

ДИФРАКЦИЯ И РАССЕЯНИЕ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

УДК 548.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИТИПНЫХ КРИСТАЛЛОВ CdInAlS_4 , $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$
И $\text{Mg}_{0.7}\text{Ga}_{1.4}\text{In}_{0.8}\text{S}_4$ ПО ЭЛЕКТРОНОГРАММАМ ВРАЩЕНИЯ© 2022 г. М. Г. Кязумов^{1,*}, С. М. Рзаева¹, А. С. Авилов^{2,**}¹Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

*E-mail: eaisaeva@mail.ru

**E-mail: avilovanatoly@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.2021 г.

После доработки 27.02.2022 г.

Принята к публикации 27.02.2022 г.

По электронограммам, полученным с помощью специального наклона кристаллодержателя с монокристаллической пленкой и его последующего вращения, установлены $2H$ -политипы (пр. гр. $R\bar{6}_3mc$) соединений: CdInAlS_4 ($a = 3.87$, $c = 24.65$ Å), $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$ ($a = 3.78$, $c = 24.44$ Å) и $\text{Mg}_{0.7}\text{Ga}_{1.4}\text{In}_{0.8}\text{S}_4$ ($a = 3.81$, $c = 24.39$ Å). Монокристаллические пленки первых двух соединений лежали на поверхности кристаллодержателя. Пленка последнего соединения была расположена под некоторым углом к плоскости кристаллодержателя. В этом случае приведена схема, объясняющая происхождение части рефлексов, находящихся в нестандартных позициях (вне линии эллипсов). Такая схема может быть использована в дальнейших электронографических структурных исследованиях нанобъектов, произвольно ориентированных на кристаллодержателе.

DOI: 10.31857/S0023476122040129

ВВЕДЕНИЕ

В слоистых кристаллах часто существуют композиционные дефекты [1] и смеси [2–4] разных политипов, которые сильно влияют на их физические свойства. Во многих случаях дифракционные картины смесей разных политипов с малыми параметрами кристаллической решетки c и некоторых политипов с большими параметрами c совпадают [3]. А это осложняет идентификацию дифракционных картин.

При исследовании слоистых кристаллов более эффективны электронно-дифракционные методы, особенно тогда, когда кристаллы состоят из смеси разных политипов. Развитие современных нанотехнологий невозможно без детальной структурной информации, получаемой различными дифракционными методами. Последнее обстоятельство стимулирует разработку новых электронно-дифракционных методов, имеющих специфические преимущества при исследовании нанобразцов [5–7].

Исследования [2, 3] показали, что в тонких (менее 500 Å) монокристаллических пленках присутствует только одна политипная модификация. В [3] продемонстрировано также, что при исследовании тонких монокристаллических пленок использование нового метода вращения в электронной дифракции существенно облегчает изу-

чение одной политипной фазы. Но если известна одна фаза, то легко установить и другую.

Важным моментом электронографических исследований, от которого зависят точность и надежность структурного определения, является получение тонкопленочных препаратов. Тонкие монокристаллические пленки получали отслаиванием от толстого кристалла с помощью липкой ленты. Благодаря наличию двух осей поворота образца на столике гониометра (на электронографх ЭГ-400 и ЭР-102М) под электронным пучком различными способами, наклоняя и вращая кристаллодержатель, получали электронограммы вращения, имитирующие электронограммы пластинчатых или игольчатых текстур [5–7]. Для того чтобы получить электронограммы с необходимым набором рефлексов, монокристаллическую пленку вращали вокруг осей, лежащих в плоскости кристаллодержателя и перпендикулярно ей [4–6].

В практике электронографического структурного анализа слоистых кристаллов часто встречаются случаи, когда параметры кристаллической решетки слоистых полупроводников в базисной плоскости (в гексагональной и тригональной решетках параметр a) в несколько, а иногда в десятки раз меньше параметра c . Соответствующая ось c может быть либо перпендикулярна, либо косо расположена по отношению к базисной

плоскости. Узловые ряды hk (в которых h и k фиксированы, меняется только l) отдалены друг от друга, тогда как узлы очень густо расположены в рядах, идущих вдоль оси c^* . Это обстоятельство позволяет легко выделить узловые ряды hk на электронограммах вращения монокристалла, что существенно облегчает их индентирование и в конечном итоге расшифровку электронограмм.

