

УДК 537.633.9, 537.9

UDC 537.633.9, 537.9

КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ NiFe

KEY FACTORS OF ELECTROLYTIC PRECIPITATION IN FORMING GRANULATED FILMS OF THE NiFe SYSTEM

В. М. Федосюк,

доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, генеральный директор ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

V. Fedosyuk,

Doctor of Physics and Mathematics, member-correspondent of the NAS of Belarus, Chief Executive Officer of SSPA “Scientific-Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Material Studies”

Поступила в редакцию 19.03.21.

Received on 19.03.21.

В работе представлены результаты исследования влияния основных технологических параметров на химический состав объекта исследований. В качестве объекта исследований рассматриваются пленки системы NiFe (высоконикелевый пермаллой) с номинальным соотношением 80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.% от заданного состава. Рассмотрено влияние таких параметров, как температура (Т) и pH электролита, плотность тока (D_c) на химический состав и морфологию поверхности синтезированных пленок. Установлены оптимальные диапазоны параметров для синтеза пленок системы NiFe с заданным соотношением (80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.% от заданного состава), соответствующие $T = 30\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 2,3\text{--}2,4$ и $D_c = 23\text{--}27\text{ mA/cm}^2$.

Ключевые слова: гранулированные пленки, пермаллой, электролитическое осаждение, технологические параметры.

The paper presents the results of studying the impact of basic technological parameters on chemical content of research object. As a research object we consider films of NiFe system (highly-nickel permalloy) with nominal correlation 80 at.% Ni and 20 at.% Fe with minimal deflection 2 at.% from the specified composition. It considers the impact of such parameters as temperature (T) and pH of electrolyte, density of current (D_c) on the chemical content and morphology of surface of synthesized films. It establishes the optimal ranges of parameters for synthesis of films of NiFe system with the specified composition (80 at.% Ni and 20 at.% Fe with minimal deflection 2 at.% from the specified composition) which correspond to $T = 30\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 2,3\text{--}2,4$ and $D_c = 23\text{--}27\text{ mA/cm}^2$.

Keywords: granulated films, permalloy, electrolytic precipitation, technological parameters.

Введение. Пленочные магнитные материалы на основе переходных металлов [1] и их бинарных сплавов [2, 3] вызывают значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Бинарные магнитные сплавы широко используются в качестве функциональных материалов в датчиках магнитных полей, работающих на эффекте гигантского магнитосопротивления [4, 5], а также в качестве электромагнитных экранов для защиты электронного оборудования от поражающих факторов электромагнитного излучения [6–8]. Пермаллой, или прецизионные сплавы, состоящие из железа и никеля (45–82 % Ni), широко известны, хо-

рошо исследованы и пользуются спросом в практических применениях. По составу пермаллои принято делить на низконикелевые (до 50 % Ni) и высоконикелевые (70–80 % Ni). Основными показателями физических параметров данных систем являются значения магнитной проницаемости ($\mu_{\text{нач}}$ начальное и μ_{max} максимальное значения), коэрцитивная сила (H_c), намагниченность насыщения (M_s) и удельное электрическое сопротивление (ρ). На рисунке 1 представлены основные электрические и магнитные параметры в системе NiFe в зависимости от концентрации исходных компонентов в бинарном сплаве [8].

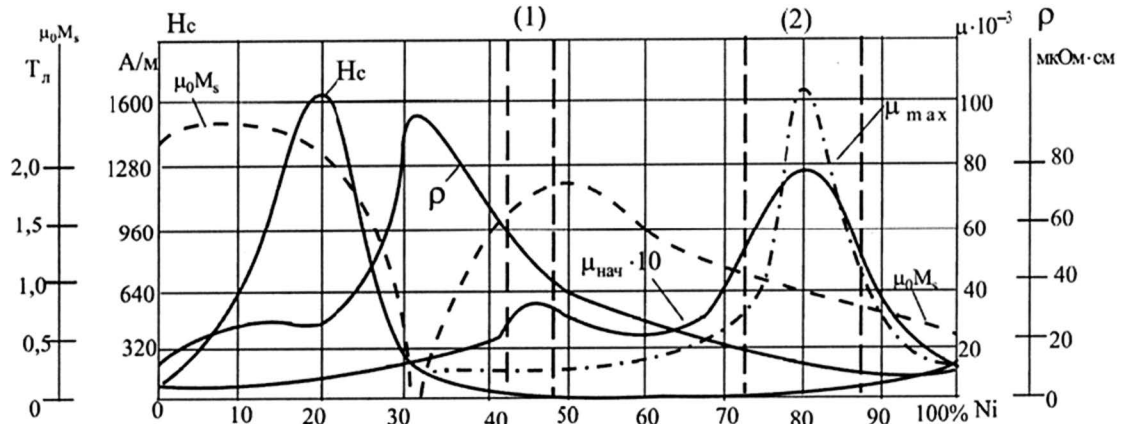


Рисунок 1. – Концентрационная зависимость электрических и магнитных свойств в системе NiFe: $\mu_{нач}$ – начальная магнитная проницаемость; μ_{max} – максимальная магнитная проницаемость; H_c – коэрцитивная сила; M_s – намагниченность насыщения; ρ – электрическое сопротивление [8]

