

УДК 621.3.049.77.002

## МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЛЕНОК СПЛАВА Co–Ni–Fe, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

© 2022 г. Р. Д. Тихонов<sup>а, \*</sup>, А. А. Черемисинов<sup>а</sup>, М. Р. Тихонов<sup>б</sup><sup>а</sup>НПК “Технологический центр”, Москва, Россия<sup>б</sup>МИЭТ, Москва, Россия

\*E-mail: R.Tikhonov@tcen.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.

После доработки 01.04.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Исследованы магнитные свойства пленок сплава Co–Ni–Fe, изготовленных по технологии локального электрохимического осаждения из хлоридного электролита. Определены зависимости намагничивания от режима осаждения, состава электролита и времени осаждения. Установлено, что использование пленок сплава Co–Ni–Fe с содержанием железа 14–16% позволяет оптимизировать характеристики намагничивания для получения усиления слабых магнитных сигналов. В магнито-полупроводниковых микросистемах пленки сплава Co–Ni–Fe используются для концентраторов магнитного поля, повышающих чувствительность системы.

*Ключевые слова:* сплава Co–Ni–Fe, электрохимическое осаждение пленок, магнитные свойства пленок

DOI: 10.31857/S0544126922050106

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные магнито-полупроводниковые микросистемы (МПМС) в своем составе используют пассивные элементы усиления магнитного поля, значительно повышающие индукцию магнитного поля непосредственно в области магнито-чувствительного преобразователя. Эти элементы получили название концентраторы магнитного поля (КМП). Их применение в составе МПМС позволяет в несколько раз повысить чувствительность к магнитному полю и расширить области применения МПМС [1].

Наиболее распространенным материалом для КМП являются [2, 3] пермаллой Ni–Fe и тройной сплав Co–Ni–Fe из-за высоких магнитомягких свойств [4–11]. Сплав Co–Ni–Fe обладает высокой максимальной относительной магнитной проницаемостью, что характеризует высокий коэффициент усиления магнитного поля, малой коэрцитивной силой менее 1 Э, но проявляются эти свойства в определенном диапазоне изменения состава.

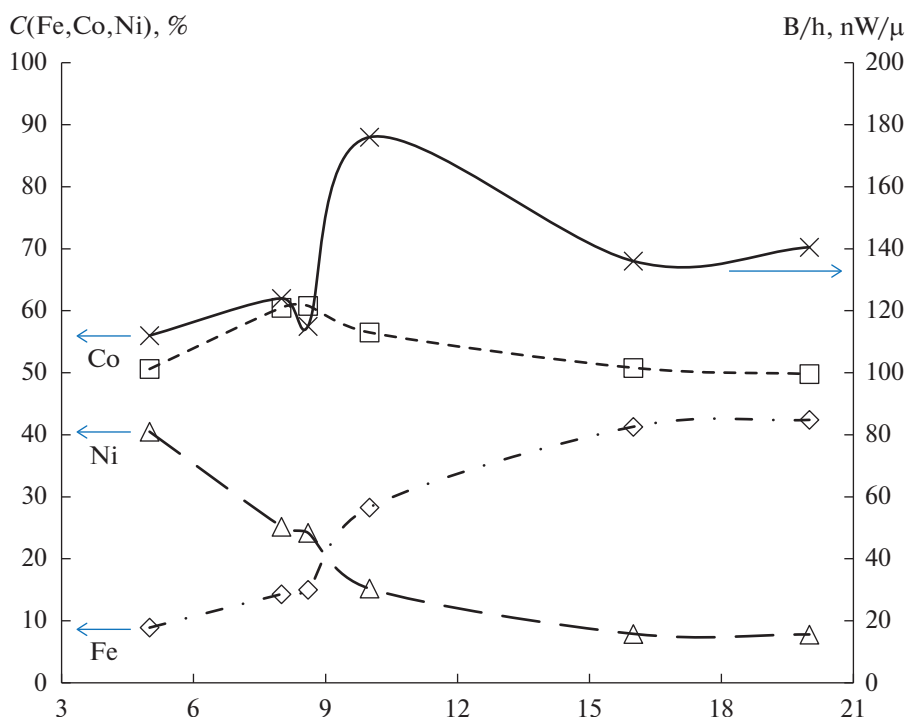
Одним из эффективных способов нанесения сплава Co–Ni–Fe на кремниевые подложки является электрохимическое осаждение при температуре близкой к комнатной. КМП формируются путем осаждения сплав Co–Ni–Fe в локальные области МПМС, ограниченные фоторезистивной маской. На дне данных областей предварительно сформирована металлическая площадка.

Намагничивание пленок сплава Co–Ni–Fe исследовалось многократно, но в основном при малой толщине пленки или нанопроволоки для выявления особенностей физических свойств материала в наноструктурах. Насыщение намагниченности тонких (до 0.1 мкм) пленок сплава Co–Ni–Fe было изучено [12] в зависимости от толщины пленки и показано, что намагниченность не изменяется при толщине пленки более 0.02 мкм. В [13] разработан хлоридный электролит с высокой концентрацией ионов Co<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> для электроосаждения однородной нанопроволоки. Были исследованы температурные зависимости магнито- и электросвойств отдельных нанопроволок.

Исследование относительно толстых 10 мкм пленок сплава Co–Ni–Fe проведено в [14]. Определены магнитные свойства массивов различных геометрических размеров и формы, электроосажденных из сульфат-хлоридного электролита и показаны наилучшие составы сплава Co–Ni–Fe.

Магнитные свойства насыщение магнитной индукции и коэрцитивная сила пленок сплава Co–Ni–Fe исследованы ранее в работах [15–18].

Сравнение намагниченности пленок Co–Ni–Fe и Ni–Fe в зависимости от приложенного магнитного поля показало [15], что крутизна линии намагничивания тройной системы выше в 1.7 раза, что позволяет считать тройную систему более перспективной для применения в преобразователях магнитного поля.