Отметим, что есть обстоятельство, осложняющее интерпретацию электронограмм. Это случаи, когда пленка неровно лежит на поверхности кристаллодержателя и основные кристаллографические плоскости расположены под некоторым углом к этой поверхности. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

Настоящая работа посвящена созданию новых схем вращения монокристаллических пленок и получения электронограмм, имитирующих пластинчатые текстуры, а также их применению к исследованию структуры пленок $CdInAlS_4$, $Fe_{0.75}Ga_{0.25}InS_3$ и $Mg_{0.7}Ga_{1.4}In_{0.8}S_4$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящих исследованиях тонкие монокристаллические пленки получали отслаиванием с помощью липкой ленты от толстого кристалла, который приклеивали ровной поверхностью на металлическую сетку или шайбу. На поверхности кристаллодержателя располагали шайбы, в которых входное отверстие имело диаметр около 0.8–1 мм, а выходное – около 2 мм. Изучены два случая расположения монокристаллической пленки: в плоскости кристаллодержателя и под некоторым углом к ней.

Расположение монокристаллической пленки на поверхности кристаллодержателя

Электронографическое исследование монокристаллической пленки $CdInAlS_4$. Монокристаллическая пленка состава $CdInAlS_4$ была получена указанным выше способом и расположена на поверхности кристаллодержателя. Поэтому при вращении кристаллодержателя вокруг нормали к его плоскости, наклоненной на угол φ относительно положения, перпендикулярного падающему электронному лучу, узлы на плоскости $(hk0)$ обратной решетки будут регистрироваться на плоскости электронограммы вдоль малой оси эллипсов, а другие узлы, относящиеся к одной и той же лауэ-зоне, – на слоевых линиях, параллельных малой оси эллипсов. Все электронограммы были получены на электронографе ЭР-102М при ускоряющем напряжении 75 кВ, точность определения параметров решетки и межплоскостных расстояний составляла $\pm 0.01 \text{ \AA}$.

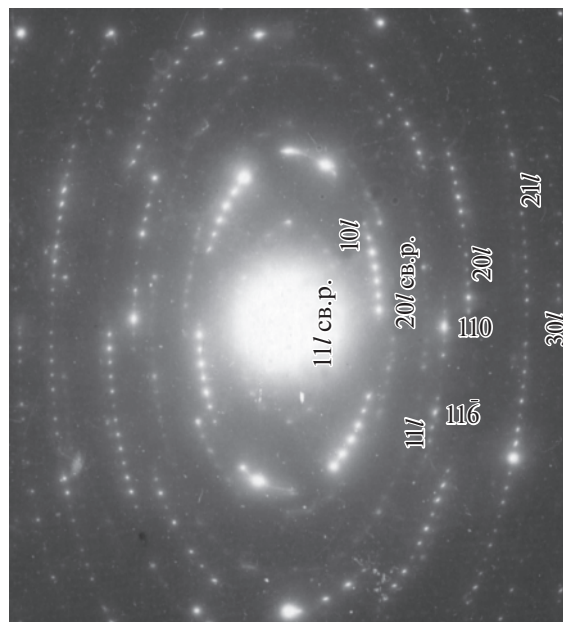


Рис. 1. Электронограмма вращения тонких монокристаллических пленок $CdInAlS_4$ ($\varphi = 60^\circ$, $\omega = 45^\circ$).

На рис. 1 показана электронограмма монокристаллической пленки $CdInAlS_4$, наклоненной на угол $\varphi \approx 60^\circ$ относительно положения, перпендикулярного падающему электронному пучку, и осуществлено вращение (во время экспозиции) на угол $\omega \approx 45^\circ$ вокруг нормали к плоскости пленки. В отличие от электронограмм косых текстур, на которых различные серии рефлексов накладываются друг на друга, в данном случае они пространственно разделены. Расшифровку дифракционных картин проводили с помощью известных формул для электронограмм косых текстур [8]:

$$d_{100} = \sqrt{3}a/2 = 2L\lambda h/2R_{h00}, \tag{1}$$

$$D_{hkl} = (R_{hkl}^2 - R_{hk0}^2)^{1/2}, \tag{2}$$

$$\Delta D = c^*L\lambda = D_{hkl} - D_{hk(l-1)}, \tag{3}$$

$$d_{001} = c = 1/c^* = L\lambda/\Delta D. \tag{4}$$

Здесь L – расстояние от образца до фотопленки, λ – длина волны падающих электронов, h, k, l – индексы Миллера, $2R$ – расстояния между рефлексами на электронограмме, R_{hk0} – малые оси эллипсов, d_{hkl} – межплоскостное расстояние, D_{hkl} – расстояние между узлами hkl и плоскостью $(hk0)$ обратной решетки в масштабе $L\lambda$ при $h, k = \text{const}$, ΔD – расстояние между соседними узлами вдоль оси c^* в масштабе $L\lambda$, c^* – параметр обратной решетки.

Установлены параметры основной кристаллической решетки: $a = 3.87$, $c = 24.65 \text{ \AA}$, пр. гр. $R\bar{6}_3mc$. Рефлексы, находящиеся на “слабых” (первых, третьих, четвертых, седьмых, восьмых и других)

эллипсах относятся только к сверхрешетке с параметром $A_{\text{сверх}} = \sqrt{3}a$.

Параметр $c = 24.65 \text{ \AA}$ соответствует толщине восьми плотноупакованных слоев серы. Как известно [9], второй сильный рефлекс в серии $11\bar{2}l$, т.е. рефлекс $11\bar{2}6$, является рефлексом-индикатором, определяющим структурный тип. Значение $l = 6 = 2 \times 3$ указывает на то, что элементарная ячейка состоит из двух пакетов типа ТОТП, где О, Т и \bar{T} – соответственно двумерные октаэдрические, тетраэдрические слои, ориентированные в одну сторону и в противоположные, П – пустой межслоевой промежуток. Этот политип является изоструктурным аналогом $2H$ -политипа $\text{ZnIn}_2\text{S}_4(\text{II})\text{a}$ [10]. Тип упаковки анионов серы – гткг, где г и к – соответственно гексагональная и кубическая упаковки слоев.

Электроннографическое исследование монокристаллической пленки $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$. В [11, 12] методом Бриджмена и химической транспортной реакции с использованием в качестве транспортера I_2 были синтезированы и с помощью порошковой дифракции изучены кристаллы некоторых составов, входящие в систему Fe–Ga–In–S. Установлено, в частности, что кристаллы $\text{Ga}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}\text{InS}_3$, $\text{Ga}_{0.25}\text{Fe}_{0.25}\text{In}_{1.5}\text{S}_3$ и $\text{Ga}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{InS}_3$ состоят из чистых однопакетных тригональных ($1T$) политипов, кристаллы $\text{Ga}_{0.5}\text{Fe}_{0.25}\text{In}_{1.25}\text{S}_3$ представляют собой смеси основной $3R$ -фазы (трехпакетной ромбоэдрической) и однопакетной фазы в малом количестве, а кристаллы $\text{Ga}_{0.25}\text{Fe}_{0.75}\text{InS}_3$ состоят из смесей $3R$ -политипа (основная фаза) и двухпакетной фазы в малом количестве. Эти политипы относятся к структурным типам ТОТП. Здесь Т и О, как и выше, – двумерные слои соответственно из тетраэдров и октаэдров, П – пустой межслоевой промежуток. Вторые фазы были в незначительной концентрации, и им соответствовало не более двух–трех слабых рефлексов. Приведенные в [13] качественные электроннограммы текстур показали, что образец $\text{Fe}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{InS}_3$ является чистым $1T$ -политипом, а образцы $\text{Fe}_{0.25}\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{1.25}\text{S}_3$ и $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$ – чистые $3R$ -политипы.

В настоящей работе получены шесть образцов тонких монокристаллических пленок $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$. Электроннограммы сняты с использованием развитаго ранее метода вращения. Поскольку изучали пленки толщиной менее 50 нм, удалось отделить одну фазу от другой. Из всех образцов только один оказался новым двухпакетным гексагональным ($2H$) политипом (рис. 2). Остальные образцы представляли собой трехпакетный ромбоэдрический политип $3R$.

