

DOI: 10.18721/JPM.111104

УДК 539.16.08

ЭМИССИОННЫЕ МЁССБАУЭРОВСКИЕ СПЕКТРЫ ДОЧЕРНИХ АТОМОВ ОЛОВА, ИЗМЕРЕННЫЕ В УСЛОВИЯХ ПОДВИЖНОГО РАДИОАКТИВНОГО РАВНОВЕСИЯ МАТЕРИНСКИХ ИЗОТОПОВ ТЕЛЛУРА С ДОЧЕРНИМИ ИЗОТОПАМИ СУРЬМЫ

Н.Н. Жуков, А.В. Марченко, К.Б. Шахович

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Методом эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии с материнским изотопом ^{119m}Te , находящимся в состоянии подвижного радиоактивного равновесия с дочерним изотопом ^{119}Sb , получена информация о валентном и координационном состояниях дочерних атомов ^{119m}Sn , образующихся из материнских атомов ^{119}Sb и ^{119m}Te в катионных и анионных узлах кристаллического теллурида свинца PbTe и в стеклообразном теллуриде мышьяка As_2Te_3 . Установлено, что соотношение различных валентных и координационных состояний атомов олова в кристаллах и стеклах зависит от времени приготовления мёссбауэровских источников, а также с помощью расчетов показано смещение части дочерних атомов ^{119}Sb из структурных позиций материнских атомов ^{119m}Te в результате распада последних.

Ключевые слова: подвижное радиоактивное равновесие; эмиссионная мёссбауэровская спектроскопия; изотоп; теллурид; свинец; мышьяк

Ссылка при цитировании: Жуков Н.Н., Марченко А.В., Шахович К.Б. Эмиссионные мёссбауэровские спектры дочерних атомов олова, измеренные в условиях подвижного радиоактивного равновесия материнских изотопов теллура с дочерними изотопами сурьмы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 34 – 43. DOI: 10.18721/JPM.111104

MÖSSBAUER EMISSION SPECTRA OF STANNUM DAUGHTER ISOTOPES MEASURED UNDER CONDITION OF A DYNAMIC RADIOACTIVE EQUILIBRIUM OF TELLURIUM PARENT ISOTOPES AND ANTIMONIUM DAUGHTER ONES

N.N. Zhukov, A.V. Marchenko, K.B. Shakhovich

Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

The information on a valence and a coordination states of the ^{119m}Sn daughter atoms formed in the cationic and anionic lattice sites of the crystalline lead telluride PbTe and the glassy arsenic telluride As_2Te_3 from the ^{119}Sb and ^{119m}Te parent isotopes has been obtained using the emission Mössbauer spectroscopy with the ^{119m}Te parent isotopes being in a dynamic radioactive equilibrium with the ^{119}Sb daughter ones. It was found by calculation and experimentally that the proportion of various valent and coordinate states of tin atoms in the crystal and the glass depended on the preparation moment of Mössbauer sources. Moreover, the displacement of a part of the ^{119}Sb daughter atoms from lattice sites of the ^{119m}Te parent isotopes as a result of a radioactive decay was established when bringing into agreement with experimental data.

Key words: dynamic radioactive equilibrium; Mössbauer emission spectroscopy; isotope; telluride; lead; arsenic

Citation: N.N. Zhukov, A.V. Marchenko, K.B. Shakhovich, Mössbauer emission spectra of stannum daughter isotopes measured under condition of a dynamic radioactive equilibrium of tellurium parent isotopes and antimonium daughter ones, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11(1) (2018) 34 – 43. DOI: 10.18721/JPM.11104

Введение

Эмиссионная мёссбауэровская спектроскопия на изотопе олова ^{119m}Sn с материнскими ядрами сурьмы ^{119}Sb и теллура ^{119m}Te широко используется для исследования состояния примесных атомов в кристаллических халькогенидах свинца и стеклообразных халькогенидах мышьяка и германия [1 – 11]. В зависимости от химической природы материнского изотопа, дочерние атомы олова могут стабилизироваться либо в узлах подрешетки халькогена (если используется изотоп ^{119m}Te) [2, 3, 5, 7, 8], либо в позициях, не определенных заранее (если используется изотоп ^{119}Sb) [1, 4, 6 – 11].

В настоящей работе применяется метод измерения эмиссионных мёссбауэровских спектров ^{119m}Sn для источников на основе кристаллического теллурида свинца PbTe и

стеклообразного теллурида мышьяка As_2Te_3 , содержащих одновременно материнские изотопы ^{119m}Te и ^{119}Sb . Спектры позволили получить информацию о состоянии материнских примесных атомов теллура, сурьмы и дочерних примесных атомов олова.

