УДК 539.216.2

# ДИСПЕРСИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АНИЗОТРОПИЕЙ В ПЛЕНКАХ ЖИГ

*Р. Г. Крышталь, А. В. Медведь*

Из неупругого рассеяния поверхностных магнитостатических волн на поверхностных акустических волнах впервые измерена дисперсия магнитостатических волн (МСВ), обусловленных магнитной анизотропией в пленках ЖИГ в касательном магнитном поле. Экспериментально показано, что в пленках ЖИГ среза ⟨111⟩ с преобладающей кубической кристаллографической анизотропией закон дисперсии этих МСВ положителен, а в пленках с одноосной анизотропией — отрицателен. Полученные экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с теоретическими [4, 6].

Пленки железоиттриевого граната (ЖИГ), выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках из галлийгадолиниевого граната (ГГГ), в настоящее время являются основным материалом для создания устройств на магнитостатических волнах (МСВ) [1]. На основе пленок ЖИГ создаются и исследуются более сложные структуры для устройств на МСВ. Таковыми являются, например, структуры металл—ЖИГ—ГГГ [2] и пьезоэлектрическая пленка ZnO—ЖИГ—ГГГ [3]. Однако к настоящему времени физические свойства реальных пленок ЖИГ нельзя считать полностью изученными, особенно экспериментально. Так, наличие магнитной анизотропии, даже такой слабой, какой является кристаллографическая анизотропия в пленках, выращенных на подложке из ГГГ среза ⟨111⟩, приводит, как теоретически было показано в [4], в касательном магнитном поле к появлению новых ветвей магнитостатических возбуждений, помимо поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) Деймана—Эшбаха. Эти ветви представляют собой моды объемных МСВ с положительным законом дисперсии (прямые объемные МСВ (ПОМСВ)), волновые векторы которых параллельны волновым векторам ПМСВ, а их спектр примыкает снизу к спектру ПМСВ. Экспериментально, на сколько нам известно, такие ПОМСВ, обусловленные кристаллографической магнитной анизотропией, непосредственно не наблюдались. Это, по-видимому, связано с некоторыми экспериментальными трудностями возбуждения и приема этих ПОМСВ, имеющих существенно меньшую групповую скорость и занимающих узкий частотный диапазон по сравнению с ПМСВ. Единственное экспериментальное подтверждение существования таких «анизотропных» ПОМСВ, насколько нам известно, было сделано в работе [5], в которой обнаружено эффективное рассеяние ПМСВ на поверхностной акустической волне (ПАВ), происходящее с перекачкой энергии ПМСВ в первую моду «анизотропной» ПОМСВ.

В теоретической работе [6] была впервые показана возможность существования объемных МСВ с отрицательным законом дисперсии (ООМСВ) в касательно намагниченной пленке ЖИГ, обусловленных одноосной магнитной анизотропией, волновые векторы которых параллельны волновому вектору ПМСВ и их спектр примыкает к спектру ПМСВ. Об экспериментальной про-

верке существования таких ООМСВ, названных в [6] анизотропно-дипольными,[1] к настоящему времени, насколько нам известно, не сообщалось.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты, полученные из измерения частотных зависимостей рассеяния ПМСВ на ПАВ, свидетельствующие о существовании анизотропно-дипольных МСВ как с положительным законом дисперсии, так и с отрицательным и позволяющие построить дисперсионные кривые этих МСВ до значений волнового числа 1500—2000 1/см. Анизотропно-дипольные МСВ с положительным законом дисперсии наблюдались в пленках ЖИГ, не подвергавшихся дополнительной технологической обработке, а с отрицательным законом дисперсии — в пленках ЖИГ, подвергавшихся технологической обработке при катодном нанесении на них пленок ZnO [3]. Полученные экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с теорией [4, 6].

