

05; 06; 10

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН

*И. Г. Кудряшкин, Д. Г. Крутогин, Е. А. Ладыгин, Л. М. Летюк, А. В. Марягин,
Б. П. Нам, А. С. Хе, Ю. К. Фетисов*

Проведен расчет параметров трехслойной структуры, образованной в результате имплантации пленок феррита-граната ионами водорода, гелия, бора, неона с энергиями до 10^6 эВ. Экспериментально исследовано распространение поверхностных магнитостатических волн в пленках феррита, имплантированных ионами H^+ с дозами до $\sim 10^{16}$ см $^{-2}$. Обнаружено, что имплантация приводит к уменьшению эффективной магнитной толщины пленки и снижению групповой скорости волн. Величина потерь распространения волн имеет максимум при определенной дозе имплантации и может значительно превышать потери в неимплантированных пленках. Подтверждено увеличение степени закрепления спинов на поверхности пленки с возрастанием дозы имплантации.

Ионная имплантация в настоящее время находит все более широкое применение в различных областях микроэлектроники как эффективный метод управления магнитными свойствами твердых тел. Например, с помощью ионной имплантации феррит-гранатовых пленок осуществляют подавление «жестких» доменов [1], формируют структуры для продвижения доменов в устройствах на «цилиндрических магнитных доменах» [2].

Представляет интерес использование ионной имплантации пленок железиттриевого граната (ЖИГ) при создании устройств обработки СВЧ сигналов на магнитостатических волнах (МСВ). Уже первые эксперименты продемонстрировали, что имплантация пленок ЖИГ ионами гелия, бора и неона с энергиями до ~ 340 кэВ и дозами до $\sim 10^{16}$ см $^{-2}$ позволяет управлять характеристиками МСВ. Так, в работе [3] наблюдалось уменьшение на 3.4 % групповой скорости прямых объемных магнитостатических волн (ПОМСВ) в результате аморфизации поверхностного слоя пленки феррита под действием имплантации ионами гелия. Исследована зависимость потерь распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) от величины дозы при имплантации пленки ЖИГ ионами неона [4]. Обнаружено [5, 6], что имплантация ионами неона приводит к увеличению степени закрепления спинов на поверхности пленки феррита, из-за чего в спектре передачи ПМСВ появляются регулярные резонансные минимумы. Показана также возможность создания методом выборочной ионной имплантации различных топологических структур на поверхности пленки феррита и, в частности периодических отражательных решеток [7-9] для частотно-селективных устройств на МСВ.

Все это делает необходимым проведение более всесторонних исследований, которые позволят установить связь магнитных характеристик пленок (распределение намагниченности по толщине, анизотропии, степени закрепления спинов, высокочастотных потерь) с типом, энергией и дозой имплантированных ионов и выявить основные особенности распространения МСВ в имплантированных пленках ЖИГ. В настоящей работе проведены расчеты параметров им-

плантации пленок ЖИГ ионами различных типов, впервые экспериментально исследовано распространение поверхностных МСВ в пленках ЖИГ, имплантированных ионами водорода.

Расчет параметров ионной имплантации пленок ферритов-гранатов

Для расчета глубины проникновения иона в вещество, характеризующейся средним нормальным пробегом R_n — проекцией траектории среднего полного пробега R на направление первоначальной скорости иона — и его среднеквадратичным отклонением ΔR_n , был использован подход работы [10]. При этом многокомпонентные пленки ферритов-гранатов рассматривались в виде однокомпонентных, состоящих из атомов с эффективными зарядом ядра и массой

$$Z_{эфф} = \frac{\sum_i x_i Z_i}{\sum_i x_i}, \quad M_{эфф} = \frac{\sum_i x_i M_i}{\sum_i x_i}, \quad (1)$$

где Z_i и M_i — атомные номера и массы элементов, входящих в состав пленки; x_i — количество атомов элемента на формульную единицу состава.

