

Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением

*Р.Д. Тихонов¹, С.А. Поломошнов¹, В.В. Амеличев¹,
А.А. Черемисинов¹, А.М. Ковалев²*

¹НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

R.Tikhonov@tcen.ru

Магнитомягкие тонкие пленки тройной системы CoNiFe являются основой для хранения магнитных данных с высокой плотностью. Электрохимическое осаждение пленок тройной системы CoNiFe по сравнению с «сухими» процессами дает более однородное покрытие с меньшим количеством дефектов и позволяет увеличить толщину пленок без механических напряжений. В работе изучена природа явлений, происходящих в электролите для электрохимического осаждения пленок CoNiFe и приводящих к различию относительного содержания элементов в электролите и пленке. Экспериментально исследован водородный показатель хлоридных электролитов в диапазоне температур 25–70 °С. Проведено электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С. Показано, что растворы солей CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ при концентрации от 0,006 до 1 моль/л характеризуются сложным процессом образования ионного баланса в одиночных и смешанных растворах. Осаждение пленок CoNiFe проведено из хлоридного электролита с отношением содержания компонентов 1:1:1 при средней концентрации 0,083 моль/л каждого компонента. Установлено, что содержание компонентов в пленке при электрохимическом осаждении из трехкомпонентного раствора солей CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ с равной концентрацией каждого компонента не соответствует составу электролита, но приближается к нему при уменьшении концентрации каждого компонента при большой плотности тока.

Ключевые слова: пленки CoNiFe; хлоридный электролит; ионный баланс; электрохимическое осаждение

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр» (г. Москва).

Для цитирования: Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением / Р.Д. Тихонов, С.А. Поломошнов, В.В. Амеличев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 3-4. С. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254>

CoNiFe Triple System Films Formation by Electrochemical Deposition

R.D. Tikhonov¹, S.A. Polomoshnov¹, V.V. Amelichev¹,
A.A. Cheremisinov¹, A.M. Kovalev²

¹SMC «Technological Centre», Moscow, Russia

²National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

R.Tikhonov@tcen.ru

Abstract: High-permeability films of CoNiFe triple system form the basis for high-density magnetic data storage. Electrochemical deposition of CoNiFe films, as contrasted with «dry» processes, gives more homogeneous coating with lesser defect level and allows reinforcing the films thickness without stresses. This study investigates the nature of the phenomena taking place at electrochemical deposition of CoNiFe films and leading to the difference in the relative content of the elements in the electrolyte and in the film. The hydrogen exponent of chloride electrolytes was examined in the temperature range of 25–70 °C and electrochemical deposition of CoNiFe films at 70 °C was studied. It was demonstrated that CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ salt solutions with concentration from 0,006 to 1 mole/l are characterized by complex process of ion balance formation in single and mixed solutions. The deposition of CoNiFe films was carried out from chloride electrolyte with a component content ratio of 1:1:1 at an average concentration of 0,083 mole/l of each component. It has been established that the content of the component in the film at electrochemical deposition of three-component solution CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ with equal concentration of each component did not correspond to the composition of the electrolyte but was closest to the composition of the electrolyte at a decrease in the concentration of each component at high current density.

Keywords: CoNiFe films; chloride electrolyte; ion balance; electrochemical deposition

Acknowledgments: this study work has been performed using the equipment of the Centre for collective use «Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem technology on the basis of the SMC «Technological Centre» (Moscow).

For citation: Tikhonov R.D., Polomoshnov S.A., Amelichev V.V., Cheremisinov A.A., Kovalev A.M. CoNiFe triple system films formation by electrochemical deposition. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 3-4, pp. 246–254. DOI: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-246-254>

Введение. Магнитомягкий тройной сплав CoNiFe применяется в изделиях нано- и микроэлектроники, а также в магнитной памяти с высокой плотностью упаковки [1–4]. Электрохимическое покрытие CoNiFe снижает коррозию и износ в магнитных и электрических устройствах, а также используется для электрокаталитических материалов. Электрохимическое осаждение пленок тройной системы CoNiFe по сравнению с «сухими» процессами дает более однородное покрытие с меньшим количеством дефектов и позволяет при необходимости увеличивать толщину пленок без механических напряжений.