**Рис. 1.** Зависимости насыщения удельного намагничивания  $V/h$  и содержания Fe, Co, Ni в пленках 40-05-10 от плотности тока  $J$  на катоде при проведении процесса осаждения с дозами солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  в электролите 0.5 моль/л при pH 1.5 и зазоре  $L_{A-K} = 30$  мм.

В работе [16] учитывается кинетика электроосаждения сплава Co–Ni–Fe. Установленные экспериментальные особенности электрохимического осаждения сплава описываются последовательностью химических и электрохимических реакций в объеме электролита, на аноде и на катоде.

В работе [17] приведены результаты получения электрохимическим осаждением пленок тройной системы Co–Ni–Fe из хлоридного электролита с заданными равными молярными концентрациями и с отношением равным 1 : 1 : 1 при температуре 70°C. Относительное содержание компонент Co, Ni, Fe в пленке отличается от одинакового содержания компонент в электролите и сильно зависит от плотности тока. Коэрцитивная сила пленок Co–Ni–Fe имеет малую величину при содержании железа в диапазоне 15–30%, аналогично пермаллою, но большая часть никеля замещена кобальтом.

При осаждении из состава электролита с концентрацией каждой соли 0.083 моль/л наблюдается [18] слабая зависимость относительного содержания компонент Co, Ni, Fe в пленке при большой плотности тока осаждения.

Целью исследования является определение коэффициента усиления магнитного поля в концентраторе в зависимости от состава пленок тройной системы Co–Ni–Fe.

Толщина пленок измерялась с помощью микроинтерферометра анализатора микросистем MSA-500. Исследование состава пленок проведено с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора Philips XL 40. Намагниченность пленок на пластинах определялась по потоку магнитного поля на анализаторе магнитных свойств пленок MESA-200, проводящего измерение магнитной индукции в пленке для 4000 дискретных значений напряженности магнитного поля. Магнитная проницаемость пленок рассчитывалась в диапазоне изменения 0–20 Э напряженности магнитного поля  $H$  по отношению изменения магнитной индукции  $B$  к дискретному изменению напряженности магнитного поля  $\mu = \Delta B / \Delta H$ .

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВА И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК СПЛАВА CO–NI–FE ОТ РЕЖИМА ОСАЖДЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

На пластинах 40-05-10 электрохимическое осаждение сплава Co–Ni–Fe проводилось при зазоре между катодом и анодом  $L_{A-K} = 30$  мм из электролита с концентрацией  $C = 0.5$  моль/л солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  с водородным по-

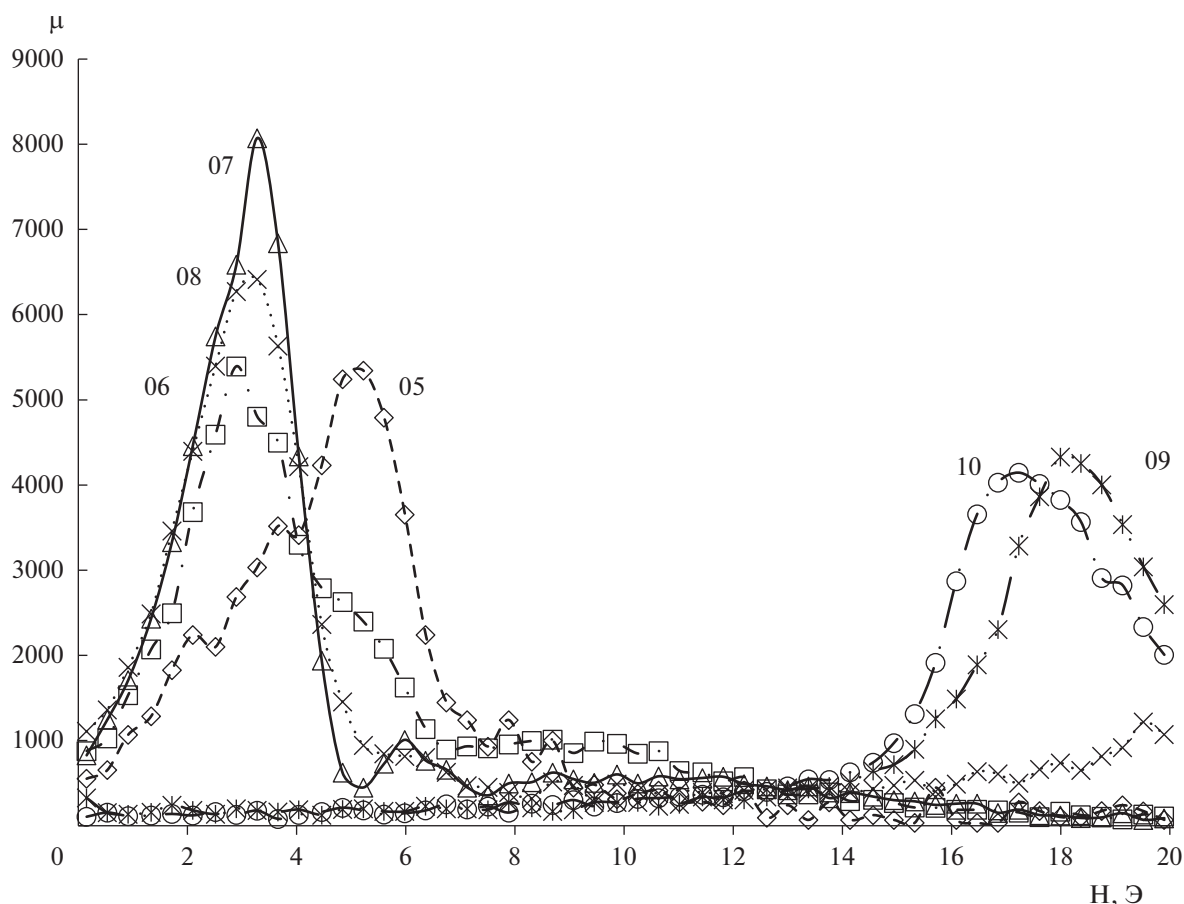


Рис. 2. Кривые зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 40-05–10.

