

УДК 621.315.592

Электроннографическое исследование фазообразования в нанотолщинных слоях систем $\text{Cu}_2\text{Te}-\text{In}_2\text{Te}_3$, $\text{Cu}-\text{In}-\text{Te}$ и ближний атомный порядок в аморфных пленках CuIn_5Te_8

© Г.Е. Дашдамирова¹, Э.Б. Аскеров^{2,3,¶}, Д.И. Исмаилов¹

¹ Институт физики Национальной академии наук,
AZ1143 Баку, Азербайджан

² Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Россия

³ Национальный центр ядерных исследований,
370143 Баку, Азербайджан

¶ E-mail: elmar.asgerov@gmail.com

Поступила в Редакцию 26 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 29 декабря 2021 г.

Принята к публикации 10 января 2022 г.

Показано, что при одновременном и последовательном осаждении пленок системы $\text{Cu}_2\text{Te}-\text{In}_2\text{Te}_3$, а также используемых в качестве исходных материалов меди, индия и теллура высшей очистки $\sim 99.999\%$, взятых в соотношениях $\text{Cu}:\text{In}:\text{Te} = 1:5:8$, независимо от порядка напыления выделяются тройные соединения составов CuInTe_2 , CuIn_3Te_5 и CuIn_5Te_8 в кристаллическом состоянии. При вакуумной конденсации пленок на монокристаллические подложки NaCl , KCl и аморфный целлулоид, охлажденные жидким азотом до 203 К, образующиеся пленки, полученные как совместным испарением двойных соединений системы $\text{Cu}_2\text{Te}-\text{In}_2\text{Te}_3$, так и синтезом тонких слоев, примененных Cu , In , Te , являются аморфными. Впервые в наноразмерных аморфных пленках состава CuIn_5Te_8 , кристаллизующихся в тетрагональной сингонии с периодами элементарных ячеек $a = 6.162 \text{ \AA}$, $c = 12.291 \text{ \AA}$, полученных как в обычных условиях, так и в условиях воздействия внешнего электрического поля напряженностью $500 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, установлена структура ближнего атомного порядка — число ближайших соседей, координационные числа и радиусы координационных сфер. Выявлено, что в аморфных пленках CuIn_5Te_8 , полученных в условиях воздействия внешнего электрического поля, в которых матрицы состоят из тетраэдрических и октаэдрических окружений атомов, в отличие от пленок, формирующихся без воздействия поля, число ближайших соседей, оставаясь неизменным, радиусы координационных сфер и межатомные расстояния несколько укорачиваются.

Ключевые слова: фазообразование, электроннограмма, функция радиального распределения атомов (ФРРА), когерентное рассеяние электронов.

DOI: 10.21883/FTP.2022.05.52344.9794

1. Введение

Высокодисперсные и алмазоподобные сложные полупроводниковые материалы в тонкопленочном исполнении, измеряемые десятками и единицами нанометров в оптоэлектронике, полупроводниковой и квантовой электронике, создаются в процессах синтеза гомогенных фаз на основе элементарных полупроводников, двух- и трехкомпонентных соединений. Физико-химические свойства стабильных фаз (которые в объемных образцах могут быть термодинамически неустойчивы, а если могут, то только при высоких температурах), а как правило, и параметры создаваемых на их основе фотопреобразовательных структур зависят от размеров и ориентации кристалликов формирующихся тонких пленок, кинетических параметров фазовых превращений, сохранения или деструкции ближнего атомного порядка в структуре и определяются условиями их получения (природой и структурой поверхности самой подложки, ее чистотой и ориентацией кристалликов).

Так как сохранение или деструкция ближнего порядка в расположении атомов, являющихся необходимыми и фундаментальными звеньями во взаимосвязи состав–структура–свойства, обуславливается сохранением или потерей полупроводниковых свойств, то электроннографические исследования аморфных пленок занимают особое место в круге решаемых этим методом задач. Электрофизические, оптические и другие свойства полупроводниковых слоев зависят не от дальнего порядка, а только лишь от структуры ближнего атомного порядка в аморфных и кристаллических веществах. Поэтому на стадии проектирования элементов оптоэлектроники для соответствующих расчетов нужны знания о структуре аморфных веществ и степени воздействия на их структуры различных внешних условий — температурного режима, электрических и магнитных полей на координацию атомов в аморфных пленках.

