

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

Клюева Мария Вячеславовна

**Особенности синтеза и электронного транспорта
монокристаллов квазикристаллических фаз и
аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe**

Специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Дмитрий Александрович Шулятев

Москва — 2016 год

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Аналитический обзор литературы.....	9
§1.Открытие квазикристаллов.....	9
§2.Классификация квазикристаллов.....	12
§3.Структура квазикристаллов. Кластеры.....	15
§4.Физические свойства квазикристаллов.....	19
§5.Аппроксиманты.....	21
§6.Методы получения квазикристаллов.....	26
§7.Электронный транспорт в квазикристаллах и аппроксимантах.....	27
§8.Магнитные свойства квазикристаллов.....	31
Глава 2 Получение монокристаллов.....	33
§9.Система Al–Co–Cu–Fe.....	33
§10.Фазообразование икосаэдрических монокристаллов в системе Al–Cu–Fe. .	34
§11.Формирование декагональной фазы в системе Al–Co–Cu.....	36
§12.Формирование аппроксимант.....	39
§13.Приготовление образцов.....	41
§14.Химический и фазовый состав квазикристаллов и аппроксимант.....	44
Глава 3 Структура.....	53
§15.Морфология образцов.....	53
§16.Структура квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe.....	56
Глава 4 Исследование электронного транспорта.....	62
§17.Получение ориентированных образцов для исследования анизотропии электронного транспорта.....	62
§18.Электронный транспорт квазикристаллов.....	64
Глава 5 Магнетосопротивление.....	75
§19.Магнетосопротивление икосаэдрических квазикристаллов системы Al–Co–Cu–Fe.....	75
§20.Магнетосопротивление декагоанальных квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe.....	81
Заключение.....	84
Выводы.....	87
Список условных обозначений.....	88
Список рисунков.....	89
Список таблиц.....	93
Список литературы.....	94

Введение

Интерес к квазикристаллам, как к не просто новому классу веществ [1], а перспективным материалам значительно возрос после открытия стабильных квазикристаллических фаз [2]. Открытие же квазикристаллов с декагональной симметрией [3, 4] предоставило шанс для исследований влияния структурного порядка на физические свойства, такие как электронная проводимость и магнитные свойства. В свойства квазикристаллов даёт вклад как локальная атомная структура, так и апериодический дальний порядок. Существование аппроксимант — соединений, близких по составу и структуре к квазикристаллам, но не обладающих апериодичностью, позволяет исследовать влияние сложного локального атомного порядка на электротранспортные и магнитные свойства.

Цели и задачи. Цель данной работы состояла в изучении степени влияния квазипериодичности и сложного локального атомного порядка (кластерной структуры) на электронный транспорт квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- Методом кристаллизации из расплава получить массивные образцы системы Al–Co–Cu–Fe, содержащих различное соотношение Fe/Co, и обладающих различной структурой — от икосаэдрической (100% ат Fe и 0% ат Co) до декагональной (100% ат Co и 0% ат Fe).
- Провести исследования фазового и химического состава монокристаллов.
- Методами Лауэ и просвечивающей электронной микроскопии исследовать структуру полученных монокристаллов.

- Подготовить ориентированные образцы для исследований электронного транспорта вдоль имеющихся кристаллографических осей симметрии.
- Провести исследования электронного транспорта монокристаллов в температурном диапазоне 1,7 – 300 К и магнитных полях 0 – 18 Тл.

Научная новизна. Полученные монокристаллы системы Al–Co–Cu–Fe по качеству не уступают полученным ранее другими авторами, а по размеру превышают их. Подход к исследованию транспортных свойств при переходе от икосаэдрических систем к декагональным через аппроксиманты не нов, но к данной системе применён впервые, а температурный и магнитный диапазоны исследований в данной работе расширен по сравнению с до сих пор известными исследованиями. Результаты хорошо согласуются с полученными ранее другими авторами в схожих системах. Измерения электронного транспорта для монокристаллических аппроксимант данного состава получены впервые.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

Разработке воспроизводимой методики роста для получения высококачественных огранённых монокристаллов квазикристаллических фаз и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe.

Сведения, полученные в результате исследования электротранспортных и магнитных свойств декагональных и икосаэдрических свойств квазикристаллов гармонично расширяют уже имеющиеся в мировой практике данные, так как проведены в более широком спектре магнитных полей. Данные же по икосаэдрическим и декагональным аппроксимантам искомой системы являются новыми и расширяют понимание влияния локального атомного порядка и квантовых интерференционных эффектов на электронный транспорт.

Методология и методы исследования.

Экспериментальные образцы квазикристаллов и аппроксимант выращивались методом кристаллизации из расплава.

Анализ химического состава производился в Аналитическом

сертификационном испытательном центре ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН). Содержание железа в исследуемых образцах определено методом атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой (iCAP-6500, Thermo Scientific, США).

Рентгенофазовый анализ производился на рентгеновском дифрактометре ДРОН 4.0 с использованием $\text{Cu K}\alpha$ излучения.

Предварительный структурный анализ был осуществлён с помощью Лауэ метода на установке УРС-2 с помощью $\text{Fe K}\alpha$ излучения. Съёмка производилась на отражение.

Основной структурный анализ был выполнен на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100

Измерения электросопротивления производились четырёхконтактным методом в Национальной Лаборатории Сильных Магнитных Полей (США), на сверхпроводящем магните SCM2, работающем на переменном токе. Использовалась температурная вставка (VTI) с рабочим температурным диапазоном от 1,4 К до 300 К.

Обработка результатов производилась в программе QtiPlot 0.9.8.3 [5]

Положения, выносимые на защиту:

- Впервые получены массивные монокристаллические образцы квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe .
- Результаты структурных исследований, показывают что в системе Al-Co-Cu-Fe при увеличении соотношения Fe/Co 0—0,3—1,73—3,4 формируются структуры: декагональный квазикристалл — декагональная аппроксиманта — икосаэдрическая аппроксиманта — икосаэдрический квазикристалл соответственно.
- Результаты исследований электротранспортных свойств, показывают что данные свойства декагональных квазикристаллов и аппроксимант

сопоставимы со свойствами аморфных материалов, а соответствующие свойства икосаэдрических квазикристаллов хорошо согласуются с литературными данными и показывают зависимость, которая по характеру ближе к полупроводниковой.

- Результаты исследований икосаэдрических квазикристаллов показывают влияние на магнетосопротивление эффектов квантовой интерференции (слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на пятнадцати конференциях – десяти отечественных и пяти международных:

1. Shulyatev D., **Klyueva M.** и др. Electron transport in Al–Cu–Co–Fe quasicrystals and approximants // Abstracts. Kathmandu, Nepal: University of Liverpool, 2016. С. 103.
2. **Клюева М.В.**, Шулятев Д.А. Особенности электронного транспорта декагональных квазикристаллов системы Al–Co–Cu(Fe) // Тезисы. Гатчина, Ленинградская область: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «КИ», 2016. С. 111.
3. Shulyatev D., **Klyueva M.** и др. Single crystal growth and study of decagonal Al–Co–Cu and Al–Co–Ni quasicrystals // Abstracts. : Krystalografická spoleènost, 2015. С. 285.
4. **Клюева М.В.** и др. Декагональные монокристаллы системы Al–Co–Cu: синтез, структура, резистивные особенности. // Тезисы. г. Гатчина, Ленинградская обл.: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «КИ», 2015. С. 86.
5. **Клюева М.В.** Разработка методики выращивания и исследование резистивных особенностей моноквазикристаллов Al–Co–Cu и Al–Co–Ni с декагональной симметрией // Тезисы. Москва: МИСиС, 2015. С. 952.
6. **Клюева М.В.** и др. Синтез и свойства квазикристаллов системы Al–Co–Cu // Тезисы. г. Казань: КФУ, 2014. С. 257.
7. **Клюева М.В.**, Шулятев Д.А., Козловская Н.А. Синтез декагональных

- монокристаллов Al–Co–Cu // Тезисы докладов 48-ой школы ПИЯФ по физике конденсированного состояния. г. Гатчина, Ленинградская обл.: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «КИ», 2014. С. 32.
8. **Клюева М.В.** и др. Особенности получения квазикристаллов Al–Co–Cu, возможность наличия резистивных особенностей // Тезисы. г. Дубна: ЛНФ ОИЯИ, 2014.
 9. **Клюева М.В.**, Шулятев Д.А., Козловская Н.А. Синтез декагональных монокристаллов Al–Co–Cu // Тезисы. г. Дубна: ЛНФ ОИЯИ, 2013. С. 13.
 10. **Клюева М.В.** и др. Получение декагональных монокристаллов Al–Co–Cu для исследования упругих свойств // Тезисы. г. Гатчина, Ленинградская обл.: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «КИ», 2013. С. 51.
 11. **Klyueva M.V.** и др. Preparation and measurement of lattice parameters by X-ray single crystal of high Al-Cu-Co // Abstracts. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University, 2012. С. 26.
 12. **Клюева М.В.**, Шулятев Д.А., Козловская Н.А. Получение и исследования декагональных квазикристаллов Al–Co–Cu // Тезисы докладов 46-ой школы ПИЯФ по физике конденсированного состояния. Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина, Ленинградская обл.: ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «КИ», 2012. С. 101.
 13. **Клюева М.В.** Получение, рентгенофазовый анализ и мёссбауэровская спектроскопия квазикристаллов системы Al–Fe–Cu // Тезисы. Москва: НИТУ МИСиС, 2012. С. 52.
 14. **Клюева М.В.** и др. Получение, рентгеноструктурный анализ и мёссбауэровская спектроскопия квазикристаллов системы Al–Cu–Fe // Тезисы. Москва: НИЦ «КИ», 2011. С. 315.
 15. **Клюева М.В.** и др. Особенности синтеза и электронного транспорта квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe // Тезисы. Москва: НИЦ КИ, 2016. С. 271.

Публикации. Результаты работы опубликованы в трёх статьях в отечественных и зарубежных реферируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования научных результатов диссертаций:

1. Шулятев, Д. А., М. А. Черников, В. В. Коровушкин, Н. А. Козловская, и М. В. Ключева. «Получение, рентгенофазовый анализи мёссбауэровская спектроскопия квазикристаллов системы Al-Fe-Cu», вып. 5 (2013 г.): 38–41.
2. Шулятев Д.А. Анизотропия электротранспортных свойств декагональных квазикристаллов Al-Cu-Co(Fe) / Д. А. Шулятев, **М. В. Ключева**, У. Девараджан // ФММ – 2016. – Т. 117 – № 9.
3. Shulyatev D.A. Formation of the icosahedral Al-Cu-Fe phase by solid state reaction / D. A. Shulyatev, A. S. Nigmatulin, M. A. Chernikov, **M. V. Klyueva**, D. S. Shaitura, E. A. Golovkova // APhysPolA. – 2014. – Т. 126 – № 2 – 581с.

Объем и структура работы. Работа изложена на 102 страницах, содержит 62 рисунка и 7 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Список цитированной литературы содержит 108 наименований.

Глава 1 Аналитический обзор литературы

§1. Открытие квазикристаллов

В 1991 году комиссией международного союза кристаллографов по аперiodическим кристаллам было утверждено уточнённое определение слова "кристалл". Кристалл – это любое твердое вещество, имеющее существенно дискретную дифрактограмму. Кристалл, решётка которого не имеет периодичности называется аперiodическим. Также аперiodическими называются кристаллы, в которых трехмерная периодичность слишком слаба, чтобы описать значимые корреляции в атомной конфигурации, но которые могут быть должным образом описаны с помощью кристаллографических методов, разработанных для реальных аперiodических кристаллов [6].

Геометрический смысл аперiodического расположения атомов хорошо виден при построении последовательности Фибоначчи. Взяв двумерную квадратную с периодом единичной длины и проведя к её трансляциям иррациональный угол α , равный:

$$\alpha = \arctan(\tau^{-1}) \quad , \quad (1)$$

где $\tau = \frac{1}{2} \cdot (1 + \sqrt{5}) = 1,618033989... -$ золотое число

можно спроецировать на него атомы из области шириной h :

$$h = \sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \alpha\right) \quad . \quad (2)$$

Эти проекции лягут на проведённый луч в аперiodическую последовательность коротких (В) и длинных (А) отрезков. (рисунок 1)

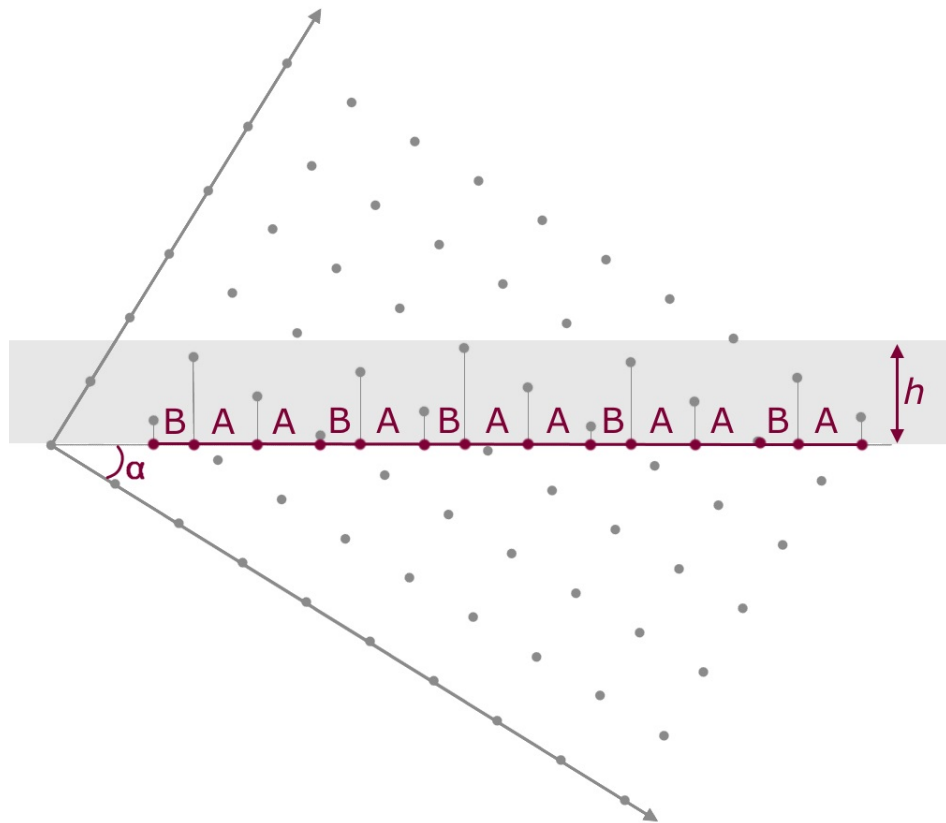


Рисунок 1: Геометрическое представление модели одномерного квазикристалла – последовательность Фибоначчи.

Ещё в 1966 году математик Роберт Бергер опубликовал работу «неразрешимость проблемы домино», где впервые предложил алгоритм замощения пространства аperiодическим образом. Для осуществления этого алгоритма требуется 20426 плиток [7]. Десятью годами позже Роберт Пенроуз описал модель разбиения плоскости без пустот и перекрытий с помощью двух плиток, используя их повороты [8, 9]. Обе плитки имеют форму ромба с одинаковыми сторонами, но разными углами – у одной острый угол равен 36° , а у другой 72° . Каждый из этих ромбов примечателен тем, что может быть разбит диагоналями на "золотые треугольники". Данная мозаика принадлежит к типу P3 и является иллюстрацией двумерной модели квазикристалла (рисунок 2).

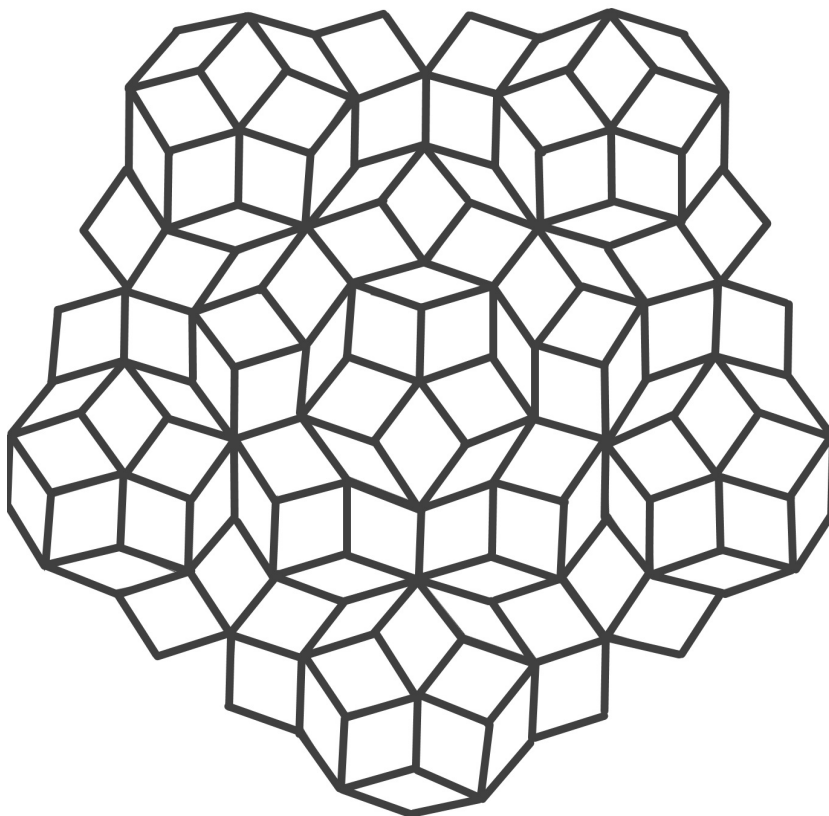


Рисунок 2: Паркет Пенроуза, представляющий из себя модель двумерного квазикристалла и составленный из ромбов двух типов – с углами 36° и 72° .

Идею Пенроуза обобщил на трёхмерное пространство британский кристаллограф Алан Маккей, создав трёхмерную модель атомной решётки, используя параллелепипеды с углами 36° и 72° где атомы повторялись не периодически. Также он показал, что дифракционная картина от паркета пенроуза есть фурье образ с симметрией пятого порядка. К настоящему моменту существует множество теоретических работ по описанию структуры квазикристаллов с помощью плиточного подхода [10–13].

Впервые материал с аperiодической атомной упаковкой был получен в 1982 году. Дан Шехтман изучал сплавы Al–Mn методами электронной микроскопии. В образце $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$ он увидел сочетание чёткой дифракционной картины, указывающей на кристаллическое состояние вещества с икосаэдрической симметрией, которая для кристаллов нереализуема (рисунок 3). После

тщательной проверки в 1984 году Д. Шехтман, И. Блэх, Д. Гратия и Дж. В. Кан в журнале "Physical Review Letters" опубликовали работу "Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry" ("Металлическая фаза с дальним ориентационным порядком и без трансляционной симметрии") [1].

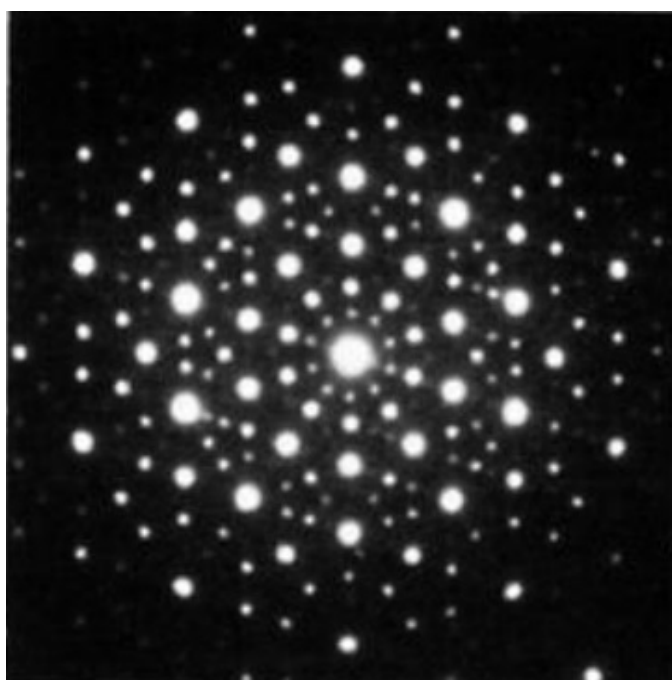


Рисунок 3: Дифракционная картина от сплава $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$, полученная Даном Шехтманом в 1982 году и показывающая икосаэдрическое расположение атомов.

§2. Классификация квазикристаллов

На данный момент открыто более 200 квазикристаллических сплавов, среди которых есть как двойные, так и тройные и даже четверные соединения. Первые известные квазикристаллы представляют из себя соединения алюминия с переходным металлом (Mn, Fe, Cr), но они являются

метастабильными — обладают высокой степенью беспорядка, а при нагреве их структура становится периодической. С открытием стабильных квазикристаллических фаз в таких системах как, например, Al–Cu–Li [2], или Al–Cu–Fe, появилась возможность исследовать влияние аперiodичности на физические свойства более детально.

Существуют так называемые 3-d и 2-d квазикристаллы. Структура 3-d квазикристаллов имеет икосаэдрическую симметрию, к ним относятся такие системы как Al–Cu–Fe, Al–Li–Cu, Zn–Mg–Sc и пр. Аксиальные же, или 2-d квазикристаллы имеют ось, вдоль которой атомы уложены периодическим образом и перпендикулярные к этой оси плоскости с аперiodической атомной укладкой. 2-d квазикристаллы могут быть октагональными, декагональными и додекагональными, и, соответственно, иметь поворотные оси восьмого, десятого и двенадцатого порядков. В [таблице 1](#) приведены наиболее распространённые системы, в которых реализуются квазикристаллические симметрии (данные взяты из работы [14]).

Таблица 1: Примеры систем соединений, в которых реализуются известные квазикристаллические симметрии.

Симметрия	Система		
Икосаэдрическая	Al–Cu–Fe	Al–Cr	Al–Mg–Zn
	Al–Mn	Al–V–Si	Al–Rh–Si
	Al–Mn–Si	Al–Pd–Ru	Ti–Fe–Si
	Al–Mn–Cu	Al–Pd–Mn	Ti–Zr–Ni
	Al–Mn–Zn	Al–Pd–Re	Mg–Li–Al
	Al–Cu–Ru	Al–Pd–Mg	Mg–Zn–Y
	Al–Cu–Os	Al–Li–Cu	Mg–Zn–Ho Cd–Mg–Tb
Октагональная	Ni–Cr–Si		
	Ni–V–Si		
	Mn–Si		
Декагональная	Al–Mn	Al–Os	Al–Cr–Si
	Al–Fe	Al–Co–Ni	Al–Ni–Fe
	Al–Pd	Al–Cu–Co	Al–Ni–Rh
	Al–Pd–Fe	Al–Cu–Fe–Co	Al–Cu–Rh
	Al–Pd–Ru	Al–Cu–Co–Si	Zn–Mg–Y
	Al–Pd–Os	Al–Co–Fe–Cr–O	Zn–Mg–Sm
			Zn–Mg–Ho
Додекагональная	Ni–Cr		
	Ni–V		
	Ni–V–Si		
	Ta–Te		
	Co–Cu		
	Al–Co–Fe–Cr		

§3. Структура квазикристаллов. Кластеры

Важным достижением в понимании структурообразования квазикристаллов стало осознание того факта, что структура квазикристаллических фаз регулируется концентрацией валентных электронов, также, как и в периодически упорядоченных структурах, и они являются по существу фазами Юм-Розери. Квазикристаллы класса Маккея образуются при отношении e/a , равном 1,75 [15].

Изучение структуры, как совокупности устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе, т. е. сохранение основных свойств при различных внутренних и внешних изменениях [16] квазикристаллов осложняется тем, что требует создания принципиально новых подходов, поскольку в основе классической кристаллографии лежат принципы, противоречащие существованию дальнего порядка при отсутствии трансляционной симметрии. Эти принципы гласят, что в кристаллах возможны только оси второго, третьего, четвертого и шестого порядков, а оси пятого и выше шестого порядков запрещены. Существует несколько способов описания структуры аperiодических кристаллов, однако почти все они в качестве основной своей идеи предлагают использовать кластерный подход. Кластер — это выделенная в кристалле группа атомов, трансляция которой воспроизводит весь объём объекта. Несмотря на схожесть кластерного подхода с принципами классической кристаллографии, кластер не является элементарной ячейкой, так как трансляция производится с использованием поворотов, а заполнение пространства нельзя осуществить без пустот и перекрытий. Применение кластерного подхода позволяет применять такие методы как построение аperiодических разбиений и выполнять проецирование из пространств высшей размерности. Математически метод кластеров для описания структуры сводится к построению аperiодической функции, которое может быть сведено к сумме гармонических функций с числом линейно независимых волновых векторов, бóльшим, чем размерность трёхмерного

пространства. Квазипериодические функции в пространстве с размерностью n являются иррациональными сечениями $(n+a)$ -мерных периодических функций, где $n+a$ определяет минимальную размерность пространства вложения, а n — размерность пространства, где реализуется кристаллическая структура. Существует несколько типов кластеров, с помощью которых описываются различные квазикристаллические структуры — наиболее распространённые из них это кластер Маккея, состоящий из 54 атомов, кластер Бергмана — 44 атома и кластер Цая — 66 атомов. Дальний порядок в квазикристаллах получается в результате закономерного пристраивания новых кластеров к уже имеющимся по правилам локального соответствия, либо подразбиением кластеров на субъединицы меньшего размера по правилам инфляции/дефляции [17, 18]. Для расшифровки конкретных дифрактограмм применяется многомерный подход, в основе которого лежит описание распределения интенсивностей на дифрактограмме [12]. Структурный фактор квазикристалла в этом случае рассчитывается на основе распределения гиператомов в элементарной ячейке n -мерной решетки. Данный метод позволил провести классификацию возможных точечных групп симметрии аксиальных квазикристаллов, установить размерность пространства вложения и соответствующие n -мерные пространственные группы для каждого случая [19, 20].

В структуре икосаэдрических квазикристаллов системы Al–Cu–Fe реализуются кластеры Маккея, состоящие из 54 атомов (рисунки 4).

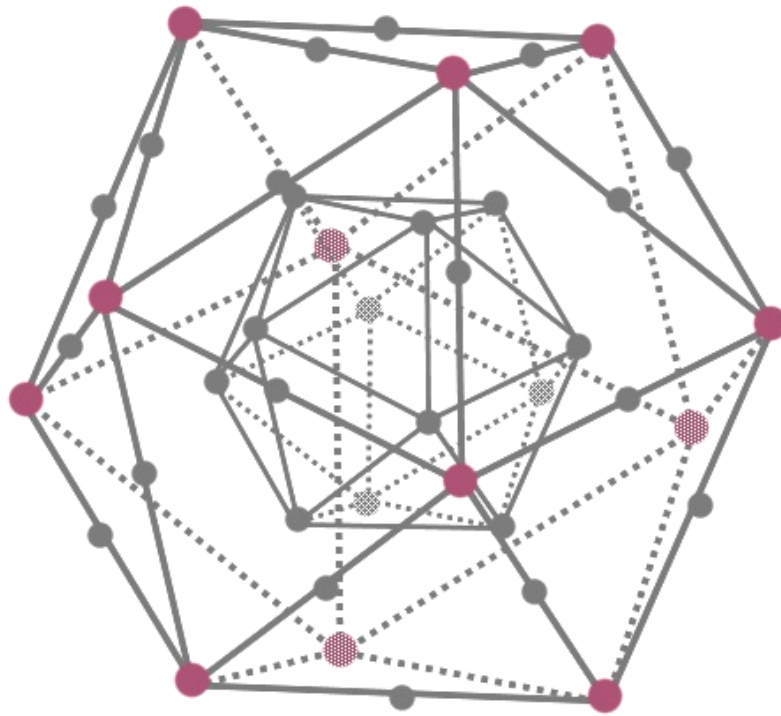


Рисунок 4: Кластер Маккея, состоящий из 54 атомов.

Икосаэдр Маккея реализуется упаковкой тетраэдров и октаэдров вокруг икосаэдра. В икосаэдрический кластер с 12 вершинами увенчанными шарами могут быть добавлены слои шаров с конфигурацией, очень похожей на плотную кубическую упаковку. Двугранные углы икосаэдра и октаэдра равны:

$$\theta_{icos} = 138,19^\circ ,$$

$$\theta_{oct} = 109,47^\circ ;$$

отсюда

$$360^\circ - (\theta_{icos} + 2\theta_{oct}) = 2,87^\circ , \quad (3)$$

Таким образом, если октаэдры размещены на каждой из плоскостей икосаэдра, зазор между ближайшими октаэдрами может быть закрыт путем очень небольшого смещения, приводящего их грани в соприкосновение. Вогнутые области этого общего многогранника могут быть заполнены

кольцами тетраэдров из пяти составляющих, и получаются 54 вершины, внутренние и внешние, представляющие 54-атомный кластер из шаров (рисунок 5). Этот процесс может быть продолжен бесконечно.[21] Число шаров N_n в n -м слое равно:

$$N_n = 10n^2 + 2, \quad (4)$$

общее число шаров N в кластере, включая n -й слой, составляет:

$$N = \frac{n}{3} \cdot (10n^2 + 15n + 11), \quad (5)$$

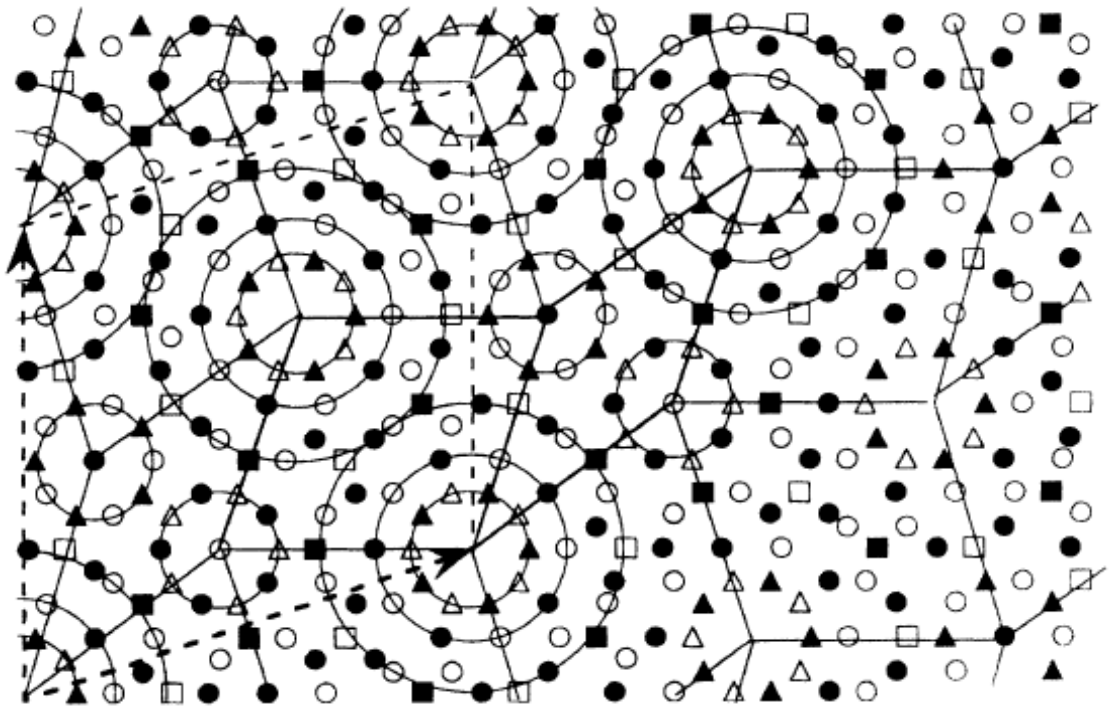


Рисунок 5: Схематическое изображение выстраивания кластеров в паркет Пенроуза.

Кластерный подход позволяет приблизить методы исследования структуры квазикристаллов к классическим методам кристаллографии, что безусловно расширяет возможности получения новой информации об этих материалах, хотя необходимость разработки принципиально новых подходов к описанию

их структуры остаётся неоспоримо важной задачей.

Самым точным методом для исследования кластерной структуры квазикристаллов является электронная микроскопия высокого разрешения (High-resolution electron-microscopy). [22, 23]

§4. Физические свойства квазикристаллов

Декагональные, октагональные и додекагональные квазикристаллы, отличаются наличием трансляционной симметрии вдоль оси наивысшего порядка, апериодичность у них проявляется в плоскостях перпендикулярных к этой оси. Эти кристаллы сложно использовать в классических сферах применения квазикристаллов, так как из-за разницы свойств в различных кристаллографических направлениях, они требуют ориентировки. Зато на декагональных и октогональных объектах сводится к минимуму погрешность в проведении экспериментов по сравнению физических характеристик в периодических и апериодических направлениях, таких как электрические, магнитные, или упругие свойства. Экспериментальные исследования осложнены из-за трудности получения декагональных объектов, ввиду невысокой скорости роста и, в случае сплавов на основе Al, склонности к окислению.

Декагональная фаза (или D-фаза), которая квазипериодична в двух измерениях и периодична в третьем, была впервые обнаружена в Al-Mn сплаве [3, 4]. Вдоль оси десятикратном зоны, периодическое расстояние 1-24 нм [3, 24]. Декагональные фазы с различными периодичностями были обнаружены впоследствии в других системах на основе алюминия: 0,4 нм в Al-Ni [25], 0,8 нм в Al-Cu- (Mn, Fe, Co или Ni) [26]. Декагональная фаза Al-Co-Cu, впервые описанная в [27] особенно интересна, так как является термодинамически стабильной и отображает все известные периоды 0,4; 0,8; 1,24 и 1,6 нм [26]. Кроме того, что слои, перпендикулярные к

периодическому направлению, являются примерами двумерного квазикристалла, декагональные фазы обеспечивают уникальную возможность исследовать более подробно геометрические структуры, которые приводят к наблюдаемым кристаллографически запрещенным симметриям [28].