На рис. 2 показана электроннограмма, полученная вращением на угол $\omega = 45^\circ$ тонких монокри-

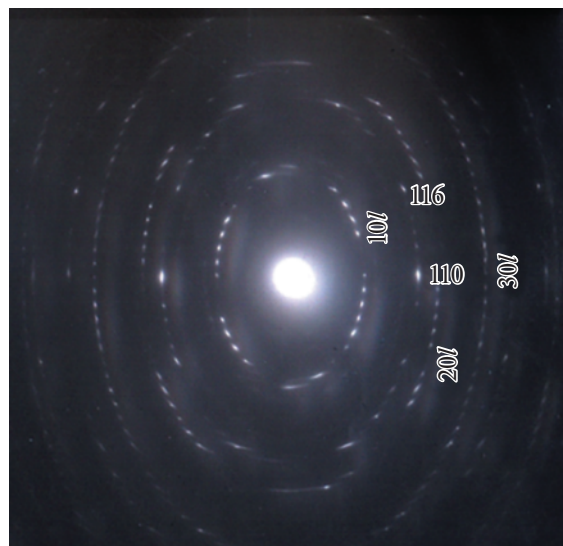


Рис. 2. Электроннограмма вращения тонких монокристаллических пленок $\text{Fe}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{InS}_3$ ($\varphi = 40^\circ$, $\omega = 45^\circ$).

сталлических пленок вокруг нормали к плоскости пленки, которая заранее наклонена на угол $\varphi = 40^\circ$ относительно положения, перпендикулярного падающему электронному пучку. Как видно, электроннограмма не охватывает симметрично-независимую часть структуры. Для простоты на рисунке опущены индексы i . По соотношениям расстояний R_{hk0} между рефлексами, находящимися на малой оси эллипсов, определен гексагональный тип кристаллической решетки: $1 : \sqrt{3} : 2 : \sqrt{7} = R_{100} : R_{110} : R_{200} : R_{210}$. По расстояниям R_{10l} между рефлексами, расположенными на первом эллипсе (серия $10\bar{1}l$), установлены параметры решетки: $a = 3.78$, $c = 24.44 \text{ \AA}$, а по погасаниям рефлексов общего типа – пр. гр. $R\bar{6}_3mc$. Отсутствие на втором эллипсе (серия $11\bar{2}l$) рефлексов с нечетными индексами l указывает на то, что структура данного образца состоит из двух пакетов. По расстояниям R_{11l} между рефлексами на втором эллипсе (серия $11\bar{2}l$) установлена толщина пакетов (12.22 \AA), а по индексу $l = 6$ второго сильного рефлекса $11\bar{2}6$ – структурный тип ТОТП [9]. Этот политип является изоструктурным аналогом $2H$ -политипа $\text{ZnIn}_2\text{S}_4(\text{II})\text{a}$ [10] и $2H$ -политипа CdInGaS_4 [2, 3].

Электроннографическое исследование монокристаллической пленки $\text{Mg}_{0.7}\text{Ga}_{1.4}\text{In}_{0.8}\text{S}_4$, расположенной под некоторым углом к плоскости кристаллодержателя

В [14] приведена кристаллическая структура трехпакетного ромбоэдрического ($3R$) политипа $\text{MgGa}_x\text{In}_{2-x}\text{S}_4$ ($0.6 \leq x \leq 1.4$) с параметрами решетки $a = 3.77\text{--}3.85$, $c = 36.68\text{--}37.12 \text{ \AA}$, пр. гр. $R3m$.

