

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТНЫХ МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ  
ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРНАТА**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

магистранта 2 курса 207 группы  
по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»  
факультета nano- и биомедицинских технологий

Корнеева Юрия Алексеевича

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Ю.В. Хивинцев

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

С.Б. Вениг

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2018

**Введение.** Исследование магнитных микро- и наноструктур на данный момент времени активно развивающаяся область физики магнитных явлений. Это объясняется развитием технологий создания магнитных микроструктур, а также большими возможностями для их практических приложений [1]. В магнитных микроструктурах изучают эффекты спинзависимого транспорта, которые представляют интерес в использовании их в магнитных датчиках [2]. Для построения разных приборов аналоговой обработки сигналов в диапазоне сверхвысоких частот успешно используются спиновые волны (СВ), которые распространяются в ферромагнитных плёнках.

Актуальность работы заключается в том, что спиновые волны в тонкоплёночных средах вызывают интерес как фундаментального, так и прикладного характера. Для исследования СВ, а также построения устройств обработки информации на их основе, как правило, применяются плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ) из-за рекордно низких потерь СВ в этом материале по сравнению с другими известными магнетиками.

Одним из направлений создания магнитных материалов с заранее заданными свойствами является использование для этих целей магнитных периодических структур. Эти структуры также называются магнотными кристаллами (МК), поскольку они характеризуются наличием запрещенных зон для магнонов – квазичастиц СВ аналогично запрещенным зонам для фотонов в фотонных кристаллах [3].

МК расширяют возможности управления спектром спиновых волн, что можно использовать для создания устройств обработки информации на СВЧ. Поэтому в настоящее время активно ведутся работы, направленные на развитие технологий создания МК и изучению их свойств [4].

МК на основе пленок ЖИГ представляют собой периодическую модуляцию толщины пленки, которая формируется за счет травления. При этом наибольшее распространение для формирования МК получила технология, использующая химическое травление ЖИГ. Эта технология обладает рядом недостатков. Из-за изотропности химического травления профиль травления

сильно отличается от прямоугольного. Кроме того, по этой же причине существует ограничение на минимальный размер микроструктур формируемых с помощью химического травления.

Цель данной работы – изучить возможность использования технологии ионного травления, характеризующейся сильной анизотропностью для создания МК из пленок ЖИГ.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи.

1) Изучить основные технологии, необходимые для формирования МК из пленок ЖИГ.

2) Изготовить образцы различных МК в соответствии с имеющимися фотошаблонами.

3) Исследовать параметры полученных структур и сделать вывод об их качестве.

4) Выявить основные преимущества и недостатки использования технологии ионного травления для формирования МК.

Дипломная работа занимает 63 страниц, имеет 50 рисунков и 12 таблиц.

Обзор составлен по 23 информационным источникам.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

Первый раздел представляет собой обзор по магнитным периодическим структурам – магнетонным кристаллам, а также технологиям, необходимым для создания таких структур и состоит из следующих подразделов: магнетонные кристаллы, базовые технологии, используемые для создания магнетонных кристаллов, фотолитография, травление, магнетронное распыление, приборы для проведения контроля.

Во втором разделе приводится детальное описание процесса изготовления микроструктур на основе пленок железоиттриевого граната и результаты контроля на всех этапах изготовления образцов. Данный раздел состоит из следующих подразделов: подготовка образцов, нанесение

адгезивного слоя, фотолитография, ионное травление, очистка от фоторезиста и адгезивного слоя, контроль параметров изготовленных структур, контроль геометрии структур, исследование доменной структуры.

### **Основное содержание работы**

**Магنونные кристаллы и их свойства.** Магنونные кристаллы обладают некоторыми свойствами: внешним магнитным полем можно управлять свойствами магنونных кристаллов, длина спиновых волн составляет от миллиметров до сотен микрон, использование планарных технологий при создании магنونных кристаллов, магنونные кристаллы могут использоваться в интегральных устройствах, проявление нелинейных эффектов в магنونных кристаллах [5].