Объекты и методика исследования

Как следует из рис. 1, распад материнских атомов ^{119m}Te происходит с образованием дочерних радиоактивных ядер ^{119}Sb , и к моменту установления подвижного равновесия (максимальной концентрации изотопа ^{119}Sb) образуется смесь радиоактивных атомов теллура (обозначим их $^{119m}\text{Te-1}$) и сурьмы (обозначим их $^{119}\text{Sb-1}$).

Доля атомов $^{119m}\text{Te-1}$ в единицах исходного содержания атомов ^{119m}Te составляет 0,575, а доля атомов $^{119}\text{Sb-1}$ – 0,195.

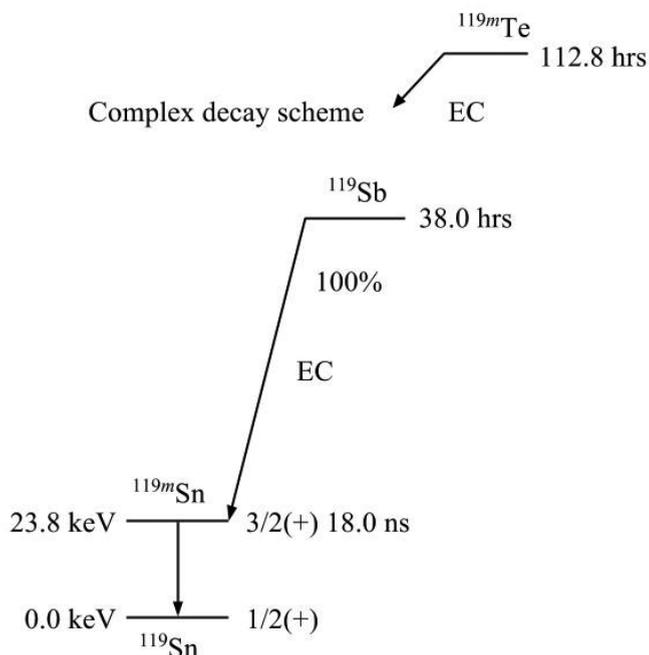
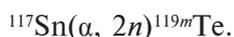


Рис. 1. Схема распада материнских изотопов ^{119m}Te и ^{119}Sb .

Указаны периоды распада и выделяемая при этом энергия. Распад сопровождается электронным захватом (EC)

Эта смесь сплавлялась со стеклообразным теллуридом мышьяка As_2Te_3 или кристаллическим теллуридом свинца $PbTe$ в вакуумированных кварцевых ампулах. При этом оценочная концентрация примесных атомов не превышала 10^{17} см^{-3} . Закалка расплава As_2Te_3 проводилась на воздухе; критериями стеклообразного состояния служили раковистый излом, отсутствие линий на дебаеграммах, отсутствие включений и неоднородностей при просмотре полированных поверхностей в металломикроскопе МИМ-7 и инфракрасном микроскопе МИК-1. Исходные образцы $PbTe$ относились к электронному (с избытком свинца, $n \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и дырочному (с избытком теллура, $p \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$) типам. Количественный состав стекол и кристаллов контролировался методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Изотоп ^{119m}Te получали по реакции



Для выделения безносительного препарата ^{119m}Te использовали процедуру анионного обмена [5].

Мёссбауэровские спектры ^{119m}Sn измерялись на спектрометре СМ-2201 при температуре 80 К со станнатом кальция $CaSnO_3$ (поверхностная плотность по олову 5 мг/см^2) в качестве поглотителя. Далее приведены типичные мёссбауэровские спектры образцов $PbTe : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ и $As_2Te_3 : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ и результаты их обработки в виде графических зависимостей.

Для каждого источника регистрировалась серия эмиссионных спектров ^{119m}Sn с длительностью набора 9,5 ч во временном интервале с момента окончания сплавления образцов до 190,5 ч. Очевидно, что в начальный период измерения мёссбауэровских спектров образцов $PbTe : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ и $As_2Te_3 : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ основной вклад в спектры ^{119m}Sn дают материнские атомы $^{119}Sb-1$ (постоянная распада $\lambda_{Sb} = 5,05 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$), тогда как по мере накопления вторичной сурьмы $^{119}Sb-2$, образующейся при распаде $^{119m}Te-1$ ($\lambda_{Te} = 1,70 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$), возрастает интенсивность спектра от материнских атомов $^{119}Sb-2$.

Экспериментальные результаты, их обработка и обсуждение

Теллурид свинца. Экспериментальные мёссбауэровские спектры изотопа ^{119m}Sn для образцов n - $PbTe : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ (электронный теллурид свинца) и p - $PbTe : (^{119}Sb + ^{119m}Te)$ (дырочный теллурид свинца) представляют собой наложение двух линий (рис. 2).

