

ИЗМЕНЕНИЕ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ КИСЛОРОДА ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВЫХ ГРАНАТОВ

*А.И. Стогний, В.В. Федотова, А.П. Гесь, В.А. Колосов,
М.И. Еремина, Т.М. Пяткова*

Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по разработке и совершенствованию элементной базы СВЧ устройств на магнитостатических волнах (МСВ). Широкое использование в этой области в качестве магнитодиэлектрической волноводной среды находят благодаря низким значениям потерь A на распространение МСВ эпитаксиальные пленки железоиттриевых гранатов (ЖИГ). Минимизация потерь A достигается путем улучшения качества структуры пленок в процессе выращивания одновременно с повышением уровня контроля состава (например, [1,2]). Совершенствование МСВ приборов переходом к более толстым пленкам ЖИГ усложняет задачу минимизации A . Так, рассогласование значений постоянных кристаллических решеток ЖИГ и обычно используемого в качестве подложки галлий-гадолиниевого граната является источником упругих деформаций. При достижении пленкой толщины около 15 мкм энергия деформации высвобождается путем растрескивания [2]. Устранение деформаций путем введения примесей отрицательно сказывается на качестве ЖИГ. Длительность процесса выращивания толстых пленок также может явиться причиной неоднородности состава и структуры по их толщине [3].

Вышеотмеченное обуславливает актуальность задачи совершенствования пленок ЖИГ для МСВ приборов методами послеростовой обработки. В работах [4,5] аналогичная задача для тонких эпитаксиальных пленок (до 10 мкм) решалась применением низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки кислородом (ИЛО). Данная работа посвящена исследованию воздействия ИЛО на передаточные характеристики тестовых линий задержки на МСВ, использующие пленки ЖИГ толщиной более 20 мкм. В результате длительной (высокодозной) ИЛО достигнуто снижение потерь на распространение A почти в два раза и обнаружено смещение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) на 60–90 МГц в сторону меньших частот для образцов с исходной шириной линии ферромагнитного резонанса ΔH мене 1.02 Э. Минимальная величина потерь на распространение A на частоте 6.1 ГГц составила менее 3.7 дБ, что не уступает лучшим образцам с $\Delta H < 0.5$ Э [1]. Установлено, что величина дозы облучения D , при которой достигается насыщение протекающих процессов, составляет $6 \cdot 10^{19}$ см⁻², а их причиной является совершенствование структуры ЖИГ пленок и повышение их однородности.

Экспериментальное оборудование и методика проведения экспериментов

Спиновыми волноводами служили пленки ЖИГ, выращенные методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава PbO/V_2O_5 на подложках галлий-гадолиниевых гранатов с ориентацией (111). Толщина пленок составляла 20–25 мкм, размеры рабочих образцов $2 \times 8 \times 20$ мм. Образцы разделялись на две серии по исходному ΔH — менее и более 1.02 Э .

Облучение волноводов производилось с помощью источника ионов с холодным катодом, поставляющего пучок положительных ионов кислорода с энергией 0.5 кэВ и равномерной по сечению плотностью тока величиной 0.5 мА/см^2 [6]. При облучении образцы помещались на водоохлаждаемом держателе на расстоянии 200 мм от источника ионов в области с рабочим давлением $2 \cdot 10^{-4}$ Тор и предельным вакуумом 10^{-5} Тор. Доза облучения D варьировалась временем облучения, а нейтрализация объемного положительного заряда ионного пучка осуществлялась в режиме автокомпенсации [7]. Влиянием процесса распыления при ИЛО на толщину пленок пренебрегалось, так как толщина распыленного слоя h (нм) была мала и описывалась эмпирическим законом $h \approx 1.8 \cdot 10^{-18} D$ для $D > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Передаточные характеристики тестовых линий задержки на поверхностных МСВ замерялись для данных волноводов до облучения и после каждой дозы. Соответственно проводился анализ изменений характеристик пленок, вызванных ИЛО. Кристаллоструктурные параметры измерялись методом обратного резерфордовского рассеяния каналированных ионов (ОРКИ) [8] на ускорительном комплексе УПИ (г. Екатеринбург), а магнитоструктурные — по индуктивно-частотной методике [9] на модифицированной установке “Эталон-1” (ДонФТИ, Донецк).

Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 1,а,б приведены характерные участки АЧХ до и после ИЛО волноводов, вырезанных из одной пластины (толщина 21 мкм; $\Delta H \lesssim 1.02 \text{ Э}$; $D, \text{ см}^{-2}$: 1 — 0, 2 — $3 \cdot 10^{19}$, 3 — $6 \cdot 10^{19}$). Видно, что изменения АЧХ при ИЛО носят сходный характер и различия в них уменьшаются с ростом дозы. Подобным образом при ИЛО вели себя все волноводы из серии с исходным $\Delta H \lesssim 1.02 \text{ Э}$. На рис. 1,в показано воздействие ИЛО на АЧХ волновода из другой серии (ΔH около 1.05 Э , толщина 23 мкм). Видно, что воздействие ИЛО минимально и неоднозначно. Это характерно и для других волноводов данной серии.

Согласно рис. 1,а,б, ИЛО вызывает уменьшение потерь на распространение МСВ и смещение АЧХ в сторону меньших частот в целом. На рис. 2 построены зависимости $A_m(D)$ и $f_m(D)$ для волноводов с АЧХ на рис. 1,а,б (кривая 1 соответствует волноводу рис. 1,а, кривая 2 — рис. 1,б), здесь A_m — минимальная величина потерь на распространение при каждой D ; f_m — частота, соответствующая A_m . Кривые имеют различные начальные участки нелинейного спада с тенденцией к сближению с ростом D , выходят на участок насыщения при $D \gtrsim 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и сливаются при $D \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Аналогично поведение образцов данной серии. Наблюдается двукратное уменьшение A_m до величин 3.7–4.2 дБ

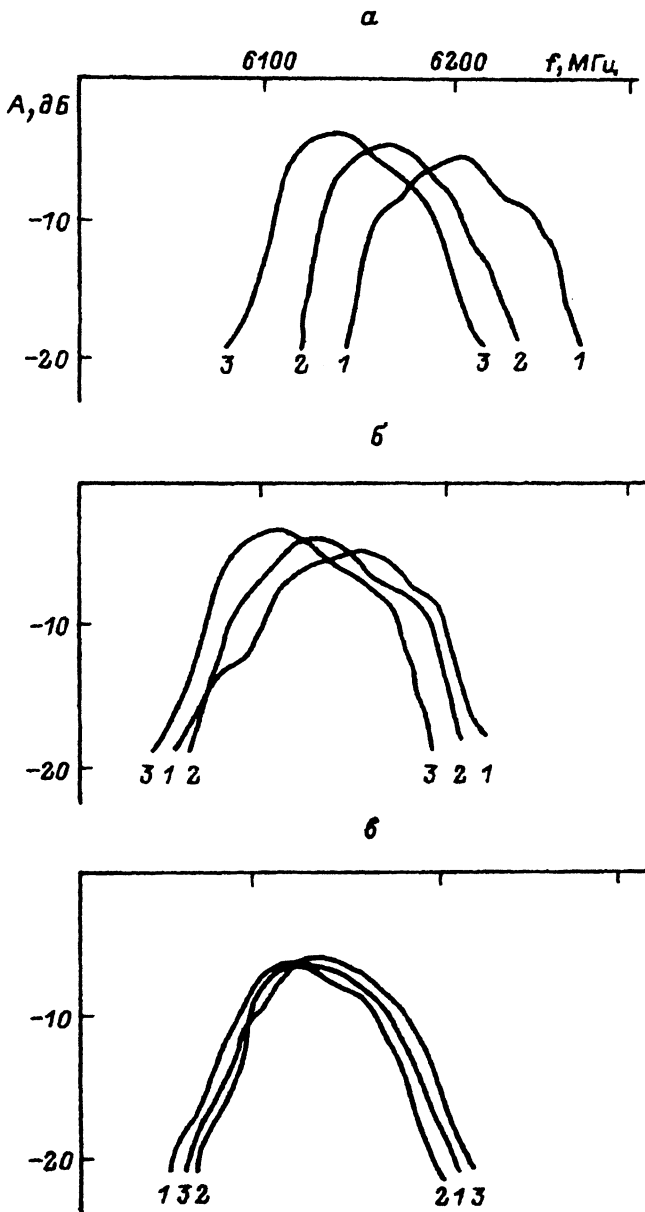


Рис. 1.

