается отрицательная величина C, и, следовательно, он относится к атомам ^{129}I , замещающим атомы двухкоординированного халькогена в цепочках типа $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$.

Квадрупольный мультиплет III с меньшим значением |C| отвечает атомам ^{129}I , которые образуют химические связи с атомами германия в своем ближайшем окружении. Для этого спектра наблюдается положительная величина C, и, следовательно, он относится к атомам ^{129}I , замещающим атомы трехкоординированного халькогена в структурных единицах типа $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$. Аналогичные структурные единицы имеют место в кристаллических GeS и GeSe, однако степень искажения для них в стекле значительно больше, что и приводит к большей величине.

Объемные стекла системы $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ не могут быть получены в сплавах, обедненных теллуром, и поэтому для идентификации трехкоординированного состояния атомов теллура мы использовали аморфный сплав стехиометрического состава GeTe, который был получен путем выливания расплава на металлическую плиту, охлаждаемую жидким азотом. Мессбауэровский спектр $^{129}\text{Te}(^{129}\text{I})$ такого сплава представлял собой наложение квадрупольных мультиплетов I и III (см. рис. 3б). Мультиплет I отвечает атомам ^{129}I , которые замещают атомы двухкоординированного халькогена в цепочках типа $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$. Мультиплет III отвечает атомам ^{129}I , которые замещают атомы 3-х координированного халькогена в структурных единицах типа $-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-\text{X}-\overset{|}{\underset{|}{\text{Ge}}}-$. Аналогичные структурные единицы имеют место в кристаллическом GeTe, однако степень искажения для них в аморфном сплаве значительно больше, что и приводит к большей величине C.

Следует отметить, что построение стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$, обогащенных халькогеном, из структурных единиц типа $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ и $\begin{array}{c} | \\ \text{Ge} - \text{X} - \text{X} - \text{Ge} \\ | \end{array}$ требует стабилизации в структурной сетке стекол четырехвалентного и четырехкоординированного германия. Если для стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ такая ситуация вполне естественна (существуют стабильные сульфид GeS_2 и селенид GeSe_2 четырехвалентного германия), то для стекла $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ эта ситуация не очевидна, поскольку отсутствует теллурид четырехвалентного германия. В этом случае необходимы дополнительные экспериментальные аргументы в пользу стабилизации в структурной сетке стекла $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ четырехвалентного и четырехкоординированного германия. С другой стороны, наличие в стеклах $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$, обедненных халькогеном, трехкоординированного состояния халькогена требует стабилизации части атомов германия в двухвалентном состоянии. Очевидно, что это требование противоречит феноменологическому правилу Мота — Губанова о стабилизации в структурной сетке халькогенидных стекол атомов с наивысшей валентностью [4, с. 114]. И в этом случае необходимо независимое экспериментальное подтверждение факта стабилизации германия в двухвалентном состоянии.

Для идентификации валентного и координационного состояния германия нами было предпринято исследование стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ методом мессбауэровской спектроскопии на изотопе ^{119}Sn : предполагалось, что примесные атомы олова изовалентно замещают атомы германия в структурной сетке стекла и локальная структура олова отражает локальную структуру атомов германия.

Мессбауэровские спектры ^{119}Sn стекол $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{Te}_x$, обогащенных халькогеном ($x \geq 0,66$), представляют собой одиночные линии I, отвечающие четырехвалентному олову (рис. 4а, 5а, 6а), причем величина изомерного сдвига спектров стекол $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ типична для олова, имеющего в локальном окружении только атомы халькогена (типа спектров соединений GeSe_2 и GeS_2). Особо отметим, что даже стекло $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{Te}_x$ демонстрирует присутствие в мессбауэровском спектре ^{119}Sn только четырехвалентного состояния олова, причем изомерный сдвиг спектра близок к изомерному сдвигу мессбауэровского спектра $\alpha\text{-Sn}$, для которого известна идеальная система тетраэдрических связей. Иными словами, в стеклах $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ атомы германия четырехвалентны и четырехкоординированы. Кристаллизация стекол $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{Se}_x$ не изменяет валентного состояния олова (см. табл. 2), тогда как кристаллизация стекла $\text{Ge}_{19,5}\text{Sn}_{0,5}\text{Te}_{80}$ сопровождается изменением мессбауэровского спектра ^{119}Sn — он представляет собой одиночную линию, отвечающую двухвалентному олову (см. рис. 6б). Иными словами, в кристаллическом сплаве $\text{Ge}_{20}\text{Te}_{80}$, как и ожидалось, германий двухвалентен (что подтверждается данными рентгенофазового анализа — при кристаллизации стекла $\text{Ge}_{20}\text{Te}_{80}$ выделяются фазы GeTe и теллура).

