

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

На правах рукописи

УДК 538.975–537.534.9

СТОГНИЙ Александр Иванович

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПУЧКАМИ  
ИОНОВ КИСЛОРОДА НА СВОЙСТВА  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНOK  
ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ**

(01.04.07 – физика конденсированного состояния)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск, 1993

Работа выполнена в лаборатории неметаллических ферромагнетиков в отделе твердотельной микроэлектроники Институте физики твердого тела и полупроводников АНБ

Научные руководители: старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук ГЕСЬ А.П.

кандидат физико-математических наук,  
ФЕДОТОВА В.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор АНИЩИК В.М. (БГУ)

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Федосюк В.М.  
(Институт физики твердого тела и  
полупроводников АНБ)

Оппонирующая организация: кафедра микроэлектроники Минского радиотехнического института

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 года в часов на заседании специализированного совета Д 006.18.01 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук в Институте физики твердого тела и полупроводников АНБ (220726, Минск, ул. П.Бровки 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики твердого тела и полупроводников АНБ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1993 г.

Ученый секретарь специализированного  
совета канд. физ.-мат. наук

А.В. Мазовко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Успехи, достигнутые в настоящее время в создании элементной базы магнитомикроэлектроники на основе монокристаллических пленок феррит-гранатов (МПФГ), во многом обусловлены достижениями в Исследовании процессов получения пленок и формирования пленочных структур. В результате были выращены пленки с высокими оптическими, магнитооптическими, магнитными и высокочастотными характеристиками.

Основным методом выращивания МПФГ является метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), в котором требования, предъявляемые к физическим свойствам пленок, удовлетворяются путем подбора состава раствора-расплава и режимов роста. Однако пленки, полученные в процессе ЖФЭ, уступают по качеству кристаллической структуры объемным монокристаллам, содержат неоднородные по составу слои. Причины происхождения отмеченных недостатков заключается в фундаментальной проблеме эпитаксии – необходимости согласования свойств кристаллических решеток подложки и растущей пленки, в многостадийности процесса ЖФЭ, в степени точности поддержания постоянства условий роста.

Данные обстоятельства послужили стимулом для поиска и исследований методов послеростового совершенствования свойств МПФГ. В настоящее время накопился значительный материал по применению с этой целью методов ионного облучения. Анализ результатов, полученных в указанном направлении, показывает перспективность использования ионно-лучевого облучения кислородом (ИЛОК). Но его реализация в длительных режимах, представляющих наибольший интерес, требует решения задач по обеспечению стабильности параметров ИЛОК и нейтрализации положительного объемного заряда пучка ионов кислорода. Следует также учитывать, что основу физической картины воздействия ИЛОК на состояние МПФГ составляют процессы ионного распыления, дефектообразования, диффузии, химического взаимодействия внедренных ионов кислорода с атомами мишени, возбуждения

и распространения упругих взаимодействий в кристаллической решетке, протекающие в областях от ангстремных до микронных размеров. Поэтому для получения сведений о состоянии МПФГ до и после облучений требуется применение экспериментальной методики, включающей такие взаимонезависимые и взаимодополняющие методы анализа, как растровая электронная микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС), обратное резерфордское рассеяние (ОРР) в сочетании с каналированием вдоль кристаллографических направлений, электронно-зондовый микроанализ (ЭЗМА), гамма-резонансная спектроскопия в геометрии отражения, рентгенодифракционный анализ. Необходимо также проведение математического моделирования воздействия бомбардирующих ионов кислорода на состояние кристаллической решетки мишени.

Таким образом, актуальность исследования определяет практическая реализация метода совершенствования МПФГ посредством ИЛОК на основе всестороннего исследования процессов, протекающих в пленках при облучении, анализа их зависимости от параметров облучения и последующего воздействия на состояние исходных образцов.

Целью данной работы явилось комплексное исследование закономерностей воздействия ИЛОК на свойства МПФГ в зависимости от параметров облучения.

