

УДК 621.378

© 1990

ВОЗБУЖДЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ДИПОЛЬНЫМИ, ОБМЕННЫМИ И ГИБРИДНЫМИ ДИПОЛЬНО-ОБМЕННЫМИ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

А. С. Бугаёв, В. Б. Горский, А. В. Помялов

Теоретически и экспериментально проведено сравнение эффективности возбуждения коротких упругих волн в ферритовых пленках тремя типами магнитостатических колебаний: дипольными, обменными и гибридными дипольно-обменными. Показано, что эффективность возбуждения упругих волн гибридными колебаниями значительно превосходит эффективность возбуждения упругих волн как чисто дипольными, так и чисто обменными колебаниями. Показано, что зависимость амплитуды упругой волны, возбуждаемой гибридным колебанием, от отношения амплитуд дипольной и обменной компонент в колебании носит немонотонный характер. Получено оптимальное отношение амплитуд дипольной и обменной компонент в гибридном колебании, при котором амплитуда возбуждаемой им упругой волны максимальна.

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследовано возбуждение поперечных упругих волн (УВ) СВЧ диапазона в структуре пленка ЖИГ—подложка ГТГ, помещенной в нормальное к поверхности насыщающее магнитное поле H . Общий вид структуры показан на рис. 1. УВ возбуждаются за счет магнитострикции при «раскачке» магнитостатических колебаний (МСК) в пленке ЖИГ. Исследовались УВ, распространявшиеся в глубь подложки в направлении, перпендикулярном к поверхности указанной структуры. Рассмотрена ситуация, когда длина возбуждаемой УВ λ_u много меньше толщины d пленки ЖИГ. Проведено сравнение эффективности возбуждения УВ тремя типами МСК: дипольными, обменными, гибридными дипольно-обменными [1].

Кратко проанализируем основные преимущества и недостатки возбуждения УВ каждым из указанных МСК. Основные этапы возбуждения различными МСК схематично изображены на рис. 2. Возбуждение УВ дипольными МСК исследовалось ранее в работах [2, 3]. Несмотря на высокую эффективность возбуждения дипольного МСК СВЧ полем (процесс a на рис. 2), эффективность возбуждения УВ с помощью дипольного МСК мала из-за слабой связи МСК с упругой системой (процесс b). Слабая связь обусловлена двумя причинами. Во-первых, сила магнитоупругого взаимодействия F дипольного МСК с упругой системой мала. Действительно, $F \sim \delta m / \delta z$, где m — переменная намагниченность МСК, а для дипольного МСК в силу квазиоднородного распределения m по толщине пленки величина $\delta m / \delta z$ мала. Во-вторых, из-за сильного различия волновых чисел дипольного МСК k_d и УВ k_u ($k_d d \ll 1$, $k_u d \gg 1$) оказывается малым интеграл перекрытия между квазиоднородной по толщине пленки функцией, описывающей распределение $m(z)$ дипольного МСК, и быстро осциллирующей по толщине функцией, описывающей упругое смещение УВ $u(z)$. Связь магнитной и упругой систем можно увеличить, если использовать для возбуждения обменное МСК (процесс z), т. е. МСК, для которых $m(z)$ — быстро осциллирующая по толщине функция [4]. Однако сами по себе обменные МСК слабо возбуждаются однородным по толщине

пленки СВЧ полем (процесс σ), поэтому эффективность возбуждения УВ с помощью обменного МСК оказывается малой. Существенно увеличить эффективность возбуждения УВ можно с помощью гибридных дипольно-обменных МСК [1]. Частоты и волновые числа в плоскости пленки у гибридных МСК соответствуют точкам пересечения дисперсионных кривых дипольной и обменной мод МСВ в ферритовой пленке [1]. Известно, что распределение переменной намагниченности m собственных колебаний вблизи указанных точек пересечения дисперсионных кривых является суперпозицией трех компонент с одинаковым распределением m в плоскости пленки и компонент, отличающихся распределением m по тол-

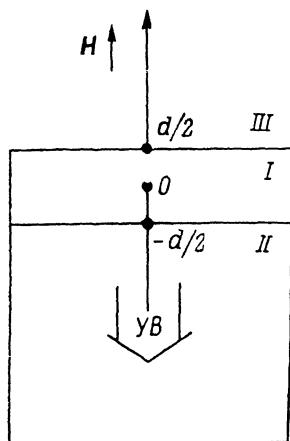


Рис. 1. Геометрия исследуемой структуры.

