

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 548.55+621.3.085.345-026.66

ЛЕОНОВЕЦ
Сергей Сергеевич

**ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $FeIn_2S_4$, СВОЙСТВА
И ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени магистра техники и технологии
по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии проектирования
электронных систем

Научный руководитель
Павлюковец Сергей
Анатольевич
кандидат технических наук

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Павлюковец Сергей Анатольевич,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой химии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Бондарик Василий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, декан ФНиДО учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «22» июня 2015 г. года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П. Бровки, б, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-89-92, e-mail: kafpiks@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительное внимание уделяется изучению магнитных полупроводников типа $A^{II}B^{III}_2C^{VI}_4$ ($A - Mn, Fe, Co, Ni$; $B^{III} - Al, Ga, In$; $C^{VI} - S, Se, Te$) [1-6]. Интерес к данным материалам стремительно растет, что связано с открытием ряда новых физических явлений в данных полупроводниках, о которых упомянуто выше. Магнитные полупроводники этого класса являются новыми и практически не изученными материалами, их систематическое изучение только начинается. Весомым аргументом в пользу этого утверждения является то, что в полупроводниковом материаловедении появляются новые технологические приемы и методы, применение которых может способствовать дальнейшему развитию технологии выращивания структурно-совершенных халькогенидных монокристаллов.

Из указанного класса соединений значительный интерес представляет $FeIn_2S_4$. Соединение является электронно-химическим аналогом двойного соединения типа $A^{III}_2B^{VI}_3$. Интерес к указанному соединению вызван еще и тем, что оно обладает более широким набором полупроводниковых параметров по сравнению с его бинарным аналогом, что связано с усложнением его химического состава и кристаллической структуры.

Уникальные свойства тройного соединения $FeIn_2S_4$ (отсутствие центра инверсии, высокая нелинейная восприимчивость, естественный фото-плеохроизм и др.) делают его перспективным материалом для твердотельной электроники.

Однако на практике реализация потенциальных возможностей соединения встречает определенные затруднения. Отсутствие достоверной информации о методах получения, физико-химических свойствах и связи технологии получения с физическими свойствами соединения является на сегодняшний день одним из основных факторов, сдерживающих прикладные разработки на основе указанного материала. Проблема выращивания больших гомогенных и оптически однородных по составу и свойствам кристаллов данного типа до сих пор не решена. В литературе имеются лишь отрывочные сведения о методах выращивания кристаллов. Кроме того, нет сведений о систематических исследованиях электрических, оптических, магнитных и теплофизических свойствах вышеупомянутого соединения. Часть имеющейся информации достаточно противоречива.

Все вышеизложенное определило направление работы, целью которой является синтез и выращивание однородных монокристаллов $FeIn_2S_4$, установление закономерностей изменения физических и физико-химических свойств от способа получения, а также создание экранов электромагнитного излучения на основе указанных монокристаллов и исследование их свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить оптимальные режимы синтеза и выращивания объемных монокристаллов $FeIn_2S_4$ из расплава методом Бриджмена–Стокбаргера.
2. Определить состав и структуру монокристаллов $FeIn_2S_4$.

3. Установить закономерности изменения оптических, теплофизических и магнитных свойств монокристаллов $FeIn_2S_4$.

4. Изготовить экраны электромагнитного излучения на основе монокристаллов $FeIn_2S_4$ и исследование их свойств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многокомпонентные соединения типа $A^{II}B^{III}_2C^{VI}_4$ (A^{II} — Mn, Fe, Co, Ni ; B^{III} — Ga, In ; C^{VI} — S, Se, Te) уже сейчас играют роль основного источника расширения функциональных возможностей современной полупроводниковой электроники. Однако проблемы выращивания монокристаллов этих веществ, разработки структур из них и необходимость комплексных исследований их физических свойств пока остаются нерешенными для большинства новых многокомпонентных веществ. Тройное соединение $FeIn_2S_4$ — одно из таких веществ, обладающих также магнетизмом. В литературе сообщены лишь сведения о некоторых кристаллохимических характеристиках указанного соединения. В данной работе, принадлежащей новому перспективному направлению полупроводниковой электроники, представлены результаты исследований по выращиванию монокристаллов $FeIn_2S_4$ и созданию первых экранов электромагнитного излучения на их основе.