Одна из них имеет изомерный сдвиг $2,31(2) \text{ мм/с}$; он типичен для изомерных сдвигов мёссбауэровских спектров ^{119}Sn интерметаллических соединений олова, и в соответствии с этим указанную линию следует приписать центрам $^{119m}Sn^0$, образовавшимся после цепочки распадов



в узлах подрешетки теллура (спектр I).

Вторая линия имеет изомерный сдвиг $3,42(2) \text{ мм/с}$; она отвечает теллуриду олова и, следовательно, эту линию можно приписать двухвалентным центрам $^{119m}Sn^{2+}$, образовавшимся после распада атомов $^{119}Sb-1$ в узлах подрешетки свинца (спектр II).

Видно, что для дырочного образца интенсивность спектра $^{119m}Sn^0$ в подрешетке теллура возрастает со временем, которое прошло от момента синтеза мёссбауэровских источников (в дальнейшем будем называть эту переменную времени возрастом источника), тогда как для электронного образца отношение площадей под двумя линиями изменяется лишь незначительно. Если принять во внимание, что примесные атомы олова в теллуриде свинца электрически неактивны [4, 5], то различное поведение мёссбауэровских спектров ^{119m}Sn для дырочных и электронных образцов теллурида свинца требует объяснения.

Для количественного описания изменения структуры мёссбауэровских спектров ^{119m}Sn в теллуриде свинца были вычислены экспериментальные отношения

$$P = \frac{SI}{SI + SII}$$

для различных значений возраста источников (здесь SI, SII — площади под нормированными мёссбауэровскими спектрами I и II соответственно).

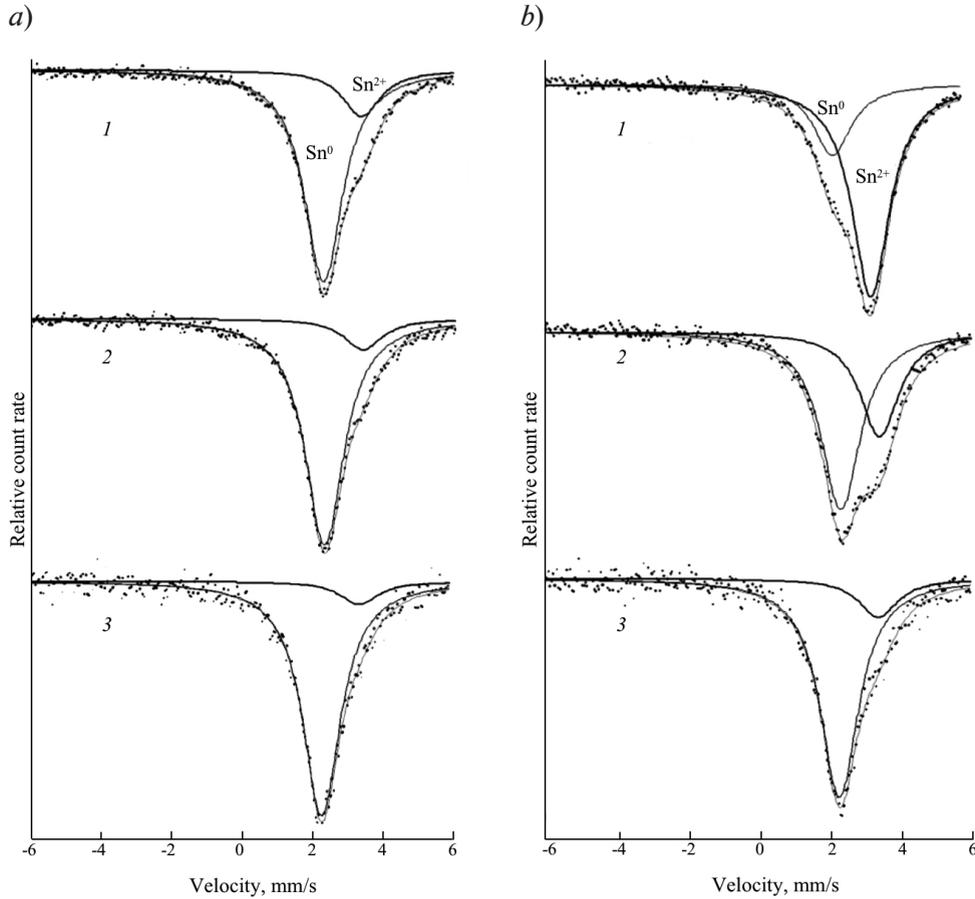


Рис. 2. Эмиссионные мёссбауэровские спектры ^{119m}Sn в $n\text{-PbTe}$ (a) и $p\text{-PbTe}$ (b). Спектры получены при 80 К в интервалах времен 0 – 9,5 ч (1), 66,7 – 76,2 ч (2) и 152,4–190,5 ч (3) после приготовления мёссбауэровского источника. Показаны линии эмиссии, отвечающие центрам Sn^0 и Sn^{2+}

Площадь S под спектром ^{119m}Sn пропорциональна концентрации атомов сурьмы N_{Sb} и фактору Мессбауэра f в соответствующей подрешетке:

$$S \sim f N_{\text{Sb}}.$$

Атомы сурьмы ^{119}Sb являются непосредственными радиоактивными предшественниками изотопа ^{119m}Sn .