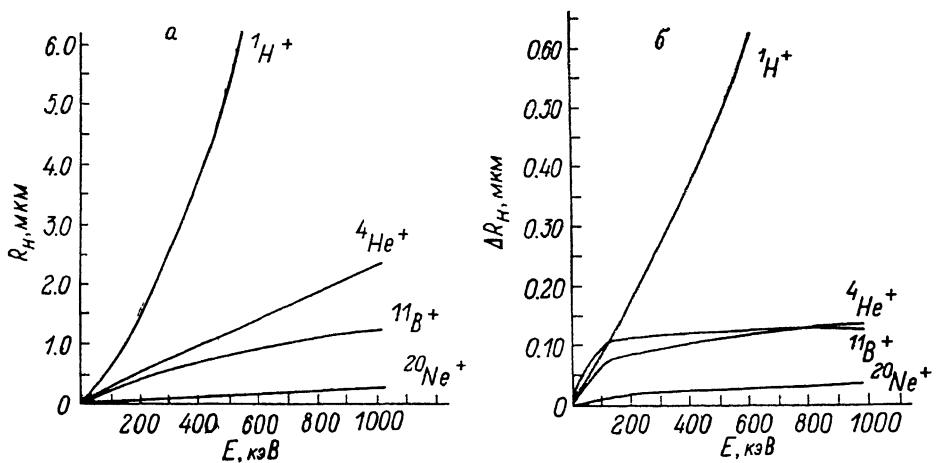


Рис. 1. Зависимости среднего нормального пробега ионов R_n от их энергии E при имплантации пленок ЖИГ (а) и отклонения среднего нормального пробега ионов ΔR_n от их энергии E при имплантации пленок ЖИГ (б).

Учитывались торможение имплантируемых ионов, обусловленное электронным и ядерным взаимодействиями с кристаллической решеткой феррита, а также процессы упругого рассеяния ионов.

На рис. 1, а, б приведены расчетные зависимости среднего нормального пробега R_n и отклонения среднего нормального пробега ΔR_n ионов H^+ , He^+ , B^+ , Ne^+ от их энергии E при имплантации пленок ЖИГ. Видно, что при увеличении энергии имплантируемых ионов E и (или) уменьшении их атомной массы M_1 практически линейно возрастает R_n , а зависимости $\Delta R_n = f(E)$ для ионов He^+ , B^+ , Ne^+ представлены графиками, выходящими на насыщение при энергиях больше ~ 200 кэВ. Необходимо отметить, что для случая имплантации ионами водорода из-за небольшой энергии захвата электрона (~ 1 эВ) эффективное сечение захвата внедряемых ионов при торможении возрастает на два-три порядка, поэтому кривая зависимости $\Delta R_n = f(E)$ для ионов H^+ также выходит на насыщение при энергиях имплантации E , больших ~ 300 кэВ. Вследствие малого атомного радиуса и небольшой массы число радиационных дефектов, вносимых ионами H^+ при ускоренном движении, будет мало по сравнению с другими типами ионов.

Без учета радиационных искажений структуры феррит-гранатовой пленки профиль распределения внедренных ионов по глубине пленки описывается кривой Гаусса [10]

$$D(x) = \frac{D}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_n} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_n}{\Delta R_n} \right)^2 \right], \quad (2)$$

D — доза облучения; x — координата, отсчитываемая от поверхности пленки.

На рис. 2 представлена модель трехслойной (с одним имплантированным слоем) феррит-гранатовой пленки. Зависимость $D(x)$, задаваемая формулой (2), показана сплошной (справа) и штриховой (слева) линиями. Учет влияния радиационных искажений, возникающих в слое 1 пленки, обуславливает изменение распределения имплантированных ионов по толщине пленки, что показано сплошной кривой $D'(x)$. Из рис. 2 видно, что толщина нарушенного слоя равна $\sim 4\Delta R_n$,

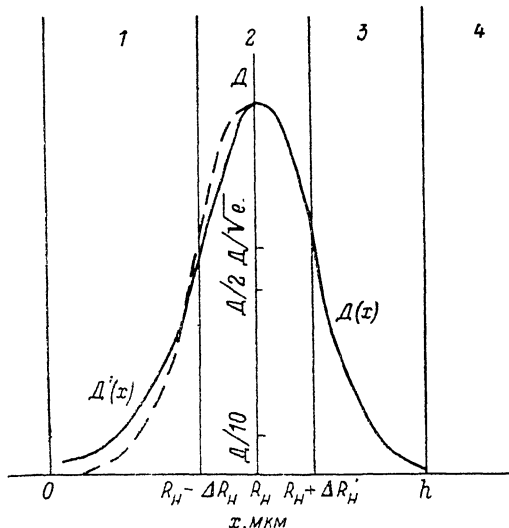


Рис. 2. Модель трехслойной феррит-гранатовой пленки, имплантированной ионами с энергией E и дозой D .