казателем рН 1.46 при плотности тока  $J$  в гальваностатическом режиме.

На зависимостях насыщения удельного намагничивания пленок  $B/h$  от действующей при осаждении плотности тока  $J$ , представленных на рис. 1, наблюдается максимум насыщения намагниченности  $B/h = 178$  нВб/мкм при плотности тока  $J = 10$  мА/см<sup>2</sup>, по сравнению со значениями 112 и 140 нВб/мкм на краевых точках зависимости. Точка максимума на зависимости имеет особенный характер. Зависимость концентрации никеля в пленке спадает при увеличении плотности тока, а зависимость концентрации железа растет и в этой точке наблюдается их совпадение, а на зависимости концентрации кобальта имеется максимум. В этой особой точке при увеличении плотности тока наблюдается снижение скорости осаждения, а коэрцитивная сила  $H_c$  имеет минимальное значение.

Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  в диапазоне 0–20 Э пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 40-05–10 даны на рис. 2.

Наибольшее значение магнитной проницаемости наблюдается на пластине 40-07  $\mu_0 = 827$ ,  $\mu_{\max} = 8043$ .  $\mu_0$  – это величина магнитной проницаемости при близкой к нулю напряженности магнитного поля, а  $\mu_{\max}$  – это величина максимальной величина магнитной проницаемости при соответствующей напряженности магнитного поля. В пленке сплава Co–Ni–Fe происходит усиление магнитного поля с напряженностью до 3.3 Э. Пленка сплава Co–Ni–Fe на пластине 40-07 имеет состав  $Co_{60.8}Ni_{24.2}Fe_{15}$  и не самое высокое значение насыщения индукции магнитного поля 115 нВб. Большие значения коэрцитивной силы от 3.5 до 23.5 Э ограничивают получение большой магнитной проницаемости.

На пластинах 40-11–20, С6 электрохимическое осаждение сплава Co–Ni–Fe проводилось при зазоре между катодом и анодом  $L_{A-K} = 75$  мм из электролита с концентрацией солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$   $C = 0.08$  моль/л с водородным показателем рН 1.96–2.88 при переменной плотности тока  $J$  в гальваностатическом режиме.

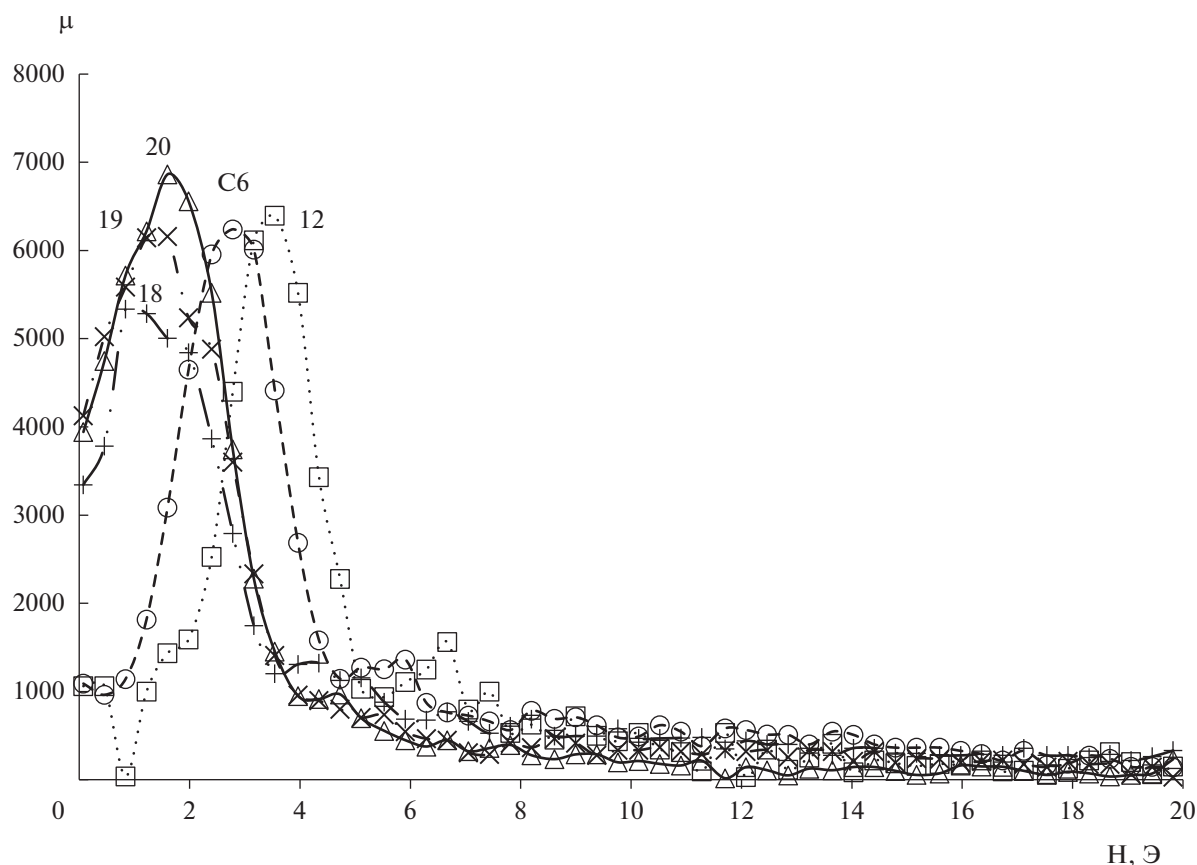


Рис. 3. Кривые зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 40–12, 18–20.