## 1. Методика эксперимента

Экспериментальная методика основана на явлении коллинеарного неупругого рассеяния ПМСВ на ПАВ [3, 5, 7]. При распространении ПАВ в структуре ЖИГ—ГГГ (в касательном магнитном поле), в которой распространяются

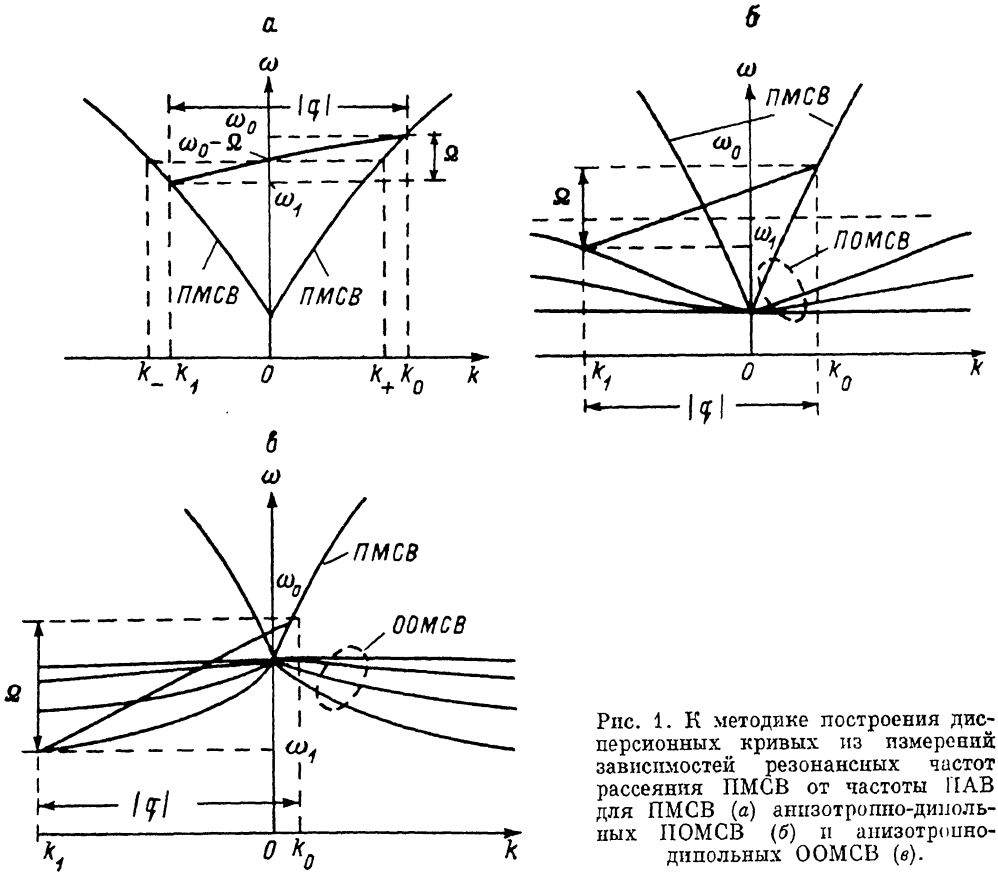


Рис. 1. К методике построения дисперсионных кривых из измерений зависимостей резонансных частот рассеяния ПМСВ от частоты ПАВ для ПМСВ (*а*) анизотропно-дипольных ПОМСВ (*б*) и анизотропно-дипольных ООМСВ (*в*).

ПМСВ, последние будут претерпевать рассеяние, если выполняются законы сохранения [8]

$$\omega_0 = \omega_1 + \Omega, \quad k_0 = k_1 + q, \tag{1}$$

где $\omega_0$ и $k_0$, $\omega_1$ и $k_1$, $\Omega$ и $q$ — круговые частоты и волновые числа рассеиваемой ПМСВ, рассеянной МСВ и ПАВ соответственно. (Здесь и далее в данной работе

[1] В дальнейшем здесь, следуя [6], объемные МСВ, обусловленные как кубической, так и одноосной анизотропией, будем называть анизотропно-дипольными.

рассматривается только случай, когда рассеиваемая ПМСВ и ПАВ распространяются в одном направлении). Частоты ПАВ в наших экспериментах значительно ниже частот ПМСВ и частоты магнитоупругого резонанса.