1 — слой пленки с радиационными дефектами, 2 — имплантированный слой пленки, 3 — матричный слой пленки, 4 — немагнитная подложка.

она определяется не только дозой ионной имплантации, как принято в работе [4], но зависит также и от энергии внедряемых ионов, их массы. Рассчитанные значения R_n и толщины имплантированного слоя для случая имплантации пленки ЖИГ ионами He^+ , V^+ хорошо согласуются с данными экспериментальной работы [3]. Нарушенный (имплантированный) слой феррит-гранатовой пленки вследствие образования дополнительных магнитоупругих полей и снижения обменного взаимодействия между магнитными ионами решетки обладает пониженной намагниченностью насыщения, и для описания спектров ПМСВ в такой многослойной структуре может оказаться полезным теоретический анализ ранее опубликованных работ (например, [11]).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения проводились на двух монокристаллических феррит-гранатовых пленках состава $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии на немагнитных подложках из $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ с ориентацией (111). Намагниченность насыщения пленок имела величину $4\pi M_s = 1760$ Гс; толщина, измеренная оптическим интерференционным методом с учетом дисперсии показателя преломления, составляла для тонкой пленки 6.2 мкм и для толстой — 13.4 мкм; параметр диссипации, измеренный по всей площади пленок методом «магнитной ямы» [12] на частоте 2.75 ГГц, не превышал $\Delta H \leq 0.6$ Э. Пленки были разрезаны на прямоугольные образцы размерами 0.4×1.0 см² и подвергнуты имплантации на установке «Heavy ion accelerator» ионами H^+ с энергией $E = 200$ кэВ, постоянными во времени интегральными потоками $\Phi = 2.10^{14} - 6.10^{15}$ см⁻², плотность тока в пучке составляла $j = 0.1$ мкА/см². Доза имплантации D равна интегральному потоку ионов Φ , так как рассеянием и отражением ионов водорода с такой энергией от поверхности феррит-гранатовой пленки можно пренебречь.

Исследовалось влияние дозы имплантации на частотную зависимость амплитуды сигнала передачи (АЧХ), дисперсионные характеристики и величину затухания ПМСВ, распространяющихся перпендикулярно направлению постоян-

ного поля H в касательном намагниченном пленках в диапазоне частот $\omega/2\pi = 4-8$ ГГц. Возбуждение и прием волн осуществлялись двумя идентичными микрополосковыми преобразователями шириной 30 мкм, прижатыми к поверхности пленки, расстояние между которыми могло изменяться. С целью обеспечения линейного режима распространения волн уровень возбуждающей СВЧ мощности не превышал $P \approx 0.5$ мВт. АЧХ ПМСВ регистрировались с помощью измерителя P2-54/4 и самописца. Волновые числа k и групповые скорости $v_{гр}$ волн рассчитывались по интерферограммам сигнала передачи ПМСВ и опорного электромагнитного сигнала. Потери распространения ПМСВ на единицу длины $\alpha = (L_2 - L_1)(l_2 - l_1)^{-1}$ определялись методом подвижной антенны по полным вносимым потерям (L_1, L_2) при двух расстояниях (l_1, l_2) между преобразователями.

Особенностью имплантации пленок ЖИГ ионами водорода в отличие от исследованной ранее имплантации более тяжелыми ионами He^+ , B^+ , Ne^+ , Li^+ [3, 5] является образование трехслойной структуры, в которой имплантирован-

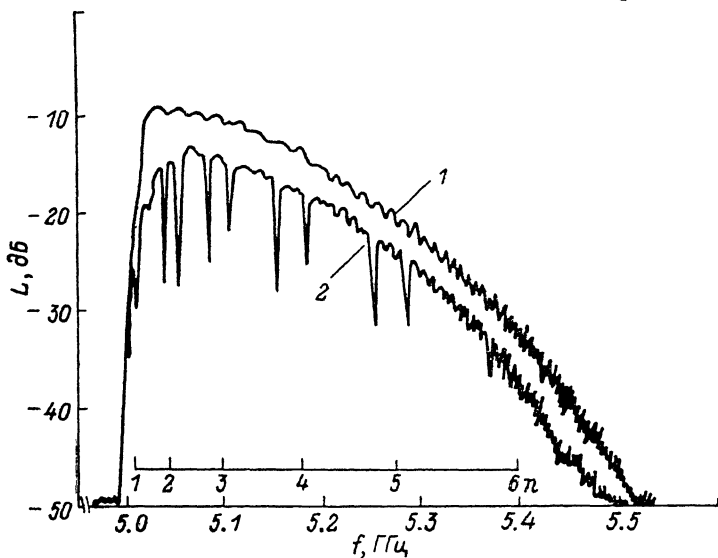


Рис. 3. Фрагменты АЧХ ПМСВ для пленок ЖИГ толщиной 6.2 мкм, исходной (1) и имплантированной ионами H^+ с энергией 200 кэВ (2).