I — пленка ЖИГ, II — подложка ГГГ, III — вакуум. Стрелкой указано направление распространения УВ.

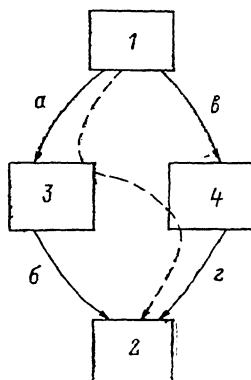


Рис. 2. Схематическое изображение основных этапов возбуждения УВ тремя типами МСК: дипольными (a, b), обменными (σ, ε), гибридными (штриховая линия).

1 — генератор СВЧ, 2 — упругая волна, 3 — дипольное МСК, 4 — обменное МСК.

щине пленки: дипольной, квазиоднородной по толщине пленки; обменной, быстро осциллирующей по толщине; поверхностной. Согласно [1], вклад последней компоненты в $m(z)$ чрезвычайно мал и при расчете возбуждения УВ гибридным МСК ее можно не учитывать. Высокая эффективность возбуждения УВ с помощью гибридного МСК получается за счет того, что само МСК возбуждается за счет дипольной компоненты, тогда как УВ непосредственно возбуждается обменной компонентой (штриховая линия на рис. 2). Вполне естественно предположить, что эффективность возбуждения УВ гибридным МСК зависит от соотношения в нем амплитуд дипольной A_d и обменной A_e компонент. В работе теоретически и экспериментально исследована зависимость амплитуды УВ U_e , возбуждаемой гибридным МСК, от величины A_e/A_d и определено оптимальное соотношение амплитуд $(A_e/A_d)_0$, при котором U_e максимальна.

1. Теория

Рассмотрим аналитически возбуждение УВ в ферритовой пленке в упругое полупространство дипольными, обменными и гибридными МСК и сравним амплитуды УВ, возбуждаемых этими тремя типами МСК. Будем предполагать, что амплитуда УВ по толщине ферритовой пленки постоянна. За счет полного отражения УВ от поверхности пленки ЖИГ, не граничащей с подложкой, распределение упругого смещения по толщине пленки имеет вид стоячей волны, т. е. в ферритовой пленке возбуждается упругое колебание. Собственные потери упругого колебания в ферритовой пленке малы, и его затухание определяется выносом упругой энергии из ферритовой пленки в подложку. При этом постоянная затухания ω_a упругого

колебания, возбуждаемого в пленке, определяется следующим выражением:

$$\omega_a = (v/4d)(1 - \zeta)^2, \quad (1)$$

где v — скорость УВ в пленке, d — толщина пленки, ζ — коэффициент отражения УВ от границы пленка—подложка. Для ЖИГ и ГТГ $\zeta \approx 0.1$. Будем использовать циркулярные компоненты переменной намагниченности m и упругого смещения u . Предполагаем, что все переменные величины зависят от времени как $\exp(i\omega t)$.

Сначала рассмотрим задачу о возбуждении УВ в ферритовой пленке обменным МСК, которое в свою очередь возбуждается однородным СВЧ полем. Для этого разложим $m(z)$ в ряд Фурье по собственным функциям ферромагнитного слоя с симметричными граничными условиями [5]. Ограничимся решениями симметричного типа

$$m(z) = \sum_j A_j \cos k_j z, \quad (2)$$

где A_j, k_j — амплитуды и волновые числа обменных МСК; k_j определяется обменными граничными условиями при $z = \pm d/2$. Будем предполагать, что спины на поверхностях пленки ЖИГ полностью закреплены.