Мессбауэровские спектры ^{119}Sn стекол $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{99,5-x}\text{Sn}_{0,5}\text{Se}_x$, обедненных халькогеном ($x < 0,66$), представляют собой наложение одиночной линии I, отвечающей четырехвалентному олову, и квадрупольного дублета II, отвечающего двухвалентному олову (рис. 4б, 5б), изомерный сдвиг которого

типичен для спектров соединений двухвалентного и трехкоординированного олова SnS и SnSe.

Рис. 4. Рис. 4. Мессбауэровские спектры ^{119}Sn стекол $\text{Ge}_{29,5}\text{Sn}_{0,5}\text{S}_{70}$ (а), $\text{Ge}_{39,5}\text{Sn}_{0,5}\text{S}_{60}$ (б) и $\text{Ge}_{28}\text{Sn}_{0,5}\text{Pb}_{15}\text{S}_{56,5}$ (в). Показано разложение спектров на синглет I (отвечает четырехвалентному и четырехкоординированному олову) и квадрупольный дублет II (отвечает двухвалентному и трехкоординированному олову)

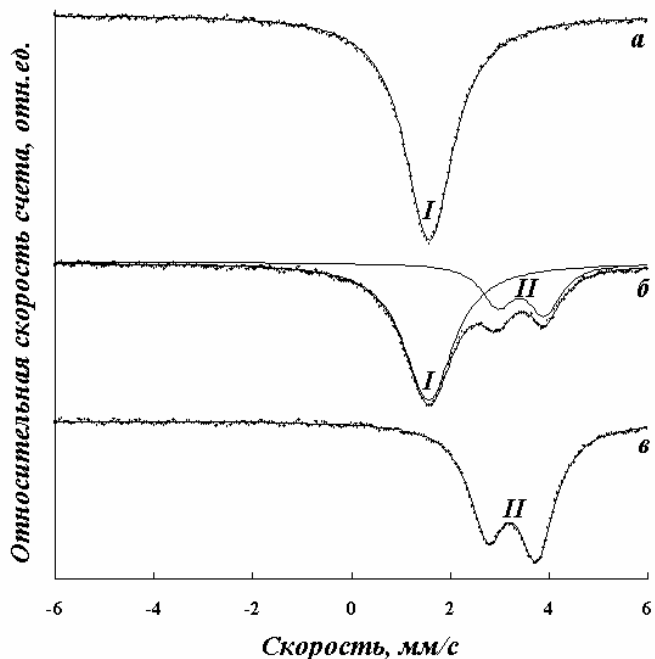
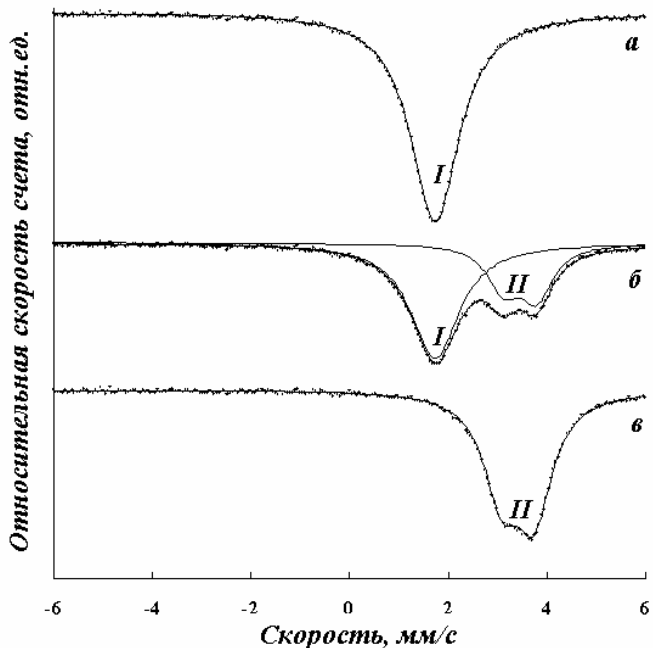