Следовательно, подобные исследования — определение фазового состава, границ гомогенности фаз, механизмов роста и степени совершенства структуры —

позволяют вести целенаправленный поиск новых материалов в пленочном исполнении с уникальными, заданными и воспроизводимыми свойствами, недостижимыми в массивных кристаллах. Вследствие этого и ряда других причин, не названных здесь, исследования вышеуказанных процессов в нанотолщинных тонкопленочных образцах, отличающихся от массивных более легким выделением как термодинамически устойчивых, так и метастабильных фаз — с промежуточно переходными структурами, возникающими на различных этапах химических реакций по пути к равновесию, имеют общенаучное значение, результаты которых могут быть использованы для увеличения прикладных возможностей — многослойных гетероструктур.

По данным работы [1] в системах Cu–Te и In–Te, являющихся двойными сечениями тройной системы Cu–In–Te, существуют несколько модификаций — низкотемпературные (α) и высокотемпературные (β) фазы различных составов Cu_2Te , Cu_3Te_2 , Cu_4Te_3 , $CuTe$, Cu_3Te_5 и $InTe$, In_4Te_3 , In_2Te_3 , In_2Te_5 , $InTe_3$ соответственно. Согласно данным работы [2], в системе Cu–In–Te, наряду с двойным теллуридом тройного соединения состава $CuInTe_2$, существуют и фазы составов $CuIn_3Te_5$, $CuIn_5Te_8$.

В работах [2,3] методом направленной кристаллизации установлены условия получения монокристаллов состава $CuIn_5Te_8$ и показана возможность создания на их основе фотопреобразователей солнечного излучения. Вопросы образования фаз, структура аморфных пленок и фазовые превращения в тройных соединениях, входящие в общую группу химических соединений $A^I B_{2n+1}^{III} C_{3n+2}^{VI}$, где индексы составов в данной формуле принадлежат ряду натуральных чисел $n = 0, 1, 2, \dots$, в пленочном состоянии, за исключением работ [4,5], не исследованы.

Цель данной работы заключается в изучении процессов фазообразования — установление фазового состава в системах Cu_2Te – In_2Te_3 и Cu–In–Te в соотношениях Cu : In : Te = 1 : 5 : 8, полученных в обычных условиях и в условиях воздействия внешнего электрического поля напряженностью $500 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ в аморфных пленках $CuIn_5Te_8$, и определении структуры ближнего атомного порядка, поскольку указанные исследования имеют особые значения в технологии создания тонкопленочных структур, служат основой развития и позволяют интенсифицировать изготовление нового поколения современной твердотельной электроники. В литературе нет каких-либо сведений о стеклообразовании на основе стекол системы Cu_2Te – In_2Te_3 и тройной системы Cu–In–Te.

2. Экспериментальные методы

Теория и экспериментальные методы, которые используются при изучении фазообразования вследствие взаимодействия тонких слоев, определяются как специфическими особенностями каждого химического элемента

исследуемых систем, так и способом получения пленок. В развитии оптоэлектронной техники немалую роль сыграли поиск новых и усовершенствование существующих методов нанесения пленок.

Исследование тройных пленок меди, индия и теллура сопряжено с рядом экспериментальных трудностей, связанных, с одной стороны, с окислением меди при контакте с воздухом, а с другой — с улетучиванием индия и теллура при длительном хранении в вакууме, особенно при повышенных температурах.

Для выявления оптимальных условий процесса образования фаз в системах Cu_2Te – In_2Te_3 и Cu–In–Te в соотношениях Cu : In : Te = 1 : 5 : 8 и установления ближнего атомного порядка в аморфном $CuIn_5Te_8$ нами использована методика капсулирования пленок, примененная в работах [6–8]. Исследуемые пленки с двух сторон покрывались защитным слоем аморфного углерода. Для этого на поверхность подложек, состоящих из монокристаллов NaCl, KCl, методом вакуумного осаждения наносилась пленка углерода, далее осаждались исследуемые объекты и сверху вновь углерод. Суммарная толщина аморфных углеродных пленок не превышала 100 \AA . Наличие защитных слоев лишь незначительно увеличивало фон дифракционных картин. Следует отметить, что вследствие многочисленности варьируемых физико-технических параметров при изготовлении пленок, условия образования тонких слоев для каждого класса вещества оказываются специфическими и определяются экспериментально — определения механизма формирования и влияния условий получения пленок до настоящего времени не привели к обобщающему результату. Для каждого конкретного случая разрабатывается технология препарирования тонких слоев и исследуется взаимосвязь со структурными и другими особенностями вакуумных конденсатов.