Термоэдс для низких ρ квазикристаллов похоже на термоэдс аморфных металлов, в то время как при высоких ρ образцы могут показывать более сложные температурные зависимости включая изменения знака. Коэффициент Холла R_H велик в икосаэдрических квазикристаллах, он отражает низкую концентрацию носителей и может показать сильную температурную и концентрационную зависимости. Одним из ярких примеров является изменение знака R_H в узком диапазоне концентраций Fe в Al-Cu-Fe [29]. $\rho(T)$ сильно уменьшается с ростом температуры. Проводимость $\sigma(T)$ может быть описана, как показатель степени T , например $\sigma(T) \sim T^\alpha$, где $\alpha = 1,37$ для Al-Pd-Re от 7 до 700 К [30]. Это описание является эмпирическим. Оптическая проводимость σ возрастает линейно, например, в Al-Cu-Fe с энергией фотонов 1 эВ [31]. Друдевский пик низких частот отсутствует в апериодическом направлении в квазикристаллах системы Al-Co-Cu, в то время как в σ в периодическом направлении преобладают свободные носители [32].

С точки зрения упругих свойств декагональные и икосаэдрические квазикристаллы близки к изотропным. Модули упругости слабо зависят от температуры. [33]

Проводимость свободных носителей, в присутствии сильного рассеяния, отклоняется от друдевской формы путём переноса спектрального веса от низких частот к более высоким, что приводит к образованию псевдощели в спектре проводимости. [31]

§5. Аппроксиманты

Икосаэдрические и декагональные квазикристаллы являются двумя типами квазикристаллов, представляющих наибольший интерес для исследования, и несмотря на различия, они тесно связаны друг с другом [34]. Впервые преобразование из икосаэдрического квазикристалла в декагональный было обнаружено Р. Дж. Шефером в системе Al–Mn, где обе квазикристаллические фазы являются метастабильными, а декагональная зарождается на икосаэдрической, постепенно поглощая её [35]. Позже, стабильная высокотемпературная декагональная фаза была обнаружена в системе Al–Pd–Mn, где в определённом диапазоне составов икосаэдрическая и декагональная фазы сосуществуют вместе, а при осаждении из пересыщенной икосаэдрической фазы через твердотельную реакцию получается декагональная фаза [28, 36].

В работе [28] сообщается, что при медленном охлаждении и отжиге в области существования декагональной фазы Al–Co–Cu не всегда образуется декагональная фаза, если не ввести туда легирование Si. Могут получиться объекты кристаллических фаз с крупными элементарными ячейками со , сходящимся дифракционным пучком и которые на порошке дифрактограмме, почти неотличимы от истинной декагональной фазы. Такие аппроксиманты были впервые получены в системе Al–Co–Cu [37], хотя и не было зарегистрировано данных об изучении структуры этих зёрен. Из-за высокой степени схожести данных материалов с декагональными квазикристаллами, следует соблюдать осторожность в её структурной и фазовой идентификации. В работе [38] предполагают наличие крупных кристаллических доменов с элементарной ячейкой, сформированной из 36 ромбов с длиной ребра 56 Å. Эти изображения содержали ось симметрии десятого порядка, аналогичную квазикристаллической, которую наблюдали например в [22].

На **рисунке 6** приведена Тройная диаграмма для медленно охлаждённого в литом состоянии Al–Co–Cu сплава, показывающая фазы где формируется

кристаллические аппроксиманты, декагональные аппроксиманты и декагональная фаза (данные работы [39]). По мере того как концентрация зерен в фазовой области декагональной аппроксиманты изменяется в направлении фазовой области декагонального квазикристалла, дифракционные пятна также непрерывно изменяются (**рисунок 7** данные работы [39]), и появляются аппроксимировать более близкие по структуре к истинной декагональной фазе.

Поскольку наблюдается граница раздела фаз, то при увеличении диффузного рассеяния и точечной анизотропии, возможно, указывает на механизм фазонных возбуждений и на непрерывный фазовый переход. Это говорит о том, что эти фазы находятся в переходном состоянии между истинной декагональной фазой и кристаллической аппроксимантой с симметрией десятого порядка.

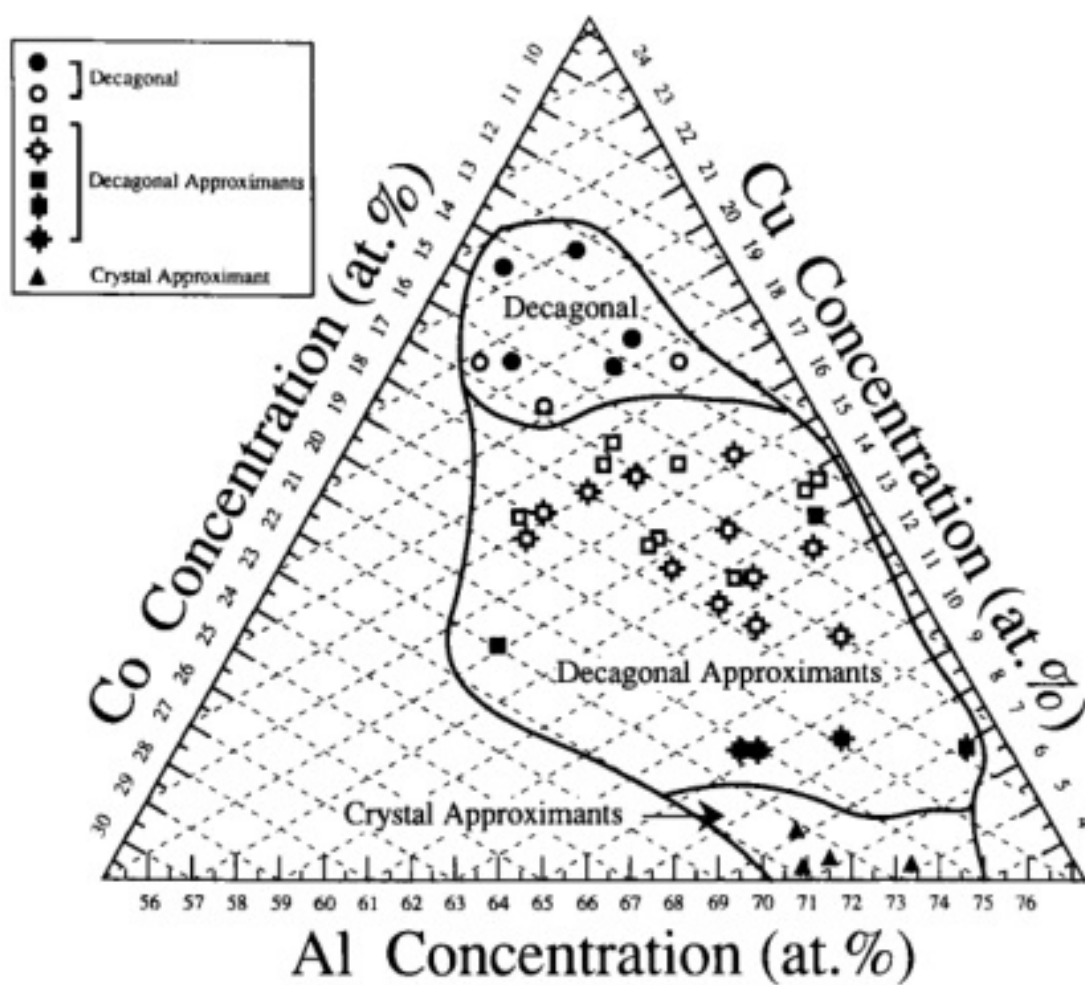


Рисунок 6: Тройная диаграмма для медленно охлаждённого в литом состоянии Al-Co-Cu сплава, показывающая фазы где формируется кристаллические аппроксиманты, декагональные аппроксиманты и декагональная фаза.

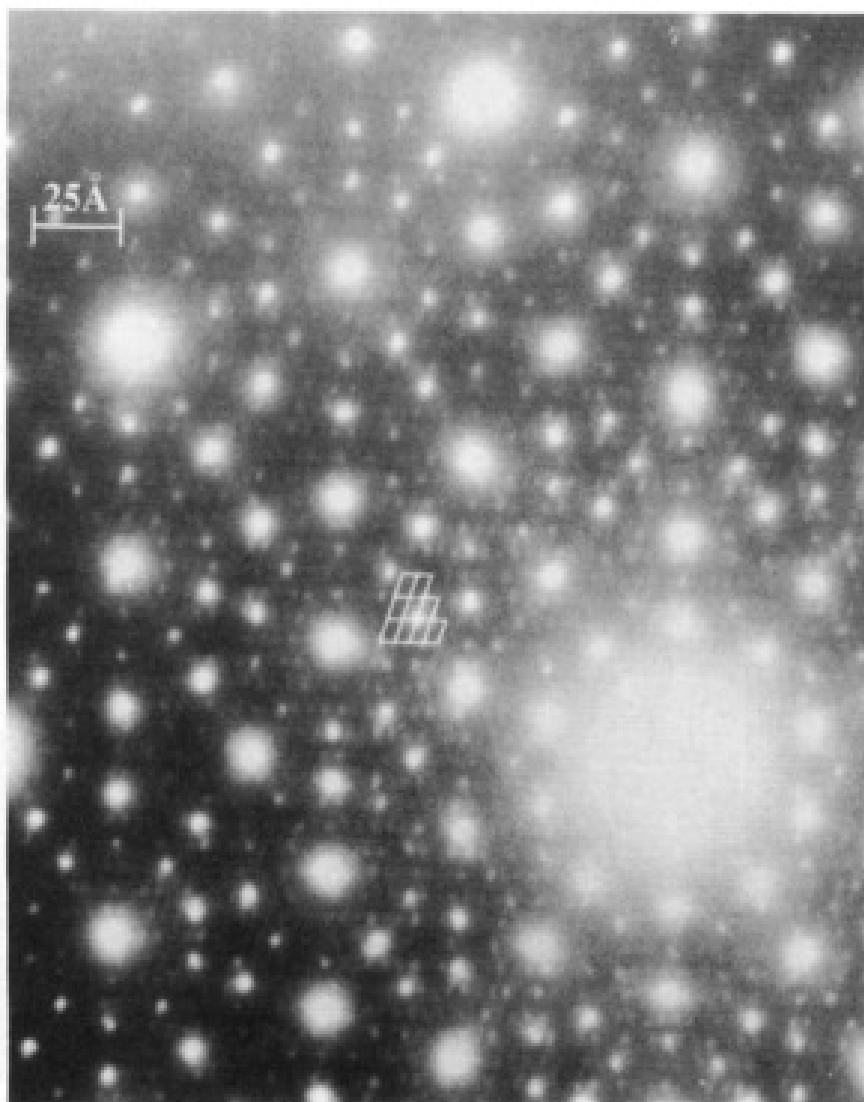


Рисунок 7: Декагональная аппроксиманта с десятой осью симметрии.

На **рисунке 8** представлены рентгеновские спектры порошковых дифракций от четырёх аппроксимант по сравнению с икосаэдрической фазой. Они получаются из икосаэдрической фазы из-за двух факторов: атомных прыжков между идентичными координационными сферами и атомной диффузии на большие расстояния (данные взяты из [40]).

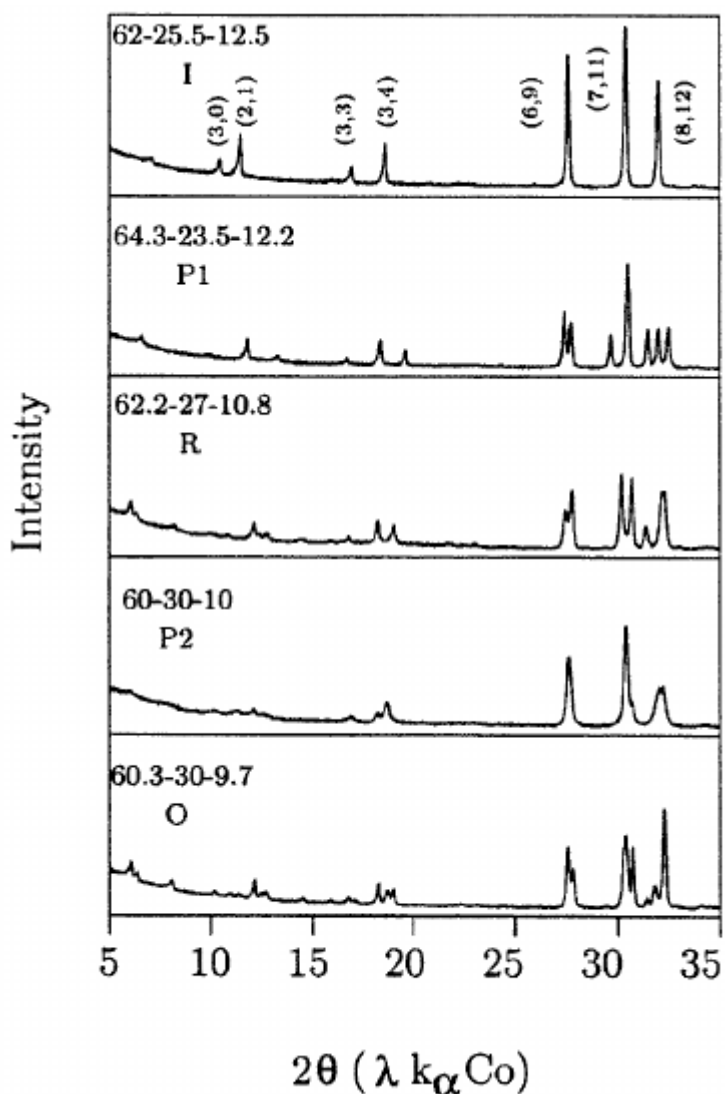


Рисунок 8: Рентгеновская порошковая дифракция четырех аппроксимант по сравнению с икосаэдрической фазой: I (икосаэдрическая фаза); P1 (пентагональная аппроксиманта с периодом 52,31 Å вдоль оси пятого порядка); P2 (пентагональная аппроксиманта с периодом 84,49 Å вдоль оси пятого порядка); O (орторомбическая аппроксиманта); и R (ромбоэдрическая аппроксиманта).

§6. Методы получения квазикристаллов

Важным шагом на пути производства высококачественных образцов было открытие первых стабильных квазикристаллов, таких как икосаэдрические Al–Cu–Fe и Al–Pd–Mn и декагональные Al–Ni–Co и Al–Co–Cu. [26]

На данный момент существует широкий спектр способов для производства квазикристаллических материалов, таких как кристаллизация из расплава, методы спонтанной кристаллизации, газовое распыление, механическое сплавление, электроосаждение, физическое осаждение из паровой фазы, газовое испарение, лазерное или электронно-лучевое плавление и электронное облучение, низкотемпературный отжиг аморфных фаз или высокотемпературная термообработка кристаллических интерметаллических фаз [41, 42]. Однако наиболее распространёнными способами изготовления Al–Cu–Fe квазикристаллов являются те, что сопровождаются процессами плавления — кристаллизация из расплава, газовое распыление, а также механическое сплавление [14].

Ряд исследований [43–46] уже был посвящён анализу конкретных областей диаграммы состояния системы Al–Co–Cu; стабильности этих фаз, процессам кристаллизации и пр. В настоящее время декагональные квазикристаллы системы Al–Co–Cu получены различными методами. Тем не менее, качество таких квазикристаллов нельзя назвать высоким. Так, например, квазикристаллы $Al_{65}Co_{7,5}Cu_{27,5}$, полученные методом Бриджмена [47] состоят, как правило из нескольких зёрен. Эти методы, однако, не позволяют рассматривать процесс формирования квазикристаллов. Другие методы, такие как, например, метод Чохральского [46] или метод бестигельной зонной плавки позволяют получить монокристаллы хорошего качества, и в то же время позволяют определить некоторые параметры перераспределения состава в расплавленной фазе в процессе кристаллизации, однако возможность получить ограниченные образцы с более высокой степенью совершенства структуры предоставляет метод очень медленного охлаждения расплавленной фазы — кристаллизация из расплава. [48]

§7. Электронный транспорт в квазикристаллах и аппроксимантах

Электросопротивление квазикристаллов ниже электросопротивления изоляторов, но выше чем у металлов и соответствующих периодических аппроксимант. Температурный коэффициент сопротивления у икосадрических квазикристаллов и у декагональных в квазипериодических плоскостях почти всегда отрицателен [49]. Когда были найдены результаты для ρ (4 K), равные 11 000 $\Omega \cdot \text{см}$ в икосаэдрических квазикристаллах системы Al–Cu–Fe и 30 000 $\Omega \cdot \text{см}$ в системе Al–Cu–Ru [50], то интерес к транспортным свойствам квазикристаллов обострился. Позже в системе Al–Pd–Re был обнаружен ρ (4 K), превышающей 1 $\Omega \cdot \text{см}$ [51].

Огромное значение для электронного транспорта в квазикристаллах имеет качество кристаллов. Повышение качества образца приводит к увеличению сопротивления. В Al–Cu–Fe, например, первые результаты показали сильное увеличение $\rho(4\text{K})$ при отжиге, сопровождающаяся сужением икосаэдрических дифракционных пиков и исчезновением примесных фаз [52, 53].

Сопротивление икосаэдрических квазикристаллов увеличивается с уменьшением температуры. Отношение сопротивления при низких и при высоких температурах $\rho(4\text{ K})/\rho(300\text{ K})$ как правило порядка 1. Проводимость квазикристаллов представляется в виде:

$$\sigma = \sigma(0) + \Delta\sigma(T) , \quad (6)$$

где $\sigma(0)$ — проводимость при нулевой температуре, которая зависит от степени структурного беспорядка, а $\Delta\sigma(T)$ — часть, которая зависит от температуры, которая, в свою очередь тоже может быть зависимой от структурного беспорядка. [54]

Согласно теории Блоха, электрон с идеальным периодическим потенциалом, не испытывает столкновений, и, соответственно, сопротивления. Поэтому известные особенности температурной зависимости электросопротивления структурно упорядоченных металлов и сплавов являются следствием

небольших отклонений от основной поступательной и ориентационной периодичности идеальной кристаллической решетки. С одной стороны статические дефекты, такие как примеси, вакансии, или дислокации, действуют как локализованные рассеивающие центры, способствуя существованию температурной зависимости остаточного сопротивления, ρ_0 . С другой стороны, тепловые колебания приводят к динамическим смещениям атомов из положения равновесия и возмущениям периодической решетки, внося вклад в температурную зависимость удельного сопротивления $\rho_L(T)$. [55] Данный вклад хорошо описывается формулой Грюнайзена [56], где θ_D — температура Дебая. Поскольку ρ_0 и $\rho_L(T)$ являются результатом процессов незаконченного рассеяния, они могут быть линейно скомбинированы, через правило «Mattheissen», чтобы дать полное сопротивление:

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_L(T) \quad , \quad (7)$$

Для большинства кристаллических металлов и сплавов $\rho_L(T)$ есть доминирующий вклад и, следовательно, уравнение. (7) предсказывает сопротивление, которое имеет тенденцию к ρ_0 при самых низких температурах, но изменяется как T^5 ниже θ_D и линейно возрастает с ростом T на уровне и выше θ_D . Для быстро закаленных аморфных интерметаллидных сплавов, отклонения от идеальной периодической решётки, возникающие от статического топологического беспорядка являются экстремальными. Хотя на расстояниях близких к межатомным в аморфном сплаве могут изменяться случайным образом лишь на несколько процентов от их кристаллических аналогов, а также локальные атомные координации и конфигурации могут оставаться аналогичными соответствующим кристаллическим фазам (рисунок 9), любая поступательная и трансляционная симметрия решетки будет полностью утрачена [57].

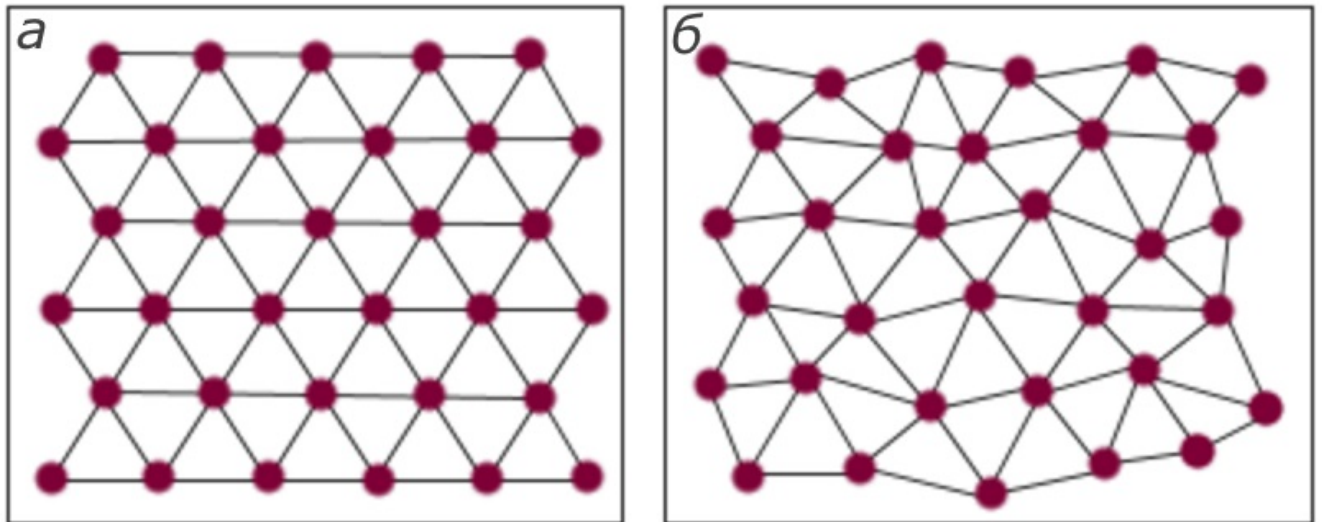


Рисунок 9: Схематическое представление а: кристаллической решетки, и б: соответствующей аморфной решетки путем нанесения небольших случайных отклонений.

Можно было бы ожидать, что такое выраженное топологического беспорядка приведет к значительно повышенному остаточному сопротивлению. Действительно, измеренные удельные сопротивления аморфных и металлических сплавов гораздо больше, чем у упорядоченных кристаллических фаз аналогичного состава, но наблюдаемая температурная зависимость сопротивления у них весьма аномальна. Температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{d\rho}{dT} \right), \quad (8)$$

как правило, очень мал (порядка 10^{-4} K^{-1}) и может быть как положительным так и отрицательным. [58, 59]

В работе [58] была отмечена корреляция между аномальным температурным коэффициентом α , а и величиной удельного сопротивления для аморфных металлических сплавов ρ . Экспериментальные данные удельного сопротивления, собранные в широком диапазоне на основе переходных металлов аморфных сплавов показывают, что знак α изменяется от положительного до отрицательного, когда при комнатной температуре

удельное сопротивление превышает пороговую величину приблизительно равную $150 \mu\Omega\cdot\text{см}$. Кроме того, для положительного и отрицательного α , удельное сопротивление всегда оказывается приближено к вышеупомянутому предельному значению $150 \mu\Omega\cdot\text{см}$ при высоких температурах. На рисунке 10 представлены данные по удельному электрическому сопротивлению для декагонального квазикристалла системы Al-Co-Cu, измеренное вдоль периодического и квазипериодического направлений. В направлении, совпадающим с периодической осью зависимость близка к линейной, в квазипериодическом же направлении кривая имеет квадратичный вид и имеет ярко выраженный максимум (данные работы [60]).

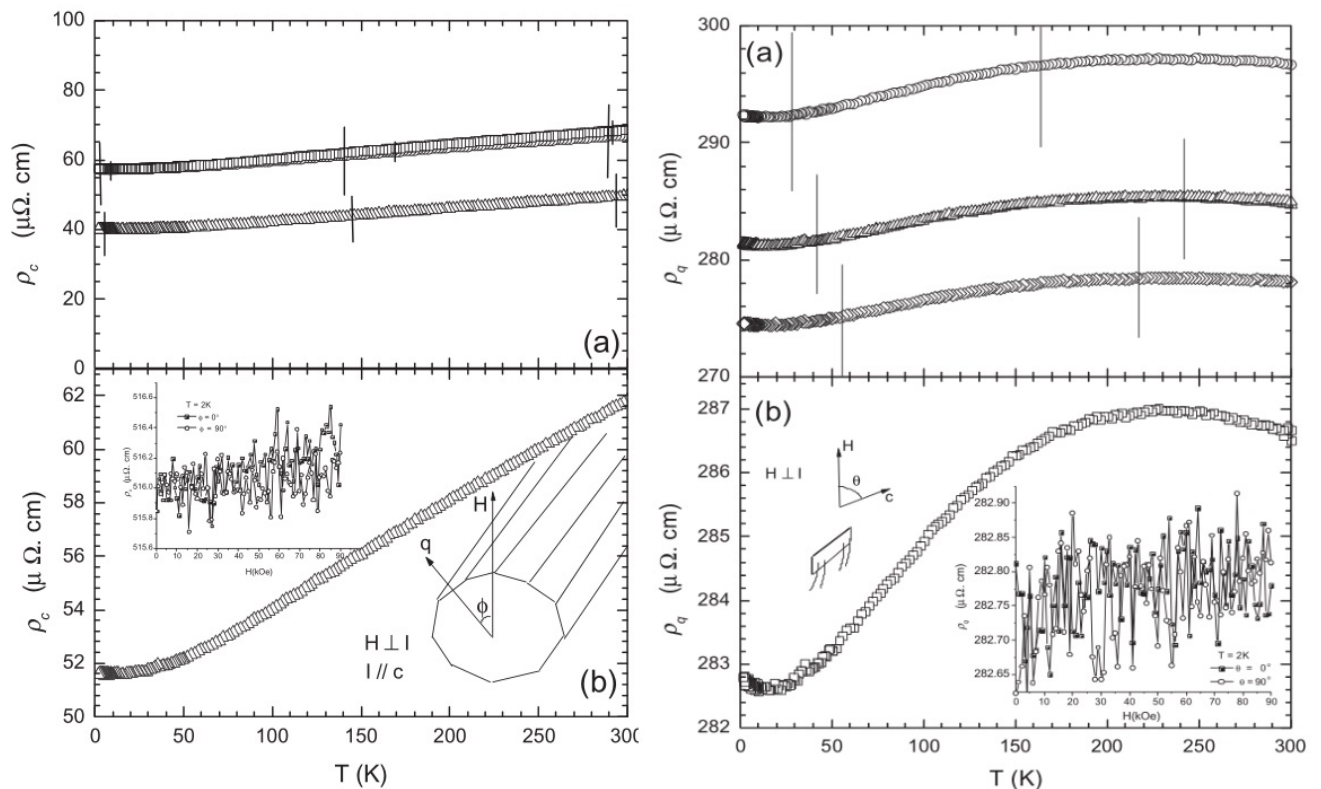


Рисунок 10: Слева: удельное электрическое сопротивление декагональных квазикристаллов Al-Co-Cu для токов, протекающих параллельно периодическим (или кристаллической) оси, справа: кривые удельного электрического сопротивления для декагональных квазикристаллов Al-Co-Cu когда ток, протекает в квазипериодической плоскости.

§8. Магнитные свойства квазикристаллов

Декагональные квазикристаллы со структурной точки зрения можно рассматривать как периодически уложенные квазипериодические плоскости, поэтому данные объекты обладают сильной структурной анизотропией, а, как следствие этого и анизотропией физических свойств, в частности анизотропией магнетосопротивления. Одними из первых анизотропию магнетосопротивления обнаружили авторы работы ([рисунок 11](#) — по данным работы [61]). Данные по анизотропии $R(H)$ декагональных квазикристаллов изложены в работах для $d\text{-Al-Ni-Co}$, $D\text{-Al-Cu-Co}$, и $d\text{-Al-Si-Cu-Co}$ и считаются уже универсальным свойством декагональных квазикристаллов. [62, 63]

Магнетосопротивление икосаэдрических квазикристаллов аномально велико при низких температурах. Первые полученные результаты были порядка $\rho(B, T)/\rho(0, T)$ до 10^{-3} [64, 65]. Впоследствии были найдены гораздо большие значения $\rho(B, T)/\rho(0, T)$, например, в Al-Cu-Fe [66, 67] и в Al-Pd-Re [68].

Особенности наблюдаемого необычного поведения магнитных свойств квазикристаллов описывается с помощью классической теории квантовых интерференционных эффектов. В металлах с сильным упругим рассеянием электронов данные эффекты достигаются с понижением температуры, когда время упругого рассеяния $\tau \ll \tau_{ie}(T)$ времени неупругого рассеяния. Рассеивающие события перестают быть независимыми и интерференционные эффекты становятся существенными. Здесь имеют место два вклада — слабая локализация, которая представляет собой интерференционный эффект, и электрон-электронное взаимодействие, происходящее в результате интерференции между двумя рассеянными электронами. На [рисунке 12](#) представлен температурный вклад в магнетосопротивление квазикристаллов, в которых имеют место квантовые интерференционные эффекты [69].

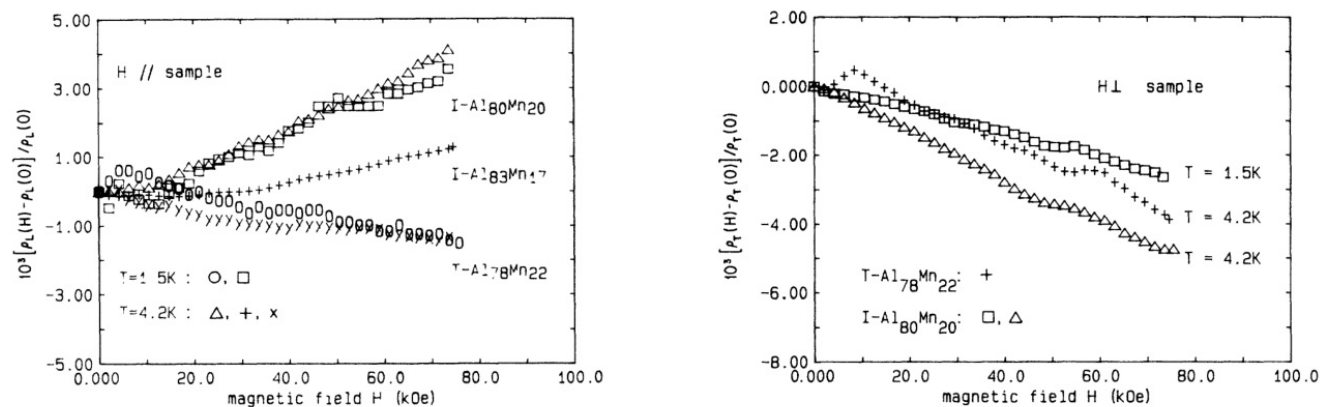


Рисунок 11: Магнетосопротивление в сплавах Al-Mn.

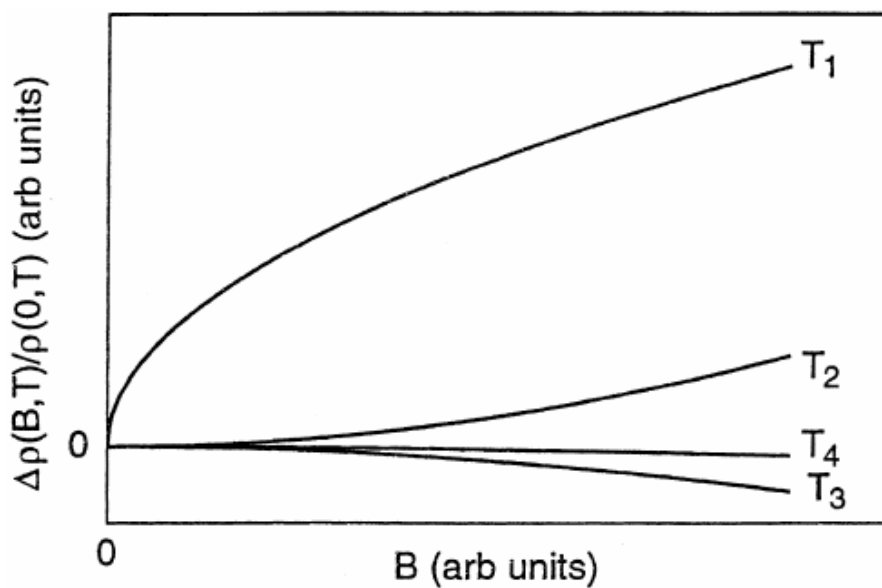


Рисунок 12: Температурный вклад в MR квазикристаллов при температурах $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

Глава 2 Получение монокристаллов

§9. Система Al–Co–Cu–Fe

Система Al–Co–Cu–Fe является четырёхкомпонентной и относится к системам типа Al–переходный металл. На данный момент информации о фазообразовании в данных соединениях почти нет. За основу для планирования экспериментов по синтезу были взяты фазовые диаграммы состояния трёхкомпонентных систем хорошо изученного соединения Al–Cu–Fe и менее подробно исследованного Al–Co–Cu. С одной стороны, эти системы по фазовым характеристикам достаточно похожи — они состоят из практически идентичных компонент, а те что различаются — Fe и Co имеют близкие атомные массы и различаются лишь на один электрон на d-орбитали. Области существования квазикристаллической фазы данных систем также находятся в схожих концентрационных диапазонах. Однако структура квазикристаллов, реализующихся в системах Al–Cu–Fe и Al–Co–Cu различается кардинально — в первом случае это изотропная икосаэдрическая симметрия (3-d квазикристалл), а во втором структура выстраивается в апериодические плоскости, лежащие в кристаллическую последовательность (2-d квазикристалл). У каждой из этих систем открыты аппроксиманты, которые по структуре тем больше напоминают квазикристалл, чем ближе по составу к нему находятся.

