

УДК 546.175-323:546.723-31:546.562-31:549.731.11
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4155
Шифр специальности ВАК: 02.00.04

Методика получения феррита меди из отходов микроэлектроники

А.С. Новиков^{1✉}, Е.А. Сударев¹, А.В. Мостовщikov²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, г. Томск

✉ truegraf1995@gmail.com

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых методик по утилизации металлических отходов. Данное направление, при участии различных интенсифицирующих воздействий, относится к ресурсосберегающим, технологическим, минимизирующим объемы капитальных затрат на сырьё, производство и последующую реализацию. **Цель:** получить из железных и медных отходов микроэлектроники феррит меди, полезный и крайне востребованный продукт в данной отрасли отечественной промышленности, особенно сегодня, когда на нашу страну наложено множество санкций, в том числе и по части микроэлектроники. Затем изучить его магнитные свойства и сделать вывод о возможности его применения. **Объекты:** образцы железных и медных отходов в виде пластинок, проволоки и стружки. **Методы:** волюмометрия, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, изучение магнитной восприимчивости. **Результаты.** Из железосодержащих отходов микроэлектроники был получен мелкодисперсный оксид железа (III), который находит применение в электротехнике в составе высоковольтных резисторов для заземления нейтралей сетей, ионно-литиевых аккумуляторов, в качестве носителя аналоговой и цифровой информации; в радиотехнической отрасли в составе низковольтных резисторов, высокочастотных дросселей, малогабаритных импульсных трансформаторов. Из медьсодержащих отходов был получен мелкодисперсный оксид меди (II), который находит применение в производстве люминофоров и сухих аккумуляторных элементов – в батареях с жидкостными элементами в качестве катода, с литием в качестве анода и диоксидом, смешанным с перхлоратом лития, в качестве электролита. Кроме того, он находит применение в качестве полупроводника р-типа, поскольку имеет узкую запрещенную зону 1,2 эВ, используется при изготовлении фотоэлементов в солнечных панелях. Из полученных оксидов спеканием был синтезирован феррит меди. Кольца из таких сплавов служат в трансформаторах сердечником. Деталь в несколько тысяч раз повышает индукцию магнитного поля, благодаря чему устройства передают большую мощность, чем они могли бы делать это с сердечником не из феррита. Кольцевые сердечники из феррита встречаются не только в трансформаторах, но и в прочей электронике, например в устройствах магнитной памяти.

Ключевые слова: Утилизация отходов, получение феррита меди, получение оксида железа, получение оксида меди, электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, магнитные свойства, магнитная память.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы Приоритет 2030.

Для цитирования: Новиков А.С., Сударев Е.А., Мостовщikov А.В. Методика получения феррита меди из отходов микроэлектроники // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 134–142. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4155

UDC 546.175-323:546.723-31:546.562-31:549.731.11
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4155

Copper ferrite obtaining from microelectronics waste

A.S. Novikov^{1✉}, E.A. Sudarev¹, A.V. Mostovshchikov²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

✉ truegraf1995@gmail.com

Abstract

Relevance. The need to develop new methods for metal waste disposal. This direction, with the participation of various intensifying influences, refers to resource-saving, technological, minimizing the volume of capital costs for raw materials, production and subsequent sale. **Aim.** To obtain copper ferrite from iron and copper waste of microelectronics. Copper ferrite is a useful and highly demanded product in this branch of domestic industry, especially now, when many sanctions have been imposed on our country, including in terms of microelectronics. To study its magnetic properties and draw a conclusion about the possibility of its application. **Objects.** Samples of iron and copper waste in the form of plates, wire and shavings. **Methods.** Volumetric analysis, electron microscopy, X-ray phase analysis, study of magnetic susceptibility. **Results.** The authors have produced finely dispersed iron (III) oxide from iron-containing microelectronics waste. This oxide is used in electrical engineering as part of high-voltage resistors for grounding the neutral of networks, lithium-ion batteries, as a carrier of analog and digital information. In the radio engineering industry it is used as part of low-voltage resistors, high-frequency chokes, small-sized pulse transformers. The authors produced finely dispersed copper (II) oxide from copper-containing waste. This oxide is used in production of phosphors and dry batteries – in batteries with liquid cells as a cathode, with lithium as an anode and dioxalane mixed with lithium perchlorate as an electrolyte. In addition, it finds application as a p-type semiconductor, since it has a narrow bandgap of 1.2 eV, and manufacturing photovoltaic cells in solar panels. Copper ferrite was synthesized from the obtained oxides by sintering. Rings made of such alloy serve as a core in transformers. The part increases the magnetic field strength by several thousand times, making the devices transmit more power than they could with a non-ferrite core. Ferrite ring cores are found not only in transformers, but also in other electronics (e.g. magnetic memory).

Keywords: Waste disposal, copper ferrite production, iron oxide production, copper oxide production, electron microscopy, X-ray phase analysis, magnetic properties, magnetic memory.

Acknowledgements: The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Priority 2030 program.

For citation: Novikov A.S., Sudarev E.A., Mostovshchikov A.V. Copper ferrite obtaining from microelectronics waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 203, vol. 334, no. 12, pp. 134–142. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4155

Введение

Переработка природных ресурсов (руд) с целью извлечения из них металлов является комплексной инженерно-технической задачей, требующей значительных затрат материальных и энергетических ресурсов на всех стадия технологического процесса. Полученные металлы поступают в производство изделий, которые после окончания их эксплуатации часто утилизируются без извлечения из них металлов путем перемещения их на полигоны отходов.