В качестве основного объекта исследования выбраны моно - кристаллические пленки  $Y_3Fe_5O_{12}$  (ЖИГ). Обобщение выводов на МПФГ в целом проводилось исходя из выборочного анализа пленок  $(YLa)_3Fe_5O_{12}$ ,  $(YSmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ ,  $(LuBi)_3(MnFePt)_5O_{12}$ ,  $Y_3(FeScGa)_5O_{12}$ .

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки и разработка методики проведения ИЛОК в диапазоне энергий  $E = 0,1 \dots 10$  кэВ потоками ионов  $F_i = 5 \times 10^{14} \dots 5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> с в непрерывном режиме без ограничения на длительность набора требуемой дозы.

2. Проведение анализа процессов торможения ионов кислорода с энергией от 0,1 до 10 кэВ в мишени  $Y_3Fe_5O_{12}$  и образования поверхностного структурнонарушенного облучением слоя посредством математического моделирования методом Монте-Карло.
3. Определение набора экспериментальных методик с последующим применением к пленкам ЖИГ, позволяющих рассмотреть эволюцию рельефа поверхности при облучении, выявить особенности структурного строения, элементного состава и химических связей в слоях, включая поверхностные толщиной в десятки ангстрем и заканчивая пленкой в целом, до и после облучений.
4. Установление механизма протекающих при облучении процессов, выявление режимов совершенствования структуры пленок и однородности состава облучением.
5. Реализация целенаправленного воздействия облучением ионами кислорода на оптические, магнитооптические, магнитные и СВЧ свойства МПФГ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан и реализован метод воздействия на свойства МПФГ ионно-лучевым облучением кислородом в интервале энергий Ионов  $E = 0,1 \dots 10$  кэВ и потоков  $F_i = 5 \times 10^{14} \dots 5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>·с без ограничения на время непрерывного набора дозы  $D$ , что достигнуто благодаря реализации в источнике ионов оригинальной конструкции двухкаскадного самостоятельного разряда низкого давления без внешнего магнитного поля на кислороде и применения схемы самокомпенсации объемного положительного заряда ионного пучка по пути следования к диэлектрической мишени.
2. Методом ОРР в сочетании с каналированием проведен анализ воздействия ИЛОК на кристаллическую решетку пленки ЖИГ в зависимости от режимов облучения.

3. Установлен и исследован факт совершенствования структуры пленок ЖИГ после облучения с дозами  $D > 5 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и энергиями ионов  $E = 0,5 \dots 2$  кэВ на расстояниях от поверхности, (достигающих величины  $(10^2 \dots 10^3) R_p$  где  $R_p > 100$  Å - глубина пробега ионов кислорода в мишени.
4. На примере пленок ЖИГ определены особенности структурного строения и элементного состава переходного слоя пленка-поверхность, образующегося на стадии ЖФЭ, рассмотрены процессы распыления этого слоя ионами кислорода с энергией  $E = 0,5 \dots 2$  кэВ и процессы формирования поверхностного ионнооблученного слоя.
5. Экспериментально установлен и на основании предложенной теоретической модели объяснен процесс удаления микронеровностей на рельефе поверхности МПФГ ростового характера при ИЛОК с энергией  $E < 2$  кэВ.

Практическая ценность. Полученные результаты позволяют осуществлять целенаправленное послеростовое воздействие на характеристики МПФТ ионно-лучевым облучением кислородом. Показано, что ИЛОК позволяет уменьшать оптические потери в МПФГ толщиной до 10 мкм на 10...20 %, до двух-трех раз снижать потери на распространение поверхностных магнитостатических волн в спиновых волноводах на основе пленок ЖИГ, усиливать и подавлять магнитооптические характеристики поверхностных слоев МПФГ толщиной 0,01...0,1 мкм, повышать однородность магнитной структуры пленок в целом. Новизна научно-технических решений, изложенных в диссертации, защищена 5 авторскими свидетельствами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная методика воздействия на свойства МПФГ, заключающаяся в облучении поверхности пленок ионными пучками кислорода с плотностью потока  $F_i = 5 \times 10^{14} \dots 5 \times 10^{15}$  – ион/ см<sup>2</sup>×с, с энергией  $E = 0,1 \dots 10$  кэВ и с неограниченным временем непрерывного набора требуемой дозы.