Если рассеянная МСВ является поверхностной, как и рассеиваемая, то при $\Omega \ll \omega_0$ (1) можно представить в виде (рис. 1, *а*)

$$\omega_0 = \omega_1 + \Omega, k_+(\omega_0 - \Omega/2) = k_-(\omega_1 + \Omega/2) = q/2, \qquad (2)$$

где $k_+$ — волновое число ПМСВ частотой $\omega_0 - \Omega/2$ и того же направления, что и ПАВ; $k_-$ — волновое число ПМСВ той же частоты, но противоположного направления.

Величины $\omega_0$ и $\Omega$ измеряются в эксперименте непосредственно, $q$ находится из соотношения $\Omega/v$, где $v$ — фазовая скорость ПАВ в структурах ЖИГ—ГГГ. Во всех исследуемых нами структурах и частотах ПАВ не выше 100 МГц фазовая скорость ПАВ с точностью до 2 % равна $3.3 \cdot 10^5$ см/с [3, 5]. Таким образом, изменяя в эксперименте частоту ПАВ $\Omega$ и измеряя при этом резонансную частоту рассеяния ПМСВ $\omega_0$, для каждого значения $\Omega$ находим из (2) величины $k_+$ волновых чисел ПМСВ, соответствующих частотам $\omega_0 - \Omega/2$, т. е. экспериментально получаем дисперсионную кривую ПМСВ.

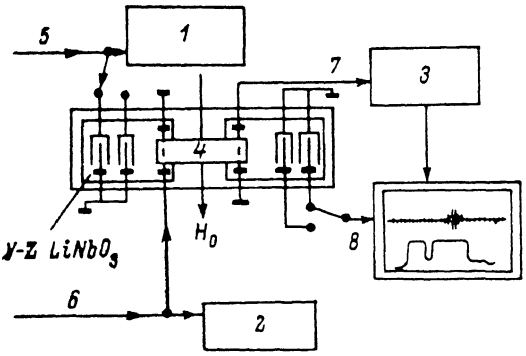


Рис. 2 Блок-схема экспериментальной установки для измерения зависимостей резонансных частот рассеяния ПМСВ от частоты ПАВ.

*1*, *2* — частотомеры; *3* — приемник; *4* — ЖИГ—ГГГ; *5* — вход ПАВ; *6* — вход ПМСВ; *7* — выход ПМСВ; *8* — выход ПАВ.

В [5] экспериментально обнаружено, что неупругое рассеяние ПМСВ на ПАВ может происходить и в том случае, когда рассеянная волна представляет собой анизотропно-дипольную объемную МСВ. Из рис. 1, *б* и дисперсионной кривой ПМСВ, можно построить дисперсионную кривую анизотропно-дипольной объемной МСВ.

На рис. 2 изображена блок-схема установки для измерения зависимостей $\omega_0$ от $\Omega$. Измерения проводились в импульсном режиме. Для возбуждения ПАВ в исследуемых структурах применялась «мостовая» методика [5]. ПАВ, возбуждаемые с помощью встречно-штыревых преобразователей (ВШП), нанесенных на входной опорный звукопровод из Y—Z $LiNbO_3$, через акустическую склейку переходят в исследуемую структуру. Использовались звукопроводы с двумя ВШП на каждом: либо с центральными частотами 24 и 81 МГц, либо 30 и 80 МГц. Ширина полосы изменения частот ПАВ, в которой возможно было производить измерения, была различной для различных образцов и в среднем составляла 20 % от центральных частот ВШП. Полные вносимые потери акустического канала (с входа на выход) на центральных частотах ВШП не превышали 35 дБ. Максимальная мощность импульсных ПАВ, распространяющихся в исследуемых структурах, могла достигать ~200 мВт. Длительность импульсов ПАВ 2—5 мкс.

Для возбуждения и приема ПМСВ использовались планарные проводники — антенны, представляющие собой алюминиевые полоски шириной 25 мкм и толщиной ~2000 Å, нанесенные фотолитографией в едином цикле с ВШП на рабочие поверхности входного и выходного звукопроводов. Длина антенн 4 мм и равнялась апертурам ВШП, расстояние между антеннами 10 мм.