Крупные страны, такие как Россия, сталкиваются с проблемами утилизации твердых отходов: имеет место недостаточная степень их переработки, а также свалки, которые не спроектированы должным образом для предотвращения загрязнения окружающей среды. В России относительно низкая глубина переработки отходов, в частности металлолома, комплексная переработка которого с применением химических технологий позволит вовлекать металлы и материалы, полученные из отходов, в дальнейшее производство полезной продукции [1–3].

Выбросы парниковых газов, связанные с первичным производством металлов, произведенных из добываемой руды, вносят значительный вклад в общемировые выбросы парниковых газов [4–6]. Переработка металлов не только помогает снизить потребление сырья, но также снижает потребление энергии и загрязнение окружающей среды. Перера-

боткой 1 т стального лома можно заменить добычу 1,4 т железной руды и избежать выделения 1,5 т выбросов CO₂, и сэкономить 13,4 ГДж первичной энергии. Это эквивалентно 73, 64 и 90 %, соответственно, по сравнению со 100 % первичного производства [7–9]. Эффективное сотрудничество промышленности с научными лабораториями способствует интеграции с зелеными технологиями, такими как переработка ресурсов, повышает инновационный потенциал предприятий, улучшает качество и расширяет ассортимент выпускаемой продукции, а также способствует промышленной реструктуризации и модернизации [10, 11].

Спрос на медь более чем удвоился за последние 40 лет, и эта тенденция, по оценкам [12], сохранится в ближайшие десятилетия. В 2017 г. наиболее важными видами конечного использования меди в мире были производство оборудования, строительство зданий и инфраструктура. На стадиях добычи и переработки полезных ископаемых, в зависимости от качества руды, расходуется 60–90 % от всей потребляемой энергии при производстве первичной меди, кроме того, данные производства создают значительную нагрузку на экологию [13, 14]. Выбросы природного газа при добыче меди в 2015 г. составили 180 Мт, или 0,36 % глобальных выбросов, по сравнению со 105 Мт в 1995 г. Современные исследования подчеркивают важность вторичной переработки меди при рассмотрении более чи-

стой меди в долгосрочной перспективе. Переработка меди, особенно лома высококачественной меди, требует значительно меньше энергии, земли и воды, чем первичное производство [15–18].

Поскольку химические соединения железа и меди имеют на сегодняшний день широкий спектр применений от микроэлектроники [5, 14], катализа [8, 16], машиностроения [6, 15] до медицинских исследований [11, 12], то и направления по переработке железо- и медьсодержащих отходов в разнообразные полезные продукты могут быть весьма разнообразны.

Одним из таких направлений может быть химическая переработка железных и медных отходов микроэлектроники в феррит меди, который широко используется в качестве магнитных материалов в радиотехнике, электронике, автоматике, вычислительной технике (ферритовые поглотители электромагнитных волн, антенны, сердечники, элементы памяти, в том числе в мемристивных элементах, постоянные магниты).

Области применения феррита меди не ограничиваются только микроэлектроникой [19], например, известно, что, по сравнению с чистым бентонитом, бентонит, модифицированный CuFe_2O_4 , способен преобразовывать больше HgO в Hg^{2+} и твердые частицы ртути Hg [20]. В качестве гибридных электродов суперконденсатора предложена двухэтапная методика и изготовлен тройной нанокомпозит $\text{PANI/GO/CuFe}_2\text{O}_4$, который может использоваться в качестве уникального электродного материала в суперконденсаторах для производства высокоэффективных и надежных устройств накопления энергии [21]. Высокое значение магнитных параметров, высокое удельное сопротивление ($\sim 10^7$ – 10^8 Ом·см) и низкие диэлектрические потери на высоких частотах для наноферритов $\text{Co-CuFe}_2\text{O}_4$ делают данные материалы перспективными для магнитных записывающих сред высокой плотности (в том числе мемристивных материалов), а также использоваться в силовых трансформаторах на высоких частотах [22]. Частицы CuFe_2O_4 , легированные цинком, демонстрируют цитотоксическое действие на раковые клетки A549 [23]. Также показано, что p-n-гетероструктура $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{MgFe}_2\text{O}_4$ имеет потенциал для применения в разложении сточных вод [24]. Для гетероструктур $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ наблюдается повышение каталитической эффективности генерации водорода до 2,5 раз по сравнению с одними только наночастицами $\text{g-C}_3\text{N}_4$, при этом кажущийся квантовый выход образования H_2 приближается к 25 % [25]. Синтезированный CuFe_2O_4 в качестве гетерогенного магнитного нанокатализатора способствует восстановлению 4-нитроанилина и 2-нитроанилина значительно быстрее, чем другие катализаторы. Данные наноча-

стицы могут быть извлечены методом магнитной сепарации и повторно использованы в течение шести последовательных циклов без заметной потери каталитической способности [26]. Также феррит меди может использоваться и в других современных приложениях [27, 28]. После тщательной переработки порошок оксида железа (III) Fe_2O_3 находит применение в электротехнике в составе высоковольтных резисторов для заземления нейтралей сетей, ионно-литиевых аккумуляторов, в качестве носителя аналоговой и цифровой информации; в радиотехнической отрасли – в составе низковольтных резисторов, высокочастотных дросселей, малогабаритных импульсных трансформаторов; в химической промышленности – в составе катализатора при производстве аммиака, а также катализатора дегидрирования при синтезе диеновых мономеров, катализированное карамельное топливо; в нефтехимической промышленности – в качестве минеральных красок, белил, эмалей и грунтов; используется в качестве компонента керамики и цветных цемента, как пигмент-краситель дорожного покрытия, цемента и тротуарной плитки, термитной сварки стальных конструкций, полирующего средство для стали и стекла.