Зависимость концентрации N_{Sb} от времени t можно получить из уравнения баланса:

$$N_{\text{Sb}} = \frac{\lambda_{\text{Te}}}{\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}}} N_{\text{Te}}^0 [\exp(-\lambda_{\text{Te}}t) - \exp(-\lambda_{\text{Sb}}t)] + N_{\text{Sb}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}}t), \quad (1)$$

где λ_{Te} , λ_{Sb} – постоянные распада соответствующих материнских изотопов; N_{Te}^0 ,

N_{Sb}^0 – концентрации атомов ^{119m}Te и ^{119}Sb в начальный момент времени; нижний индекс Te указывает, что берется концентрация ^{119m}Te в той же подрешетке, что и Sb.

Поскольку концентрацией N_{Te}^0 в подрешетке свинца можно пренебречь, то вместо выражения (1) получим:

$$N_{\text{Sb in Pb}} = N_{\text{Sb in Pb}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}}t), \quad (2)$$

где $N_{\text{Sb in Pb}}^0$ – концентрация атомов Sb-1 в узлах свинца.

Аналогичным образом для подрешетки теллура имеем:

$$N_{\text{Sb in Te}} = \frac{\lambda_{\text{Te}}}{\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}}} N_{\text{Te}}^0 [\exp(-\lambda_{\text{Te}}t) - \exp(-\lambda_{\text{Sb}}t)] + N_{\text{Sb}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}}t), \quad (3)$$

при этом общая концентрация Sb-1 определяется как

$$N_{\text{Sb}}^0 = N_{\text{Sb in Pb}}^0 + N_{\text{Sb in Te}}^0.$$

Таким образом, отношение площадей под нормированными спектрами может быть записано в следующем виде:

$$P = \left[\left\{ \frac{\lambda_{\text{Te}}}{\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}}} N_{\text{Te}}^0 [\exp(-\lambda_{\text{Te}} t) - \exp(-\lambda_{\text{Sb}} t)] + N_{\text{Sb in Te}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}} t) \right\} \cdot f_{\text{Te}} \right] \times \left[\left\{ \frac{\lambda_{\text{Te}}}{\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}}} N_{\text{Te}}^0 [\exp(-\lambda_{\text{Te}} t) - \exp(-\lambda_{\text{Sb}} t)] + N_{\text{Sb in Te}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}} t) \right\} \cdot f_{\text{Te}} + N_{\text{Sb in Pb}}^0 \exp(-\lambda_{\text{Sb}} t) \cdot f_{\text{Pb}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет с помощью экстраполяции графиков на рис. 3 получить значения

$$q = \frac{N_{\text{Sb in Te}}^0 f_{\text{Te}}}{N_{\text{Sb in Te}}^0 f_{\text{Te}} + N_{\text{Sb in Pb}}^0 f_{\text{Pb}}},$$

равные 0,2 для *p*-PbTe и 0,8 для *n*-PbTe.

Если не учитывать различие в факторах Мёссбауэра в узлах подрешетки теллура f_{Te} и в узлах подрешетки свинца f_{Pb} (что справедливо при 80 K), то эти величины показывают долю Sb-1, попавшую при синтезе в структурные позиции теллура. В электронном образце *n*-PbTe (избыток атомов свинца и вакансии теллура) атомы Sb-1 с вероятностью около 0,8 заполняют вакансии теллура, в то время как в дырочном образце *p*-PbTe большая часть атомов сурьмы оказывается в решеточных узлах свинца.

Временные зависимости отношения площадей $P(t)$ для электронного и дырочного теллуридов свинца, рассчитанные по формуле (4) с полученным выше распределением Sb-1 по подрешеткам и с учетом значения