Степень разработанности проблемы

Поиски полупроводников, обладающие ферромагнитными свойствами при комнатной температуре привели к тому, что в последнее время появился повышенный интерес к легированию марганцем как бинарных полупроводников $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ ($CdMnTe, GaMnAs$ и др.), так и тройных соединений $A^I B^{III} C^{VI}_2$, $A^{II} B^{IV} C^{VI}_2$ и $A^{II} B^{III}_2 C^{VI}_4$ (1. Zhao L.X., Campion R.P. Fewster P.F. et al. *Determination of the Mn concentration in GaMnAs // Semiconduc. Sci. Technol.* 2005. Vol. 20. № 4. P. 369 – 373; 2. Farah W, Scalbert D, Nawrocki M, Semenov Y.G. *Magnetic-field-induced sign reversal of transient photoreflectance in $Cd_{1-x}Mn_xTe$: Paramagnetic shift at low manganese concentration // Physical Review B-Condensed Matter.* 1998. Vol.58, № 8.15. P. 4522-4530.). Спинтроника или электроника с использованием спиновых эффектов привлекает все большее внимание исследователей вследствие потенциальной возможности создания новых функциональных приборов на основе этих эффектов, сочетающих в себе транспортные и магнитные свойства и способных работать при комнатной температуре (Слынько В.В., Хандожко А.Г., Ковалюк З.Д. и др. Слабый ферромагнетизм в слоистых кристаллах $InSe:Mn$ // ФТП. 2005. Т. 39. № 7. С. 806 – 810.). Ряд совершенно новых явлений, таких, как спиновая инжекция, индуцированный зарядовый ферромагнетизм и ферромагнетизм с оптическим управлением, открыты в разбавленных полупроводниках на основе соединений $A^{III}B^V$ (1. Yu-Jun Zhao, A Zunger. *Site preference for Mn substitution in spintronic $CuM^{III}X_2^{VI}$ chalcopyrite semiconductors // Phys. Rev. (B).* 2004. Vol. 69. 075208 (7 pages).; 2. Tsujii N., Kitazawa H., Kido G. *Electric and magnetic of Mn*

– and Fe – doped $CuInS_2$ compounds // *Phys. Stat. Sol.(a)*. 2002. Vol. 189, № 3. P. 951 – 953.). Введение ферромагнитных атомов, какими являются атомы железа, в бинарные соединения In_2S_3 , In_2Se_3 , Ga_2S_3 и Ga_2Se_3 , приведет к созданию новых тройных соединений и появлению у них уникальных физических свойств, сочетающих в себе как полупроводниковые, так и магнитные свойства и дает основание предполагать, что полученные новые материалы могут использоваться, для создания на их основе, новых приборов для спинтроники.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является синтез и выращивание однородных монокристаллов $FeIn_2S_4$, установление закономерностей изменения физических и физико-химических свойств от способа получения, а также создание экранов электромагнитного излучения на основе указанных монокристаллов и исследование их свойств.

Задачи исследования:

1. Определить оптимальные режимы синтеза и выращивания объемных монокристаллов $FeIn_2S_4$ из расплава методом Бриджмена – Стокбаргера.
2. Определить состав и структуру монокристаллов $FeIn_2S_4$.
3. Установить закономерности изменения оптических, теплофизических и магнитных свойств монокристаллов $FeIn_2S_4$.
4. Изготовить экраны электромагнитного излучения на основе монокристаллов $FeIn_2S_4$ и исследовать их свойства.

Объектом исследования являются монокристаллы $FeIn_2S_4$ и экраны на их основе.

Предметом работы являются физико-химические, оптические, теплофизические и магнитные свойства.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй степени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии проектирования электронных систем.

Теоретической основой исследований являются теоретические и практические положения отечественных и зарубежных исследований ученых по проблеме инновационной деятельности: И.В. Боднар, С.В. Труханов, И.А. Викторов, Г.П. Яблонский, Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, П.Г. Рустамов, Э. Арушанов, *G. Attolini, V. Sagredo, S. Reil*, Н. Haeuseler и др.

Методологической основой исследования являются разработки отечественных и зарубежных авторов, методические материалы, труды отечественных и зарубежных учёных и научные труды в области синтеза и выращивания монокристаллов. В магистерской диссертации используются следующие общенаучные методы: эмпирического исследования (эксперимент,

измерение, научное исследование), обще логические (анализ, аналогия, системный подход), метод факторного и сравнительного анализа.