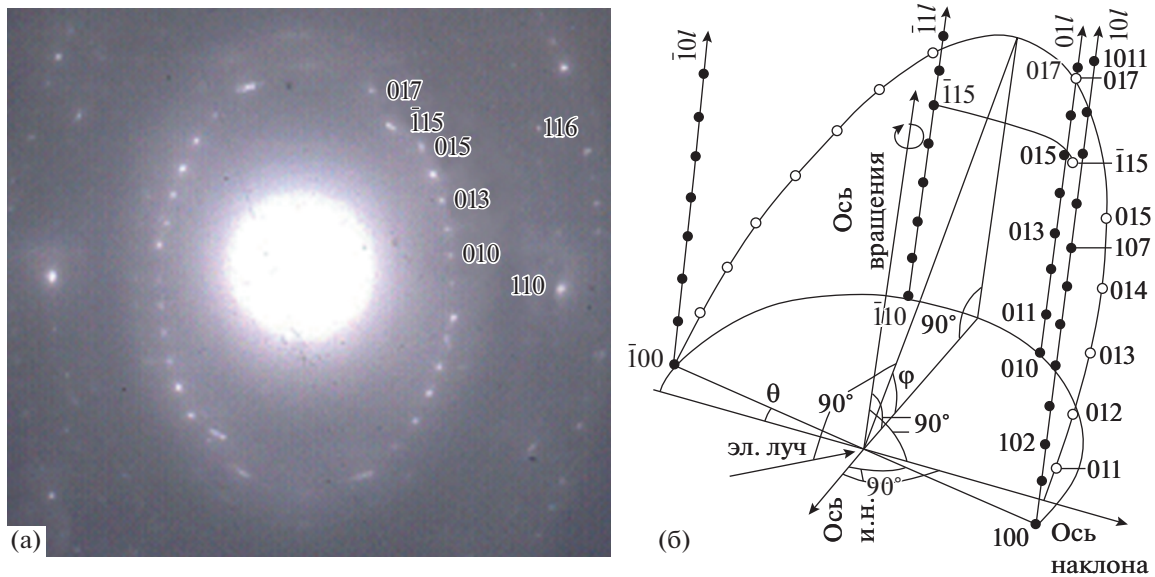


Рис. 3. Монокристалл $2H$ -политипа $Mg_{0.7}Ga_{1.4}In_{0.8}S_4$ ($\varphi = 35^\circ$, $\omega = 60^\circ$): а – электронограмма вращения, б – схема вращения и регистрации узлов (и, соответственно, рефлексов) обратной решетки на сечении сферы Эвальда. Темные кружки – узлы обратной решетки, расположенные параллельно оси $00l$, светлые – узлы типа $01l$ и $11l$, регистрируемые на сечении сферы Эвальда, ось И.Н. – ось исходного наклона пленки по отношению к плоскости кристаллодержателя, θ – угол между плоскостями пленки и кристаллодержателя.

В этой структуре элементарная ячейка состоит из 12 слоев, а элементарный пакет – из четырех слоев атомов серы. В пакетах к центральной октаэдрической сетке с двух сторон примыкают тетраэдрические сетки. Межпакетные октаэдры и тетраэдры пустуют.

В [15] приведена кристаллическая структура однопакетного тригонального $1T$ -политипа $MgGaInS_4$ с параметрами решетки $a = 3.81$, $c = 12.20$ Å, пр. гр. $P3m1$. В этой структуре элементарная ячейка и пакет состоят из четырех слоев атомов серы. В [15] также описана кристаллическая структура двухпакетного гексагонального ($2H$) политипа $Mg_{0.5}Ga_2InS_5$ с параметрами решетки $a = 3.81$, $c = 30.60$ Å, пр. гр. $P6_3mc$. В этой структуре элементарная ячейка состоит из десяти слоев, а элементарный пакет – из пяти слоев атомов серы. В пакетах к центральной октаэдрической сетке с одной стороны примыкает одна тетраэдрическая сетка, а с другой – две тетраэдрические сетки. Межпакетные октаэдры и тетраэдры пустуют. Задачей настоящей работы было исследование структуры кристаллов $MgGa_xIn_{2-x}S_4$ с помощью развитых здесь электронно-дифракционных методов с целью установления новых политипов и уникальных сверхрешеток, которые характерны для слоистых полупроводников.

Кристаллы для эксперимента отбирали из различных ампул и различных мест одной и той же ампулы. Определенные прямоугольные части кристаллов $MgGa_xIn_{2-x}S_4$ использовали для по-

лучения тонких монокристаллических пленок, пригодных для электронографического исследования. Структурное электронографическое исследование показало, что монокристаллическая пленка лежит под наклоном к плоскости кристаллодержателя. Поэтому развитый нами ранее метод наклона и последующего вращения монокристаллической пленки был использован для объяснения дифракционных картин в данном случае.