Обе группы пермаллоев легированы различными элементами, например молибденом, хромом, медью и некоторыми другими элементами для улучшения электрических и магнитных характеристик. Эти сплавы также характеризуются отличной коррозионной стойкостью, пластичностью и металлическим блеском. Благодаря своим магнитным свойствам они находят множество применений в различных областях современной техники. Высокие значения магнитных характеристик пермаллоев (магнитная проницаемость, намагниченность насыщения) и их способность легко перемагничиваться в переменных магнитных полях объясняются близостью к нулю константы кристаллографической анизотропии. Однако низкие значения константы анизотропии приводят к большой чувствительности магнитных свойств к внешним механическим воздействиям, что обусловлено формированием внутренних напряжений микроструктуры. Требуемые магнитные и электрические свойства позволяют широко использовать материалы на основе сплава NiFe на практике (электротехника, датчики, электромагнитная защита). Наиболее распространены и широко используются на практике следующие сплавы NiFe (цифра в названии сплава соответствует концентрации Ni в ат.%): высоконикелевые – 79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ, 65НП, 79НМП; низконикелевые – 50НХС, 45Н, 50Н, 50НП, 34 НКМП. Основные преимущества коммерческих материалов на основе системы NiFe для практического применения представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Сопоставление различных марок пермаллоя (сплав NiFe)

№	Коммерческое наименование	Основные свойства для применений
1	79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ	Самая высокая магнитная проницаемость в слабых магнитных полях
2	50НХС	Высокая магнитная проницаемость и высокое электрическое сопротивление в слабых магнитных полях
3	45Н, 50Н	Высокая индукция насыщения
4	50НП, 79НМП, 34НКМП, 65НП	Прямоугольная петля гистерезиса, анизотропия магнитных свойств

Высоконикелевые сплавы представляют особый интерес для использования в качестве функциональных слоев для защиты от внешнего электромагнитного воздействия [8], а также перспективны для использования в качестве магнитных сред в датчиках магнитных полей на основе эффекта магнитосопротивления [4]. Известно, что состав пленок системы NiFe, синтезированных методом электрохимического осаждения, в значительной степени зависит от химического состава электролита [10]. Однако зависимость химического состава от таких технологических параметров, как величина D_c (плотность тока), интенсивность перемешивания, температура (Т) и рН электролита изучена недостаточно.

Кроме того, необходимо учитывать, что между параметрами процесса электролиза существует взаимосвязь, то есть при изменении одного из них могут в значительной степени изменяться и другие параметры. Так, к примеру, чем выше температура электролита, тем ниже должна быть величина рН и тем

более высокая плотность тока допустима при осаждении. Однако при температуре выше 40 °С ионы железа Fe^{2+} окисляются, то есть переходят в ионы Fe^{3+} , а при низком значении $pH < 1,5$ выделяется много водорода, что приводит к появлению питтинга на поверхности и снижению качества пленки. Следует отметить, что корреляция основных технологических параметров синтеза пленок системы NiFe, их химического состава и микроструктуры требует детального исследования как для оптимизации лабораторных процессов, так и для масштабирования техпроцесса. Данная статья посвящена установлению оптимальных технологических режимов при синтезе пленок системы NiFe с высоким содержанием никеля (80 ат.% Ni) для формирования однородных образцов с заданными химическим составом и параметрами микроструктуры.

Основная часть. Электролитическое осаждение – это электрохимический процесс, основанный на восстановлении ионов металлов из раствора (электролита), что позволяет получать пленочные материалы и покрытия на поверхности проводящих материалов. Процесс синтеза осуществляется при пропускании электрического тока через электролит с использованием электродов – катода (поверхность, на которой происходит восстановление ионов металла и растет пленка) и анода (на котором происходит процесс окисления атомов металла и их переход в форму ионов), необходимого для замыкания электрической цепи.