Учитывая, что медьсодержащие отходы имеют в своём составе, помимо меди, которая на воздухе быстро покрывается оксидной плёнкой монооксида меди Cu_2O , придающего ей характерный интенсивный желтовато-красный оттенок, разнообразные загрязнители в виде пыли, грязи и масел, приобретенные на бывших местах эксплуатации, то классическая переработка медьсодержащих отходов с помощью переплавки в этом случае неэффективна, данную проблему способна решить химическая переработка.

Оксид меди (II) находит применение в производстве вискозы, люминофоров и сухих аккумуляторных элементов – в батареях с жидкостными элементами в качестве катода, с литием в качестве анода и диоксидом, смешанным с перхлоратом лития, в качестве электролита. Кроме того, он находит применение в качестве полупроводника p-типа, поскольку имеет узкую запрещенную зону 1,2 эВ, используется при изготовлении фотоэлементов в солнечных панелях, а также является абразивом, используемым для полировки оптического оборудования. Оксид меди (II) применяется для производства растворов гидроксида купраммония, используемых для изготовления искусственного шелка, для обнаружения восстановительных свойств веществ, добавляется в комбикорма животных.

Несмотря на то, что оксид железа (III) и оксид меди (II) сами по себе востребованы, представляется возможным изготовление из их смеси феррита меди.

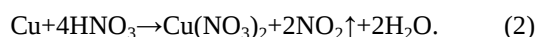
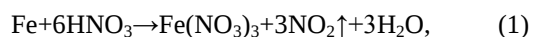
Цель данной работы заключалась в разработке методики получения феррита меди из железных и медных отходов, а также изучении его магнитных свойств для доказательства полезности применения данной методики.

Физико-химические основы и объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали железные и медные отходы микроэлектроники в виде стружек, проволок и ржавых пластинок, длиной не более 3 см и толщиной не более 5 мм. В качестве реагента для реализации процесса растворения и дальнейшей очистки металлов была выбрана азотная кислота.

Азотная кислота (HNO_3) – сильная одноосновная кислота ($\text{Р}_{\text{K}_a} = -1,64$). Концентрированная HNO_3 взаимодействует:

а) с металлами, стоящими в электрохимическом ряду напряжений левее водорода, на примере железа:



В колбу – 1 помещали навеску железных отходов – 2 массой $5 \text{ г} \pm 10 \text{ мг}$ с 50 см^3 65 % раствора азотной кислоты. Выделяющийся в ходе химических реакции (1) диоксид азота собирали в отдельной ёмкости – 3 (рис. 1).

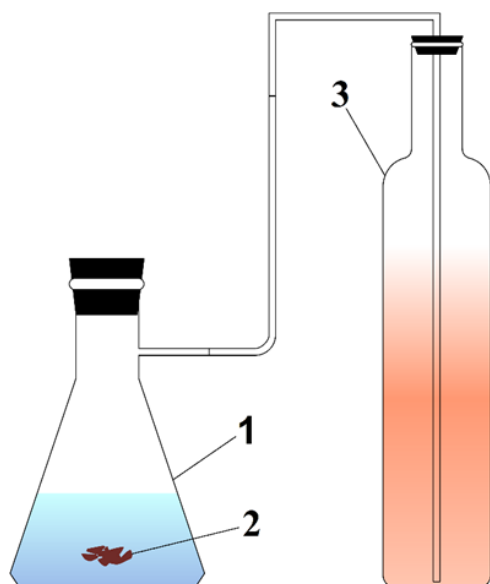
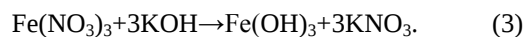


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – плоскодонная колба, наполненная азотной кислотой; 2 – образец металлического отхода; 3 – ёмкость для сбора диоксида азота

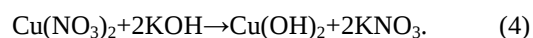
Fig. 1. Laboratory setup: 1 – flat-bottomed flask filled with nitric acid; 2 – sample of metal waste; 3 – tank for collecting nitrogen dioxide

Полученный раствор трижды пропускали через фильтр «Синяя лента», в ходе чего происходило очищение от примесей, находящихся в металлических отходах. Аналогичную процедуру проводили отдельно и с медными отходами по уравнению (2).

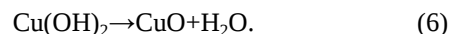
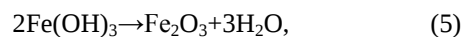
К полученному раствору нитрата железа (III) добавляли концентрированный раствор гидроксида калия до получения коричневой суспензии гидроксида железа (3):



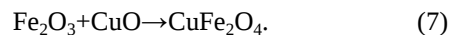
Полученную суспензию промывали горячей водой на фильтре для удаления нитрата калия. Аналогичную процедуру проводили и с нитратом меди в рамках уравнения (4):



Полученные гидроксиды отдельно друг от друга прокаливались при температуре $450\text{--}500^\circ\text{C}$ в течение часа. В итоге (реакции (5), (6)) получались оксиды железа (III) и меди (II):



Затем полученные оксиды смешивались в мольных соотношениях 1:1 и спекались при температуре 900°C в течение двух часов для получения феррита меди (7):

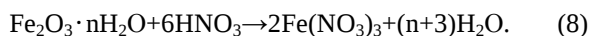


В качестве основных физико-химических методов исследования использовали: рентгенофазовый анализ (дифрактометр ДРОН-3М) и электронную микроскопию (растровый электронный микроскоп JEOL JSM 6000) с увеличением от 300 до 3000. Магнитные свойства полученного феррита изучали с помощью СКВИД (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – сверхпроводящий квантовый интерферометр) магнитометра на базе Федерального Исследовательского Центра проблем химической физики и медицинской химии Российской Академии Наук. В работе также применялось оборудование ЦКП НОИЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ.