$$m = \frac{N_{\text{Te}}^0}{N_{\text{Sb}}^0} = 2,949,$$

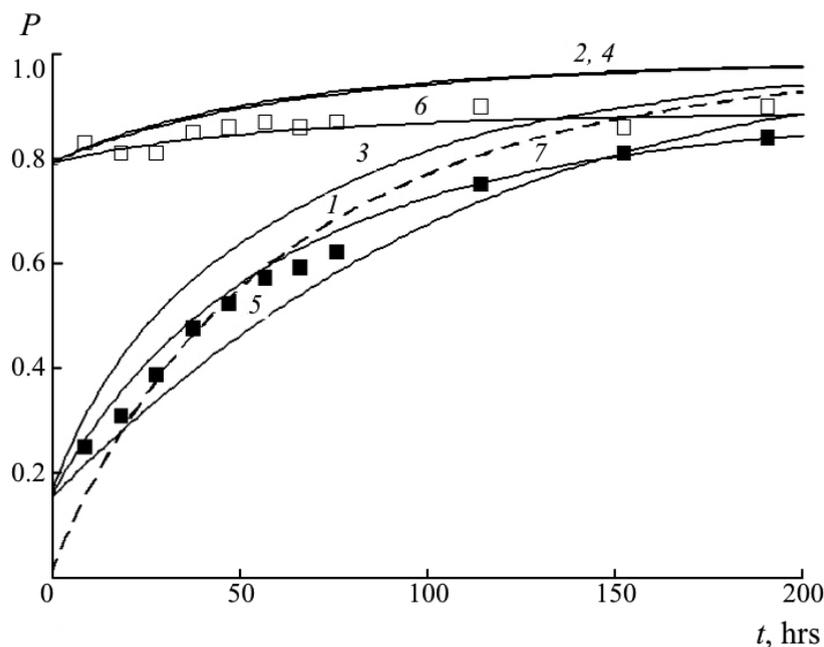


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и расчетные (кривые 1 – 7) зависимости отношения P от возраста источников для электронных (затухеванные квадраты, кривые 2, 4, 6) и дырочных (пустые квадраты, кривые 3, 5, 7) образцов PbTe:($^{119}\text{Sb}+^{119m}\text{Te}$); расчетные зависимости получены при различных предположениях, когда варьируется содержание атомов ^{119}Sb в подрешетке свинца (также кривая 1) (см. описание в тексте)

вместе с экспериментальными величинами P приведены на рис. 3.

Кривая 1, рассчитанная в предположении, что все атомы $^{119}\text{Sb-1}$ находятся в подрешетке свинца, а все атомы $^{119m}\text{Te-1}$ — в подрешетке теллура, существенно отклоняется от поведения экспериментальных величин как для дырочного теллурида свинца, так и (в особенности) для электронного. Если учесть рассмотренное выше предположение о попадании части $^{119}\text{Sb-1}$ в подрешетку теллура, то рассчитанные зависимости $P(t)$ удовлетворительно описывают экспериментальные данные для малого возраста источников, но дают завышенные значения

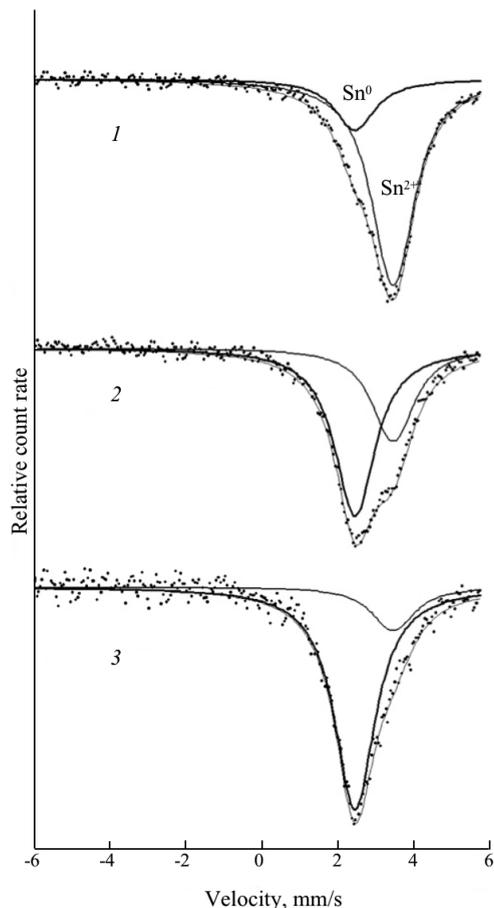


Рис. 4. Эмиссионные мёссбауэровские спектры ^{119m}Sn в стеклообразном образце As_2Te_3 ; ($^{119}\text{Sb} + ^{119m}\text{Te}$). Условия регистрации спектров и их обозначения идентичны приведенным на рис. 2. Показаны также линии эмиссии, отвечающие центрам Sn^0 и Sn^{2+}

для спектров, измеренных через значительное время после приготовления источников (кривые 2 и 3 на рис. 3). Причинами такого расхождения могут быть, во-первых, меньшее значение фактора Мёссбауэра f_{Te} для структурных узлов теллура по сравнению с таковым для узлов свинца (f_{Pb}), а, во-вторых, смещение части атомов $^{119}\text{Sb-2}$ подрешетки теллура в подрешетку свинца. Такое перемещение может происходить за счет энергии отдачи, получаемой дочерними атомами $^{119}\text{Sb-2}$ при радиоактивном распаде материнских атомов $^{119m}\text{Te-1}$ [5].