Рис. 5. Мессбауэровские спектры ^{119}Sn стекол $\text{Ge}_{29,5}\text{Sn}_{0,5}\text{Se}_{70}$ (а), $\text{Ge}_{39,5}\text{Sn}_{0,5}\text{Se}_{60}$ (б) и $\text{Ge}_{28}\text{Sn}_{0,5}\text{Pb}_{15}\text{Se}_{56,5}$ (в). Показано разложение спектров на синглет I (отвечает четырехвалентному и четырехкоординированному олову) и квадрупольный дублет II (отвечает двухвалентному и трехкоординированному олову)



Это позволяет заключить, что валентное и координационное состояние атомов германия в стеклах $\text{Ge}_{100-x}\text{S}_x$, $\text{Ge}_{100-x}\text{Se}_x$ и $\text{Ge}_{100-x}\text{Te}_x$ зависит от содержания халькогена в составе стекла: в стеклах, обогащенных халькогеном, германий только четырехвалентен и четырехкоординирован, тогда как в стеклах, обедненных халькогеном, германий стабилизируется как в четырехвалентном и четырехкоординированном состоянии, так и двухвалентном и трехкоординиро-

ванном состоянии. Во всех случаях в локальном окружении атомов германия находятся только атомы халькогена.

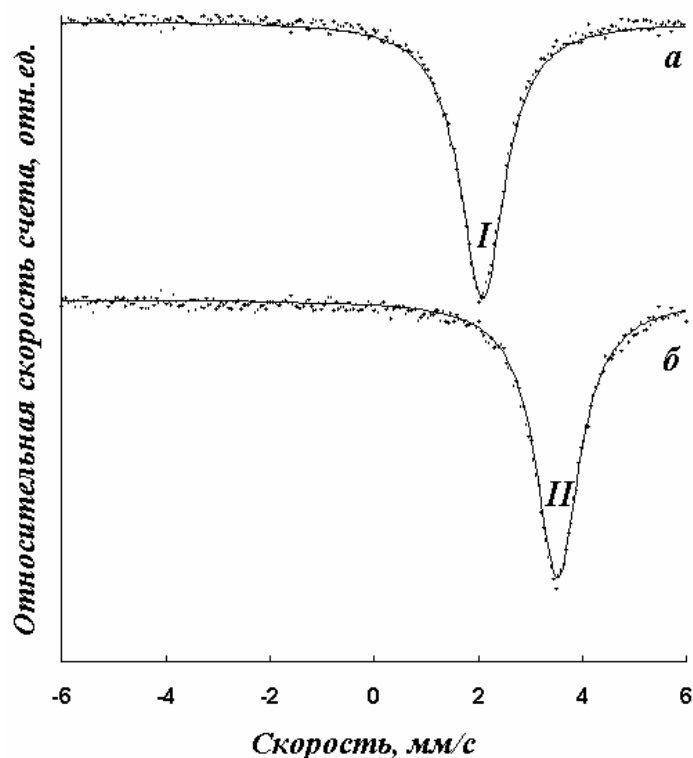


Рис. 6. Мессбауэровские спектры ^{119}Sn стеклообразного (а) и кристаллического (б) сплава $\text{Ge}_{19,5}\text{Sn}_{0,5}\text{Te}_{70}$. Показано разложение спектров на синглет I (отвечает четырехвалентному и четырехкоординированному олову) и синглет II (отвечает двухвалентному и трехкоординированному олову)