Результаты и обсуждение

Поскольку железосодержащие отходы, помимо железа, имеют в своём составе различные продукты ржавления железа общего вида $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, углерод в стальных изделиях, а также разнообразные загрязнители в виде пыли, грязи и масел, приобретенные на бывших местах эксплуатации, классическая переработка лома в виде переплавки в данном случае не подходит, данную проблему успешно решает химическая переработка металлов [1–3].

С помощью концентрированной азотной кислоты растворялись различные железосодержащие отходы в виде стружек, проволок и ржавых пластинок, согласно уравнению (1). При этом ржавчина растворялась азотной кислотой согласно уравнению (8):

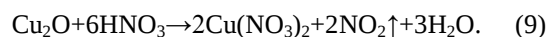


Таким образом, после окончания химических превращений образовывался раствор нитрата железа, примеси выпадали в осадок, для очистки от них раствор трижды отфильтровывали. Выделяющийся в ходе реакции (1) диоксид азота собирался в отдельную ёмкость, что позволяет в дальнейшем применять его в качестве сырья для получения азотной кислоты, таким образом исключалось загрязнение окружающей среды и повышалась ресурсоэффективность методики.

К полученному раствору нитрата железа добавляли свежеприготовленный концентрированный раствор гидроксида калия до получения гидроксида железа согласно уравнению (3). Полученный осадок отфильтровывали, затем оставляли на ночь под вытяжкой для удаления оставшейся влаги. Перед тем как перевести гидроксид железа в оксидную форму высушенный осадок гомогенизировали в ступе. Состав полученного по уравнению (5) оксида железа исследовали с помощью рентгенофазового анализа (рис. 2), размер частиц составил от 0,5 до 80 мкм (рис. 3).

С помощью концентрированной азотной кислоты растворялись различные медьсодержащие отходы в виде стружек, проволок и небольших пласти-

нок, согласно уравнению (2). При этом оксидная плёнка растворялась азотной кислотой согласно уравнению (9):



Таким образом, после окончания химических превращений образовывался раствор нитрата меди, примеси оседали на дне колбы, для очистки от них раствор трижды отфильтровывали. Выделяющийся в ходе обеих реакций диоксид азота собирался в отдельную ёмкость, в дальнейшем он может быть использован для получения азотной кислоты, таким образом исключалось загрязнение окружающей среды и повышалась ресурсоэффективность методики.

К полученному раствору нитрата меди добавляли свежеприготовленный концентрированный раствор гидроксида калия до получения гидроксида меди согласно уравнению (4). Полученный осадок отфильтровывали, затем оставляли на ночь под вытяжкой для удаления оставшейся влаги. Перед тем как перевести гидроксид меди в оксидную форму высушенный осадок гомогенизировали в ступе. Состав полученного по уравнению (6) оксида меди исследовали с помощью рентгенофазового анализа (рис. 2), размер частиц составил от 0,4 до 40 мкм (рис. 2).

Полученные оксиды железа и меди смешивались в мольных соотношениях 1:1, после чего прокаливались при температуре 900 °С в течение 2 часов. Состав полученного на выходе феррита меди изучали с помощью РФА (рис. 2), размер частиц составил от 0,45 до 45 мкм (рис. 3).