Осаждение пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 40–11–20, С6 с концентрацией солей в электролите 0.08 моль/л и с зазором анод–катод 75 мм дает более воспроизводимые результаты по удельной магнитной индукции насыщения по сравнению с концентрацией солей в электролите 0.5 моль/л и с зазором анод–катод 30 мм, за счет улучшения перемешивания электролита. На пластине 16 насыщение намагничивания достигает 135 нВб/мкм при плотности тока осаждения 15.6 мА/см<sup>2</sup>.

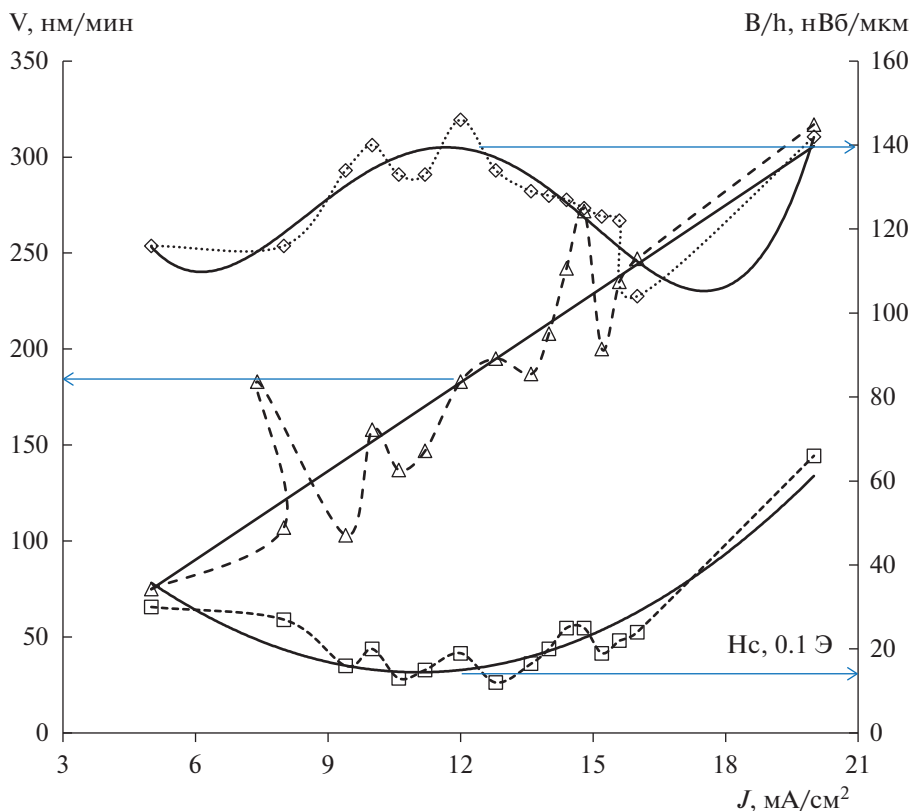
Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 40–12, 18–20, С6 даны на рис. 3. Минимум коэрцитивной силы  $H_c = 1.6$  Э и максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_0 = 4348$  и  $\mu_{max} = 6863$  наблюдаются на пластине 20 при плотности тока осаждения 13.6 мА/см<sup>2</sup> и составе пленки  $Co_{49.8}Ni_{33.7}Fe_{16.5}$ . Величина оптимальной плотности тока с концентрацией солей в электролите 0.08 моль/л больше, чем при электролите с концентрацией солей в электролите 0.5 моль/л.

Минимизация коэрцитивной силы в пленках сплава Co–Ni–Fe за счет выбора режима осаждения увеличивает магнитную проницаемость, как при малых полях, так и в максимуме магнитной проницаемости.

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ, СОСТАВА И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК СПЛАВА Co–Ni–Fe ОТ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА

На пластинах 41–01–09, С1–С8 электрохимическое осаждение сплава Co–Ni–Fe проводилось при зазоре между катодом и анодом  $L_{A-K} = 75$  мм из электролита с концентрацией солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$   $C = 0.08$  моль/л с водородным показателем pH 1.55 при переменной плотности тока  $J$  в гальваностатическом режиме. На пластине 41–С6 насыщение намагничивания достигает 146 нВб/мкм при плотности тока осаждения 12 мА/см<sup>2</sup>.

На рис. 4 представлены зависимости намагничивания  $B/h$ , скорости осаждения  $V$  и коэрцитивной силы  $H_c$  в пленках на пластинах 41–01–09,



**Рис. 4.** Зависимости намагничивания  $B/h$ , скорости осаждения  $V$  и коэрцитивной силы  $H_c$  в пленках 41-01-08, С1-С8 от плотности тока  $J$  на катоде при проведении процесса осаждения с дозами солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  в электролите 0.08 моль/л при pH 1.55 и зазоре  $L_{A-K} = 75$  мм.

С1-С8 от плотности тока  $J$  на катоде при проведении процесса осаждения.

Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co-Ni-Fe на пластинах 41-01, 02, 08, С2, С4, С5 даны на рис. 5.

Наибольшее значение магнитной проницаемости наблюдается на пластине 41-08  $\mu_0 = 4137$ ,  $\mu_{max} = 9114$ . В пленке сплава Co-Ni-Fe происходит максимальное усиление магнитного поля напряженностью 2.2 Э. Пленка сплава Co-Ni-Fe на пластине 41-08 имеет состав  $Co_{58.4}Ni_{25.5}Fe_{16.1}$  и

не самое высокое значение насыщения индукции магнитного поля 134 нВб. Из зависимостей удельной намагниченности  $B/h$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  в диапазоне магнитного поля 0-20 Э пленок сплава Co-Ni-Fe на пластинах 41-01-08, С1-С8 следует, что получение большой магнитной проницаемости в магнитных полях до 20 Э достигается при коэрцитивной силе порядка 1.5 Э.