Образцы пленок системы NiFe с заданным соотношением 80 ± 2 ат.% Ni и 20 ± 2 ат.% Fe были синтезированы методом электролитического осаждения. Химический состав электролита: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 210 г / л; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 15 г / л; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 20 г / л; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 60 г / л; H_3BO_3 – 30 г / л; $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ – 30 г/л; сахарин – 2 г/л. Для определения оптимальных режимов были проведены исследования при синтезе пленок NiFe в следующих интервалах технологических параметров: $Dc = 15–40$ мА/см², температура электролита $T = 30–45$ °С, $pH = 1,8–2,6$. Анод никелевый. Соотношение поверхности катода и анода составляло 1: 2. Аноды были покрыты хлориновой тканью. Контроль pH осуществляется каждые 3 часа работы электролита. Оценка морфологии поверхности пленок была произведена с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе Zeiss EVO 10 (Zeiss, Oberkochen, Germany). Химический состав пленок кон-

тролировался методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на детекторе AZtecLive Advanced Ultim Max 40 (Oxford Instruments, Bognor Regis, UK).

Влияние температуры электролита на химический состав пленок системы NiFe. В результате ряда экспериментов был определен наиболее оптимальный температурный интервал для синтеза пленок системы NiFe с номинальным соотношением 80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.% от заданного состава из описанного выше электролита. Оптимальный температурный интервал составляет $T = 30–35$ °С. Следует отметить, что для образцов данного сплава химический состав и магнитные характеристики в указанном температурном диапазоне синтеза изменяются незначительно. Температурный параметр влияет на соотношение концентрации Ni и Fe в указанном сплаве, а также на скорость осаждения пленок.

На рисунке 2 представлены результаты исследования химического состава пленок системы NiFe, синтезированных при различных температурах 30 °С (а), 35 °С (б) и 40 °С (в). Номинальный химический состав образца, полученного при 30 °С – $Ni_{79}Fe_{21}$ (рисунок 2а). При повышении температуры до 35 °С номинальный химический состав образца – $Ni_{79,5}Fe_{20,5}$ (рисунок 2б). При повышении температуры до 40 °С номинальный химический состав образца – $Ni_{81,5}Fe_{19,5}$ (рисунок 2, в). Это не приводит к значительному изменению состава, но способствует снижению скорости выделения водорода и увеличению токового выхода сплава. Систематическое снижение концентрации железа в пленках NiFe вызвано усилением окислительных процессов ионов железа от Fe^{2+} до Fe^{3+} . Зачастую скорость реакций окисления увеличивается с повышением температуры.

Когда температура электролита достигает 45 °С (рисунок 2г), наблюдается значительное отклонение от заданной стехиометрии по железу (снижение концентрации железа). Это также может быть связано с увеличением скорости реакции окисления катионов железа. Номинальный химический состав пленки, синтезированной при $T = 45$ °С, соответствует $Ni_{83,5}Fe_{16,5}$.

Таким образом, оптимальный температурный режим для получения ферромагнитных пленок системы NiFe с заданной концентрацией (80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.%) составляет $T = 30–35$ °С. При повышении температуры выше 45 °С наблюдается значительное снижение кон-

