

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук
(ИППИМ РАН)

Отдел проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий

УДК 548:537.621

№ госрегистрации 115082440008

Инв. № АААА-Б16-216022450098-9

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИППИМ РАН, академик РАН

А.Л. Стемповский

« 24 » октября 2015 г.

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

Разработка методов повышения чувствительности и принципов проектирования биосенсоров на основе магнитных микро- и наноэлементов

по Программе фундаментальных исследований ОНИТ РАН

«Биоинформатика, современные информационные технологии в математические методы медицины»

(промежуточный, этап 2015 г.)

шифр «Вега-О-Н-Ск-2017»

Заместитель директора по научной работе,
д.т.н., проф.

А.Д.Иванников

" 21 " 12 2015 г.

Научный руководитель НИР,
заведующий отделом, д.т.н.

В.А. Скиданов

" 21 " 12 2015 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
д.т.н.



Подпись, дата

Скиданов В. А.
(Введение, Заключение,
раздел 1,2)

Исполнители

ведущий научный сотрудник,
к.ф.-м.н.



Островская Н.В.
(Введение, Заключение,
разделы 1,2)

старший научный сотрудник,
к.ф.-м.н.



Панина Л.В.
(Введение, Заключение,
раздел 3)

Инженер-исследователь



Скиданова Л.А.
(раздел 1)

Инженер-исследователь



Ковтун А.С.
(раздел 2)

РЕФЕРАТ

Отчет 21 стр., 9 рис., 13 источников литературы

БИОСЕНСОРЫ, МАГНИТООПТИКА, ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ КЕРРА, МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ, ДОМЕННЫЕ ГРАНИЦЫ, МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ, СПИНОВЫЙ ТОК, ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МАГНИТОИМПЕДАНС.

Объект разработки – высокочувствительные сенсорные устройства на основе магнитных микроструктур с электромагнитной регистрацией сигнала.

Впервые обнаружены эффекты инверсного поведения и усиления амплитуды сигнала экваториального эффекта Керра в двухслойных структурах магнитных и нормальных переходных металлов в диапазоне толщины структур до 200 нм.

Приведены экспериментальные данные об инверсии экваториального эффекта Керра при отражении от немагнитного металла в двухслойных структурах с переходными металлами с незаполненными d атомными оболочками (Ru/Cr, Ru/Ta, Ru/Mo).

Показано, что в двухслойных структурах с заполненными $3d$, $4d$, $5d$ атомными оболочками (Ru/Au, Ru/Cu) наблюдается только экспоненциальное ослабление сигнала экваториального эффекта Керра без инверсии при отражении от слоя нормального металла. При этом сигнал усиливается в 2 раза при отражении от слоя ферромагнитного металла.

Предложено использовать наблюдаемые эффекты усиления экваториального эффекта Керра для повышения чувствительности плазмонных биосенсоров.

Изучено влияние постоянного магнитного поля смещения на характеристики недиагонального СВЧ- магнитоимпеданса в аморфных микропроводах. Показано, что постоянный ток в проводе, создающий циркулярное поле смещения, приводит к улучшению чувствительности за счет подавления доменной структуры. Установлено, что геликоидальная

анизотропия микропровода позволяет получить значительный сигнал недиагонального магнитоимпеданса в отсутствие тока смещения.

В работе исследовано влияния температурной обработки на недиагональный магнитоимпеданс (МИ) в аморфных ферромагнитных микропроводах на основе кобальта с геликоидальной магнитной анизотропией. Установлено, что определенные режимы отжига МИ чувствительного элемента, включающего микропровод с электрическими контактами и детектирующую катушку, увеличивают чувствительность выходного сигнала к осевому внешнему магнитному полю и уменьшают его температурную зависимость. Для изучения и оптимизации данного явления нами была разработана методика термической обработки датчиков на основе аморфных микропроводов. После проведения термообработки наблюдается увеличение чувствительности датчиков к осевому внешнему полю на 25% и ослабление температурной зависимости в ~ 2 раза. Эти изменения связаны с релаксацией внутренних напряжений, которые определяют эффективную магнитную анизотропию аморфного МИ провода.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	6
1	Инверсия экваториального эффекта Керра в пермалловых пленках при отражении от поверхностного слоя нормального переходного металла	8
2	Усиление магнитооптического отклика от пермалловой пленки, нанесенной на слой переходного или благородного металла	12
3	Влияние температурной обработки на чувствительность и температурную стабильность магнитоимпедансного сенсора	13
4	Заключение	17
5	Литература	20

Введение

В настоящее время регистрация изменения интенсивности отраженного света от металлической пленки при возбуждении плазмонной волны в металлическом нанослое представляет наиболее распространенный способ обнаружения биологических меток в современных биочипах. При этом широко исследуются и разрабатываются пути и способы использования нанотолщинных слоев ферромагнитных элементов Fe, Co и сплавов для повышения чувствительности плазмонных биосенсоров до уровня, позволяющего детектировать анализируемую субстанцию в жидком носителе (слюне, плазме крови, etc.) на уровне, не превышающем 0,1 пикограмм/мм² [1-3]. В таком подходе используют преимущественно экваториальный сигнал Керра в структуре Co/Au, который составляет весьма малую величину (10^{-3} - 10^{-4} от интенсивности отраженного света). Поэтому стоит задача повышения магнитооптического сигнала в биочипах с целью повышения их чувствительности к биологическим меткам, в т.ч. использующим магнитный носитель для детектирования.