Для исследования последовательных структурных изменений, происходящих при смещении фазового состава $dQ \rightarrow dA \rightarrow iA \rightarrow iQ$ (рисунок 13) и наиболее эффективной оценки реализации в системе Al–Co–Cu–Fe правила Юм-Розери, необходимо рассматривать объекты с концентрациями, находящиеся в непосредственной близости друг от друга (в идеальном случае, находящиеся

на одном отрезке). Таким образом составы для экспериментальных образцов были выбраны таким образом, чтобы получить декагональный квазикристалл dQ $Al_{65}Co_{17}Cu_{18}$, декагональную аппроксиманту dA $Al_{63}Co_{10}Cu_{24}Fe_3$, икосаэдрическую аппроксиманту iA $Al_{63}Co_3Cu_{24}Fe_{10}$ и икосаэдрический квазикристалл iQ $Al_{63}Co_3Cu_{26}Fe_8$.

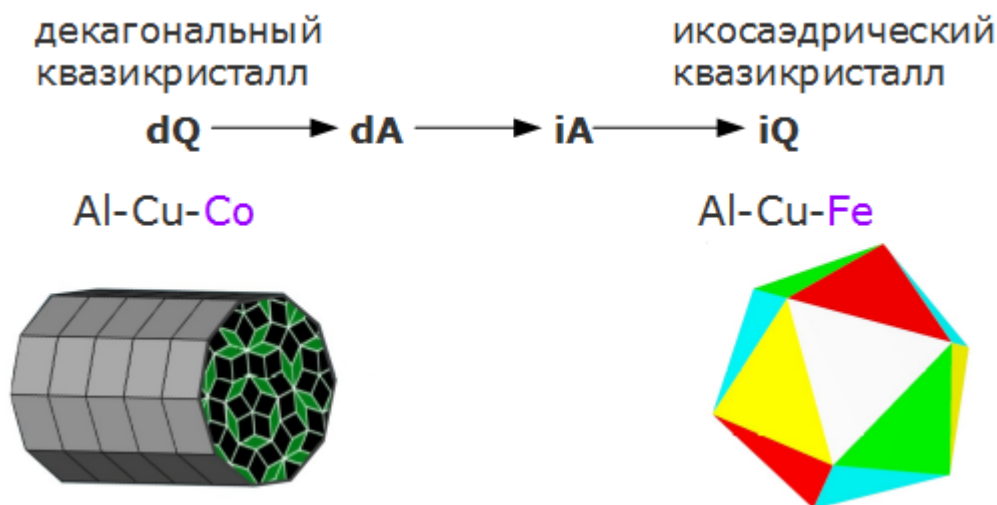


Рисунок 13: Схема получения монокристаллов с различной структурой в зависимости от соотношения Fe/Co; dQ — декагональный квазикристалл, dA — декагональная аппроксиманта, iA — икосаэдрическая аппроксиманта, iQ — икосаэдрический квазикристалл.

§10. Фазообразование икосаэдрических монокристаллов в системе Al–Cu–Fe

Квазикристаллы с икосаэдрической симметрией системы Al-Cu-Fe достаточно хорошо изучены, в том числе существуют подробные фазовые тройные диаграммы при различных температурах, а также множество их двухкомпонентных сечений.

Формирование стабильных квазикристаллов может быть предсказано из равновесных фазовых диаграмм. Система Al–Cu–Fe изучена достаточно хорошо, и для неё построены фазовые диаграммы высокой точности. К методам синтеза, выбираемым для квазикристаллов следует относиться очень внимательно, так как от них могут зависеть структурные характеристики. Правило Юм-Розери применимо к некоторым стабильным квазикристаллам, но не каждый квазикристалл является таковым. Икосаэдрические объекты системы Al–Cu–Fe, как правило являются стабильными, но могут быть получены и в метастабильной форме с помощью соответствующих методов синтеза. Таким образом, кристаллические образцы стабильной икосаэдрической фазы могут быть получены с помощью методов, позволяющих реализовываться равновесным процессам. Метастабильная же фаза находится в неравновесном состоянии, и, несмотря на её способность сохраняться в течение очень долгого времени, она не может быть получена термодинамическими правилами равновесия. Поэтому метастабильные квазикристаллы могут быть синтезированы только за счет использования более совершенных методов [14]. Этот факт позволяет получать стабильные квазикристаллические объекты простыми методами, такими как кристаллизация из расплава.

Икосаэдрическая фаза в системе Al–Cu–Fe существует в композиционном диапазоне 20–28 ат.% Cu и 10–14 ат.% Fe, до температуры 860 °C, как показано на [рисунке 14](#). Эта температура указывает на возникновение перитектической реакции, с помощью которой икосаэдрическая фаза образуется из расплава в равновесных условиях. [14]

На [рисунке 14](#) представлена псевдо-двойная фазовая диаграмма системы Al–Cu–Fe в диапазоне составов икосаэдрической фазы между $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{10}$ и $\text{Al}_{58}\text{Cu}_{28}\text{Fe}_{14}$ (рисунок взят из работы [70]).

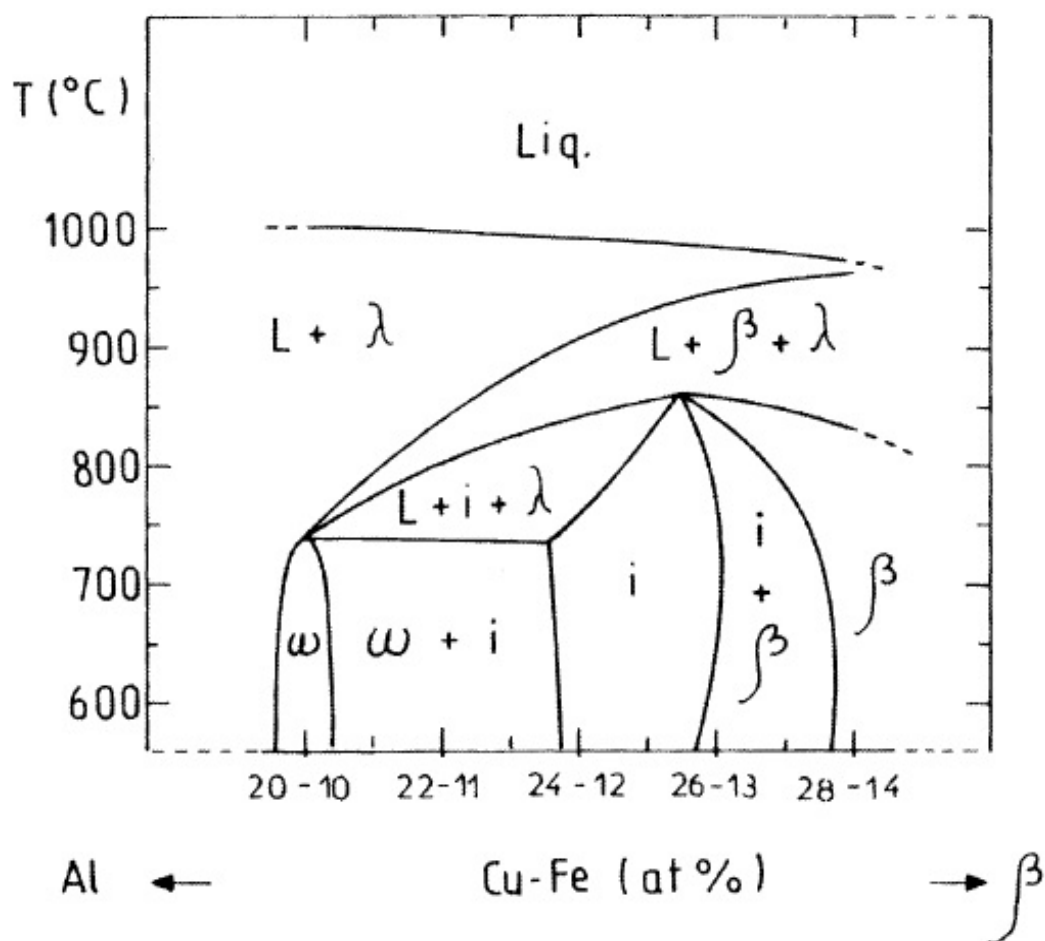


Рисунок 14: Псевдо-двойная фазовая диаграмма системы Al-Cu-Fe в диапазоне составов икосаэдрической фазы между $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{10}$ и $\text{Al}_{58}\text{Cu}_{28}\text{Fe}_{14}$.

§11. Формирование декагональной фазы в системе Al-Co-Cu

Хотя декагональные квазикристаллы (D-фазы) в двух тройных системах Al-Co-Ni и Al-Co-Cu являются термодинамически стабильными [26, 27, 71], рост крупных монокристаллов системы Al-Co-Cu на практике никогда не был столь успешным как, например, Al-Co-Ni. [72-74]

Система Al-Co-Cu стала интересным объектом для более детального изучения после открытия в ней термодинамически устойчивой декагональной

квазикристаллической фазы, которая была найдена в стехиометрических соотношениях $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Co}_{15}$ и $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{15}\text{Co}_{20}$ [26, 27]. Основные исследования этой системы можно найти в работах [75–83] и полученные экспериментальные результаты часто публикуются в виде изотермических сечений фазовой диаграммы Al–Co–Cu и псевдо-бинарных диаграмм. [75, 77, 83, 84]

Получение декагональных моноквазикристаллов обусловлена рядом трудностей, определяемых спецификой равновесной фазовой системы, а также механизмом зарождения и роста квазикристаллической фазы [85–87].

Для целей исследования структурных особенностей, морфологии и электронного транспорта монокристаллических образцов использовался метод роста из расплава, так как именно он позволяет получить огранённые монокристаллы высокого качества. [75]

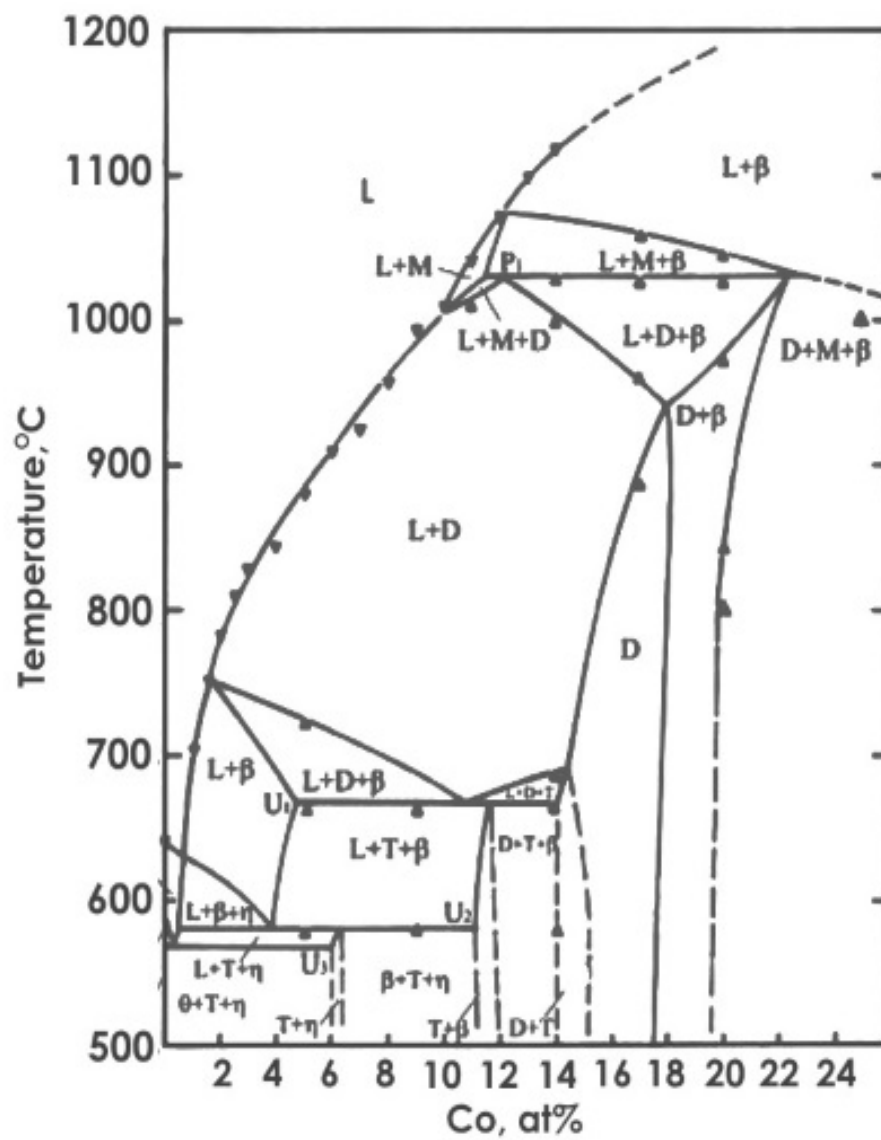


Рисунок 15: Псевдо-двойная диаграмма состояния системы Al-Co-Cu в области 65% Al.

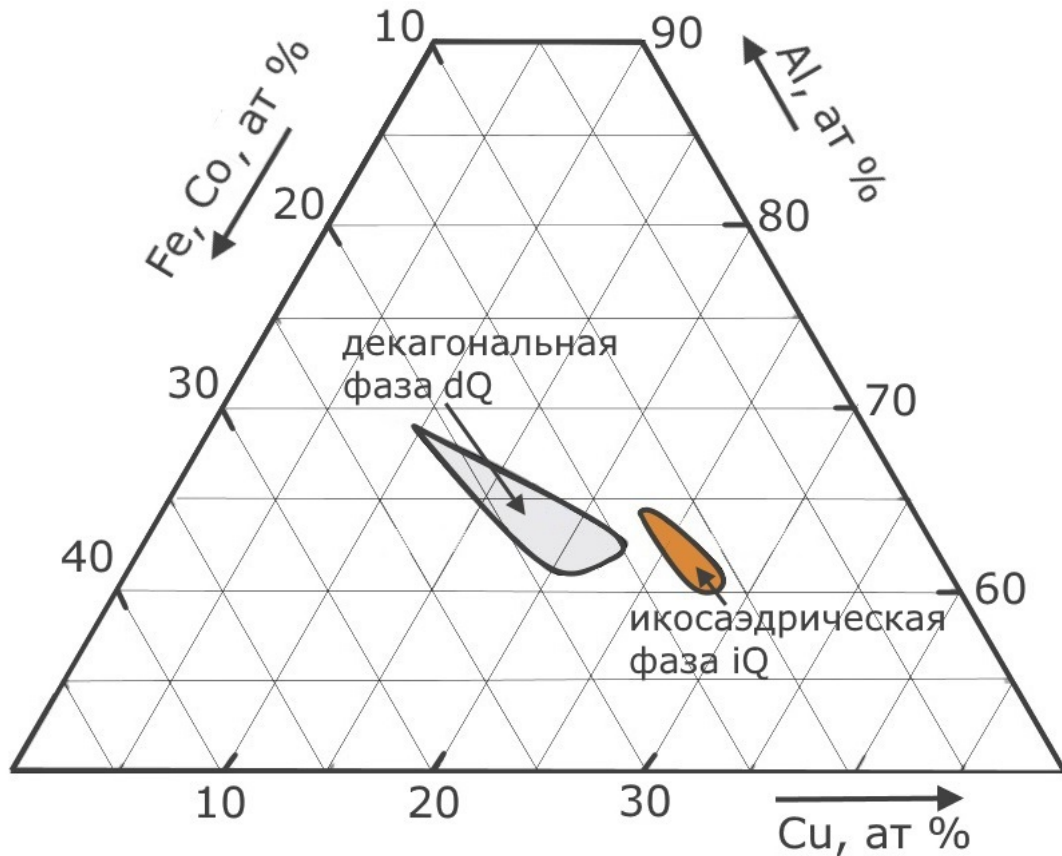


Рисунок 16: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al-Cu-(Fe-Co).

§12. Формирование аппроксимант

Получение как декагональных, так и икосаэдрических аппроксимант осложнено очень узкими областями концентраций существования данных фаз, а также тем, что до сих пор не существует точных данных об областях существования данных фаз.

В рамках данной работы впервые получены аппроксиманты с декагональной и икосаэдрической симметрией, сумма концентраций Fe и Co которых лежат в квазикристаллической области на псевдо-тройной диаграмме Al-Co-(Cu-Fe). Формирование псевдо-декагональной кристаллической фазы в сплаве Al-Co-Cu без добавления Si, дает просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции, которые практически неотличимы от истинной

десятиугольной фазы. По мере того как концентрация зерен в декагональной аппроксиманте фазовой области изменяются в направлении аperiодической фазовой области, дифракционная картина непрерывно меняется — появляются аппроксимировать более близкие по структуре к истинной декагональной фазе. Анизотропия начинает наблюдаться при увеличении диффузного рассеяния, и возможно это указывает на механизм фазонных возбуждений и на непрерывный фазовый переход. Это говорит о том, что эти фазы находятся в переходном состоянии между истинной десятиугольной фазой и кристаллической десятиугольной аппроксимантой [39].

Для получения декагональных аппроксимант за основу был принят состав из области существования декагональной фазы $\text{Al}_{(63-68)}\text{--Co}_{(15-23)}\text{--Cu}_{(9-22)}$ (рисунок 20), однако часть кобальта была заменена на железо, чтобы состав получаемой аппроксиманты был приближен к фазе с икосаэдрической симметрией. Аналогично был выбран состав для получения икосаэдрической аппроксиманты — отклонение от состава фазы с чистой икосаэдрической симметрией $\text{Al}_{(58-70)}\text{--Cu}_{(20-28)}\text{--Fe}_{(10-14)}$ было сделано путём замещения части Fe на Co (рисунок 21)

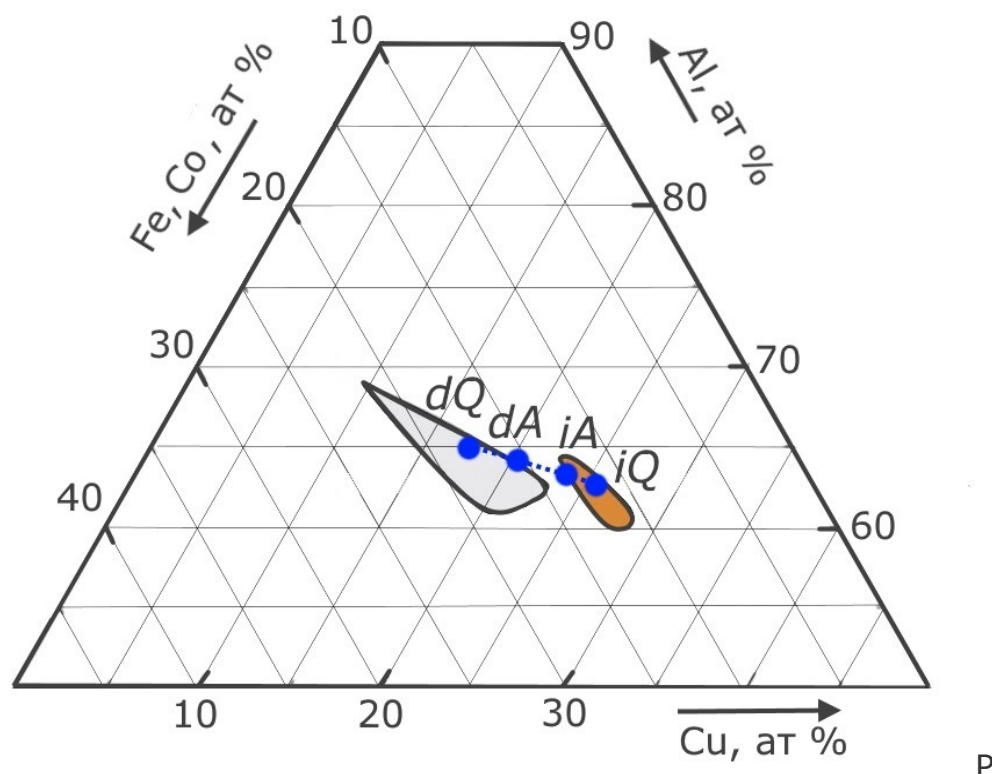


Рисунок 17: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al–Co–Cu–Fe с нанесёнными составами, подготовленными для получения.

§13. Приготовление образцов

Для получения массивных монокристаллов нужно иметь возможность максимально долго охлаждать образец, давая его зерну возможность вырасти, поэтому выбор стехиометрических пропорций компонент соединения осуществлялся таким образом, чтобы температурный диапазон существования получаемой фазы был максимальным.

Экспериментальные образцы квазикристаллов и аппроксимант выращивались методом кристаллизации из расплава. Порошки Al, Co, Cu и Fe чистотой 99,99% взвешивались на аналитических весах марки GX-200 производства фирмы A&D высокого класса точности с дискретностью 0,001 гр. (рисунки 18 а). Смешивание порошков производилось вручную в ступке из агата (SiO_2) в

спиртовой связке течение 1 часа (рисунок 18 б). Просушенная смесь прессовалась в таблетки диаметром 5–10 мм при усилии 4–8 кН соответственно (рисунок 18 в, г). Готовые таблетки помещались в тигли Al_2O_3 . Поскольку один из компонентов синтезируемой системы — алюминий окисляется на воздухе при высоких температурах, то для проведения синтеза монокристаллов в инертной атмосфере (в данной работе использовался аргон), тигли с образцами погружались в кварцевую ампулу (рисунок 18 д), откуда откачивался воздух. На рисунке 19 приведена схема оригинальной установки для откачки воздуха с последующей гирметизации, которая была разработана и собрана на кафедре теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСиС. Плавление, а затем медленная кристаллизация производились в трубчатой печи «Nabertherm» (рисунок 18 е).

Нагрев производился до температуры на 20 °C превышающей ликвидус с часовой выдержкой в жидком состоянии. Затем заготовка со скоростью 1 град/мин охлаждалась до температуры на 20 °C ниже температуры начала существования декагональной фазы (рисунок 21). Такое быстрое охлаждение из жидкого состояния необходимо для того чтобы не дать зародиться фазам находящимся между жидкостью и декагональной фазой, а небольшое переохлаждение внутри области декагональной фазы даёт возможность зародиться малому количеству центров кристаллизации для последующего их роста. Скорость охлаждения в области существования декагональной фазы составила около 1,5 град/ч. Монокристаллы икосаэдрической фазы растут со скоростью близкой к скорости декаганальных, и для их синтеза применялась аналогичная скорость охлаждения. Синтез декагональных аппроксимант осуществлялся также по режиму, идентичному режиму для синтеза декагональных монокристаллов. Икосаэдрические аппроксиманты же проявили способность к быстрому росту и для получения образцов в три раза превышающих размер декагональных монокристаллов и аппроксимант хватило скорости охлаждения в два раза большей (3-4 град/ч.) (рисунок 20)

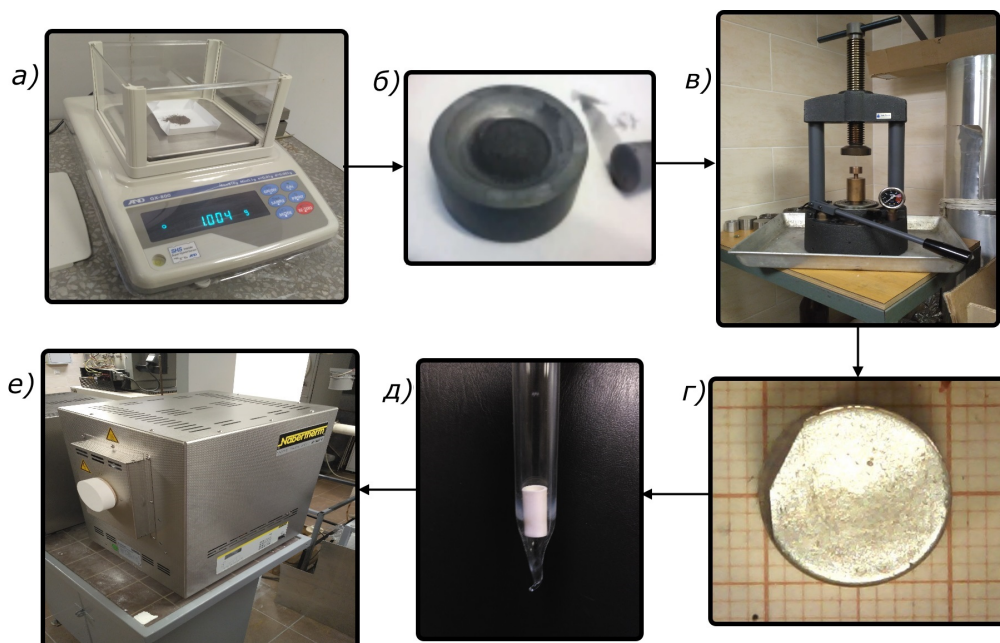


Рисунок 18: Технологическая цепочка получения монокристаллических фаз квазикристаллов и аппроксимант: а) аналитические весы, б) агатовая ступка, в) ручной пресс, г) таблетка, полученная в результате прессования металлических порошков, д) кварцевая ампула с корундовым тиглем, е) печь «Nabertherm».

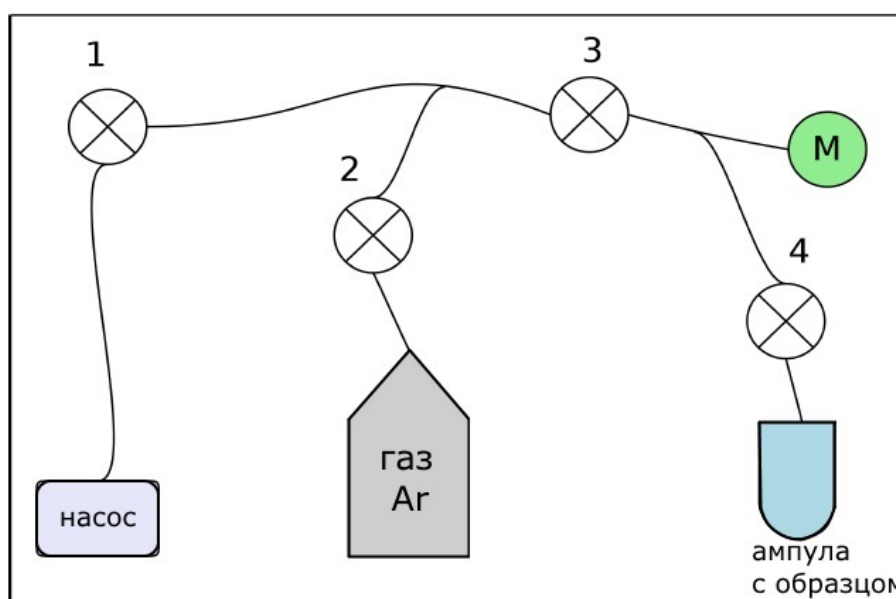


Рисунок 19: Схема оригинальной установки откачки воздуха для проведения синтеза в контролируемой атмосфере; 1, 2, 3, 4 — вентили.

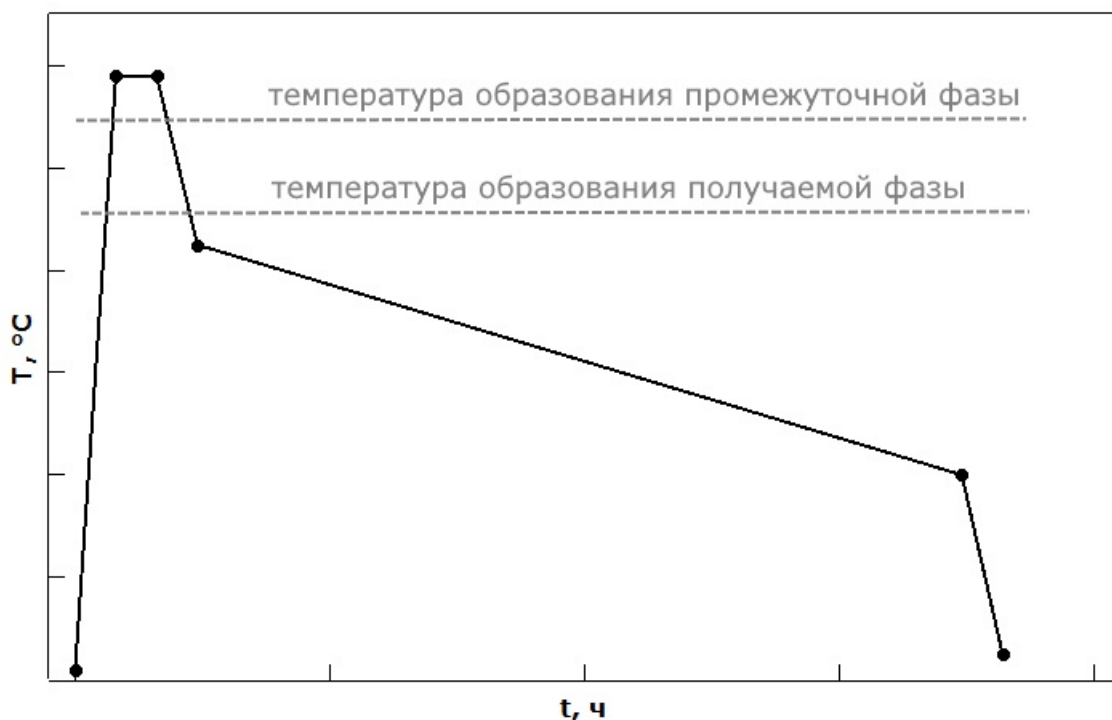


Рисунок 20: Схема режима термообработки для получения монокристаллов системы Al-Co-Cu-Fe с различной структурой — dQ, dA, iA, iQ методом роста из расплава.

§14. Химический и фазовый состав квазикристаллов и аппроксимант

Элементный анализ образцов проведен в аналитическом сертификационном испытательном центре ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН) методом атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой (iCAP-6500, Thermo Scientific, США). Элементный состав представлен в [таблице 2](#). Анализ химического состава для образцов dQ, dA и iQ показал незначительное (в пределах 1,5 ат. %) отклонение от заложенного при синтезе. Состав же образца икосаэдрической аппроксиманты iA сильно отклонился от исходного по меди (на 18 ат. %). Данное отклонение можно объяснить недостаточными данными по фазовым превращениям аппроксимант данной системы и

фазовому равновесию диаграммы вблизи перитектической точки.

Таблица 2: Элементный состав образцов квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe — данные атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой

Fe/Co	dQ 0,0	dA 0,3	iA 1,7	iQ 3,4
Al	64,34	63,12	71,06	64,36
Co	18,25	9,48	8,28	3,05
Cu	17,34	24,73	6,85	22,20
Fe	0,07	2,68	13,81	10,39
e/a	1,92	1,99	1,84	1,91

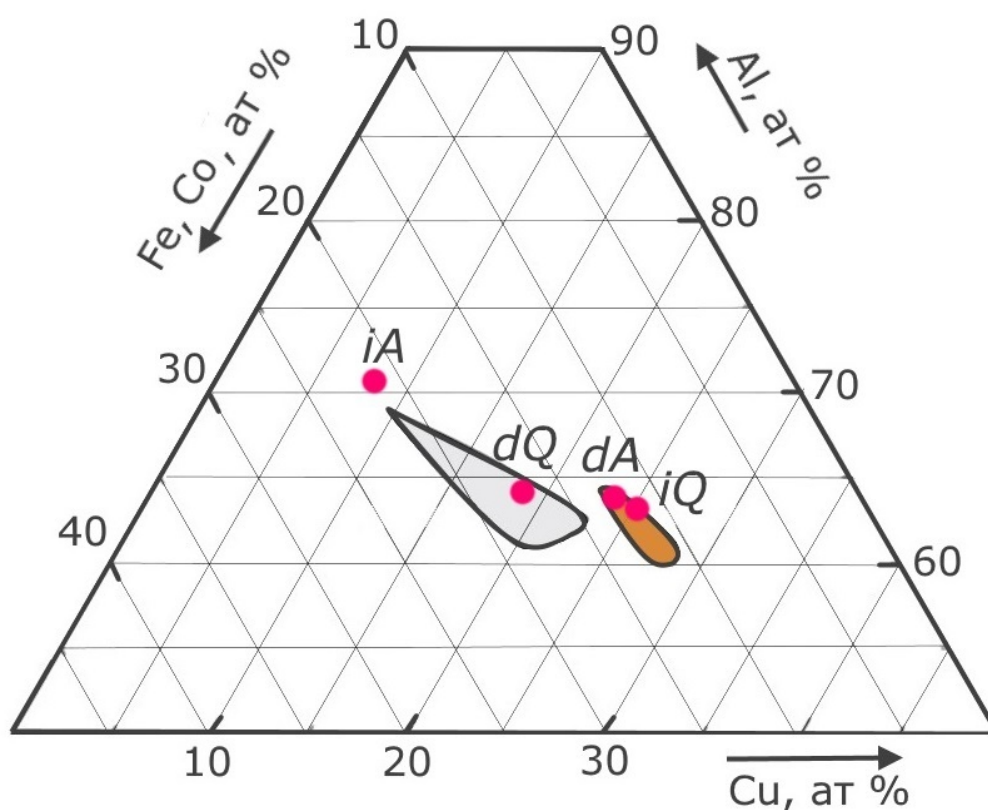


Рисунок 21: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al-Co-Cu-Fe с нанесёнными составами по данным масс-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

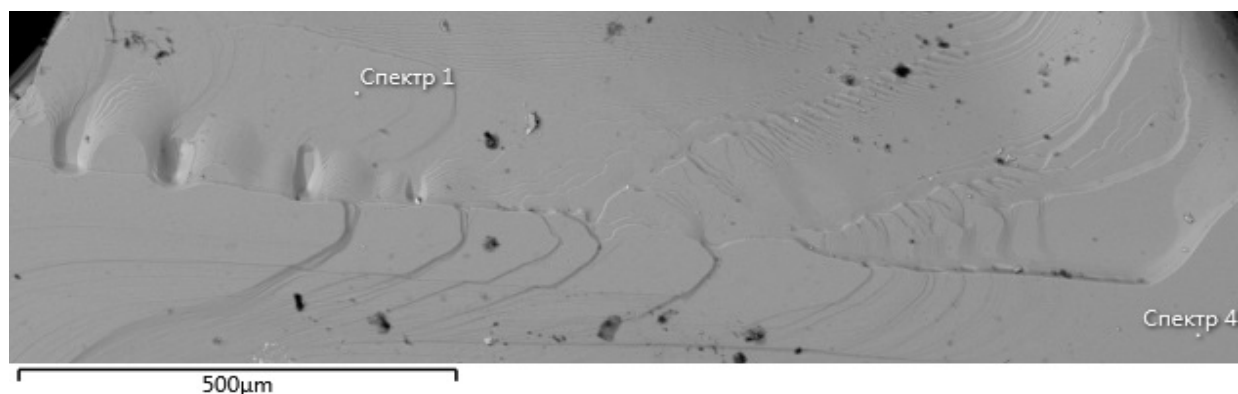


Рисунок 22: Оценка однородности образца iA по химическому составу.