Информационная база исследования для синтеза и выращивания монокристаллов сформирована на основе экспериментальных данных, научных публикаций известных зарубежных ученых (Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, П.Г. Рустамов, Э. Арушанов, *G. Attolini*, *V. Sagredo*, *S. Reil*, *H. Haeseler*) и Республики Беларусь (И.В. Боднар, С.В. Труханов, И.А. Виктор, Г.П. Яблонский).

Инструментальной базой Поэлементный состав монокристаллов производился на установке «*Stereoscan-360*». В качестве анализатора рентгеновского спектра использовали рентгеновский спектрометр «*AVALON-8000*». Относительная погрешность определения компонентов составляла $\pm 5\%$.

Научная новизна и значимость полученных результатов магистерской диссертационной работы заключается в следующем

1. Разработанные температурные режимы синтеза и выращивания монокристаллов $FeIn_2S_4$ позволяют получать оптически однородные объемные монокристаллы диаметром ~ 14 мм и длиной ~ 50 мм с воспроизводимыми свойствами.

2. Результаты исследования физико-химических, теплофизических, оптических, электрических и магнитных свойств имеют фундаментальный характер и используются как справочные данные при расчете и конструировании оптоэлектронных приборов и приборов спинтроники.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре химии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплине «Физико-химические процессы».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные оптимальные температурно-временные режимы синтеза и выращивания оптически однородных монокристаллов $FeIn_2S_4$ направленной кристаллизацией методом Бриджмена–Стокбаргера, позволяющие снизить температуру технологического этапа многостадийного роста монокристаллов, а также сократить время отжига и получить структурно-совершенные кристаллы диаметром ~ 14 мм и длиной ~ 50 мм с воспроизводимыми свойствами.

2. Экспериментально установленные фундаментальные физико-химические, оптические, теплофизические, электрические и магнитные параметры монокристаллов халькогенидов $FeIn_2S_4$ и $FeIn_2Se_4$ (параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений, параметры сверхтонких взаимодействий ионов железа, ширина запрещенной зоны, коэффициенты теплового расширения, температура Дебая, среднеквадратичные динамические смещения атомов, температура замерзания магнитных моментов ферромагнитных кластеров, асимптотическая температура Нееля и спонтанный атомный магнитный

момент), полученные впервые для такого класса соединений и необходимые при расчете и конструировании оптоэлектронных приборов и приборов спинтроники.

3. Предложены и реализованы экраны электромагнитного излучения на основе выращенных монокристаллов $FeIn_2S_4$.

Теоретическая значимость

Установлены физико-химические параметры выращенных монокристаллов, что позволило получить новые справочные данные в области материаловедения.

Практическая значимость

На основе выращенных монокристаллов впервые получены экраны электромагнитного излучения.

Апробация и внедрение результатов исследования

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в четырех опубликованных работах.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертации – 89 страниц. Работа содержит 21 таблицу, 32 рисунка. Библиографический список включает 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и **общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор по теме диссертации. В ней проведен анализ методов выращивания, структуры и свойств кристаллов $FeIn_2S_4$. В первом разделе приведены характеристики структуры соединений. Отмечено, что данные соединения кристаллизуются в решетках двух типов: с катионным упорядочиванием в тетраэдрической подрешетке и с катионным упорядочиванием в тетраэдрической и октаэдрической подрешетках. Во втором разделе описаны диаграммы состояния с точки зрения фазового разнообразия и условия образования соединения $FeIn_2S_4$. Третий раздел главы содержит анализ методов синтеза и выращивания кристаллов исследуемых соединений. Анализ литературных данных показал, что возникают трудности при получении качественных объемных монокристаллов указанного соединения. Результаты исследований физико-химических, оптических, электрических и магнитных свойств, приведенные различными авторами, значительно отличаются друг от друга, что можно объяснить проведени-

ем исследований в основном на поликристаллических образцах. Отсутствие надежной информации о методах получения ставит задачу поиска оптимальных режимов выращивания однородных монокристаллов. Исследование фундаментальных характеристик соединения $FeIn_2S_4$ необходимо для выработки рекомендаций по их практическому использованию.

Во **второй главе** изложены экспериментальные методы синтеза и выращивания монокристаллов $FeIn_2S_4$. Использование метода Бриджмена-Стокбаргера связано с простотой проведения процесса выращивания, высокой технологичностью, возможностью поддержания постоянного градиента температуры на фронте кристаллизации и управления скоростью кристаллизации.