ный слой с пониженной намагниченностью насыщения расположен в объеме пленки (рис. 2). В наших экспериментах, согласно проведенным расчетам, имплантированный слой располагался на глубине $\sim R_n = 1.5$ мкм от поверхности пленки и имел толщину $\sim 4\Delta R_n = 0.8$ мкм, намагниченность слоя постепенно уменьшалась с увеличением дозы имплантации. Появление имплантированного слоя привело к целому ряду эффектов, наиболее существенными из которых являются: изменение дисперсионных характеристик магнитостатических волн, увеличение потерь распространения и изменение условий возбуждения волн. Перечисленные эффекты хорошо видны на рис. 3 при сравнении типичных АЧХ ПМСВ в тонкой пленке феррита до и после имплантации дозой $D = 10^{15}$ см $^{-2}$. Имплантация вызвала сужение наблюдаемой полосы частот существования волн на ~ 50 МГц, увеличение полных вносимых потерь во всей полосе частот ~ 5 дБ и появление на АЧХ резонансных минимумов, свидетельствующих о возбуждении дипольно-обменных мод высших порядков.

Влияние ионной имплантации на дисперсию ПМСВ проявилось в уменьшении групповой скорости волн $v_{гр} = d\omega/dk$ в имплантированных пленках. На рис. 4 показаны экспериментальные и теоретические зависимости $v_{гр}$ от волнового числа k для тонкой пленки в диапазоне частот 5.0—5.6 ГГц. Экспериментальные точки соответствуют значениям v_0 в неимплантированной пленке и значениям v_i в пленке, подвергнутой имплантации дозой $D = 10^{15}$ см $^{-2}$. При промежуточных дозах имплантации наблюдалось монотонное уменьшение v_i ,

во всем диапазоне волновых чисел. Теоретические кривые построены с использованием известного дисперсионного уравнения ПМСВ, причем при расчете для наилучшего совпадения теории с экспериментом в качестве подгоночного параметра выбиралась толщина пленки. Определенная из сравнения расчетных и экспериментальных данных толщина неимплантированной пленки $h=5.5$ мкм оказалась несколько меньше измеренной оптическим методом, что наблюдалось и в [13], а толщина имплантированной пленки составила $h_i=4.5$ мкм. Изменение толщины пленки $\Delta h=h-h_i \cong 1$ мкм удовлетворительно совпало с рассчитанной толщиной имплантированного слоя (~ 0.8 мкм). Это обстоятельство позволяет объяснить влияние ионной имплантации на дисперсию ПМСВ уменьшением эффективной магнитной толщины пленки ЖИГ в результате образования в объеме пленки имплантированного слоя с пониженной намагниченностью, который не участвует в волновом процессе на данной частоте. Относительное изменение скорости ПМСВ с фиксированным k , как можно показать, опреде-

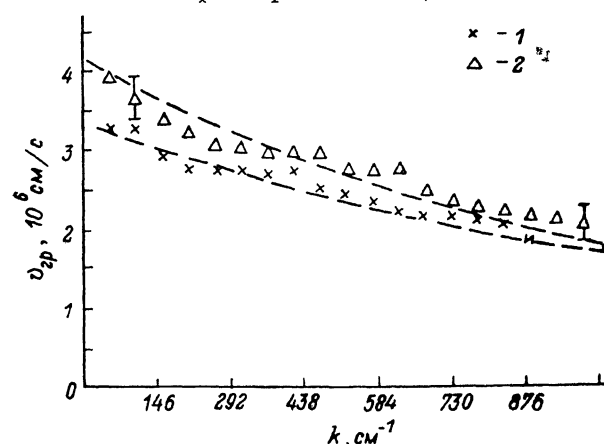


Рис. 4. Дисперсионные зависимости групповой скорости ПМСВ $v_{гр}$ для пленок ЖИГ толщины 6.2 мкм, имплантированной ионами H^+ с энергией 200 кэВ (1) и исходной (2). Пунктирная линия — теория.