Для получения пленок системы Cu_2Te – In_2Te_3 из двух источников, расположенных на расстоянии 120 мм друг от друга, испарялись синтезированные соединения Cu_2Te и In_2Te_3 . Для испарения веществ нами применялись нагреватели в виде конусообразных спиральных корзинок из вольфрамовой проволоки диаметром 0.15 мм. Количество испаряемых Cu_2Te и In_2Te_3 составляло 11.2 и 8.8 мг соответственно. Расчетная толщина пленок составляла 250 \AA , скорость осаждения ~ 15 – $20 \text{ \AA}/\text{с}$. В результате электронографического анализа продуктов, образовавшихся по всей плоскости конденсации, установлено, что как при одновременном, так и при последовательном процессе возгонки компонентов независимо от последовательности их испарения образующиеся на подложках KCl тонкие слои формируются в кристаллическом состоянии (рис. 1).

Кристаллическая фаза, образующаяся на подложках NaCl, находящаяся при комнатной температуре, дает дифракционную картину, характерную для текстурированных объектов, но с нерезкими рефлексамии дифракционного поля. Дальнейший рекристаллизационный отжиг при 343 К приводит к совершенству текстуры (рис. 2).

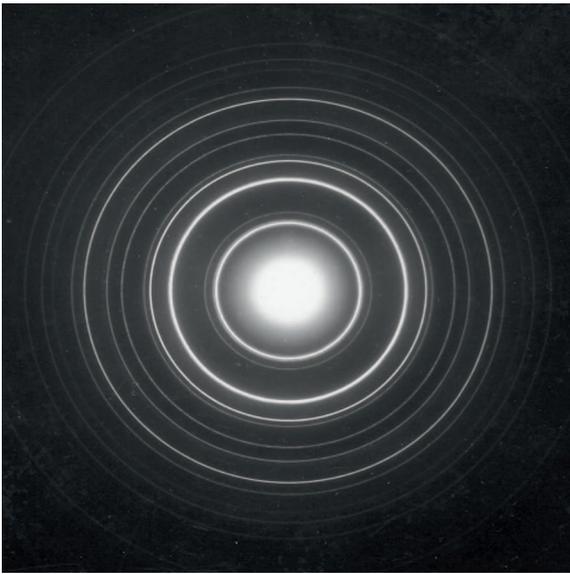


Рис. 1. Электронограмма от поликристаллического CuIn_5Te_8 с тетрагональной решеткой.

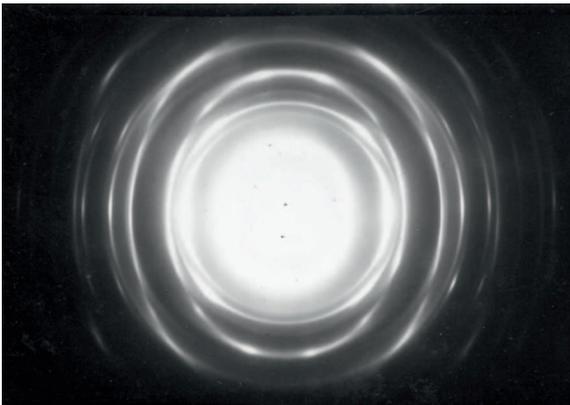


Рис. 2. Электронограмма от текстуры тетрагонального CuIn_5Te_8 . Угол съемки 45° .

Все дифракционные отражения на электронограммах от поликристалла и текстурированных пленок индицируются на основе тетрагональной решетки тройного соединения CuIn_5Te_8 с периодами элементарной кристаллической решетки $a = 6.162 \text{ \AA}$ и $c = 12.291 \text{ \AA}$ [9].

