

05; 08; 09

**РАССЕЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН
НА ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ
В НЕВЗАИМНОЙ СТРУКТУРЕ ПЛЕНКА ЖИГ—МЕТАЛЛ***Р. Г. Крышталъ, А. В. Медведев*

Впервые экспериментально исследовано коллинеарное неупругое рассеяние поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) на поверхностной акустической волне (ПАВ) в невязимной структуре. Обнаружено, что в структуре пленка ЖИГ—толстая пленка алюминия (больше скин-слоя) значения резонансных частот рассеяния изменяются при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное. Обсуждаются возможности применения этого явления для измерения дисперсионных характеристик ПМСВ в невязимных структурах.

Введение

Особенности спектра поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в слоистой структуре пленка магнетика—слой металла хорошо известны из теории (см., например, [1]) и представляются перспективными для создания устройств на ПМСВ для обработки сигналов [2]. Однако в настоящее время нам не известно публикаций, в которых сообщалось бы о непосредственных измерениях перестроения спектра ПМСВ в магнитной пленке при нанесении на нее слоя металла.

В [3, 4] были показаны возможности применения явления рассеяния ПМСВ на поверхностной акустической волне (ПАВ) для измерения дисперсии спин-волновых возбуждений в пленках железитриевого граната (ЖИГ). Поэтому представлялось интересным исследовать рассеяние ПМСВ на ПАВ в невязимной структуре ЖИГ—слой металла, которое ранее не исследовалось, и выяснить возможность применения этого явления для построения дисперсионных характеристик ПМСВ.

В настоящей работе сообщаются некоторые результаты исследования коллинеарного рассеяния ПМСВ на ПАВ в структуре пленка ЖИГ—толстая пленка алюминия (толще скин-слоя), обсуждаются особенности явления, связанные с невязимностью структуры, приводится методика обработки экспериментальных результатов, позволяющая в некоторых случаях построить дисперсионные кривые ПМСВ в той структуре. Представлена построенная по этой методике дисперсионная зависимость $\omega(k)$ ПМСВ, удовлетворительно согласующаяся с теоретической, рассчитанной в предположении идеальной проводимости слоя металла.

Методика эксперимента

Экспериментальное исследование коллинеарного рассеяния ПМСВ на ПАВ в структурах галлий-гадолиниевый гранат (ГГГ)—пленка ЖИГ—пленка алюминия проводилось по так называемой методике «на отражение» [3, 5], когда измеряется сигнал, соответствующий рассеянной на ПАВ магнитостатической волне. На рис. 1 показаны конфигурация исследуемых образцов и схема подключения к измерительной установке. Из шайбы ГГГ—пленка ЖИГ, кристалло-

графической плоскости (111), вырезались прямоугольные образцы с размерами 15×5 мм. На поверхность пленки ЖИГ через маску методом термического испарения в вакууме наносилась пленка алюминия толщиной $2.5-3$ мкм. Конфигурация алюминиевой пленки представляла собой прямоугольник длиной 6 мм и шириной, равной ширине структуры ГГГ—ЖИГ. Края пленки ЖИГ для уменьшения отражений ПАВ и ПМСВ подвергались специальной механической обработке.

ПАВ в образцах возбуждались по «мостовой» методике [3]. Генерируемая встречно-штыревым преобразователем 1 ПАВ в пластине 2 из $Y-Z LiNbO_3$ через акустический контакт (вакуумное масло) «переходит» в исследуемый образец (рис. 1). Для возбуждения и приема ПМСВ служила антенна 3, представляющая собой планарный проводник шириной 25 мкм и длиной 6 мм, нанесенный на диэлектрическую пластину 4. Эта пластина с антенной прижималась (без акустического контакта) к рабочей поверхности пленки ЖИГ. Через циркулятор 5 антенна подключалась к СВЧ генератору и селективному приемнику [3]. При измерениях исследуемый образец помещался в касательное магнитное поле величиной 640 Э, направленное параллельно антенне. На антенну подавался СВЧ сигнал частоты $f = 3500-4000$ МГц мощностью ~ 1 мВт,