ляется только относительным изменением толщины пленки и не зависит от частоты волны

$$\frac{\Delta v_{гр}}{v_{гр}} = 1 - \left(1 + \frac{\Delta h}{h}\right) e^{-2k\Delta h}, \quad (3)$$

что подтвердили измерения, проведенные во всем диапазоне частот 4—8 ГГц. Для волн с $k\Delta h \ll 1$ получено максимальное значение $\Delta v_{гр}/v_{гр} \cong 0.2$, хорошо согласующееся с рассчитанным изменением толщины пленки $\Delta h/h \cong 0.18$. Аналогичный эффект уменьшения групповой скорости под действием ионной имплантации наблюдался и в толстой пленке ЖИГ, для которой получено максимальное значение $\Delta v_{гр}/v_{гр} \cong 0.07$.

На рис. 5, а, б показано влияние дозы имплантации D на величину удельных потерь распространения ПМСВ α в толстой пленке ЖИГ в диапазоне частот 6.0—6.5 ГГц. Видно, что потери распространения волн в имплантированной пленке ЖИГ всегда больше, чем в исходной пленке. С увеличением дозы наблюдается более резкое возрастание потерь при больших значениях волновых чисел. Величина потерь распространения немонотонно зависит от дозы имплантации для всех значений k : с увеличением дозы потери вначале резко растут, достигают максимума при $D \sim 2 \cdot 10^{14}$ см⁻², а затем постепенно уменьшаются почти до начального уровня. При этом изменение потерь распространения ПМСВ под действием ионной имплантации наиболее существенно для волн с большими волновыми числами. Экспериментально получено увеличение потерь распространения волн с $k=500$ см⁻¹, $\Delta \alpha=160$ дБ/см (примерно в $\sim 10^8$ раз по сравнению с неимплантированной пленкой ЖИГ). Измерения, выполненные на тех же образцах имплантированных пленок ЖИГ во всем диапазоне частот

4—8 ГГц, дали аналогичные результаты с тем отличием, что повышение частоты привело к более медленному падению потерь с увеличением дозы имплантации. Зависимость параметра диссипации ПМСВ ΔH_k , рассчитанная по методике [13], от дозы имплантации качественно повторяет ход зависимости $\alpha=f(D)$ в изученном диапазоне частот 4—8 ГГц. Полученная немонотонная зависимость ве-

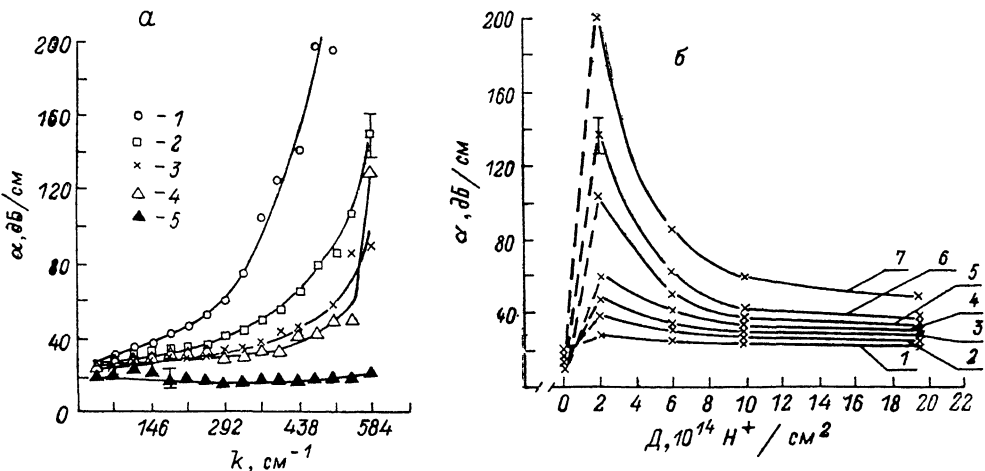


Рис. 5.