Кривые 4 и 5 на рис. 3 показывают поведение величины $P(t)$, рассчитанной для дырочного и электронного теллурида свинца в предположении, что отношение $f_{\text{Te}}/f_{\text{Pb}} = 0,5$. Для дырочного образца это предположение заметно улучшает согласие с экспериментом, но практически не меняет вида кривой $P(t)$ для электронного образца. Следовательно, различие факторов Мёссбауэра не может объяснить пониженные значения $P(t)$ для спектров источников с большим возрастом. В дальнейших расчетах принималось, что $f_{\text{Te}}/f_{\text{Pb}} = 0,5$.

Кривые 6 и 7 на рис. 3 показывают поведение величины $P(t)$, рассчитанной для дырочного и электронного теллуридов свинца в предположении, что часть атомов $^{119}\text{Sb-2}$ (доля $\alpha = 0,1$) от их общего числа оказывается смещенной в подрешетку свинца. При этом соотношение (4) можно преобразовать к виду

$$P = 1 - \alpha - (1 - q - \alpha) \times \left(m \frac{\lambda_{\text{Te}}}{\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}}} \{ \exp[(\lambda_{\text{Sb}} - \lambda_{\text{Te}})t] - 1 \} + 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

Для обоих типов образцов наблюдается удовлетворительное согласие с измеренными значениями P . Этот результат подтверждает и вывод работы [5] о смещении атомов $^{119}\text{Sb-2}$ при распаде материнских изотопов ^{119m}Te .

Теллурид мышьяка. Согласно данным работы [12], примесные атомы олова в стеклообразном теллуриде мышьяка As_2Te_3 электрически неактивны (в соответствии с общим правилом «нелегируемости» халько-

генидных стеклообразных полупроводников). Полученные нами экспериментальные мёссбауэровские спектры изотопа ^{119m}Sn в сплаве As_2Te_3 : ($^{119}\text{Sb} + ^{119m}\text{Te}$) представляют собой наложение двух линий (рис. 4).

Менее интенсивная линия при измерении спектра в интервале времени 0 – 19,05 ч имеет изомерный сдвиг 2,61(2) мм/с; он близок к изомерному сдвигу мёссбауэровского спектра ^{119}Sn в полуметаллическом соединении арсенида олова SnAs и, следовательно, эту линию можно приписать примесным центрам олова $^{119m}\text{Sn}^0$, образовавшимся после распада атомов ^{119m}Te -1 в узлах подрешетки теллура (спектр I). Относительная интенсивность этой линии увеличивается с возрастом источника, что также говорит о ее происхождении от ^{119m}Te -1 в структурных узлах теллура.

Изомерный сдвиг линии, интенсивность которой спадает с возрастом источника, составляет 3,65(2) мм/с; он близок к изомерному сдвигу мёссбауэровского спектра ^{119}Sn для соединения SnTe и, следовательно, эту линию можно приписать двухвалентным

примесным центрам олова $^{119m}\text{Sn}^{2+}$, образовавшимся после распада атомов ^{119}Sb -1 в узлах мышьяка (спектр II). Видно, что относительная интенсивность мёссбауэровского спектра $^{119m}\text{Sn}^0$ в узлах теллура увеличивается с возрастом источника.

Для количественного описания изменения структуры мёссбауэровских спектров ^{119m}Sn , представленных на рис. 4, были рассчитаны зависимости отношения

$$P = \frac{SI}{SI + SII}$$

от возраста источника $(\text{As}, ^{119}\text{Sb})_2^{119m}\text{Te}_3$.

Рассчитанные зависимости $P(t)$ вместе с соответствующими экспериментальными значениями P приведены на рис. 5. Если расчет величины P выполнить в предположении, что в процессе измерения мёссбауэровских спектров атомы ^{119}Sb -1 находятся в узлах подрешетки мышьяка, а атомы ^{119}Sb -2 – в узлах подрешетки теллура, то он дает завышенные значения отношения P . Для согласования этих данных необходимо предполо-