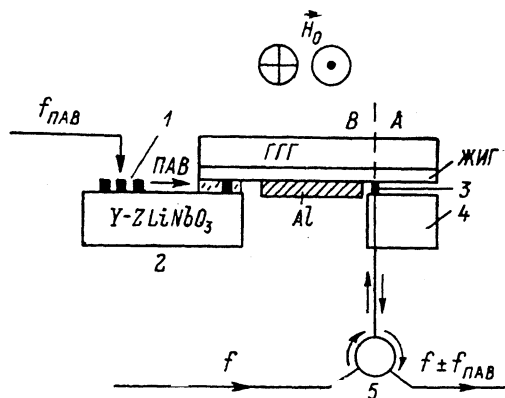


Рис. 1.

измерялся уровень выходного сигнала с помощью селективного приемника, настраиваемого на частоту $f + f_{ПАВ}$ либо $f - f_{ПАВ}$, снималась зависимость уровня этого сигнала P от частоты f . Частота ПАВ $f_{ПАВ}$ могла изменяться в эксперименте от 18 до 28 МГц. Мощность ПАВ в исследуемой структуре равнялась ~ 1 мВт. Измерения проводились в импульсном режиме, длительность СВЧ импульсов и ПАВ импульсов равнялась 20 и 7 мкс соответственно.

Антенна возбуждает ПМСВ в двух взаимно противоположных направлениях, когда приемник настроен на частоту $f - f_{ПАВ}$, измеряется сигнал, соответствующий отраженной (рассеянной) ПМСВ, возникающей в области А образца (рис. 1), в которой падающая ПМСВ и ПАВ распространяются в одном и том же направлении [3]. При настройке приемника на частоту $f + f_{ПАВ}$ измеряется сигнал отраженной ПМСВ, возникающей в области В при встречном распространении падающей ПМСВ и ПАВ. Максимумы зависимостей $P(f)$ имеют место на частотах резонансного рассеяния ПМСВ на ПАВ [3, 5].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены измеренные зависимости относительного уровня сигналов отраженной ПМСВ P_0 при рассеянии на ПАВ от частоты f входного СВЧ сигнала (падающей ПМСВ) при $f_{ПАВ} = 20$ МГц для различных экспериментальных ситуаций: «чистая» пленка ЖИГ (без слоя металла) (а) и металлизированная пленка ЖИГ при двух взаимно противоположных направлениях внешнего магнитного поля (б, в). Как видно из рис. 2, а максимум кривой 1 (попутное распространение ПМСВ и ПАВ, область А) достигается на частоте $f_{0П} = 3640$ МГц, а кривой 2 (встречное распространение, область В) — на частоте $f_{0В} = 3620$ МГц. Значения этих частот удовлетворительно согласуются с расчетными значениями резонансных частот рассеяния для попутного и встречного распространения ПМСВ и ПАВ. При изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное значения этих резонансных частот в эксперименте не изменялись (в пределах точности измерений ± 1 МГц).

В случае образцов с металлизированной пленкой ЖИГ зависимость $P_0(f)$ для попутного распространения ПМСВ и ПАВ (рис. 2, б, кривая 3) практически совпадала с кривой 1, при встречном же распространении ПМСВ и ПАВ (кри-

вая 4) максимум зависимости $P_0(f)$ имел место на частоте $f_1=3721$ МГц. При изменении направления магнитного поля на противоположное максимум кривой 5, соответствующей «чистой» области пленки ЖИГ, достигается на той же частоте, что и максимум кривой 3, а кривая 6, соответствующая металлизированной области пленки ЖИГ, достигает максимума на частоте $f_2=3734$ МГц, т. е. на более высокой частоте, чем кривая 4.