а — дисперсионные зависимости потерь распространения ПМСВ α в диапазоне частот 6.0—6.5 ГГц для пленок ЖИГ толщиной 13.4 мкм, имплантированных ионами H^+ с энергией 200 кэВ и дозами $2 \cdot 10^{14}$ (1), $6 \cdot 10^{14}$ (2), 10^{15} (3), $6 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ (4) и исходных (5); б — влияние дозы имплантированных ионов H^+ с энергией 200 кэВ на параметр потерь распространения ПМСВ α для пленок ЖИГ толщиной 13.4 мкм в диапазоне частот 6.0—6.5 ГГц при волновых числах k : 1 — 73, 2 — 146, 3 — 220, 4 — 292, 5 — 365, 6 — 438, 7 — 510 см^{-1} .

личины потерь распространения ПМСВ от дозы имплантации пленок ЖИГ ионами водорода, так же как и в случае имплантации ионами Ne [4], объясняется, на наш взгляд, главным образом изменением высокочастотных диссипативных свойств имплантированного слоя. Максимум потерь распространения ПМСВ имеет место при определенной дозе имплантации, соответствующей наибольшему поглощению энергии волны в имплантированном слое. При дальнейшем увеличении дозы основная часть слоя не участвует в волновом процессе, поглощаются только условные границы слоя, потери распространения ПМСВ возвращаются почти к исходному уровню в неимплантированной пленке. Ме-

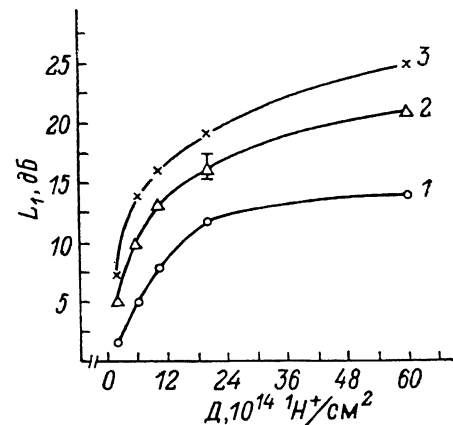


Рис. 6. Зависимость глубины заграждения низкочастотного минимума на АЧХ ПМСВ для пленок ЖИГ толщиной 6.2 мкм, имплантированных ионами H^+ с энергией 200 кэВ, от дозы имплантации в диапазонах частот 3.6—4.2 (1), 5.0—5.6 (2) и 6.0—6.5 ГГц (3).

ханизм поглощения высокочастотной энергии имплантированным слоем требует дальнейшего выяснения.

Отметим, что рассмотренные эффекты уменьшения групповой скорости и увеличения удельных потерь магнитоэлектрических волн приводят совместно к значительным изменениям ширины полосы частот распространения ПМСВ в пленках ЖИГ под действием ионной имплантации. Так, в тонкой пленке, где эти эффекты проявляются сильнее, при измерениях в диапазоне частот 5.0—5.6 ГГц наблюдалось сужение АЧХ (по уровню мощности 50 дБ) от $\Delta f \approx 500$ МГц в неимплантированной пленке до $\Delta f \approx 350$ МГц в пленке, имплантированной дозой $D = 2 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$. Увеличение дозы до $D = 10^{15} \text{см}^{-2}$ привело к уменьшению

потерь распространения волн с большими k и соответствующему расширению АЧХ до $\Delta f \cong 450$ МГц. В диапазоне частот 6.0—6.5 ГГц Δf уменьшалась от ~ 400 для исходной пленки до ~ 200 МГц для пленок, имплантированных любыми дозами в области $2 \cdot 10^{14}$ — $6 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$.

Как уже отмечалось, в проведенных экспериментах при имплантации тонкой пленки ЖИГ ионами водорода наблюдалось появление на АЧХ ПМСВ резонансных минимумов, что свидетельствует [14] об увеличении степени закрепления спинов на свободной поверхности пленки и возбуждении, кроме основной распространяющейся волны, дипольно-обменных мод высших порядков. Минимумы располагаются по два на АЧХ, частотный интервал между парами и расстояние между минимумами в каждой паре незначительно увеличивались с ростом дозы имплантации, амплитуда минимумов падала с увеличением их номера. Такое неравномерное (в отличие от случая имплантации пленок более тяжелыми ионами Ne [5]) расположение минимумов на АЧХ связано, по нашему мнению, с дополнительным уменьшением подвижности спинов в объеме пленки на границах имплантированного слоя. На рис. 6 показана типичная зависимость глубины заграждения одного из низкочастотных ($n=3$) минимумов от дозы имплантации в разных частотных диапазонах. В соответствии с предсказанием теории [15] возрастание дозы имплантации приводило к увеличению степени закрепления спинов на поверхности пленки и соответствующему нелинейному увеличению глубины заграждения. Резонансных минимумов на АЧХ ПМСВ в толстой пленке, имплантированной ионами H $^+$, не наблюдалось из-за обратной зависимости глубины заграждения от толщины пленки.