Эффект магнитного импеданса (МИ) заключается в изменении напряжения на магнитном проводнике (диагональный МИ) или на катушке, намотанной на магнитный проводник (недиагональный МИ), при прохождении по нему высокочастотного тока под воздействием внешнего слабого магнитного поля [4,5]. В аморфных микропроводах на основе кобальта МИ может достигать сотен процентов на мегагерцовых частотах, что обусловлено магнитомягкими свойствами и особой циркулярной анизотропией [6]. Соответственно, МИ эффект в аморфных микропроводах используется для разработки высокочувствительных сенсоров слабых магнитных полей с разрешением порядка пикоТесла [7,8]. Однако МИ эффект в микропроводах со стеклянной оболочкой имеет значительную температурную зависимость, даже при температурах, значительно меньших, чем температура Кюри. Наличие температурной нестабильности может

существенно ограничить применение таких сенсоров. С целью улучшения температурной стабильности МИ в данной работе предлагается использовать температурный отжиг. В зависимости от режима отжига удастся значительно снизить температурную зависимость МИ в области рабочих температур (-30-80 С), при этом чувствительность сенсорных элементов также повышается.

Чувствительность МИ элементов в значительной степени определяется типом магнитной анизотропии. В аморфных микропроводах магнитная анизотропия обусловлена магнитострикционными взаимодействиями и зависит от распределения внутренних напряжений. Внутренние напряжения возникают в процессе затвердевания и сильно зависят от соотношения диаметра металлической жилы и толщины стеклянной оболочки [9,10]. Это связано с различием коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Так при относительном уменьшении толщины стеклянной оболочки, внутренние напряжения уменьшаются, а чувствительность МИ увеличивается. Магнитная структура аморфных микропроводов может быть модифицирована за счет изменения внутренних механических напряжений в результате различных тепловых обработок [11,12]. Отжиг приводит к релаксации внутренних напряжений, а отжиг в магнитном поле позволяет индуцировать геликоидальную магнитную структуру. Эта особенность имеет большое практическое значение для увеличения чувствительности МИ элемента и разработки точных высокочувствительных сенсоров магнитных полей.

Следует отметить, что термический и термомагнитный отжиг являются наиболее технологичными, поскольку они позволяют проводить процесс обработки, не затрагивая конструкцию датчика, т.е. как на чувствительном элементе, так и на собранном в корпус сенсоре.

В результате тепловой обработки могут меняться не только внутренние напряжения, но и константа магнитострикции [13]. Например, отжиг микропроводов состава $\text{Co}_{69.2}\text{Fe}_{4.1}\text{B}_{9.1}\text{Si}_{13.8}\text{C}_{1.1}$ с общим диаметром 28.9 мкм и диаметром металлической жилы 25.1 мкм при

температуре 200-300 С в течении 5 мин приводит к изменению анизотропии с циркулярной на осевую, что подтверждается как поведением петли намагниченности, так и МИ характеристиками [12]. Такое преобразование, которое является неблагоприятным с точки зрения МИ эффекта, объясняется изменением знака магнотрикссионного параметра в результате релаксации внутренних напряжений. Таким образом, важно правильно определить наилучшие режимы отжига.

1 Инверсия экваториального эффекта Керра в пермалловых пленках при отражении от поверхностного слоя нормального переходного металла

Регистрация магнитооптического отклика от дополнительного ферромагнитного нанослоя рассматривается как перспективный путь повышения чувствительности биочипов на основе плазмонного резонанса в пленках благородных металлов в связи с независимостью магнитных параметров от оптических неоднородностей как источников помех [3]. Однако величина самого эффекта Керра весьма мала. К тому же магнитооптический отклик пропорционален толщине магнитного слоя в области прозрачности (до 30-50 нм), так что интенсивность экваториального эффекта Керра (наиболее удобного для применения) составляет $\sim 10^{-4}$ от интенсивности падающего света для пермаллоя 80Ni-20Fe (Py).

Несмотря на относительно малую константу магнитооптической связи пермаллой представляет интерес в связи с возможностью использовать модуляцию сигнала на полную амплитуду перемагничивания ферромагнитного слоя во внешнем поле 10 А/м из-за низкой коэрцитивности материала.

В данной работе неожиданно обнаружен эффект трансформации сигнала Керра от пермалловой пленки в случае, если она нанесена на (или на нее нанесен) дополнительный слой переходного металла толщиной в несколько десятков нанометров.