**Базовые технологии, используемые для создания магنونных кристаллов.** В большей степени МК изготавливаются из плёнок железо – иттриевого граната. Кристалл изготовленный из плёнки ЖИГ является ферромагнитным волноводом с двумерными периодическими неоднородностями [5]. Плёнки железо - иттриевого граната характеризуется высокими удельными сопротивлениями, следовательно, являются диэлектриками. ЖИГ может перестраиваться в широком диапазоне частот, а также обладает высокой температурой по Кюри (560 К). [6].

**Особенности проведения процесса фотолитографии.** Фотолитография – это технологический процесс, который основан на использовании необратимых фотохимических явлений [7].

При фотолитографической обработке нужный рисунок получают сначала фотографическим способом в слое специального светочувствительного материала — фоторезиста, предварительно нанесенного на подложку, а затем, используя фоторезист в качестве защитной маски,— на подложке химическим травлением или ионным травлением [8].

Процесс фотолитографии состоит из последовательных этапов:

1) подготовка подложки;

- 2) нанесение фоторезиста;
- 3) сушка фоторезиста;
- 4) совмещение и экспонирование;
- 5) проявление;
- 6) вторая сушка фоторезиста (задубливание);
- 7) травление;
- 8) удаление фоторезиста[9].

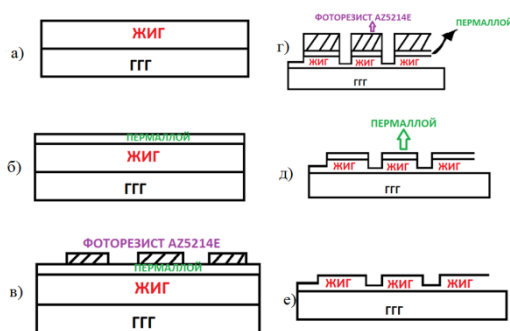
**Травление.** Травление - управляемое удаление поверхностного слоя материала. Травление подразделяется на химическое, которое также носит название жидкостного и ионное (сухое). Травление включает в себя различные этапы: подготовка поверхности (шлифовка, полировка), взаимодействие травителя с материалом, который подлежит обработке, очистка поверхности (либо от травителя, либо от продуктов травления) [10].

В данной работе после проведения процесса фотолитографии необходимо провести травление пленки железиттриевого граната. Для этого как уже отмечено выше можно использовать жидкостное или сухое травление. [9].

**Процесс магнетронное распыление.** Магнетронное распыление — технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда — диодного разряда в скрещенных полях. Технологические устройства, которые предназначены для воплощения этой технологии - магнетронные распылители системы или магнетронами. При использовании методов магнетронного распыления получают металлические (сверхпроводящие, ферромагнитные) плёнки. Могут получаться диэлектрические плёнки (либо из диэлектрических материалов, либо в атмосфере реактивных газов). Как уже было сказано, плёнки изготовленные данным методом высоко адгезионны, подложка при этом не разогревается. Следовательно, возможно напыление плёнок на материалы с малой термостойкостью, а именно фоторезисты. А еще открывается возможность распыления тугоплавких материалов[11].

**Приборы для проведения контроля качества после выполненных операций.** Одним из вариантов контроля в данной работе является просмотр результата на оптическом инспекционном микроскопе Olympus MX51. Он оснащен план полуапохроматическими объективами на «бесконечность» микроскопии по методам светлого поля, тёмного поля, интерференционного контрастирования, контрастирования – гарантирует высочайшее оптическое разрешение и непревзойдённую контрастность, что позволяет добиться качественной диапозоне долей микронметра [12]. Помимо микроскопа в работе контроль проводился и на стилусном профилометре Dektak 150. Dektak 150 – это профилометр (контакт), используемый для измерения толщины резиста после выполнения операции проявления, а также высоты ступенек, шероховатости. Это метод контроля качества проведенной фотолитографии. Эта система работает стилусом (иголкой), физически создающим контакт с поверхностью образца и перемещение каскада вперед - назад (например, иголка удерживается статически на месте) для измерения изменений высоты поверхности [13].