2. Облучение ионами кислорода с энергией менее 1,2 кэВ приводит к образованию на поверхности пленок ЖИГ структурнонарушенного слоя толщиной менее 60 Å, что не превышает толщину исходного поверхностного структурноразупорядоченного слоя, образующегося на стадии ЖФЭ, но характеризуется в 1,5...2 раза большим содержанием в составе кислорода, в 3...5 раз меньшим содержанием нетрехвалентных катионов железа и отсутствием примесей органического происхождения по сравнению с составом исходного поверхностного слоя.
3. Облучение пленок ЖИГ ионами кислорода с энергиями от 0,5 до 2 кэВ и дозами более  $3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к удалению переходного слоя пленка-поверхность обогащенного в несколько раз по сравнению с остальным объемом пленки примесями свинца и платины технологического происхождения, и повышает совершенство кристаллической структуры пленки на глубину от поверхности, превышающей более чем на два порядка длину пробега ионов кислорода в мишени.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- XII Всесоюзная школа-семинар "Новые магнитные материалы микроэлектроники", – Новгород, 30 сентября – 6 октября 1990 г.
- V11 Международная конференция по микроэлектронике. – Минск, 16–18 октября 1990г.
- Международная конференция "ЕММА-91". – Дрезден, 16–19 апреля 1991г.
- 1991 MRS Fall Meeting.-Boston , 2-6 декабря 1991г.
- XIX Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений, – Ташкент, 24-27 сентября 1991г.
- Семинар по магнитомикроэлектронике. - Симферополь, 19-25 октября 1991г.
- XIII Всесоюзная школа-семинар "Новые магнитные материалы

микроэлектроники". – Астрахань, 22–26 сентября 1992г.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы научные работы, в том числе 8 статей в центральных журналах.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы из 111 наименований общим объёмом 131 страниц печатного текста и 36 рисунков.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе даны основные сведения о структуре и составе феррит-гранатов, об условиях эпитаксиального наращивания МПФГ.

Литературный анализ показал, что методу жидкофазной эпитаксии монокристаллических пленок феррит-гранатов, являющегося основным методом получения последних, свойственна многостадийность. На каждой из стадий происходит наращивание слоев пленки, которые неоднородны по составу и структуре. Поэтому даже самые совершенные пленки содержат как минимум три слоя, различающихся по физическим характеристикам. Это переходный слой пленка-подложка, происхождение которого одновременно связано и с фундаментальным вопросом эпитаксии – сопряжения кристаллических решеток пленки и подложки, и со стадией погружения подложки в раствор-расплав. Второй слой представляет собой собственно пленку при соблюдении стационарных условий наращивания. Происхождение третьего переходного слоя пленка-поверхность связано с процессом извлечения пленки из раствора-расплава. В результате эпитаксиальные пленки являются менее совершенными, чем объемные монокристаллы соответствующего состава.

Рассмотрение результатов, полученных при использовании методов ионного облучения для послеростового совершенствования свойств МПФГ, показывает необходимости проведения исследований по воздействию пучков ионов кислорода с энергиями в диапазоне 0,1...10 кэВ на состояние пленок. В этом случае следует ожидать сочетания решений двух проблем. Первая связана с образованием обедненного по содержанию кислорода поверхностного слоя при облучении ионами другого типа, а вторая – с повышением однородности МПФГ путем ионного распыления неоднородного поверхностного слоя ростового происхождения. Однако длительность облучения, согласно сделанных оценок, должна достигать от единиц до десятков часов. Для формирования интенсивных пучков ионов кислорода с нейтрализованным объемным зарядом и полученной длительностью требуется привлечение новых научно-технических решений.

Во второй главе приведены результаты, полученные при создании экспериментальной установки ионно-лучевого облучения кислородом.