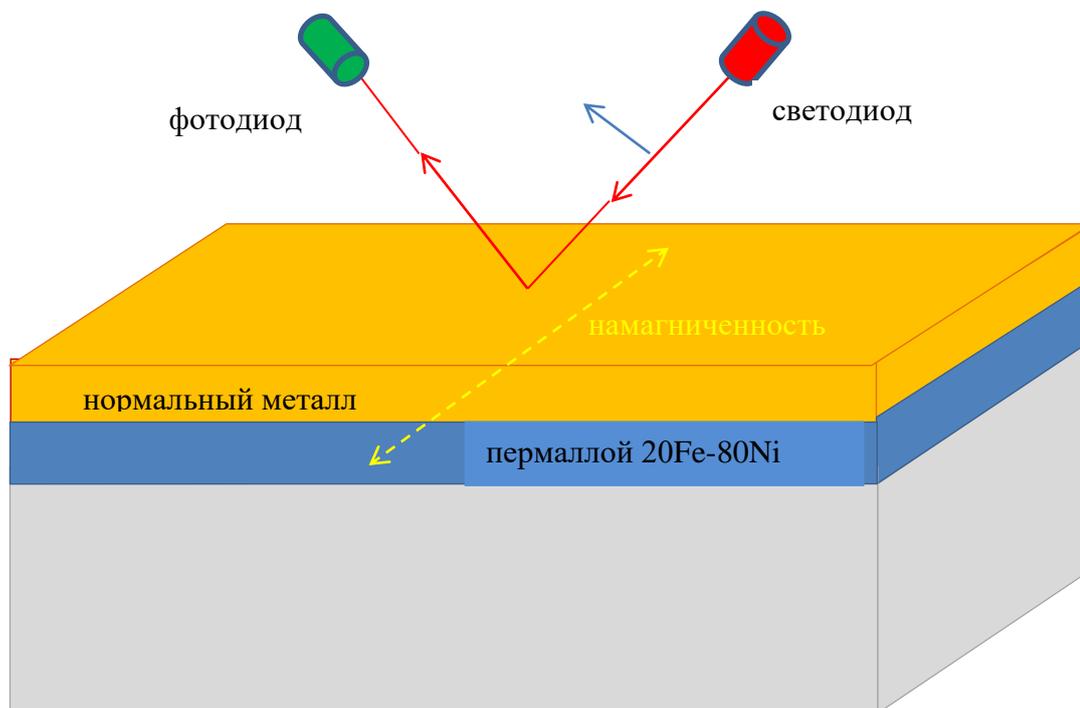


Рис. 1.1. Схема регистрации магнитооптического отклика от двухслойной пленочной структуры ферромагнетик/нормальный металл

Схема эксперимента представлена на рис. 1.1. В качестве источника света использована лампа накаливания, т.е. применялся белый свет. В качестве подложки использовались полированный кремний или стекло. При этом результаты не зависели от материала подложки, несмотря на то, что часть света отражалась от подложки.

Измерения проводились при постоянной интенсивности отраженного от структуры света для исключения зависимости сигнала от коэффициента отражения исследуемых структур.

Внешнее переменное магнитное поле амплитудой $H = 320$ А/м создавалось парой катушек Гельмгольца для переключения магнитного слоя между двумя насыщенными состояниями.

В противоположность ожидаемому уменьшению магнитооптического сигнала благодаря оптическому экранированию ферромагнитного слоя вышележащим слоем нормального металла обнаружен эффект инверсии магнитооптического сигнала от двухслойной структуры (рис. 1.2, 1.3).

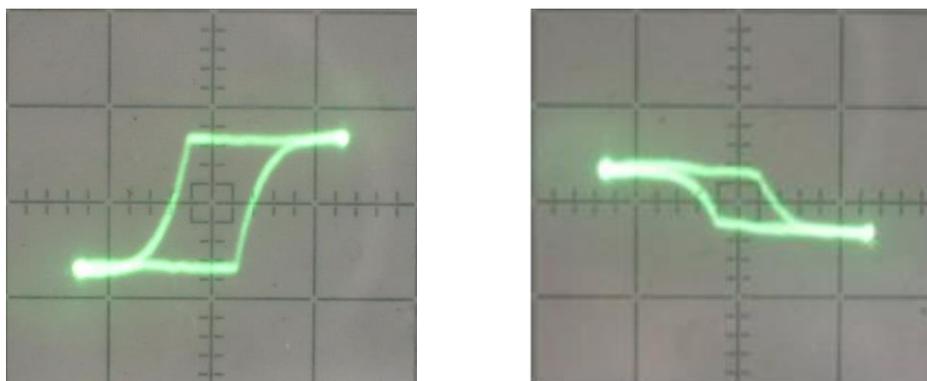


Рис 1.2. Осциллограммы магнитооптических сигналов, слева – от однослойной пленки пермаллоя Py (Ni82-Fe18), толщина Py 20 нм, справа – инвертированный сигнал от двухслойной структуры Cr/Py , толщина Py - 30 нм, толщина Cr - 20 нм, отражение от слоя хрома.

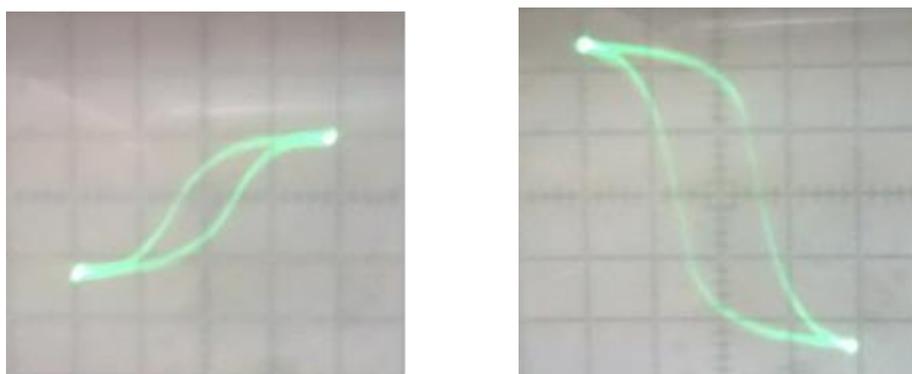


Рис 1.3. Осциллограммы магнитооптических сигналов, слева – от однослойной пленки пермаллоя Py (Ni82-Fe18), толщина Py 30 нм, справа – инвертированный сигнал от двухслойной структуры Ta/Py , толщина Py - 30 нм, толщина Ta - 20 нм, отражение от слоя тантала.

