

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н. Успенской Л.С. на диссертационную работу Максимовой Ольги Александровны «Оптические и магнитооптические свойства магнитных наноструктур по данным *in-situ* спектральной магнитооптической эллипсометрии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Максимовой О.А. посвящена развитию магнитоэллипсометрических спектральных методов исследования свойств однослойных и многослойных ультратонких пленок. Ею предложен и разработан новый подход к извлечению магнитоэлектрических характеристик тонких однослойных и многослойных пленок из экспериментальных оптических данных и на основе развитого метода выполнены исследования свойств магнитных наноструктур Fe/SiO₂/Si с разной толщиной слоя Fe на подложке SiO₂/Si.

Тема диссертационной работы актуальна из-за важности научных и прикладных аспектов решаемых задач. Тонкие магнитные пленки лежат в основе многих современных устройств микроэлектроники. Это записывающие ичитывающие устройства в вычислительной технике, элементы памяти, спиновые транзисторы и многое другое. Тонкие магнитные пленки предполагается использовать в будущих спинtronных устройствах, в криоэлектронике. Но свойства тонких пленок очень чувствительны к малейшим нюансам технологии их изготовления, поэтому контроль их свойств на стадии изготовления, *in-situ*, еще до изготовления структур на их основе, является важнейшей задачей. Магнитоэллипсометрические спектральные исследования - это неразрушающий контроль характеристик пленок, что особенно важно.

Вх.№ 287-03/08-41

от 12.10.2020

Таким образом, работы, составляющие диссертацию Максимовой О.А., крайне важны и своевременны.

Во введении диссертации рассмотрено состояние дел в области исследований автора диссертации, выполнено сравнение выполненных исследований с мировыми достижениями, показана новизна исследований: впервые проведен комплекс теоретических и экспериментальных магнитоэллипсометрических спектральных исследований ферромагнитных структур Fe/SiO₂/Si с разной толщиной слоя Fe, для ряда моделей отражающих систем, учитывающих структуру, толщину, оптические и магнитные свойства слоев, получены соотношения, связывающие наблюдаемые эллипсометрические и магнитоэллипсометрические углы с компонентами тензора диэлектрической проницаемости магнитного слоя, разработаны и реализованы алгоритмы расчета компонент тензора диэлектрической проницаемости по данным магнито-эллипсометрических измерений, обоснована актуальность, научная и практическая значимость работы, в частности, показана новая возможность применения *in situ* спектральной магнитооптической эллипсометрии для определения всех компонент тензора диэлектрической проницаемости ферромагнетиков, сформулированы постановка задачи и цели диссертационной работы, объяснена структура диссертации.

Первая глава диссертации является обзорной. В ней подробно рассмотрены существующие методы исследования свойств отражающих слоистых структур, их применимость для извлечения характеристик слоев и имеющиеся ограничения на точность определения параметров.

Вторая глава посвящена описанию оригинальной методики извлечения эллипсометрических и магнитоэллипсометрических параметров из экспериментальных магнитоэллипсометрических данных, полученных из измерений величины магнитооптического эффекта Керра. В этой главе представлены математические выражения и операции, позволяющие

переходить от экспериментально определенных параметров к тензору диэлектрической проницаемости ферромагнитного слоя для объемного ферромагнитного образца на немагнитной подложке, для образца с одним тонким ферромагнитным слоем на немагнитной подложке и многослойной среды с ферромагнитным слоем.

В третьей главе выполнена апробация методики нахождения компонент тензора диэлектрической проницаемости по экспериментальным магнитоэллипсометрическим данным на примере структуры Fe/SiO₂/Si. Подробно описана методика проведения эксперимента и изготовления образцов. Приведены экспериментальные данные: зависимость показателей поглощения k , преломления n и толщины d пленки железа от времени напыления пленок, зависимость эллипсометрических параметров 1 - ψ_0 , 2 - Δ_0 , 3 - $\delta\psi$, 4 - $\delta\Delta$ от энергии возбуждения, спектры показателя преломления n и поглощения k железа после синтеза тонкой пленки Fe на подложке SiO₂/Si. На основе развитых моделей определены оптические и магнитооптические параметры изготовленных пленок. Таким образом продемонстрирована применимость развитого в диссертации подхода к расчету параметров пленки из экспериментальных данных.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных магнитооптических исследований тонких поликристаллических пленок Fe/SiO₂/Si с тремя толщинами слоя Fe. Здесь также подробно описаны метод изготовления образцов и методика проведения эксперимента. На основе четырех моделей: однородная полубесконечная ферромагнитная среда, «среда - тонкая ферромагнитная пленка - немагнитная подложка»; двухслойная среда «ферромагнитный слой - немагнитный слой - немагнитная подложка» и многослойная среда выполнена обработка экспериментальных данных и показано, для каких толщин пленок слоя Fe какая модель лучше всего работает. Показано, что эффективный тензор диэлектрической проницаемости пленок зависит от их толщины.

В заключении диссертации приведены основные результаты исследования.