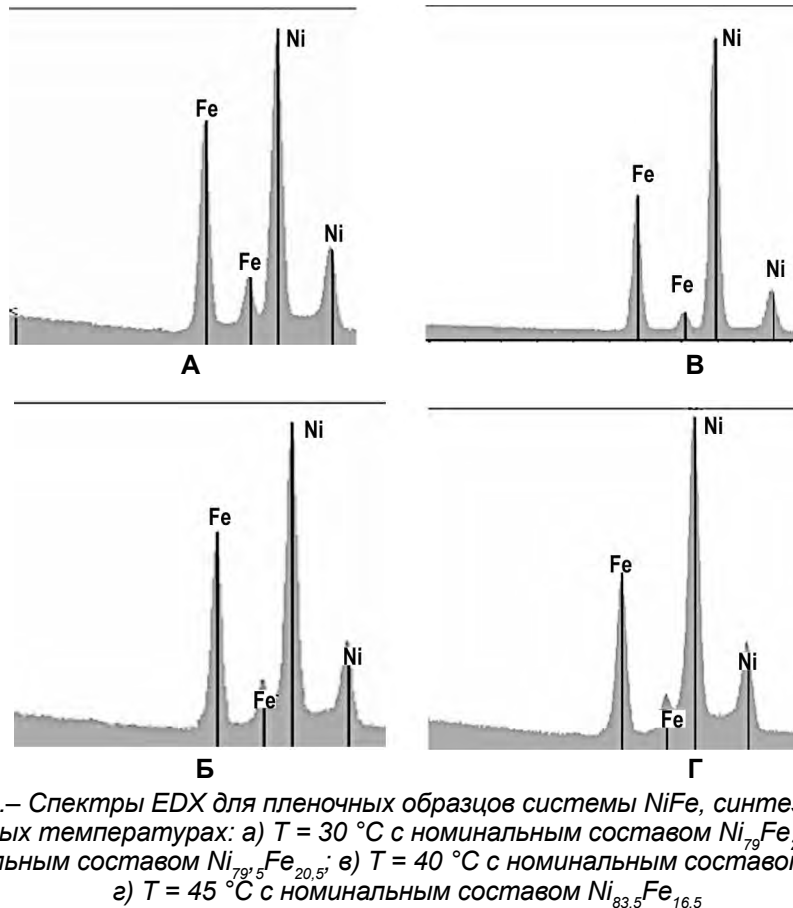


Рисунок 2.– Спектры EDX для пленочных образцов системы NiFe, синтезированных при различных температурах: а) $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ с номинальным составом $\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$; б) $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ с номинальным составом $\text{Ni}_{79,5}\text{Fe}_{20,5}$; в) $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с номинальным составом $\text{Ni}_{81,5}\text{Fe}_{19,5}$; г) $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ с номинальным составом $\text{Ni}_{83,5}\text{Fe}_{16,5}$

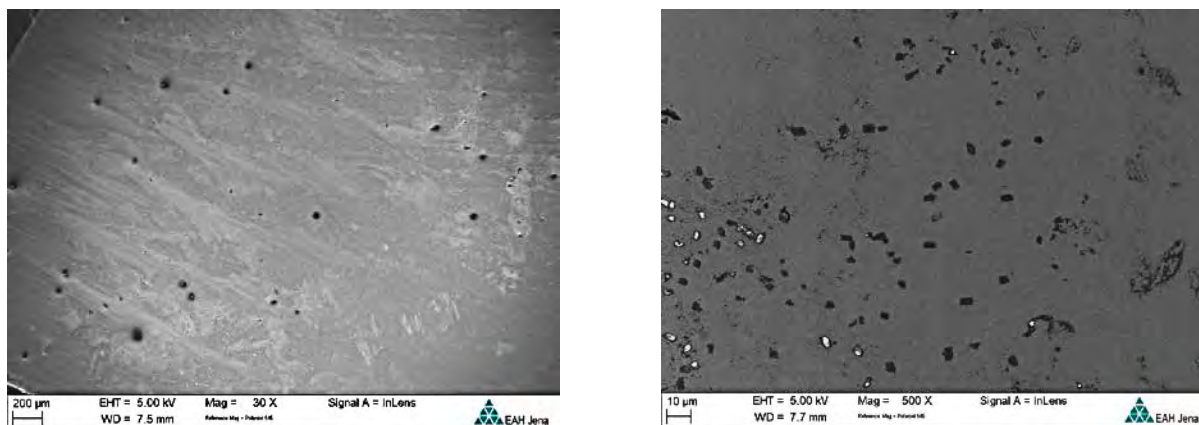
центрации железа (более 3 ат.%) из-за увеличения скорости окислительной реакции ионов железа и перехода части ионов из Fe^{2+} в Fe^{3+} . Кроме того, предпочтительно использовать этот температурный диапазон при масштабировании технологического процесса для снижения энергетических затрат и уменьшения испарения воды из электролита во время процесса осаждения.

Влияние pH электролита на химический состав и морфологию поверхности пленок системы NiFe. При электролитическом осаждении сплавов с номинальным соотношением 80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe на катоде при восстановлении ионов из раствора образуется водород. Фактор pH электролита является одним из основополагающих для контроля химического состава пленки, а также для формирования равномерной и качественной пленки. Контроль и поддержание значения pH в процессе электролитического синтеза является очень важным. Оптимальное значение pH при синтезе пленок с номинальным составом $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ из описанного электролита находится в диапазоне 2,3–2,4, что было установлено путем изучения качества пленок и их химического состава. Уменьшение pH привело к интенсификации процесса окисления ионов железа Fe^{2+} до Fe^{3+} . На рисунке 3а представле-

но СЭМ-изображение поверхности пленки NiFe, синтезированной при $\text{pH} = 1,8\text{--}2,0$.