Величина магнитооптического сигнала не уменьшалась экспоненциально, а возрастала с ростом толщины экранирующего слоя до величины ~ 20 нм и лишь затем постепенно снижалась. При этом максимальная величина инвертированного сигнала при отражении от немагнитного слоя могла

превысить в несколько раз величину начального сигнала от неэкранированной пермаллоевой пленки (рис. 1.3).

Установлено, что влияние слоя нормального металла испытывает сильную зависимость от степени заполнения d-оболочки атома металла. Исследован широкий круг переходных металлов с различным заполнением атомных оболочек 3d, 4d и 5d (Ti, Cr, Cu, Mo, Ta, W, Re, Pt, Au), а также Al в качестве экранирующего слоя. Тантал продемонстрировал наибольший эффект среди исследованных подробно переходных металлов, в то время как платина (с одной дыркой в d-оболочке) показала наименьший эффект.

Зависимости магнитооптического сигнала от толщины слоя тантала для различных толщин слоя пермаллоя h показаны на рис. 1.4.

Толщина слоя Ta, соответствующая максимальному сигналу, оказалась близкой к величине ~ 20 нм, что соответствует длине спиновой диффузии в

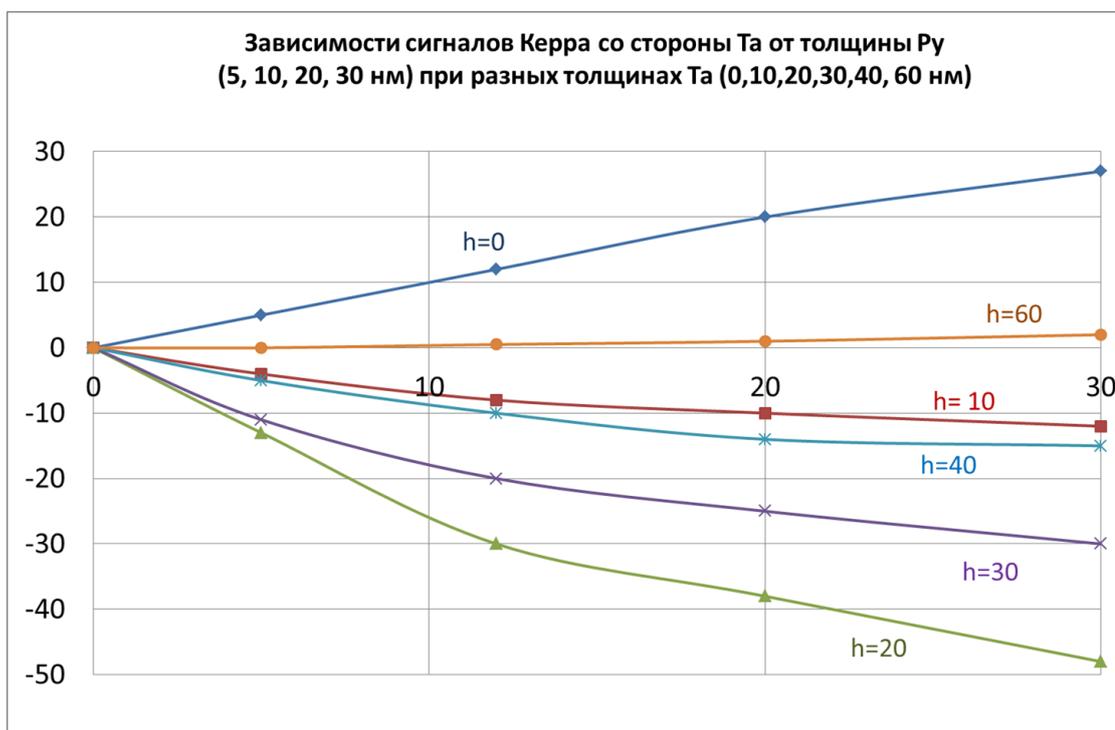


Рис. 1.4 Зависимости амплитуды магнитооптического сигнала от толщины слоя тантала для разных значений толщины h слоя пермаллоя (со стороны тантала), толщины слоев приведены в нм.

тантале. Однако возможные физические механизмы (оптические свойства структуры или спиновая диффузия из ферромагнитного слоя в нормальный металл) находятся в стадии экспериментального изучения и теоретического анализа.

2 Усиление магнитооптического отклика от пермаллоевой пленки, нанесенной на слой переходного или благородного металла

Максимальная амплитуда инвертированного сигнала постепенно уменьшается с заполнением d-оболочки атома переходного металла. Никакого инвертированного сигнала не было обнаружено для слоев меди Cu и золота Au с заполненными полностью 3d 5d атомными оболочками.

Однако обнаружено двукратное усиление магнитооптического отклика от пермаллоевой пленки, когда слои благородных металлов толщиной 20-30 нм, а также алюминия лежат под ферромагнетиком (рис. 2.1). Эффект неожиданно сохраняется (с незначительным снижением) даже когда толщина пермаллоевого слоя приближается к области режима полного отражения, т.е. свет не достигает нижележащего слоя и “не знает” о его природе.