Уменьшение степени закрепления спинов на поверхностях на величину связи магнитной и упругой систем не окажет большого влияния, но приведет к уменьшению амплитуды возбуждаемой УВ из-за уменьшения интенсивности обменных МСК [5]. Поэтому для определения максимальной амплитуды УВ, которую можно возбудить обменным МСК, и для упрощения расчетов будем считать, что $m|_{z=\pm d/2} = 0$. Упругое смещение $u(z)$ разложим в интеграл Фурье по собственным функциям упругого полупространства. Упругое напряжение на свободной поверхности ферритовой пленки равно нулю, следовательно, $\partial u / \partial z|_{z=d/2} = 0$ и Фурье-разложение имеет вид

$$u(z) = \int_0^{\infty} u(k) \cos k(z - d/2) dk. \quad (3)$$

Амплитуда U_0 УВ, уходящей в упругое полупространство (подложку), пропорциональна амплитуде U УВ в пленке ЖИГ. Подставляя (2) и (3) в уравнение движения упругой среды [6, 7], получаем связь $u(k)$ с амплитудами A_j обменных МСК

$$u(k) = \frac{2b_{44}M}{c_{44}k^2 - \rho\omega^2} \sum_j A_j J_j(k), \quad (4)$$

где

$$J_j(k) = -\frac{2}{\pi} \int_{-d/2}^{+d/2} k_j \sin k_j z \cos k\left(z - \frac{d}{2}\right) dz,$$

b_{44} — компонента тензора магнитострикции, M — намагниченность насыщения, ρ — плотность, c_{44} — компонента тензора упругих постоянных в пленке. Для определения A_j подставим (4) в уравнение движения намагниченности с учетом магнитострикции [5, 6]. В результате получаем следующую систему уравнений для амплитуд A_j :

$$A_j (\omega - \omega_H - 4\pi a \omega_M k_j^2) - \eta \omega_M \sum_i A_i \int_0^{\infty} J_i(k) J'_j(k) dk = \omega_M h_j, \quad (5)$$

где

$$J'_j(k) = \int_{-d/2}^{d/2} k \sin k(z - d/2) \cos k_j z dz,$$

α — постоянта неоднородного обмена; $\eta = 4M^2 b_{44}^2 / c_{44}$; $\omega_H = \gamma H$; $\omega_M = \gamma M$; γ — гиромагнитное отношение; H , — магнитное поле в пленке; h_j — амплитуда j -компоненты СВЧ поля h , разложенного по собственным функциям $m(z)$ [5]. Учет диссипации проведем формально, заменив во всех формулах ω_H на $\omega_H + i\omega_r$, νk на $\nu k + i\omega_a$, где $\omega_r = \gamma \Delta H$, ΔH — полуширина резонансной кривой, а величина ω_a определяется выражением (1).

Выражения (3)—(5) определяют амплитуду УВ, которая возбуждается в пленке МСК с $m(z)$, описываемым выражением (2) при любых значениях частоты возбуждения и магнитного поля. Из указанных выражений следует, что амплитуда возбуждаемой УВ имеет максимумы при магнитных полях, соответствующих резонансным магнитным полям обменных МСК. При совпадении магнитного поля с резонансным магнитным полем j -го обменного МСК можно считать, что $A_i = \delta_{ij} A_j$, и из (3)—(5) с учетом того, что $m|_{z=\pm d/2} = 0$, получаем амплитуду УВ U_e , возбуждаемой j -м обменным МСК

$$U_e = 4 \frac{b_{44} M}{\pi c_{44} k_a} \frac{\xi}{1 + \beta \xi^2} \frac{\omega_M}{\omega_r} h \frac{1}{k_e d}, \quad (6)$$

где $\xi = \sin(k_e - k_a) d / (k_e - k_a) d$; k_a — волновое число возбуждаемой УВ, равное ω/ν ; k_e — волновое число обменного МСК; $\beta = \eta dk_e \omega_M / \pi \omega_r$ — параметр, характеризующий отношение потерь обменного МСК, обусловленных возбуждением УВ, к собственным потерям МСК. В тонких пленках со слабой магнитоупругостью, где параметр $\beta \ll 1$, амплитуда U_e УВ максимальна при $\xi = 1$, т. е. при точном совпадении волновых чисел обменного МСК и УВ: $k_e = k_a$. Если же параметр $\beta > 1$, то амплитуда УВ максимальна при $\xi = \beta^{-1/2}$ и определяется следующим выражением:

$$U_e^{\max} = 2 \frac{b_{44} M}{\pi c_{44} k_a} \frac{\omega_M}{\omega_r} h \beta^{-1/2} \frac{1}{k_e d}. \quad (7)$$

