

- [4] Stern F., Woodall I.M. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 3904-3906.
- [5] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З. и др. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. № 9. С. 401-405.
- [6] Гарбузов Д.З., Ермакова А.Н., Румянцев В.Д. и др. // ФТП. 1977. Т. 11. № 4. С. 717-725.
- [7] Tsang W.T. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39. N 2. P. 134-137.
- [8] Алферов Ж.И., Антонишкис Н.Ю., Арсентьев И.Н. и др. // ФТП. 1988. Т. 22. № 6. С. 1031-1034.
- [9] Адамсон П.В. Автореф. канд. дис. Тарту, 1988.
- [10] Stern F. // Appl. Opt. 1964. V. 3. N 1. P. 111-113.
- [11] Johnson P.B., Christy R.W. // Phys. Rev. 1972. V. B6. N 12. P. 4370-4379.
- [12] Tsang W.T. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 12. P. 1022-1025.

Институт физики АН ЭССР,  
Тарту

Поступило в Редакцию  
31 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 23

12 декабря 1989 г.

02; 11

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИОНОВ ГЕЛИЯ  
В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ  
С ПЛЕНКАМИ ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

П.А. Колодин, В.А. Савченко,  
В.И. Шаповалов, М.С. Хамитжанова

В связи с перспективами применения в магнитоэлектронике пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ)  $Y_3Fe_5O_{12}$  в последнее время значительно возрос интерес к исследованиям процесса взаимодействия с ними ускоренных ионов [1-5]. При ионной бомбардировке обнаружены изменения поверхностной и объемной проводимости, поверхностной намагниченности, спектров спиновых волн (СВ), структуры и т.д. Однако до сих пор подобные исследования проводились исключительно в области высоких энергий (более 50 кэВ). Для выявления механизма влияния ионного облучения на состав, структуру и

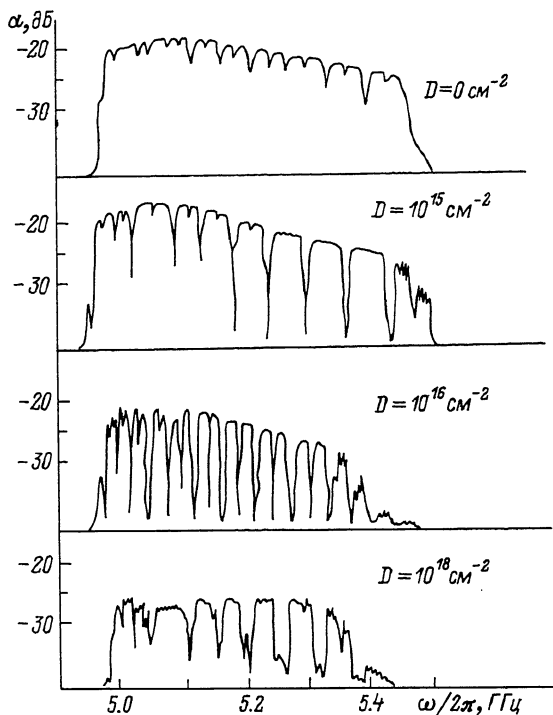


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики измерительного макета, содержащего касательно намагниченную пленку железо-иттриевого граната, имплантированную ионами гелия при разных дозах.

связанные с ними магнитные свойства пленок ЖИГ нами был проведен эксперимент для ионов  $He^+$  в области средних энергий.

Эксперимент проводился на серийной промышленной вакуумной установке, обеспечивающей остаточное давление не хуже  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. Установка оснащена ионным источником низкого давления с осциллирующей электроном, который формирует пучок моноэнергетических ионов с равномерностью не хуже 5 % на диаметре 40 мм. Обработке ионами с энергией 1 кэВ подвергались образцы размером  $15 \times 3$  мм<sup>2</sup> с монокристаллической пленкой ЖИГ толщиной 5.6 мкм, выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложках из галлий-гадолиниевого граната с ориентацией (111). Плотность тока была установлена на уровне 32 мкА/см<sup>2</sup>. Эксперимент проводился для следующего интервала доз:  $10^{15}$ – $10^{18}$  см<sup>-2</sup>.

Влияние ионной обработки на пленки ЖИГ оценивалось по спектрам дипольно-обменных спиновых волн. Измерение спектров СВ про-

водилось на макете линии задержки, которая состояла из двух микрополосковых антенн шириной 30 мкм с расстоянием между ними 4 мм. Линия задержки помещалась в постоянное магнитное поле. Измерения проводились для двух случаев ориентации магнитного поля: в плоскости пленки, перпендикулярно направлению распространения спиновой волны и перпендикулярно плоскости пленки. Фиксировалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такой линии задержки. Для интерпретации АЧХ использовалась теория, изложенная в работе [6].