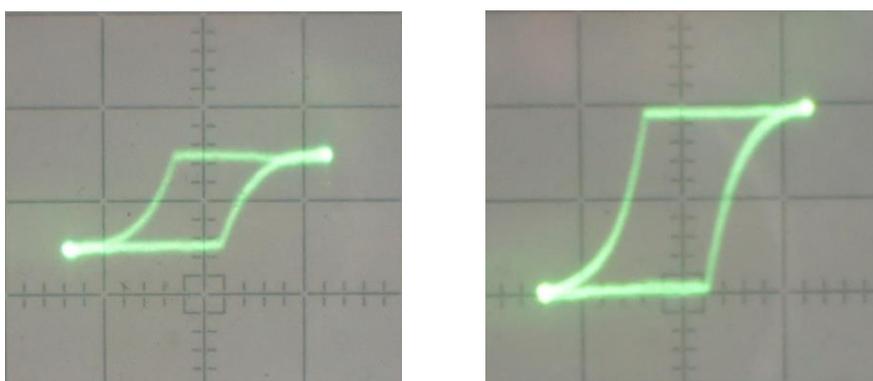


Рис. 2.1 Магнитооптические отклики от пермаллоевой пленки толщиной 15 нм, слева – нанесенной на стекло, справа – нанесенной на слой меди толщиной 30 нм.

Эффект усиления магнитооптического отклика особенно велик для тонких слоев ферромагнитного металла (менее 15 нм толщиной). В этом случае усиление сигнала может достигать 4-5 кратной величины.

3 Влияние температурной обработки на чувствительность и температурную стабильность магнитоимпедансного сенсора

Недиагональный МИ представляет собой магнитный сердечник длиной менее 1 см и диаметром 40 мкм состава $\text{Co}_{66.94}\text{Fe}_{3.83}\text{Ni}_{1.44}\text{B}_{11.57}\text{Si}_{14.59}\text{Mo}_{1.96}$ на подложке с электрическими контактами для пропускания высокочастотного тока, помещенный в детектирующую катушку 65 витков.

Для исследования влияния температуры отжига на поведение недиагонального МИ использована установка, представленная на рис. 3.1. Она состоит из магнитной системы с катушками Гельмгольца и блока управления величиной магнитного поля, генератора сигналов для возбуждения провода, осциллографа для регистрации параметров выходного сигнала датчика, теплового фена с блоком управления и термопары с электронным измерителем температуры.

С помощью функционального генератора в микропровод посылается возбуждающий сигнал в виде гармонических колебаний частотой 20 МГц с различной величиной постоянной составляющей (тока смещения). Частота возбуждения соответствует резонансной частоте чувствительного элемента. Постоянная составляющая тока определяет величину циркулярного подмагничивающего поля. МИ чувствительный элемент помещается в генератор магнитного поля (H_{ex}), который выполнен в виде катушек Гельмгольца и блока управления магнитным полем. При помощи блока контроля температуры задается требуемая температура, нагнетатель со встроенным нагревательным элементом формирует поток нагретого до заданной температуры воздуха, контроль температуры ведется при помощи

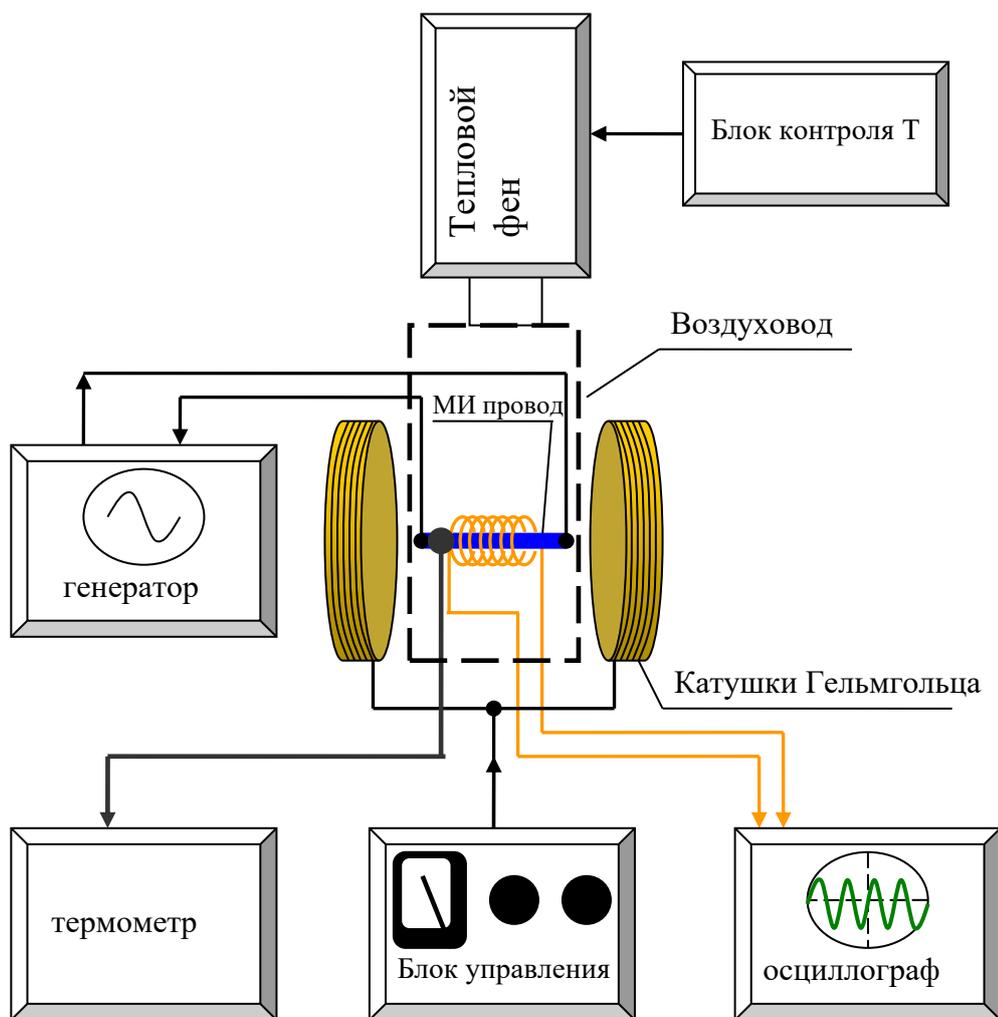


Рис. 3.1 Установка для изучения температурной зависимости недиагонального импеданса