Эти экспериментальные результаты хорошо объясняются в рамках существующих представлений о коллинеарном рассеянии ПМСВ на ПАВ. Действительно, как следует из диаграмм рассеяния рис. 3, для случая «чистой» пленки ЖИГ (рис. 3, а) резонансные частоты рассеяния при изменении направления магнитного поля на обратное не должны изменяться, видно также, что $f_{оп}-f_{об} = f_{пав}$, что хорошо согласуется с экспериментом.

Рис. 2. Измеренные зависимости относительного уровня сигнала P_0 отраженной ПМСВ при рассеянии на ПАВ от частоты f входного СВЧ сигнала. Толщина пленки ЖИГ 5.2 мкм, $H_0=640$ Э.

а — пленка ЖИГ без металла: 1 — попутное распространение ПМСВ и ПАВ (рис. 1, область А), 2 — встречное распространение (область В); б, в — пленка ЖИГ с металлизированным участком (Al толщиной 3 мкм) для двух взаимно противоположных направлений внешнего магнитного поля: 3, 5 — попутное распространение, «чистый» участок ЖИГ (область А); 4, 6 — встречное распространение под металлом (участок В).

Для случая металлизированной пленки из рис. 3, б следует, что при изменении направления магнитного поля на противоположное значение резонансной частоты рассеяния должно измениться (структура невзаимна). Это также имело место в эксперименте (ср. кривые 4 и 6 на рис. 2).

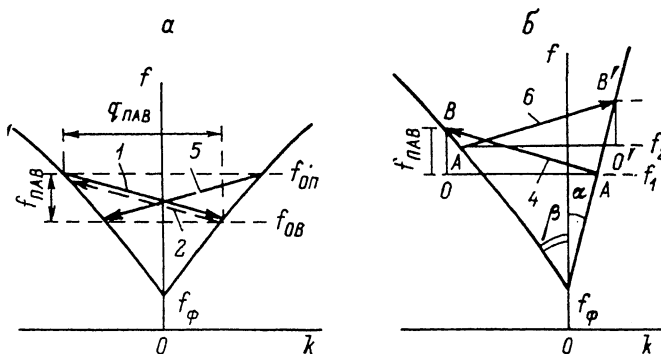


Рис. 3. Диаграммы рассеяния ПМСВ на ПАВ.

а — пленка ЖИГ без металла, б — металлизированная пленка ЖИГ. 1—в — то же, что и на рис. 2.

Отметим, что разница значений резонансных частот рассеяния при взаимно противоположных направлениях магнитного поля $\Delta=f_2-f_1$ может служить «мерой» невзаимности системы. Легко показать, что величина $\Delta/f_{пав}$ равна 0 для взаимной системы и 1 для невзаимной системы, у которой групповая скорость волны, соответствующей одной ветви дисперсионной кривой, конечна, а групповая скорость волны, соответствующей другой ветви, стремится к нулю.

С ростом частоты ПАВ значения резонансных частот рассеяния монотонно возрастают. На рис. 4 представлены измеренные зависимости резонансных частот от частоты ПАВ для «чистой» пленки $f_{0П}$ (попутное распространение ПМСВ и ПАВ) и для металлизированной пленки ЖИГ f_1 и f_2 (для двух взаимно противоположных направлений магнитного поля).

При сравнении пленки алюминия со структуры ГГГ—ЖИГ в растворе щелочи пики на зависимостях $P_0(f)$, обусловленные рассеянием ПМСВ на ПАВ в металлизированной области образца, исчезали, оставались лишь пики, обусловленные рассеянием в «чистой» пленке, которые по частоте совпадали с максимумами кривых 1 и 2 на рис. 2, а.

Применение рассеяния ПМСВ на ПАВ для измерения дисперсионных зависимостей в невзаимных структурах

В [3] показано, что из измерения параметров рассеяния ПМСВ на ПАВ можно построить дисперсионные зависимости ПМСВ во взаимных структурах, в которых дисперсионная кривая симметрична относительно оси частот. В невзаимных системах это не так, поэтому воспользоваться процедурой построения дисперсионных кривых, изложенной в [3], нельзя. Ниже излагается методика обработки экспериментальных результатов по рассеянию ПМСВ на ПАВ, которая позволяет построить в некоторых случаях дисперсионные кривые ПМСВ в невзаимных структурах.