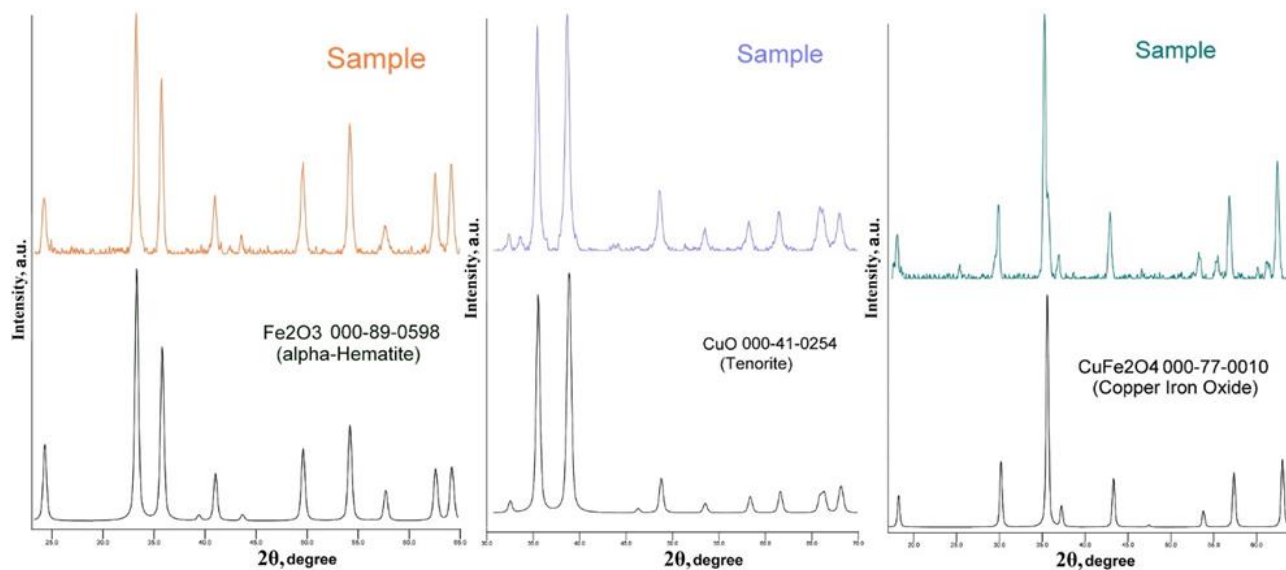


Рис. 2. Рентгенограммы полученных образцов и стандартов из базы данных PDF-2: 1 – оксида железа (III); 2 – оксида меди (II); 3 – феррита меди

Fig. 2. X-ray patterns of obtained samples and standards from the PDF-2 database: 1 – iron oxide (III); 2 – copper oxide (II); 3 – copper ferrite

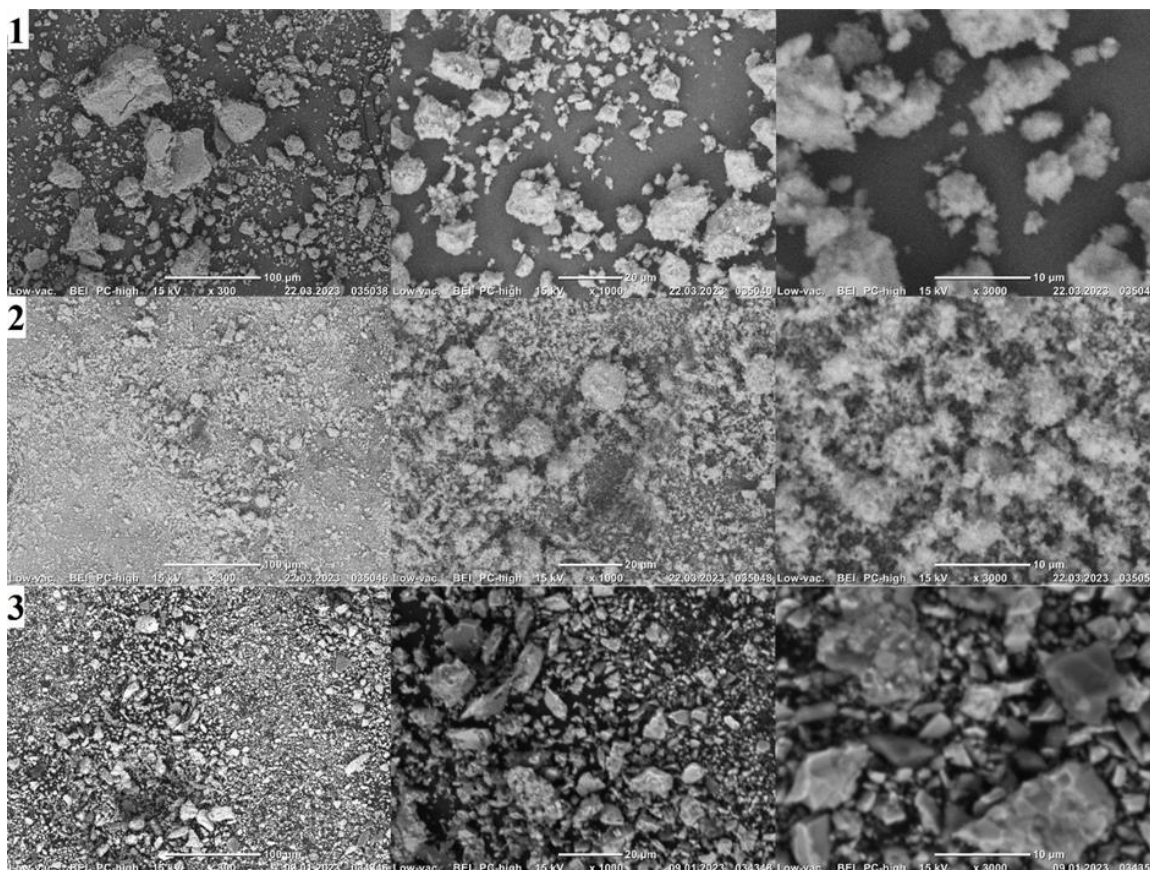


Рис. 3. Микрофотографии частиц: 1 – Fe_2O_3 ; 2 – CuO ; 3 – CuFeO_4

Fig. 3. Micrographs of particles: 1 – Fe_2O_3 ; 2 – CuO ; 3 – CuFeO_4

Далее полученный порошок спрессовывали при давлении 90–100 МПа, в ходе чего формовались образцы в виде прямоугольников площадью $2,5 \text{ см}^2$, которые затем подвергались обжигу при температуре 500°C .

При изучении магнитных свойств полученных образцов феррита меди (рис. 4) было установлено, что они обладают магнитным моментом 35 emu/g при температуре 300 K в полях от $0,1 \text{ T}$, сопоставимые величины были получены для различных ферритов в исследованиях [28, 29].