В работе [9] показано, что элементарная ячейка тетрагонального CuIn_5Te_8 подчиняется пространственной группе симметрии (ПГС) $I\bar{4}$. Однако по закону погашения рефлексов, наблюдаемых на электронограммах, полученных от поликристаллических и текстурированных пленок, нами установлено, что CuIn_5Te_8 обладает объемно-центрированной решеткой и описывается с ПГС кристаллов $I4/mcm-D_{4h}^{18}$. Координация атомов в структуре CuIn_5Te_8 , которая еще полностью не расшифрована, возможно, более сложная, чем в $\text{CuIn}_5\text{S}_8(\text{Se}_8)$, и обладает собственным структурным типом.

В последующих экспериментах три источника испарения — конические навитые вольфрамовые спирали устанавливались вдоль плоскости конденсации так, что крайние, которые испарялись Cu и In, находились на расстоянии 150 мм друг от друга и на высоте 60 мм над свежеосаженными монокристаллами NaCl, а третий источник с Te находился на высоте 70 мм от плоскости подложки, точно между источниками Cu и In. Толщина полученных пленок системы Cu–In–Te в соотношении 1:5:8, образующихся при плавном изменении процентного содержания компонентов при их одновременной и послойной конденсации на NaCl и KCl (находящихся при комнатной температуре без учета толщины углеродной капсулы, в которую помещались данные пленки, так же как и в работах [6–8]), составляла $\sim 200 \text{ \AA}$. Методика капсулирования требует особенной аккуратности, позволяющей минимизировать эффекты, связанные с поглощением образцами влаги из атмосферного воздуха, и при термообработке образцов. Электронографический анализ исследованных пленок системы Cu–In–Te показал, что наряду с двойными соединениями систем Cu–Te, In–Te (являющихся двойными сечениями тройной системы Cu–In–Te) в результате взаимодействия между пленками, в достаточно широкой области плоскости конденсации, обогащенной теллуром (непосредственно под источником Te), образуется тройное соединение состава CuInTe_2 с периодами тетрагональной элементарной ячейки (ЭЯ) $a = 6.197 \text{ \AA}$, $c = 12.453 \text{ \AA}$, ПГС $I42d-D_{2d}^{12}$, согласующимися с данными работы [2]. Соединения составов CuIn_3Te_5 ($\text{Cu}_5\text{In}_{15}\text{Te}_{25}$) с постоянными $a = 6.173 \text{ \AA}$, $c = 12.334 \text{ \AA}$ и CuIn_5Te_8 ($\text{Cu}_5\text{In}_{15}\text{Te}_{24}$) со структурными характеристиками, приведенными в работах [2,9], образуются в очень узкой области составов.

Аморфные фазы CuIn_5Te_8 и CuIn_3Te_5 образуются при температуре подложки 223 К. Однако при этом, несмотря на исключение влияния геометрического фактора (геометрия экспериментов остается неизменной), в зависимости от очередности осаждения компонентов

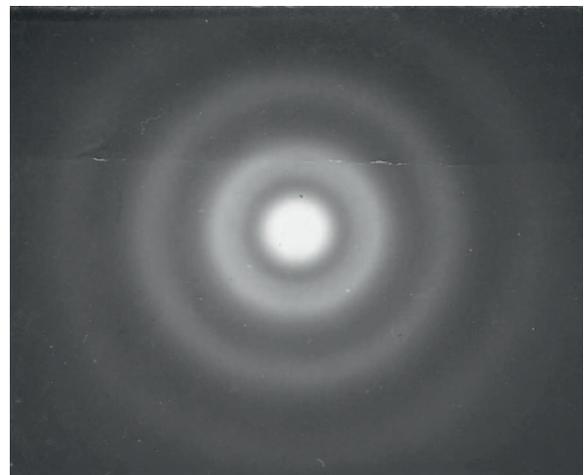


Рис. 3. Электронограмма от аморфного CuIn_5Te_8 $T_n = -50^\circ\text{C}$.

происходит некоторое изменение доли границ, образующихся на коллекторе аморфных фаз тройных соединений системы Cu–In–Te. Электронограмма аморфных пленок CuIn_5Te_8 (рис. 3) содержит диффузные линии с значениями $S = 4\pi \sin \theta / \lambda$, равными 1.66, 3.20 и 4.91 \AA^{-1} .