#### 4. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ, СОСТАВА И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛЕНОК СПЛАВА Co-Ni-Fe ОТ ВРЕМЕНИ ОСАЖДЕНИЯ

На пластинах 42-7-12, 19-24 электрохимическое осаждение сплава Co-Ni-Fe проводилось при зазоре между катодом и анодом  $L_{A-K} = 75$  мм из электролита с концентрацией солей  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$   $C = 0/08$  моль/л с водородным показателем pH 1.62, с добавками  $H_3BO_3$  20 г/л, сахарина 1.5 г/л, HCl 2 мл/л с pH 1.62, при одинаковой плотности тока  $J = 12.8$   $mA/cm^2$  для всех процессов в гальваностатическом режиме. Проведена фильтрация рас-

**Таблица 1.** Магнитная проницаемость пленок сплава Co-Ni-Fe на пластинах 40-07, 40-20, 41-08, 42-23.

	40-07	40-20	41-08	42-23
$\mu_0$	827	4348	4137	5945
$\mu_{max}$	8073	6863	9114	12320
H, Э	3.3	1.6	2.2	1.64
Co	49.8	49.8	58.4	58.5
Ni	33.7	33.7	27.4	27.4
Fe	16.5	16.5	16.1	14.1

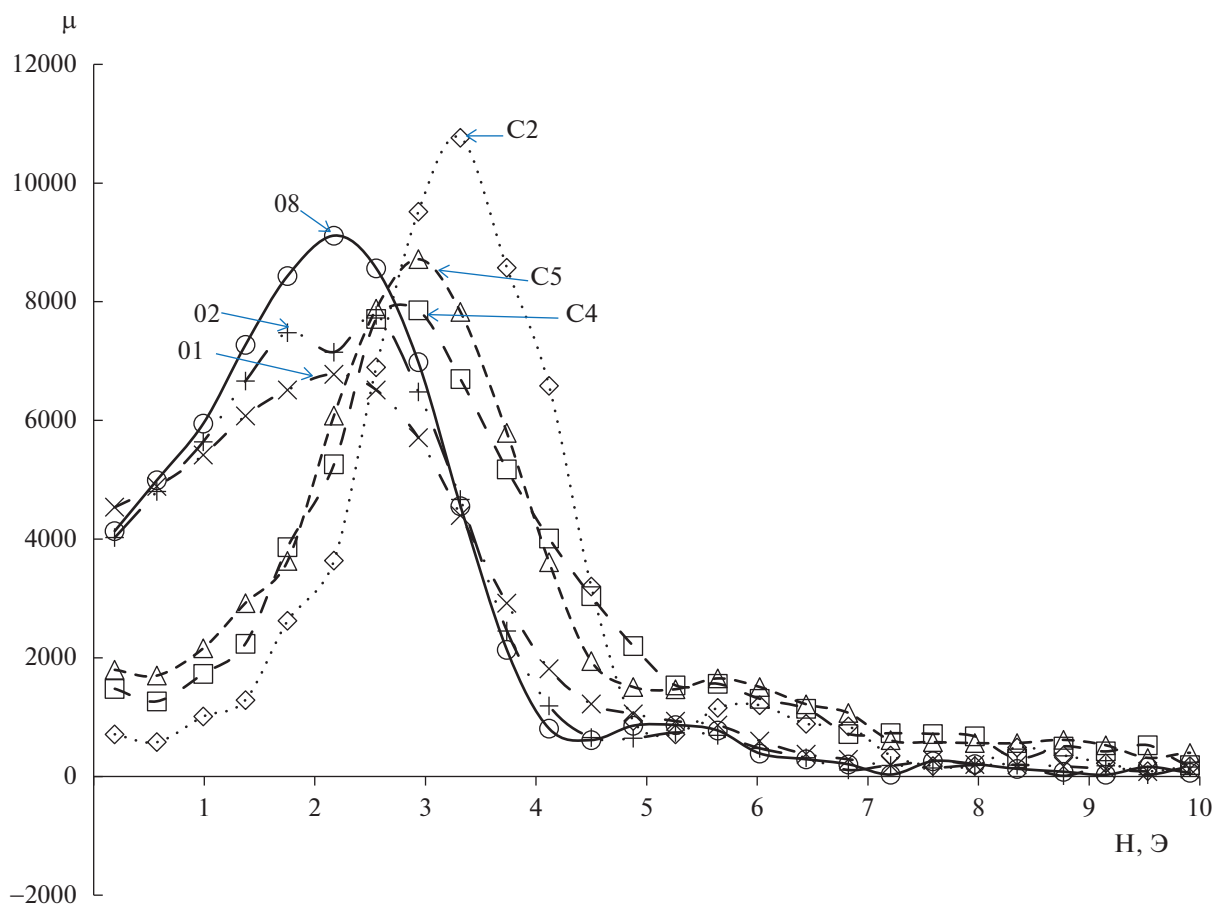


Рис. 5. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 41-01, 02, 08, C2, C4, C5.

творов железа, никеля и кобальта. Из раствора соли  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  на фильтре выпал осадок ржавчины. Добавки в электролит введены сразу после смешения солей.

На рис. 6 приведены зависимости скорости осаждения  $V$  и состава пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 42-07–12, 19–24 от суммарной толщины  $h_{\Sigma}$  пленок, полученных с различным временем электрохимического осаждения из одного электролита при плотности тока  $12.8 \text{ mA/cm}^2$ .

Состав пленок немного изменяется, а скорость осаждения уменьшается более чем в два раза при осаждении пленок с суммарной толщиной  $85 \text{ мкм}$  на площади  $50 \text{ см}^2$  (объем осадка  $0.425 \text{ см}^3$ ). Уменьшение скорости осаждения связано с истощением электролита.