Таблица 3: Химический состав образца в разных точках

ат %	Al	Fe	Co	Cu
Спектр 1	71,13	10,64	12,13	6,10
Спектр 4	71,30	10,23	12,50	5,98

Для исследования фазового состава образцы измельчались механически в ступке из агата до получения порошка дисперсностью 50 мкм. Рентгенофазовый анализ производился на рентгеновском дифрактометре ДРОН 4.0 с использованием $\text{Cu K}\alpha$ излучения. На [рисунке 23](#) представлен спектр дифракции рентгеновских лучей, измеренный при комнатной температуре от порошка декагонального квазикристалла dQ $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$. На спектре не обнаружено ни одной вторичной фазы, и он хорошо согласуется с литературными данными ([рисунк 24](#) — данные работы [88]). Полученный спектр полностью доказывает наличие декагональной фазы в образце в количестве 100 %.

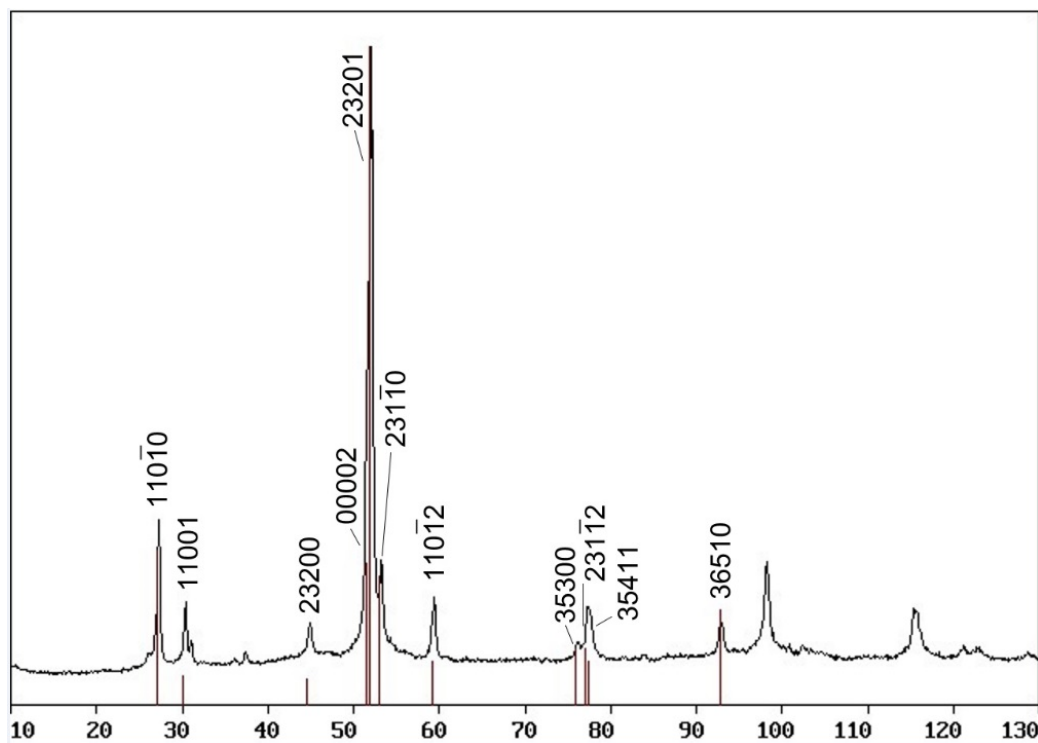


Рисунок 23: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка dQ состава $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$.

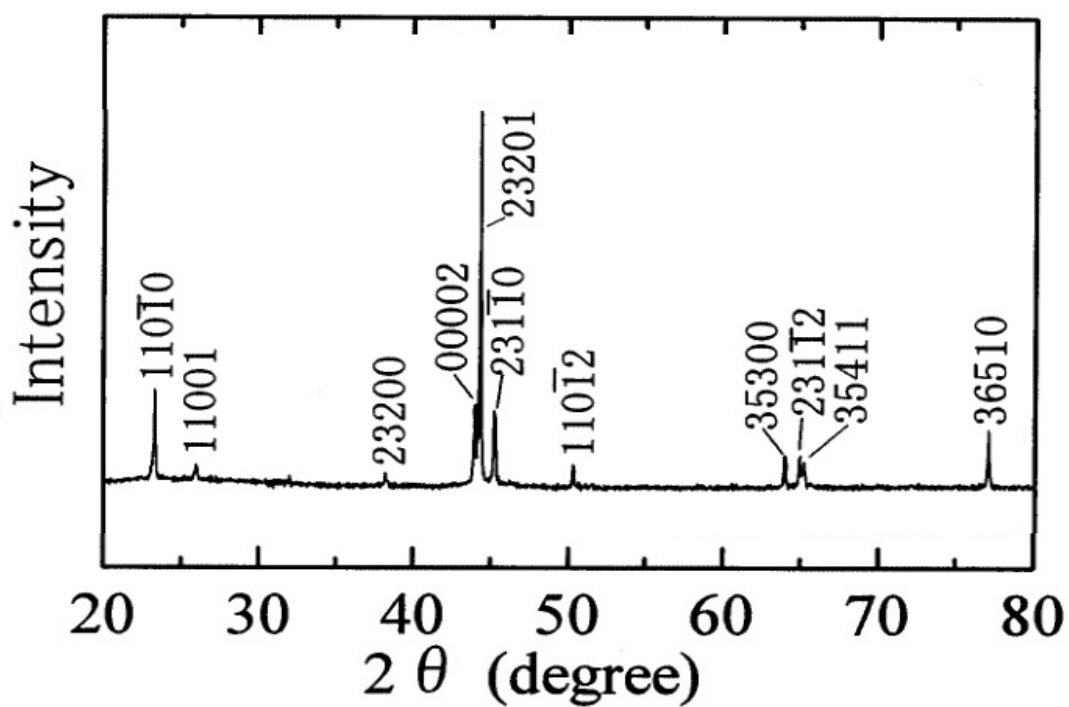


Рисунок 24: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре в сплаве $\text{Al}_{64,5}\text{Cu}_{18,5}\text{Co}_{17}$.

Спектр дифракции рентгеновских лучей от порошка образца $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$ dA представлен на **рисунке 25**. Он практически повторяет данные для декагонального квазикристалла dQ с небольшими смещениями углов. Указанный анализ косвенно свидетельствует о том, что образец $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$ представляет из себя декагональную аппроксиманту dA, однако для твёрдого утверждения этого не достаточно, и только структурные исследования в совокупности с элементным и рентгенофазовым анализами могут дать достоверный ответ.

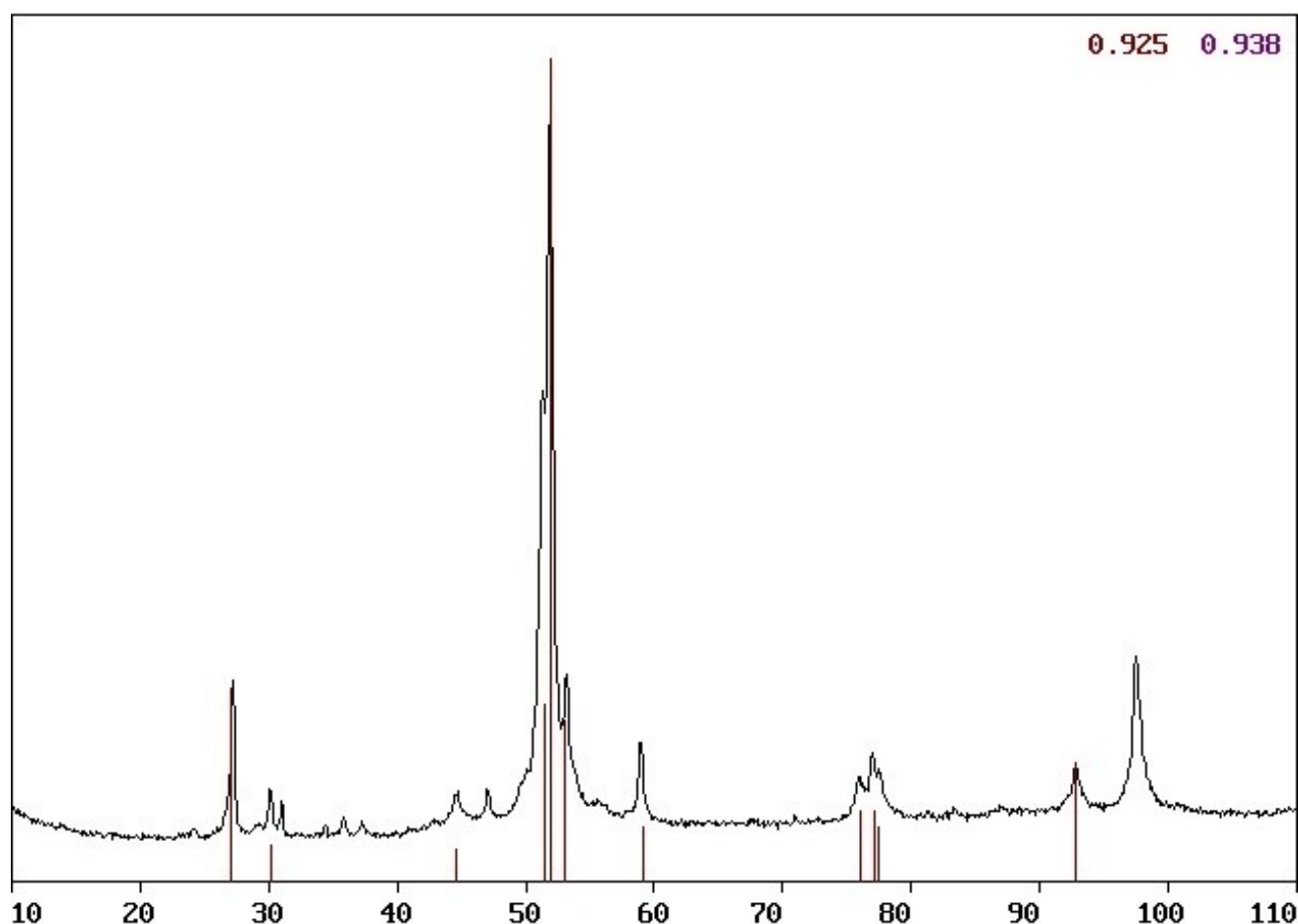


Рисунок 25: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка dA состава $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$.

Дифракция рентгеновских лучей от порошка образца $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$ iA показана на **рисунке 26**. Спектр сильно напоминает спектр от икосаэдрического квазикристалла, однако однозначный вывод о его природе можно сделать проанализировав его с точки зрения структурного типа, пространственной группы, а также периодов решётки (**таблица 4**). Сопоставив результаты с литературными данными (**таблица 5** — данные работы [89]), а также [90] можно однозначно утверждать, что исследуемый объект на 100% состоит из фазы $\text{Cu}_6\text{Fe}_{21}\text{Al}_{73}$ и является икосаэдрической аппроксимантой.

Таблица 4: Анализ спектра дифракции рентгеновских лучей от порошка образца $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$ iA.

Фаза	Структурный тип, пространственная группа	Объёмная доля, %	Весовая доля, %	периоды, Å
$\text{Cu}_6\text{Fe}_{21}\text{Al}_{73}$	mC102/1 C2/m	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0	$a=15.444$ $b=8.007$ $c=12.432$ $\beta=107.97^\circ$

Таблица 5: Литературные данные расчёта периодов решётки для фазы, представляющей из себя икосаэдрическую аппроксиманту.

	Symmetry	a (Å)	b (Å)	c (Å)	
Osawa (1933)	Orthorhombic	15.804	8.088	11.870	2
Bachmetew (1944)	Orthorhombic	15.49	8.11	47.6	2
Phragmén (1950)	Orthorhombic	15.59	8.10	48.04	2
Present work	Monoclinic	15.489 ± 0.001	8.0831 ± 0.0005 $\beta = 107^\circ 43' \pm 1'$	12.476 ± 0.002	2
		$(a : b : c = 1.5435 : 1 : 1.9155)$			
Groth (1906–19)	Monoclinic	$(a : b : c = 1.5413 : 1 : 1.9158; \beta = 107^\circ 41')$			

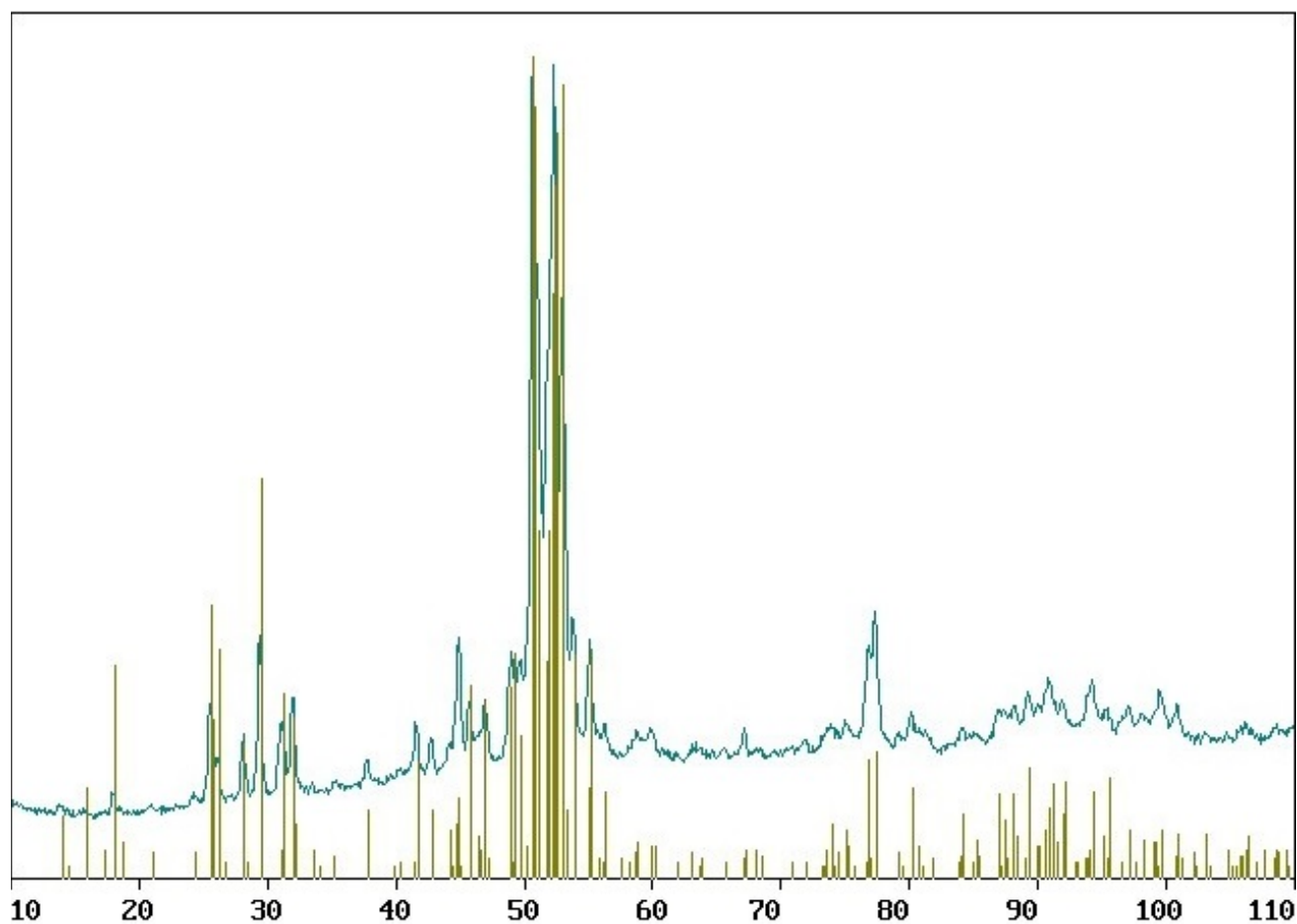


Рисунок 26: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка iA состава $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$.

Фазовый анализ для образца $\text{Al}_{64,36}\text{Co}_{3,05}\text{Cu}_{22,20}\text{Fe}_{10,39}$ iQ (рисунок 27) показал наличие единственной фазы — икосаэдрической. Спектр совпадает с литературными данными (рисунок 28 — данные работы [91]) и однозначно определяет образец как квазикристалл с икосаэдрической симметрией.

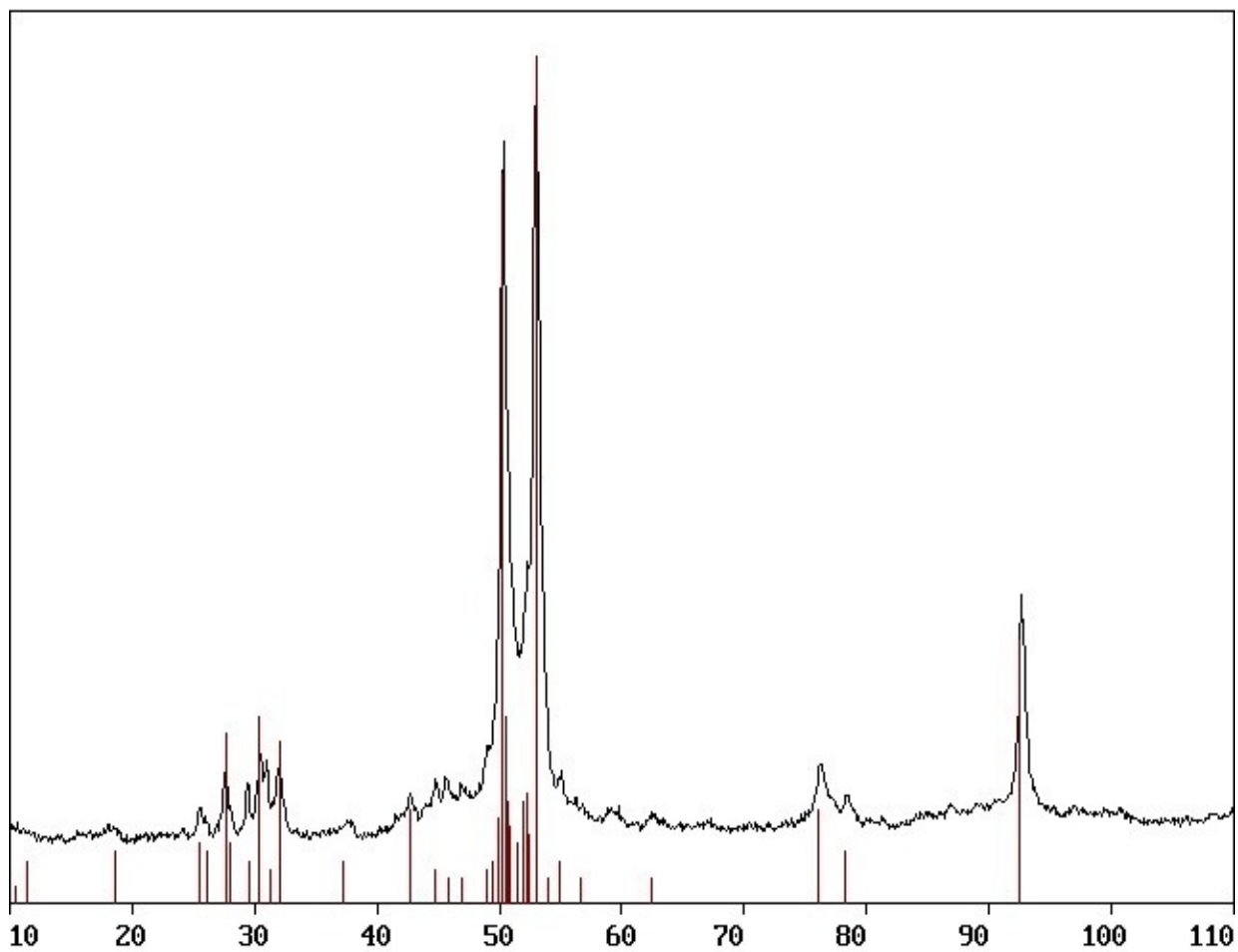


Рисунок 27: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка iQ состава $\text{Al}_{64,36}\text{Co}_{3,05}\text{Cu}_{22,20}\text{Fe}_{10,39}$.

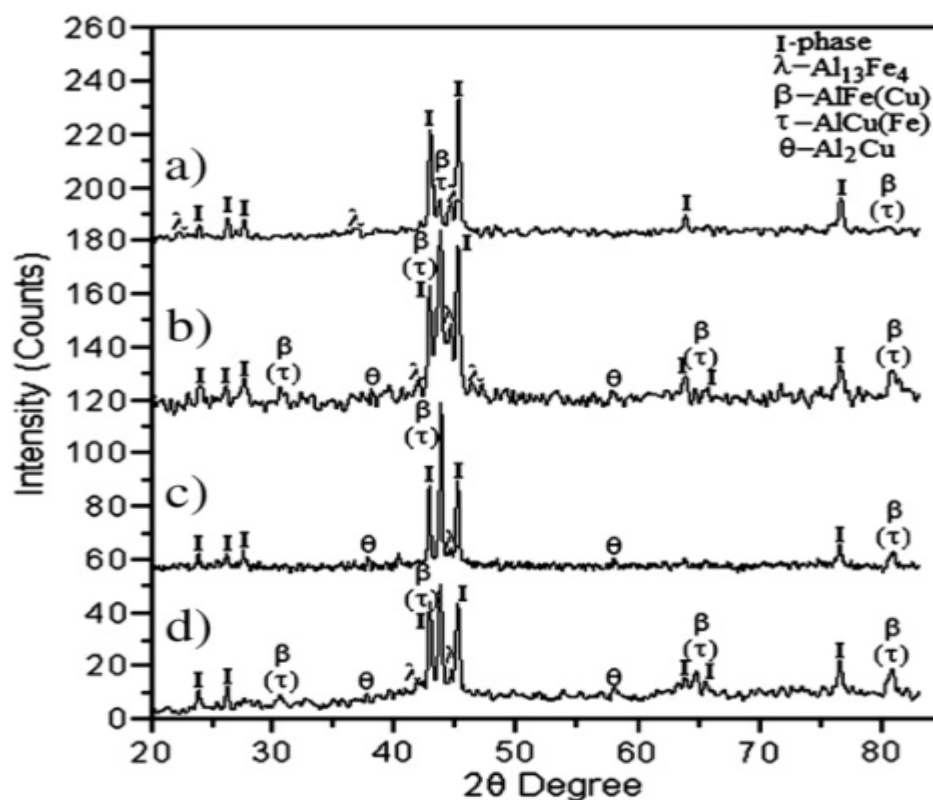


Рисунок 28: Рентгенограммы квазикристаллических сплавов: а: $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$, б: $\text{Al}_{64}\text{Cu}_{22,5}\text{Fe}_{13,5}$, в: $\text{Al}_{61}\text{Cu}_{26}\text{Fe}_{13}$ и д: $\text{Al}_{62}\text{Cu}_{25,5}\text{Fe}_{12,5}$, в литом состоянии.

По результатам дифракции рентгеновских лучей от порошков исследуемых образцов удалось однозначно установить 100% содержание декагональной и икосаэдрической фаз в образцах состава $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$ и $\text{Al}_{64,36}\text{Co}_{3,05}\text{Cu}_{22,20}\text{Fe}_{10,39}$ соответственно, а также установить что образец $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$ представляет из себя икосаэдрическую аппроксиманту. Также косвенно показано, что образец $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$ скорее всего является декагональной аппроксимантой.

Все четыре образца показывают острые пики дифракции с шириной близкими к инструментальному пределу разрешения, что указывает на высокое их качество.

Глава 3 Структура

§15. Морфология образцов

Образцы в зависимости от типа структуры имеют сильные морфологические различия. Декагональные монокристаллы dQ имеют форму правильной десятиугольной прямой призмы, вдоль длинной оси которой атомы расположены периодическим образом; перпендикулярно к этой оси располагаются плоскости с квазипериодической кластерной укладкой (рисунки 29). Аппроксиманты декагональной системы $Al-Co-Cu$ dA также имеют форму десятиугольной прямой призмы, однако форма её не является правильной. Длина таких образцов значительно уступает декагональным монокристаллам, в то время как величина поперечного сечения в среднем в два раза выше (рисунки 30). Габитус полученных аппроксимант икосаэдрической системы $Al-Cu-Fe$ iA отличается от декагональных аппроксимант и квазикристаллов кардинальным образом — он имеет форму скорее прямоугольного параллелепипеда длинная ось которого всегда расположена вдоль оси второго порядка, в то время как перпендикуляры к этой оси представляют из себя оси третьего порядка. Торцы параллелепипедов не являются плоскими гранями, а представляют из себя двугранный угол, симметрично расположенный относительно длинной оси. Угол этот по величине соответствует углу икосаэдра в шестиугольном сечении (рисунки 31). Икосаэдрические квазикристаллы системы $Al-Cu-Fe$ iQ уже не имеют выделенной оси и являются более изотропными по форме и напоминают усечённый икосаэдр (рисунки 32).

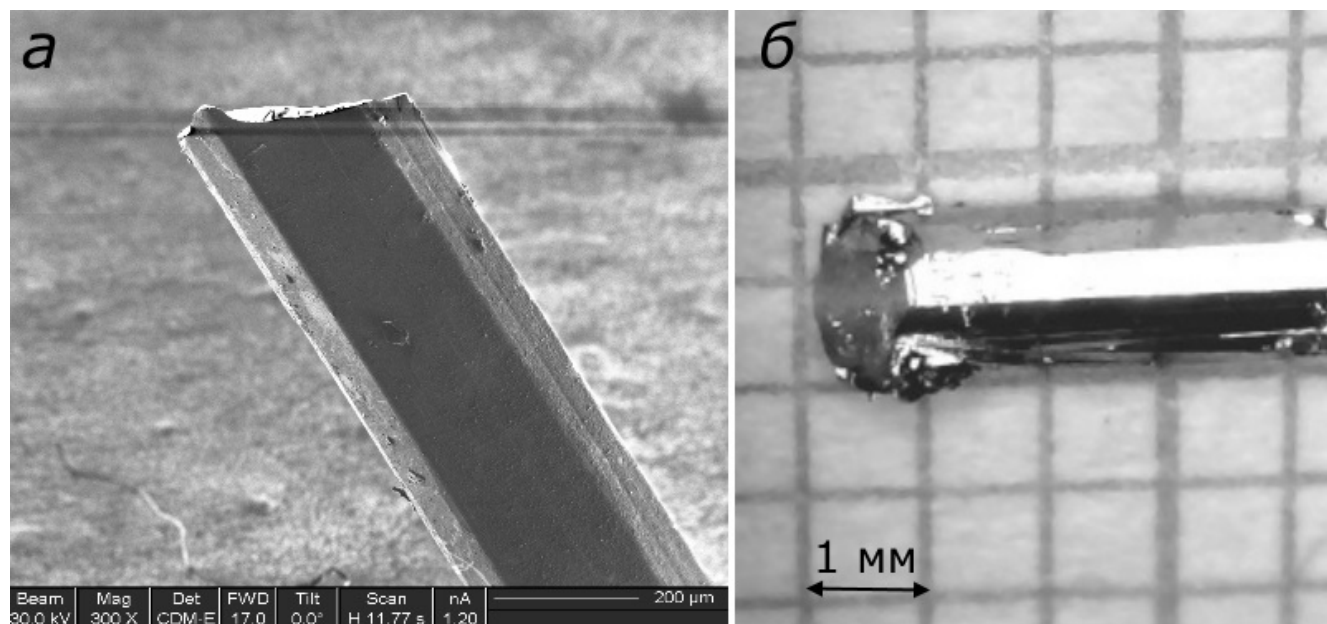


Рисунок 29: Фото декагонального квазикристалла а: в ионном микроскопе, б: в оптическом микроскопе.

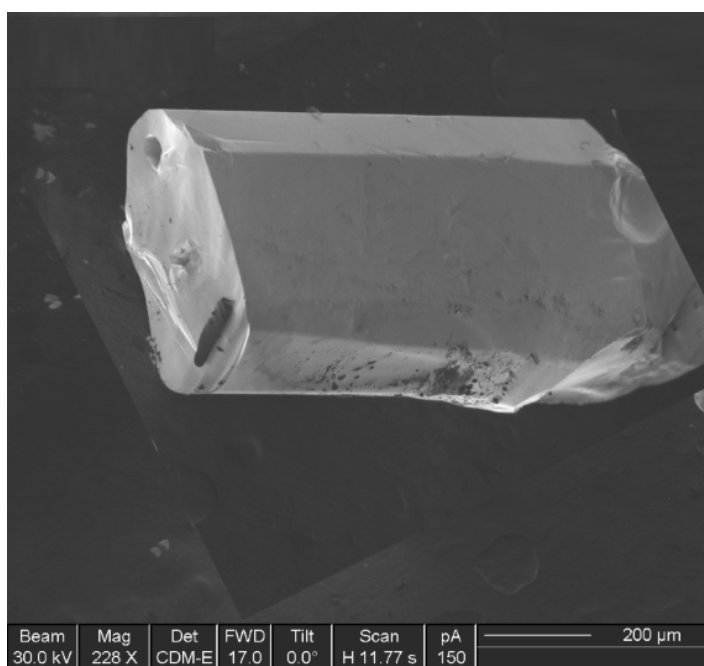


Рисунок 30: Фото образца декагональной аппроксиманты в ионном микроскопе.

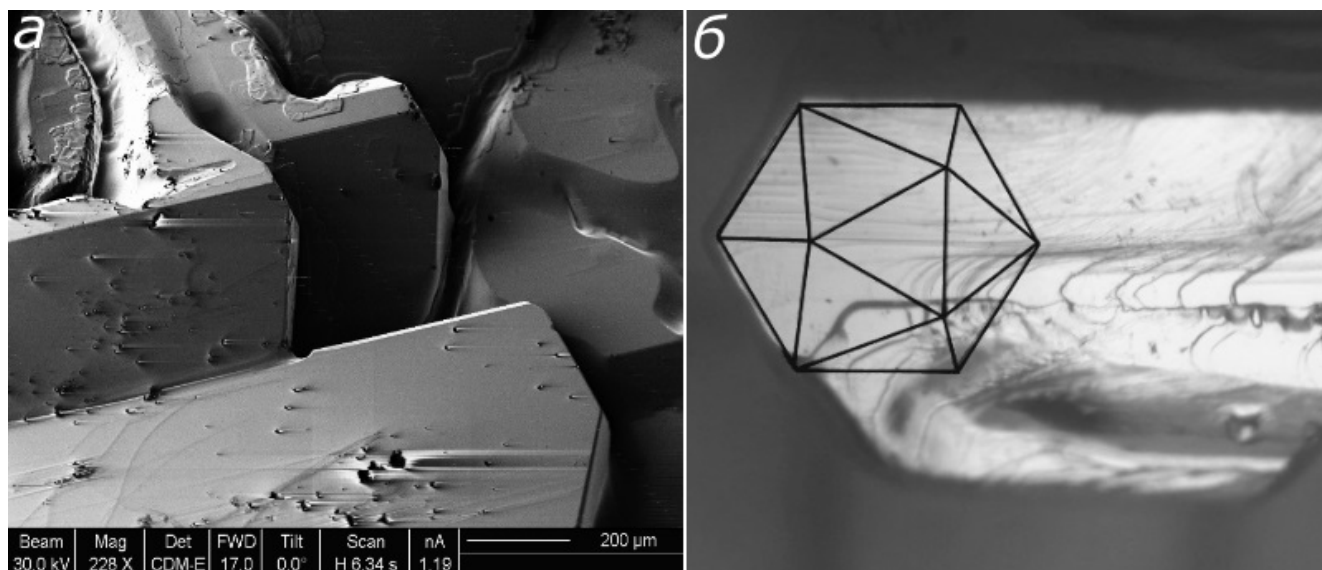


Рисунок 31: а: фото образцов икосаэдрических аппроксимант $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$, б: сравнение угла икосаэдра с углом при вершине икосаэдрической аппроксиманты $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$.

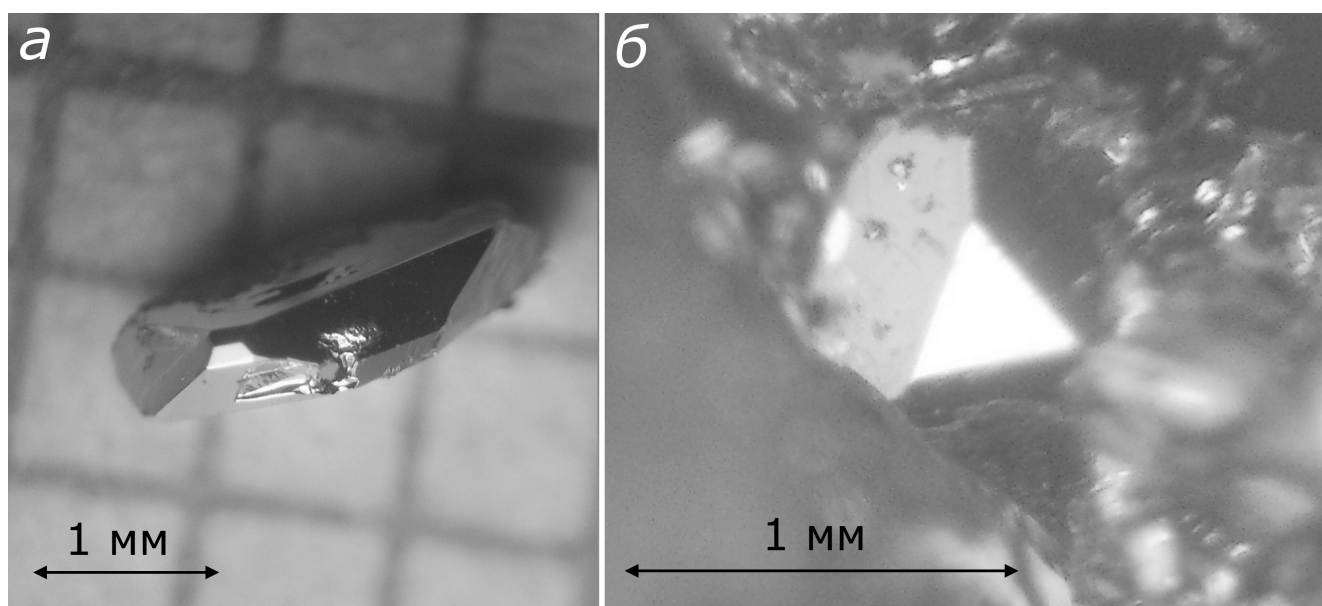


Рисунок 32: а: монокристаллический образец икосаэдрической фазы, б: монокристаллический образец икосаэдрической фазы.