Уменьшение концентрации ионов Fe^{2+} приводило к уменьшению концентрации железа в образцах. Установлено, что при $\text{pH} < 2,0$ химический состав синтезированной пленки соответствовал $\text{Ni}_{84}\text{Fe}_{16}$. Однако наиболее серьезной проблемой снижения pH было образование серьезных дефектов поверхности пленки. Выделение большого количества водорода при более низком значении pH приводило к питтингу (дефектам в виде «проколов» или углублений на поверхности пленки), что резко ухудшало качество поверхности пленки (рисунок 3а) и магнитных свойств.

Для предотвращения окисления ионов железа и поддержания pH в необходимом диапазоне в электролит вводили комплексообразователь $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$, что позволяло осаждать сплавы постоянного состава во всем диапазоне pH. Также следует отметить, что в процессе синтеза требуется осуществлять корректировку pH путем добавления соответствующего количества H_2SO_4 . На рисунке 3б представлено СЭМ-изображение поверхности пленки NiFe, синтезированной при $\text{pH} = 2,5\text{--}2,6$. Повышение значения $\text{pH} > 2,5$ и более способствовало образованию гидроксидов же-



А

Б

Рисунок 3. – СЭМ-изображения поверхности пленок номинального состава: а) $Ni_{84}Fe_{16}$, синтезированной из электролита с $pH = 1,8-2,0$; б) $Ni_{81}Fe_{19}$, синтезированной из электролита с $pH = 2,5-2,6$

леза и никеля – $Fe(OH)_2$ и $Ni(OH)_2$ на поверхности пленки (рисунок 3б).

Наличие в качестве примеси второй магнитной фазы (гидроксидов магнитных ионов) значительно усложняет процесс осаждения сплава $NiFe$ заданного состава и ухудшает качество ферромагнитных пленок (неравномерное распределение химического состава по поверхности пленки). Неоднородность химического состава и наличие примесных фаз снижают магнитную проницаемость и ухудшают перспективы практического использования в качестве электромагнитных экранов и сенсоров магнитного поля.

Влияние плотности тока на химический состав пленок системы $NiFe$. Оптимальные электрохимические потенциалы для процесса равновесного восстановления

бинарного сплава $Ni_{80}Fe_{20}$ составляют $-1,25...-1,35$ В. В этих условиях указанный материал осаждается в потенциостатическом режиме. В этом случае плотность тока в процессе электролитического осаждения пленок $NiFe$ соответствует $23-27$ mA/cm^2 (рисунок 4).

Синтез пленок системы $NiFe$ с номинальным соотношением 80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.% от заданного состава в гальваностатическом режиме технологически выгоден на поверхностях значительных размеров. В связи с этим наиболее оптимальными режимами плотности тока являются $D_c = 20-25$ mA/cm^2 . В этом режиме формируются плотные и однородные пленочные образцы бинарных магнитных сплавов $NiFe$ с минимальной концентрацией дефектов (рисунок 5а).

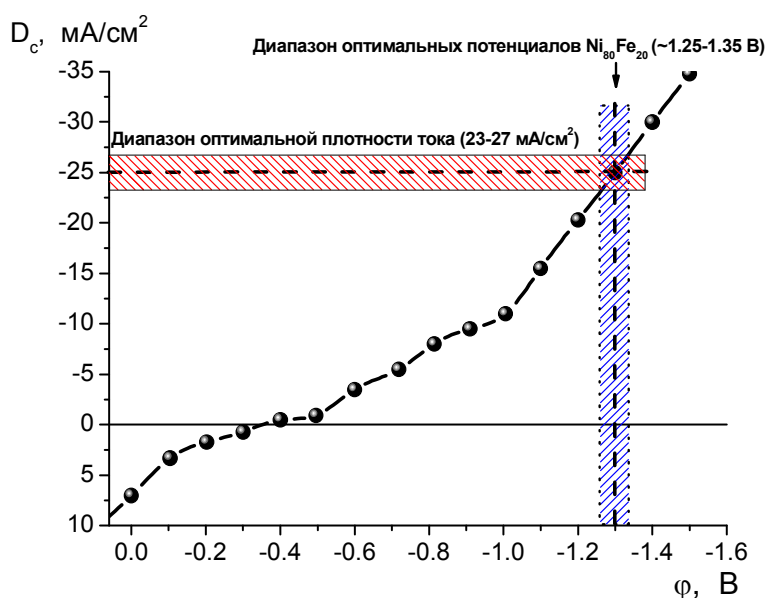
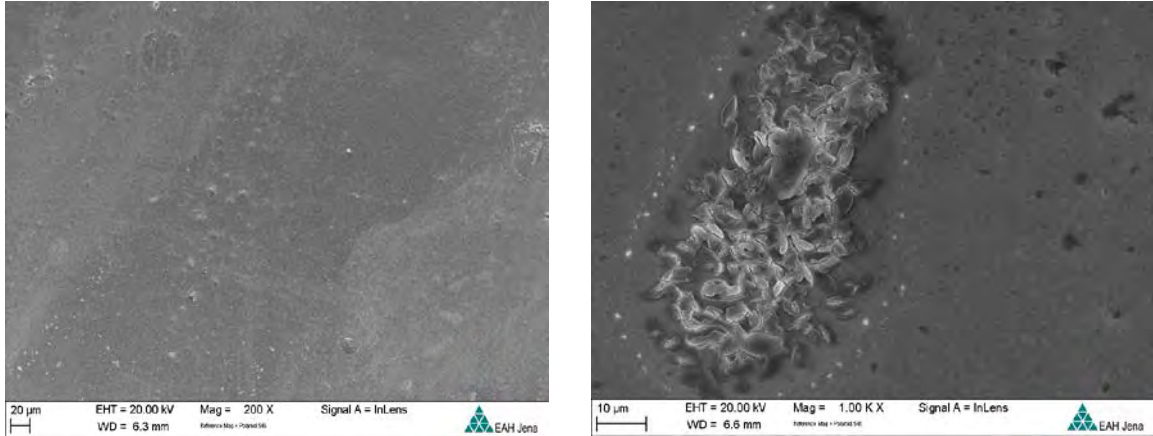


