

УДК 538.93

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$

С.С.РАГИМОВ<sup>1,2</sup>, Ш.С.АБДУЛЛАЕВА<sup>3</sup>, А.Э.БАБАЕВА<sup>2</sup>

*Институт Физических Проблем Бакинского Государственного Университета<sup>1</sup>*

*AZ 1148, Азербайджан, г. Баку, ул. З.Халилова, 23*

*Министерство Науки и Образования, Институт Физики<sup>2</sup>*

*AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 131*

*Министерство Науки и Образования, Институт катализа и неорганической химии*

*AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г.Джавида, 113*

*sadiyar.raqimov@bsu.edu.az; sadiyar@mail.ru*

Получена: 07.01.2024

Принята к печати: 02.03.2024

### РЕФЕРАТ

Проведено исследования температурной зависимости электропроводности и эффекта Холла твердого раствора  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ . Эксперименты проведены в температурном интервале 200-400К. На основе экспериментальных данных определены концентрация носителей заряда, оценена энергия активации электронов  $E_a=0,026$  эВ. Проведены также рентгеноструктурный анализ исследованного состава, определены параметры решетки и тип пространственной группы.

Ключевые слова: электропроводность, коэффициент Холла, энергия активации.

### ВВЕДЕНИЕ

Легирование полупроводниковых соединений магнитными примесями может привести к появлению ферромагнетизма при комнатной температуре. Интерес к таким соединениям обусловлен тем, что они обладают одновременно зарядовыми и спиновыми свойствами. Эти свойства можно использовать в спинтронных приборах.

Изучению магнитных полупроводников типа  $\text{M}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_4$  (М - Mn, Fe) уделяется особое внимание. Одним из перспективным материалом этого типа является  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ . Это соединение кристаллизуются в кубической структуре и являются перспективным материалом для создания различных функциональных устройств, управляемых магнитным полем [1-4].

С другой стороны,  $\text{CuIn}_2\text{S}_4$  является перспективным оптическим полупроводниковым материалом для создания ряда новых оптоэлектронных приборов. Получение твердых растворов на основе этих материалов, исследо-

вание их транспортных и магнитных свойств представляет особый интерес [3,5-7].

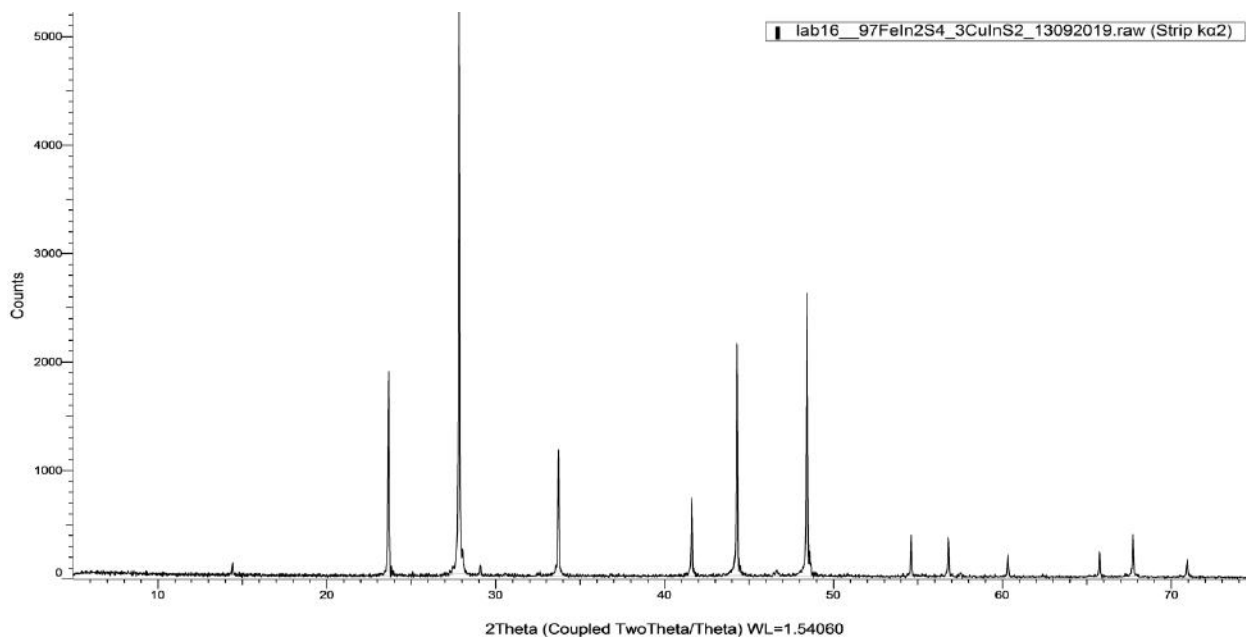
В данной работе представлены результаты исследования электропроводности и эффекта Холла твердого раствора  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ . На основе экспериментальных данных оценена энергия активации носителей заряда.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проведены в температурном интервале 200-400К. Структуру и параметры элементарной ячейки исследованного кристалла устанавливали рентгеновским методом. Рентгеноструктурный анализ был проведен на автоматическом дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Германия) с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения и Ni-фильтра. Для управления устройством и анализа полученной информации использовали программный пакет "DiffraC suite".