§16. Структура квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe

Для описания подробного описания структуры необходимо точно установить атомные позиции, что в случае квазикристаллов требует серьезного пересмотра классической постановки задачи. Даже для самых сложных случаев обычной кристаллической структуры (например для объектов с большой элементарной ячейкой), всегда можно по крайней мере определить размеры элементарной ячейки и её параметры. В икосаэдрической фазе Al–Cu–Fe невозможно сделать даже это. Однако, в некоторых случаях в реальном или обратном пространстве его структура может быть описана простым указанием размеров и углов некоторого периодически повторяющегося блока. [92]

Структура монокристаллов системы Al–Co–Cu–Fe исследована методом просвечивающей электронной микроскопии. Дифракционные картины получены на микроскопе модели JEM–2100 фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 200 кВ. Пластика поперечного среза образца для просвечивающей электронной микроскопии была изготовлена с помощью фокусированного ионного пучка (FEI Strata FIB 201) с ускоряющим напряжением 30 кВ. Предварительная ориентировка образцов осуществлялась по методу Лауэ на дифрактометре УРС–2.0.

Электронограмма образца состава $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$ показала наличие оси десятого порядка (**рисунок 33а**) и двадцати осей второго порядка двух разновидностей осей десятого порядка — с межплоскостными расстояниями 2,04 Å и 4,09 Å (**рисунок 34а, 34б**). Углы между осями второго порядка одного типа составляют 36°. Отношение межплоскостных расстояний вдоль осей второго порядка соответствует золотому числу с погрешностью в пределах точности измерений (**рисунок 33б**). В **таблице 6** представлены величины отрезков между максимумами, измеренные вдоль осей второго порядка. Измерения проводились с помощью программы Inscap0.91 [93].

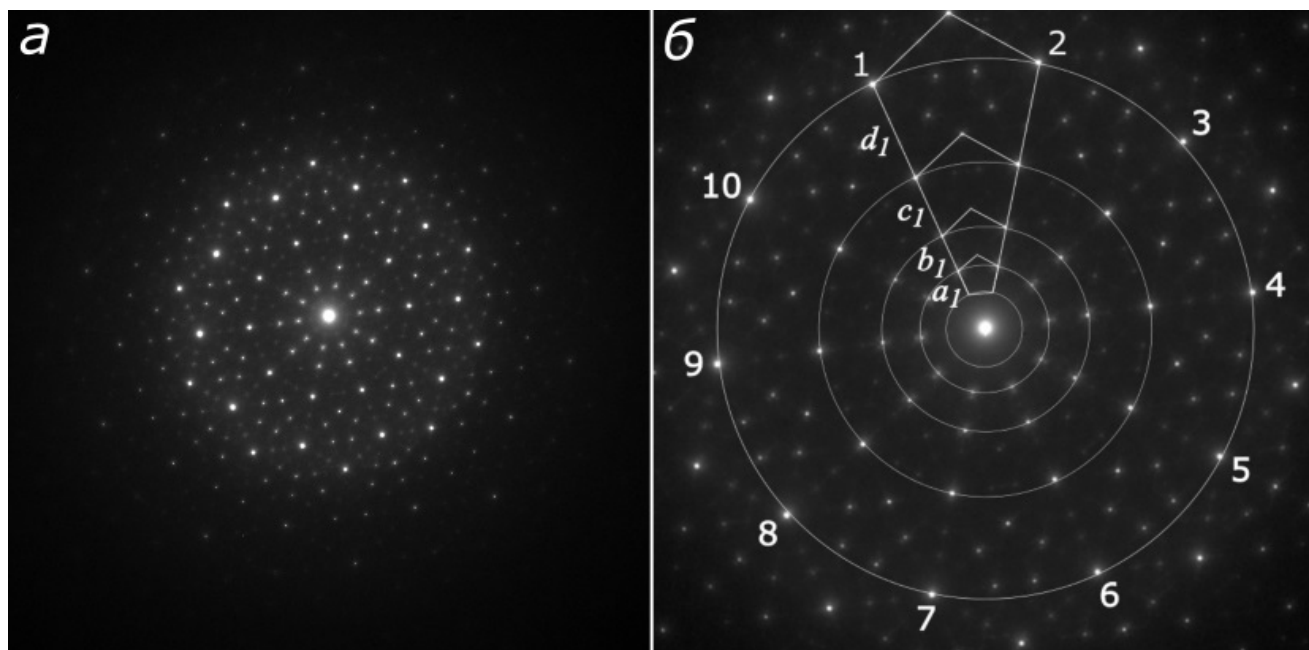


Рисунок 33: Электронная дифракция, снятая с оси десятого порядка от монокристалла системы Al–Co–Cu с декагональной симметрией.

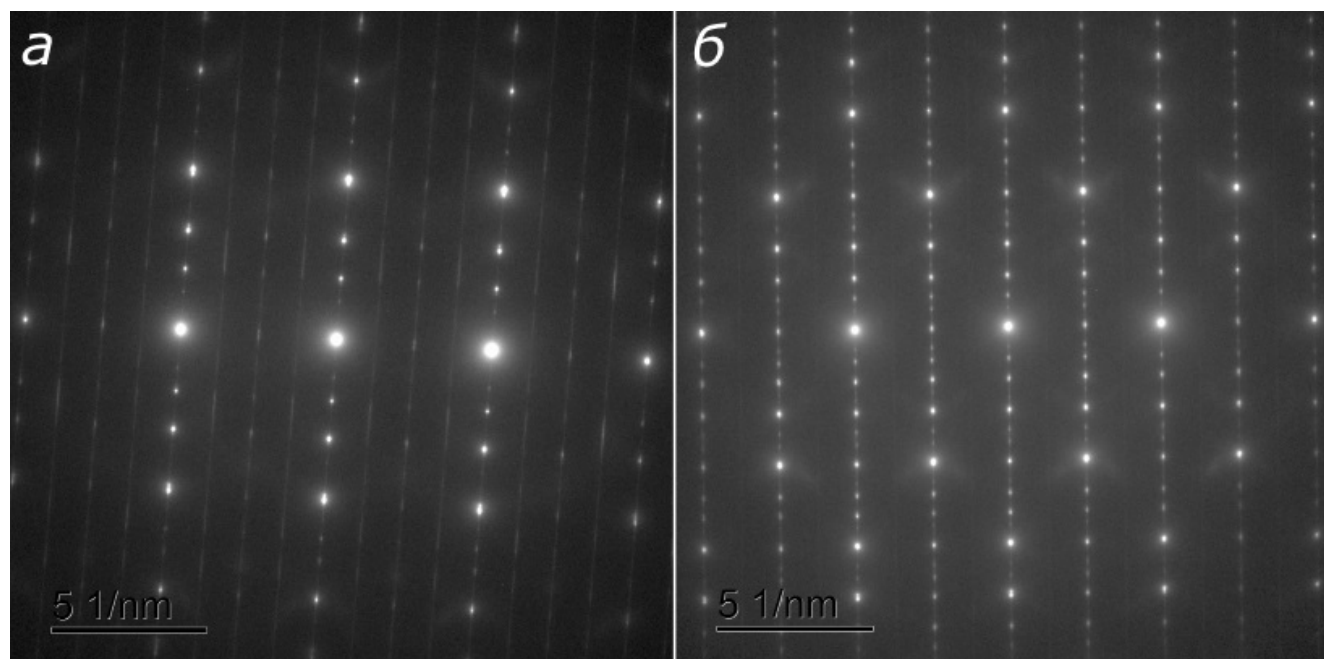


Рисунок 34: Электронная дифракция, снятая с осей второго порядка с межплоскостными расстояниями а: 2,04 Å и б: 4,09 Å от квазикристалла системы Al–Co–Cu с декагональной симметрией.

Таблица 6: Величины отрезков между максимумами вдоль осей второго порядка на дифракционной картине декагонального монокристалла.

отрезок\№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a , отн. ед.	5,17	5,41	5,24	5,34	5,42	5,55	5,35	5,41	5,36	5,34
b , отн. ед.	8,55	8,79	8,70	8,73	8,38	8,71	8,37	8,57	8,46	8,42
c , отн. ед.	13,67	13,89	13,84	13,82	13,72	13,97	13,47	13,78	13,55	13,64
d , отн. ед.	22,06	22,62	22,61	22,32	21,94	22,31	22,04	22,42	22,09	22,03

Золотое число, полученное по результатам электронной дифракции от монокристалла системы Al–Co–Cu с декагональной симметрией:

$$\tau = \frac{d_n}{c_n} = \frac{c_n}{b_n} = \frac{b_n}{a_n} = 1,61 \pm 0,01, \quad (9)$$

где a_n , b_n , c_n , d_n — расстояния между рефлексами, лежащими вдоль оси второго порядка.

Картина электронной дифракции от декагональной аппроксиманты dQ $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$ представлена на [рисунке 35 а, б](#). Ось второго порядка ([рисунк 35 а](#)) сильно напоминает десятую симметрию, однако расстояния между рефлексами «псевдо-десятой» симметрии не одинаковы и отношения расстояний между плоскостями вдоль перпендикулярной оси не дают золотого числа. Ось второго порядка, показанная на [рисунке 35 б](#) выглядит также как у декагонального квазикристалла.

На [рисунке 36](#) представлена электронная дифракция от икосаэдрической аппроксиманты iQ $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$ а: ось второго порядка, б: ось третьего порядка, которая при увеличении легирования Fe выродилась бы в пятикратную симметрию.

Электронограмма от икосаэдрического монокристалла $\text{Al}_{64,36}\text{Co}_{3,05}\text{Cu}_{22,20}\text{Fe}_{10,39}$ с осью симметрии пятого порядка представлена на [рисунке 37 а, б](#). Отношение величин отрезков между максимумами, также, как и в случае декагонального квазикристалла дают золотое число ([таблица 7](#)). В образце найдены две оси второго порядка ([рисунк 38 а, б](#))

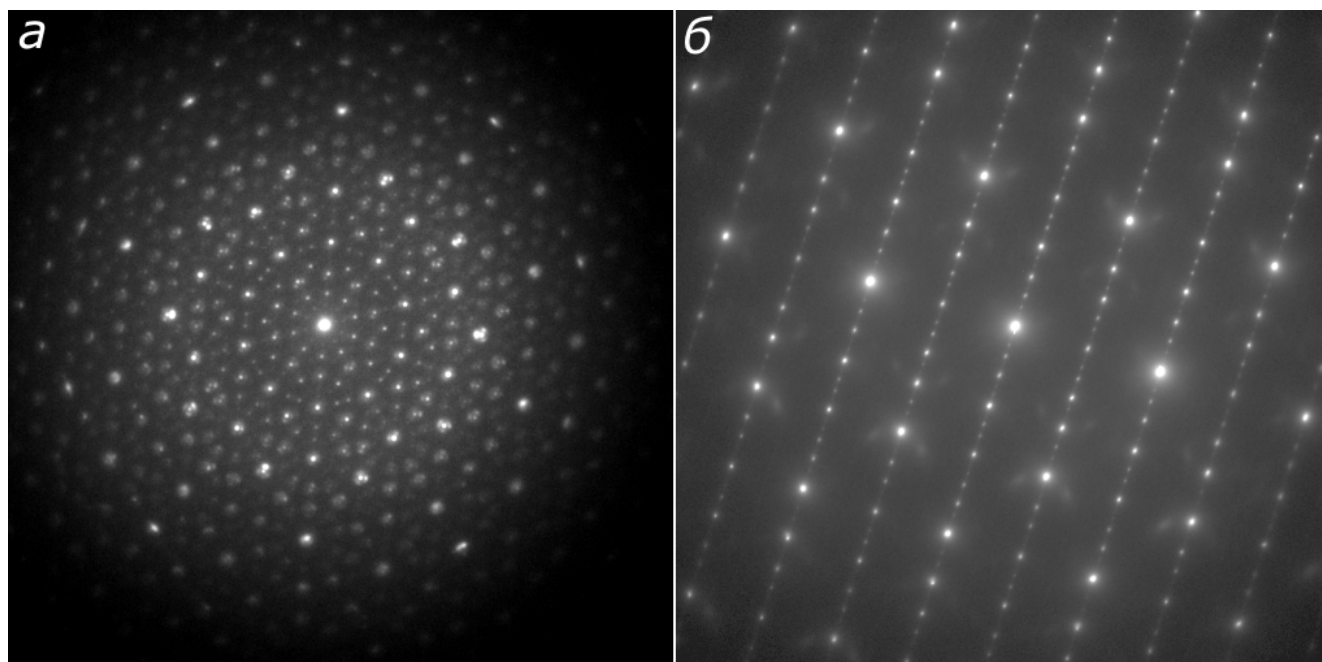


Рисунок 35: Электронная дифракция от декагональной аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe, а: ось 2-го порядка (вырожденная ось 10-го порядка), б: ось второго порядка.

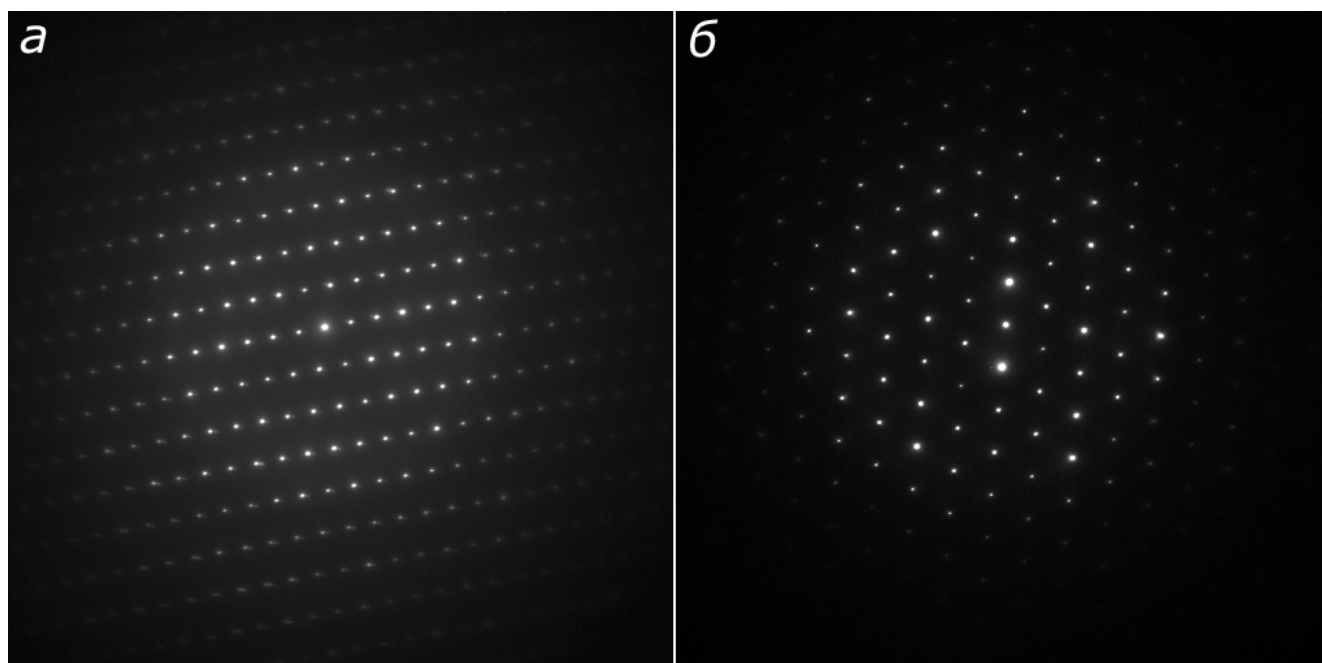


Рисунок 36: Электронная дифракция от икосаэдрической аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe, а: ось 2-го порядка, б: ось 3-го порядка.

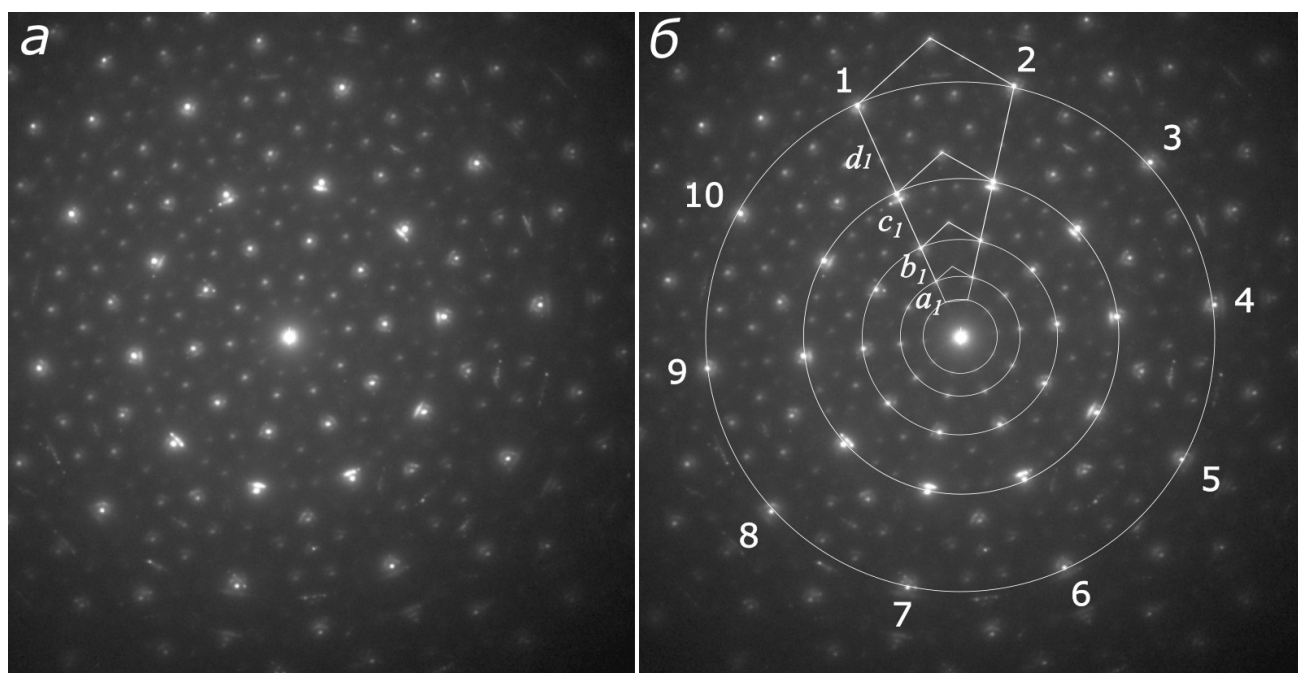


Рисунок 37: Электронная дифракция от квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe с икосаэдрической симметрией.

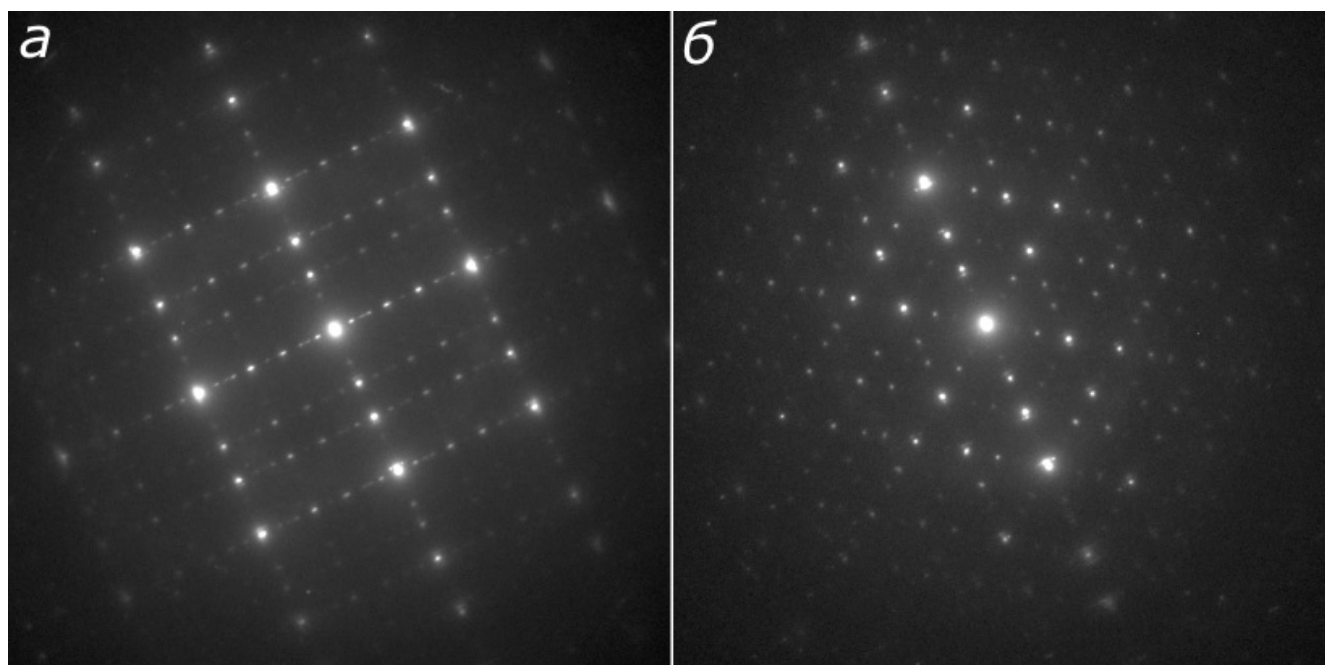


Рисунок 38: Электронная дифракция от квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe с икосаэдрической симметрией.

Таблица 7: Величины отрезков между максимумами вдоль осей третьего порядка на дифракционной картине икосаэдрического монокристалла.

отрезок\№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a , отн. ед.	6,87	6,88	6,87	6,85	6,83	6,82	6,81	6,82	6,84	6,86
b , отн. ед.	11,15	11,05	11,07	11,19	11,38	11,56	11,64	11,62	11,50	11,31
c , отн. ед.	18,09	18,37	18,48	18,42	18,25	18,00	17,75	17,57	17,56	17,77
d , отн. ед.	29,11	28,92	28,77	28,74	28,87	29,09	29,29	29,38	29,37	29,27

Золотое число, полученное по результатам электронной дифракции от монокристалла системы Al–Cu–Fe с икосаэдрической симметрией:

$$\tau = \frac{d_n}{c_n} = \frac{c_n}{b_n} = \frac{b_n}{a_n} = 1,62 \pm 0,01 \quad . \quad (10)$$

Глава 4 Исследование электронного транспорта

§17. Получение ориентированных образцов для исследования анизотропии электронного транспорта.

Задача получить ориентированные образцы заданных размеров и формы не является столь тривиальной, хотя имеет огромную актуальность для исследования физических свойств материалов со структурной анизотропией, таких как квазикристаллы.[60, 94, 95] Углы между плоскими сетками в структуре кристалла измеряются с помощью рентгенограмм, независимо от того, есть у кристалла правильная внешняя форма, или нет.[96] Вопрос поиска положения кристаллографических осей решетки кристалла относительно внешних координатных осей хорошо изучен и решается преимущественно с помощью методов рентгеновской дифракции.[97]

Ввиду большой степени хрупкости моноквазикристаллов, а также того факта, что качественные образцы могут быть получены лишь маленького размера (от 1 до 4 мм в длину), то для приготовления ориентированных монокристаллических образцов заданных размеров и формы в данной работе использовался оригинальный метод.

Кристалл длиной l и диаметром d ориентировался по методу Лауэ на установке УРС-2 с камерой РКСО. Поскольку кристалл имеет игольчатую форму и его структура относительно оси иглы изотропна, то при ориентировке не имеют смысла повороты вокруг рентгеновского пучка. Этот факт позволяет установить кристалл параллельно дуге гониометра и не нарушать эту параллельность при ориентировке (рис. 39 а). Таким образом исключается одна из степеней свободы сорientированного образца, что даёт

возможность его параллельного переноса с гониометрической головки на подготовленную графитовую подложку с плоскопараллельными гранями (рис. 39 б).

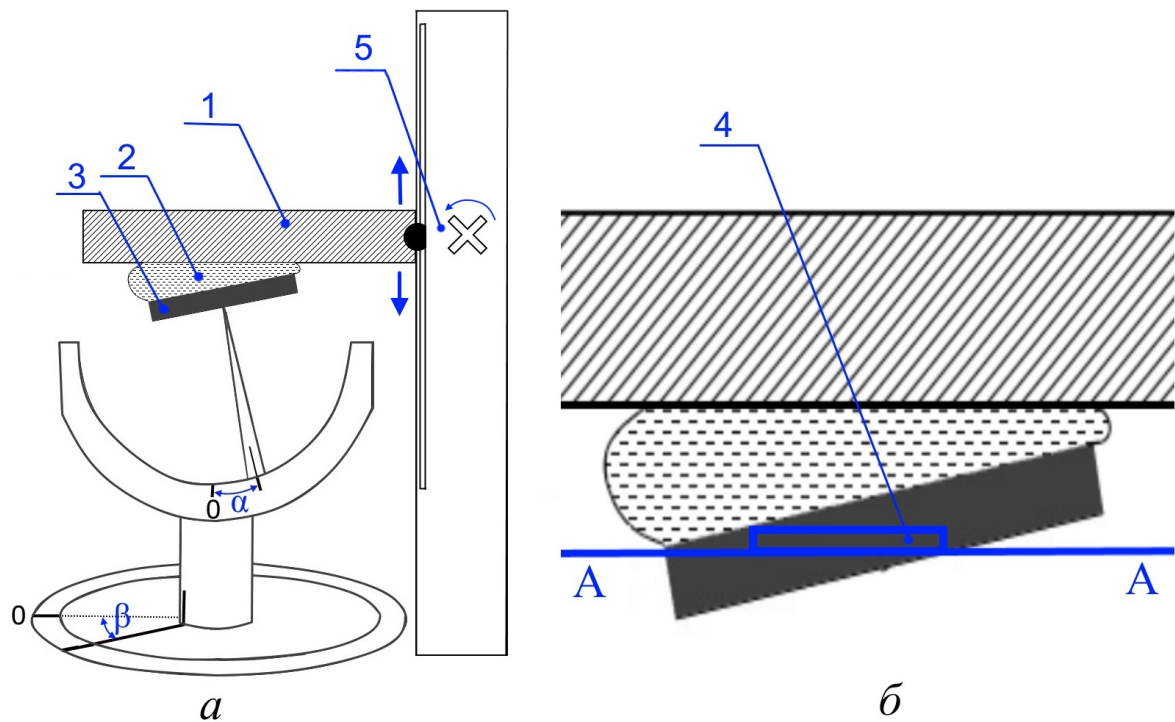


Рисунок 39: а: схематическое изображение сориентированного кристалла на гониометрической головке. α , β - углы поворота кристалла до ориентировки вокруг горизонтали и вертикали соответственно, 1 - графитовая подложка с плоскопараллельными гранями, 2 - клей, 3 - монокристалл; б: монокристалл, параллельно перенесённый на графитовую подложку с плоскопараллельными гранями, где 4 - границы полученного образца с гранями параллельными ориентировке, AA - плоскость ориентировки.

В результате получается что образец жёстко закреплён на подложке, а ось ориентировки параллельна плоскостям подложки. Достигнув такого крепления формируется первая плоская грань. Далее путём серии последовательных поворотов на 90° и полировки получается монокристалл в

форме прямоугольного параллелепипеда с гранями, параллельными оси искомой ориентировки. Максимальная длина l_{1max} и толщины h_{1max} и h_{2max} получаемого прямоугольного образца зависят от первоначальных размеров монокристалла (l и d), а также от углов доворота монокристалла при ориентировке (α и β):

$$l_{1max} = \frac{l}{\cos \alpha} \quad (11)$$

$$h_{1max} = \frac{d}{\cos \alpha} \quad (12)$$

$$h_{2max} = \frac{d}{\cos \beta} \quad (13)$$

§18. Электронный транспорт квазикристаллов

Температурные зависимости сопротивления измерялись стандартным четырехконтактным методом в диапазоне температур 1,4–300 К и в магнитных полях 0–18 Тл. Магнитное поле было приложено перпендикулярно направлению протекания тока и параллельно квазипериодической плоскости.

Измерения электросопротивления производились четырёхконтактным методом (рисунок 40) в Национальной Лаборатории Сильных Магнитных Полей (США), на сверхпроводящем магните SCM2, работающем на переменном токе. Использовалась температурная вставка (VTI) с рабочим температурным диапазоном от 1,4 К до 300 К.

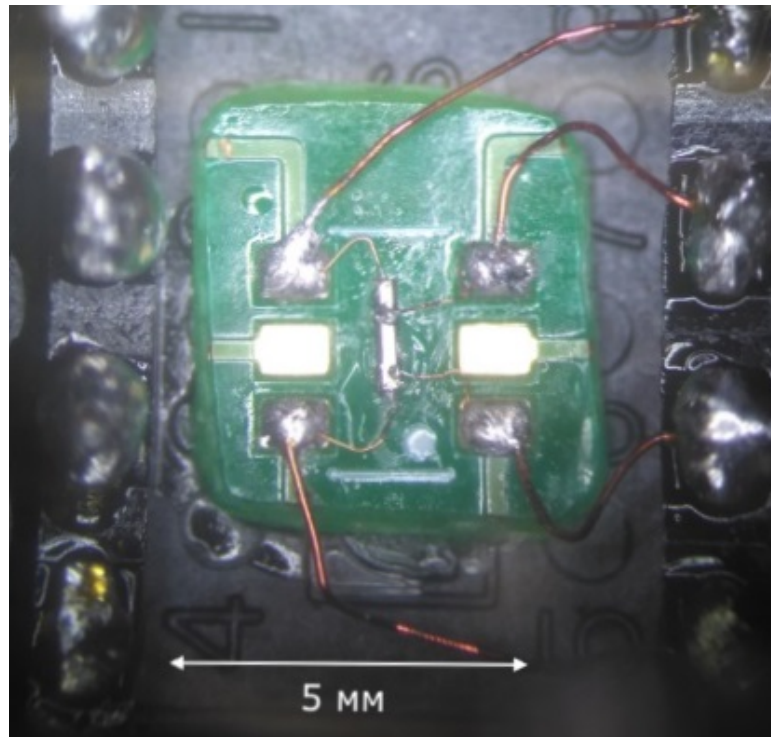


Рисунок 40: Образец декагонального монокристалла dQ, смонтированный для измерения транспортных свойств.

В структурах, где реализуется декагональный квазикристалл, декагональная аппроксиманта и икосаэдрическая аппроксиманта, наблюдается сильная анизотропия электротранспортных свойств (рисунки 47, 51, 49) — электросопротивление, измеренное вдоль длинной оси образцов растет почти линейно выше 50 К с ростом температуры для образцов с декагональной симметрией dQ (рисунок 41), для икосаэдрических же и декагональных аппроксимант данная зависимость имеет минимальные отклонения от прямой (рисунки 43 и 45). Сопротивление в перпендикулярном направлении в том же температурном диапазоне хорошо аппроксимируется полиномом второго порядка (рисунки 42, 44 и 46). Таким образом можно утверждать, что электротранспортные свойства декагональных квазикристаллов, а также икосаэдрических и декагональных аппроксимант сопоставимы со свойствами аморфных материалов.

По результатам измерений электросопротивления была отмечена корреляция

между аномальным температурным коэффициентом α , и величиной удельного сопротивления для аморфных металлических сплавов ρ . Экспериментальные данные удельного сопротивления, собранные в широком диапазоне на основе переходных металлов аморфных сплавов показывают, что знак α изменяется от положительного до отрицательного, когда при комнатной температуре удельное сопротивление превышает пороговую величину приблизительно равную $150 \mu\Omega \cdot \text{см}$. [55] Кроме того, для положительного и отрицательного α , удельное сопротивление всегда оказывается приближено к вышеупомянутому предельному значению $150 \mu\Omega \cdot \text{см}$ при высоких температурах. Ограничение или пороговое значение для сопротивления близко к ожидаемому, при эффективной длине свободного пробега электронов проводимости, приближающейся к длине, сравнимой со средним межатомным расстоянием ($0,3 \pm 0,5 \text{ нм}$). Из этого следует, что соотношение $\text{Mo}\alpha\text{i}\text{j}$ должно быть вполне применимо в целом к материалам с небольшой длиной свободного пробега. Обширные исследования аморфных сплавов интерметаллических соединений показывают, что соотношение $\text{Mo}\alpha\text{i}\text{j}$ независимо от любой атомной или электронной структуры, и сопровождает многие высокорезистивные неупорядоченные кристаллические сплавы. Основываясь на полученных экспериментальных данных можно утверждать, что данное соотношение справедливо и для декагональных квазикристаллов, а также для декагональных и икосаэдрических аппроксимант. Тот факт, что соотношение $\text{Mo}\alpha\text{i}\text{j}$ распространяется на икосаэдрические аппроксиманты особенно интересен, так как данные объекты более всего приближены к икосаэдрической изотропной структуре.