Установка включает оригинальной конструкции широкоапертурный источник ионов с холодным катодом и узел принудительной компенсации объемного положительного заряда ионного пучка. В источнике применен двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления, связь между геометрическими размерами разрядной камеры которого и процессами генераций ионов кислорода определяется со отношениями:

$$\left( \frac{Q \langle V_l \sigma_{la} \rangle}{A_k T \omega_{pl} (n_b / n_l)^{1/3}} \right)^{1/2} < d \leq 0,1H, \quad (1)$$

$$r_D (n_l v_l / n_b v_b) \ln(n_b v_b^2) < h \leq 0,1kTAd^2 (Q \sigma_{la})^{-1}, \quad (2)$$

Здесь  $Q$ ,  $n$  – величина потока и объемная концентрация кислорода, подаваемого в разрядную камеру,  $T$  – его температура,  $M = 32$  – молекулярный вес,  $A = 9,1\pi (T/M)^{1/2}$ ;  $r_D$ ,  $\omega_{pl}$ ,  $n_l$ ,  $v_l$  – дебаевская длина, собственная частота, плотность и тепловая скорость электронов, соответственно, характеризующие плазму анодного каскада разряда;

$n_b$  и  $v_b$  – плотность и скорость электронов пучка, поступающего из катодного каскада разряда в анодный;  $\sigma_{ia}$  – сечение электрон-атомных столкновений;  $H$  – характерный размер полого катода;  $d$ ,  $h$  – диаметр и высота полого анода.

При выполнении неравенств (1-2) заряженные частицы в объеме катодного каскада генерируются в основном  $\gamma$  - электронами вторичной эмиссии со стенок катода, ускоренными в слое катодного падения потенциала и осциллирующими в полом катоде. А в анодном каскаде ионизация осуществляется плазменными электронами, приобретающими необходимую для этого энергию в поле ленгмюровских колебаний, которые возбуждаются электронами из катодного каскада, ускоренными в виде пучка в направлении анода электрическим полем двойного электрического слоя, разделяющего каскады.

Экспериментальная система нейтрализации заряда ионного пучка включает ионопровод диаметром  $D_i$  и длиной  $L_i$ , определяемых соотношениями:  $D_i = (1,2...1,6)d_b$ ,  $L_i = (1,6...2,4)d_b$  где  $d_b$  – диаметр сечения ионного пучка, причем  $d_s \leq 0.3 d_b$  ( $d_s$  - характерный размер диэлектрической мишени). Весь ионопровод находится под отрицательным потенциалом  $0...50$  В относительно ускоряющего электрода источника ионов.

В третьей главе охарактеризованы используемые экспериментальные методы анализа, дано краткое обоснование выбора пленок для облучений и более подробно - выбора пленок ЖИГ толщиной до 10 мкм в качестве базового объекта. Критерием определения качества исходных образцов являлось выполнение известных эмпирических условий:  $|a-a_0|/a_0 < 2 \times 10^{-3}$ ,  $0,03h^{-1/2} > |a-a_0|$ ,  $\chi_{min} < 0,1$ . Здесь  $a_0$ ,  $a$  – постоянная кристаллической решетки подложки и пленки, соответственно, Å;  $h$  – толщина пленки, мкм;  $\chi_{min}$  – параметр, определяемый по спектрам обратного резерфордского рассеяния и характеризующий кристаллическую структуру ( $\chi_{min} < 0,05$  соответствует совершенным объемным монокристаллам).

Численное моделирование экспериментов по облучению мишеней ЖИГ проводилось методом Монте-Карло по программе TRIM – 88. Оно позволило оценить величину пробега ионов кислорода в глубь мишени  $R_p$ ,

конкретизировать процессы потерь энергии ионов при торможении, установить их зависимость от начальной энергии. Величина пробега  $R_p$  возрастает от 10 Å до 170 Å с увеличением энергии ионов от 0,5 до 10 кэВ. Для ионов кислорода с энергией менее 2 кэВ потери энергии на ионизационные столкновения, образование вакансий и генерацию упругих колебаний сопоставимы по величине и составляют для каждой от 8% до 15 % от значения начальной энергии. С увеличением энергии ионов до 10 кэВ начинают преобладать ионизационные потери энергии (возрастают до 30 %), а другие уменьшаются до 3...5 % от начальной энергии ионов.