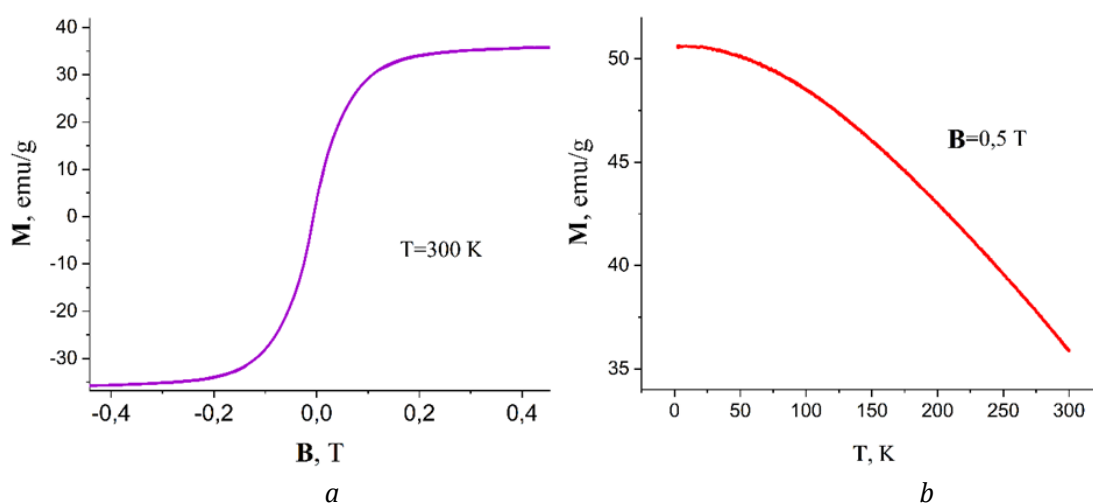


Рис. 4. Зависимость магнитного момента феррита меди: а) от величины индукции магнитного поля; б) от температуры

Fig. 4. Dependence of copper ferrite magnetic moment: a) on magnetic field induction magnitude; b) on temperature

Закключение

На основе железосодержащих отходов был получен мелкодисперсный оксид железа (III) с размерами частиц от 0,5 до 80 мкм. Из медьсодержащих отходов был получен мелкодисперсный оксид меди (II) с размерами частиц от 0,4 до 40 мкм. Затем из полученных оксидов спеканием был получен феррит меди с размерами частиц от 0,45 до 45 мкм, магнитным моментом 35 емг/г при температуре 300 К в полях от 0,1 Т.

Таким образом, предложенная методика переработки медь- и железосодержащих отходов с применением азотной кислоты позволяет получать феррит меди. Для дальнейшего успешного промышленного применения предложенной технологии её необходимо доработать с учетом степени чистоты используемых отходов, а также необходимой чистоты феррита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков А.С., Mostovshchikov A. B. Влияние ультразвукового излучения на кинетику процесса щелочной переработки алюминиевых отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 49–56.
2. Новиков А.С., Mostovshchikov A.B. Разработка методики синтеза фосфата алюминия и водорода из алюминиевого лома // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 24–31.
3. Новиков А.С., Mostovshchikov A.B., Сударев Е.А. Сравнительный анализ физико-химических методов переработки алюминиевых отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 53–61.
4. Musadamba P., Simuka J., Zimucha T. Impacts of using non automated technologies on the Business Performance of Zimbabwean metal recycling industries // Journal of Research and Innovation for Sustainable Society. – 2022. – V. 4. – P. 42–50.
5. Gorman M., Dzombak D., Frischmann C. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling // Resources, Conservation & Recycling. – 2022. – V. 182. – 106424.
6. A three-dimensional comprehensive numerical model of ion transport during electro-refining process for scrap-metal recycling / C. Liu, G. Li, L. Zhang, Q. Wang // Materials. – 2022. – V. 15. – 2789.
7. Luo K., Zor S. China's non-ferrous metal recycling technology convergence and driving factors: a quadratic assignment procedure analysis based on patent collaboration-based network structural hole // PLOS ONE. – 2022. – V. 17. – P. 1–30.
8. Slusarczyk P., Mleczko-Sanecka K. The multiple facets of iron recycling // Genes. – 2021. – V. 12. – 1364.
9. Oguclu O., Yildirim C. Cutting performance analysis of a single shaft shredder for various recycling metal materials // Journal of Engineering Sciences and Design. – 2022. – V. 11. – P. 1–10.
10. NCOA4 regulates iron recycling and responds to hepcidin activity and lipopolysaccharide in macrophages/ C. Guggisberg, J. Kim, J. Lee, X. Chen, M. Ryu // Antioxidants. – 2022. – V. 11. – 1926.
11. Zolotova E., Kotelnikova A., Ryabinin V. The content of toxic elements in soil-plant system based on ombrotrophic peat with the copper smelting slag recycling waste // Pollution. – 2023. – V. 9. – P. 286–298.
12. Loibl A., Espinoza L. Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America // Resources, Conservation & Recycling. – 2021. – V. 169. – 105462.
13. Copper recycling flow model for the United States economy: impact of scrap quality on potential energy benefit / T. Wang, P. Berrill, J. Zimmerman, E. Hertwich // Environmental Science & Technology. – 2021. – V. 55. – P. 5485–5495.
14. Dynamic analysis of in-use copper stocks by the final product and end-use sector in Japan with implication for future demand forecasts / R. Yokoi, J. Nakatani, H. Hatayama, Y. Moriguchi // Resources, Conservation & Recycling. – 2022. – V. 180. – 106153.
15. Potential-mediated recycling of copper from brackish water by an electrochemical copper pump / H. Deng, W. Wei, L. Yao, Z. Zheng, B. Li, A. Abdelkader, L. Deng // Advanced Science. – 2022. – V. 9. – 2203189.
16. Recycling and reusing copper and aluminum current-collectors from spent lithium-ion batteries / H. Khatibi, E. Hassan, D. Frisone, M. Amirian, R. Farahati, S. Farhad // Energies. – 2022. – V. 15. – 9069.
17. Blinova L., Godovcin P. Importance of recycling the waste-cables containing copper and PVC // Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. – 2021. – V. 48. – P. 1–21.
18. Activation of peracetic acid with CuFe₂O₄ for rhodamine B degradation: activation by Cu and the contribution of acetylperoxyl radicals / C. Yu, L. Zheng, Y. Hong, J. Chen // Molecules. – 2022. – V. 27. – 6385.
19. Role of CuFe₂O₄ in elemental mercury adsorption and oxidation on modified bentonite for coal gasification / M. An, N. Yuan, Q. Guo, X. Wei // Fuel. – 2022. – V. 328. – 125231.
20. Facile synthesis of PANI/GO/CuFe₂O₄ nanocomposite material with synergistic effect for superb performance supercapacitor / A. Ghasemi, M. Ghorbani, M. Lashkenari, N. Nasiri // Electrochimica Acta. – 2023. – V. 439. – 141685.
21. Dhyani R., Srivastava R., Dixit G. Study of magnetic and temperature-dependent dielectric properties of Co-CuFe₂O₄ nanoferrites // Journal of Electronic Materials. – 2022. – V. 51. – P. 5492–5507.
22. Biosynthesis of Zn-doped CuFe₂O₄ nanoparticles and their cytotoxic activity / M. Darvish, N. Nasrabadi, F. Fotovat, S. Khosravi // Scientific Reports. – 2022. – V. 12. – 9442.
23. Hollow CuFe₂O₄/MgFe₂O₄ heterojunction boost photocatalytic oxidation activity for organic pollutants / Z. Zhang, W. Cai, S. Rong, H. Qu // Catalysts. – 2022. – V. 12. – 9069.
24. Type-II CuFe₂O₄/graphitic carbon nitride heterojunctions for high-efficiency photocatalytic and electrocatalytic hydrogen generation / A. Mehtab, S. Banerjee, Y. Mao, T. Ahmad // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2022. – V. 39. – P. 44317–44329.