**Практическая часть.** В качестве исходных объектов для выполнения практической части работы было использовано три образца пленок железо - иттриевого граната (ЖИГ): А,В,С. Все технологические этапы процесса продемонстрированы на рисунке 1.



а) структура ЖИГ/ГГГ; б) напыление слоя пермаллоя (сплав железа Fe и никеля Ni, с преобладающим содержанием последнего 45 - 82%); в) формирование маски из фоторезиста AZ5214E; г) ионное травление; д) очистка от фоторезиста; е) очистка от пермаллоя.

## Рисунок 1 – Технология изготовления периодических структур

**Подготовка образцов.** На первом этапе выполнения работы, представленном выше на рисунке 1а, было произведено 3 этапа очистки структуры ЖИГ/ГГГ:

- 1) в смеси водного раствора аммиака и перекиси водорода;
- 2) в ацетоне с использованием ультразвуковой ванны;
- 3) кипячением в изопропиловом спирте с последующей сушкой образцов в потоке сухого азота.

**Нанесение адгезивного слоя.** На очищенную поверхность ЖИГ (рисунок 1а), после предварительного отжига в вакууме при температуре 200°C в течение 30 мин и последующего остывания до комнатной температуры, с помощью магнетронного распыления наносится слой пермаллоя толщиной 50 нм (рисунок 1б). В данном случае пленка пермаллоя использовалась для улучшения адгезионных свойств в процессе фотолитографии.

**Получение маски из фоторезиста с рисунком, соответствующим шаблону.** Первым этапом в фотолитографии является подготовка подложки, а именно, её очистка. На следующем этапе проводилось нанесение фоторезиста на пленку ЖИГ. Для фотолитографии использовался фоторезист AZ5214E. В данной работе этот резист использовался как позитивный. После нанесения фоторезист подсушивался на электроплитке. Сушка производилась в течении 1,5 минут при температуре 80°C для удаления остатков растворителя. Затем образец остужался до комнатной температуры. На следующем этапе на установке экспонирования MJB4 (рисунок 1б) осуществляется засветка образца через фотошаблон. Доза экспонирования для резиста толщиной 1,630 мкм (3000 об/мин) равна (120) мДж/см<sup>2</sup>. Время засветки составило 1,4 секунды. После засветки фоторезист проявляется следующим образом: его окунают в проявитель AZ 726 MIF в течении 40 секунд, при этом проводят визуальный контроль, затем промывают деионизированной водой для отмывки от агрессивной проявки (примерно 30 секунд – 1 минуту), сушат образец от воды в потоке сухого азота. Затем помещают образцы на оптический инспекционный

микроскоп MX51 для того, чтобы осуществить контроль проведения процесса фотолитографии. Контроль, проведенный на контактном профилометре подтвердил результаты оптического микроскопа. После просмотра результатов фотолитографии на оптическом микроскопе и контактном профилометре образцы помещаются на электроплитку при температуре 120 °С на 10 минут. Так проводится задубливание фоторезиста (сформированного рельефа рисунка). Затем опять делают фотографии на оптическом микроскопе MX51 и профилометре Dektak 150. По фотоснимкам и результатам с контактного профилометра видна успешность проведения процедуры второй сушки (задубливания). В таблице 1 представлены толщины фоторезистов на каждом участке образцов после второй сушки.