Набор методов анализа определялся необходимостью контроля за состоянием как поверхностных слоев толщиной согласно результатов численного моделирования в несколько десятков ангстрем, так и всей пленки в целом. Состав и химические связи в поверхностном слое толщиной до 50 Å анализировались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Элементный анализ поверхностного слоя образцов на глубину до 0,1 мкм проводился методом масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) на установке Самеса IMS-4F. Эффективная глубина анализа составляла не более 20 Å, распределение по глубине подучалось посредством распыления поверхности. Структура поверхностного слоя толщиной до 2 мкм и его элементный состав определялись методами обратного резерфордовского рассеяния (ОРР) для разориентированно и каналированно, в направлении [111], падающих на мишень протонов  $H^+$  с энергией 600 кэВ и ионов  ${}^4He^+$  с энергией 2,4 МэВ. Электронно-зондовый микроанализ состава пленок и распределения элементов по толщине и поверхности проводился сканирующим электронным микроскопом Nanofab-7, снабженным энергодисперсным рентгеноспектроскопическим анализатором System-810-500. Рентгеноструктурные исследования проводились на рентгеновском спектрометре ДРОН-3.0. Изображения рефлексов (888)  $CuK\alpha_1$  – лучения фиксировались отдельно от пленки и подложки, при необходимости точность измерений повышалась применением симметричного германиевого

монохроматора с плотностью дислокаций порядка  $10^2 \text{ см}^{-2}$ . Методом ядерного гамма-резонанса (ЯГР) на спектрометре фирмы Wissel исследовалось влияние ионного облучения на состояние катионов железа в объеме пленок. Эволюция рельефа поверхности и измерение толщины пленок под воздействием ионно-лучевого распыления контролировались методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Оптический микроскоп обладал тысячекратным увеличением, электронный микроскоп увеличивал до тридцати тысяч крат.

Комплексное применение перечисленных методов позволило определить строение переходного слоя пленка-поверхность ростового происхождения в исходных пленках ЖИГ. Условно он содержит два слоя. Первый находится на поверхности, является структурнонарушенным и нестехиометричным по составу, содержит примеси органического происхождения и железо в металлическом, двух- и трехвалентном состояниях с сопоставимыми концентрациями. Толщина этого слоя составляет до  $60 \text{ \AA}$  в наиболее совершенных образцах. Второй слой толщиной до  $0,15 \text{ мкм}$  имеет структуру граната, но содержит в два-четыре раза большее количество примесей технологического происхождения свинца и платины, чем в нижележащей пленке. В этом слое наблюдаются существенные, более 10 %, вариации в распределении элементов по толщине.

В четвертой главе изложены результаты исследований по воздействию ионно-лучевого облучения на совершенство структуры и однородность пленок по толщине. Определено, что оптимальные режимы воздействия обеспечивают по мере набора дозы облучения  $D > 5 \times 10^{18} \text{ ион/см}^2$  пучки ионов с плотностью тока до  $0,6 \text{ мА/см}^2$  и энергией из интервала  $0,5 \dots 2 \text{ кэВ}$ . При этом происходит одновременно ионное распыление переходного слоя пленка-поверхность ростового происхождения, образование на поверхности тонкого облученного слоя и повышение степени совершенства кристаллической структуры вдали от поверхности.

Скорость распыления  $v_p$  нелинейно зависит от дозы облучения  $D$  по мере набора дозы, соответствующей моменту окончания распыления поверхностного слоя ростовой природы. После этого она принимает постоянное значение и составляет от 2,4 нм/мин. для ионов с энергией  $E = 0,5$  кэВ и до 3,6 нм/мин. для ионов с  $E = 2$  кэВ. Для ионов с меньшими энергиями быстро падает ( $V_p = 0,9$  нм/мин. для  $E = 0,3$  кэВ) и почти не растет с увеличением  $E > 2$  кэВ ( $V_p = 3,8$  нм/мин, для  $E = 4$  кэВ). Согласно результатов численного моделирования это объясняется тем, что в диапазоне энергий ионов 0,5...2 кэВ максимум величины удельных потерь энергии на упругие столкновения с атомами мишени, приводящих к распылению атомов, лежит в слое, из которого идет распыление, а доля этих потерь энергии достигает 25 % от начальной энергии ионов. При начальной энергии ионов  $E \leq 0,3$  кэВ смещенным атомам мишени передается недостаточная для выхода на поверхность энергия. При  $E > 2$  кэВ основная доля смещенных атомов образуется вдали от слоя, из которого идет распыление