Исследовались структуры ЖИГ—ГГГ среза ⟨111⟩ с различными толщинами пленок ЖИГ (от 4 до 16 мкм) и различной технологической «предысторией»: 1) выращенные методом жидкофазной эпитаксии и не подвергавшиеся никакой дополнительной технологической обработке; 2) подвергавшиеся технологической обработке в процессе катодного осаждения на них пьезоэлектрических

пленок ZnO [3], которые затем были стравлены в азотной кислоте. Планарные размеры исследуемых образцов 14×4 мм. Для измерения образцы накладывались пленкой ЖИГ на опорные звукопроводы; требуемый акустический контакт между образцом и звукопроводами достигался с помощью пленки вакуумного масла. Далее вся конструкция в специальном держателе помещалась в касательное к пленке ЖИГ магнитное поле (как показано на рис. 2) 640 Э, создаваемое постоянным магнитом.

С помощью частотомера *1* (рис. 2) устанавливалась частота ПАВ Ω. Частотомером *2* измерялись частоты ПМСВ $\omega_0$, на которых на выходном импульсе ПМСВ «провал», вызванный рассеянием на ПАВ, имеет максимальную глубину. Изменяя частоту, снимали зависимость $\omega_0(\Omega)$, из которой на основании выражений (1), (2) (рис. 1) строились дисперсионные кривые ПМСВ и анизотропно-дипольных МСВ.

Максимальная мощность СВЧ сигнала, подаваемая на входную антенну, выбиралась таким образом, чтобы в отсутствие ПАВ не происходило искажений формы импульса ПМСВ, снимаемого с выходной антенны. Точность определения резонансных частот рассеяния ПМСВ была не хуже ±1 МГц.

## 2. Экспериментальные результаты, их обсуждение

В образцах ЖИГ—ГГГ, не подвергавшихся дополнительной технологической обработке, наблюдалось, как и в [5], рассеяние ПМСВ двух механизмов (схематически изображены на рис. 1, *а*, *б*).

В таких образцах с толщиной пленки ЖИГ более 6—7 мкм рассеяние типа *б* было обнаружено на нескольких резонансных частотах ПМСВ. На одной из них

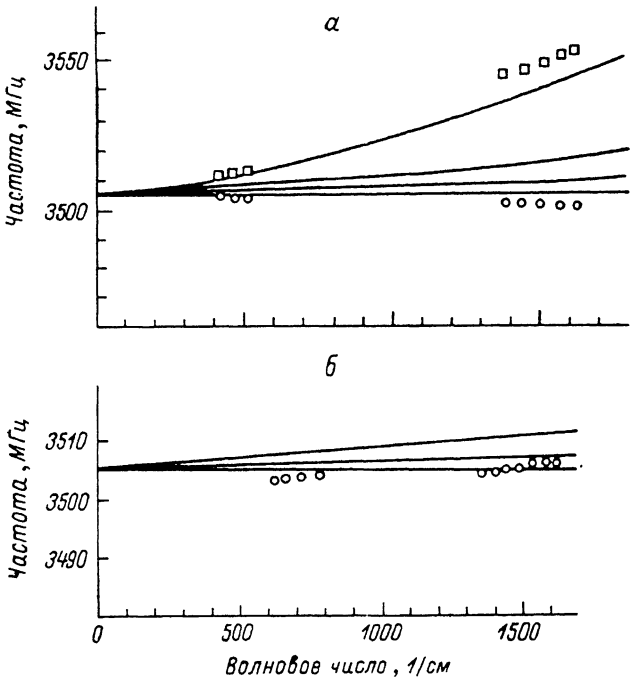


Рис. 3. Дисперсионные кривые анизотропно-дипольных ПОМСВ. Центральные частоты ВШП ПАВ 24 и 80 МГц (*а*), 30 и 80 МГц (*б*).