25. Naghash-Hamed S., Arsalani N., Mousavi S. The catalytic reduction of nitroanilines using synthesized CuFe_2O_4 nanoparticles in an aqueous medium // *ChemistryOpen*. – 2022. – V. 11. – 910.
26. Kotsyubynsky V., Zapukhlyak R., Boychuk V. Hydrothermally synthesized $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ and $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{porous carbon nanocomposites}$ // *Applied Nanoscience*. – 2021. – V. 12. – P. 1–8.
27. Magnetic CuFe_2O_4 nanoparticles with pseudocapacitive properties for electrical energy storage / W. Liang, W. Yang, S. Sakib, I. Zhitomirsky // *Molecules*. – 2022. – V. 27. – 5313.
28. Rashad M.M., Mohamed R.M., Ibrahim M.A. Magnetic and catalytic properties of cubic copper ferrite nanopowders synthesized from secondary resources // *Advanced Powder Technology*. – 2012. – V. 23. – P. 315–323.
29. Найден Е.П., Журавлев В.А., Итин В.И. Магнитные свойства и параметры структуры наноразмерных порошков оксидных ферритмагнетиков, полученных методом механохимического синтеза из солевых систем // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 857–863.

REFERENCES

1. Novikov A.S., Mostovshchikov A.V. Influence of ultrasonic radiation on the kinetics of alkaline processing of aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 49–56. In Rus.
2. Novikov A.S., Mostovshchikov A.V. Development of a method for synthesis of aluminum phosphate and hydrogen from aluminum production wastes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 24–31. In Rus.
3. Novikov A.S., Mostovshchikov A.V., Sudarev E.A. Comparative analysis of physico-chemical methods for processing aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 24–31. In Rus.
4. Musadamba P., Simuka J., Zimucha T. Impacts of using non automated technologies on the Business Performance of Zimbabwean metal recycling industries. *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society*, 2022, vol. 4, pp. 42–50.
5. Gorman M., Dzombak D., Frischmann C. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, vol. 182, 106424.
6. Liu C., Li G., Zhang L., Wang Q. A three-dimensional comprehensive numerical model of ion transport during electro-refining process for scrap-metal recycling. *Materials*, 2022, vol. 15, 2789.
7. Luo K., Zor S. China's non-ferrous metal recycling technology convergence and driving factors: A quadratic assignment procedure analysis based on patent collaboration-based network structural hole. *PLOS ONE*, 2022, vol. 17, pp. 1–30.
8. Slusarczyk P., Mleczko-Sanecka K. The multiple facets of iron recycling. *Genes*, 2021, vol. 12, 1364.
9. Oguclu O., Yildirim C. Cutting performance analysis of a single shaft shredder for various recycling metal materials. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 2022, vol. 11, pp. 1–10.
10. Guggisberg C., Kim J., Lee J., Chen X., Ryu M. NCOA4 Regulates iron recycling and responds to hepcidin activity and lipopolysaccharide in macrophages. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, 1926.
11. Zolotova E., Kotelnikova A., Ryabinin V. The content of toxic elements in soil-plant system based on ombrotrophic peat with the copper smelting slag recycling waste. *Pollution*, 2023, vol. 9, pp. 286–298.
12. Loibl A., Espinoza L. Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, vol. 169, 105462.
13. Wang T., Berrill P., Zimmerman J., Hertwich E. Copper recycling flow model for the United States economy: impact of scrap quality on potential energy benefit. *Environmental Science & Technology*, 2021, vol. 55, pp. 5485–5495.
14. Yokoi R., Nakatani J., Hatayama H., Moriguchi Y. Dynamic analysis of in-use copper stocks by the final product and end-use sector in Japan with implication for future demand forecasts. *Resources, Conservation & Recycling*, 2022, vol. 180, 106153.
15. Deng H., Wei W., Yao L., Zheng Z., Li B., Abdelkader A., Deng L. Potential-mediated recycling of copper from brackish water by an electrochemical copper pump. *Advanced Science*, 2022, vol. 9, 2203189.
16. Khatibi H., Hassan E., Frisone D., Amiryan M., Farahati R., Farhad S. Recycling and reusing copper and aluminum current-collectors from spent lithium-ion batteries. *Energies*, 2022, vol. 15, 9069.