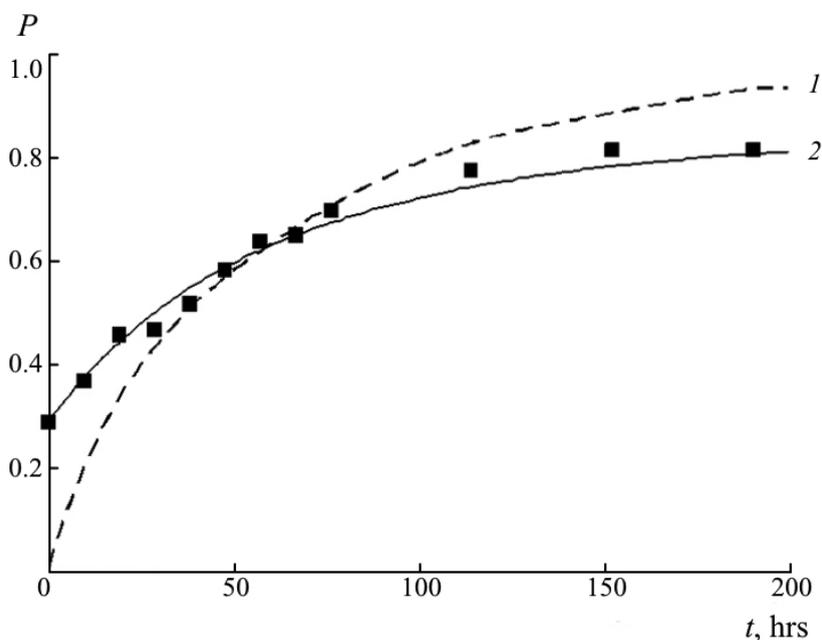


Рис. 5. Экспериментальные (символы) и расчетные (кривые 1, 2) зависимости отношения P от возраста источников для образцов стеклообразного As_2Te_3 ($^{119}\text{Sb} + ^{119m}\text{Te}$); расчетные зависимости получены при различных предположениях, когда варьируется содержание атомов ^{119}Sb в подрешетке мышьяка (см. описание в тексте)



жить, что в процессе измерения спектров происходит перемещение доли атомов ($\alpha = 0,15(2)$) ^{119m}Te -1 из структурных узлов теллура в узлы подрешетки мышьяка (эта величина получается при экстраполяции экспериментальной зависимости $P(t)$ на $t \rightarrow \infty$) (сплошная линия I на рис. 5). Это перемещение может происходить за счет энергии отдачи, получаемой дочерними атомами ^{119}Sb -2 при радиоактивном распаде атомов ^{119m}Te -1. Кроме того, за время жизни ^{119}Sb (55 ч) возможна перестройка локального окружения образовавшихся атомов ^{119}Sb -2.

Заключение

Показано, что из серии эмиссионных мёссбауэровских спектров одного источника $^{119}\text{Sb} + ^{119m}\text{Te}$ может быть получена информация о месте локализации атомов сурьмы и теллура в кристаллической решетке теллурида свинца (или в узлах структурной сетки стеклообразного теллурида мышьяка) и о валентном состоянии дочерних атомов олова, образующихся из материнских атомов ^{119}Sb . Показано также смещение части дочерних атомов ^{119}Sb из структурных позиций материнских атомов ^{119m}Te в результате распада последних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ambe F., Ambe S., Shoji H., Saito N. Mössbauer emission spectra of ^{119}Sn after the EC decay of ^{119}Sb in metals, oxides, and chalcogenides of antimony and tellurium // J. Chem. Phys. 1974. Vol. 60. No. 10. Pp. 3773–3778.
2. Ambe F., Ambe S. Mössbauer emission studies of defect ^{119}Sn , ^{119}Sb , and ^{119m}Te atoms after nuclear decays and reactions in SnSb, SnTe, and Sb_2Te_3 // J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. No. 5. Pp. 2029–2036.
3. Ambe F., Ambe S. A site distribution study of dilute ^{119}Sb and ^{119m}Te on solidification of SnTe and SnSb by Mössbauer emission spectroscopy of ^{119}Sn // J. Chem. Phys. 1981. Vol. 75. No. 5. Pp. 2463–2465.
4. Мастеров В.Ф., Насрединов Ф.С., Немов С.А., Серегин П.П., Троицкая Н.Н., Бондаревский С.И. Положение примесных атомов сурьмы в решетке PbTe, определенное методом эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 11. С. 1321–1322.
5. Мастеров В.Ф., Бондаревский С.И., Насрединов Ф.С., Серегин Н.П., Серегин П.П. Антиструктурные дефекты в полупроводниках типа PbTe // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 7. С. 772–773.
6. Мастеров В.Ф., Насрединов Ф.С., Серегин П.П., Серегин Н.П., Ермолаев А.В., Бондаревский С.И. Положение примесных атомов сурьмы в решетке PbS, определенное методом эмиссионной мёссбауэровской спектроскопии на изотопе ^{119}Sb (^{119m}Sn) // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 8. С. 913–915.
7. Немов С.А., Серегин П.П., Кожанова Ю.В., Серегин Н.П. Двухэлектронные центры олова, образующиеся в халькогенидах свинца в результате ядерных превращений // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 12. С. 1414–1419.
8. Seregin N.P., Seregin P.P., Nemov S.A., Yanvareva A.Y. Antistructural defects in lead chalcogenides // J. Phys.: Condensed Matter. 2003. Vol. 15. No. 44. Pp. 7591–7597.
9. Бордовский Г.А., Немов С.А., Марченко А.В., Зайцева А.В., Кожокарь М.Ю., Серегин П.П. Состояния атомов сурьмы и олова в халькогенидах свинца // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 4. С. 437–440.
10. Бордовский Г.А., Марченко А.В., Анисимова Н.И., Зайцева А.В., Серегин П.П. Двухэлектронные центры олова с отрицательной корреляционной энергией в сульфиде свинца // Физика и химия стекла. 2013. Т. 39. № 2. С. 297–307.
11. Марченко А.В., Николаева А.В., Серегин П.П., Шалденкова А.В., Бобохужаев К.У. Двухэлектронный обмен между U -минус центрами олова в кристаллических и стеклообразных халькогенидных полупроводниках // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42. № 2. С. 232–243.
12. Бордовский Г.А., Марченко А.В., Серегин П.П., Али Н.М., Гладких П.В., Кожокарь М.Ю. Двухэлектронные центры олова, образующиеся в халькогенидных стеклах в результате ядерных превращений // Физика и химия стекла. 2010. Т. 36. № 6. С. 828–834.