Температурная зависимость удельного сопротивления икосаэдрического квазикристалла iQ линейно растёт при понижении температуры, выходя на насыщение при $0,00347 \Omega \cdot \text{см}$ (рисунок 53), что хорошо согласуется с литературными данными. [40, 52, 98]

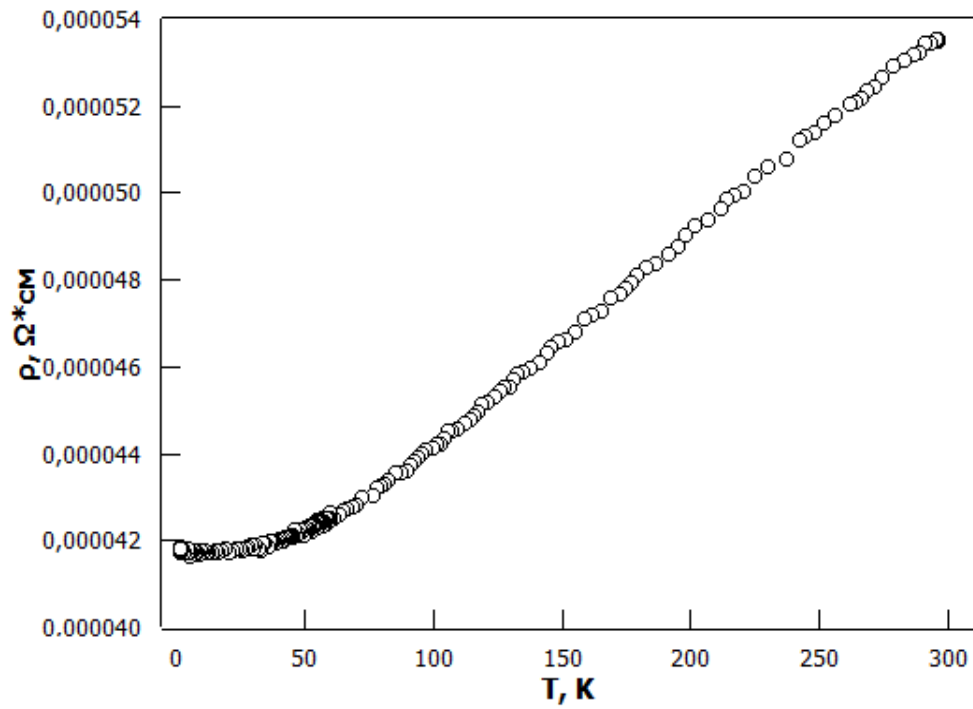


Рисунок 41: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагонального квазикристалла $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$, измеренная вдоль оси роста.

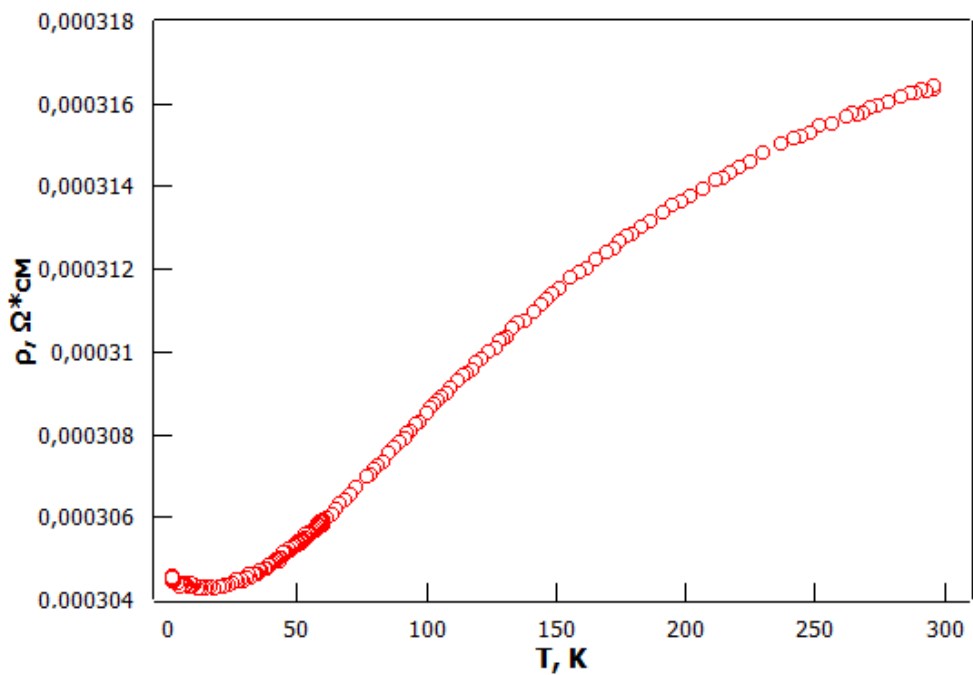


Рисунок 42: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагонального квазикристалла $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.

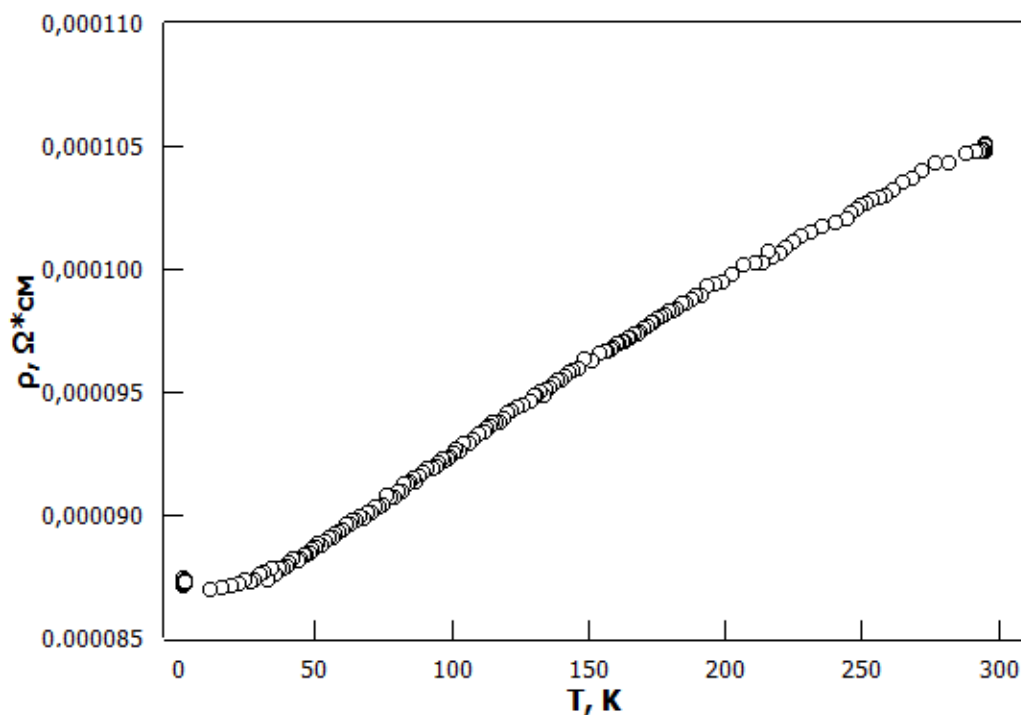


Рисунок 43: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагональной аппроксиманты $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$, измеренная вдоль оси роста.

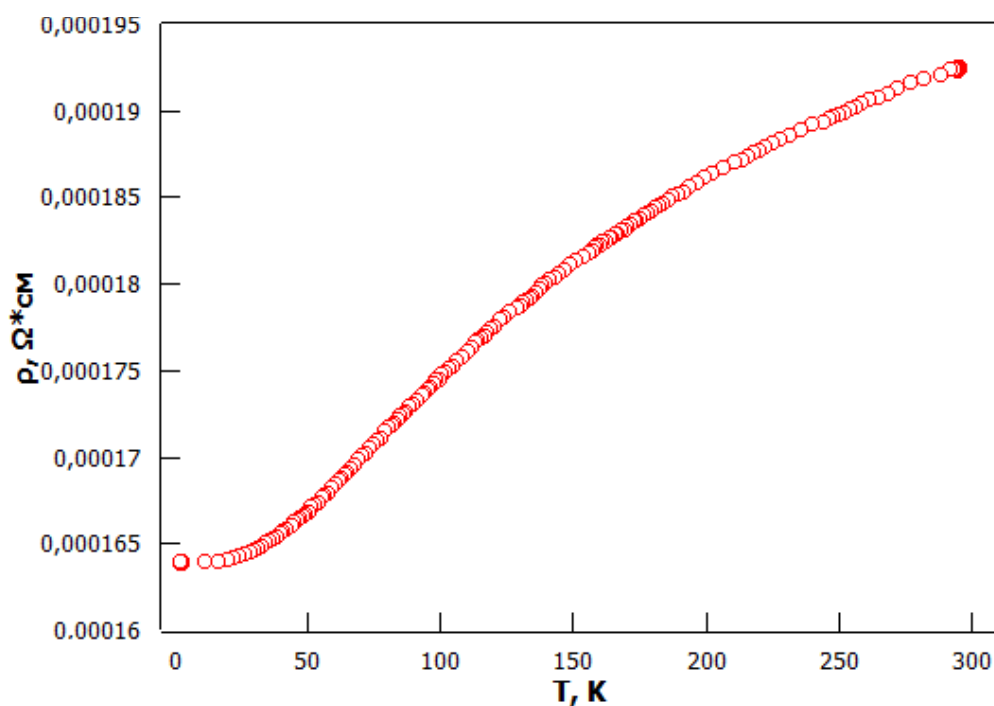


Рисунок 44: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагональной аппроксиманты $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.

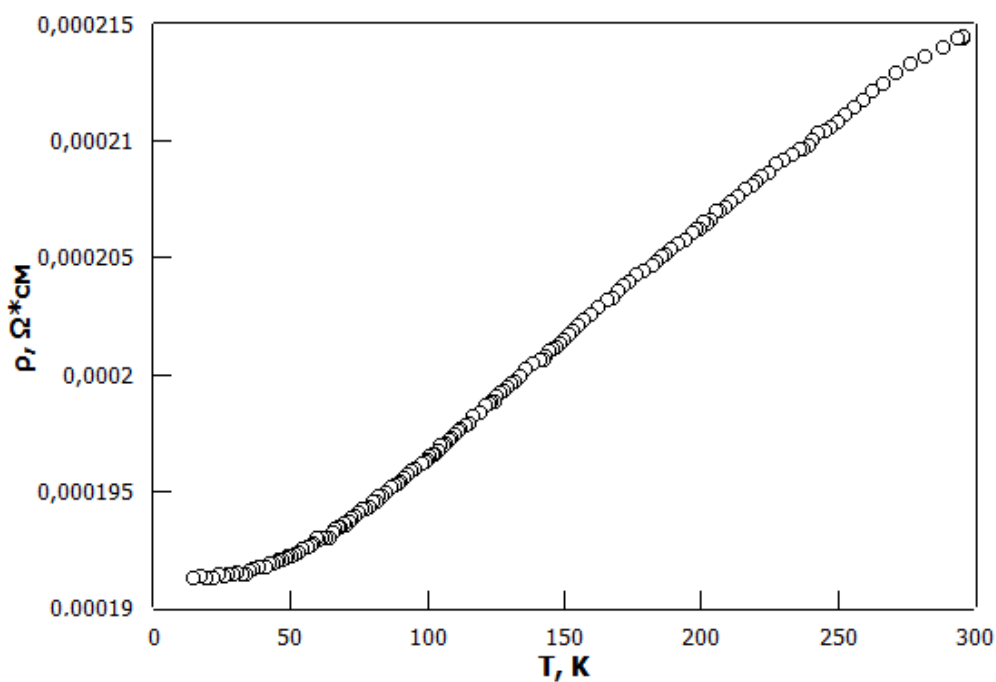


Рисунок 45: Температурная зависимость удельного электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.

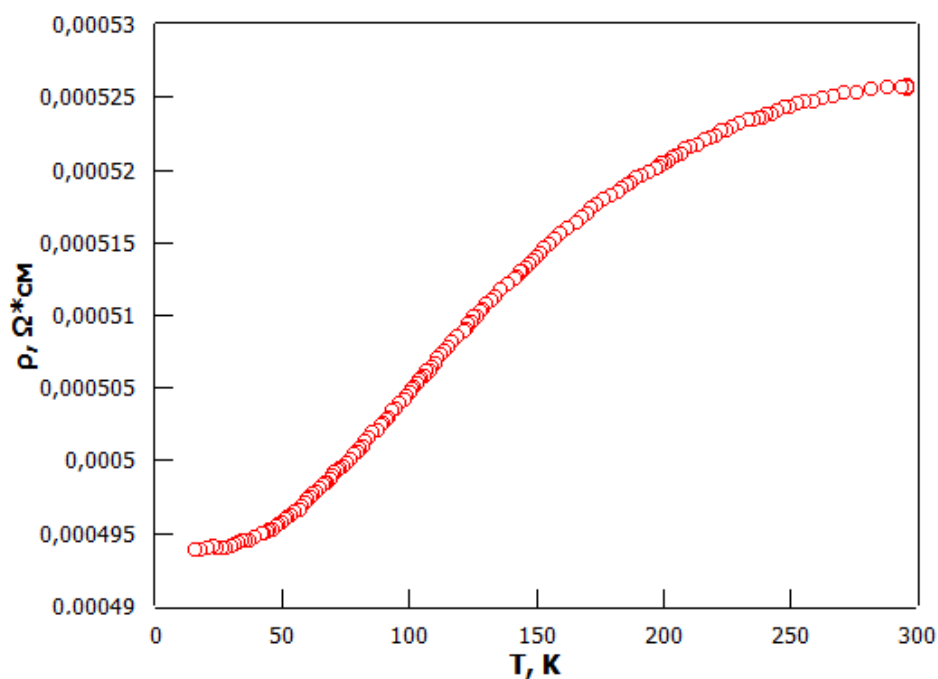


Рисунок 46: Температурная зависимость удельного электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.

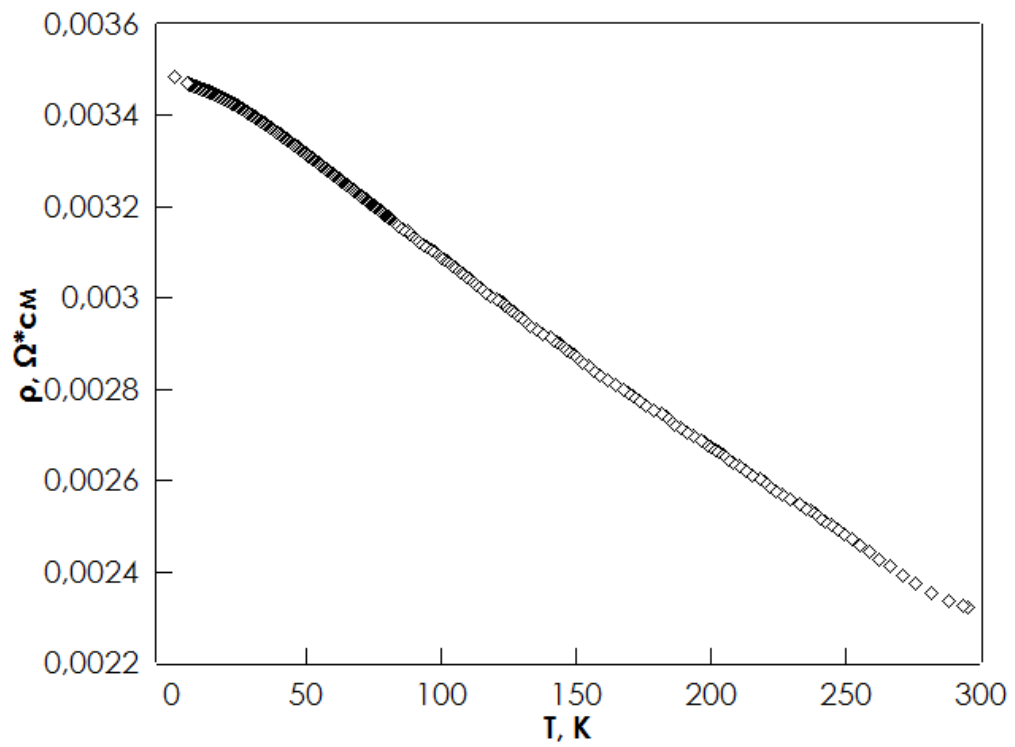


Рисунок 47: Температурная зависимость удельного электросопротивления квазикристалла $\text{Al}_{64,36}\text{Co}_{3,05}\text{Cu}_{22,20}\text{Fe}_{10,39}$ с икосаэдрической симметрией.

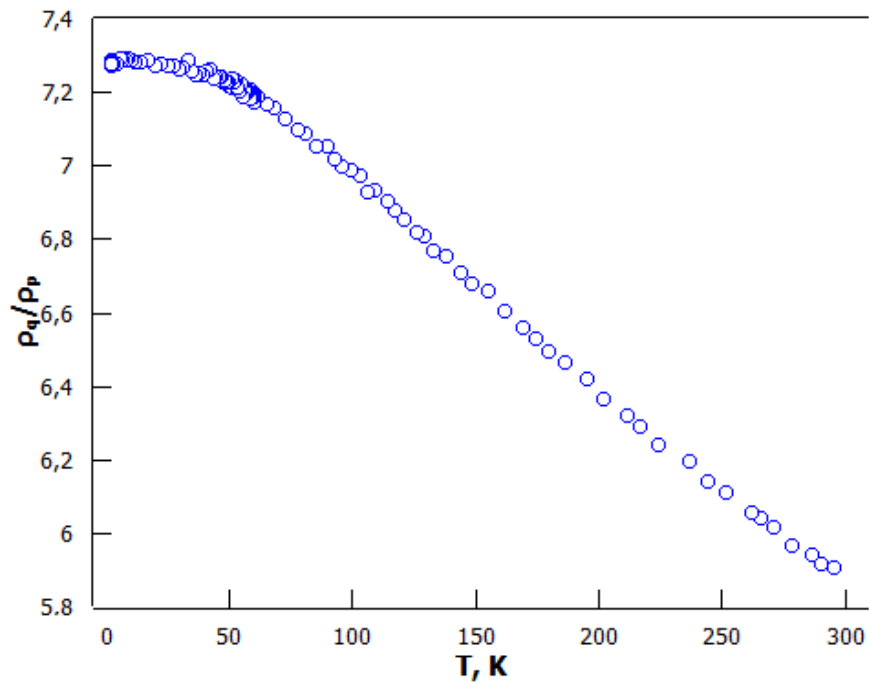


Рисунок 48: Анизотропия удельного электросопротивления ρ_q/ρ_p декагонального квазикристалла dQ $\text{Al}_{64,34}\text{Co}_{18,25}\text{Cu}_{17,34}\text{Fe}_{0,07}$.

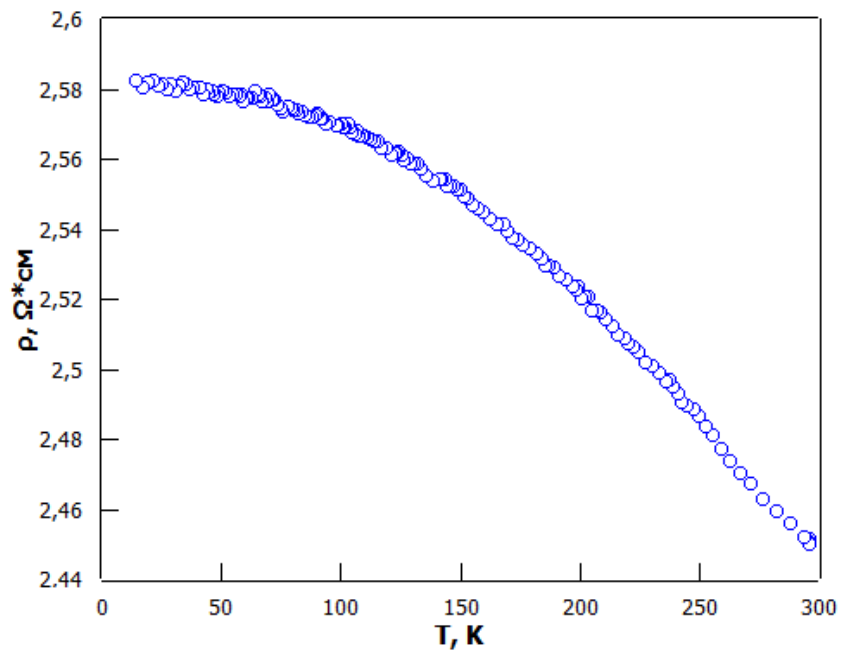


Рисунок 49: Анизотропия удельного электросопротивления ρ_q/ρ_p икосаэдрической аппроксиманты iA $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$.

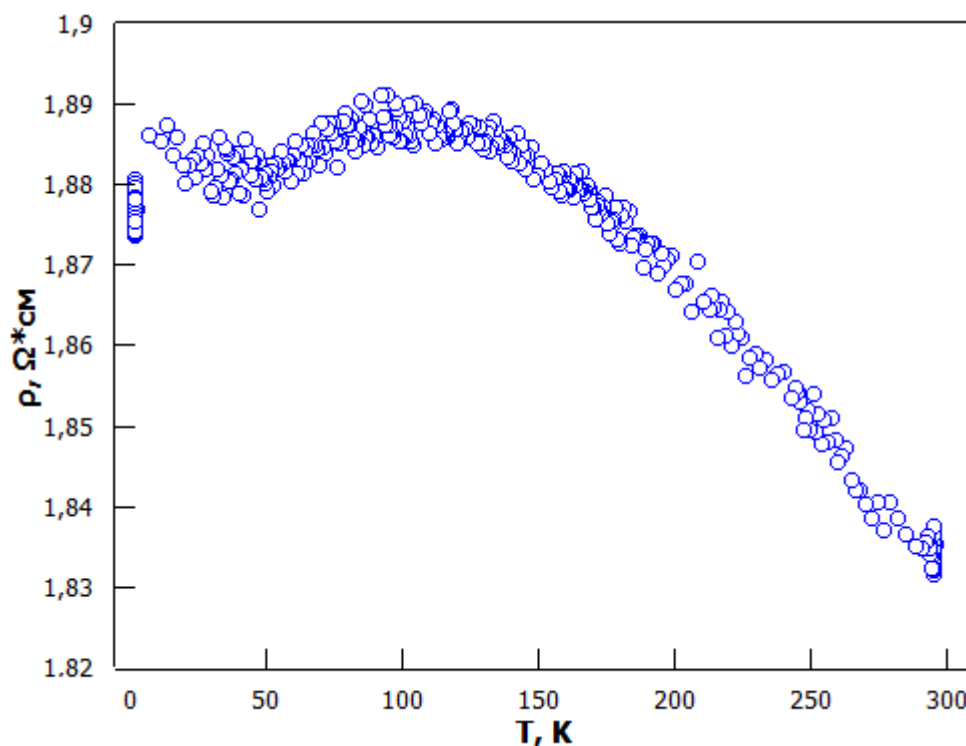


Рисунок 50: Анизотропия удельного электросопротивления ρ_q/ρ_p декагональной аппроксиманты dA $\text{Al}_{63,12}\text{Co}_{9,48}\text{Cu}_{24,73}\text{Fe}_{2,68}$.

На рисунках 51 и 52 представлено нормированное электросопротивление квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe, измеренное вдоль оси роста кристаллов и перпендикулярно к этой оси соответственно. Также на рисунки нанесены литературные данные работ [63, 99, 100] по нормированному электросопротивлению некоторых квазикристаллических систем. У декагональных квазикристаллов, а также декагональных и икосаэдрических квазикристаллических аппроксимант температурный коэффициент сопротивления $\alpha=(d\rho/dT)/\rho$ при измерениях по всем направлениям имеет положительный знак, в то время как у икосаэдрического квазикристалла отрицательно.

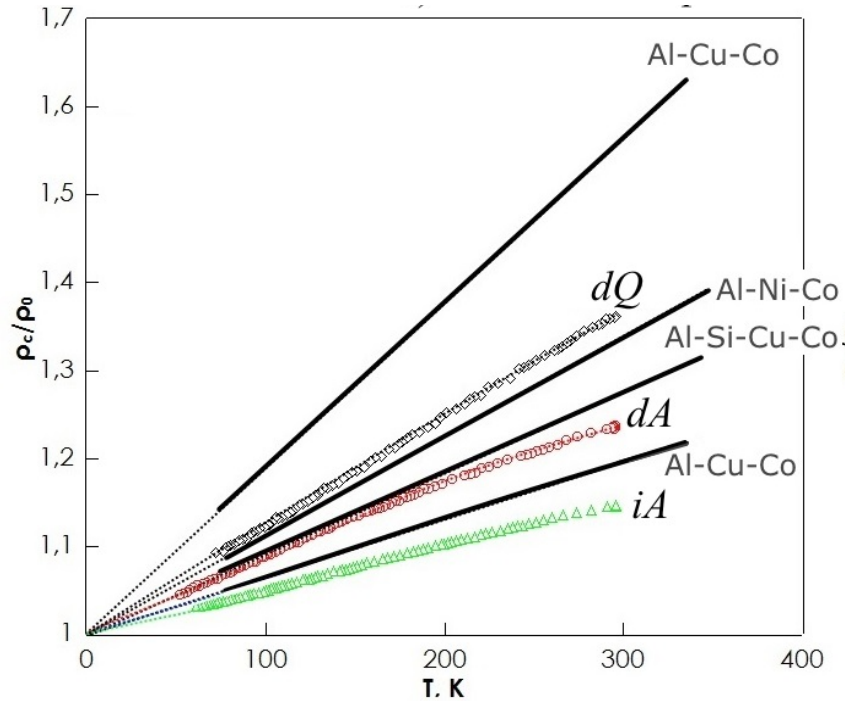


Рисунок 51: Нормированное сопротивление, измеренное вдоль оси роста кристаллов: dQ — квазикристалла с декагональной симметрией, dA — декагональной аппроксиманты, iA — икосаэдрической аппроксиманты.

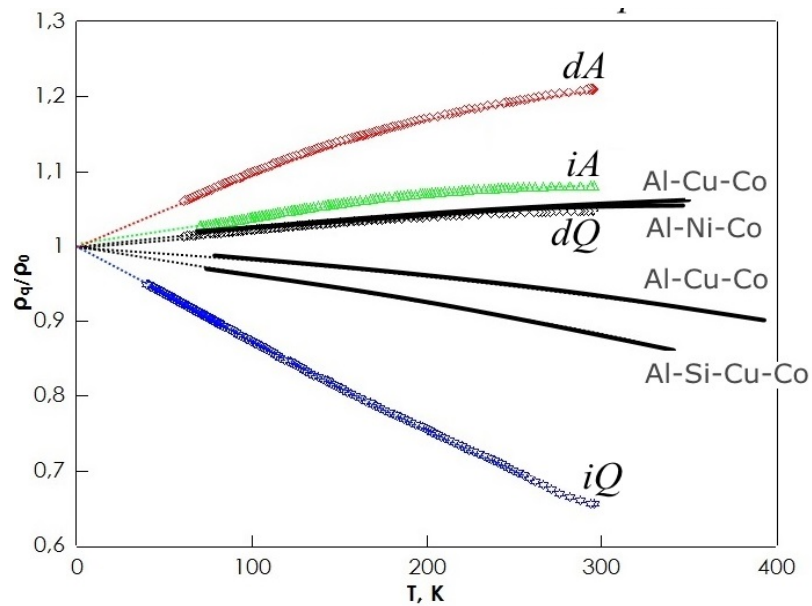


Рисунок 52: Нормированное сопротивление, измеренное в перпендикулярном направлении к оси роста кристаллов: dQ — квазикристалла с декагональной симметрией, dA — декагональной аппроксиманты, iA — икосаэдрической аппроксиманты.

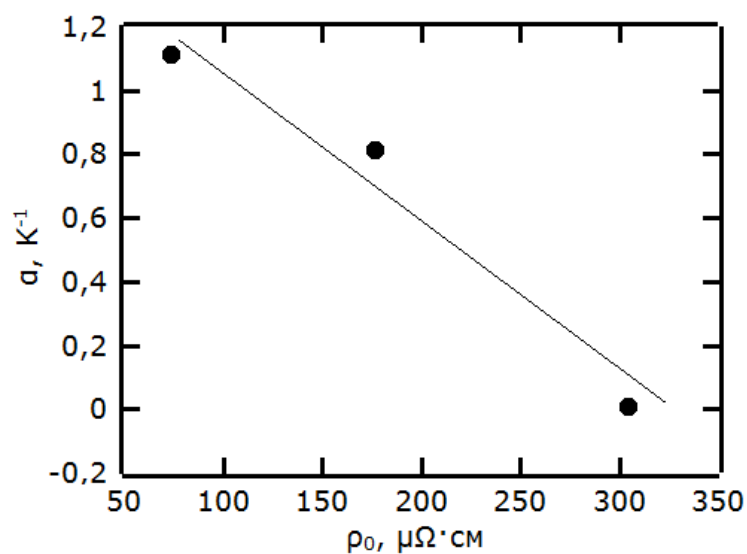


Рисунок 53: Температурный коэффициент сопротивления в направлении, перпендикулярном к оси роста.

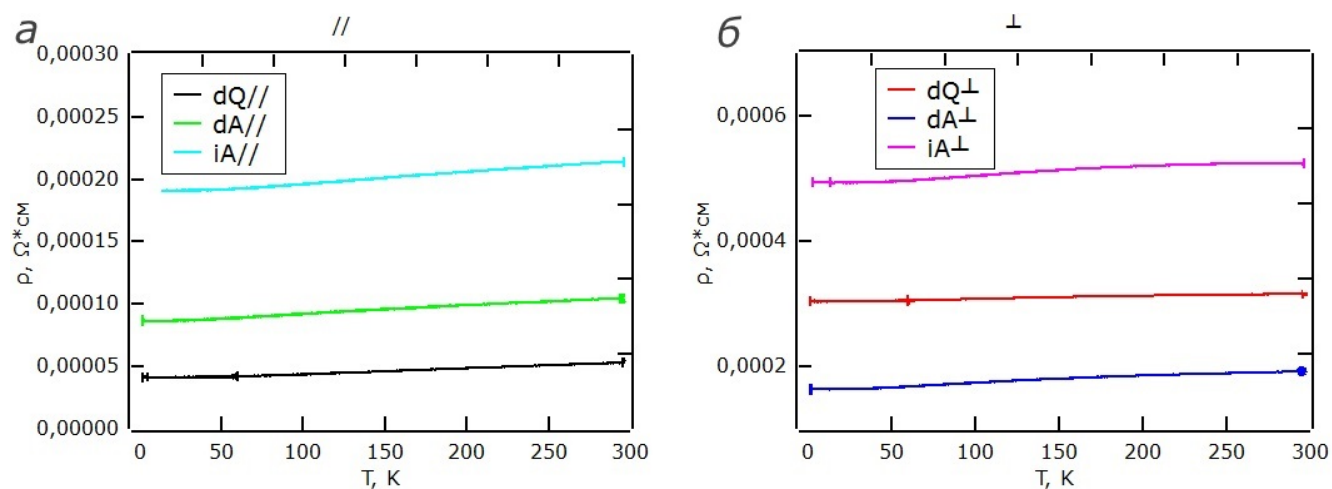


Рисунок 54: Температурные зависимости удельного сопротивления а: образцов, измеренных вдоль оси роста, б: образцов, измеренных перпендикулярно оси роста.

Глава 5 Магнетосопротивление

§19. Магнетосопротивление икосаэдрических квазикристаллов системы Al-Co-Cu-Fe

Транспортные свойства икосаэдрических квазикристаллов является одним из направлений исследования квазикристаллов, где наблюдается самое большое количество аномалий. В частности можно говорить об аномальном магнетосопротивлении (MR). В этой области значительная часть экспериментальных наблюдений может быть объяснена в рамках установленной теоретической базы, то есть квантовых интерференционных эффектов. Согласование экспериментальных результатов с этой теорией даёт беспрецедентную точность по сравнению с предыдущими анализами трехмерных материалов, например таких как аморфные сплавы.

Измерения магнетосопротивления проводилось при температурах 1,7; 120 и 300 K в диапазоне магнитных полей от -18 до 18 Тл. Все кривые показали симметричный ход зависимости относительно нулевого поля. На изотропных образцах с икосаэдрической симметрией iQ измерения проводились вдоль одного направления, совпадающего с осью симметрии пятого порядка. Данные по магнетосопротивлению всех образцов исследуемой системы представлены на [рисунке 55](#).

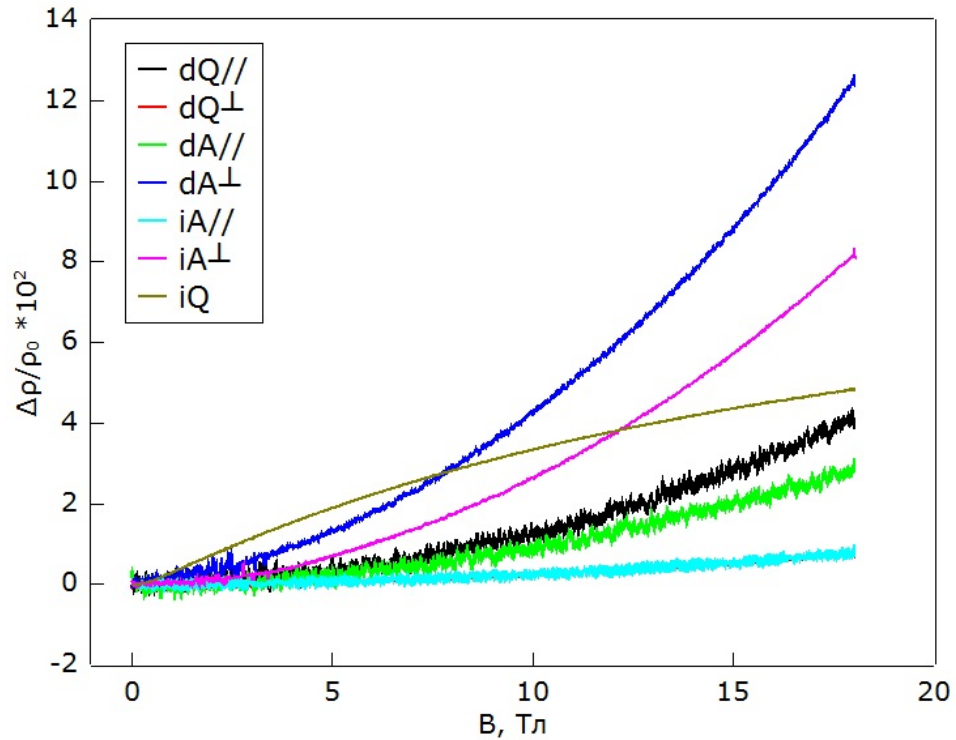


Рисунок 55: MR квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe при температуре 1,7 К.