Таким образом, в толстых пленках ЖИГ, где $\beta > 1$, амплитуда УВ, возбуждаемой обменным МСК, достигает максимума не при точном равенстве k_e и k_a , а когда они различаются на величину Δk . При этом расстройка Δk определяется следующим уравнением:

$$\frac{\sin \Delta k d}{\Delta k d} = \left(\eta \frac{dk_e}{\pi} \frac{\omega_M}{\omega_r} \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

При указанной величине расстройки Δk величина связи магнитной и упругой систем такова, что половина энергии СВЧ поля, расходуемой на возбуждение обменного МСК, уносится УВ в подложку. Амплитуду УВ, возбуждаемой обменным МСК, можно еще увеличить специальным подбором толщины d пленки. Действительно, как видно из (6), (7), при толщине d , когда параметр $\beta = 1$, и при точном равенстве k_e и k_a амплитуда УВ достигает максимума.

Вышеприведенная методика расчета может быть применена без изменений для определения амплитуды U_d УВ, возбуждаемой дипольным МСК. В результате получим

$$U_d = \frac{b_{44} M}{\pi c_{44} k_a} \left(\frac{k_d}{k_a} \right)^2 \frac{k_a d}{2} \sin k_a d \frac{\omega_M}{\omega_r} h. \quad (9)$$

Сравним амплитуды УВ, возбуждаемых на определенной частоте ω обменным и дипольным МСК в ферритовой пленке толщиной d . Будем предполагать, что толщина пленки d достаточно велика, так что параметр $\beta > 1$. Именно такая ситуация реализовывалась в эксперименте. Из сравнения выражений (7) и (9) получим

$$\frac{U_e^{\max}}{U_d} = 4 \left(\eta \frac{\omega_M}{2\omega_r} \right)^{-1/2} \frac{(k_a d)^{1/2}}{(k_a d)^2} \frac{1}{\sin k_a d}, \quad (10)$$

откуда видно, что эффективность возбуждения УВ с помощью обменного МСК больше эффективности возбуждения УВ дипольным МСК. Действительно, величина $k_d d \ll 1$, а для ЖИГ $\eta (\omega_M/2\omega_r) \approx 1$, поэтому амплитуда УВ, возбуждаемой обменным МСК в пленке ЖИГ, более чем в 4 $(k_d d)^{1/2}$ число раз превосходит амплитуду УВ, возбужденной дипольным МСК.

Рассмотрим возбуждение УВ гибридным МСК. Распределение $m(z)$ гибридного МСК можно представить в виде суммы дипольной и обменной компонент [1]

$$m(z) = A_d \cos k_d z + A_e \cos k_e z, \quad (11)$$

где A_d, A_e — амплитуды; k_d, k_e — волновые числа дипольной и обменной компонент. При расчетах будем предполагать, что $k_d d \ll 1$. Неравенство $k_d d \ll 1$ выполняется в том случае, когда мы рассматриваем МСК, длина волны λ которых в плоскости пленки много больше d . При экспериментах указанное неравенство всегда выполнялось. Как мы уже показали, дипольные МСК возбуждают УВ значительно слабее, чем обменные МСК, поэтому мы будем предполагать, что УВ возбуждаются только обменной компонентой. Действительно, как следует из (9) и (4), указанное предположение верно, если отношение амплитуд

$$A_e/A_d \gg q/k_a, \quad (12)$$

q — волновое число МСК в плоскости пленки. Далее мы покажем, что наиболее эффективное возбуждение УВ гибридным МСК происходит при таком отношении A_e/A_d , при котором указанное неравенство выполняется. При экспериментах неравенство (12) всегда выполнялось, и мы будем предполагать, что УВ возбуждается только за счет обменной компоненты. Выражение (4) дает нам связь амплитуды УВ U с амплитудой обменной компоненты A_e . Для определения же самой амплитуды A_e используем энергетический подход, а именно приравняем энергию P , поступающую в магнитную систему от СВЧ поля, к сумме энергии собственных потерь P_m в магнитной системе и энергии P_a , уносимой УВ в подложку. Энергия P , передаваемая СВЧ полем гибричному МСК в единицу времени на единицу площади, определяется следующим выражением:

$$P = \left(A_d - A_e \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2} \right) h d \omega. \quad (13)$$