3. Результаты и обсуждение

Наиболее рациональным методом исследования ближнего атомного порядка в тонких аморфных слоях является метод электронографического структурного анализа (ЭСА). Массивные стеклообразные вещества и тонкие аморфные слои, обладая меньшей упорядоченностью внутреннего строения, характеризуются при тех же температурах и давлениях соответственно большим объемом, большей внутренней энергией и энтропией, чем вещества, находящиеся в кристаллическом состоянии.

Сведения об атомном строении стеклообразных веществ различных составов систем Cu–Te, In–Te, Cu–In–Te и тонких аморфных пленок по различным причинам весьма ограничены и в подавляющем большинстве неопределены. Достижение устойчивых состояний в аморфных веществах, т.е. отвечающих минимуму термодинамического потенциала при заданных давлениях и температурах, связано с установлением как определенных расстояний между частицами, так и определенных конфигураций их взаимного расположения. Структура ближнего порядка в аморфных веществах описывается радиальной функцией распределения атомной плотности.

Экспериментальные кривые интенсивности рассеяния электронов (рис. 4) для аморфной фазы CuIn_5Te_8 получены на электронографе серийного производства марки ЭМР-102, снабженном системой, позволяющей отфильтровывать сигнал, связанный с неупругим рассеянием электронов. Система измерения интенсивностей электронных дифракционных картин, с помощью электрометрической регистрации методом сканирования дифракционного поля перед неподвижным датчиком высокой чувствительности, позволяет значительно улучшить точность структурных исследований.

В настоящее время единственным методом получения функции радиального распределения атомов (ФРРА) является метод интегрального преобразования интенсивностей рассеяния рентгеновых лучей, электронов или нейтронов. Сферически симметричная ФРРА позволяет рассчитать параметры межатомного взаимодействия (задает вероятность нахождения атомов, ориентированных в пространстве определенным образом на некотором расстоянии друг от друга) и установить размещение координационных групп, т.е. количество атомов в координационных сферах. В основе указанного метода, определяющего кривую радиального распределения атомов

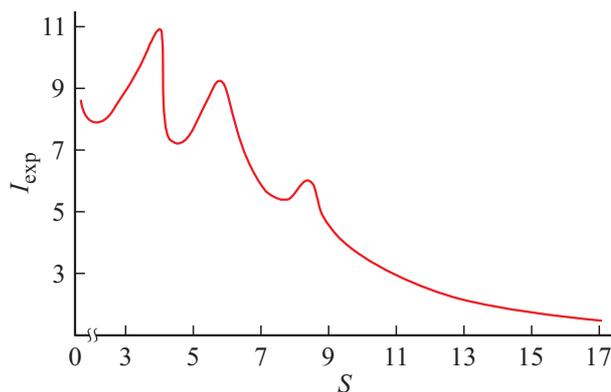


Рис. 4. Экспериментальная кривая интенсивности $I_{\text{exp}}(S)$ аморфного CuIn_5Te_8 .

(КРРА) аморфных веществ, состоящих из атомов разного сорта, лежит формула, представленная в работе [10]:

$$4\pi r^2 \sum_m K_m U_m(r) = 4\pi r^2 U_0 \sum_m K_m + \frac{2r}{\pi} \int_0^\infty \sin(s) \sin(sr) ds. \quad (1)$$

Здесь \sum — суммирование по молекулярному составу, K_m представляет эффективную рассеивающую способность атома в исследуемом веществе, которая в электронографии, согласно [11], определяется как

$$K_m^{\text{el}} = (Z_m/Z_l)^{0.75}, \quad (2)$$

где Z_m — порядковый номер атома m в Периодической системе элементов, Z_l — порядковый номер наиболее легкого атома, входящего в соединение; $U_m(r)$ — функция распределения атомной плотности; $4\pi r^2 U_m dr$ — среднее число атомов в сферическом слое, ограниченном радиусами r и $r + dr$; U_0 — средняя плотность ($\text{ат}/\text{\AA}^3$) в данном объеме, которая определяется из выражения $U_0 = d/Mm_H$, где d — плотность аморфного вещества, m_H — масса атома водорода, равная $1.65 \cdot 10^{-24}$ г; $S = 4\pi \sin \theta / \lambda_e$, где θ — угол рассеяния, λ_e — длина волны электронов, зависящая от приложенного ускоряющего напряжения. Интерференционная функция определяется как

$$i(s) = \frac{I_H^k(s)}{f^2(s)} - 1. \quad (3)$$

Здесь $I_H^k(s)$ — нормированная интенсивность когерентного рассеяния; $f(s)$ — атомный фактор применяемого излучения. Интенсивность когерентного рассеяния $I_H^k(s)$ находят по экспериментальной кривой интенсивности $I_e(s)$, вычитая из нее интенсивность фона. Экспериментальные данные для фона при дифракции электронов