и уменьшение f_m на 60–90 мГц при наборе дозы $D_m \gtrsim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, соответствующей дозе насыщения.

Механизм процессов, протекающих при ИЛО спиновых волноводов, позволяет установить анализы последних методами ОРРКИ и индуктивно-частотным. На рис. 3 показаны спектры минимального выхода ионов He^+ с энергией 2.4 МэВ при каналировании вдоль кристаллографической оси (111), характеризующиеся величиной χ_m , для образца

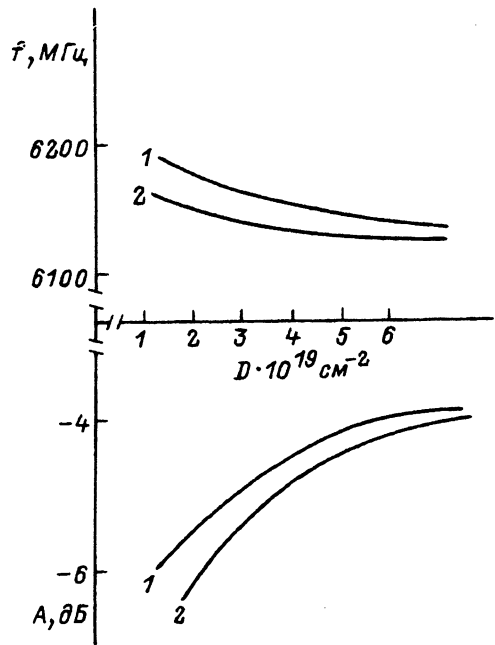


Рис. 2. Зависимости величин минимальных потерь A_m и соответствующих им частот f_m от дозы облучения.

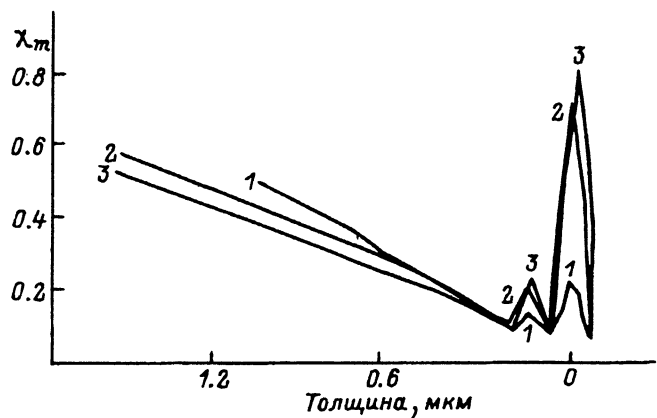


Рис. 3. Спектры обратного резерфордского рассеяния каналированных ионов в пленке ЖИГ до и после облучения.

первой серии ($\Delta H \lesssim 1.01 \text{ Э}$; толщина 21 мкм; D , см⁻²: 1 — 0, 2 — $3 \cdot 10^{19}$, 3 — $6 \cdot 10^{19}$). Ход кривой χ_m [8] говорит об образовании при ИЛО тонкого поверхностного слоя толщиной до 10 нм с сильнонарушенной структурой, оцениваемой по двум поверхностным пикам. Формирование этого слоя заканчивается при $D \approx 3 \cdot 10^{19}$ см⁻². На глубине более 0.6 мкм χ_m убывает с ростом $D \gtrsim 3 \cdot 10^{19}$ см⁻². Последнее прямо свидетельствует об улучшении кристаллической структуры пленки при ИЛО с $D \gtrsim 3 \cdot 10^{19}$ см⁻². Совершенствование структуры пленки заканчивается достижением $D \approx 5 \cdot 10^{19}$ см⁻².