Таблица 1 – Толщины фоторезистов на каждом участке образцов до задубливания и после

№ Участка образца	Толщина фоторезиста до задубливания, мкм	Толщина фоторезиста после задубливания, мкм
A1	1,625	1,620
A2	1,625	1,560
A3	1,550	1,700
A4	1,550	1,580
B2	1,555	1,650
B3	1,650	1,700
B4	1,575	1,580
C	1,650	1,675

**Ионное травление.** После создания на поверхности пермаллоя маски из фоторезиста (рисунок 15в) образец подвергался ионному травлению (рисунок 15г). Травление осуществлялось пучком аргона с помощью ионной пушки типа Кауфмана. Время травления выбиралось так, чтобы полностью вытравить слой пермаллоя и вытравить ЖИГ на глубину ~ 1 мкм. После травления последующая работа опять переместилась в чистую комнату для проведения визуального и точного контроля на оптическом микроскопе MX51 и контактном



профилометре Dektak 150. Результаты представлены на следующих изображениях (рисунки 2-3).

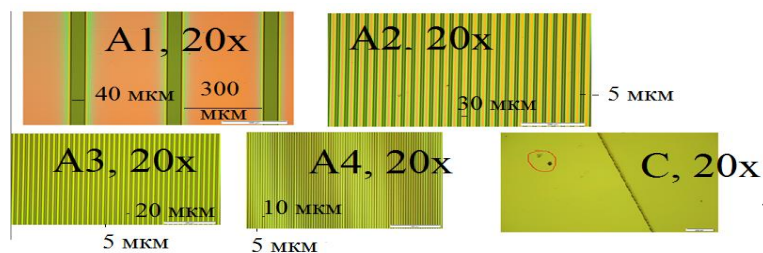


Рисунок 2 – Образец А и С после ионного травления

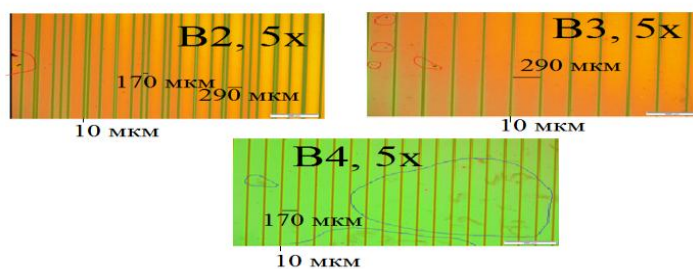


Рисунок 3 – Образец В после ионного травления

Визуальный контроль проведенный после ионного травления показывает, что образцы получились идеальными, не содержащих никаких дефектов. Традиционно помимо визуального контроля проводится и точный на контактном профилометре.

**Очистка от фоторезиста и адгезивного слоя.** После проведения ионного травления, а также последующего визуального и точного контроля следующим этапом работы стало удаления фоторезиста с образцов (рисунок 1д). Следующим этапом работы стало очистка образцов от пермаллоя (рисунок 1д).

**Контроль параметров изготовленных структур.** Удалив резист, а затем и металлическую плёнку получили структуру изображённую на рисунке 1е. Данную структуру необходимо проконтролировать на микроскопе и профилометре. Изображения с оптического инспекционного микроскопа МХ 51 представлены на рисунках 3 – 5.

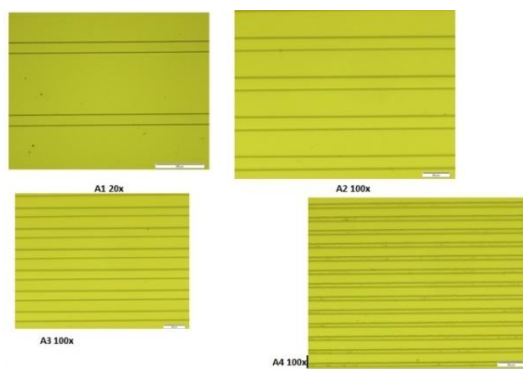


Рисунок 3 – Снимки с оптического микроскопа МХ 51 всех участков образца А после процедур очистки от фоторезиста и пермаллоя



Рисунок 4 – Снимки с оптического микроскопа МХ 51 всех участков образца В после процедур очистки от фоторезиста и пермаллоя

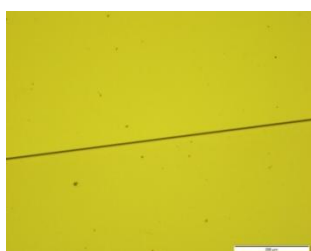


Рисунок 5 – Снимок с оптического микроскопа МХ 51 образца С после процедур очистки от фоторезиста и пермаллоя

Результатом визуального контроля проведенного после очистки от фоторезиста и пермаллоя стало получение чистой структуры, которая показана на рисунке 1е, а именно получение всех участков образцов без грязи.