можно определить теоретической зависимостью

$$I^{\text{back}}(s) = k \left\{ \frac{4ZS(s)}{a_0 S^4} + f^2(s) [1 - e^{-2M}] \right\}, \quad (4)$$

где Z — порядковый номер; a_0 — период решетки; $S(s)$ — функция неупругого рассеяния Гейзенберга–Бевилоуга; $f^2(s)$ — атомный фактор; e^{-2M} — температурный фактор Дебая.

Однако наиболее оптимальный способ учета фона и определения функции $i(s)$, который позволяет определить интенсивность фона через функцию $I_{av}(S)/f^2(s)$, где $I_{av}(S)$ — средняя интенсивность, представлен в работе [10].

Так как интерференционная функция $i(s)$ определяется только лишь когерентной частью интенсивности, то она вычисляется непосредственно из экспериментальной кривой интенсивности без предварительного определения и исключения фона. Экспериментальную интенсивность рассеяния $I_{\text{exp}}(S)$ можно представить в виде суммы интенсивности когерентного рассеяния $I^k(s)$ и интенсивности фона $I^{\text{back}}(s)$, измеряемых в относительных единицах

$$I_{\text{exp}}(S) = I^k(s) + I^{\text{back}}(s), \quad (5)$$

а среднюю интенсивность рассеяния

$$I_{av}(s) = I^{\text{back}}(s) + \frac{1}{\alpha} f^2(s). \quad (6)$$

Используя формулу, предложенную в работе [10], интенсивность когерентного рассеяния нормируется как

$$\alpha \int_0^\infty I^k(s) i^2 ds = \int_0^\infty f^2(s) s^2 ds, \quad (7)$$

где α — нормирующий множитель, а с учетом (5)

$$\int_0^\infty I_e(S) S^2 ds = \int_0^\infty I_{av}(S) S^2 ds. \quad (8)$$

Учитывая, что $I_H^k(s) = \alpha I^k(s)$ с помощью (6), (7) интерференционная функция определяется как

$$i(s) = \frac{\alpha I^k(s) - f^2(s)}{f^2(s)} = \alpha \left[\frac{I_e(S)}{f^2(s)} - \frac{I_{av}(S)}{f^2(s)} \right] = \alpha i(s). \quad (9)$$

Зависимость экспериментальной интенсивности когерентного рассеяния электронов (I_e) от S , как было указано выше, записывалась нами в режиме непосредственной регистрации электронного тока. Учет некогерентного фона проводили по методике [10], а расчет ФРРА по формуле (1). Для аморфной структуры CuIn_5Te_8 построены кривые функций $I_e(S)/\sum_m f_m^2(S)$ и $I_{av}(S)/\sum_m f_m^2(S)$.

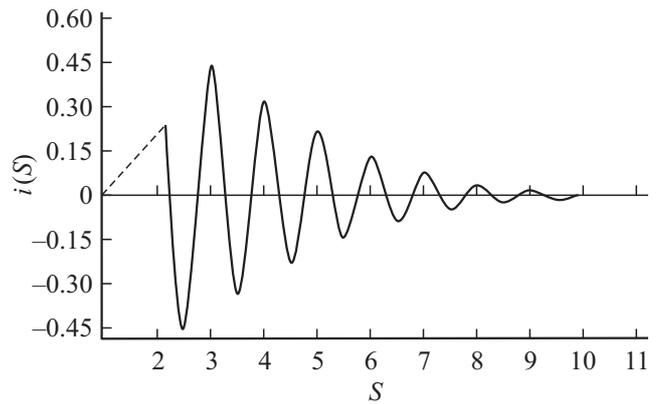


Рис. 5. Интерференционная функция рассеяния электронов в аморфном CuIn_5Te_8 .