На Рис.1 представлена рентгенограмма исследованного образца  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ . Наличие резких пиков дифракции в исследованных образцах указывает на их поликристаллический характер. Обнаружено, что дифракционные максимумы исследованного образца, в основном, соответствуют  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  [2].

На основе рентгеноструктурного анализа были определены пространственная группа (кубическая  $Fd\bar{3}m$ ) и параметр элементарной ячейки ( $a=10.52\text{\AA}$ ) твердого раствора  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ . Установлено, что исследованный состав кристаллизуются в кубической структуре шпинели.



**Рис.1**

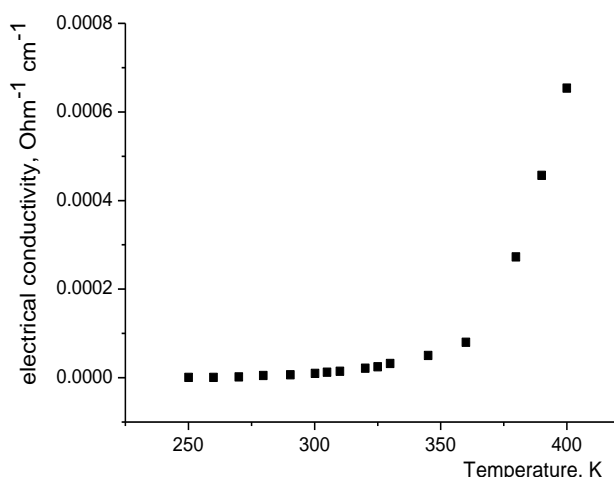
Дифрактограмма  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ .

На Рис.2 и Рис.3 приводятся результаты исследования электропроводности и коэффициента Холла  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$  в температурном интервале 200-400К. Исследование электропроводности и коэффициента Холла проводилось на автоматизированной и с программным компьютерным обеспечением установке HL5500PC Hall Effect Measurement System. Эксперименты проводились методом Вандер Пау, на постоянном токе и при магнитном поле 0,5Тл. Измерения температурной зависимости электропроводности показало, что исследованный образец при температурах (порядка 200К) имеет высокое удельное сопротивление порядка  $3 \cdot 10^6 \text{ Ом.см}$ . Это указывает на то, что данный образец имеет достаточно большую ширину запрещенной зоны. Действительно, согласно [4,6] величина ширины

запрещенной зоны  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  порядка 1,38эВ и увеличивается с понижением температуры.

При образовании твердого раствора на основе тройных соединений  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)$  и  $(\text{CuIn}_2\text{S}_4)$  общая электропроводность должно снижаться. Это обусловлено тем, что при размещении в пространственной решетке растворителя «чужих» атомов растворенного вещества электрическое поле решетки растворителя искажается, и рассеяние электронов увеличивается. Сформулированное правило об изменении избыточного электросопротивления твердого раствора с концентрацией примесей справедливо для всех идеально неупорядоченных твердых растворов, то есть растворов, в которых ионы примеси распределены по узлам решетки растворителя строго статистически [2]. Это является общим правилом даже в том случае, когда в металле с низкой электропро-

водимостью растворяется металл с высокой электропроводимостью [8]. Поэтому увеличение удельного сопротивления исследованного твердого раствора  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$  по сравнению с  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)$  разумно и этим будет обусловлено изменение ширины запрещенной зоны.



**Рис.2**

Температурная зависимость электропроводности  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ .

Как видно из Рис.2, величина электропроводности в интервале температур 200-350K меняется медленно с температурой. Однако, начиная с 350K наблюдается достаточно сильный рост значения электропроводности. Из температурной зависимости электропроводности была определена энергия активации носителей.

Температурная зависимость проводимости полупроводников определяются в виде [9]

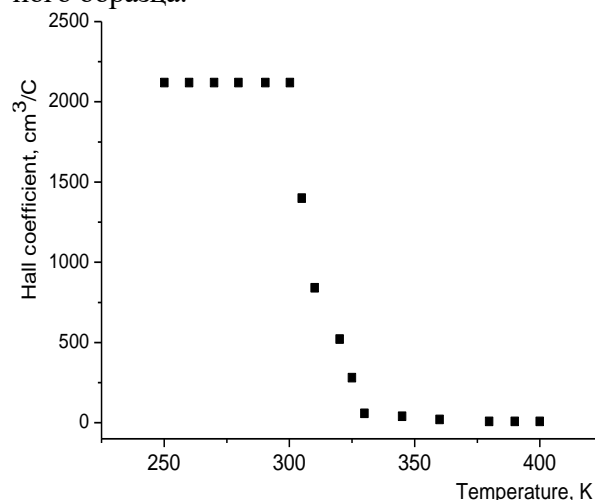
$$\sigma = \sigma_n e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}. \quad (1)$$

Соотношение для энергии активации можно получить, измеряя значение электропроводности при двух температурах и логарифмируя их отношение в виде

$$\Delta E = \frac{2k_B \ln \sigma_1 / \sigma_2}{T_1 - T_2} \cdot T_1 \cdot T_2. \quad (2)$$

Согласно экспериментальным данным, по электропроводности была определена энергия активации  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ ,  $E_a = 0,026$  эВ. Это значение не может быть принято за ширину запрещенной зоны  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ , так как ширина запрещенной зоны основного компонента  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  порядка 1,38эВ [4, 6].