Статья поступила в редакцию 19.01.2018, принята к публикации 24.01.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЖУКОВ Николай Николаевич – ассистент кафедры компьютерного обучения и электронных технологий Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
nzhukov@herzen.spb.ru

МАРЧЕНКО Алла Валентиновна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
al7140@rambler.ru

ШАХОВИЧ Кирилл Борисович – аспирант кафедры физической электроники Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
shakhovichkirill@gmail.com

REFERENCES

[1] F. Ambe, S. Ambe, H. Shoji, N. Saito, Mössbauer emission spectra of ^{119}Sn after the EC decay of ^{119}Sb in metals, oxides, and chalcogenides of antimony and tellurium, J. Chem. Phys. 60 (10) (1974) 3773–3778.

[2] F. Ambe, S. Ambe, Mössbauer emission studies of defect ^{119}Sn , ^{119}Sb , and ^{119m}Te atoms after nuclear decays and reactions in SnSb, SnTe, and Sb_2Te_3 , J. Chem. Phys. 73(5) (1980) 2029–2036.

[3] F. Ambe, S. Ambe, A site distribution study of dilute ^{119}Sb and ^{119m}Te on solidification of SnTe and SnSb by Mössbauer emission spectroscopy of ^{119}Sn , J. Chem. Phys. 75 (5) (1981) 2463–2465.

[4] V.F. Masterov, F.S. Nasredinov, S.A. Nemov, et al., Position of antimony impurity atoms in PbTe lattice determined by emission Mössbauer spectroscopy, Semiconductors. 31 (11) (1997) 1138–1139.

[5] V.F. Masterov, S.I. Bondarevskii, F.S. Nasredinov, et al., Antistructural defects in PbTe-type semiconductors, Semiconductors. 33 (7) (1999) 710–711.

[6] V.F. Masterov, F.S. Nasredinov, P.P. Seregin, et al., Determining the position of antimony impurity atoms in PbS by ^{119}Sb (^{119m}Sn) emission Mössbauer spectroscopy, Semiconductors. 33 (8) (1999) 836–837.

[7] S.A. Nemov, P.P. Seregin, Yu.V. Kozhanova, N.P. Seregin, Two-electron tin centers formed in lead chalcogenides as a result of nuclear transmutations, Semiconductors. 37 (12) (2003) 1367–1372.

[8] N.P. Seregin, P.P. Seregin, S.A. Nemov, A.Y. Yanvareva, Antistructural defects in lead chalcogenides, J. Phys.: Condensed Matter. 15 (44) (2003) 7591–7597.

[9] G.A. Bordovsky, A.V. Marchenko, A.V. Zaiceva, et al., States of antimony and tin atoms in lead chalcogenides, Semiconductors. 45 (4) (2011) 427–430.

[10] G.A. Bordovsky, A.V. Marchenko, N.I. Anisimova, et al., Two-electron tin centers with a negative correlation energy in lead sulfide, Glass Physics and Chemistry. 39 (2) (2013). 201–207.

[11] A.V. Marchenko, A.V. Nikolayeva, P.P. Seregin, et al., The two-electron exchange between U^- tin centers in crystal and glass-like chalcogenide semiconductors, Glass Physics and Chemistry. 42 (2) (2016) 164–171.

[12] G.A. Bordovsky, A.V. Marchenko, P.P. Seregin, et al., Two-electron tin centers formed in chalcogenide glasses as a result of nuclear transformations, Glass Physics and Chemistry. 36 (6) (2010) 652–656.

Received 19.01.2018, accepted 24.01.2018.

THE AUTHORS

ZHUKOV Nikolay N.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation
nzhukov@herzen.spb.ru

MARCHENKO Alla V.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

al7140@rambler.ru

SHAKHOVICH Kirill B.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

shakhovichkirill@gmail.com