На рис. 7 приведены зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля  $H$  пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 42-10, 12, 19, 23, 24. Максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_0 = 5945$ ,  $\mu_{\text{max}} = 12320$  наблюдаются на пластине 23 при плотности тока осаждения  $12.8 \text{ mA/cm}^2$ , мини-

мальной скорости осаждения и составе пленки  $\text{Co}_{58.5}\text{Ni}_{27.4}\text{Fe}_{14.1}$ .

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенное определение коэффициента усиления магнитного поля в концентраторе в зависимости от состава пленок тройной системы Co–Ni–Fe представлено в табл. 1 в виде данных по магнитной проницаемости и составу для пленок с наибольшей проницаемостью из 3 партий пластин. Высокие значения магнитной проницаемости наблюдаются при содержании в тройном сплаве Co–Ni–Fe концентрации железа 14–17%, никеля 25–35%, кобальта 50–60%.

На рис. 8 тройной системы Co–Ni–Fe приведены данные по индукции насыщения  $B_s$  для монокристаллического сплава согласно [20] и для пленок по данным работы [4]. Наши данные указаны стрелками. Сплав такого состава тройного магнитного сплава Co–Ni–Fe может иметь специальное название ТРЕМАГ.

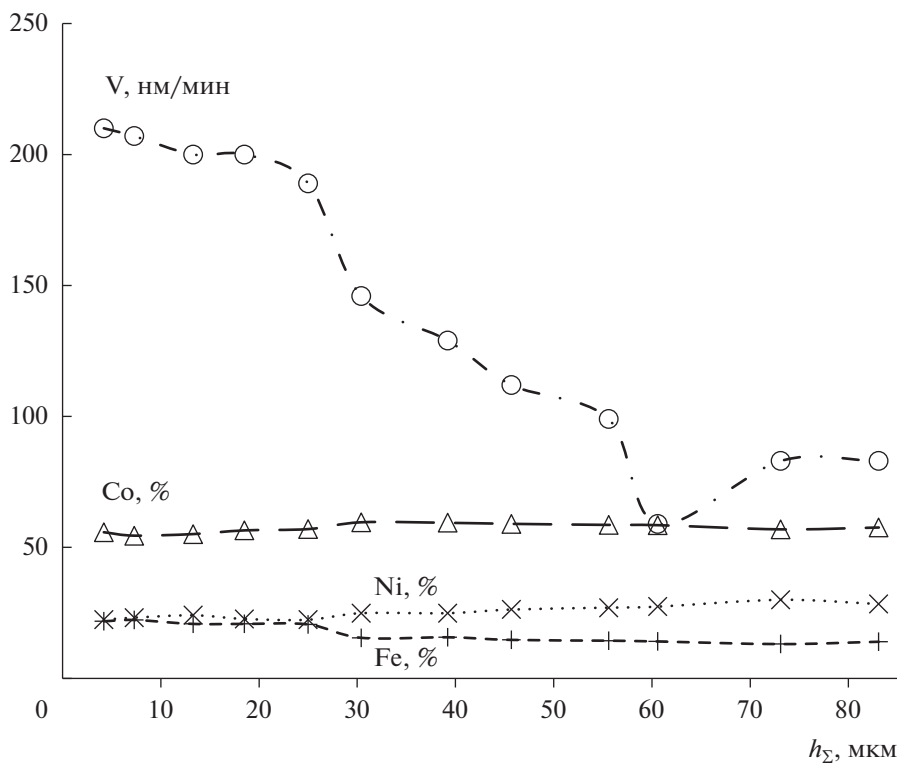


Рис. 6. Зависимости скорости осаждения V и состава пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 42-07–12, 19–24.