Величина энергии P_m собственных потерь в магнитной системе равна

$$P_m = \left(A_d^2 + 2A_d A_e \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2} + A_e^2 \left(1 + \frac{\sin k_e d}{k_e d} \right) \right) \frac{\omega_r}{\omega_M} d \omega. \quad (14)$$

Энергия P_a , уносимая УВ из пленки в подложку, равна

$$P_a = \eta \xi^2 A_e^2 \left(1 + \frac{\sin k_e d}{k_e d} \right) \frac{k_e d}{2\pi} d \omega. \quad (15)$$

Используя равенство P и $P_m + P_a$, получаем амплитуду обменной компоненты гибридного МСК

$$A_e = \varepsilon \frac{1 - \varepsilon \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2}}{1 + 2\varepsilon \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2} + \frac{\varepsilon^2}{2} \left(1 + \frac{\sin k_e d}{k_e d} \right) \left(1 + \eta \frac{\omega_M}{\omega_r} \frac{k_e d}{\pi} \xi^2 \right)} \frac{\omega_M}{\omega_r} h. \quad (16)$$

Через ε обозначено отношение амплитуд A_e/A_d в гибридном МСК. Подставляя полученное выражение для A_e в (4), получаем амплитуду U_g УВ, возбуждаемой гибридным МСК с отношением амплитуд A_e/A_d , равным ε

$$U_g = \frac{b_{44} M}{\pi c_{44} k_a} \frac{\xi \varepsilon \left(1 - \varepsilon \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2} \right)}{1 + 2\varepsilon \frac{\sin(k_e d/2)}{k_e d/2} + \frac{\varepsilon^2}{2} \left(1 + \frac{\sin k_e d}{k_e d} \right) \left(1 + \eta \frac{\omega_M}{\omega_r} \frac{k_e d}{\pi} \xi^2 \right)} \frac{\omega_M}{\omega_r} h. \quad (17)$$

При анализе выражения (17) ограничимся случаем коротких УВ, таких, что $k_a d \gg 1$. Тогда амплитуда U_g УВ максимальна при выполнении следующих условий: а) волновые числа k_a УВ и k_e обменной компоненты гибридного МСК совпадают, б) отношение амплитуд A_e/A_d равно ϵ_0 , где

$$\epsilon_0 = \sqrt{2} \left(1 + \eta \frac{\omega_M}{\omega_r} \frac{k_e d}{\pi} \right)^{-1/2}. \quad (18)$$

При таком соотношении амплитуд A_e/A_d половина энергии, расходуемой СВЧ полем на возбуждение МСК, уносится УВ в подложку. В этом случае амплитуда U_g^{\max} УВ равна

$$U_g^{\max} = \frac{b_{44} M}{\pi c_{44} k_a} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1 + \eta \frac{\omega_M}{\omega_r} \frac{k_e d}{\pi}}} \frac{\omega_M}{\omega_r} h. \quad (19)$$

Сопоставив выражения (7) и (19), получим, что U_g^{\max} больше U_g^{\max} примерно в $k_e d$ число раз и именно во столько раз амплитуда обменной компоненты гибридного колебания с ϵ , равным ϵ_0 , превосходит амплитуду чисто обменного колебания. Таким образом, наличие дипольной компоненты в гибридном МСК улучшает преобразование энергии СВЧ поля в обменную компоненту, которая в свою очередь эффективно возбуждает УВ.