В работе [1] рассматриваются тонкие магнитные пленки $\text{Co}_{65}\text{Ni}_{12}\text{Fe}_{23}$, изготовленные из сульфатного электролита. Такие пленки имеют высокое насыщение намагничивания (2,4–2,59 Тл). При добавлении в электролит хлорида аммония изменяется соотношение компонентов в пленках CoNiFe : происходит обогащение железом или никелем [2]. В результате улучшаются магнитные свойства, снижается коэрцитивная сила и растет магнитная проницаемость. Пленки CoNiFe , полученные электролитическим осаждением из сульфатного электролита, имеют структуру нанокompозитов [3]. Математическая модель, описывающая электроосаждение нанометровых многослойных магниточувствительных структур FeCoNiCu/Cu , разработана для получения нанопроволок [4].

Осаждение электрохимическим методом пленок CoNiFe из сульфатно-хлоридного электролита [5], содержащего, моль/л: NiSO_4 – 0,304, NiCl_2 – 0,084, CoSO_4 – 0,1, FeSO_4 – 0,036 и H_3BO_3 – 20 г/л, показало, что кобальт и железо осаждаются с концентрацией в три раза большей, чем в электролите, а никель – с концентрацией в два раза меньшей. Аномальность зависимости состава пленок тройного сплава от состава электролита не позволяет привести в соответствие состав пленок и состав электролита. Несмотря на то что пленки CoNiFe успешно применяются в микроэлектронике, природа явлений, определяющих химические процессы в электролите и состав пленок, остается невыясненной и требует дальнейших исследований.

Ряд напряжений металлов характеризует их сравнительную активность в окислительно-восстановительных реакциях в водных растворах. Электрохимические потенциалы φ_0 составляют, В: Fe^{2+} – 0,441; Fe^{3+} – 0,0425; Co^{2+} – 0,28; Ni^{2+} – 0,234. Поэтому никель должен осаждаться лучше, чем железо и кобальт, а железо – хуже, чем кобальт. Экспериментальные данные по зависимости состава пленок от состава электролита при электрохимическом осаждении сплавов CoNi , CoFe , NiFe представлены в работах [6, 7] для NiFe , [8, 9] для CoNi , [10] для CoFe .

В работе [6] впервые показана аномальность осаждения железа по отношению к никелю в диапазоне концентраций железа в электролите 5–50 % для осаждения сплава NiFe и зависимость концентрации железа в пленке от плотности тока. В работе [7] аномальность осаждения железа по отношению к никелю демонстрируется при всех концентрациях железа в электролите для осаждения сплава NiFe . В диапазоне концентраций кобальта в электролите до 30 % для осаждения сплава CoNi происходит осаждение пленки с содержанием кобальта до 80 % [8]. В диапазоне концентраций кобальта в электролите 50–85 % для осаждения сплава CoNi происходит осаждение пленки с содержанием кобальта 60–95 % [9]. В диапазоне концентраций железа в электролите 3–40 % для осаждения сплава CoFe происходит осаждение пленки с содержанием железа до 60% [10].

Таким образом, для электрохимического осаждения металлов группы железа характерна аномальность осаждения. Железо осаждается более интенсивно, чем кобальт и никель, кобальт осаждается более интенсивно, чем никель. Оценка скорости осаждения по электрохимическим потенциалам важна, но существует много факторов проведения процессов, определяющих осаждение металлов. Аномальность осаждения проявляется также в тройном сплаве CoNiFe . Согласно экспериментальным данным, состав пленок зависит от температуры, водородного показателя рН, концентрации и состава электролита.

В настоящей работе для выяснения действия факторов, определяющих отклонение состава пленок CoNiFe от состава электролита, исследуется зависимость водородного показателя от температуры хлоридных электролитов с одинаковой концентрацией ком-

понентов и электрохимическое осаждение пленок CoNiFe при температуре 70 °С, которое обеспечивает нормальное и конгруэнтное осаждение сплава NiFe [11, с. 193; 12].

Исследование pH растворов солей $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Водородный показатель pH в водных растворах солей CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 с концентрацией компонентов 0,01–1 моль/л измерялся с помощью pH-метра testo 206 фирмы Testo SE Co. KGaA (Германия). При концентрации 1 моль/л и температуре 25 °С получены следующие значения pH: NiCl_2 – 5,8; CoCl_2 – 4,7; FeCl_2 – 2,7 [13]. Показатель pH смешанного электролита во всем диапазоне изменения концентраций каждого компонента от 0,01 до 1 моль/л тройного электролита с равными концентрациями всех трех солей CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 определялся фактически гидролизом хлорида железа.