Монокристаллы соединения $FeIn_2S_4$ получали в два этапа. Предварительно синтезировали двухтемпературным методом, чтобы избежать взрыва ампул и загрязнения получаемых слитков примесями, содержащимися в кварцевом стекле. В этом методе ампула помещается в двухзонную горизонтальную печь, температуру зон которой можно регулировать независимо друг от друга, а металлические компоненты сера или селен находятся в разных частях кварцевой ампулы. Металлические компоненты (железо, галлий или индий) загружали в кварцевую лодочку, которую располагали в одном конце кварцевой ампулы, а в противоположном ее конце находились сера или селен. Ампулу откачивали до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па, запаивали и размещали в двухзонной горизонтальной печи.

Температуру зоны с металлическими компонентами повышали со скоростью ~ 250 К/ч до 1300–1420 К (в зависимости от соединения). Температуру зоны, где находилась сера или селен, повышали со скоростью ~ 50 –100 К/ч до ~ 780 –870 К и выдерживали в течение ~ 2 –3 ч. По истечении указанного времени выдержки проводили понижение температуры, где находились металлические компоненты со скоростью ~ 50 К/ч до 1000 К. Полученные слитки использовались для выращивания монокристаллов методом Бриджмена-Стокбаргера.

Монокристаллы $FeIn_2S_4$ выращивали по методу Бриджмена-Стокбаргера. Подготовленную ампулу размещали в верхней зоне печи, где температуру повышали со скоростью ~ 100 К/ч до ~ 1420 К. Для гомогенизации расплава выдерживали при этой температуре 24 ч, а затем опускали ее через фронт кристаллизации в нижнюю зону со скоростью $\sim 0,2$ мм/ч при градиенте температуры ~ 40 К/см.

Для образования затравки часть расплава длиной ~ 7 мм закристаллизовывали путем опускания ампулы, а затем в течение 72 ч проводили ее рекристаллизационный отжиг. На сформированной таким образом монокристаллической затравке проводили выращивание монокристаллов $FeIn_2S_4$. После кристаллизации всего расплава, полученные кристаллы отжигали в течение 150 ч при температуре ~ 1020 К. Разработанный режим обеспечивал получение монокристаллических слитков диаметром ~ 14 мм и длиной до 50 мм.

В **третьей главе** изложены результаты исследования физико-

химических свойств соединения. Измерение состава показало, что расчетные величины удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Равновесность выращенных монокристаллов определяли по угловым положениям линий дифракционного спектра в монохроматизированном $CuK\alpha$ – излучении. Проведенные исследования показали, что на снятых дифрактограммах присутствуют рефлексы отражения, характерные для структуры шпинели. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов по рефлексам, для которых $2\theta > 60^\circ$ равны: $a = 10,612 \pm 0,005 \text{ \AA}$.

Проведенные исследования определения температур фазовых превращений показали, что как на кривых нагревания, так и на кривых охлаждения имеется по одному тепловому эффекту, который соответствует температуре плавления и составляет 1378 K .

На выращенных кристаллах была измерена плотность и микротвердость. Полученные значения рентгеновской и пикнометрической плотности достаточно хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о качестве полученных монокристаллов.

Используя ядерную гамма-резонансную спектроскопию, определены параметры сверхтонких взаимодействий ионов железа в $FeIn_2S_4$.

Для определения ширины запрещенной зоны на монокристаллах проведены измерения спектров пропускания в области края фундаментального поглощения в интервале температур $20\text{--}300 \text{ K}$. По спектрам пропускания рассчитывали коэффициент поглощения α . Ширину запрещенной зоны определяли экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha \times \hbar\omega)^2$ от энергии фотонов $\hbar\omega$ до пересечения с осью абсцисс. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны для монокристаллов $FeIn_2S_4$ представлена на рисунке 1. Видно, что указанная зависимость имеет вид, характерный для сложных соединений. Для описания полученной зависимости была использована модель Пэсслера.