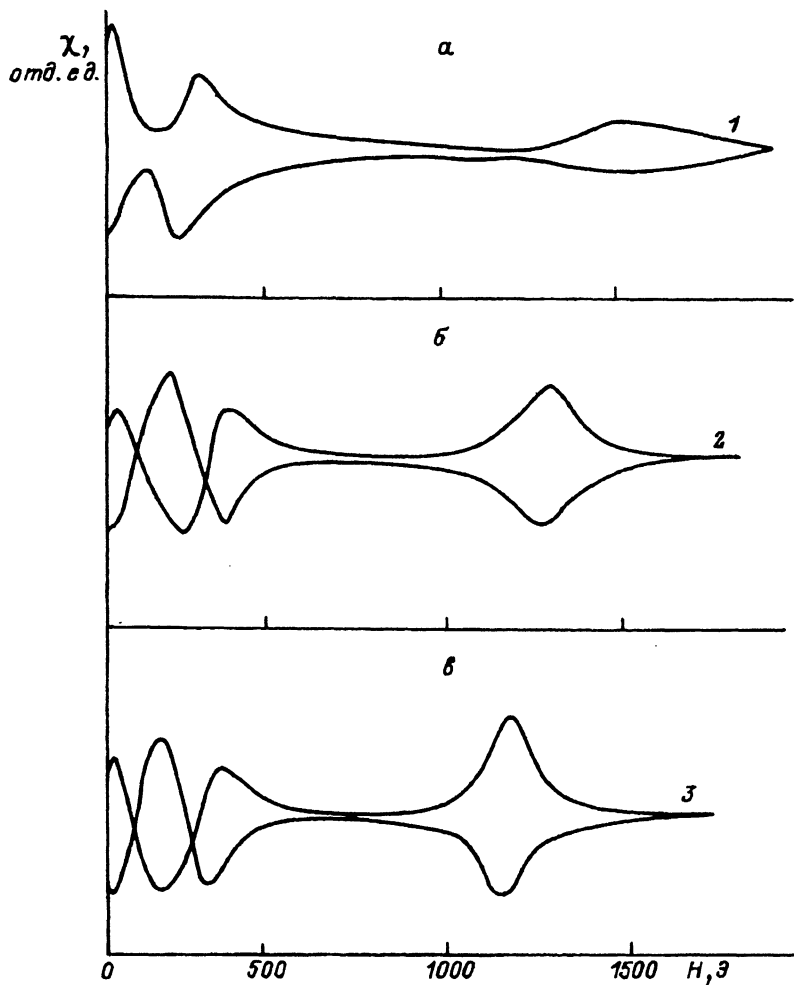


Рис. 4. Влияние облучения на зависимости магнитной восприимчивости $\chi = \chi(H)$. $D, \text{см}^{-2}$: 1 — 0, 2 — $3 \cdot 10^{19}$, 3 — $6 \cdot 10^{19}$.

В волноводах другой серии с $\Delta H > 1.02$ Э также образуется поверхностный структурно нарушенный ИЛО слой, но улучшений структуры на глубине не обнаружено. Причиной может служить то, что у этих образцов на глубине 0.6 мкм $\chi_m > 0.5$, а у первой серии $\chi_m < 0.4$. Поэтому некачественная исходная структура образцов с $\Delta H > 1.02$ Э делает их невосприимчивыми к ИЛО. Более структурно качественные волноводы первой серии совершенствуют структуру под воздействием ИЛО вплоть до достижения доз $5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$, соответствующих дозам насыщения. Повышение качества структуры с ростом D является причиной снижения величины потерь A на распространение МСВ.

Одновременно с совершенствованием структурных характеристик при облучении ионами кислорода наблюдается повышение однородности распределения магнитных параметров волноводов по глубине. На рис. 4 приведены кривые, отражающие изменение магнитной восприимчивости

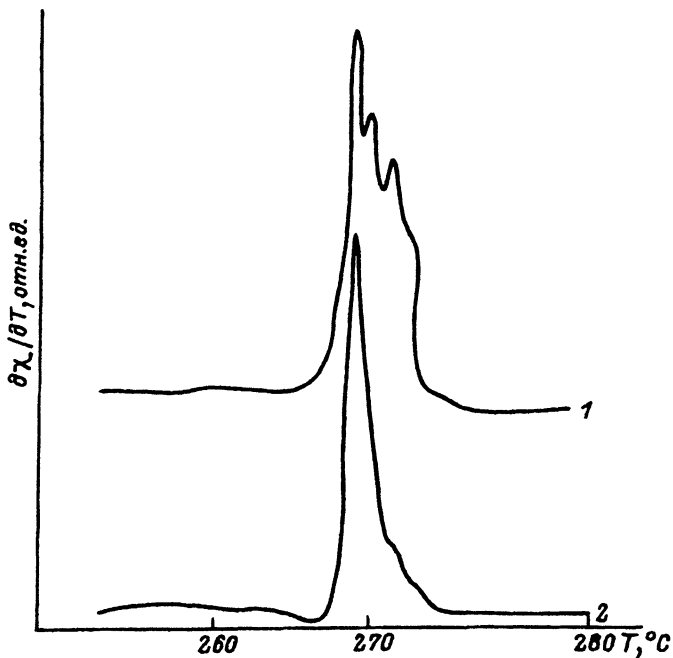


Рис. 5.