Зависимость показателя pH от температуры растворов с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента приведена на рис.1. Повышение температуры до 70 °С усиливает гидролиз. На рис.2 показана зависимость pH смешанного электролита от концентрации для осаждения сплава CoNiFe. Видно, что повышение температуры от 25 до 70 °С усиливает гидролиз смешанного электролита в диапазоне концентраций 0,004–0,5 моль/л практически равномерно.

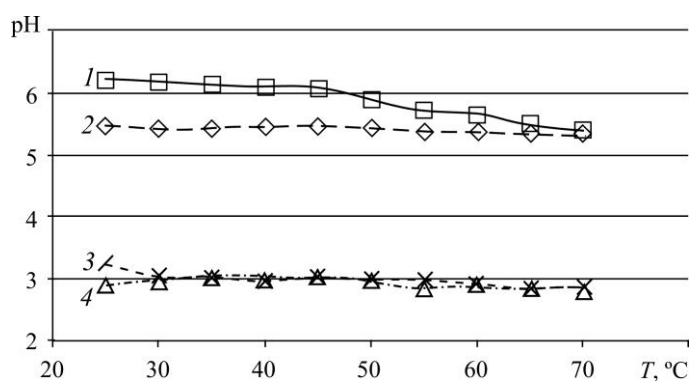


Рис.1. Зависимость pH от температуры электролита для осаждения сплава CoNiFe с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента по отдельности и в смеси (□ – кобальт; ◇ – никель; × – CoNiFe; Δ – железо)
 Fig.1. Dependence of electrolyte pH for the deposition of the CoNiFe alloy with concentrations of 0.083 mole/l of each component separately and in a mixture at a temperature of 25 to 70 °С (□ – cobalt; ◇ – nickel; × – CoNiFe; Δ – iron)

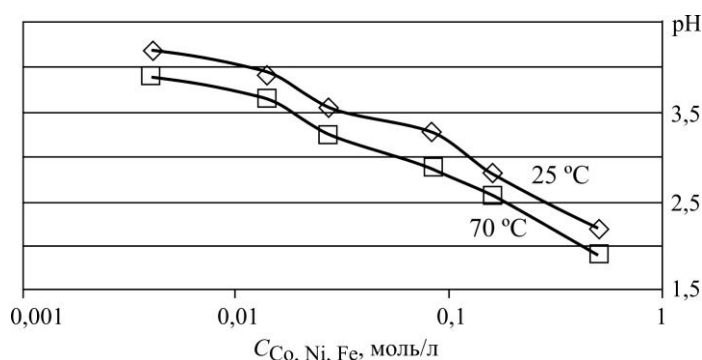


Рис.2. Зависимость pH электролита для осаждения сплава CoNiFe от концентрации C_{CoNiFe} при температуре 25 и 70 °С
 Fig.2. Dependence of electrolyte pH for the deposition of the CoNiFe on the concentrations C_{CoNiFe} at a temperature of 25 to 70 °С

Таким образом, в результате экспериментального исследования водородного показателя рН растворов солей FeCl_2 , NiCl_2 и CoCl_2 получены изменения гидролиза солей в одиночных и смешанных растворах в зависимости от температуры и концентрации.

Электрохимическое осаждения пленок CoNiFe при разной концентрации электролита. Измерения толщины пленок концентраторов проведены с использованием анализатора микросистем MSA-500. Состав пленочных концентраторов магнитного поля исследовали с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора PhilipsXL 40. Состав пленок, полученных электрохимическим осаждением из трехкомпонентного раствора солей FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,006 моль/л, обеспечивает [13] содержание компонентов в пленке, близкое к содержанию состава электролита.