(обычно самой высокой) уменьшение выходного сигнала ПМСВ под действием ПАВ было максимальным («провал» на импульсе ПМСВ достигал более 20 дБ при мощности ПАВ ~50 мВт на частотах ПАВ ~80 МГц). На остальных частотах рассеяния уменьшение выходного сигнала было значительно слабее (~3÷5 дБ), а сами эти резонансы были «размыты» и отстояли по частоте близко друг от друга. Поэтому в эксперименте фиксировались частоты первого и последнего резонансов, т. е. зона частот, в которой наблюдается рассеяние типа *б*.

В образцах с толщинами пленки ЖИГ менее 6—5 мкм наблюдалось рассеяние типа *б* лишь на одной частоте ПМСВ.

На рис. 3 представлены экспериментальные результаты измерения зависимости частот рассеяния типа *б* от частоты ПАВ для двух образцов ЖИГ—ГГГ с толщинами пленки 15.7 (*а*), 5 мкм (*б*) и обработанные в соответствии с выражениями (1), (2) (рис. 1, *а*, *б*; точки). Сплошными линиями изображены результаты расчета дисперсии нескольких первых мод анизотропно-дипольных ПОМСВ [4] для этих толщин ЖИГ. При расчете были взяты обычно используемые значения параметров пленок ЖИГ: намагниченность насыщения $4\pi M_0=1760$ Гс, гиромагнитное отношение $\gamma=2.81$ МГц/Э, первая константа кубической анизотропии $k_1/M_0=-42$ Э. Из рис. 3 видно, что согласие экспериментальных результатов с рассчитанными из теории [4] дисперсионными кривыми удовлетворитель-

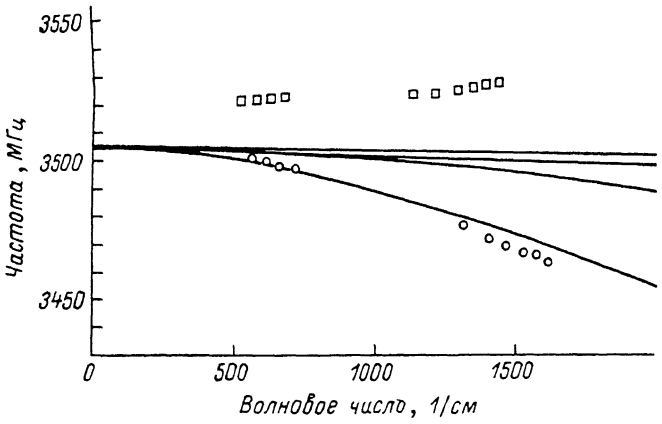


Рис. 4. Дисперсионные кривые анизотропно-дипольных ООМСВ для образца ЖИГ—ГГГ, подвергавшегося технологической обработке при нанесении пленки ZnO.

Точки — эксперимент, сплошные линии — расчет из [6] для $H_0=640$ Э, $4\pi M_0=1760$ Гс, $\beta=0.8$, $\theta=28°$, $d=9.1$ мкм.

ное. Это подтверждает факт существования в касательно намагниченных пленках ЖИГ анизотропно-дипольных объемных МСВ с положительным законом дисперсии, обусловленных кубической анизотропией. Наблюдаемая в эксперименте для пленки ЖИГ толщиной 15.7 мкм более широкая частотная зона существования этих ПОМСВ по сравнению с теоретической может быть, вероятно, объяснена некоторой неоднородностью магнитных свойств образца и тем, что в методике обработки экспериментальных данных не учтено затухание МСВ. Все эти факторы могут приводить к уширению резонансов рассеяния ПМСВ.

В образцах ЖИГ—ГГГ, подвергавшихся обработке при нанесении пленок ZnO, наблюдалось рассеяние ПМСВ двух типов: с рассеянной МСВ, представляющей собой поверхностную волну (рис. 1, *а*); с рассеянной волной, представляющей собой анизотропно-дипольную ООМСВ (рис. 1, *в*). При измерении зависимости резонансных частот рассеяния типа *в* от частоты ПАВ в таких образцах, так же как и в «чистых» образцах, фиксировались частоты первого и последнего резонанса, т. е. зона частот ПМСВ, в которой наблюдается рассеяние типа *в*.