На всех образцах во всех направлениях обнаружено магнетосопротивление. Измеренное MR образца икосаэдрического квазикристалла iQ системы Al-Cu-Fe показано на [рисунке 56](#). Магнетосопротивление в данной системе не сильно меняется при высоких температурах и значительно увеличивается при понижении температуры до 1,7 К. При низких температурах $\rho(B, T)/\rho(0, T) \sim B^{1/2}$ ([рисунк 58](#)). При повышении температуры MR ведёт себя согласно данным, представленным на [рисунке 57](#). Более детальный анализ показывает, что вклад электрон-электронного взаимодействия $\sim B^2$ уменьшает амплитуду с ростом T и накладывается на вклад эффекта слабой локализации [101]. Изменение знака вклада слабой локализации происходит при несколько более низких температурах, чем при $\Delta\rho/\rho_0$ на [рисунке 56](#). В- и Т- зависимости магнетосопротивления находятся в качественном согласии с теорией квантовых интерференционных эффектов.

$$\Delta\sigma_{WL}(B, T) = \Delta\sigma[\tau_{ie}(T), \tau_{so}, D, g, B] \quad , \quad (14)$$

$$\Delta\sigma_{EEI}(B,T)=\Delta\sigma[F_{\sigma}(T),D,g,B,T] \quad , \quad (15)$$

где τ_{so} — время спин-орбитального рассеяния, D — коэффициент диффузии, g — фактор Ланде, и F — параметр кулоновского взаимодействия. При условии, что $\tau \ll \tau_{ic}(T)$, τ не входит в явном виде. С более слабым условием $\tau < \tau_{ic}(T)$, были получены общие формулы для τ в качестве дополнительного параметра.

Если σ в уравнениях. (14) и (15) не слишком велико, $\Delta\rho/\rho \approx -\rho\Delta\sigma$. Кроме того, оба уравнения содержат множитель $D^{-1/2}$, и измеренное MR затем примерно возрастает с увеличением ρ , как $\rho^{3/2}$. Когда MR измеряется в сопоставимых условиях в различных сплавах, оно строится в координатах $MR(\rho)$. Такое представление MR близко к универсальному с некоторым разбросом из-за различий между системами сплавов других параметров в уравнениях (14) и (15). Все измерения проводились на одном оборудовании и в одинаковых условиях, что исключает погрешности при сравнении результатов по образцам различных систем. По представленным данным магнетосопротивления икосаэдрического квазикристалла можно отметить, что примеси в икосаэдрической квазикристаллической фазе не вносят вклад в MR, исследуемый состав отличался от исследованных в литературе [102], однако поведение MR находится в полном согласовании с ними. Поведение MR икосаэдрического квазикристалла системы находится в качественном согласии с теорией квантовых интерференционных эффектов.

На **рисунке 56** представлены данные по магнетосопротивлению для икосаэдрического квазикристалла системы Al–Cu–Fe с икосаэдрической симметрией.

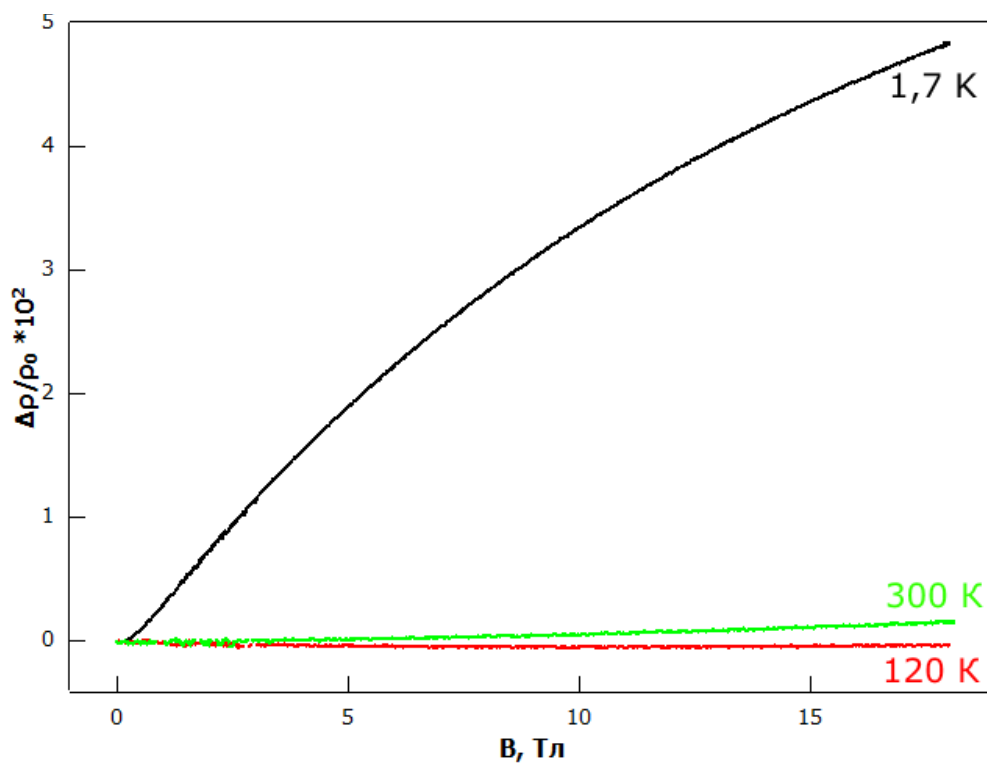


Рисунок 56: Магнетосопротивление икосаэдрического квазикристалла системы Al–Cu–Fe при температурах 1,7; 120 и 300 К.

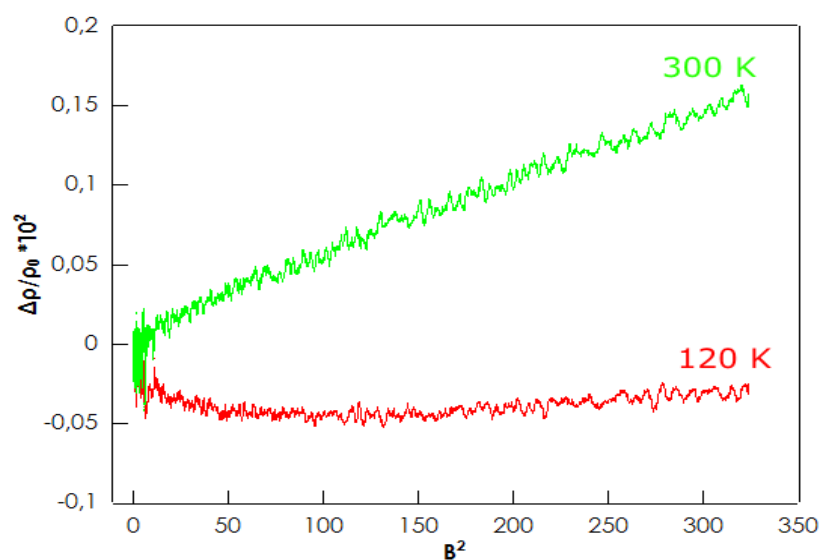


Рисунок 57: Спрямленное в координатах $\Delta\rho/\rho_0(B^2)$ магнетосопротивление квазикристалла системы Al–Cu–Fe при температурах 120 и 300 К.

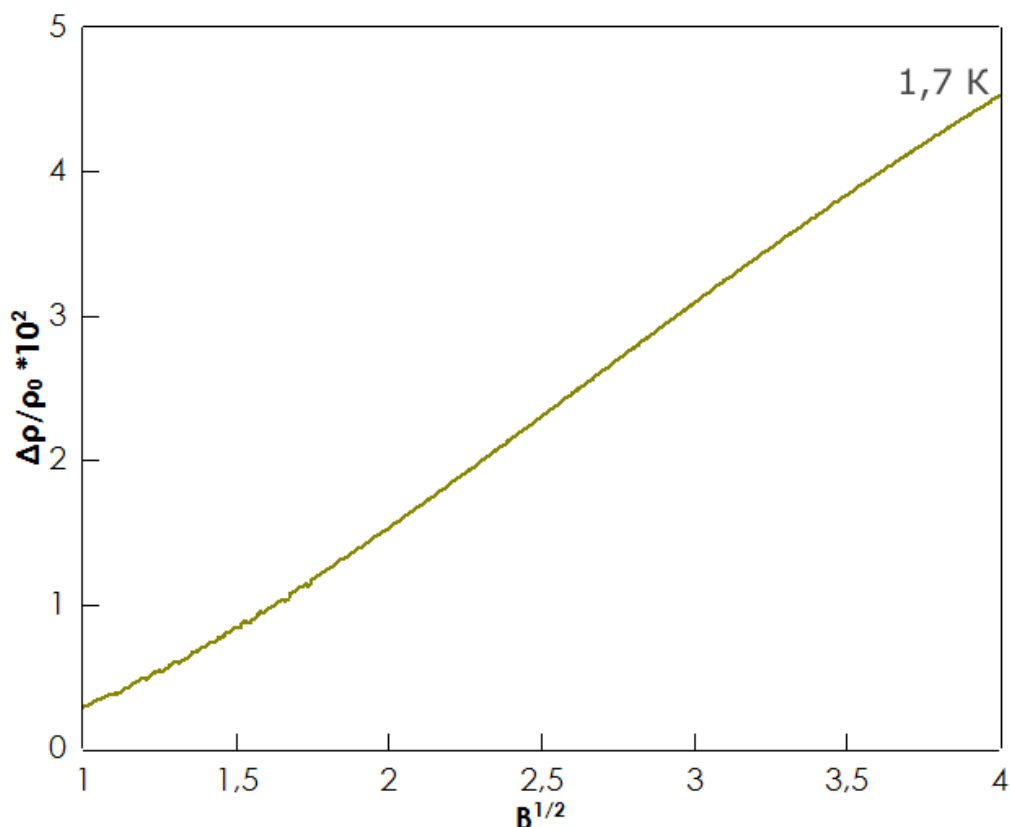


Рисунок 58: Спряmlенное в координатах $\Delta\rho/\rho_0(B^{1/2})$ магнетосопротивление квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe при температуре 1,7.

Хотя проводимость $\sigma(T)$ должна по теоретическим расчётам должна уменьшаться с ростом температуры, не происходит. О том, как и почему это происходит, данных не было до того как применили эффекты квантовой интерференции к квазикристаллам. Экспериментально данная проблема также была неразрешимой. В аморфных металлах вклад электрон-электронного взаимодействия мал и в измерениях MR не вносят вклада до температуры ниже 20 К. В икосаэдрической системе Al-Co-Cu-Fe MR является весьма ощутимым при $T > 20$ К и $d\rho/dT$ мало. Тем не менее, только с помощью эффектов квантовой интерференции можно дать превосходное описание наблюдаемых зависимостей. Для получения количественной информации о параметрах квантовых интерференционных эффектов, различные были сделаны разными методами, в том числе и вариацией

температурного диапазона для анализов и варьировании других параметров [101, 103–107]. Качественное согласие между этими результатами подтверждают, что σ уменьшается приблизительно линейно с ростом температуры выше 10K (рисунок 59 — данные настоящей работы).

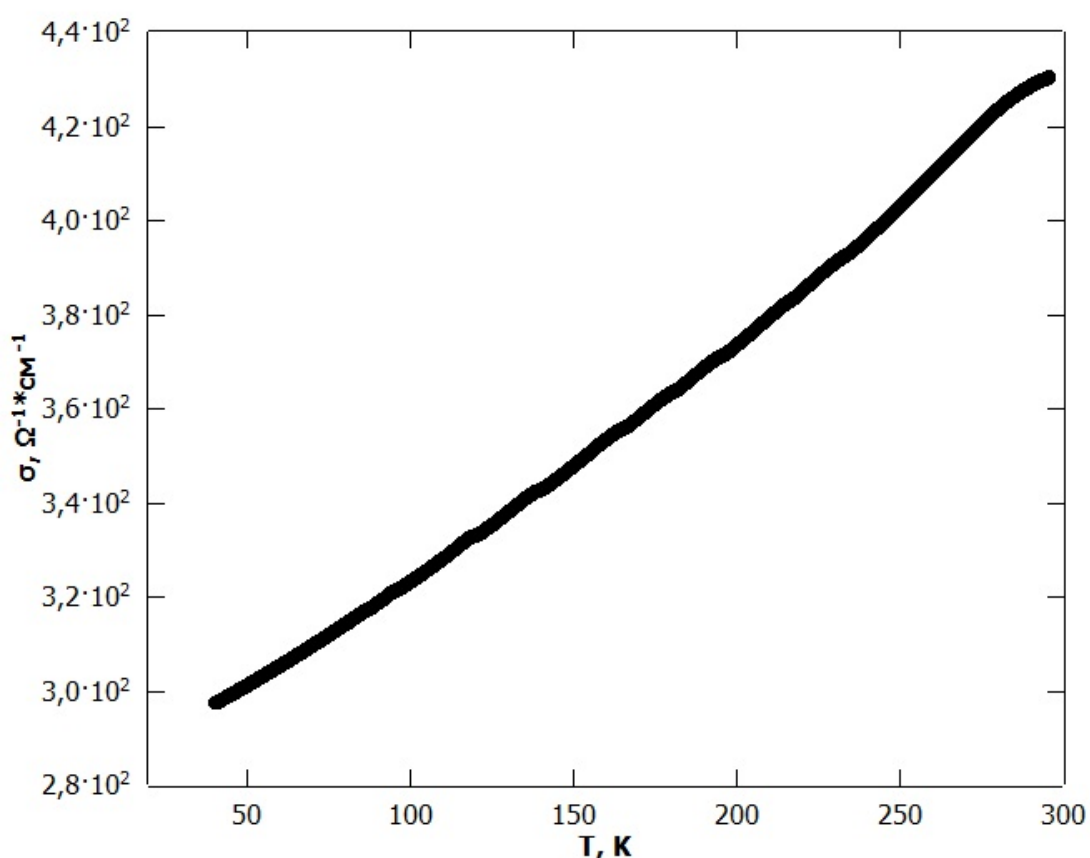


Рисунок 59: Температурная зависимость проводимости икосаэдрического квазикристалла iQ системы Al-Co-Cu-Fe.

Квантовые интерференционные эффекты четко определяют поведение икосаэдрических квазикристаллов при низких температурах, что можно объяснить тем фактом, что атомно-электронная структура данных материалов является неупорядоченной — данные эффекты хорошо характеризуют слабо неупорядоченные металлы.

Точность, полученный в описании MR квазикристаллов по теории квантовых интерференционных эффектов является беспрецедентной для трехмерных металлов.

Магнитное поведение икосаэдрических квазикристаллов при $\rho(1,7\text{ K})$ кардинальным образом отличается от MR декагональных квазикристаллов и аппроксимант.

§20. Магнетосопротивление декагональных квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe

Измерения магнетосопротивления на декагональных квазикристаллах dQ и всех аппроксимантах dA и iA проводилось при температурах 1,7; 120 и 300 K в диапазоне магнитных полей от -18 до 18 Тл. Все кривые показали симметричный ход зависимости относительно нулевого поля.

На декагональных квазикристаллах dQ и всех аппроксимантах dA и iA измерения осуществлялись по двум направлениям — вдоль направления оси роста, которое совпадает с периодическим направлением как для квазикристаллов, так и для аппроксимант ($dQ_{//}$, $dA_{//}$ и $iA_{//}$) и перпендикулярно этому направлению — для декагональных квазикристаллов оно представляет из себя аperiodическое направление ($dQ_{\perp}$), для аппроксимант периодическое ($dA_{\perp}$ и $iA_{\perp}$).

Магнетосопротивление икосаэдрической аппроксиманты системы Al–Co–Cu–Fe iA представлено на **рисунке 60**. Наблюдается увеличение магнетосопротивления при увеличении температуры, что иногда встречается в анизотропных материалах. Авторы [108] в сильных магнитных полях наблюдали минимум магнетосопротивления, а с возрастанием температуры он сдвигался в сторону более высоких магнитных полей. В работе это объясняется наличием вклада положительного магнетосопротивления.

Измерения вдоль оси роста магнетосопротивления декагональной аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe dA (рисунок 61) показывают увеличение магнетосопротивления при увеличении температуры, а в перпендикулярном направлении (вдоль оси третьего порядка), наоборот, наблюдается слабая тенденция на усиление эффекта с понижением температуры. Факт такой анизотропии MR обусловлен тем, что ось третьего порядка при изменении состава вырождается именно в квазикристаллическую симметрию, т. е. от неё следует ожидать поведения наиболее близкого к поведению икосаэдрического квазикристалла.

Магнетосопротивление декагонального квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe dQ представлено на рисунке 62, где также наблюдается увеличение магнетосопротивления при увеличении температуры

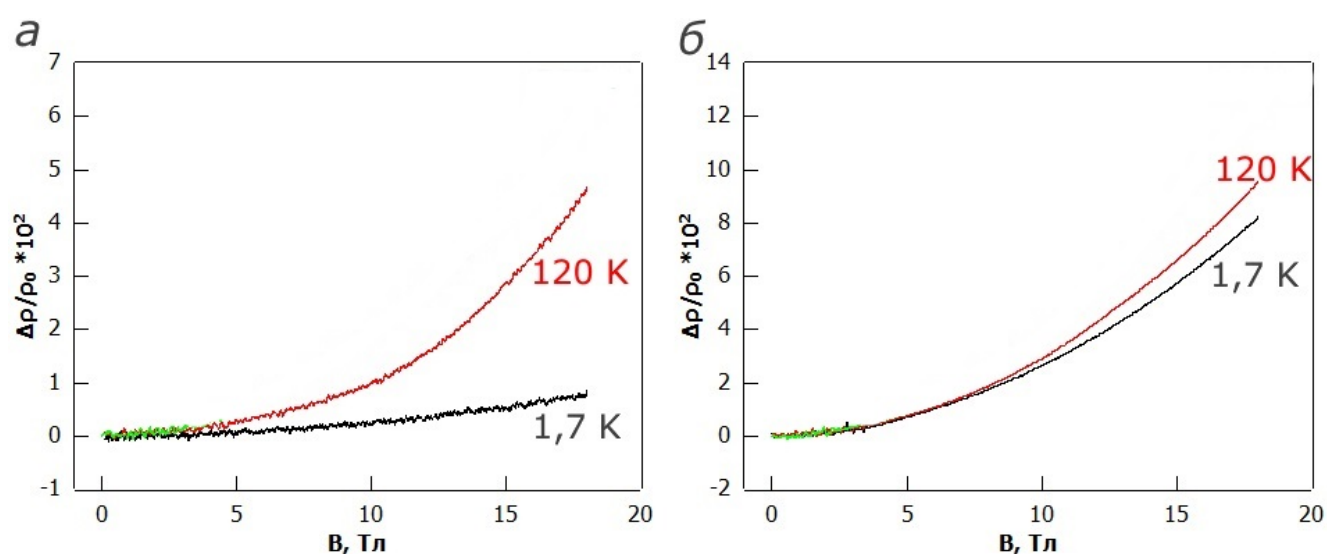


Рисунок 60: Магнетосопротивление икосаэдрической аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe iA а: $iA_{//}$, б: $iA_{\perp}$.

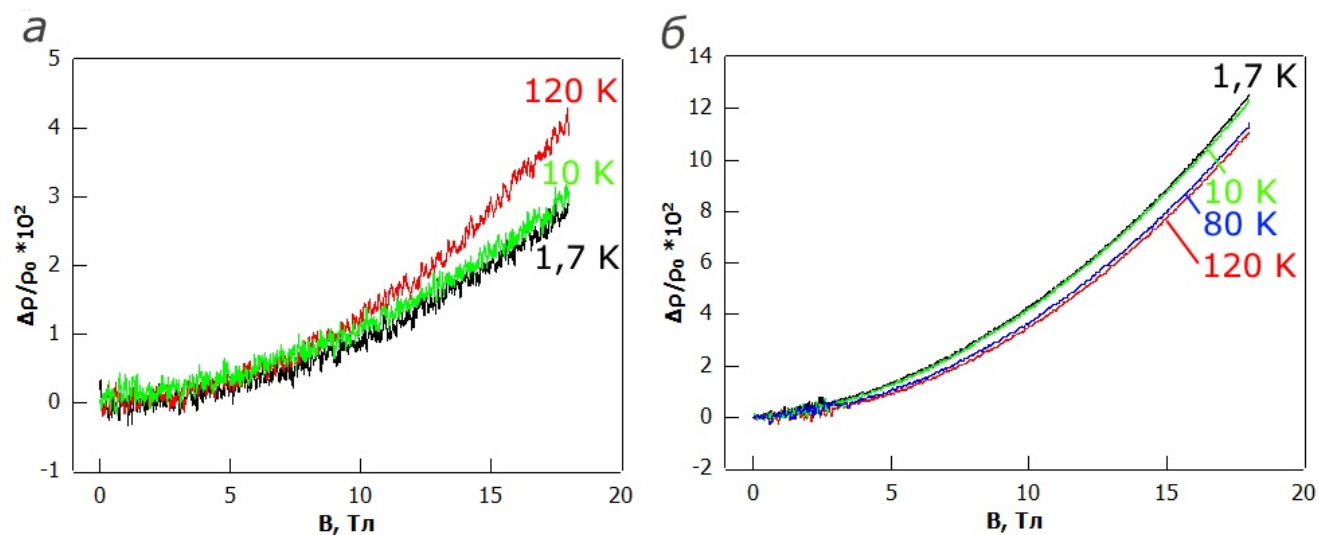


Рисунок 61: Магнетосопротивление декагональной аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe dA а: $dA_{//}$, б: $dA_{\perp}$.

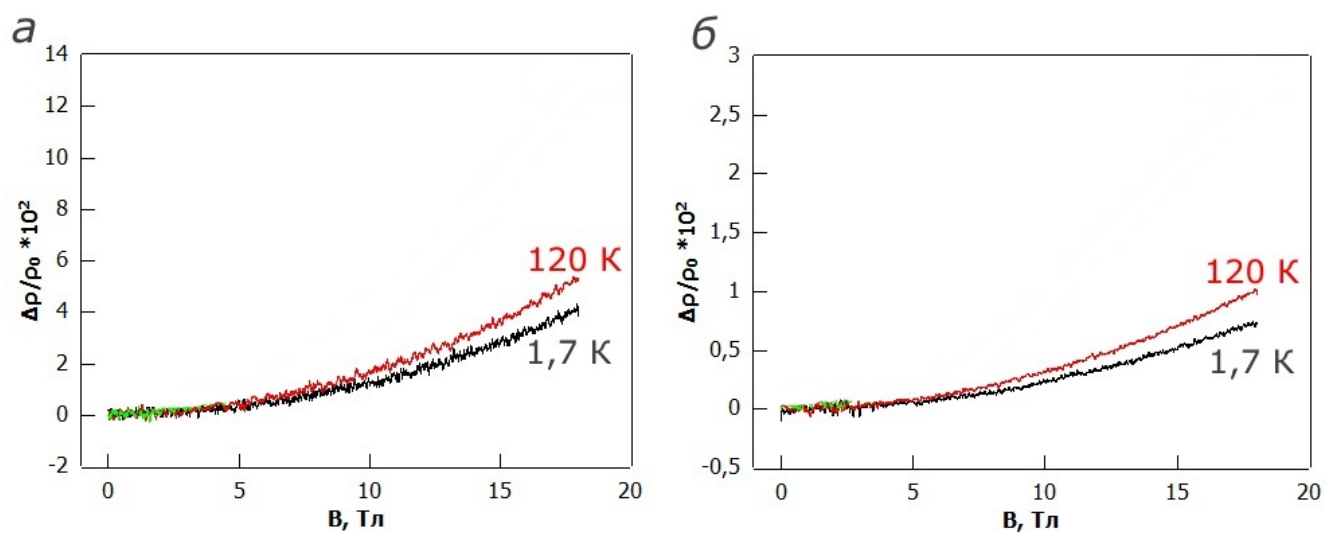


Рисунок 62: Магнетосопротивление декагонального квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe dQ а: $dQ_{//}$, б: $dQ_{\perp}$.

Заключение

Подход, используемый в данной работе предполагал всестороннее исследование квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe, так как в физике в целом и физике конденсированного состояния в частности связь между всеми характеристиками материала от качества исходных материалов и синтеза до структуры и физических свойств может оказывать принципиальное влияние на результат. Все полученные объекты четырёхкомпонентной системы Al-Co-Cu-Fe были синтезированы из материалов одной степени чистоты, использовались одни и те же методы и оборудование.

Четырёхкомпонентная квазикристаллическая фаза с икосаэдрической симметрией, а также четырёхкомпонентные икосаэдрическая и декагональная кристаллические аппроксиманты получены впервые в рамках данной работы. Всесторонний анализ полученных монокристаллов достоверно и полностью характеризует их химический и фазовый состав.

Тот факт, что обнаружена сильная анизотропия электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты в системе Al-Co-Cu-Fe соизмеримая с анизотропией электросопротивления декагональной фазы может значительно расширить интерес к исследованию квазикристаллических аппроксимант, так как до сих пор не найдена точка перехода аппроксиманты в изотропное состояние, а следовательно не объяснена его природа.

Корреляция, обнаруженная между величиной удельного электросопротивления и температурным коэффициентом электросопротивления декагональной и икосаэдрических аппроксимант и декагонального квазикристалла характерная для аморфных материалов, иллюстрирует устоявшееся мнение, что квазикристаллы есть промежуточное

состояние между кристаллами и аморфными телами.

Кардинальные различия электротранспортных свойств декагональных квазикристаллов и кристаллических аппроксимант с икосаэдрическими квазикристаллами является в целом ожидаемым результатом в силу анизотропности первых и изотропности последних. Однако столь серьёзное различие электротранспортных свойств икосаэдрических аппроксимант и икосаэдрических квазикристаллов является неожиданным результатом, свидетельствующим о необходимости более детального исследования промежуточных состояний между икосаэдрическим квазикристаллом и икосаэдрической аппроксимантой.

Магнетосопротивление декагонального квазикристалла и кристаллических аппроксимант пропорционально B^2 . В икосаэдрическом квазикристалле MR пропорционально $B^{1/2}$, что опять-таки показывает принципиальное различие между 3-d и 2-d материалами. Поведение магнетосопротивления декагональных квазикристаллов и кристаллических аппроксимант безусловно требует более досконального исследования — возможно поиска максимума при более высоких магнитных полях. Недостаточную интерпретацию результатов по магнетосопротивлению декагональных квазикристаллов и кристаллических аппроксимант следует считать недостатком данной работы.

Показано, что электротранспортные свойства квазикристаллических фаз и кристаллических аппроксимант в системе Al-Co-Cu-Fe хорошо согласуются с теорией Фабера-Займана (Faber-Ziman), успешно применяемой для аморфных материалов, с учетом квантово-интерференционных эффектов.

К недостаткам работы следует отнести недостаточное по мнению автора количество промежуточных фаз между икосаэдрической и декагональной квазикристаллической фазами, ликвидация данного упущения позволила бы получить более полную картину природы структурных превращений в системе Al-Co-Cu-Fe. Также, хоть результаты исследования магнетосопротивления декагональных квазикристаллов и кристаллических аппроксимант и представляет большой интерес, интерпретация результатов

проведена не достаточно подробно ввиду отсутствия дополнительных измерений и литературных данных по данному вопросу.



Хочу выразить огромную признательность своему научному руководителю Дмитрию Александровичу Шулятеву, который на всём протяжении выполнения работы давал бесценные советы и делился своим богатым научным опытом; сотрудникам центра коллективного пользования НИТУ «МИСиС», без которых был бы невозможен структурный анализ — Наталье Юрьевне Табачковой и Николаю Валерьевичу Андрееву; Татьяне Александровне Свиридовой за помощь в интерпретации структурных и фазовых аспектов и проведении фазового анализа; а также Алексею Суслову за оказание помощи в измерении транспортных свойств.

Выводы

1. В системе Al-Co-Cu-Fe получена новая четырехкомпонентная квазикристаллическая фаза с икосаэдрической симметрией, а также четырехкомпонентные икосаэдрическая и декагональная кристаллические аппроксиманты.
2. Показано, что при увеличении отношения Fe/Co происходит последовательное изменение структуры: декагональный квазикристалл → декагональная аппроксиманта → икосаэдрическая аппроксиманта → икосаэдрический квазикристалл.
3. В системе Al-Co-Cu-Fe обнаружена сильная анизотропия электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты соизмеримая с анизотропией электросопротивления декагональной фазы.
4. Для кристаллических аппроксимант и декагональных квазикристаллов установлена корреляция, характерная для неупорядоченных систем: уменьшение температурного коэффициента при увеличении величины удельного электросопротивления.
5. Установлено, что электротранспортные свойства декагонального квазикристалла и кристаллических аппроксимант в четырехкомпонентной системе Al-Co-Cu-Fe существенно отличаются от электротранспортных свойств икосаэдрического квазикристалла: а) температурный коэффициент сопротивления декагональных квазикристаллов и кристаллических аппроксимант положителен в диапазоне температур 1,7–300 К; температурный коэффициент сопротивления икосаэдрического квазикристалла отрицателен в указанном диапазоне температур, б) магнетосопротивление декагонального квазикристалла и кристаллических аппроксимант пропорционально B^2 . В икосаэдрическом квазикристалле магнетосопротивление пропорционально $B^{1/2}$.
6. Показано, что электротранспортные свойства квазикристаллических фаз и кристаллических аппроксимант в системе Al-Co-Cu-Fe хорошо согласуются с теорией Фабера-Займана, применяемой для аморфных материалов, с учетом квантово-интерференционных эффектов, что позволяет рассматривать электронный транспорт в квазикристаллах как совокупность баллистического и диффузионного движения носителей зарядов.