**Контроль геометрии структур.** Как и во всех предыдущих случаях вслед за визуальным контролем идёт точный на контактном профилометре.

Полученные данные на профилометре перенесли в программу Microcal origin 6 и построили графики, показывающие высоту ступенек (рисунок 6).

№ Участка образца	Толщина фоторезиста до задубливания, мкм	Толщина фоторезиста после задубливания, мкм	Толщина фоторезиста +глубина травления пленки ЖИГ, мкм	Глубина травления пленки ЖИГ, мкм
A1	1,625	1,620	1,387	0,837
A2	1,625	1,560	1,426	0,895
A3	1,550	1,700	1,423	0,835
A4	1,550	1,580	0,750	0,680
B2	1,555	1,650	1,455	0,785
B3	1,650	1,700	1,400	0,755
B4	1,575	1,580	1,500	0,765
C	1,650	1,675	1,900	1,715

Рисунок 6 – Толщины фоторезиста на всех участков образцов

По значениям, которые приведены выше на графиках и таблице 3, видны результаты проведения процесса очисток. По данным замеров, в подтверждении визуального контроля, можно сделать вывод о том, что процедура очистки от фоторезиста и пермаллоя была качественной, следовательно финальная структура, показанная на рисунке 1е, получилась успешной.

**Исследование доменной структуры.** В работе также исследовалось влияние травления на магнитную доменную структуру в пленке ЖИГ. Наблюдение доменной структуры проводилось с помощью оптического микроскопа MX51 Olympus с использованием поляризаторов света. Данная методика основана на фарадеевском вращении плоскости поляризации света, проходящего через магнитную пленку. При этом плоскость поляризации поворачивается в противоположные стороны при прохождении света через домены, намагниченные «вверх» и «вниз» [14]. При помощи воздействия магнита доменная структура изменяется, что отображается на рисунках выше. У образца С доменная структура оказалась разной, так как толщина плёнки не одинакова. На тонкой плёнке домены получились меньше. Наблюдение доменной структуры свидетельствует о том, что ионное травление привело лишь к утончению пленки ЖИГ, не разрушив ее магнитных свойств.

**Заключение.** Представленная работа полностью отвечает заявленной структуре и состоит из введения, двух основных глав – теоретической и практической частей, заключения и списка использованных источников. В первой главе изложены все основные понятия, касающиеся изучения основных технологий, необходимых для формирования магнетонных кристаллов из плёнок железо–иттриевого граната. Для улучшения адгезионных свойств на поверхность ЖИГ наносят специальную плёнку (слой пермаллоя в данной работе). С целью осуществления этого процесса используют метод магнетронного распыления[15]. Существование неоднородностей в плёнке ЖИГ приводит к возбуждению спиновых волн, распространяющихся на значительное расстояние[5]. Одним из распространенных технологических процессов, основанных на использовании необратимых фотохимических явлений, является фотолитография[9]. Другим технологическим процессом считается травление, которое подразделяется на химическое и ионное. Целью травления является удаление плёнки или её очистка [10]. Несмотря на то, что химическое травление довольно простое по своей сущности, в данной работе применялось ионное травление ввиду изотропности химического травления. Ионное травление основано на физическом разрушении технологического слоя, который нанесен на подложку, бомбардировкой ионами инертного газа (Ar, Xe, Ne) и в отличие от химического травления сильно анизотропно [9], что позволяет изготавливать структуры с меньшими размерами.