В оптимальных режимах облучения переходный слой пленка-по - верхность ростовой природы распыляется по мере набора дозы  $D \approx 10$  ион/см<sup>2</sup>. При этом образуется на поверхности облученный слой толщиной порядка  $2R_p \leq 120$  Å. Он является структурно-нарушенным относительно нижележащей пленки, обогащен в сравнении с ее составом, в среднем, почти в два раза по содержанию кислорода, и до полутора раз – железа, а по содержанию иттрия обеднен почти в два раза. Железо и иттрий находятся в облученном слое, в основном, в трехвалентном состоянии. Примесей органического происхождения на облученной поверхности не обнаружено. Толщина облученного слоя определяется процессами столкновений ионов кислорода с ранее внедрившимися в мишень ионами кислорода и ранее смещенными из углов кристаллической решетки атомами, приводящих к продвижению последних на глубину больше  $R_p$ . Различие в концентрациях железа и иттрия связано с различием в значениях парциальных коэффициентов распыления  $Y_s$ .

Обнаружено, что рельеф исходной поверхности содержит неровности ростового происхождения размерами до 0,1 мкм, которые удаляются путем

распыления в процессе набора дозы облучения  $D \geq 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>. На основании экспериментальных данных разработана теоретическая модель, описывающая планаризацию рельефа МПФГ при облучении ионами кислорода. В этой модели мишень разбивается на совокупность элементарных участков  $\Delta S$ , включающих множество участков  $dS_k$  со случайным образом ориентированным вектором нормали  $\vec{k}$ . В результате усреднений по направлениям  $\vec{k}$  в окрестности  $\Delta S$  и по параметру  $B$ , характеризующему неровность рельефа:

$$B = \int_{\Delta S} \langle Y_s dS_k \rangle / \langle Y \rangle_k \Delta S, \quad (3)$$

распределение потока распыленных атомов в направлении  $\vec{v}$  определяется выражением

$$Y_s^*(E, \vec{h}; E_b)(\vec{h}\vec{v}), \quad (4)$$

Здесь  $V_s^*$  – эффективный коэффициент распыления с поверхности участка  $\Delta S$ , зависящий от энергии ионов  $E$ , направления их падения на мишень –  $\vec{h}$  и поверхностной энергии связи атомов  $E_b$ . Появление, согласно (4), в распределении распыленных атомов, анизотропного члена  $\vec{h}\vec{v}$  по сравнению с распылением плоской мишени, связанное состояние атомов на распыляемой поверхности, зависимость величины энергии связи  $E_b$  от рельефа поверхности приводит в процессе длительного облучения ионами кислорода с энергией  $E \leq 2$  кэВ к плавной планаризации поверхности МПФГ.

Экспериментальное исследование повышения степени совершенства кристаллической структуры облученных пленок по глубине от поверхности, составляющей до  $(10^2 \dots 10^3)$   $R_p$  проводилось методами ОРР в сочетании с каналированием, протонографии и рентгеноструктурного анализа. Совершенствование структуры наблюдается при облучении пучками ионов кислорода с энергией от 0,5 до 4 кэВ и дозами облучения  $D > 5 \times 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. По мере набора дозы  $D \geq 2 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> процесс совершенствования замедляется и после достижения  $D \geq 4 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> прекращается. Для пленки