Список условных обозначений

dQ	— декагональный квазикристалл
dA	— декагональная аппроксиманта
iA	— икосаэдрическая аппроксимантв
iQ	— икосаэдрический квазикристалл
e/a	— количество электронов, приходящихся на один атом
D	— декагональная фаза
I	— икосаэдррическая фаза
ρ	— удельное электросопротивление
R	— электросопротивление
MR	— магнетосопротивление
τ	— золотое сечение
σ	— электронная проводимость
θ	— двугранный угол икосаэдра
l	— длина кристалла
d	— поперечное сечение кристалла
KTC	— температурный коэффициент сопротивления
//	— измерения вдоль оси роста кристалла
$\perp$	— измерения перпендикулярно оси роста кристалла

Список рисунков

Рисунок 1: Геометрическое представление модели одномерного квазикристалла – последовательность Фибоначчи.....	10
Рисунок 2: Паркет Пенроуза, представляющий из себя модель двумерного квазикристалла и составленный из ромбов двух типов – с углами 36° и 72°.....	11
Рисунок 3: Дифракционная картина от сплава $\text{Al}_{86}\text{Mn}_{14}$, полученная Даном Шехтманом в 1982 году и показывающая икосаэдрическое расположение атомов.....	12
Рисунок 4: Кластер Маккея, состоящий из 54 атомов.....	17
Рисунок 5: Схематическое изображение выстраивания кластеров в паркет Пенроуза.....	18
Рисунок 6: Тройная диаграмма для медленно охлаждённого в литом состоянии Al–Co–Cu сплава, показывающая фазы где формируется кристаллические аппроксиманты, декагональные аппроксиманты и декагональная фаза.....	23
Рисунок 7: Декагональная аппроксиманта с десятой осью симметрии.....	24
Рисунок 8: Рентгеновская порошковая дифракция четырех аппроксимант по сравнению с икосаэдрической фазой: I (икосаэдрическая фаза); P1 (пентагональная аппроксиманта с периодом 52,31 Å вдоль оси пятого порядка); P2 (пентагональная аппроксиманта с периодом 84,49 Å вдоль оси пятого порядка); O (орторомбическая аппроксиманта); и R (ромбоэдрическая аппроксиманта).....	25
Рисунок 9: Схематическое представление а: кристаллической решетки, и б: соответствующей аморфной решетки путем нанесения небольших случайных отклонений.....	29
Рисунок 10: Слева: удельное электрическое сопротивление декагональных квазикристаллов Al–Co–Cu для токов, протекающих параллельно периодическим (или кристаллической) оси, справа: кривые удельного электрического сопротивления для декагональных квазикристаллов Al–Co–Cu когда ток, протекает в квазипериодической плоскости.....	30
Рисунок 11: Магнетосопротивление в сплавах Al–Mn.....	32
Рисунок 12: Температурный вклад в MR квазикристаллов при температурах $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$	32
Рисунок 13: Схема получения монокристаллов с различной структурой в зависимости от соотношения Fe/Co; dQ — декагональный квазикристалл, dA — декагональная аппроксиманта, iA — икосаэдрическая аппроксиманта, iQ — икосаэдрический квазикристалл.....	34
Рисунок 14: Псевдо-двойная фазовая диаграмма системы Al–Cu–Fe в диапазоне составов икосаэдрической фазы между $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{10}$ и $\text{Al}_{58}\text{Cu}_{28}\text{Fe}_{14}$	36
Рисунок 15: Псевдо-двойная диаграмма состояния системы Al–Co–Cu в области 65% Al..	38

Рисунок 16: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al–Cu–(Fe–Co).....	39
Рисунок 17: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al–Co–Cu–Fe с нанесёнными составами, подготовленными для получения.....	41
Рисунок 18: Технологическая цепочка получения монокристаллических фаз квазикристаллов и аппроксимант: а) аналитические весы, б) агатовая ступка, в) ручной пресс, г) таблетка, полученная в результате прессования металлических порошков, д) кварцевая ампула с корундовым тиглем, е) печь «Nabertherm».....	43
Рисунок 19: Схема оригинальной установки откачки воздуха для проведения синтеза в контролируемой атмосфере; 1, 2, 3, 4 — вентили.....	43
Рисунок 20: Схема режима термообработки для получения монокристаллов системы Al–Co–Cu–Fe с различной структурой — dQ, dA, iA, iQ методом роста из расплава.....	44
Рисунок 21: Псевдо-тройная диаграмма состояния Al–Co–Cu–Fe с нанесёнными составами по данным масс-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.....	45
Рисунок 22: Оценка однородности образца iA по химическому составу.....	46
Рисунок 23: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка dQ состава $Al_{64,34}Co_{18,25}Cu_{17,34}Fe_{0,07}$	47
Рисунок 24: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре в сплаве $Al_{64,5}Cu_{18,5}Co_{17}$	47
Рисунок 25: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка dA состава $Al_{63,12}Co_{9,48}Cu_{24,73}Fe_{2,68}$	48
Рисунок 26: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка iA состава $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$	50
Рисунок 27: Спектр дифракции рентгеновских лучей измеренный при комнатной температуре от порошка iQ состава $Al_{64,36}Co_{3,05}Cu_{22,20}Fe_{10,39}$	51
Рисунок 28: Рентгенограммы квазикристаллических сплавов: а: $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$, б: $Al_{64}Cu_{22,5}Fe_{13,5}$, в: $Al_{61}Cu_{26}Fe_{13}$ и д: $Al_{62}Cu_{25,5}Fe_{12,5}$, в литом состоянии.....	52
Рисунок 29: Фото декагонального квазикристалла а: в ионном микроскопе, б: в оптическом микроскопе.....	54
Рисунок 30: Фото образца декагональной аппроксиманты в ионном микроскопе.....	54
Рисунок 31: а: фото образцов икосаэдрических аппроксимант $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$, б: сравнение угла икосаэдра с углом при вершине икосаэдрической аппроксиманты $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$	55
Рисунок 32: а: монокристаллический образец икосаэдрической фазы, б: монокристаллический образец икосаэдрической фазы.....	55
Рисунок 33: Электронная дифракция, снятая с оси десятого порядка от монокристалла системы Al–Co–Cu с декагональной симметрией.....	57
Рисунок 34: Электронная дифракция, снятая с осей второго порядка с межплоскостными расстояниями а: 2,04 Å и б: 4,09 Å от квазикристалла системы Al–Co–Cu с декагональной симметрией.....	57
Рисунок 35: Электронная дифракция от декагональной аппроксиманты системы Al–Co–Cu–Fe, а: ось 2-го порядка (вырожденная ось 10-го порядка), б: ось второго порядка.....	59

Рисунок 36: Электронная дифракция от икосаэдрической аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe, а: ось 2-го порядка, б: ось 3-го порядка.....	59
Рисунок 37: Электронная дифракция от квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe с икосаэдрической симметрией.....	60
Рисунок 38: Электронная дифракция от квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe с икосаэдрической симметрией.....	60
Рисунок 39: а: схематическое изображение сориентированного кристалла на гониометрической головке. α , β - углы поворота кристалла до ориентировки вокруг горизонтали и вертикали соответственно, 1 - графитовая подложка с плоскопараллельными гранями, 2 - клей, 3 - монокристалл; б: монокристалл, параллельно перенесённый на графитовую подложку с плоскопараллельными гранями, где 4 - границы полученного образца с гранями параллельными ориентировке, AA - плоскость ориентировки.....	63
Рисунок 40: Образец декагонального монокристалла dQ, смонтированный для измерения транспортных свойств.....	65
Рисунок 41: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагонального квазикристалла $Al_{64,34}Co_{18,25}Cu_{17,34}Fe_{0,07}$, измеренная вдоль оси роста.....	67
Рисунок 42: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагонального квазикристалла $Al_{64,34}Co_{18,25}Cu_{17,34}Fe_{0,07}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.....	67
Рисунок 43: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагональной аппроксиманты $Al_{63,12}Co_{9,48}Cu_{24,73}Fe_{2,68}$, измеренная вдоль оси роста.....	68
Рисунок 44: Температурная зависимость удельного электросопротивления декагональной аппроксиманты $Al_{63,12}Co_{9,48}Cu_{24,73}Fe_{2,68}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.....	68
Рисунок 45: Температурная зависимость удельного электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.....	69
Рисунок 46: Температурная зависимость удельного электросопротивления икосаэдрической аппроксиманты $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$, измеренная перпендикулярно к оси роста.....	69
Рисунок 47: Температурная зависимость удельного электросопротивления квазикристалла $Al_{64,36}Co_{3,05}Cu_{22,20}Fe_{10,39}$ с икосаэдрической симметрией.....	70
Рисунок 48: Анизотропия удельного электросопротивления $\rho q/\rho r$ декагонального квазикристалла dQ $Al_{64,34}Co_{18,25}Cu_{17,34}Fe_{0,07}$	71
Рисунок 49: Анизотропия удельного электросопротивления $\rho q/\rho r$ икосаэдрической аппроксиманты iA $Al_{71,06}Co_{8,28}Cu_{6,85}Fe_{13,81}$	71
Рисунок 50: Анизотропия удельного электросопротивления $\rho q/\rho r$ декагональной аппроксиманты dA $Al_{63,12}Co_{9,48}Cu_{24,73}Fe_{2,68}$	72
Рисунок 51: Нормированное сопротивление, измеренное вдоль оси роста кристаллов: dQ — квазикристалла с декагональной симметрией, dA — декагональной аппроксиманты, iA — икосаэдрической аппроксиманты.....	73
Рисунок 52: Нормированное сопротивление, измеренное в перпендикулярном направлении к оси роста кристаллов: dQ — квазикристалла с декагональной симметрией, dA — декагональной аппроксиманты, iA — икосаэдрической аппроксиманты.....	73

Рисунок 53: Температурный коэффициент сопротивления в направлении, перпендикулярном к оси роста.....	74
Рисунок 54: Температурные зависимости удельного сопротивления а: образцов, измеренных вдоль оси роста, б: образцов, измеренных перпендикулярно оси роста.....	74
Рисунок 55: MR квазикристаллов и аппроксимант системы Al-Co-Cu-Fe при температуре 1,7 К.....	76
Рисунок 56: Магнетосопротивление икосаэдрического квазикристалла системы Al-Cu-Fe при температурах 1,7; 120 и 300 К.....	78
Рисунок 57: Спрямоленное в координатах $\Delta\rho/\rho_0(B^2)$ магнетосопротивление квазикристалла системы Al-Cu-Fe при температурах 120 и 300 К.....	78
Рисунок 58: Спрямоленное в координатах $\Delta\rho/\rho_0(B^{1/2})$ магнетосопротивление квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe при температуре 1,7.....	79
Рисунок 59: Температурная зависимость проводимости икосаэдрического квазикристалла iQ системы Al-Co-Cu-Fe.....	80
Рисунок 60: Магнетосопротивление икосаэдрической аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe iA а: $iA_{//}$, б: $iA_{\perp}$	82
Рисунок 61: Магнетосопротивление декагональной аппроксиманты системы Al-Co-Cu-Fe dA а: $dA_{//}$, б: $dA_{\perp}$	83
Рисунок 62: Магнетосопротивление декагонального квазикристалла системы Al-Co-Cu-Fe dQ а: $dQ_{//}$, б: $dQ_{\perp}$	83

Список таблиц

Таблица 1: Примеры систем соединений, в которых реализуются известные квазикристаллические симметрии.....	14
Таблица 2: Элементный состав образцов квазикристаллов и аппроксимант системы Al–Co–Cu–Fe — данные атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой.....	45
Таблица 3: Химический состав образца в разных точках.....	46
Таблица 4: Анализ спектра дифракции рентгеновских лучей от порошка образца $\text{Al}_{71,06}\text{Co}_{8,28}\text{Cu}_{6,85}\text{Fe}_{13,81}$ iA.....	49
Таблица 5: Литературные данные расчёта периодов решётки для фазы, представляющей из себя икосаэдрическую аппроксиманту..	49
Таблица 6: Величины отрезков между максимумами вдоль осей второго порядка на дифракционной картине декагонального монокристалла.....	58
Таблица 7: Величины отрезков между максимумами вдоль осей третьего порядка на дифракционной картине икосаэдрического монокристалла.....	61

Список литературы

1. Shechtman D. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry / Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W. // Physical Review Letters – 1984. – Т. 53 – № 20 – С.1951–1953.
2. Dubost B. Large AlCuLi single quasicrystals with triacontahedral solidification morphology / Dubost B., Lang J.-M., Tanaka M., Sainfort P., Audier M. // Nature – 1986. – Т. 324 – № 6092 – С.48–50.
3. Bendersky L. Quasicrystal with One-Dimensional Translational Symmetry and a Tenfold Rotation Axis / Bendersky L. // Physical Review Letters – 1985. – Т. 55 – № 14 – С.1461–1463.
4. Chattopadhyay K. Electron microscopy of quasi-crystals in rapidly solidified Al-14% Mn alloys / Chattopadhyay K., Ranganathan S., Subbanna G.N., Thangaraj N. // Scripta Metallurgica – 1985. – Т. 19 – № 6 – С.767–771.
5. Vasilief I. QtiPlot: data analysis and scientific visualization / I. Vasilief.
6. IUCr Report of the Executive Committee for 1991 / IUCr // Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography – 1992. – Т. 48 – № 6 – С.922–946.
7. Berger R. The Undecidability of the Domino Problem / R. Berger – American Mathematical Soc., 1966. – 76c.
8. Penrose R. The role of aesthetics in pure and applied mathematical research / Penrose R. // The Institute of Mathematics and its Applications Bulletin – 1974. – Т. 10 – № 7/8 – С.266–271.
9. Векилов Ю.Х. Что такое квазикристаллы / Векилов Ю.Х. // Соросовский образовательный журнал – 1997. – № 1 – С.87–91.
10. Margenstern M. The domino problem of the hyperbolic plane is undecidable / Margenstern M. // Theoretical Computer Science – 2008. – Т. 407 – № 1 – С.29–84.
11. Pelantová E. Quasicrystals: algebraic, combinatorial and geometrical aspects / Pelantová E., Masáková Z. // arXiv:math-ph/0603065 – 2006.
12. Rabson D.A. The space groups of axial crystals and quasicrystals / Rabson D.A., Mermin N.D., Rokhsar D.S., Wright D.C. // Reviews of Modern Physics – 1991. – Т. 63 – № 3 – С.699–733.

13. Levitov L. Local rules for quasicrystals / Levitov L. // Sov. Phys. JETP – 1987. – Т. 66 – № 5 – С.1046–1054.
14. Huttunen-Saarivirta E. Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al–Cu–Fe alloys: a review / Huttunen-Saarivirta E. // Journal of Alloys and Compounds – 2004. – Т. 363 – № 1–2 – С.154–178.
15. Tsai A.P. Stable Icosahedral Al–Pd–Mn and Al–Pd–Re Alloys / Tsai A.P., Inoue A., Yokoyama Y., Masumoto T. // Materials Transactions, JIM – 1990. – Т. 31 – № 2 – С.98–103.
16. Lord E.A. New Geometries for New Materials / E. A. Lord, A. L. Mackay, S. Ranganathan – Cambridge University Press, 2006. – 9с.
17. Senechal M. Quasicrystals and Geometry / M. Senechal – CUP Archive, 1996. – 310с.
18. Тханг Ты Куок Л. Геометрия квазикристаллов / Тханг Ты Куок Л., Пиунихин А.С., Садов В.А. – 1993. – Т. 48 – № 1 – С.41–102.
19. Мадисон А.Е. Симметрия квазикристаллов / Мадисон А.Е. – 2013. – Т. 55 – № 4 – С.784–796.
20. Chen H.-L. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the ternary Al–Cu–Fe system / Chen H.-L., Du Y., Xu H., Xiong W. // Journal of Materials Research – 2009. – Т. 24 – № 10 – С.3154–3164.
21. Лорд Э.Э. Новая геометрия для новых материалов / Э. Э. Лорд, А. Л. Маккей, С. Ранганатан – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 264с.
22. Chen H. High-resolution electron-microscopy study and structure modeling of the stable decagonal Al–Cu–Co quasicrystal / Chen H., Burkov S.E., He Y., Poon S.J., Shiflet G.J. // Physical Review Letters – 1990. – Т. 65 – № 1 – С.72–75.
23. Li R.T. Microstructure characterization of Al–Cr–Fe quasicrystals sintered using spark plasma sintering / Li R.T., Dong Z.L., Murugan V.K., Zhang Z.L., Khor K.A. // Materials Characterization – 2015. – Т. 110 – С.264–271.
24. Gerald J.D.F. The Al–Mn decagonal phase 1. A re-evaluation of some diffraction effects 2. Relationship to crystalline phases / Gerald J.D.F., Withers R.L., Stewart A.M., Calka A. // Philosophical Magazine Part B – 1988. – Т. 58 – № 1 – С.15–33.
25. Li X.Z. Decagonal quasicrystals with different periodicities along the tenfold axis in rapidly solidified Al–Ni alloys / Li X.Z., Kuo K.H. // Philosophical Magazine Letters – 1988. – Т. 58 – № 3 – С.167–171.
26. He L.X. Decagonal quasicrystals with different periodicities along the tenfold axis in rapidly solidified Al₆₅Cu₂₀M₁₅ (M=Mn, Fe, Co or Ni) / He L.X., Wu Y.K., Kuo K.H. // Journal of Materials Science Letters – 1988. – Т. 7 – № 12 – С.1284–1286.
27. Tsai A.-P. Stable Decagonal Al–Co–Ni and Al–Co–Cu Quasicrystals / Tsai A.-P.,

- Inoue A., Masumoto T. // *Materials Transactions, JIM* – 1989. – T. 30 – № 7 – C.463–473.
28. Daulton T.L. Decagonal approximate phases in Al–Co–Cu alloys / Daulton T.L., Kelton K.F. // *Philosophical Magazine Letters* – 1991. – T. 63 – № 5 – C.257–265.
 29. Lindqvist P. Role of Fe and sign reversal of the Hall coefficient in quasicrystalline Al-Cu-Fe / Lindqvist P., Berger C., Klein T., Lanco P., Cyrot-Lackmann F., Calvayrac Y. // *Physical Review B* – 1993. – T. 48 – № 1 – C.630–633.
 30. Gignoux C. Indications for a metal-insulator transition in quasicrystalline i-AlPdRe / Gignoux C., Berger C., Fourcaudot G., Grieco J.C., Rakoto H. // *EPL (Europhysics Letters)* – 1997. – T. 39 – № 2 – C.171.
 31. Homes C.C. Optical conductivity of the stable icosahedral quasicrystal Al_{63.5}Cu_{24.5}Fe₁₂ / Homes C.C., Timusk T., Wu X., Altounian Z., Sahnoune A., Ström-Olsen J.O. // *Physical review letters* – 1991. – T. 67 – № 19 – C.2694.
 32. Basov D.N. Anisotropic optical conductivity of decagonal quasicrystals / Basov D.N., Timusk T., Barakat F., Greedan J., Grushko B. // *Physical Review Letters* – 1994. – T. 72 – № 12 – C.1937–1940.
 33. Chernikov M.A. Elastic Moduli of a Single Quasicrystal of Decagonal Al–Ni–Co: Evidence for Transverse Elastic Isotropy / Chernikov M.A., Ott H.R., Bianchi A., Migliori A., Darling T.W. // *Physical Review Letters* – 1998. – T. 80 – № 2 – C.321–324.
 34. Lei Y. Structure and morphology of [icosahedral Al₆₂Cu_{25.5}Fe_{12.5}]_{100–x}[decagonal Al₇₀Co₁₅Ni₁₅]_x alloys, for x=10*(0~3 and 5~10) / Lei Y., Calvo-Dahlborg M., Dubois J.M., Hei Z., Weisbecker P., Dong C. // *Journal of Non-Crystalline Solids* – 2003. – T. 330 – № 1–3 – C.39–49.
 35. Schaefer R.J. Replacement of icosahedral Al-Mn by decagonal phase / Schaefer R.J., Bendersky L. // *Scripta Metallurgica* – 1986. – T. 20 – № 5 – C.745–750.
 36. Hiraga K. Formation of Decagonal Quasicrystal in the Al-Pd-Mn System and Its Structure / Hiraga K., Sun W., Lincoln F.J., Kaneko M., Matsuo Y. // *Japanese Journal of Applied Physics* – 1991. – T. 30 – № 9R – C.2028.
 37. Ramani A.S. Proceedings: Forty-Ninth Annual Meeting Electron Microscopy Society of America: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.abebooks.com/Proceedings-Forty-Ninth-Annual-Meeting-Electron-Microscopy/536991469/bd> (дата обращения: 04.12.2016).
 38. Launois P. Decagonal Phases: Non-Quasi-Crystalline Microcrystalline State in an Al-Cu-Co-Si Alloy / Launois P., Audier M., Dénoyer F., Dong C., Dubois J.M., Lambert M. // *EPL (Europhysics Letters)* – 1990. – T. 13 – № 7 – C.629.

39. Daulton T.L. Decagonal and decagonal approximant formation as a function of composition in ternary Al-Co-Cu alloys / Daulton T.L., Kelton K.F., Song S., Ryba E.R. // Philosophical Magazine Letters – 1992. – T. 65 – № 1 – C.55–65.
40. Quiquandon M. Quasicrystal and approximant structures in the Al - Cu - Fe system / Quiquandon M., Quivy A., Devaud J., Faudot F., Lefebvre S., Bessière M., Calvayrac Y. // Journal of Physics: Condensed Matter – 1996. – T. 8 – № 15 – C.2487.
41. Joo S.-H. Enhanced wear resistivity of a Zr-based bulk metallic glass processed by high-pressure torsion under reciprocating dry conditions / Joo S.-H., Pi D.-H., Guo J., Kato H., Lee S., Kim H.S. // Metals and Materials International – 2016. – T. 22 – № 3 – C.383–390.
42. Tsai A.-P. A Stable Quasicrystal in Al-Cu-Fe System / Tsai A.-P., Inoue A., Masumoto T. // Japanese Journal of Applied Physics – 1987. – T. 26 – № Part 2, No. 9 – C.L1505–L1507.
43. Dong C. Phase transformations and structure characteristics of the Al₆₅Cu_{17.5}Co_{17.5} decagonal phase / Dong C., Dubois J.M., Boissieu M.D., Janot C. // Journal of Physics: Condensed Matter – 1991. – T. 3 – № 11 – C.1665.
44. Raghavan V. Al-Co-Cu (Aluminum-Cobalt-Copper) / Raghavan V. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion – 2008. – T. 29 – № 3 – C.267–269.
45. Daulton T.L. The decagonal phase in (Al, Si)₆₅Co₂₀Cu₁₅ alloys / Daulton T.L., Kelton K.F. // Philosophical Magazine Part B – 1992. – T. 66 – № 1 – C.37–61.
46. Meisterernst G. Understanding Czochralski growth of decagonal AlCoCu / Meisterernst G., Zhang† L., Dreier P., Gille P. // Philosophical Magazine – 2006. – T. 86 – № 3–5 – C.323–328.
47. Zhang L.M. Solidification study of Al-Co-Cu alloys using the Bridgman method / Zhang L.M., Gille P. // Journal of Alloys and Compounds – 2004. – T. 370 – № 1–2 – C.198–205.
48. Bogdanowicz W. Two-subgrain single quasicrystals Al-Cu-Co alloy growth and characterisation / Bogdanowicz W. // Journal of Crystal Growth – 2002. – T. 240 – C.255–266.
49. Черников М.А. Квазикристаллы / Черников М.А., Векилов Ю.Х. // Успехи физических наук – 2010. – Т. 180 – № 6 – C.561–586.
50. Klein T. Proximity of a metal-insulator transition in icosahedral phases of high structural quality / Klein T., Berger C., Mayou D., Cyrot-Lackmann F. // Physical Review Letters – 1991. – T. 66 – № 22 – C.2907–2910.
51. Pierce F.S. Enhanced Insulatorlike Electron Transport Behavior of Thermally Tuned Quasicrystalline States of Al-Pd-Re Alloys / Pierce F.S., Guo Q., Poon S.J. // ResearchGate – 1994. – T. 73 – № 16 – C.2220–2223.

52. Klein T. Anomalous Transport Properties in Pure AlCuFe Icosahedral Phases of High Structural Quality / Klein T., Gozlan A., Berger C., Cyrot-Lackmann F., Calvayrac Y., Quivy A. // EPL (Europhysics Letters) – 1990. – Т. 13 – № 2 – С.129.
53. Singh K. Electron transport in Al₆₅Cu₂₀Co₁₅–xFe quasicrystals / Singh K., Bahadur D., Radha S., Nigam A.K., Prasad S. // Journal of Alloys and Compounds – 1997. – Т. 257 – № 1–2 – С.57–61.
54. Векилов Ю.Х. Электронная проводимость икосаэдрических квазикристаллов / Векилов Ю.Х. // Успехи физических наук – 2002. – Т. 172 – № 2 – С.233–234.
55. Cywinski R. Amorphous Intermetallic Alloys: Resistivity / под ред. R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan, P. Veyssi re. Oxford: Elsevier, 2001. – 160–166с.
56. Ziman J.M. Principles of the Theory of Solids [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cambridge.org/catalogue/catalogue.asp?isbn=9780521297332> (дата обращения: 27.11.2016).
57. Elliott S.R. Physics of amorphous materials [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zvab.com/Physics-amorphous-materials-Elliott-S-R/15977905253/buch> (дата обращения: 28.11.2016).
58. Mooij J.H. Electrical conduction in concentrated disordered transition metal alloys / Mooij J.H. // ResearchGate – 1973. – Т. 17 – № 2 – С.521–530.
59. Шулятев Д.А. Анизотропия электротранспортных свойств декагональных квазикристаллов Al-Cu-Co(Fe) / Шулятев Д.А., Ключева М.В., Девараджан У. // Физика Металлов и Металловедение – 2016. – Т. 117 – № 9.
60. Ribeiro R.A. Growth and physical properties of the decagonal Al-Cu-Co quasicrystal grown from the ternary melt / Ribeiro R.A., Bud'co S.L., Laabs F.S., Kramer M.. J., Canfield P.C. // Philosophical Magazine – 2004. – Т. 84 – № 12 – С.1291–1302.
61. Machado F.L.A. Low-temperature resistivity and magnetoresistance of the quasicrystalline icosahedral Al₈Mn₂₀ and decagonal Al₇₈Mn₂₂ alloys / Machado F.L.A., Kang W.W., Canfield P.C., Clark W.G., Giessen B.C., Quan M.X. // Physical Review B – 1988. – Т. 38 – № 12 – С.8088–8092.
62. Dian-lin Z. Hall effect in a single two-dimensional quasicrystal: Al₆₂Si₃Cu₂₀Co₁₅ / Dian-lin Z., Li L., Xue-mei W., Shu-yuan L., He L.X., Kuo K.H. // Physical Review B – 1990. – Т. 41 – № 12 – С.8557–8559.
63. Yun-ping W. Universality in the resistivity-temperature relationship for decagonal quasicrystals / Yun-ping W., Dian-lin Z. // Physical Review B – 1994. – Т. 49 – № 18 – С.13204–13207.
64. Wong K.M. Transport and superconducting properties of the Mg₃₂(Al,Zn)₄₉-type quasicrystalline and crystalline phases / Wong K.M., Lopdrup E., Wagner J.L., Shen Y., Poon S.J. // Physical Review B – 1987. – Т. 35 – № 5 –

C.2494–2497.

65. Baxter D.V. Electrical resistivity of icosahedral Mg-Al-Zn alloys / Baxter D.V., Richter R., Strom-Olsen J.O. // *Physical Review B* – 1987. – T. 35 – № 10 – C.4819–4822.
66. Klein T. Strong electron-electron interaction effects in highly resistive Al-Cu-Fe icosahedral phases / Klein T., Rakoto H., Berger C., Fourcaudot G., Cyrot-Lackmann F. // *Physical Review B* – 1992. – T. 45 – № 5 – C.2046–2049.
67. Sahnouné null Quantum corrections to the conductivity in icosahedral Al-Cu-Fe alloys / Sahnouné null, Ström-Olsen null, Zaluska null // *Physical Review. B, Condensed Matter* – 1992. – T. 46 – № 17 – C.10629–10635.
68. Ahlgren M. Transition from weak to strong electronic localization in icosahedral AlPdRe / Ahlgren M., Rodmar M., Gignoux C., Berger C., Rapp Ö. // *Materials Science and Engineering: A* – 1997. – T. 226 – C.981–985.
69. Rapp Ö. Electronic transport properties of quasicrystals: the unique case of the magnetoresistance / Rapp Ö. // *Materials Science and Engineering: A* – 2000. – T. 294–296 – C.458–463.
70. Faudot F. About the Al-Cu-Fe icosahedral phase formation / Faudot F., Quivy A., Calvayrac Y., Gratias D., Harmelin M. // *Materials Science and Engineering: A* – 1991. – T. 133 – C.383–387.
71. Tsai A.-P. A Stable Decagonal Quasicrystal in the Al-Cu-Co System / Tsai A.-P., Inoue A., Masumoto T. // *Materials Transactions, JIM* – 1989. – T. 30 – № 4 – C.300–304.
72. Canfield P.C. High-temperature solution growth of intermetallic single crystals and quasicrystals / Canfield P.C., Fisher I.R. // *Journal of Crystal Growth* – 2001. – T. 225 – C.155–161.
73. Fisher I.R. On the growth of decagonal Al-Ni-Co quasicrystals from the ternary melt / Fisher I.R., Kramer M.J., Islam Z., Ross A.R., Kracher A., Wiener T., Sailer M.J., Goldman A.I., Canfield P.C. // *Philosophical Magazine Part B* – 1999. – T. 79 – № 3 – C.425–434.
74. Bianchi A.D. Low-temperature thermal and optical properties of single-grained decagonal Al-Ni-Co quasicrystals / Bianchi A.D., Bommeli F., Felder E., Kenzelmann M., Chernikov M.A., Degiorgi L., Ott H.R., Edagawa K. // *Physical Review B* – 1998. – T. 58 – № 6 – C.3046–3056.
75. Grushko B. Solidification of Al₆₅Cu₂₀Co₁₅ and Al₆₅Cu₁₅Co₂₀ alloys / Grushko B., Urban K. // *Journal of Materials Research* – 1991. – T. 6 – № 12 – C.2629–2636.
76. Grushko B. Phase Equilibrium and Transformation of Stable Quasicrystals — Decagonal Al-Cu-Co Phase / Grushko B. // *Materials Transactions, JIM* – 1993. – T. 34 – № 2 – C.116–121.
77. Grushko B. A study of the Al-Cu-Co phase diagram and the solidification of

- alloys containing decagonal phase / Grushko B. // Phase Transitions – 1993. – T. 44 – № 1–3 – C.99–110.
78. Grushko B. A study of the high-Cu Al–Cu–Co decagonal phase / Grushko B. // Journal of Materials Research – 1993. – T. 8 – № 7 – C.1473–1476.
 79. Grushko B. Structural variations and transformation behavior of the Al₆₈Cu₁₁Co₂₁ decagonal phase / Grushko B., Wittmann R., Urban K. // Journal of Materials Research – 1994. – T. 9 – № 11 – C.2899–2906.
 80. Kuo K.H. Stable Al–Cu–Co decagonal quasicrystals / Kuo K.H., Zhang Z. // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials – 1997. – T. 34 – № 1 – C.191–206.
 81. Murthy G.V.S. Microhardness and Fracture Toughness Studies of Decagonal Quasicrystal in Al–Cu–Co System / Murthy G.V.S., Ray A.K., Minz R.K., Mukhopadhyay N.K. // ResearchGate – 1999. – T. 18 – № 3 – C.255–258.
 82. Liu X.B. Decagonal quasicrystal formed directly from the rapidly solidified Al₆₆Cu₁₇Co₁₇ alloy / Liu X.B., Yang G.C., Fan J.F., Song G.S. // Journal of Materials Science Letters – 2003. – T. 22 – № 2 – C.103–105.
 83. Kazennov N.V. Phase Equilibria for the Aluminum-Rich Region of the Al–Cu–Co System at 883 K / Kazennov N.V., Kalmykov K.B., Dunaev S.F., Zaitsev A.I. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion – 2011. – T. 32 – № 4 – C.320–328.
 84. Yokoyama Y. Preparation of a Decagonal Al–Cu–Co Single Quasicrystal by the Czochralski Method / Yokoyama Y., Note R., Yamaguchi A., Inoue A., Fukaura K., Sunada H. // Materials Transactions, JIM – 1999. – T. 40 – № 2 – C.123–131.
 85. Guo J. Production of Single Decagonal Quasicrystal in Al–Co–Cu System / Guo J., Abe E., J. Sato T., Tsai A.-P. // Japanese Journal of Applied Physics – 1999. – T. 38 – № 9A – C.L1049.
 86. Fisher I.R. Growth of large single-grain quasicrystals from high-temperature metallic solutions / Fisher I.R., Kramer M.J., Islam Z., Wiener T.A., Kracher A., Ross A.R., Lograsso T.A., Goldman A.I., Canfield P.C. // Materials Science and Engineering – 2000. – T. 294–296 – C.10–16.
 87. Schroers J. Growth kinetics of quasicrystalline and polytetrahedral phases of Al–Pd–Mn, Al–Co, and Al–Fe from the undercooled melt / Schroers J., Holland-Moritz D., Herlach D.M., Urban K. // Physical Review B – 2000. – T. 61 – № 21 – C.14500–14506.
 88. Edagawa K. High-temperature specific heat of quasicrystals and a crystal approximant / Edagawa K., Kajiyama K., Tamura R., Takeuchi S. // Materials Science and Engineering: A – 2001. – T. 312 – № 1–2 – C.293–298.
 89. Black P.J. The structure of FeAl₃. I / Black P.J. // Acta Crystallographica – 1955. – T. 8 – № 1 – C.43–48.

90. Trebin H.-R. Quasicrystals structure and Physical Properties / H.-R. Trebin – Strauss Offsetdruck GmbH, Mörlenbach, 2003.
91. Suárez M.A. Effect of chemical composition on the microstructure and hardness of Al–Cu–Fe alloy / Suárez M.A., Esquivel R., Alcántara J., Dorantes H., Chávez J.F. // Materials Characterization – 2011. – T. 62 – № 9 – C.917–923.
92. Elser V. Indexing problems in quasicrystal diffraction / Elser V. // Physical Review B – 1985. – T. 32 – № 8 – C.4892–4898.
93. Bah T. Inkscape: Guide to a Vector Drawing Program, 4th Edition / T. Bah – Prentice Hall., 2011. Вып. 4th – 504с.
94. Spoor P.S. Elastic Isotropy and Anisotropy in Quasicrystalline and Cubic AlCuLi / Spoor P.S., Maynard J.D., Kortan A.R. // Physical Review Letters – 1995. – T. 75 – № 19 – C.3462–3465.
95. Dolinšek, J. Anisotropic magnetic and transport properties of orthorhombic Al₁₃Co₄ / Dolinšek, J., Komelj, M., Jeglič, P., Vrtnik, S., Stanić D., Popčević P. // PHYSICAL REVIEW B – 2009. – T. 79 – C.184201-1-184201-12.
96. Сиротин Ю.И. Основы кристаллофизики / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская – Наука, 1975.– 682с.
97. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. – 1982.
98. Guo null Weak localization in an anisotropic crystal: Decagonal quasicrystal Al₆₅Cu₁₅Co₂₀ / Guo null, Poon null // Physical Review. B, Condensed Matter – 1996. – T. 54 – № 9 – C.6046–6049.
99. He L.X. Stable Al–Cu–Co decagonal quasicrystals with decaprismatic solidification morphology / He L.X., Wu Y.K., Meng X.M., Kuo K.H. // Philosophical Magazine Letters – 1990. – T. 61 – № 1 – C.15–19.
100. Chen L.F. Phd thesis, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences , 1992.
101. Ahlgren M. Quantum corrections to transport properties of icosahedral Al–Cu–Fe in extended regimes / Ahlgren M., Lindqvist P., Rodmar M., Rapp Ö. // Physical Review B – 1997. – T. 55 – № 22 – C.14847–14854.
102. Rapp Ö. Electronic transport properties of quasicrystals: the unique case of the magnetoresistance / Rapp Ö. // Materials Science and Engineering: A – 2000. – T. 294–296 – C.458–463.
103. Matsuo S. Magnetic and electrical properties of the single-grained Al–Cu–Fe icosahedral phase / Matsuo S., Ishimasa T., Mori M., Nakano H. // Journal of Physics: Condensed Matter – 1992. – T. 4 – № 49 – C.10053.
104. The Electrical Properties of Disordered Metals// Cambridge University Press [Электронный ресурс]. URL:

<http://www.cambridge.org/jp/academic/subjects/engineering/materials-science/electrical-properties-disordered-metals?format=AR> (дата обращения: 04.12.2016).

105. Fournée V. Electronic structure of quasicrystals deduced from Auger and x-ray photoelectron spectroscopies / Fournée V., Anderegg J.W., Ross A.R., Lograsso T.A., Thiel P.A. // Journal of Physics: Condensed Matter – 2002. – Т. 14 – № 10 – C.2691.
106. Morgan G.J. A generalised kinetic equation for electrons in disordered solids / Morgan G.J., Howson M.A., Saub K. // Journal of Physics F: Metal Physics – 1985. – Т. 15 – № 10 – C.2157.
107. Stadnik Z.M. Physical Properties of Quasicrystals / Z. M. Stadnik – Springer Science & Business Media, 2012.– 450с.
108. Reuss F. Magnetoresistance in epitaxially grown degenerate ZnO thin films / Reuss F., Frank S., Kirchner C., Kling R., Gruber T., Waag A. // Applied Physics Letters – 2005. – Т. 87 – № 11 – C.112104.