В трехкомпонентном растворе солей CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 с концентрацией каждого компонента 0,48 моль/л при такой же плотности тока на катоде и температуре, как и с концентрацией 0,083 моль/л, содержание компонентов не соответствует составу электролита. Влияние плотности электрического тока на катоде в диапазоне 5–20 mA/cm^2 на состав пленок исследовано при электрохимическом осаждении из электролита с концентрацией примесей 0,48 моль/л (рис.3). Относительное содержание компонентов Co, Ni, Fe в пленке отличается от состава электролита и существенно меняется в зависимости от плотности тока. Подобрать плотность тока для получения состава пленки, равного составу электролита, не представляется возможным.

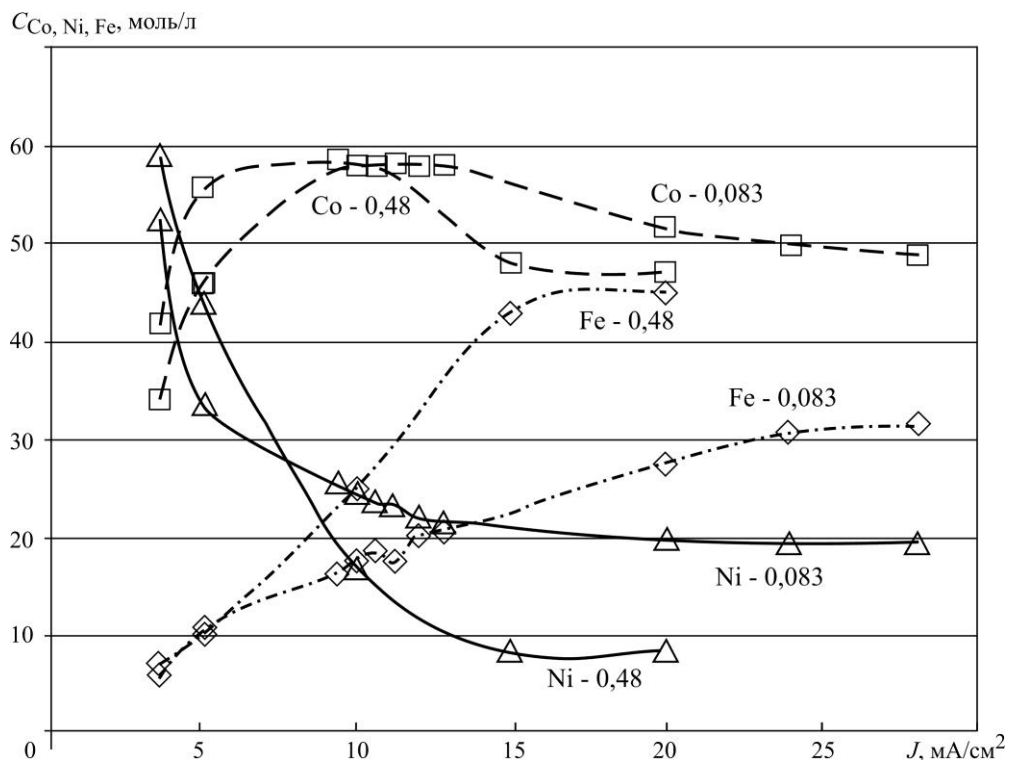


Рис.3. Зависимость состава пленок CoNiFe от плотности тока при осаждении из трехкомпонентного раствора солей CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 с концентрацией C_{CoNiFe} , равной 0,48 или 0,083 моль/л

Fig.3. Dependence on current density of CoNiFe film composition when deposited from three-component salt solutions CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 with concentration C_{CoNiFe} equal to 0.48 mole/l or 0.083 mole/l

Исследовано относительное содержание компонентов Co, Ni, Fe в пленке при осаждении из состава электролита с концентрацией 0,083 моль/л каждого компонента, равной 33,3 %. Результаты приведены на рис.3. Наблюдается слабая зависимость содержания компонентов от плотности тока больше 25 мА/см². В пленке CoNiFe содержание никеля составляет 19–22 %, железа – 28–33 %, кобальта – 55–47 %. При плотности тока менее 25 мА/см² состав пленки CoNiFe существенно изменяется: содержание никеля увеличивается с 19 до 57 %, содержание железа уменьшается с 28 до 5 %, а содержание кобальта составляет 55–42 %.