ЖИГ с исходным значением  $\chi_{\min}^0 = 0,44$  на глубине 1,2 мкм после облучения с  $E = 1,2$  кэВ и  $D = 4 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> достигнуто значение  $\chi_{\min}^0 = 0,35$ . Одновременно определено уменьшение полуширины на полувысоте рефлекса (888) линии  $\text{CuK}\alpha_1$  на  $16''$ . Численные оценки качественного характера, выполненные с привлечением теоретической модели, разработанной для описания структурных изменений в кристалле вдали от облучаемой ионами поверхности (Семин Ю.А., Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. Усиление генерируемых ионной бомбардировкой упругих волн при распространении в кристалле с кластерами дефектов // Письма в ЖГФ, – 1988, – т.14, в.3. – с.273–275), позволяют предложить следующее объяснение данных экспериментальных результатов. Интенсивный поток ионов кислорода в процессе торможения кристаллической решеткой возбуждает упругие колебания в ней, которые распространяясь в глубину, активируют состояние точечных дефектов в примесно-дефектной атмосфере протяженных дефектов на глубине, обеспечивая, например, сток вакансий на дислокацию или междоузельный кластер точечных дефектов. Восстановление квазиравновесной концентрации вакансий обеспечивается их оттоком из области генерации точечных дефектов упругонапряженного облученного поверхностного слоя. В результате стока вакансий на дефект возможно рассасывание междоузельных кластеров и переползание дислокаций в направлении поверхности на глубинах величиной порядка микрометра. По мере завершения образования поверхностного структурнонарушенного слоя, экспериментально наблюдающееся при  $D \approx 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>, процессу оттока вакансий на глубину начинает препятствовать процесс их захвата границей между этим слоем и оставшейся частью пленки. Поэтому процесс совершенствования структуры на глубине постепенно замедляется и потом прекращается с ростом дозы.

В пятой главе рассмотрено воздействие ионно-лучевого облучения кислородом на оптические, магнитооптические, магнитные и высокочастотные свойства МПФГ. Показано, что в результате совершенствования структуры и

повышения однородности пленок величина оптического пропускания возрастает, причем на более прозрачных участках почти на 20 %. Одновременно наблюдается подавление осцилляционной картины на кривой пропускания, вызванной интерференцией волн, отраженных от границ неоднородных по толщине слоев. Обнаружено небольшое увеличение полярного эффекта Керра, вызванное планаризацией рельефа поверхности облученных образцов, и более существенное влияние облучения на экваториальный эффект Керра. Повышается магнитная однородность облученных пленок.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты выполненной диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработан и исследован метод воздействия облучения пучками ионов кислорода с энергией, изменяющейся в интервале 0,1...10 кэВ, и величиной плотности потока от  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>·с до  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>·с, без ограничения на время непрерывного набора требуемой дозы, на свойства монокристаллических пленок феррит-гранатов.
2. Методом Монте-Карло проведен теоретический анализ процесса взаимодействия ионов кислорода с мишенью  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Получены зависимости величины проективного пробега ионов  $R_p$  от их начальной энергии, определены энергетические потери на ионизационные столкновения, на генерацию вакансий и фононов.
3. Методом ОРР в сочетании с каналированием вдоль кристаллографического направления [111] определена зависимость характера изменения свойств пленок ЖИГ от параметров пучка ионов и показано, что оптимальным является облучение ионами с энергией  $E = 0,5...2$  кэВ и дозами  $D > 3 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>.

4. Установлено, что облучение ионами кислорода с энергией менее 1,2 кэВ приводит к образованию на поверхности пленок ЖИГ структурнонарушенного слоя толщиной менее 60 Å, которая не превышает толщину разупорядоченного поверхностного слоя, образующегося на стадии роста в исходных образцах.
5. Экспериментально определено совершенствование структуры МПФГ на расстояниях от поверхности, превосходящих на два-три порядка величину  $R_p$ , при облучении ионами с энергией  $E = 0,5...4$  кэВ, дозой  $D > 5 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> и предложено его объяснение.
6. Экспериментально исследована и теоретически объяснена эволюция рельефа поверхности в результате ионного распыления, которое приводит к уменьшению характерных размеров микровыступов ростового характера на поверхности до размеров порядка межатомных при энергии ионов  $E = 0,5...2$  кэВ и дозе облучения  $D \geq 4 \times 10^{19}$  ион/см<sup>2</sup>.
7. Показано, что в результате распыления исходного поверхностного слоя ростового происхождения и совершенствования кристаллической структуры по глубине повышается однородность магнитной структуры пленок, уменьшаются локальные деформации в магнитных подрешетках, повышается оптическая прозрачность пленок, снижаются потери на распространение магнитостатических волн.