В заключение добавим, что аналогичные исследования были проведены нами на пленках ЖИГ, имплантированных ионами бора с энергиями до 350 кэВ и дозами $8 \cdot 10^{13}$ — $4 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$. Результаты измерений качественно согласуются с результатами для пленок, имплантированных ионами водорода. Однако из-за большей массы и размеров ионов B $^+$ обусловленные имплантацией эффекты проявлялись при меньших дозах облучения.

Выводы

Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показывают, что ионная имплантация позволяет эффективно управлять магнитными свойствами феррит-гранатовых пленок и характеристиками распространяющихся в них магнитостатических волн. В частности, подбирая тип имплантируемых ионов, их энергию и дозу имплантации, можно формировать на основе ферритовых пленок многослойные планарные структуры с заданным распределением намагниченности и диссипативных свойств по толщине. Имплантация пленок ЖИГ ионами водорода с энергией ~ 200 кэВ и дозой до $\sim 10^{16}$ см $^{-2}$ вызывает уменьшение эффективной магнитной толщины пленки и, как следствие, снижение групповой скорости ПМСВ. Величина удельных потерь распространения ПМСВ максимальна при определенной дозе имплантации $2 \cdot 10^{14}$ H $^+$ /см 2 и снижается почти до уровня потерь в неимплантированной пленке ЖИГ при больших дозах. В результате имплантации увеличивается степень закрепления спинов на поверхности пленки, что приводит к возбуждению, помимо основной распространяющейся ПМСВ, также дипольно-обменных мод высших порядков и появлению резонансных минимумов на АЧХ. Возможности ионной имплантации могут использоваться при создании различных МСВ — устройств на основе феррит-гранатовых пленок.

Авторы искренне благодарны Б. А. Калининскому и А. В. Маркялису за ценные замечания и плодотворное обсуждение полученных результатов.

Литература

- [1] Балбашов А. М., Рыбак В. И., Червоненкис А. Я. // Зарубежная электронная техника. 1982. № 6, 7. С. 11—130.
- [2] Рандошкин В. В. // Радиоэлектроника за рубежом. 1983. № 8. С. 1—34.
- [3] Hartmann P., Fontaine D. // IEEE Trans. Magn. 1982. Vol. 18. N 6. P. 1595—1597.
- [4] Ляшенко Н. И., Талалаевский В. М. // УФЖ. 1986. Т. 35. № 11. С. 1716—1718.
- [5] Яковлев Ю. М. // Обзор по электронной технике. Сер. 6. Материалы. 1986. № 7. С. 1—56.

- [6] ^{*}Крылова Т. А., Лебедь Г. М., Ляшенко Н. И. и др. // Спин-волновая электроника СВЧ. Ашхабад, 1985. С. 41—42.
- [7] Carter R. L., Owens J. M., Smith C. V., Reed K. W. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 3. P. 2655—2657.
- [8] Бабенко В. Э., Попков А. Ф. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 5. С. 839—845.
- [9] Бабенко В. Э., Медников А. М., Миляев Ю. К. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 2039—2041.
- [10] Курносое А. И., Юдин В. В. // Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. С. 202—230.
- [11] Зубков В. И., Епанечников В. А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 4. С. 625—633.
- [12] Калинин Б. А., Ковшиков Н. Г., Кожусь Н. В. // Тез. докл. VIII Всесоюзн. школы-семинара «Новые магнитные материалы для микроэлектроники». Донецк, 1982. С. 319.
- [13] Гусев² Б. Н., Чивилева О. А., Гуревич А. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 3. С. 159—163.
- [14] Калинин Б. А. // Изв. вузов. Физика. 1981. Т. 24. № 8. С. 42—56.
- [15] Kalinikov B. A., Slavin N. A. // Sol. St. Phys. C. 1986. Vol. 19. N 35. P. 7013—7034.

Московский институт
стали и сплавов

Поступило в Редакцию
16 июня 1987 г.
В окончательной редакции
14 декабря 1987 г.