Рисунок 4. – Зависимость плотности тока от величины электрохимического потенциала в процессе синтеза пленочного образца системы $Ni_{80}Fe_{20}$

При высоких плотностях тока возможно образование дефектных участков в виде крупнозернистых дендритов на поверхности пленки (рисунок 5б). Отмечено, что при заданных плотностях тока (D_C в диапазоне 23–27 mA/cm^2) химический состав полученных пленок наиболее близок к заданной стехиометрии $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Согласно данным рисунка 6а,

номинальный химический состав пленки, исследованный методом EDX, полученный при $D_C = 25 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$, соответствует формуле $\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$. Незначительное отклонение от заданной стехиометрии (1 ат.%) не критично для магнитных свойств.

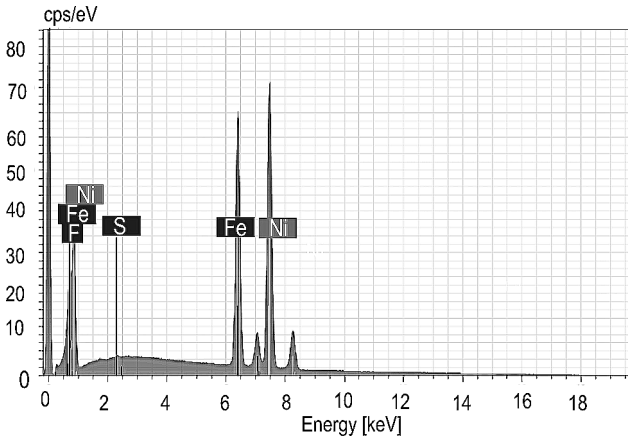
Также было установлено, что увеличение постоянного тока до значений $D_C = 35 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$



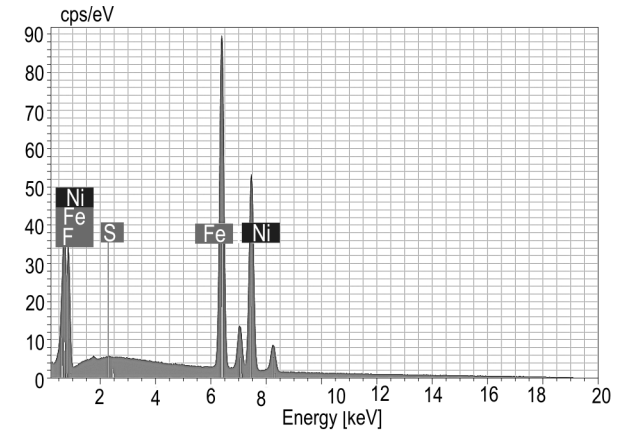
А

Б

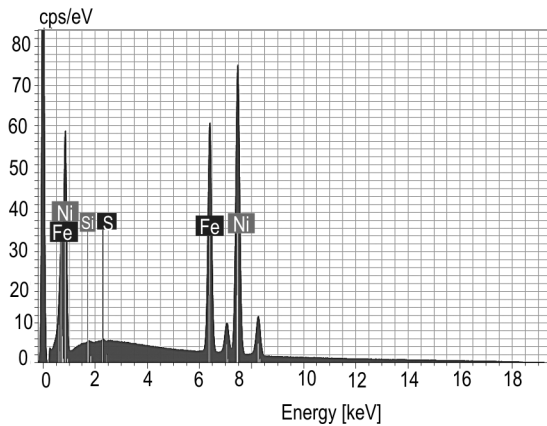
Рисунок 5. – СЭМ-изображения поверхности пленок номинального состава: а) $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, синтезированной при плотности тока $D_C = 25 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$; б) $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, синтезированной при плотности тока $D_C = 35 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$



