

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
НПЦ НАН БЕЛАРУСИ ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ

**МЕТАЛЛООКСИДНЫЕ ПЛЕНКИ:
ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ,
СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

Минск
«Беларуская навука»
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА РАЗЛИЧНЫХ ПО ПРИРОДЕ ПОДЛОЖКАХ	8
1.1. Отличия тонкопленочного состояния от объемного	8
1.2. Особенности роста тонких пленок и основные механизмы формирования... ..	10
1.2.1. Стадии формирования пленок	10
1.2.2. Механизмы роста пленок на идеальной подложке	12
1.2.3. Механизмы роста пленок на реальных подложках	14
1.3. Основные методы получения тонких пленок	20
1.3.1. Методы физического осаждения пленок	21
1.3.2. Методы ионного распыления	27
1.3.3. Методы химического осаждения пленок	34
Глава 2. ПЛЕНКИ ФЕРРИТОВ СО СТРУКТУРОЙ ШПИНЕЛИ $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4$	42
2.1. Синтез и структура пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4$ на подложках кремния	43
2.2. Структура пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_{4-\delta}$ толщиной 200 нм и 400 нм на подложках кремния	47
2.3. Магнитные свойства пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_{4-\delta}$ на подложках кремния	51
2.4. Особенности кристаллизации пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_{4-\delta}$ на Si с буферными слоями SiO_2 и TiO_2	53
2.5. Выбор барьерного слоя при осаждении пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_{4-\delta}$ на кремнии.. ..	59
2.6. Магнитные свойства гетероструктур $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4/SiO_x/Si$ и $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4/AlO_x/Si$	65
2.7. Электрические и магниторезистивные свойства пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4$	66
2.8. Особенности синтеза пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4$ на подложках GaN	69
2.9. Оптимизация условий осаждения пленок $Mg(Fe_{0,8}Ga_{0,2})_2O_4$ на эпитаксиальных структурах GaN/AlGaN для полевых транзисторов	74
Глава 3. ПЛЕНКИ СЛОЖНЫХ МЕТАЛЛООКСИДОВ НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ $BaFe_{12}O_{19}$	80
Глава 4. ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА $Y_3Fe_5O_{12}$	86
4.1. Наноразмерные пленки железиттриевого граната на подложках галлий-гадолиниевого граната	87
4.2. Синтез наноразмерных пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложках Si	92
4.2.1. Подавление диффузионных процессов на границе с подложкой за счет антидиффузионных барьеров на основе AlO_x и SiO_x	92

4.2.2. Магнитные свойства пленок YIG на подложках Si.....	96
4.2.3. ФМР в пленках YIG на подложках Si.....	97
4.3. Синтез и структура тонких пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ на подложках GaN.....	100
4.3.1. Общие принципы формирования YIG на подложках GaN.....	100
4.3.2. Магнитные, ФМР- и СВЧ-свойства пленок YIG на подложках GaN.....	104
4.4. Получение наноразмерных пленок YIG на подложках GaAs.....	107
4.4.1. Общие подходы к формированию наноразмерных пленок YIG на подложках GaAs.....	107
4.4.2. Применение ионно-лучевого метода повторного зарождения пленок на подложках GaAs.....	108
4.4.3. ФМР-исследования и спин-волновые свойства гетероструктур $Y_3Fe_5O_{12}/GaAs$	112
4.5. Синтез и свойства пленки $Y_3Fe_5O_{12}$ на сегнетоэлектрических подложках $LiNbO_3$	117
4.5.1. Формирование гетероструктур YIG/ $LiNbO_3$ методом ионно-лучевого распыления – осаждения	117
4.5.2. Структура и оптические свойства пленок YIG на подложках $LiNbO_3$	118
4.5.3. Магнитные и ФМР-свойства структур YIG/ $LiNbO_3$	121
4.6. Сплошные слои $Y_3Fe_5O_{12}$ на керамической подложке $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$	123
4.6.1. Общие подходы к формированию пленок YIG на керамической подложке $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$	123
4.6.2. Морфология поверхности и структурные свойства пленок YIG на подложке $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$	124
4.6.3. Магнитные свойства пленок YIG на подложке $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$	130

Глава 5. СПИН-ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

133

5.1. Исследование эффектов распространения спиновых волн в пленках железоиттриевого граната на подложках галлий-гадолиниевого граната и кремния	133
5.2. Эффекты распространения спиновых волн в пленках железоиттриевого граната на GaN	143
5.3. Спин-волновые устройства на основе пленок железоиттриевого граната на подложке арсенида галлия.....	147
5.4. Анализ практически востребованных характеристик наноразмерных пленок YIG для применения в дискретных приборах магнитной микроэлектроники.....	151
5.5. Трехмерные магнитные структуры на основе пленок железоиттриевого граната	164
5.6. Применение трехмерных магнитных структур в качестве дискретных элементов спиновой электроники (фильтр, делитель, ответвитель).....	171
5.6.1. Спин-волновой фильтр на основе структуры YIG/GGG.....	173
5.6.2. Спин-волновой фильтр на основе структуры YIG/ SiO_2/Si	175
5.7. Наноразмерные фотонные кристаллы со структурой золото/феррит-гранат для применения в магнитоплазмонике	179

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

188

ЛИТЕРАТУРА

189