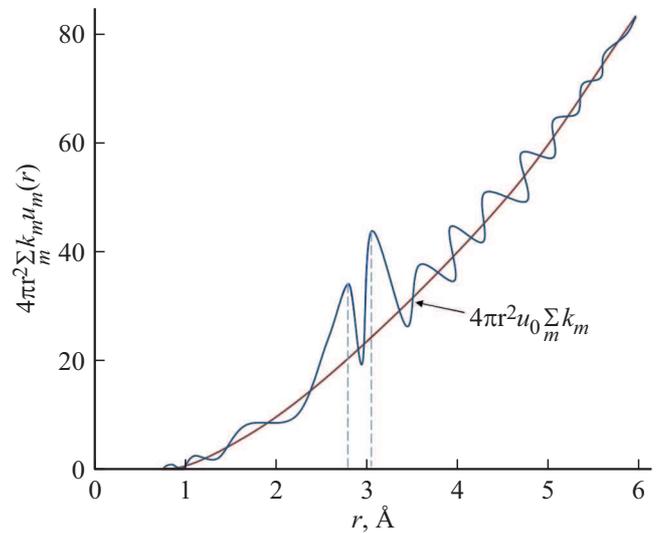


Рис. 6. Кривая радиального распределения атомов CuIn_5Te_8 .

Кривая интерференционной функции $i(S)$, построенная для аморфного CuIn_5Te_8 , представлена на рис. 5.

Среднее значение нормирующего множителя $\alpha_{av} = 33$. Для расчета U_0 плотность аморфного CuIn_5Te_8 принята равной 5.30 г/см^3 , т.е. на 10% меньше плотности кристаллического соединения. ФРРА аморфного CuIn_5Te_8 (рис. 6) содержит два явно выраженных максимума. Первый максимум выявляется при $r_1 = 2.70 \text{ Å}$, второй обнаруживается при $r_2 = 3.04 \text{ Å}$.

Площади под максимумами, соответствующие расстояниям r_1 и r_2 , равны $\Delta_1 = 22.5$, $\Delta_2 = 40.5$. Первому максимуму при $r_1 = 2.70 \text{ Å}$ отвечает межатомное расстояние $\text{Cu}–\text{Te}$. Значение суммы ионных радиусов меди и индия составляет $\text{In}^{+3} + \text{Te}^{-2} = 0.94 + 2.1 = 3.04 \text{ Å}$. Расчет соответствующего координационного числа (K_4) дает $n_1 = 4$, что указывает на тетраэдрическое окружение ионов меди атомами индия. Второму максимуму на ФРРА соответствует расстояниям между ионами Cu и Te . Значение суммы ковалентных радиу-

сов $\text{Cu-Te} = 1.32 + 1.38 = 2.70 \text{ \AA}$ близко r_2 . K_4 , равное $n_2 = 6$, указывает на октаэдрическое окружение ионов меди атомами теллура. В аморфных пленках CuIn_5Te_8 , полученных под воздействием электрического поля напряженностью $500 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, межатомные расстояния Cu-Te , In-Te несколько укорачиваются и составляют 2.70 и 3.04 \AA соответственно, что, возможно, связано с дипольно-эластичной поляризацией молекул аморфного CuIn_5Te_8 . При этом в обоих случаях число ближайших соседей атомов не меняется — наблюдаются тетраэдрические и октаэдрические окружения атомов [9].