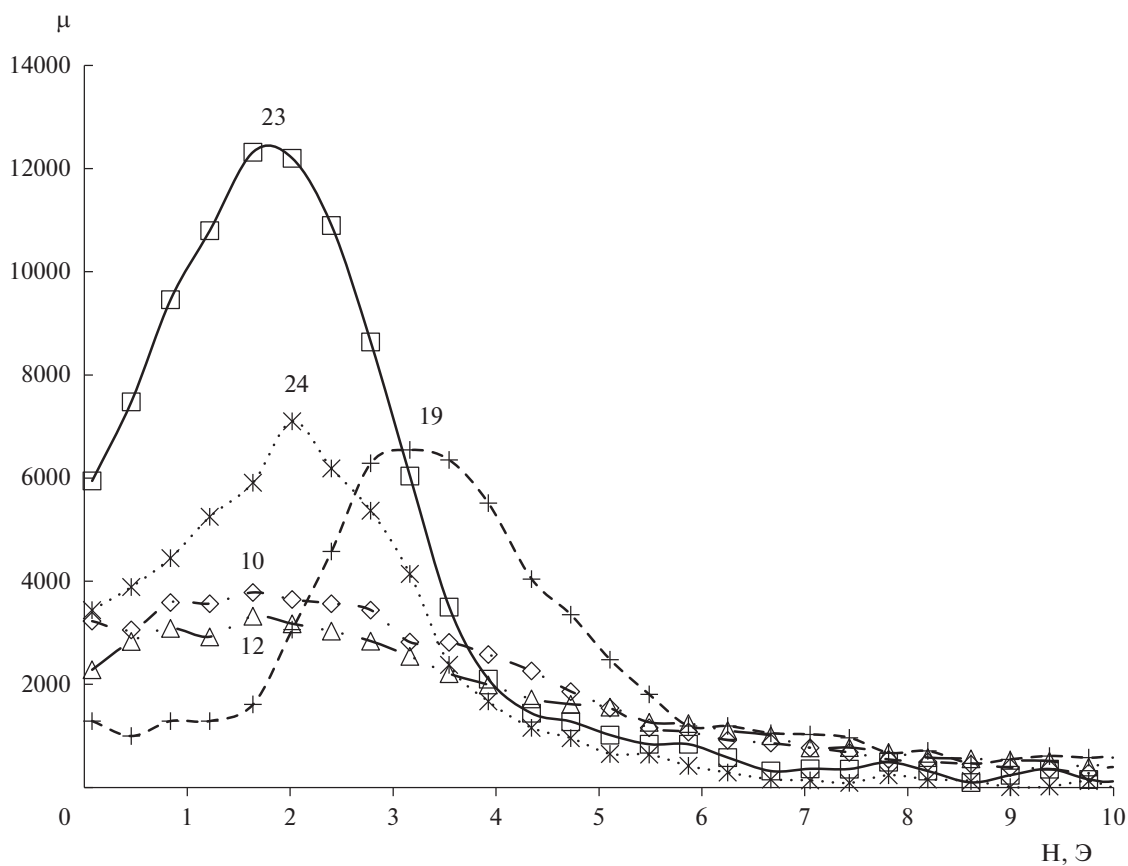
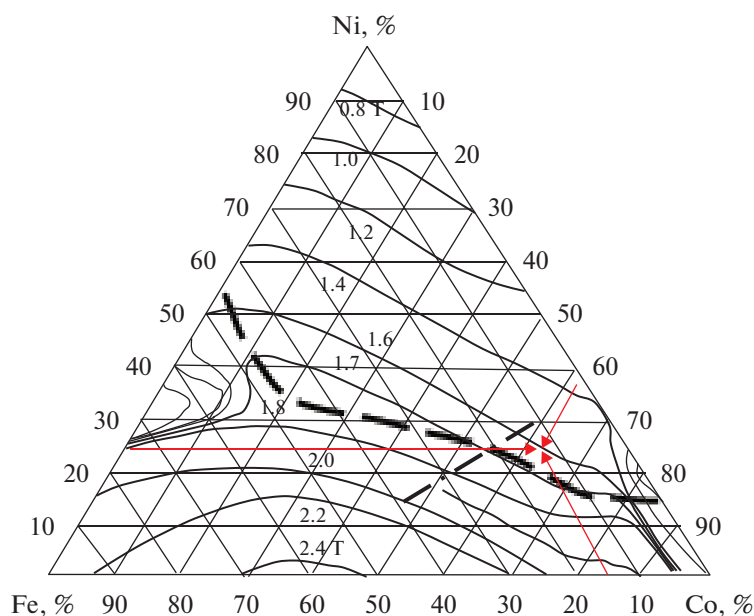
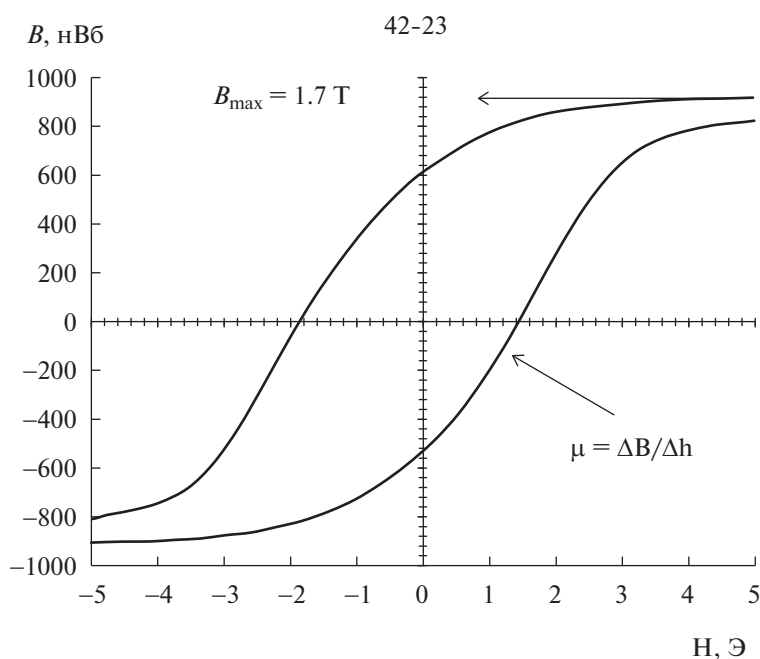


Рис. 7. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  от величины напряженности магнитного поля H пленок сплава Co–Ni–Fe на пластинах 42-10, 12, 19, 23, 24.



**Рис. 8.** Распределение значений индукции насыщения  $B_s$  в зависимости от состава тройного сплава Fe–Co–Ni в пленках (обозначено линиями штрих и штрих-пунктир), и в монолитном сплаве (обозначено областями).



**Рис. 9.** Кривая намагничивания пленки 905-43-23.

На рис. 9 представлена кривая намагничивания пленки 42-23. Магнитный поток пленки 42-23, приходящийся на толщину пленки  $B/h = 138$  нВб/мкм при ширине области магнитной пленки 80 мм, соответствует плотности насыщения магнитного потока в пленке  $B_{\max} = 1.725$  Т, которая соответствует данным на рис. 8 для монолитного сплава.  $H_c = 1.6$  Э.

Большая величина насыщения магнитной индукции пленок сплава Co–Ni–Fe является важной характеристикой магнитомягкого материала. Необычно высокое значение намагничивания достигалось ранее [10] при импульсном реверсивном осаждении метастабильных тонких магнитных пленок  $Co_{65}Ni_{12}Fe_{23}$  из сульфатного электролита с насыщением намагничивания 2.4–2.59 Т.



Получение высокой величины насыщения магнитной индукции является достижением используемого способа электрохимического осаждения.

Однако, для усиления магнитных сигналов в магнитополупроводниковых микросистемах (МПМС) концентраторы магнитного поля (КМП) в области магниточувствительного преобразователя должны иметь большую магнитную проницаемость в области слабых магнитных полей. Их применение в составе МПМС позволяет в несколько раз повысить чувствительность к магнитному полю и расширить области применения МПМС. Проведенное исследование дает возможность оптимизировать параметры концентраторов магнитного поля для усиления слабых магнитных полей.