Для подтверждения достоверности результатов образцы облучались двумя способами. По первому из них определенной дозе облучения подвергалась серия из трех образцов, которые затем исследовались на макете линии задержки. По другому варианту исследовались только три образца, на которых обеспечивался циклический набор дозы до  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> с регистрацией АЧХ линии задержки после каждого цикла облучения. Образцы с одинаковой дозой, облученные в разных вариантах, имели аналогичные АЧХ.

На рис. 1 и 2 приведены полученные результаты. Из рисунка видно, что при увеличении дозы на АЧХ появляются осцилляции, глубина которых зависит от дозы. Следует отметить, что возникает два типа осцилляций. При малых дозах появляется один набор осцилляций (А). По мере увеличения дозы в спектре обнаруживаются между осцилляциями типа (А) другие осцилляции (Б), глубина и ширина которых значительно меньше. Далее они увеличиваются и становятся сравнимыми с осцилляциями типа (А). Дальнейшая ионная обработка приводит к уменьшению осцилляций, существенному увеличению потерь и сужению АЧХ.

Обнаруженное нами после ионной обработки изменение СВЧ свойств пленок ЖИГ аналогично результатам, полученным на высоких энергиях в работах [7, 8]. С нашей точки зрения, для ионов инертных газов в широком диапазоне энергий это связано с изменением состава и структуры приповерхностного слоя. Это подтверждается исследованиями обработанных пленок методами электронографии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [9]. Данные эффекты изменяют обменные граничные условия (приводят к закреплению поверхностных спинов) [6] и проявляются на АЧХ, что вполне понятно, поскольку спектр СВ в пленке ЖИГ многомодовый, причем высшие моды „секут“ основную моду спектра. В точках пересечения возникает „расталкивание“ и образуются дипольные „щели“. Ширина этих щелей сильно зависит от степени закрепления поверхностных спинов и номеров пересекающихся мод. Для свободных поверхностных спинов ширина щели менее 1 МГц и в эксперименте ее наблюдать не удастся, т.к. она меньше частоты релаксации ( $\omega_r \sim 1$  МГц). По мере увеличения закрепления ширина „щели“ растет и может достигать  $10 \div 20$  МГц [6]. Два типа осцилляций на АЧХ соответствуют пересечению ветвей одинаковой и разной четности. В случае симметричных граничных условий, когда спины на обеих границах пленки закреплены одинаково, моды различной четности не взаимодействуют [6], поэтому появление осцилляций

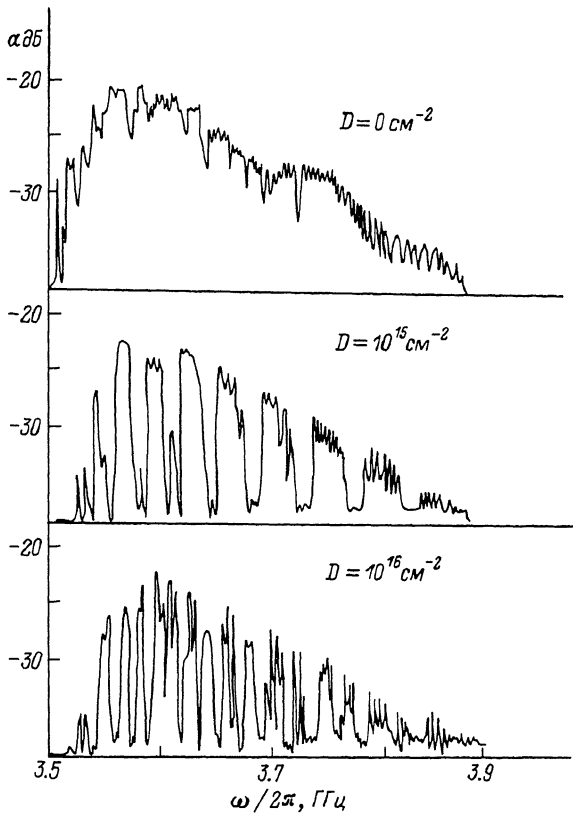


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики измерительного макета, содержащего перпендикулярно намагниченную пленку железоиттриевого граната, имплантированную ионами гелия при разных дозах.

типа (Б) свидетельствует о том, что в пленке реализуются несимметричные граничные условия.

Анализируя эволюцию спектров СВ с ростом дозы, которая приводит к исчезновению осцилляций и росту потерь, можно утверждать, что это происходит вследствие конкуренции двух процессов: изменения в поверхностном слое; нарушение структуры в более глубоких слоях. Видимо, до доз порядка  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> СВ возбуждается и распространяется в нижнем слое с незначительными дефектами структуры. В этом случае граничные условия для нее создает поверхностный слой пленки. При дозах более  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> концентрация дефектов

в имплантированном слое пленки возрастает до уровня, при котором он становится парамагнитным [2] и начинает работать, как поглотитель, лежащий на поверхности неимплантированной части пленки. Толщина этого слоя по оценкам, проведенным с помощью теории ЛШШ [10], для ионов  $He^+$  с энергией 1 кэВ составляет величину порядка 0.02 мкм. В то же время имплантированный слой с измененными магнитными свойствами для энергии 175 кэВ [7] имеет толщину порядка 0.5 мкм. Это различие проявилось в наших экспериментах в существенно меньшем сужении АЧХ при переходе имплантированного слоя в парамагнитное состояние.