4. Заключение

Впервые показано, что в бинарном поле компонентов при одновременном и последовательном осаждении $\text{Cu}_2\text{Te-In}_2\text{Te}_3$, а также при испарении пленок системы Cu-In-Te в соотношении $1:5:8$, вследствие плавного изменения процентного содержания компонентов при комнатной температуре образуются пленки тройных соединений CuInTe_2 , CuIn_3Te_5 и CuIn_5Te_8 в кристаллическом состоянии. При температуре монокристаллических подложек 223 К реализуются аморфные фазы CuIn_3Te_5 и CuIn_5Te_8 . На основе интегрального анализа интенсивностей рассеяния электронов высоких энергий построена кривая радиального распределения атомной плотности в аморфных пленках CuIn_5Te_8 , т.е. установлена функция, которая в статических рамках определяет вероятность встречи атома того или иного сорта, находящегося на расстоянии r от данного атома. Рассчитаны и определены параметры ближнего атомного порядка в аморфном CuIn_5Te_8 : межатомные расстояния, радиусы координационных сфер и число ближайших соседей атомов. Установлено, что матрицы аморфных слоев состава CuIn_5Te_8 состоят из тетраэдрических и октаэдрических окружений атомов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М. Хансен, К. Андерко. *Структура двойных сплавов* (М., Металлургиздат, 1962).
- [2] C. Rinson, S.M. Wasim, G. Marin, E. Hernández, J.M. Delgado, J. Galibert. *J. Appl. Phys.*, **88**, 3439 (2000).
- [3] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Е.И. Теруков, А.М. Ковальчук. *ФТП*, **45** (5), 617 (2011).
- [4] A.M. Abo, T.A. Hendia, L.I. Soliman, H.A. Zayed, M.A. Kenawy. *J. Mater. Sci.*, **28**, 1182 (1993).
- [5] А.Ч. Мамедова, Н.К. Керимова, Д.И. Исмаилов, С.М. Багирова, А.М. Нуриева. *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования*, **2**, 62 (2016).
- [6] Э.Б. Аскеров, А.И. Мададзада, Д.И. Исмаилов, Р.Н. Мехтиева. *ФТП*, **48** (11), 1484 (2014).
- [7] Э.Б. Аскеров, А.И. Мададзада, Д.И. Исмаилов, Р.Н. Мехтиева. *ФТП*, **48** (9), 1265 (2014).
- [8] Г.Е. Дашдамирова, Э.Б. Аскеров, Д.И. Исмаилов. *ФТП*, **56** (3), 297 (2022).
- [9] I.D. Olekseyuk, O.Ye. Zbankov. *J. Alloys Compd.*, **436**, 247 (2007).
- [10] И.Д. Набитович, Я.И. Специв, Я.В. Волушук. *Кристаллография*, **12** (4), 584 (1967).
- [11] Б.К. Вайнштейн. *Кристаллография*, **2** (1), 29 (1957).

Редактор А.Н. Смирнов

Electron Diffraction Study of Phase Formation in Nano Layers of $\text{Cu}_2\text{Te-In}_2\text{Te}_3$, Cu-In-Te Systems and Short-Range Atomic Order in Amorphous CuIn_5Te_8 Films

G.E. Dashdamirova¹, E.B. Asgerov^{2,3}, D.I. Ismailov¹

¹ Institute of Physics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, AZ1143 Baku, Azerbaijan

² Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

³ National Nuclear Research Centre, 370143 Baku, Azerbaijan

Abstract It is shown that with the simultaneous and sequential deposition of films of the $\text{Cu}_2\text{Te-In}_2\text{Te}_3$ system, as well as copper, indium, and tellurium of the highest purity used as starting materials, $\sim 99.999\%$, taken in the ratio $\text{Cu:In:Te} = 1:5:8$, regardless of the deposition order ternary compounds of the compositions CuInTe_2 , CuIn_3Te_5 , and CuIn_5Te_8 in the crystalline state are distinguished. During vacuum condensation of films on single-crystal substrates NaCl , KCl and amorphous celluloid cooled by liquid nitrogen to 203 К , the resulting films obtained both by co-evaporation of binary compounds of the $\text{Cu}_2\text{Te-In}_2\text{Te}_3$ system and by the synthesis of thin layers applied by Cu , In , Te are amorphous. For the first time in nanosized amorphous films of the composition CuIn_5Te_8 , crystallizing in the tetragonal system with the periods of unit cells $a = 6.162 \text{ \AA}$, $c = 12.291 \text{ \AA}$, obtained both under normal conditions and under the influence of an external electric field with a strength of $500 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, the structure of the short-range atomic order is established — the number of nearest neighbors — coordination numbers and radius of coordination spheres. It was revealed that in amorphous CuIn_5Te_8 films obtained under the influence of an external electric field, in which the matrices consist of tetrahedral and octahedral environments of atoms, in opposite to films that are formed outside the field, the number of nearest neighbors remains unchanged, the radius of coordination spheres and interatomic distances are somewhat are shortened.