На рис. 4 представлены экспериментальные результаты, обработанные в соответствии с (1), (2) (рис. 1, *а*, *в*) для образца с толщиной 9.1 мкм (точки). Из этих результатов следует, что закон дисперсии для рассеянных МСВ является отрицательным. Это позволяет сделать вывод о том, что в процессе нанесения пленки ZnO в пленке ЖИГ возникает заметная одноосная анизотропия [6].

Полученные экспериментальные результаты качественно согласуются с теорией [6]. Для количественного сравнения необходимо знать точные значения намагниченности насыщения $4\pi M_0$, константы одноосной анизотропии $\beta$, угла наклона оси анизотропии для исследуемого образца. Такими данными мы не располагали. Удовлетворительное количественное согласие получается, если принять, например, следующие значения параметров: $4\pi M_0=1760$ Гс, $\beta=0.8$, $\theta=28°$. На рис. 4 представлены рассчитанные дисперсионные кривые первых

четырех мод анизотропно-дипольных ООМСВ для этих значений параметров. Видно, что экспериментальная ширина частотной зоны рассеяния шире расчетной, что, по-видимому, можно объяснить тем, что в нашем расчете не учтен неоднородный обмен, приводящий к увеличению частотных промежутков между модами [6]. Отметим, что неоднородный обмен в образцах с дополнительной обработкой, по-видимому, существен, так как на амплитудно-частотных характеристиках канала ПМСВ наблюдался ряд характерных «провалов», которые мы объясняли спин-волновыми резонансами [9]. Это обстоятельство затрудняло исследование образцов этого типа с толщиной пленок ЖИГ менее 5 мкм. Полученные экспериментальные результаты для образцов ЖИГ—ГГГ, на которых ранее была пленка ZnO, не изменялись, если пленку ZnO и не стравливать, а ПАВ возбуждать с помощью ВШП, нанесенных на пленку ZnO [3]. В этом случае рассеяние ПМСВ типа *в* наблюдалось в непрерывном режиме распространения ПАВ и ПМСВ.

## Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные результаты по рассеянию ПМСВ на ПАВ в структурах ЖИГ—ГГГ среза ⟨111⟩ свидетельствуют о возможности существования анизотропно-дипольных МСВ, которые имеют положительный закон дисперсии в «чистых» пленках ЖИГ (с преобладанием кубической кристаллографической анизотропии) и отрицательный закон дисперсии в пленках ЖИГ, подвергавшихся дополнительной технологической обработке, приводившей, по-видимому, к появлению одноосной анизотропии.

Описанная экспериментальная методика может быть использована для оценки параметров пленок ЖИГ.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность П. Е. Зильберману за обсуждение работы и В. Г. Сорокину за полезные замечания и помощь в изготовлении образцов ZnO—ЖИГ—ГГГ.

### Литература

[1] *Sethares J. C.* J. Appl. Phys., 1982, v. 53, p. 2646—2651.
[2] *Flogd R. E., Sethares J. C.* J. Appl. Phys., v. 55, N 6, p. 2515—2517.
[3] *Гуляев Ю. В., Крышталь Р. Г., Медведь А. В., Сорокин В. Г.* Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 9, с. 552—557.
[4] *Вызулин С. А.* Автореф. канд. дис. М., 1983.
[5] *Крышталь Р. Г., Медведь А. В., Никитин И. П., Дробязко И. Б.* ЖТФ, 1986, т. 56, № 9, с. 540—543.
[6] *Галкин О. Л., Зильберман П. Е.* Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, с. 1077—1080.
[7] *Медников А. М., Попков А. Ф., Анисимкин В. И.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, № 12, с. 646—650.
[8] *Медников А. М., Никитов С. А., Попков А. Ф.* ФТТ, 1982, т. 24, № 10, с. 3008—3013.
[9] *Гуляев Ю. В., Бугаев А. С., Зильберман П. Е.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, № 9, с. 600—603.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
11 июня 1986 г.