цифрового термометра и термопары типа хромель-алюмель. Зависимость выходного сигнала от величины магнитного поля и температуры фиксируется при помощи осциллографа по максимальной амплитуде сигнала на его экране.

Сенсор нагревался и охлаждался со скоростью не превышающей 1 град/с в потоке воздуховода, внутри катушек Гельмгольца, которые обеспечивали компенсацию внешнего магнитного поля (магнитного поля земли). Время выдержки составляло 3 минуты.

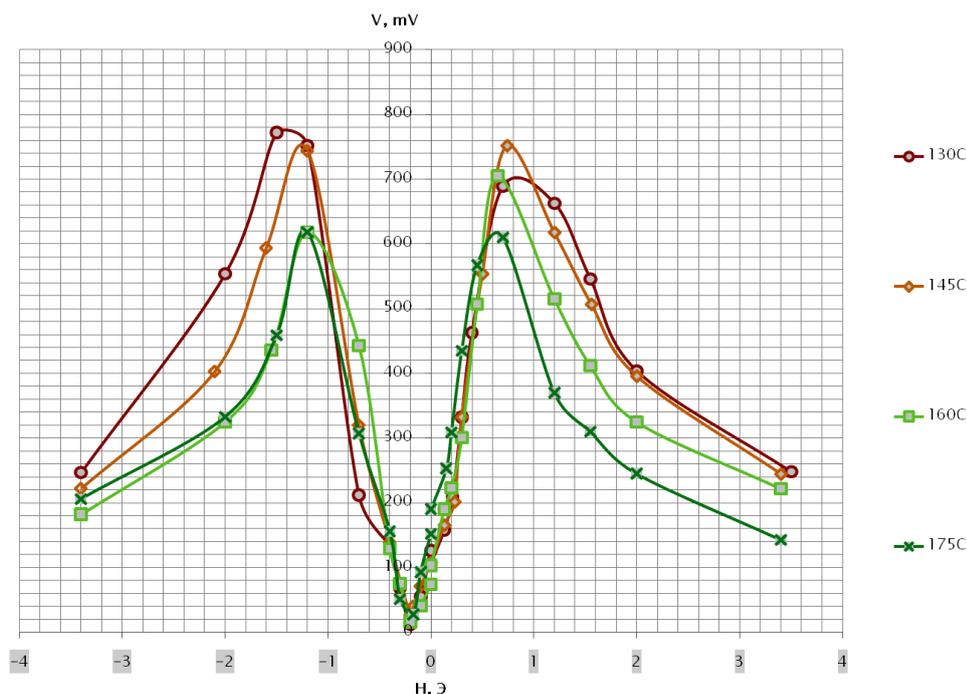


Рис. 3.2 Характеристики чувствительности датчика после термообработки при различных температурах

На рис. 3.2 показаны семейства зависимостей выходного сигнала недиагонального МИ элемента от величины внешнего магнитного поля для различных температур обработки.

Как видно из графика, чувствительность датчика в результате обработки при не очень высоких температурах несколько возрастает, однако при увеличении температуры отжига чувствительность начинает падать. На рисунке 3 показана зависимость полученной чувствительности датчика при комнатной температуре от температуры отжига. Максимум чувствительности наблюдается при температуре отжига порядка 160°C и времени отжига 2-3 минуты. Для проверки воспроизводимости результатов по увеличению чувствительности в результате термообработки, подобным образом было обработано 5 сенсоров, в среднем чувствительность после термообработки при 160°C выросла на 800 мВ/Э.

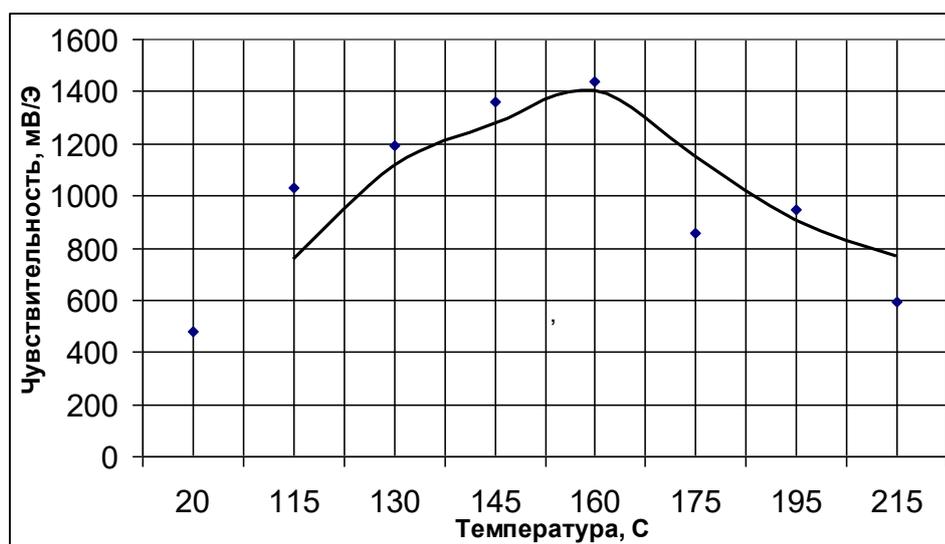


Рис. 33 Зависимость полученной чувствительности датчика от температуры обработки.