Сравнение зависимостей состава пленок от плотности тока, полученных из трехкомпонентного раствора солей CoCl₂, NiCl₂, FeCl₂ с концентрацией каждого компонента Co, Ni, Fe, равной 0,48 моль/л или 0,083 моль/л, показало следующее. Преобладание осаждения кобальта сохраняется при всех концентрациях электролита. Повышение плотности тока приводит к уменьшению содержания никеля и повышению содержания железа. Уменьшение концентрации электролита до 0,083 моль/л в области стабилизации зависимости состава пленок от плотности тока 28 мА/см² приближает концентрацию никеля и железа в пленке к составу компонентов в электролите. Кобальт осаждается с концентрацией в 1,44 раза большей, чем в электролите, железо – с концентрацией в 0,97 раза меньшей, чем в электролите, никель – с концентрацией в 0,54 раза меньшей, чем в электролите.

В экспериментах по электрохимическому осаждению пленок CoNiFe из хлоридного электролита с мольным отношением 1:1:1 и содержанием компонентов CoCl₂·6H₂O; NiCl₂·6H₂O; FeCl₂·4H₂O с составом 0,48; 0,083; 0,006 моль/л соответственно проявляется сильная зависимость состава пленок от напряжения между анодом и катодом и концентрации солей в электролите. От концентрации электролита зависит падение напряжения на электродах анода и катода при заданной плотности тока. Скорость осаждения пленок CoNiFe определяется плотностью тока. Изменение состава при больших напряжениях может быть связано с изменением скорости массопереноса в электролите за счет дрейфа ионов в электрическом поле.

Результаты и их обсуждение. Проведенное экспериментальное исследование водородного показателя pH растворов солей CoCl₂, NiCl₂ и FeCl₂ при разной концентрации показывает, как происходит реакция гидролиза в растворах. На диссоциацию молекул соли при гидролизе оказывает влияние несколько факторов:

- хлориды кобальта, никеля и железа образованы слабыми основаниями и сильной кислотой и гидролизуются по аниону. Наиболее сильно гидролизуется хлорид железа (см. рис.2);

- степень гидролиза растет при разбавлении, но рост концентрации тройного электролита приводит к общему увеличению количества молекул, подвергшихся гидролизу (см. рис.3);

- в диапазоне температуры 25–70 °С гидролиз растворов солей CoCl₂, NiCl₂ и FeCl₂ с концентрацией 0,083 моль/л усиливается незначительно;

- при концентрации 0,083 моль/л водородный показатель pH растворов солей CoCl₂, NiCl₂ не оказывает влияния на pH трехкомпонентного раствора, который определяется гидролизом FeCl₂.

Ионные равновесия в электролите FeCl₂ определялись в работе [14] с помощью термодинамического расчета констант равновесия и уравнений баланса массы и заряда. В отличие от принятой полной диссоциации солей в электролите в растворе FeCl₂ происходит образование однократно заряженных ионов (Fe²⁺Cl)⁺, а количество ионов Fe²⁺ меньше. По сравнению с двухзарядными ионами количество однозарядных ионов

CoCl^+ и NiCl^+ в растворах в 10 раз меньше, а нейтральных молекул хлоридов совсем мало [15]. Согласно этим расчетам заряд ионов в растворах солей CoCl_2 , NiCl_2 , FeCl_2 отличается от валентности металлов в солях.

Результаты электрохимического осаждения из трехкомпонентного раствора солей FeCl_2 , CoCl_2 , NiCl_2 с равной концентрацией каждого компонента показывают, что содержание компонентов в пленке не соответствует составу электролита. Состав электролита приближается к составу пленки CoNiFe при уменьшении концентрации каждого компонента в электролите.

Для получения соответствия составов пленки CoNiFe и электролита необходимо учитывать все факторы, влияющие на ионный баланс электролитов и парциальные токи ионов.

Заключение. Использование технологии приготовления электролита с фильтрацией и проведение процесса осаждения при температуре 70°C обеспечивают выбор хлоридного электролита с отношением $C_{\text{Co}}/C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}} = 1/1/1$. Установлено, что отношение концентраций в пленке $C_{\text{Co}}/C_{\text{Ni}}/C_{\text{Fe}} = 1/1/1$ достигается при снижении концентрации каждого компонента в электролите при большой плотности тока.

Пленки CoNiFe при электрохимическом осаждении получены воспроизводимо с минимальными механическими напряжениями и адгезией к подслою никеля.