2. Экспериментальные результаты

Экспериментально исследовались пленки ЖИГ с толщиной $d \approx 10$ мкм, выращенные на подложке ГГТ с ориентацией $\{1, 1, 1\}$. Ширина линий ФМР $2\Delta H$ составляла 0.5 Э. Спины на поверхности пленок были закреплены. МСК были локализованы в плоскости пленки. Диаметр области локализации $D \approx 1$ мм. МСК возбуждались с помощью микрополостного преобразователя. Частота возбуждения менялась в диапазоне от 2 до 5.6 ГГц. Исследовалась зависимость амплитуды U УВ, возбуждаемой МСК, от соотношения амплитуд A_e/A_d обменной и дипольной компонент в МСК. Амплитуда СВЧ поля, возбуждающего МСК, при измерениях была фиксирована. Амплитуды УВ, возбуждаемых различными МСК, определялись эхо-методом [2, 3] по амплитуде первого отраженного эхо-импульса. При такой схеме МСК возбуждались импульсами СВЧ поля. Длительность возбуждающего импульса составляла 100—250 нс и была меньше времени пробега УВ по толщине подложки «туда и обратно». МСК использовались как для возбуждения УВ, так и для ее приема. Изменение отношения A_e/A_d в гибридных МСК достигалось путем изменения положения МСК в спектре МСВ [4]. Соотношение амплитуд A_e/A_d в реально возбуждаемых гибридных МСК можно определить по интенсивности I_g гибридных МСК. Действительно, если подставить (11) в выражение для интенсивности МСК [1], то получим следующее выражение:

$$I = I_d / (1 + \epsilon^2/2), \quad (20)$$

где I_d — интенсивность чисто дипольного МСК, возбуждаемого в пленке с параметрами d и $2\Delta H$, как и в исследуемой пленке, но с незакрепленными поверхностными спинами. Выражение (20) верно, когда $A_e/A_d \ll \ll k_e d$. При экспериментах же данное неравенство всегда выполнялось.

На рис. 3 (штрихи) представлена экспериментальная зависимость амплитуды УВ U от соотношения A_e/A_d . Точки с абсциссами $A_e/A_d = 0$ и $A_e/A_d \rightarrow \infty$ соответствуют возбуждению УВ чисто дипольным и чисто обменным МСК. В промежуточных случаях, когда $0 < A_e/A_d < \infty$, УВ возбуждались гибридными МСК. Частота возбуждения $f = 4$ ГГц. При указанных выше условиях эксперимента величина расстройки Δk , определяемая формулой (8), составляла $2 \cdot 10^3$ см⁻¹ и была много меньше k_e ($k_e \approx 7 \cdot 10^4$ см⁻¹). Поэтому в экспериментах расстройка Δk была незаметна и

максимум амплитуды УВ, возбуждаемой как чисто обменным, так и гибридным МСК, наблюдался при совпадении волновых чисел k_e и k_d . Из полученной зависимости $U (A_e/A_d)$ видно, что амплитуда УВ, возбужденной обменным МСК ($A_e/A_d \rightarrow \infty$), больше амплитуды УВ, возбужденной дипольным МСК ($A_e/A_d=0$). Однако основным выводом является подтверждение того факта, что с помощью гибридных МСК можно достичь наиболее высокой эффективности возбуждения УВ. Действительно, амплитуды УВ, возбужденных гибридными МСК ($0 < A_e/A_d < \infty$), более чем на порядок превосходят амплитуды УВ, возбужденных как чисто дипольными, так и чисто обменными МСК. Причем в соответствии с расчетом существует некоторое оптимальное соотношение амплитуд A_e/A_d , при котором амплитуда УВ максимальна. При оптимальном соотношении амплитуд потери на преобразование L энергии СВЧ генератора в энергию УВ составляли -7 дБ. Сплошной линией на рис. 3 представлена рассчитанная по формуле (17) зависимость $U (A_e/A_d)$, которая достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными.

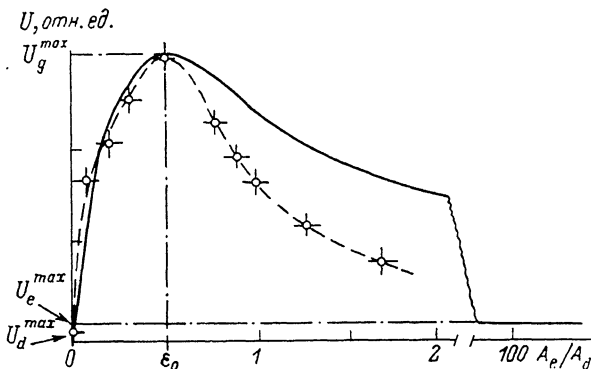


Рис. 3. Зависимость амплитуды УВ U от отношения амплитуд A_e/A_d обменной и дипольной компонент в возбуждающей упругую волну МСК.