χ до (кривая 1) и после облучения (D , см^{-2} : 2 — $3 \cdot 10^{19}$, 3 — $6 \cdot 10^{19}$) волновода первой серии в увеличивающемся с постоянной скоростью внешнем магнитном поле H , приложенном перпендикулярно к поверхности пленки при комнатной температуре. Процесс перемангничивания указывает на существование трех аномалий (пииков) в полях H_1 , H_2 и H_3 , позволяющих предположить наличие в пленке трехслойной магнитной структуры, характеризующихся собственными эффективными планарными полями анизотропии. Первый слой перемангничивается в полях менее 10 Э независимо от величины D . Интенсивность сигнала от него убывает вплоть до $D \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и в дальнейшем остается неизменной. Второй слой перемангничивается в полях ~ 300 Э независимо от D . Для третьего слоя эффективное поле анизотропии убывает от 1500 до 1200 Э при $D \lesssim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, а потом с ростом D остается неизменным, как и форма сигнала от самого слоя. Повышение магнитной однородности волноводов первой серии также подтверждает зависимости $d\chi/dT = f(T)$, снятые вблизи температуры Кюри для ЖИГ (рис. 5: 1 — $D = 0$, 2 — $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$). Более регулярный характер поведения кривой 2 по сравнению с кривой 1 говорит о большей степени однородности магнитной структуры.

Повышение однородности магнитной структуры образцов также является источником снижения потерь A при распространении МСВ. Сопоставление результатов ОРКИ и индуктивно-частотного метода позволяет идентифицировать сигнал от третьего магнитного слоя как сигнал от пленки в целом, второй слой связать с переходным слоем пленка-подложка, а первый — с поверхностным переходным слоем. Тогда уменьшение поля эффективной планарной анизотропии может объяснить смещение АЧХ в сторону меньших частот.

Ионно-лучевое облучение положительными ионами кислорода с энергией 0.5 кэВ является эффективным методом улучшения условий распространения МСВ в пленках ЖИГ. Оно позволяет при посредственном качестве исходных образцов ($\Delta N \lesssim 1.02 \text{ Э}$) снизить уровень потерь A на распространение МСВ в 1.5–2 раза, доведя их до 3.7–4.2 дБ на частоте 6.1 ГГц, что не уступает значениям лучших образцов с $\Delta N < 0.5 \text{ Э}$ [1]. Кроме того, облучение вызывает смещение АЧХ в сторону меньших частот на 60–90 МГц. Вышесказанное позволяет корректировать параметры спиновых волноводов с близкими характеристиками вплоть до их совмещения. Предельно необходимые дозы облучения ионами кислорода составляют $5\text{--}6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и достигаются в течение 4–5 ч при наличии источника ионов, поставляющего компенсированный пучок ионов плотностью тока 0.5 мА/см^2 .

Список литературы

- [1] *Истак В.С.* // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2. С. 86–104.
- [2] *Гласс Х.Л.* // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 2. С. 64–72.
- [3] *Рандошкин В.В., Червоенкис А.Я.* Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [4] *Гесь А.П., Демченко А.И., Стогний А.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 1. С. 42–44.
- [5] *Гесь А.П., Стогний А.И., Федотова В.В.* и др. // Тез. докл. XIX Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений. Ч. II. Ташкент, 1991. С. 101.
- [6] *Стогний А.И., Демченко А.И., Дубовик А.И.* и др. // ПТЭ. 1990. № 5. С. 42–44.
- [7] *Стогний А.И., Токарев В.В.* // Тез. докл. VII Междунар. конф. по микроэлементам. Ч. II. Минск, 1990. С. 177.
- [8] *Фелдман Л., Майер Д.* Основы анализа поверхности и тонких пленок. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 344 с.
- [9] *Хребтов А.О., Ходосов Е.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 18. С. 1127–1131.

Институт физики твердого тела
и полупроводников
Минск

Поступило в Редакцию
6 февраля 1992 г.
В окончательной редакции
9 июня 1992 г.