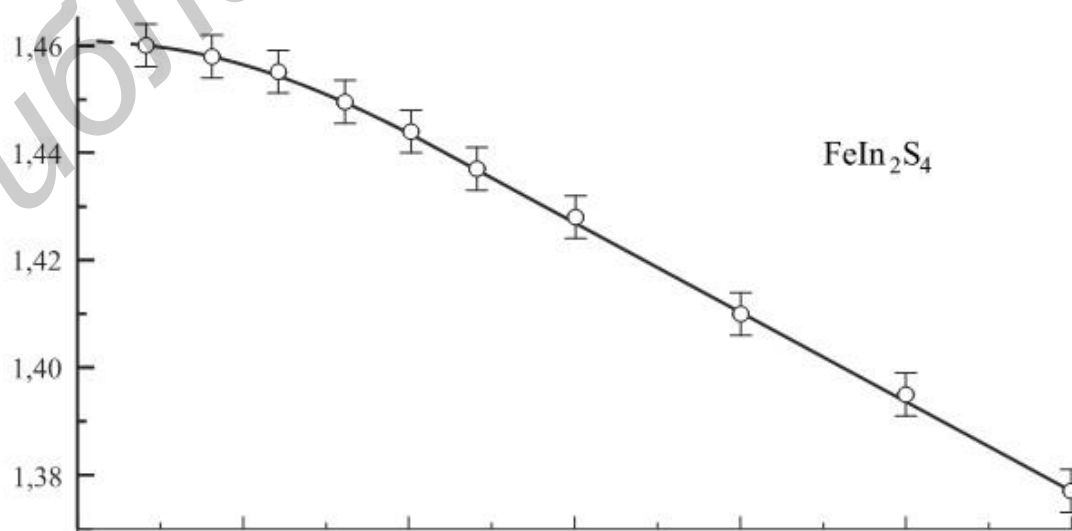


Рисунок 1 – Температурная зависимость $E_g(T)$ для монокристаллов $FeIn_2S_4$
На полученных монокристаллах проведены измерения теплового рас-

ширения. По полученным экспериментальным значениям рассчитаны коэффициенты теплового расширения, температуры Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов. Установлено, что с ростом температуры значение температуры Дебая уменьшается, а среднеквадратичные динамические смещения атомов увеличиваются для всех исследованных монокристаллов. Такое поведение свидетельствует об ослаблении химической связи в указанных соединениях с ростом температуры.

Исследования удельного магнитного момента были выполнены индукционным методом в интервале температур 4–310 K и полей 0–14 Tл. По температурным зависимостям обратной магнитной восприимчивости определена асимптотическая температура Нееля, которая имеет значение – 86 K и свидетельствует о преимущественно антиферромагнитном взаимодействии в магнитной подсистеме образца.

Для исследования характера низкотемпературного магнитного состояния проведены измерения полевой зависимости атомного магнитного момента. Измерения показали, что полевая зависимость имеет тенденцию к отклонению от линейности. Такое поведение не характерно для антиферромагнитного состояния, а свойственно, скорее всего, слабому ферромагнитному состоянию или наличию корреляций ближнего порядка. Установлено, что исследуемые соединения при 4 K обладают спонтанным атомным магнитным моментом равным 0,05 μ_B /ф.е.

Результаты магнитных измерений ZFC- и FC-зависимостей (в режиме отогрева после охлаждения без поля и в поле) удельного магнитного момента в поле 0,01 Tл показали, что исследуемые монокристаллы $FeIn_2S_4$ являются парамагнетиками и описываются законом Кюри-Вейсса $\chi = C/(T-\Theta)$ вплоть до температур замерзания (T_f) магнитных моментов ферромагнитных кластеров (рисунок 2). Ниже температур, указанных на рисунке 2, на ZFC-кривых наблюдается отчетливое уменьшение удельного магнитного момента, характеризующегося спонтанным нарушением эргодичности, которое можно объяснить теорией Эдвардса-Андерсона. Этот факт указывает на наличие магнитного фазового перехода, характерного для образования состояния типа спинового стекла.

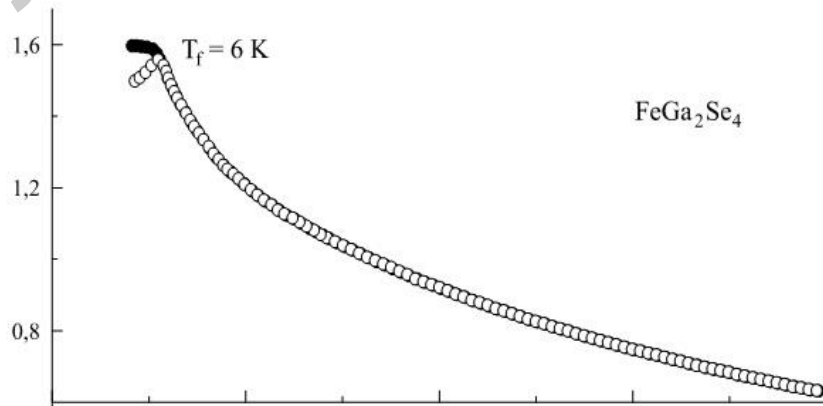


Рисунок 2 – Температурные зависимости ZFC- (светлые символы) и FC- кривых (темные символы) удельного магнитного момента в поле 0,01 Tл