Литература

1. **Tabakovic I., Venkatasamy V.** Preparation of metastable CoFeNi alloys with ultra-high magnetic saturation ($B_s = 2.4\text{--}2.59\text{ T}$) by reverse pulse electrodeposition // *J. of Magn. and Magn. Mat.* 2018. Vol. 452. P. 306–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.003>
2. Electroplated Fe-Co-Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths / **T. Yanai, K. Koda, J. Kaji et al.** // *AIP Advances*. 2018. Vol. 8. Iss. 5. P. 056127. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5007782>
3. **Romankov S., Park Y.C., Shchetinin I.V.** Mechanical intermixing of elements and self-organization of (FeNi) and (CoFeNi) nanostructured composite layers on a Ti sheet under ball collisions // *J. of Alloys and Comp.* 2015. Vol. 653. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.269>
4. **Li D., Podlaha E.** Template-assisted electrodeposition of Fe-Ni-Co nanowires: Effects of electrolyte pH and sodium lauryl sulfate // *J. Electrochem. Soc.* 2017. Vol. 164 (13). P. D843–D851. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0931713jes>
5. **Yang Y.** Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2015. Vol. 10. Issue 6. P. 5164–5175.
6. **Коровин Н.В.** О катодном процессе при электроосаждении сплава железо-никель // *Журнал неорганической химии*. 1957. Т. 2. № 9. С. 2259–2263.
7. Mechanism of anomalous type electrodeposition of Fe-Ni alloys from sulfate solutions / **H. Nakano, M. Matsuno, S. Oue et al.** // *Mater. Trans.* 2004. Vol. 45. No. 11. P. 3130–3135.
8. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni-Co alloy deposits / **L. Wang, Y. Gao, Q. Xue et al.** // *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 242 (3-4). P. 326–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.08.033>
9. The influence of saccharin on the electrodeposition and properties of Co-Ni alloy thin films / **S. Tebbakh, Y. Messaoudi, A. Azizi et al.** // *Transactions of the IMF – The International Journal of Surface Engineering and Coatings*. 2015. Vol. 93 (4). P. 196–204. DOI: <https://doi.org/10.1179/0020296715Z.000000000247>
10. Preparation, structure and giant magnetoresistance of electrodeposited Fe-Co/Cu multilayers / **B.G. Tóth, L. Péter, L. Pogány et al.** // *J. Electrochem. Soc.* 2014. Vol. 161 (4). P. D154–D162. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.053404jes>
11. **Tikhonov R.** Congruent electrochemical deposition of NiFe alloy: The results of the research. Beau Bassin: Lambert Academic Publishing, 2019. 204 p.
12. **Тихонов Р.Д.** Электрохимическое осаждение сплава NiFe при температуре 70°C // *Электрохимия*. 2020. Т. 56. № 7. С. 666–669. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0424857020070063>
13. **Тихонов Р.Д., Черемисинов А.А., Горелов Д.В., Казаков Ю.В.** Магнитные свойства пленок Co-Ni-Fe , полученных электрохимическим осаждением по методу Тихонова // *Нано- и микросистемная техника*. 2020. Т. 22. № 3. С. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135>

14. Lee M.-S. Use of the bromley equation for the analysis of ionic equilibria in mixed ferric and ferrous chloride solutions at 25 °C // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37 (2). P. 173–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02693146>

15. Lee M.-S., Oh Y.-J. Chemical equilibria in a mixed solution of nickel and cobalt chloride // Mater. Trans. 2005. Vol. 46 (1). P. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.59>

Поступила в редакцию 09.03.2020 г.; после доработки 09.03.2021 г.; принята к публикации 14.04.2021 г.

Тихонов Роберт Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории новых технологических процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Поломошнов Сергей Александрович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории новых технологических процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), PSA@tcen.ru

Амеличев Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник отдела микросистемной техники НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), AVV@tcen.ru

Черемисинов Андрей Андреевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории микроэлектроники и микросенсорики НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), CheremisinovAA@gmail.com

Ковалев Алексей Михайлович – сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), A.kovalev@gmail.com

References

1. Tabakovic I., Venkatasamy V. Preparation of metastable CoFeNi alloys with ultra-high magnetic saturation ($B_s = 2.4\text{--}2.59\text{ T}$) by reverse pulse electrodeposition. *J. of Magn. and Magn. Mat.*, 2018, vol. 452, pp. 306–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.003>