Получение пленок сплава Co–Ni–Fe для концентраторов усилителей магнитного поля с оптимальными свойствами магнитной проницаемости достигается выбором условий проведения электрохимических процессов осаждения пленок с составом сплава  $\text{Co}_{50-60}\text{Ni}_{25-35}\text{Fe}_{14-17}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология локального конгруэнтного электрохимического осаждения из хлоридного электролита позволяет получать пленки сплава Co–Ni–Fe для концентраторов магнитного поля. В области слабых магнитных полей магниточувствительности преобразователя концентраторы усиливают магнитное поле за счет большой магнитной проницаемости.

Пленочная система формирования магнитного поля используются для создания датчиков магнитного поля различного назначения на основе магниторезисторов, датчиков Холла, магнитотранзисторов. Система обладает новым качеством в датчиках магнитного поля – повышенной чувствительностью к слабым магнитным полям, направленным параллельно поверхности подложки и расширенным диапазоном чувствительности.

Выбор состава пленки сплава Co–Ni–Fe с названием ТРЕМАГ при электрохимическом осаждении позволяет формировать кривую намагничивания КМП, наиболее подходящую реализуемой МПМС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амеличев В.В., Абанин И.Е., Аравин В.В., Костюк Д.В., Касаткин С.И., Резнев А.А., Сауров А.Н. Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем // Известия ВУЗов. Электроника. 2015. № 21(5). С. 505–510.
2. Тихонов Р.Д., Черемисинов А.А. Намагничивание пленок пермаллоя // Микроэлектроника. 2017. № 46(2). С. 104–113. [Tikhonov R.D., Cheremisinov A.A., Magnetization of Permalloy Films // Russian Microelectronics, © Pleiades Publishing, Ltd., 2017, V. 46 (2), P. 95–104.]
3. Li Zh, Sun X., Zheng Y., Zhang H., Microstructure and magnetic properties of micro Ni-Fe alloy arrays for MEMS application // J. Micromech. Microeng. 2013. V. 23 (8). P. 1–8.
4. Sverdlov Ye., Rosenberg Yu., Rosenberg Yu.I., Zmood R., Erlich R., Natan S., Shacham-Diamond Yo. The electrodeposition of cobalt–nickel–iron high aspect ratio thick film structures for magnetic MEMS applications // Microelectronic Engineering. 2004. V. 76. P. 258–265.
5. Yoo B.Y., Hernandez S.C., Park D.Y., Myung N.V., Electrodeposition of Fe–Co–Ni thin films for magnetic-MEMS devices // Electrochim. Acta. 2006. V. 51(28), P. 6346–6352.
6. Sundaram K., Dhanasekaran V., Mahalingam T. Structural and magnetic properties of high magnetic moment electroplated Co–Ni–Fe thin films // Ionics 2011. V. 17(9). P. 835–842.
7. Khomenko E.V., Shalyguina E.E., Chechenin N.G. Magnetic properties of thin Co–Fe–Ni films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2007. V. 316. P. 451–453.
8. Watanabe Yo., Otsubo M., Takahashi A., Fukunaga H. Temperature Characteristics of a Fluxgate Current Sensor with Fe–Ni–Co Ring Core // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. V. 51(11).
9. Li D., Podlaha E. Template-Assisted Electrodeposition of Fe–Ni–Co Nanowires: Effects of Electrolyte pH and Sodium Lauryl Sulfate // Journal of The Electrochemical Society. 2017. V. 164 (13). D843.
10. Tabakovic I., Venkatasamy V. Preparation of metastable Co–Fe–Ni alloys with ultra-high magnetic saturation ( $B_s = 2.4\text{--}2.59\text{ T}$ ) by reverse pulse electrodeposition // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. V. 452. P. 306–314.
11. Миляев М.А., Банникова Н.С., Наумова Л.И., Проглядо В.В., Патраков Е.И., Каменский И.Ю., Устинов В.В., Магнитосопротивление сверхрешеток Co–Ni–Fe/Cu с различным составом ферромагнитного сплава // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120(9). С. 905–912.
12. Tobakovic I., Inturi V., Riemer S. Composition, structure, stress, and coercivity of electrodeposited soft magnetic Co–Ni–Fe films // Journal of the Electrochemical Society. 2002. V. 149(1). P. 18–22.
13. Cesiulis H., Tsyntsaru N., Podlaha E.J., Li D., Sort J. Electrodeposition of Iron-Group Alloys into Nanostructured Oxide Membranes: Synthetic Challenges and Properties // Current Nanoscience. 2019. V. 15(1). P. 84–99.
14. Yanai T. et al. Electroplated Fe–Co–Ni films prepared in ammonium-chloride-based plating baths // AIP ADVANCES. 2018. V. 8(056127). P. 1–5.
15. 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. № 22(3). С. 123–135.

16. Тихонов Р.Д. Электрохимическое осаждение сплава Co–Ni–Fe из концентрированного хлоридного электролита // Нано- и микросистемная техника. 2020. № 22(8). С. 422–433.
17. Тихонов Р.Д., Черемисинов А.А., Тихонов М.Р. Ионный разряд при электрохимическом осаждении пленок Co–Ni–Fe // Электрохимия. 2021. № 57(12), С. 756–761.
18. Тихонов Р.Д., Черемисинов А.А., Поломошнов С.А., Амеличев В.В., Ковалев А.М. Формирование пленок тройной системы Co–Ni–Fe электрохимическим осаждением // Известия ВУЗов, Электроника. 2021. № 26(3–4). С. 246–254.
19. Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Горелов Д.В., Казаков Ю.В. Амеличев В., Николаева Н.Н. Магнитомягкие пленки пермаллоя полученные электрохимическим осаждением из хлоридного электролита // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2015. № 4. С. 26–31.
20. Tiffany Yun, Wen Jiang. Effects of additives on magnetic properties of electroplated Co–Ni–Fe films // Master's Theses, San Jose State University, 2008.