На Рис.3 представлена температурная зависимость коэффициента Холла исследованного образца.



**Рис.3**

Температурная зависимость коэффициента Холла  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0,97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0,03}$ .

На температурной зависимости наблюдается резкое уменьшение значения коэффициента Холла в области 300-330K. В области 200-300K и выше 330K значение постоянного коэффициента Холла практически остается постоянным и указывает на *n*-тип проводимости. Такой ход зависимости указывает на то, что в указанных областях температур концентрация носителей заряда остается постоянной. Однако, в области 300-330K концентрация носителей заряда увеличивается в три десятка раз (от  $3,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  до  $1,35 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), что и сказывается на температурной зависимости электропроводности. Рост температурной зависимости электропроводности с повышением температуры выше комнатной свидетельствует о наличии донорных уровней. С ростом температуры электроны перебрасываются в зоны проводимости и участвуют в проводимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рентгеноструктурного анализа определены тип пространственной группы ( $Fd3m$ ) и параметр решетки ( $a=10.52\text{\AA}$ ) твердого раствора  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0.03}$ . Показано,

что резкое увеличение концентрации носителей заряда в области 300-350K обусловлено наличием донорных уровней. Определены концентрация носителей заряда, оценена энергия активации электронов  $E_a=0.026\text{ эВ}$ .

1. И.В.Боднар, С.А.Павлюковец, В.Ю.Рудь, Ю.В.Рудь. *Выращивание монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  и создание фоточувствительных структур на их основе*, ФТП, **43** (2009) 1553-1556.
2. Г.А.Пухир, Т.Г.Баругу, И.В.Боднар. *Экранирующие свойства твердых растворов  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$  в СВЧ-диапазоне*, Доклады БГУИР, **106** (2017) 77-82.
3. Т.Г.Баругу. *Тепловое расширение монокристаллов  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.5}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0.5}$* , Доклады БГУИР, **114** (2018) 18-22.
4. И.В.Боднар, С.А.Павлюковец. *Температурная зависимость ширины запрещенной зоны монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$* , ФТП, **45** (2011) 1450-1453.
5. A.Usujima, S.Takeuchi, S.Endo, T.Irie. *Optical and electrical properties of  $\text{CuIn}_5\text{S}_8$  and  $\text{AgIn}_5\text{S}_8$  single crystals*, Jap. J. Appl.Phys. **20** (1981) L505-L507.
6. И.В.Боднар, Т.Г.Баругу, Ю.В.Касюк, Ю.А.Федотова. *Твердые растворы  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$  кристаллическая структура, ядерные гамма-резонансные спектры и ширина запрещенной зоны*, ФТП, **51** (2017) 1434-1438.
7. Ш.С.Абдуллаева, Ф.М.Мамедов, И.Б.Бахтиярлы. *Квазибинарный разрез  $\text{CuInS}_2\text{-FeIn}_2\text{S}_4$* , Журнал Неорганической Химии, **64** (2019) 1-6.
8. В.И.Иверонова, А.А.Кацнельсон. *Ближний порядок в твердых растворах*, Наука, Москва, (1977) 255.
9. Б.М.Аскеров, *Кинетические эффекты в полупроводниках*, Наука, Ленинград, (1970) 303.

## $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0.03}$ -ün ELEKTROFİZİKİ XASSƏLƏRİ

S.S.RƏHİMOV, Ş.S.ABDULLAYEVA, A.E.BABAYEVA

$(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0.03}$  bərk məhlulunun elektrikkeçiriciliyinin və Hall effektinin temperatur asılılıqları tədqiq edilmişdir. Təcrübələr 200-400K temperatur intervalında aparılmışdır. Təcrübi nəticələr əsasında yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və elektronların aktivasiya enerjisi ( $E_a=0.026\text{eV}$ ) təyin edilmişdir. Bundan əlavə tədqiq olunan tərkibin rentqenostruktur analizi aparılmış, fəza qrupunun tipi və qəfəs parametrləri təyin edilmişdir.

## THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0.03}$

S.S.RAGIMOV, Sh.S.ABDULLAYEVA, A.E.BABAYEVA

The temperature dependence of electrical conductivity and the Hall effect of the  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{0.97}(\text{CuIn}_2\text{S}_4)_{0.03}$  solid solution was studied. The experiments have been carried out in 200-400K temperature intervals. Based on experimental data, the concentration of charge carriers was determined, and the electron activation energy  $E_a = 0.026\text{eV}$  was estimated. An X-ray diffraction analysis of the studied composition was also carried out, and the lattice parameters and type of space group were determined.