Итак, в результате обработки ионами  $He^+$  пленок ЖИГ изменение их СВЧ характеристик возникает не только при высоких энергиях, но и в области средних энергий. Можно допустить, что наиболее вероятной причиной появления осцилляций в спектрах СВ являются эффекты изменения структуры и состава приповерхностного слоя. Увеличение затухания СВ при дозах более  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  можно связать с высокой концентрацией дефектов в имплантированном слое пленки толщиной порядка 200 Å.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Линкова Д.Е., Осуховский В.Э., Рудик Е.И., Юдина Л.А., Ветер В.В., Чиркин Г.К., Миляев Ю.К. // ФТТ. 1982. Т. 24. В. 5. С. 1308-1313.
- [2] Осуховский В.Э., Линкова Д.Е., Ленков В.А., Цыгельнюк Л.А., Миляев Ю.К., Млеко В.И. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 3. С. 662-665.
- [3] Дурасова Ю.А., Зюзин А.М., Куделькин Н.Н., Лю-Фачун М.А., Осико В.В., Рядошкин В.В., Телеснин Р.В., Тимошечкин М.И. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 277. № 2. С. 363-366.
- [4] Урбонас Д.А., Пожела И.П., Пранявичус Л.И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 11. С. 2287-2288.
- [5] Бержанский В.Н., Евстафьев И.И., Кокос В.Л., Петров В.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 1. С. 80-82.
- [6] Kalinikos В.А., Slavin А.Н. // Journ. Phys. C: Solid State Phys. 1986. V. 19. P. 7013-7030.
- [7] Яковлев Ю.М., Ржихина Е.Г., Крылова Т.А., Яковлев С.В., Новиков Г.М. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 2. С. 622-624.
- [8] Стахурский Л.Л. Тез. докл. XI Всес. школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". Ташкент, 1988. С. 160-161.
- [9] Чернакова А.К. Исследование процесса ионного распыления пленок железо-иттриевого граната. Автореферат канд. дисс. Л.: ЛЭТИ, 1988. С. 16.

[10] А б р о я н И.А., А н д р о н о в А.Н., Т и т о в А.И.  
Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Выс-  
шая школа", 1984.

Ленинградский электротехнический  
институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
8 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
6 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 23

12 декабря 1989 г.

11

ВОЗМОЖНА ЛИ РАБОТА ЭГД-ЭМИТТЕРА  
В РЕЖИМЕ МАЛЫХ ТОКОВ?

А.Л. Ш а б а л и н

В исследованиях электрогидродинамических (ЭГД) эмиттеров ионов отмечается существование ненулевого минимального тока эмиссии  $I_* \sim 0.1-1$  мкА, при котором эмиттер выключается [1, 2]. Объяснение этому эффекту предложено в [3]. Однако в [4] сообщается о получении ЭГД-эмиссии в слаботочном режиме при токе  $I \ll J_*$ . В данной работе сделана попытка повторить эти результаты и исследовать слаботочный режим ЭГД-эмиттера с высоким временным разрешением.

При измерении тока эмиссии по обычной схеме (сбор ионов на коллектор и измерение тока коллектора усилителем) работа с высоким временным разрешением невозможна из-за большой постоянной времени  $\tau = RC$  измерительной цепи. Здесь  $C$  — емкость коллектора,  $R$  — входное сопротивление усилителя, которое при регистрации малых токов приходится делать достаточно большим, чтобы обеспечить приемлемую чувствительность усилителя.

В наших экспериментах для исследования слаботочного режима ЭГД-эмиттера использовалась схема, показанная на рисунке. Ионы, попадая на конвертор 4, выбивают электроны с коэффициентом вторичной эмиссии  $\beta \sim 0.5$ . Эти электроны ускоряются и, пробив алюминиевое покрытие 5, вызывают свечение люминофора 6, которое регистрируется с помощью ФЭУ-130. Быстродействие этой схемы, определяемое по длительности одноэлектронного импульса, составляет 10 нс. Абсолютное значение тока эмиссии в цепи иглы измерялось осциллографом по падению напряжения на сопротивлении  $R_2$ .

В [4] снижение минимального тока  $I_*$  по меньшей мере до 3 нА было достигнуто за счет использования очень острых игл эмиттера с радиусом кривизны острия  $r = 25-500$  нм. Поэтому мы также использовали иглы с радиусом острия  $r < 500$  нм. Для стабилизации тока в цепь иглы включено сопротивление  $R_1 = 100$  МОм, установленное в вакууме непосредственно рядом с