Особенностью вхождения примесных атомов олова в структурную сетку стекол типа $\text{Ge}_{40}\text{X}_{60}$ является зависимость соотношения двух- и четырехвалентного олова в стекле от присутствия в стекле атомов свинца — для стекол, содержащих свинец ($\text{Ge}_{28,5}\text{Pb}_{15}\text{S}_{56,5}$ и $\text{Ge}_{27}\text{Pb}_{17}\text{Se}_{56}$), в мессбауэровских спектрах ^{119}Sn наблюдается только двухвалентное олово (рис. 4в, 5в). Поскольку свинец в структуре таких стекол только двухвалентен [1, с. 431], то можно сделать вывод, что примесные атомы олова преимущественно стабилизируются в положении свинца в двухвалентном состоянии.

Заключение.

Стекла $\text{Ge}_{1-x}\text{S}_x$ и $\text{Ge}_{1-x}\text{Se}_x$, обогащенные халькогеном, построены из структурных единиц, включающих двухкоординированные атомы халькогена в цепочках типа $-\text{Ge}-\text{X}-\text{Ge}-$ и $-\text{Ge}-\text{X}-\text{X}-\text{Ge}-$, тогда как стекла, обедненные халькогеном, построены из структурных единиц, включающих двух- (в цепочках типа $-\text{Ge}-\text{X}-\text{Ge}-$) и трехкоординированные атомы халькогена (в цепочках типа $-\text{Ge}-\text{X}-\text{Ge}-$). Валентное и координационное состояния атомов германия в стеклах зависит от содержания халькогена в составе стекла. В стеклах, обогащенных халькогеном, германий только четырехвалентен и четырехкоординирован, а в стеклах, обедненных халькогеном, германий стабилизируется как в четырехва-

ФИЗИКА

лентном и четырехкоординированном состоянии, так и двухвалентном и трехкоординированном состоянии, но во всех случаях в локальном окружении атомов германия находятся только атомы халькогена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бордовский Г. А., Кастро Р. А.* Состояние атомов железа и олова в стеклообразных полупроводниках $\text{Ge}_{28.5}\text{P}_{15}\text{S}_{56.5}$ и $\text{Ge}_{27}\text{P}_{17}\text{Se}_{56}$ // Физика и химия стекла. 2006. Т. 32. С. 431–437.
2. *Бордовский Г. А., Марченко А. В., Серегин П. П.* Влияние аморфизации на локальное окружение атомов в халькогенидах мышьяка // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34. С. 706–711.
3. *Любин В. М., Клебанов А. В.* Новые результаты фундаментальных и прикладных исследований халькогенидных стеклообразных полупроводников // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Физика. 2006. 6(15). С. 143–151.
4. *Фельц А.* Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела. М.: Мир, 1986. 556 с.

REFERENCES

1. *Bordovskii G. A., Castro R. A.* Sostoyanie atomov zheleza i olova v stekloobraznykh poluprovodnikakh $\text{Ge}_{28.5}\text{P}_{15}\text{S}_{56.5}$ i $\text{Ge}_{27}\text{P}_{17}\text{Se}_{56}$ // Fizika i khimiya stekla. 2006. T. 32. S. 431–437.
2. *Bordovskii G. A., Marchenko A. V., Seregin P. P.* Vliyanie amorfizatsii na lokalnoe okruzhenie atomov v khalkogenidakh myshjyaka // Fizika i khimiya stekla. 2008. T. 34. S. 706–711.
4. *Lubin V. M., Klebanov A. V.* Novye rezultaty fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy khalkogenidnykh stekloobraznykh poluprovodnikov // Izvestiya Rossiiskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A. I. Gercena. Fizika. 2006. 6(15). S. 143–151.
5. *Felc A.* Amorfnye b stekloobraznye neorganicheskie tverdye tela. M.: Mir, 1986. 556 s.