Снижение чувствительности с дальнейшим ростом температуры может объясняться увеличением разброса направлений внутренних напряжений при релаксации, а также изменением константы магнитострикции.

После проведения температурной обработки были исследованы МИ характеристики при различных температурах. Даже при незначительном нагревании, выходной сигнал уменьшается, что связано с изменением распределения внутренних напряжений, вызванных различием коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Также, на температурные зависимости могут оказывать влияние возникновение дополнительных напряжений электрических контактов. На рис. 3.4 показано уменьшение выходного сигнала недиагонального МИ сенсорного элемента при определенном магнитном поле с ростом температуры для чувствительного МИ элемента до и после отжига, которое происходит практически линейно с ростом температуры. Однако степень зависимости от температуры оказывается значительно снижена (практически в два раза для используемых режимов отжига) для отожженного МИ элемента, поскольку в

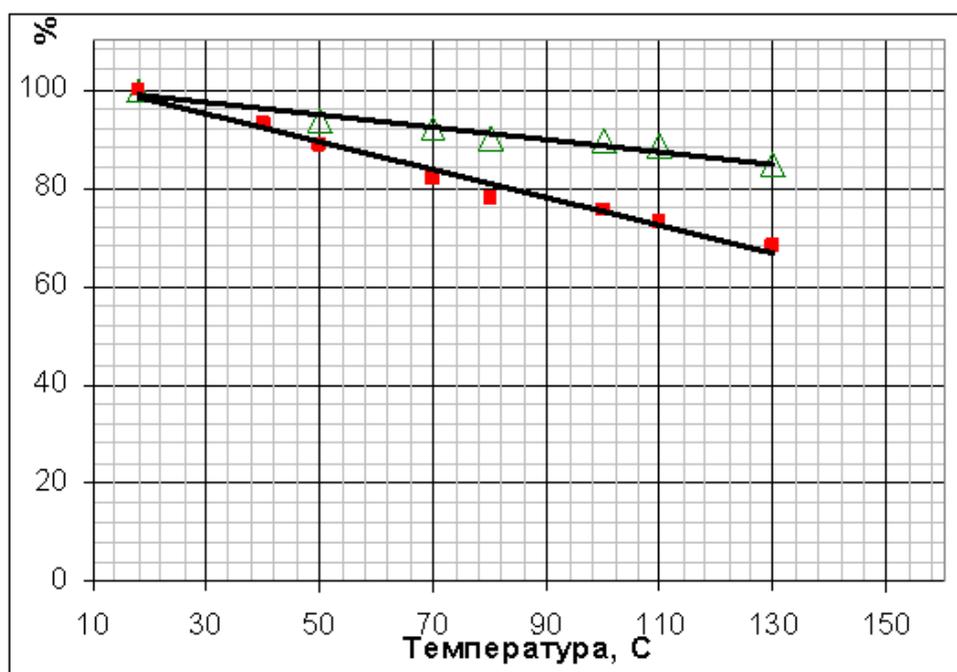


Рис. 3.4 Температурная зависимость сигнала МИ датчика после проведения температурной обработки (в % к величине сигнала при комнатной температуре)

этом случае внутренние напряжения, возникающие из-за стеклянной оболочки и электрических контактов, значительно снижены. Так, до проведения термообработки температурная нестабильность составляла $0,29\ \%/^{\circ}\text{C}$, после проведения термообработки температурная нестабильность уменьшилась почти вдвое – до $0,15\ \%/^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Обнаружен и исследован эффект усиления магнитооптического отклика от ферромагнитного нанотолщинного слоя с помощью дополнительного слоя переходного или благородного металла. В зависимости от материала и толщин слоев структуры усиление может достигать 4-5 раз при одной и той же интенсивности отраженного от структуры света. Эффект характеризуется наличием максимального уровня усиления сигнала в области толщины 20-30 нм дополнительного слоя.

Введение магнитоактивного слоя в плазмонный биосенсор представляет также возможность независимой модуляции сигналов, что может быть использовано для повышения чувствительности устройства.

Эффект усиления магнитооптического сигнала посредством слоя нижележащего благородного металла может быть напрямую использован в плазмонных биочипах, так как легко совместим с технологией их изготовления. При этом, однако, следует провести исследования плазмонного резонанса в двухслойных структурах с ферромагнитным слоем.

Определен режим температурной обработки магнитоимпедансного сенсора слабого магнитного поля, приводящий к почти двукратному повышению чувствительности высокочастотных сенсоров слабого постоянного магнитного поля.

Показано, что применение такой обработки позволит повысить обнаружительную способность по отношению к магнитным биообъектам и микрометкам в биочипах.