Выполненная Максимовой Ольгой Александровной разработка и реализация алгоритмов расчета компонент тензора диэлектрической проницаемости по данным магнитоэллипсометрических измерений имеет большое практическое значение и полученные ею результаты будут востребованы экспериментаторами многих научных групп, изготавливающих и выполняющих магнитооптические спектральные исследования тонких пленок и многослойных наноструктур.

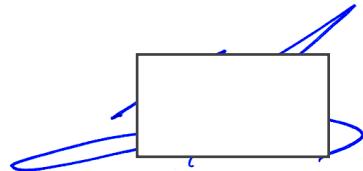
Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Работы автора диссертации представлены в виде 20 докладов на 13 конференциях и опубликованы в 6 статьях в журналах, индексируемых базами Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ.

Следует отметить имеющиеся в диссертационной работе недостатки: на странице 31 используются термины s- и p-поляризация, которые определены лишь на 33 странице, опечатка на странице 26 (9ая строка диссертации). Разумеется, указанные замечания не уменьшают качества работы в целом, выполненной на высоком начном уровне.

Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Максимовой О.А. «Оптические и магнитооптические свойства магнитных наноструктур по данным in-situ спектральной магнитооптической эллипсометрии» соответствует требованиям ВАК и «Положению о присуждении ученых степеней», учрежденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года а её автор Максимова Ольга Александровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.



Официальный оппонент:

Успенская Людмила Сергеевна,

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния,

ведущий научный сотрудник лаборатории квантовых кристаллов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт
физики твердого тела Российской академии наук

142432 Черноголовка, Московская область

ул. Академика Осипьяна, 2 ИФТТ РАН

Тел: 84965228208 e-mail: uspenska@issp.ac.ru

Подпись Успенской Л.С. заверяю



УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИФТТ РАН
ТЕРЕЩЕНКО А.Н.

СПИСОК

избранных научных трудов Успенской Л.С. за 2016-2020 гг.

1. A.K. Ponomareva, S.V. Egorov, L.S. Uspenskaya. Effect of the shape and lateral dimensions on the magnetization reversal in permalloy nanofilms. *Physica B*, Volume 486, 1 April 2016, Pages 77–80.
2. L.S. Uspenskaya, S.V. Egorov. Current and field stimulated motion of domain wall in narrow permalloy stripe. *arXiv:1512.01372 [cond-mat.mes-hall]*
3. С. В. Егоров, Л. С. Успенская. Кинетика перемагничивания микрополосок пермаллой-ниобий под действием импульсов магнитного поля и тока. *Письма ЖЭТФ*, т. 103, в.4, с. 298-302 (2016);
4. Tikhomirov O.A., Red'kin B.S., Uspenskaya L.S. Magnetic properties of iron-doped gadolinium molybdate. *Ferroelectrics*. 505, 210-215, 2016
5. В.В. Больгинов, О.А. Тихомиров, Л.С. Успенская. «Двухкомпонентная намагниченность тонких пленок Pd99Fe01». *Письма ЖЭТФ* т.105 №3, стр. 153-157, 2017.
6. Л. С. Успенская, И. Н. Хлюстиков. Аномальная магнитная релаксация в тонких пленках Pd0.99Fe0.01. *ЖЭТФ*, 152, вып..5, 1029-1033, 2017.
7. Успенская Л.С., Хлюстиков И.Н. изменение магнитных свойств тонких пленок Pd99Fe01 при 3D-2D переходе. В сборнике: НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА Материалы XXI Международного симпозиума . 2017. С. 254-255.
8. L.S. Uspenskaya, I.V. Shashkov, Influence of Pd\$_{0.99}\$Fe\$_{0.01}\$ film thickness on magnetic properties. *Physica B: Condensed Matter*. Volume 549, Pages 58-61 2018,
9. Успенская Л.С. "Переключение спин-поляризованным током гибридных структур на базе пермаллоя", Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника 3 (171) с.17-22, (2018)

10. Успенская Л.С., И.Н. Хлюстиков. Аномальная низкотемпературная релаксация намагниченности в тонких пленках $Pd0.99Fe0.01$. В книге: Тезисы докладов 38 Совещания по физике низких температур (НТ-38) Институт физических проблем имени П. Л. Капицы РАН, Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета. 2018. С. 37-38.
 11. Успенская Л.С., С.В. Егоров, О.В. Скрябина, Д. Львов, Г. Пензяков, В. Чичков. Колossalное магнитосопротивление в гибридных структурах ферромагнитный диэлектрик/сверхпроводник. В книге: Тезисы докладов 38 Совещания по физике низких температур (НТ-38) Институт физических проблем имени П. Л. Капицы РАН, Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета. 2018. С. 186-187.
 12. Успенская Л.С., Тихомиров О.А. Особенности низкотемпературного перемагничивания двуслойных пленок $FeNi/FeMn$. :ЖЭТФ Vol. 155, No. 4, p. 730-736 (2019)
 13. Л. С. Успенская, Д. С. Львов, Г. А. Пензяков, О.В. Скрябина. Эффект невзаимности в структурах железо-иттриевый гранат - сверхпроводник. *ФММ, 2020, том 121, № 5, с. 469–475*

Список публикаций Успенской Л.С. заверяю

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИФТТ РАН
ТЕРЕЩЕНКО А.Н.