Рассмотрим начальный участок дисперсионной кривой ПМСВ для структуры феррит—слой металла [1]. Прямую и обратную ветви дисперсионной зависимости можно с достаточной степенью точности аппроксимировать прямыми, исходящими из точки $(0, f_\phi)$ под углами к оси частот α и β соответственно (f_ϕ — частота ферромагнитного резонанса) (рис. 3, б). На рис. 3, б f_1 и f_2 — резонансные частоты рассеяния ПМСВ на ПАВ при встречном распространении падающей ПМСВ и ПАВ для двух взаимно противоположных направлений магнитного поля. Из треугольников AOB и $A'O'B'$ нетрудно получить следующие соотношения для углов α и β :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{Nq_{\text{ПАВ}}(f_{\text{ПАВ}} - \Delta)}{f_{\text{ПАВ}}[2(f_1 - f_\phi) + \Delta + f_{\text{ПАВ}}]}, \quad (1)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\Delta + f_{\text{ПАВ}}}{f_{\text{ПАВ}}}, \quad (2)$$

где N — масштабный коэффициент, равный отношению цены деления по оси волновых чисел к цене деления по оси частот f ; $q_{\text{ПАВ}}$ — волновое число ПАВ; $\Delta = f_2 - f_1$.

Выражение (1) справедливо лишь на начальном участке дисперсионных кривых, выражение (2) будет справедливо для всей кривой, если под углами α и β подразумевать углы, образованные касательными к соответствующим ветвям дисперсионной кривой и осью частот.

Для структур ГГГ—металлизированная пленка ЖИГ, согласно теории [1], прямую ветвь дисперсионной кривой можно аппроксимировать прямой линией в довольно широком интервале изменения частоты (для обычно используемых на практике параметров: $H_0 \approx 500-1000$ Э, толщина пленки ЖИГ не менее 5 мкм, этот интервал достигает величины не менее 500 МГц). Поэтому, измерив значения частот f_1 и f_2 при сравнительно низкой частоте ПАВ (где обе ветви дисперсионной кривой можно аппроксимировать прямыми), из (1) можно найти значение угла α . Далее, используя измеренные зависимости f_1 от $f_{\text{ПАВ}}$ (или f_2

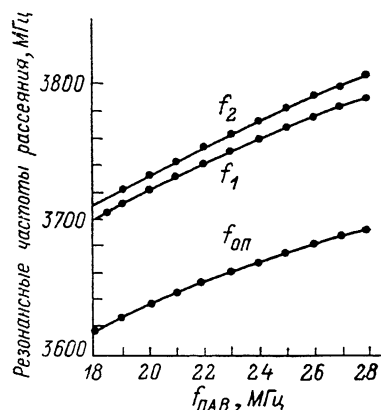


Рис. 4.

от $f_{\text{пав}}$), можно построить дисперсионные зависимости, как это делалось при построении дисперсионных кривых анизотропно-дипольных МСВ [4].

На рис. 5 представлены построенные по данной методике участки дисперсионной характеристики ПМСВ для структуры ГГГ—металлизированная пленка ЖИГ (линии с точками). Угол α , рассчитанный из (1), равен $5.5 \pm 1.5^\circ$. Погрешности измерения по оси волновых чисел изображены горизонтальными