3. Практическое использование

Возбуждение УВ с помощью гибридных МСК может быть практически использовано для возбуждения УВ на высоких частотах (более 4 ГГц). Действительно, в наших экспериментах на частоте 5.6 ГГц потери на преобразование L энергии СВЧ генератора в энергию УВ составляли -7 дБ. Из выражения (19) для амплитуды U_g^{\max} видно, что частоту преобразования можно увеличивать без заметного увеличения потерь на преобразование L . Кроме того, потери L можно уменьшить, если увеличить толщину пленки ЖИГ, используемой для возбуждения УВ. В результате с помощью пленок ЖИГ гибридными МСК можно возбуждать УВ на частотах вплоть до 20 ГГц при потерях $L \approx -7$ дБ, что значительно меньше потерь, достигаемых в иных известных методах.

Максимальная частота f^{\max} , на которой возможно возбуждение УВ гибридным МСК в ферритовой пленке толщиной d , равна

$$f^{\max} = (v/4\pi) \sqrt{\pi d/aD^{\min}}, \quad (21)$$

где D^{\min} — минимальное значение диаметра локализации МСК в плоскости пленки, при котором еще возможно эффективное возбуждение МСК с помощью микрополоскового преобразователя. Действительно, волновое число обменной компоненты гибридного МСК зависит от удаления МСК от начала спектра МСВ, которое в свою очередь зависит от размера D [1, 5]. В результате k_e связано с D и с толщиной пленки следующим образом:

$$k_e = \sqrt{\pi d/aD}/2. \quad (22)$$

С учетом того, что для эффективного возбуждения УВ необходимо совпадение волновых чисел УВ и обменной компоненты МСК, для максимальной частоты возбуждения f_{\max} получаем выражение (21). Диаметр локализации можно уменьшать до 200 мкм. Если использовать при этом пленки ЖИГ толщиной 40 мкм, то максимальная частота f_{\max} составит 20 ГГц.

Итак, мы сопоставили эффективность возбуждения упругих волн с помощью трех различных типов МСК: дипольных, обменных и гибридных. Показано, что в толстых пленках ЖИГ, толщины которых много больше длины УВ, амплитуды УВ, возбужденных гибридными МСК, более чем на порядок превосходят амплитуды УВ, возбужденных как чисто обменным так и чисто дипольным МСК. Наиболее эффективное возбуждение УВ гибридным МСК наблюдается при совпадении волновых чисел УВ и обменной компоненты МСК. Кроме того, существует некоторое оптимальное соотношение амплитуд обменной и дипольной компонент в гибридном МСК, при котором амплитуда возбуждаемой им УВ максимальна. В этом случае половина энергии, расходуемой СВЧ полем на возбуждение МСК, преобразуется в энергию УВ. На частоте 5.6 ГГц потери на преобразование энергии СВЧ генератора в энергию УВ составили —7 дБ. Частота преобразования может быть увеличена до 20 ГГц без заметного увеличения потерь на преобразование.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Зильберман П. Е., Козлов В. И., Помялов А. В. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 2. С. 352—357.
- [2] Андреев А. С., Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Кравченко В. Б., Огрии Ю. Ф., Темиряев А. Г., Филимонова Л. М. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. № 2. С. 90—94.
- [3] Тычинский А. В. // УФЖ. 1985. Т. 30. № 8. С. 1193—1196.
- [4] Горский В. Б., Помялов А. В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 7. С. 61—64.
- [5] Саланский Н. М., Ерухимов М. Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Новосибирск, 1975. 222 с.
- [6] Ле-Кроу Р., Комсток Р. // Физическая акустика. Т. 3. Ч. Б. / Под ред. У. Мезона. М., 1968. С. 156.
- [7] Бугаев А. С., Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Филимонов Ю. А. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 9. С. 2647—2652.

Московский физико-технический институт
Долгопрудный
Московская область

Поступило в Редакцию
19 декабря 1989 г.
В окончательной редакции
17 апреля 1990 г.