17. Blinova L., Godovcin P. Importance of recycling the waste-cables containing copper and PVC. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 2021, vol. 48, pp. 1–21.
18. Yu C., Zheng L., Hong Y., Chen J. Activation of peracetic acid with CuFe_2O_4 for rhodamine B degradation: activation by Cu and the contribution of acetylperoxyl radicals. *Molecules*, 2022, vol. 27, 6385.
19. An M., Yuan N., Guo Q., Wei X. Role of CuFe_2O_4 in elemental mercury adsorption and oxidation on modified bentonite for coal gasification. *Fuel*, 2022, vol. 328, 125231.
20. Ghasemi A., Ghorbani M., Lashkenari M., Nasiri N. Facile synthesize of $\text{PANI/GO/CuFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite material with synergistic effect for superb performance supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 2023, vol. 439, 141685.
21. Dhyani R., Srivastava R., Dixit G. Study of magnetic and temperature-dependent dielectric properties of Co- CuFe_2O_4 nanoferrites. *Journal of Electronic Materials*, 2022, vol. 51, pp. 5492–5507.
22. Darvish M., Nasrabadi N., Fotovat F., Khosravi S. Biosynthesis of Zn-doped CuFe_2O_4 nanoparticles and their cytotoxic activity. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, 9442.
23. Zhang Z., Cai W., Rong S., Qu H. Hollow $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{MgFe}_2\text{O}_4$ heterojunction boost photocatalytic oxidation activity for organic pollutants. *Catalysts*, 2022, vol. 12, 9069.
24. Mehtab A., Banerjee S., Mao Y., Ahmad T. Type-II $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{Graphitic carbon nitride}$ heterojunctions for high-efficiency photocatalytic and electrocatalytic hydrogen generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 39, pp. 44317–44329.
25. Naghash-Hamed S., Arsalani N., Mousavi S. The catalytic reduction of nitroanilines using synthesized CuFe_2O_4 nanoparticles in an aqueous medium. *ChemistryOpen*, 2022, vol. 11, 910.

26. Kotsyubynsky V., Zapukhlyak R., Boychuk V. Hydrothermally synthesized $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$ and $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{porous carbon}$ nanocomposites. *Applied Nanoscience*, 2021, vol. 12, pp. 1–8.
27. Liang W., Yang W., Sakib S., Zhitomirsky I. Magnetic CuFe_2O_4 nanoparticles with pseudocapacitive properties for electrical energy storage. *Molecules*, 2022, vol. 27, 5313.
28. Rashad M.M., Mohamed R.M., Ibrahim M.A. Magnetic and catalytic properties of cubic copper ferrite nanopowders synthesized from secondary resources. *Advanced Powder Technology*, 2012, vol. 23, pp. 315–323.
29. Nayden E.P., Zhuravlev V.A., Itin V.I. Magnitnye svoystva i parametry struktury nanorazmernykh poroshkov oksidnykh ferrimagnetikov, poluchennykh metodom mekhanokhimicheskogo sinteza iz solevykh sistem [Magnetic properties and structural parameters of nanosized powders of oxide ferrimagnets produced by mechanochemical synthesis from salt systems]. *Fizika tverdogo tela*, 2008, no. 50, pp. 857–863.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Станиславович Новиков, аспирант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. truegraf1995@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-8364-090X>

Евгений Александрович Сударев, кандидат технических наук, старший преподаватель научно-образовательного центра имени Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sudarev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5596-4048>

Андрей Владимирович Мостовщиков, доктор технических наук, профессор кафедры физической электроники Томского государственного университета системы управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. avmost@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Novikov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. truegraf1995@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-8364-090X>

Evgeniy A. Sudarev, Cand. Sc., Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sudarev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5596-4048>

Andrei V Mostovshchikov, Dr. Sc., Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. avmost@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6401-9243>

Поступила в редакцию: 03.04.2023

Поступила после рецензирования: 30.06.2023

Принята к публикации: 06.12.2023

Received: 03.04.2023

Revised: 30.06.2023

Accepted: 06.12.2023