А



Б



Б

Рисунок 6. – Спектры EDX для пленок системы NiFe, синтезированных при плотности тока: а) $D_C = 25 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ с номинальным составом $\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{21}$; б) $D_C = 35 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ с номинальным составом $\text{Ni}_{72}\text{Fe}_{28}$; в) $D_C = 15 \pm 2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ с номинальным составом $\text{Ni}_{86}\text{Fe}_{14}$

приводит к резкому увеличению содержания железа в пленочных образцах и отклонению от заданной стехиометрии (рисунок 6б) в область составов с высоким содержанием железа $Ni_{72}Fe_{28}$. Отклонение от стехиометрии в сторону увеличения концентрации железа изменяет магнитные и электрические характеристики (увеличивает индукцию насыщения, коэрцитивную силу и снижает магнитную проницаемость). При снижении плотности тока ниже порогового значения 20 mA/cm^2 (при $D_c = 15 \pm 2 \text{ mA/cm}^2$) отмечалось значительное снижение скорости роста ферромагнитных пленок. При исследовании химического состава пленок, полученных при более низких плотностях тока, наблюдалось существенное отклонение от стехиометрического состава железа (концентрация железа в пленках уменьшается). Номинальный химический состав пленки, полученной при плотности тока $D_c = 15 \pm 2 \text{ mA/cm}^2$, соответствовал $Ni_{86}Fe_{14}$ (рисунок 6, в). Отклонение от стехиометрии в сторону уменьшения концентрации железа, как и в случае увеличения концентрации железа, изменяет магнитные и электрические характеристики отдельных частичных слоев (уменьшаются индукция насыщения и магнитная проницаемость, повышается коэрцитивная сила).

Заключение. Методом электролитического осаждения были синтезированы пленки системы NiFe с номинальным соотношением, близким к заданному 80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe. Рассмотрено влияние таких параметров, как температура (Т) и рН электролита, плотность тока (D_c), на химический состав и морфологию поверхности синтезированных пленок. В качестве основных требований при обосно-

вании оптимальных диапазонов параметров синтеза были: отклонение от заданного химического состава не более 2 ат.%, а также отсутствие значительных дефектов поверхности пленок. Установлены оптимальные диапазоны параметров для синтеза пленок системы NiFe с заданным соотношением (80 ат.% Ni и 20 ат.% Fe с отклонением не более 2 ат.% от заданного состава). Показано, что наиболее оптимальным диапазоном температуры электролита является $T = 30\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$. При увеличении температуры концентрация железа в пленках уменьшается, что обусловлено усилением окислительных процессов ионов железа от Fe^{2+} до Fe^{3+} . Показано, что наиболее оптимальным значением рН является 2,3–2,4. При более низких значениях рН отмечено как отрицательное отклонение от заданного состава по железу, так и формирование серьезных дефектов поверхности пленки (питтинг) за счет увеличения выделения водорода на катоде. Увеличение значения рН свыше 2,5 также привело к формированию на поверхности пленки дефектов в виде частиц гидроксидов железа и никеля – $Fe(OH)_2$ и $Ni(OH)_2$. Формирование дефектов на поверхности пленки как в первом, так и во втором случае, значительно ухудшает магнитные характеристики, а также снижает коррозионную стойкость и качество внешнего вида. Показано, что наиболее оптимальным значением D_c является диапазон $23\text{--}27 \text{ mA/cm}^2$. Изменение плотности тока хорошо коррелирует с концентрацией железа в пленках NiFe. Так, увеличение D_c приводит к увеличению концентрации железа, тогда как снижение D_c приводит к обратной тенденции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и магниторезистивные свойства нанокристаллических пленок никеля / Т. А. Тоцицкий [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси (сер. физ.-мат. наук). – 2012. – Т. 1. – С. 101–105.
2. Особенности получения и механизм роста многослойных квазиодномерных систем (Co-Ni-Fe)/Cu в порах матриц анодного оксида алюминия / А. В. Труханов [и др.] // Кристаллография (Поверхность, тонкие пленки). – 2014. – Т. 59, № 5. – С. 815–819.
3. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et. al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2016. – iss. 398. – С. 49–53.
4. Magnetotransport properties and calculation of the stability of GMR coefficients in CoNi/Cu multilayer quasi-one-dimension structures / A. V. Trukhanov [et al.] // Mater. Res. Express. – 2016. – Vol. 3, iss. 6. – 065010.