На рис. 3 показана электронограмма, полученная вращением монокристаллической пленки (на угол $\omega = 60^\circ$) вокруг нормали к ней, которая заранее наклонена на угол $\varphi = 35^\circ$ относительно положения, перпендикулярного падающему электронному пучку. Для простоты на рисунке опущены индексы i .

После предварительного (до экспозиции) наклона на угол $\varphi = 35^\circ$ во время съемки дифракционной картины кристаллодержатель вместе с пленкой вращали вокруг нормали к плоскости кристаллодержателя (а не пленки) (рис. 3). Узлы обратной решетки, находящиеся на одинаковых расстояниях от оси c и от плоскости пленки (например, $10l$, $01l$, $11l$, $10l$, $01l$ и $11l$, $l = \text{const}$), в отличие от случая расположения пленки на поверхности кристаллодержателя будут находиться на разных расстояниях от оси вращения и от плоскости кристаллодержателя. Поэтому несмотря на то что R_{hkl} одинаковы для таких узлов, при вращении вокруг нормали к плоскости кристаллодержателя эти узлы будут двигаться вдоль окружностей раз-

ных радиусов и на разных высотах относительно плоскости кристаллодержателя.

При малых углах ($\theta < 5^\circ$) на электронограммах наблюдаются рефлексы, расположенные на деформированных эллипсах, и в этом случае слоевые линии отсутствуют. При визуальной оценке можно прийти к выводу, что расстояния между некоторыми рефлексами вдоль эллипсов неодинаковые, что может ошибочно указывать на низкую симметрию кристаллической решетки. На самом деле в связи с тем, что не меняются длины радиус-векторов узлов R_{hkl} при уменьшении высоты рефлексов относительно малой оси эллипсов (относительно оси наклона) рефлексы больше удаляются от большой оси эллипсов и остаются вне их линии.

Узлы 015 и $\bar{1}15$, находящиеся на одинаковых расстояниях от оси c и от плоскости пленки, в отличие от случая расположения пленки на поверхности кристаллодержателя, где они должны налагаться друг на друга, в данном случае выходят в разных местах электронограммы (рис. 3). Как видно из рис. 3а, при вращении из узлового ряда $\bar{1}11$ на электронограмме зарегистрирован только один узел $\bar{1}15$.

По электронограмме определены параметры кристаллической решетки: $a = 3.80$, $c = 24.39$ Å. Параметр c соответствует толщине восьми плотноупакованных слоев серы. Таким образом, элементарная ячейка состоит из восьми слоев, а элементарный пакет – из четырех слоев атомов серы.

На рис. 3 второй сильный рефлекс на втором эллипсе $11\bar{2}6$. Как известно [9], второй сильный рефлекс в серии $11\bar{2}l$ является рефлексом-индикатором, определяющим структурный тип. Индекс $l = 6 = 2 \times 3$ указывает на тип структуры. Число 2 соответствует количеству пакетов в элементарной ячейке политипа, а число 3 указывает на тип пакетов ТОП в структуре политипа [9]. В сериях $11\bar{2}l$ отсутствуют рефлексы с $l \neq 2n$. По угасаниям рефлексов установлена пространственная группа двухпакетного политипа $P6_3mc$. Тип упаковки анионов серы – гткг. Этот политип является изоструктурным аналогом $2H$ -политипа $ZnIn_2S_4(II)a$ [10] и $2H$ -политипа $CdInGaS_4$ [2, 3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены электронограммы тонких монокристаллических пленок $CdInAlS_4$, $Fe_{0.75}Ga_{0.25}InS_3$ и $Mg_{0.7}Ga_{1.4}In_{0.8}S_4$ вращением на угол $\omega \leq 60^\circ$ вокруг нормали к плоскости кристаллодержателя, которая заранее (до экспозиции) наклонена на угол $\varphi < 70^\circ$ относительно положения, перпендикулярного падающему электронному лучу. Рассмотрены два случая. В первом случае монокри-

сталлические пленки двух соединений расположены в плоскости кристаллодержателя. По электронограмме, имитирующей электронограммы косых текстур, установлен новый $2H$ -политип $CdInAlS_4$ со структурным типом $ТО\bar{T}П$ и плотнейшей упаковкой слоев серы гткг, где T , \bar{T} и O – двумерные слои соответственно из ориентированных в одну и противоположные стороны тетраэдров и октаэдров, P – пустой межслоевой промежуток, g и k – соответственно гексагональная и кубическая упаковка слоев серы.