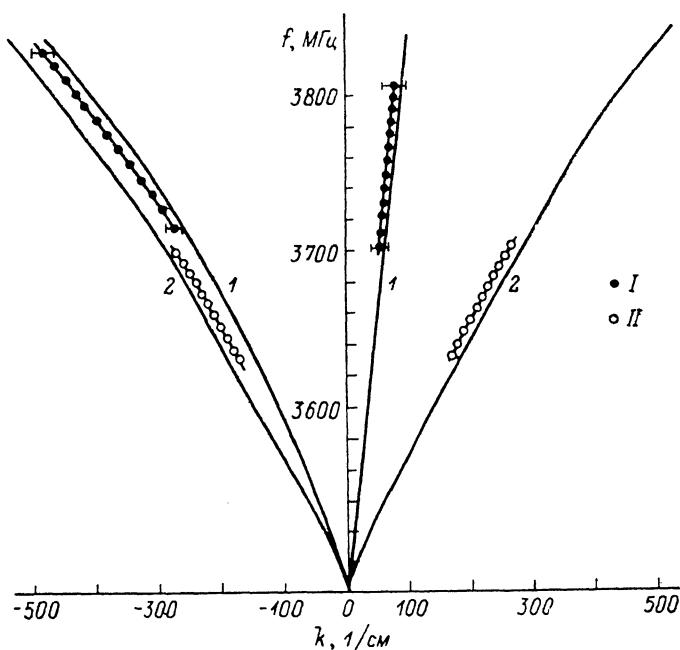


Рис. 5. Дисперсионные зависимости ПМСВ.

I, II — эксперимент; структура с металлизированной пленкой ЖИГ и пленка ЖИГ без металла соответственно. 1, 2 — теория для металлизированной и «чистой» пленки ЖИГ соответственно. $H_0=640$ Э, толщина пленки ЖИГ 5.2 мкм, $4\pi M_0=1760$ Гс.

отрезками, погрешность измерения по оси частот составляет ± 1 МГц. Сплошные линии 1 представляют результат расчета из [1] для толщины пленки ЖИГ 5.2 мкм и величины магнитного поля 640 Э. На основании экспериментальных результатов по методике [3] построены участки дисперсионных кривых ПМСВ для структуры с «чистой» пленкой ЖИГ и дисперсионные кривые 2, рассчитанные из [1] (рис. 5). Видно удовлетворительное согласие экспериментальных результатов с теорией.

Заключение

В настоящей работе впервые экспериментально исследовано коллинеарное рассеяние ПМСВ на ПАВ в невазимной структуре. Главной особенностью этого рассеяния по сравнению с рассеянием во взаимных структурах является изменение значения резонансной частоты рассеяния при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное. Отметим, что такая особенность не должна проявляться при рассеянии ПМСВ в пленке феррита со стационарными периодическими неоднородностями такими, как канавки, магнитные решетки и т. п. [6, 7].

Рассмотренное явление может оказаться полезным при исследовании параметров распространения ПМСВ в структурах феррит—металл, в частности при измерении участков дисперсионных кривых, для оценки значений групповых скоростей ПМСВ v^+ и v^- , распространяющихся во взаимно противоположных направлениях, если учесть, что $v^+=(\text{tg } \alpha)^{-1}$, $v^-=(\text{tg } \beta)^{-1}$ (см. выражение (2)). Последнее обстоятельство, по-видимому, можно использовать для контроля идентичности магнитных свойств поверхностей пленки ЖИГ в различных структурах.

Литература

- [1] *Сеишадри С. Р.* // ТИИЭР. 1970. Т. 58. № 4. С. 105—107.
- [2] *Вапна Г. М.* // Обзоры по электротехнике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. Вып. 8 (1060). С. 13—17.
- [3] *Крышталь Р. Г., Медведь А. В.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 12. С. 2399—2402.
- [4] *Крышталь Р. Г., Медведь А. В.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 1936—1941.
- [5] *Гуляев Ю. В., Крышталь Р. Г., Медведь А. В., Сорокин В. Г.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 9. С. 502—507.
- [6] *Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Плесский В. П.* // ФТТ. 1981. Т. 23. Вып. 4. С. 1231—1233.
- [7] *Вороненко А. В., Герус С. В.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 12. С. 746—748.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
28 марта 1988 г.