## Результаты диссертации опубликованы

в следующих основных работах:

1. Стогний А.И., Никитинский В.А., Журавлев Б.И., Двухкаскадный самостоятельный разряд низкого давления без внешнего магнитного поля // ЖТФ. – 1988. – т.58, – № 5. – с, 993–995.
2. Stognij A.I., Tokarev V.V. Hollow Cold Cathode Ion Source for Reactive Ion Beam Etching // MRS Volume 158. – 1989 – p.61–67.
3. Гесь А.П., Демченко А.И., Стогний А.И., Федотова В.В. Облучение ЖИГ-пленок низкоэнергетичным пучком положительных ионов кислорода // XII Всесоюзная шк.-сем. "Новые магн. матер. микроэлек, – Тез. докл. – ч. 1. – Новгород. –1990. – с. 123.
4. Стогний А.И., Токарев В.В. Широкоапертурный источник ионов реактивных газов // ПТЭ. – 1990. – № 3. – с. 142–144.
5. Стогний А.И, Демченко А.И., Дубовик А.И. и др. Источник ионов реактивных газов // ПТЭ. – 1990. – № 5. – с. 42–44.
6. Стогний А.И., Токарев В.В., Демченко А.И., Понкратов В.В. Широкоапертурный источник ионов кислорода // Тез. докл. VII Междунар. конф. "Microelectronics – 90". – Минск. – 1990. – т.2. – с. 177.
7. Гесь А.П., Демченко А.И., Стогний А.И. и др. Изменение структурных и оптических характеристик тонких ЖИГ пленок под воздействием низкоэнергетического пучка ионов кислорода // Письма в ЖТФ. – 1991. – т.17. – в.1. – с. 17–21.
8. Stognij A.I., Tokarev V.V. and Mitin Yu.N. The formation of Metal Oxide Thin Films by Sputtering Powder Mixtures with Oxygen Ions //MRS Volume 235–236. – 1991. – p. 231–234.
9. Гесь А.П., Стогний А.И., Федотова В.В. Совершенствование структуры ЖИГ-пленок низкоэнергетичным облучением ионами кислорода // XIX Всесоюзн. конф. по физике магн. явлений. – Тез. докл. – ч. II. – Ташкент. – 1991. – с. 110.

10. Стогний А.И., Федотова В.В., Гесь А.П. и др. Изменение объемных свойств пленок ЖИГ при низкоэнергетичном облучении ионами кислорода // XIII Всесоюзн. шк.-сем. "Новые магн. мат, микроэлек." Тез. докл. – ч.П. – Астрахань. – 1992. – с. 47–48.
11. Стогний А.И., Федотова В.Р., Гесь А.П. и др. Изменение условий распространения магнитостатических волн в облученных низкоэнергетичными ионами кислорода пленках железоиттриевых гранатов // ЖТФ. – 1992. – т.73. – в. 11. – с. 1121–1125.
12. А.с. СССР № 1245152, МКИ НОИД 73/04. Источник ионов / Никитинский В.А., Стогний А.И., Ткаченко А.Б.
13. А.с. СССР № 1561744. МКИ НОИД 727/00. Источник ионов / Стогний А.И., Никитинский В.А., Журавлев Б.И.
14. А.с. СССР № 1589899, МКИ НОИД 727/00. Источник ионов / Стогний А.И.
15. А.с. СССР № 1623240, МКИ С ЗОВ 31/22, 29/28. Способ формирования в феррит-гранатовых структурах областей с различными магнитными свойствами / Богуш А.К., Демченко А.И., Токарев В.В. Стогний А.И.
16. А.с. СССР N 1662284, МКИ С ЗОВ 31/22. Способ прецизионного травления пленок на подложках / Малышев В.С., Стогний А.И., Токарев В.В.