

05,2; 09

© 1991

НАБЛЮДЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ ОБМЕННЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В ИМПЛАНТИРОВАННОМ СЛОЕ ПЛЕНКИ ЖИГ

В.В. Тихонов, А.В. Толкачев,
Б.К. Остафийчук

Ионная имплантация пленок железиттревового граната (ЖИГ) использовалась в ряде работ для наблюдения резонансов обменных спиновых волн (ОСВ) [1-3]. В работе [4] также было обнаружено возбуждение бегущих ОСВ, причем эффективность возбуждения оказалась достаточно высокой, порядка 50% и более. Это, в сочетании с малыми потерями ОСВ, вызвало значительный интерес. Однако в понимании результатов [4] не было полной ясности, а именно никак не удавалось объяснить значительное (более чем на два порядка) превышение экспериментальной эффективности возбуждения над расчетной. Дело в том, что согласно распространенной в настоящее время теории, возбуждение ОСВ происходит в бесконечно тонком поверхностном слое пленки ЖИГ. Роль имплантации состоит в том, чтобы вызвать поверхностное напряжение пленки, которое за счет эффекта магнитострикции проявляется как дополнительное поле поверхностной анизотропии. В теории поверхностная анизотропия учитывается посредством особых граничных условий для переменной намагниченности, содержащих параметр „закрепления“ спинов (см. например, [5]). При таких условиях рассчитанная эффективность возбуждения ОСВ оказывается не более 0.1%, что никак не согласуется с результатами эксперимента. Для объяснения возникшего расхождения можно было бы предположить, что внутри имплантированного слоя происходит резонансное накопление энергии ОСВ. В этом случае эффективность возбуждения должна возрасти примерно в Q раз, где $Q \sim 100$ – собственная добротность резонансов ОСВ. Такое предположение не лишено оснований, если вспомнить, что в действительности имплантированные ионы залегают в поверхностном слое толщиной d , порядка десятых долей микрона, и что возбуждаемые ОСВ с волновыми числами $q \sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-1}$ имеют длины волн $\lambda = 2\pi/q$ того же порядка. В реальном существовании резонансов ОСВ в имплантированном слое следовало убедиться экспериментально. В данной работе это сделано. Были обнаружены собственные резонансы имплантированного слоя, которые наблюдались при нормальном намагничивании пленки ЖИГ. По измерениям резонансных частот были сделаны оценки магнитных параметров и толщины имплантированного слоя.

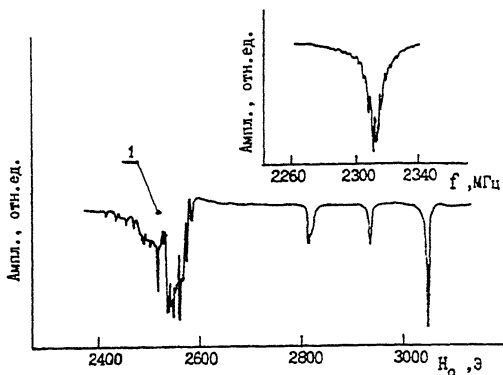


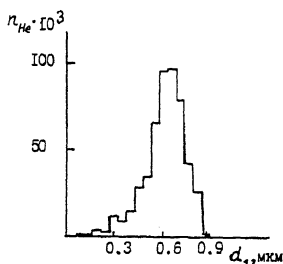
Рис. 1. Амплитудно-полевая характеристика отраженного сигнала. Частота $f = 2340$ МГц. Цифрой 1 отмечена область возбуждения МСВ.

На вставке: амплитудно-частотная характеристика отраженного сигнала основного (первого) резонанса ОСВ в имплантированном слое. Поле $H_0 = 2690$ Э.

Эксперименты проводились с эпитаксиальной пленкой ЖИГ толщиной $d_0 = 3.2$ мкм, выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) с ориентацией (111). Толщина структуры пленка-подложка составляла $D = (503 \pm 1)$ мкм. Поверхность пленки была имплантирована ионами He^+ с энергией 120 КэВ дозой 10^{16} см $^{-2}$. В качестве СВЧ возбуждителя использовалась закороченная на конце микрополосковая линия шириной 0.1 мм. Пленка вместе с возбуждателем помещалась в постоянное магнитное поле H_0 , ориентированное по нормали к поверхности. На вход МПЛ через направленный ответвитель (НО) подавался непрерывный СВЧ сигнал. Исследовался отраженный сигнал, который снимался с выхода НО, затем детектировался, усиливался и записывался самописцем.