Установлено, что состояние спинового стекла есть следствие фрустра-

ции обменных связей ферромагнитных кластеров, внедренных в парамагнитную матрицу. Определена объемная часть образца (V_{fer}), находящаяся в ферромагнитном состоянии, которая составила $\sim 2\%$.

На основе монокристаллов $FeIn_2S_4$ сфор водосодержащие экраны электромагнитного излучения и изучены их свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлен механизм воздействия плазмы на поверхность металла при обработке, определены ионный состав парогазовой оболочки и элементный состав органических и неорганических загрязнений после обработки в различных технологических средах. Установлено, что в процессе ЭПО снижается количество технологических загрязнений в поверхностных слоях металлов, а глубина их проникновения составляет для стали – до 0,05 мкм, для латуни – 0,01 мкм.

2. Установлено значительное увеличение температуры до 700 °С металлической поверхности прианодной области в начальный период обработки при ЭПО и ее колебательный характер.

3. Разработана методика импульсного возбуждения плазмы в жидких электролитах, с использованием которой разработан процесс модификации латунных поверхностей в электролитной плазме импульсными токами. Использование данной технологии позволяет за счет управления режимами и изменения микропрофиля повысить степень шероховатости поверхности до R_a 0,1...0,3, уменьшить величины контактного сопротивления до 3...4 мОм, объемного износа в 2-3 раза, сократить энергопотребление и время обработки. Определены оптимальные режимы процесса ЭПО. Установлены закономерности изменения свойств и микропрофиля поверхностей материалов в зависимости от условий проведения ЭПО. Показана возможность формирования поверхностей материалов с шероховатостью R_a 0,1...0,2 для углеродистой стали и 0,2...0,3 для латуни, и при этом величины объемного износа исследованных материалов уменьшается в 2-3 раза.

4. Определены закономерности влияния процесса ЭПО на формирование приповерхностных слоев твердых тел, на адгезионные и физико-механические свойства осажденных на них электрохимическим способом слоев никеля. Показано, что ЭПО улучшает адгезионные свойства поверхности, а для нанесенных на нее никелевых покрытий получены значения шероховатости R_a 0,26...0,29, контактного сопротивления – 2,4...3,3 мОм при сокращении количества технологических операций и вредного воздействия технологических сред на свойства покрытий. Разработаны состав электролита из доступных компонентов ($NaCl$ – 25...30 г/л, NH_4Cl – 2 г/л, остальное – вода), обладающий длительной работоспособностью, и технологический процесс модификации поверхностей из углеродистых сталей в стационарной электролитной плазме ($U_{\text{раб}}$ – 160...320 В, $T_{\text{эл}}$ – 60...90 °С, $t_{\text{обр}}$ – 3...7 мин).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Леоновец, С.С. Оптические свойства монокристаллов In_2S_3 и $FeIn_2S_4$ со структурой шпинели / С.С. Леоновец, А.Н. Микита, В.И. Шейкин А.И. Сенибабнов // Актуальные вопросы физики и техники: IV Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов. – Гомель, 2015 – С. 91-92.

[2] Леоновец, С.С. Выращивание монокристаллов $FeIn_2S_4$ методом Бриджмена-Стокбаргера/ С.С. Леоновец // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2015 – С. 48-49.

[3] Леоновец, С.С. Методы синтеза и выращивания кристаллов In_2S_3 / С.С. Леоновец, А.И. Сенибабнов // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2015 – С. 50-51.

[4] Леоновец, С.С. Многокомпонентные магнитные проводники типа $A^{II}B^{III}_2C^{VI}_4$ / С.С. Леоновец, Микита А.Н., Шейкин В.И., А.И. Сенибабнов // Компьютерное проектирование и технология производства электронных систем: 51-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2015 – С. 52-53.