Во второй главе работы описывается изготовление различных образцов МК, исследование параметров полученных структур и выявление основных преимуществ и недостатков использования технологии ионного травления для формирования МК.

В процессе изготовления было изготовлено три образца на основе ЖИГ. Нарушений выявлено не было. О высоком качестве изготовленных образцов свидетельствуют приведенные в работе данные, представленные в виде изображений, графиков, таблиц. Результаты работы показывают, что используя технологию ионного травления можно создавать структуры с гораздо

меньшими размерами, чем при химическом травлении. Кроме того, использование ионного травления позволяет получить профиль элементов со стенками близкими к вертикальным. Таким образом задачи, поставленные в рамках работы, решены, цель достигнута.

#### **Список использованных источников**

1 Террис, Б. Д. Нано - объемные и самоорганизующиеся магнитные структуры в качестве носителя данных / Б. Д. Террис, Т. Томсон. Мэриленд : Изд - во Письма прикладной физики, 2005. 199 с.

2 Ленц, Д. Магнитные датчики и их применение / Д. Ленц, А. С. Эдельштейн. Нью - Йорк : Изд - во IEEE, 2006. 631 с.

3 Никитов, С. А. Спиновые волны в периодических структурах - магнетонные кристаллы / С. А. Никитов, Ф. П. Тейлхадес, Цай Ц. С. Амстердам : Изд - во Elsevier, 2001. 320 с.

4 Гуляев, Ю. В. Доклад академии наук / Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов. СПб. : Изд - во ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2001. 470 с.

5 Гуляев, Ю. В. Ферромагнитные пленки с периодическими структурами с магнетонной запрещенной зоной - магнетонные кристаллы / Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, Л. В. Животовский, А. А. Климов, Ф. Тайад, Л. Пресманес, К. Бонин, Ч. С. Цай, Л. С. Высоцкий, Ю. А. Филимонов. СПб. : Изд - во ПЖТФ| Письма в ЖТФ, 2003. 15с.

6 Кабыченков, А. Ф. Особенности затухания акустических волн в поликристаллическом ЖИГ / А. Ф. Кабыченков, Г. Д. Мансфельд, А. А. Рубцов. СПб. : Изд -во ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 1991. 675с.

7 Пресс, Ф. П. Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / Ф. П. Пресс. М. : Изд-во: Советское радио, 1978. 96с.

8 Мокеев, О.К. Химическая обработка и фотолитография в производстве полупроводниковых приборов и микросхем. Учебное пособие / О.К. Мокеев, А. С. Романов. М.: Изд-во: Высшая школа, 1979. 186с.

9 Мартынов, В.В. Технология полупроводниковых приборов и изделий в микроэлектронике. Учебное пособие / В.В. Мартынов, Т.Е. Базарова. М. : Изд-во: Высш. школа, 1990. 9с.

10 Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон. дан. (1360438 статей, 5080499 страниц, 194844 загруженных файлов). Wikipedia® 2001 - 2018. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Травление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Травление) (дата обращения 08.01.2018). Загл. с экрана. Последние изменение страницы: 9:14, 18 июня 2012. Яз. рус].

11 Антоненко С.В. Технология тонких пленок / С. В. Антоненко. М. : Изд - во МИФИ, 2008. 104 с.

12 Микроскоп Olympus MX 515 [Электронный ресурс] // EUROTEK [сайт]. URL : <http://www.eurotek.com> (дата обращения : 04.12.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.

13 Dektak 150 Stylus Surface Profiler Operation Manual [Электронный ресурс] // Engineering [сайт]. URL : <http://engineering.ru> (дата обращения : 17.02.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

14 Доменная структура ферромагнитных металлов [Электронный ресурс] // Студопедия [сайт]. URL : <https://studopedia.su> (дата обращения : 25.01.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

15 Методы получения тонких пленок ионным распылением. Магнетронное распыление [Электронный ресурс] // MyShared [сайт]. URL: <http://www.myshared.ru> (дата обращения: 25.11.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.