REFERENCES

1. Struktura i magnitorezistivnye svojstva nanokristallicheskikh plenok nikelya / T. A. Tochickij [i dr.] // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi (ser. fiz.-mat. nauk). – 2012. – T. 1. – S. 101–105.
2. Osobennosti polucheniya i mekhanizm rosta mnogoslojnyh kvaziodnomernyh sistem (Co-Ni-Fe)/Cu v porah matric anodnogo oksida alyuminiya / A. V. Truhanov [i dr.] // Kristallografiya (Poverhnost', tonkie plenki). – 2014. – T. 59, № 5. – S. 815–819.
3. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et. al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2016. – iss. 398. – S. 49–53.
4. Magnetotransport properties and calculation of the stability of GMR coefficients in CoNi/Cu multilayer quasi-one-dimension structures / A. V. Trukhanov [et al.] // Mater. Res. Express. – 2016. – Vol. 3, iss. 6. – 065010.

5. Труханов, А. В. Методика расчета постоянства коэффициентов гигантского магниторезистивного эффекта в многослойных квазиодномерных структурах / А. В. Труханов, С. В. Труханов, С. А. Шарко // ФТДВ. – 2014. – Т. 24, № 1. – С. 74–79.
6. Защита радиоэлектронной аппаратуры от воздействия магнитостатических и низкочастотных электромагнитных полей / Н. Василенков [и др.] // Роскосмос, Макс-2015 : сб. ст. / Федеральное космическое агентство. – 2015. – С. 52–54.
7. Эффективность магнитостатического экранирования цилиндрическими оболочками / С. С. Грабчиков [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси (сер. физ.-тех. наук). – 2015. – № 4. – С. 107–114.
8. AC and DC-shielding properties for the $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ film structures / A. V. Trukhanov [et al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2017. – iss. 443. – С. 142–148.
9. Расчетно-экспериментальные аспекты оптимизации многослойных пленочных структур для эффективного экранирования электромагнитных импульсов / С. А. Акимов [и др.] // Технологии ЭМС. – 2019. – Т. 68, № 1. – С. 30–40.
10. Особенности синтеза многослойных структур на основе электролитически осажденных пленок никель-железо и эффективность их радиационной защиты / С. С. Грабчиков [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси (сер. физ.-тех. наук). – 2017. – № 2. – С. 23–29.
5. *Truhanov, A. V. Metodika rascheta postoyanstva koefficientov gigantskogo magnitorezistivnogo effekta v mnogoslujnyh kvaziodnomernyh strukturah / A. V. Truhanov, S. V. Truhanov, S. A. Sharko // FTDV. – 2014. – T. 24, № 1. – S. 74–79.*
6. *Zashchita radioelektronnoj apparatury ot vozdejstviya magnitostaticheskikh i nizkochastotnyh elektromagnitnyh polej / N. Vasilenkov [i dr.] // Roskosmos, Maks-2015 : sb. st. / Federal'noe kosmicheskoe agentstvo. – 2015. – S. 52–54.*
7. *Effektivnost' magnitostaticheskogo ekranirovaniya cilindricheskimi obolochkami / S. S. Grabchikov [i dr.] // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi (ser. fiz.-tekh. nauk). – 2015. – № 4. – S. 107–114.*
8. *AC and DC-shielding properties for the $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ film structures / A. V. Trukhanov [et al.] // J. Magn. Magn. Mat. – 2017. – iss. 443. – S. 142–148.*
9. *Raschetno-eksperimental'nye aspekty optimizacii mnogoslujnyh plenochnyh struktur dlya effektivnogo ekranirovaniya elektromagnitnyh impul'sov / S. A. Akimov [i dr.] // Tekhnologii EMS. – 2019. – T. 68, № 1. – S. 30–40.*
10. *Osobennosti sinteza mnogoslujnyh struktur na osnove elektroliticheski osazhdennyh plenok nikel'-zhelezo i effektivnost' ih radiacionnoj zashchity / S. S. Grabchikov [i dr.] // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi (ser. fiz.-tekh. nauk). – 2017. – № 2. – S. 23–29.*