Измерялись амплитудно-частотные (АЧХ) и амплитудно-полевые (АПХ) характеристики отраженного сигнала. Типичная АПХ представлена на рис. 1. Здесь хорошо видна область поглощения, вызванная возбуждением дипольных, или иначе магнитостатических волн (МСВ) (область 1), внутри которой наблюдались известные резонансы ОСВ по толщине всей пленки с относительно малыми интервалами полей $\Delta H_0 \sim (10-15)$ Э. Там же видны большие резонансные пики, дополнительно обнаруженные в области более высоких полей вне области МСВ. Эти пики следуют с относительно большими интервалами $\Delta H_0 = 115, 120$ Э, их амплитуда спадала с уменьшением поля. На АЧХ в полосе обнаруженных пиков наблюдалась тонкая структура, представляющая собой серию эквидистантных (с интервалами $\Delta f = 3.54$ МГц) узкополосных (шириной менее 1 МГц) резонансных пиков, амплитуда которых достигала максимума в центре широкополосного пика и спадала

Рис. 2. Рассчитанная зависимость концентрации n_{He} имплантированных ионов гелия от глубины залегания от поверхности пленки. Энергия имплантированных ионов 120 КэВ, доза 10 см.



к периферии, как показано на вставке к рис. 1. Отметим, что наиболее сильно узкополосные пики проявлялись в диапазоне частот $f = (2-3)$ ГГц.

Появление дополнительных широкополосных пиков вызвано возбуждением резонансов ОСВ по толщине имплантированного слоя. Это подтверждается анализом условия поперечного резонанса ОСВ в двухслойной пленке с толщинами слоев $d_1 \ll d_0$, полученного для случая отсутствия волн в неимплантированной части пленки. Такой случай реализуется при нормальном намагничивании в интервале полей $H_{кр} < H_0 < H_{кр} + H_A$, где $H_{кр} = (\omega / \gamma) + 4\pi M_0$ — предельное поле существования волны в неимплантированной пленке, H_A — поле одноосной анизотропии имплантированного слоя, $4\pi M_0 = 1750$ Гс — намагниченность насыщения пленки, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, γ — гиромагнитное отношение. Уравнение, описывающее резонансы имплантированного слоя, имеет вид

$$q_1 d_1 + \arctg(Im q_0 / q_1) = n\pi, \quad (1)$$

где q_1, q_0 — волновые числа ОСВ в имплантированном слое и в неимплантированной части пленки. Волновые числа определяются из дисперсионного уравнения ОСВ в свободном пространстве для случая $H_0 \parallel \vec{q}_1, \vec{q}_0$ [5] в виде

$$q_0 = i\sqrt{(\omega_{H0} - \omega) / \eta}; \quad q_1 = \sqrt{(\omega - \omega_{H1}) / \eta}, \quad (2)$$

где $\omega_{H0} = \gamma(H_0 - 4\pi M_0)$, $\omega_{H1} = \omega_{H0} - \gamma H_A$, $\eta = \alpha \gamma^2 4\pi M_0$, $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-12}$ см² — постоянная неоднородного обмена. Численное решение уравнения (1) при подстановке в (2) экспериментальных значений резонансных полей из рис. 1 позволяет оценить параметры имплантированного слоя: $H_A = (430 \pm 80)$ Э; $d_1 = (0,3 \pm \pm 0,1)$ мкм. Тот же порядок толщины d_1 получается и из расчетов профиля концентрации имплантированного He^+ , рассчитанного методом Монте-Карло при реальных условиях имплантации данной пленки (см. рис. 2). Это подтверждает правильность сделанных оценок.

Появление тонкой структуры на АЧХ широкополосных пиков вызвано, как и в [6], возбуждением акустических резонансов сдвиговых волн. Это подтверждается сравнением экспериментальных

Δf и расчетных интервалов резонансных частот $\Delta f_p = \sigma_{st}/2D = 3.69$ МГц, где $\sigma_{st} = 3.72 \cdot 10^5$ см/с – скорость сдвиговых волн в ГГ. Отличие от [6] состояло в том, что звук возбуждался не магнитоэластическими, а обменными колебаниями, и не во всей пленке, а лишь в имплантированном слое, причем это возбуждение в полосе частот $f = (2-3)$ ГГц имело резонансный характер, поскольку ОСВ и звук имели сравнимые длины волн. Последнее обстоятельство обуславливало высокую эффективность магнитоупругого взаимодействия и, по сравнению с [6], продвинуло возбуждение магнитоупругих резонансов в область более высоких частот.

Таким образом, обнаружение собственных резонансов в имплантированном слое пленки ЖИГ существенно прояснило механизм возбуждения ОСВ. Показано, что резонансные свойства имплантированного слоя могут существенно влиять на эффекты гибридизации ОСВ с другими типами волн. Высокая эффективность резонансного возбуждения ОСВ открывает реальную возможность создания нового класса функциональных СВЧ устройств на основе обменных спиновых волн.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Зильберман П.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. № 9. С. 600-603.
- [2] Калинин Б.А. // Изв. вузов. Физика. 1981. Т. 24. № 8. С. 42-56.
- [3] Колодин П.А., Савченко В.А., Шаповалов В.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 23. С. 22-27.
- [4] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Тихонов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 10. С. 884-888.
- [5] Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
- [6] Казаков Г.Т., Тихонов В.В., Зильберман П.Е. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 8. С. 2307-2312.

Поступило в Редакцию
4 июля 1991 г.