2. Yanai T., Koda K., Kaji J., Aramaki H., Eguchi K., Takashima K., Nakano M., Fukunaga H. Electroplated Fe-Co-Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, iss. 5, pp. 056127. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5007782>

3. Romankov S., Park Y.C., Shchetinin I.V. Mechanical intermixing of elements and self-organization of (FeNi) and (CoFeNi) nanostructured composite layers on a Ti sheet under ball collisions. *J. of Alloys and Comp.*, 2015, vol. 653, pp. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.269>

4. Li D., Podlaha E. Template-assisted electrodeposition of Fe-Ni-Co nanowires: Effects of electrolyte pH and sodium lauryl sulfate. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, vol. 164 (13), pp. D843–D851. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0931713jes>

5. Yang Y. Preparation of Fe-Co-Ni ternary alloys with electrodeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2015, vol. 10, iss. 6, pp. 5164–5175.

6. Korovin N.V. About cathode process at the electrodeposition of Fe-Ni alloy. *Zhurnal neorganicheskoy khimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1957, vol. 2, no. 9, pp. 2259–2263. (In Russian).

7. Nakano H., Matsuno M., Oue S., Yano M., Kobayashi Sh., Fukushima H. Mechanism of anomalous type electrodeposition of Fe-Ni alloys from sulfate solutions. *Mater. Trans.*, 2004, vol. 45, no. 11, pp. 3130–3135.

8. Wang L., Gao Y., Xue Q., Liu H., Xu T. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni-Co alloy deposits. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, vol. 242 (3-4), pp. 326–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.08.033>

9. Tebbakh S., Messaoudi Y., Azizi A., Fenineche N., Schmerber G., Dinia A. The influence of saccharin on the electrodeposition and properties of Co-Ni alloy thin films. *Transactions of the IMF – The International*

Journal of Surface Engineering and Coatings, 2015, vol. 93 (4), pp. 196–204. DOI: <https://doi.org/10.1179/0020296715Z.000000000247>

10. Tóth B.G., Péter L., Pogány L., Revesz A., Bakonyi I. Preparation, structure and giant magnetoresistance of electrodeposited Fe-Co/Cu multilayers. *J. Electrochem. Soc.*, 2014, vol. 161 (4), pp. D154–D162.

DOI: <https://doi.org/10.1149/2.053404jes>

11. Tikhonov R. *Congruent Electrochemical Deposition of NiFe Alloy: The Results of the Research*. Beau Bassin, Lambert Academic Publishing, 2019. 204 p.

12. Tikhonov R.D. Electrochemical deposition of NiFe alloy at 70 °C. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2020, vol. 56, no. 7, pp. 666–669. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0424857020070063>

13. Tikhonov R.D., Cheremisinov A.A., Gorelov D.V., Kazakov Iu.V. The magnetic properties of the Co-Ni-Fe films were obtained by electrochemical deposition by Tikhonov's method. *Nano- and Microsystemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 12–135. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.22.123-135>

14. Lee M.-S. Use of the bromley equation for the analysis of ionic equilibria in mixed ferric and ferrous chloride solutions at 25 °C. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, vol. 37 (2), pp. 173–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02693146>

15. Lee M.-S., Oh Y.-J. Chemical equilibria in a mixed solution of nickel and cobalt chloride. *Mater. Trans.*, 2005, vol. 46 (1), pp. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.59>

Received 09.03.2020; Revised 09.03.2021; Accepted 14.04.2021.

Information about the authors:

Robert D. Tikhonov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher the Research Laboratory New Technological Processes, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), R.Tikhonov@tcen.ru

Sergey A. Polomoshnov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory New Technological Processes, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), PSA@tcen.ru

Vladimir V. Amelichev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Microsystem Technology Department, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), AVV@tcen.ru

Andrey A. Cheremisinov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Microelectronics and Microsensorics, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), CheremisinovAA@gmail.com

Alexey M. Kovalev – Staff Member of the Research Laboratory of Integrated Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), A.kovalev@gmail.com

Уважаемые авторы!

**С правилами оформления и опубликования научных статей
можно ознакомиться на нашем сайте:
<http://ivuz-e.ru>**