Рентгенографическое исследование порошков $Fe_{0.75}Ga_{0.25}InS_3$ показало, что они состоят из основного известного политипа и малого количества неизвестной фазы. С помощью развитого нами метода вращения монокристалла, имитирующего пластинчатые текстуры, установлен двухпакетный гексагональный ($2H$) политип со структурным модулем $гTгOкTгП$, который является новым политипом в системе $Fe-Ga-In-S$.

Для тонких монокристаллических пленок соединения $Mg_{0.7}Ga_{1.4}In_{0.8}S_4$ получены электронограммы, имитирующие пластинчатые текстуры. В этом случае пленка расположена под некоторым углом θ к плоскости кристаллодержателя. Электронограммы получены путем наклона пленки на угол $\varphi = 35^\circ$ и последующего вращения на угол $\omega = 60^\circ$ вокруг нормали к плоскости кристаллодержателя. На электронограммах основные рефлексы расположены вдоль эллипсов, и они были легко проиндексированы. По этим электронограммам в системе $Mg-Ga-In-S$ впервые установлен двухпакетный гексагональный ($2H$) политип с пр. гр. $P6_3mc$. Приведена схема, объясняющая происхождение дополнительных рефлексов, расположенных не на линии эллипсов. Подобные схемы должны помочь при изучении кристаллической структуры пленок нанометровой толщины и пленочных систем, нанобразцов, нанотрубок и других нанобъектов в случае их произвольной ориентации.

Работа выполнена частично в рамках госзадания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anagnostopoulos A.N., Manolikas C., Papadopoulos D., Spyridelis J.* // Phys. Status Solidi. A. 1982. V. 72. P. 731.
2. *Kyazumov M.G.* // Azerb. J. Phys. Fizika. 1996. V. 2. № 4. P. 28.
3. *Кязумов М.Г., Рзаева С.М., Авиллов А.С.* // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 6. С. 861. <https://doi.org/10.31857/S0023476121060217>
4. *Кязумов М.Г.* // Кристаллография. 2000. Т. 45. № 4. С. 617.

5. Звягин Б.Б., Жухлистов А.П., Кязумов М.Г., Фоми-
ненков А.М. // Кристаллография. 1990. Т. 35.
Вып. 3. С. 602.
6. Кязумов М.Г., Звягин Б.Б., Жухлистов А.П., Фоми-
ненков А.М. Способ получения электронограмм
типа косых текстур тонких пластинчатых кристал-
лов. Авторское свидетельство № 1649397 (1991).
7. Кязумов М.Г. // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 4.
С. 549.
8. Звягин Б.Б. Электронография и структурная кри-
сталлография глинистых минералов. М.: Наука,
1964. 282 с.
9. Кязумов М.Г. // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 4.
С. 572.
10. Доница Ф.Г., Радауцан С.И., Киоссе Г.А. и др. //
Кристаллография. 1971. Т. 16. Вып. 2. С. 235.
11. Кязумов М.Г., Гусейнов Г.Г., Асадова И.Б., Султа-
нов Р.М. // Получение и структурное исследование
кристаллов, входящих в систему Ga–In–Fe–S.
Тез. докл. НКРК-2002, Москва 24–29 ноября 2002,
С. 230.
12. Гусейнов Г.Г., Мусаева Н.Н., Кязумов М.Г. и др. //
Неорган. материалы. 2003. Т. 39. № 9. С. 1.
13. Кязумов М.Г., Гусейнов Г.Г., Казымов М.Г., Руста-
мова Л.В. // Transac. NAS Azerbaijan. 2005. V. XXV.
№ 5. P. 129.
14. Hauser H., Cordes W. // Z. Naturforsch. 1996. B.
51b. S. 457.
15. Moldovyan N.A., Pyshnaya N.B., Radautsan S.I. // Jpn.
J. Appl. Phys. 1993. V. 32. P. 781.