Публикации:

1. Uspenskaya, Ludmila S.; Egorov, Sergei V.; Skidanov, Vladimir A. Transformation of the Domain-Wall Structure in Permalloy Nanotape Under Electrical Current Pulses. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS Volume: 51 Issue: 1 Article Number: 4300104 Part: 1 Published: JAN 2015.
2. Panina L. V.; Makhnovskiy D. P.; Morchenko A. T.; Kostishin V. G. Tunable permeability of magnetic wires at microwaves. JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, Volume: 383, P. 120-125, JUN 1 2015

Результаты докладывались на 3 международных и 1 Всероссийской конференциях:

1. V. Skidanov. Transverse Kerr effect transformation of by normal metal film atop ferromagnetic metal surface. Book of Abstracts, Mo.H-P45, 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, 5 – 10 Jul 2015

2. N. Yudanov, A. Rudyonok, L. Panina, A. Morchenko, A. Zhukov. Multicore off-diagonal magnetoimpedance sensors utilizing amorphous wires. Book of Abstracts, Th.O-P46, 20th International Conference on Magnetism, Barcelona, 5 – 10 Jul 2015

3. V. Skidanov. Kerr effect transformation intwo-layered transition metals F/N structures. Program Abstracts, p. 158, International Symposium “Spin Waves”, Saint-Petersburg, 7 – 13 June 2015

4. N. Ostropvskaya, V. Skidanov, Yu. Yusipova. Bifurcation theory of the dynamical system for three-layered nanopilar. Program Abstracts, p. 132, International Symposium “Spin Waves”, Saint-Petersburg, 7 – 13 June 2015

5. SKIDANOV V.A. Enhancement of transverse Kerr effect in permalloy films by normal transition metal nanolayer. 22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, ref. number 0159, Cracow, 12-17 Jul 2015

6. А.С. Ковтун, А.С. Касьянов, Т.В. Коростылева, Е.А. Истомина, В.Ю. Макеев, А.М.Кудрявцев, Т.И. Одинцова. Идентификация генов антимикробных пептидов в пшенице TRITICUM KINARAE DOROF.ET MIGUSH. путем анализа транскриптомов методом NGS. Геномное секвенирование (NGS 2015), СБОРНИК ТЕЗИСОВ 3-ей Всероссийской научно-практической конференции по геномному секвенированию, стр. 13, Москва, 14 мая 2015

Литература

- [1] Sorin David, Cristina Polonschii, Catalin Luculescu, Mihaela Gheorghiu, Szilveszter Gáspár, Eugen Gheorghiu. Magneto-plasmonic biosensor with enhanced analytical response and stability. *Biosensors and Bioelectronics* 63 (2015) p. 525-532, DOI: 10.1016/j.bios.2014.08.004.
- [2] Wei Zheng, Aubrey T. Hanbicki, Berend T. Jonker. Control of magnetic contrast with nonlinear magneto-plasmonics. *Scientific Reports* 08/2014; 4:6191. DOI: 10.1038/srep06191.
- [3] G. Armelles, A. Cebollada, A. Garcia-Martin and M.U. Gonzalez, Magnetoplasmonics: combining magnetic and plasmonic functionalities. *Adv. Opt. Mater.* 1, 10 -35 (2013).
- [4] Makhnovskiy D.P., Panina L.V., Mapps D.J. Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with helical and circumferential anisotropy // *Phys. Rev. B.* 2001. V. 63, P. 144424-23.
- [5] M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, J. Gonzalez, and A. Zvezdin, Low-field hysteresis in the magnetoimpedance of amorphous microwires, *Phys. Rev.B* 81, 134421 (2010).
- [6] K. Pirola, L. Kraus, H. Chiriac, M. Knobel, Magnetic properties and giant magnetoimpedance in a CoFeSiB glass-covered microwire, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , Volume 221, Issue 3, November 2000, Pages L243–L247
- [7] Mohri, K., Honkura, Y., Panina, L.V., Uchiyama, T. Super MI Sensor : Recent Advances of Amorphous Wire and CMOS-IC Magneto-Impedance Sensor // *J. Nanoscience and Nanotechnology.* – 2012. – V.12. – P. 7491-7495.
- [8] Uchiyama T., Mohri K., Honkura Y., Panina L.V. Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto-Impedance Sensor Based on Amorphous Wire CMOS IC MI Sensor // *IEEE Trans. Magn.-* 2012.- V. 48. - P. 3833-3839.
- [9] V. Zhukova, A. Chizhik, A. Zhukov, A. Torcunov, V. Larin, J. Gonzalez, 2002 Optimization of Giant Magnetoimpedance in Co-rich Amorphous Microwires // *IEEE Trans. Magn.-* 2002 - V. 38. - P. 3090-3092

- [10] H. Chiriac, T.-A. Ovari, and A. Zhukov, Magnetoelastic anisotropy of amorphous microwires, *J. Magn. Magn. Mater.* 254–255, 469 (2003).
- [11] A. Talaat, V. Zhukova, M. Ipatov, J.M. Blanco, L. Gonzalez-Legarreta, B. Hernando, J.J. del Val, J. Gonzalez, and A. Zhukov, Tailoring of magnetic properties and GMI effect of Co-rich amorphous microwires by heat treatment, *J. Appl. Phys.* 115, 17A313 (2014).
- [12] A. Zhukov, V. Zhukova, V. Larin, J.M. Blanco, and J. Gonzalez, Tailoring of magnetic anisotropy of Fe-rich microwires by stress induced anisotropy, *Phys. B* 384, 1 (2006).
- [13] A. Zhukov, A Talaat, J. M. Blanco, M. Ipatov, V. Zhukova, Tuning of Magnetic Properties and GMI Effect of Co-Based Amorphous Microwires by Annealing, *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 43, No. 12, p. 4532-4539, 2014.