

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СУБГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ТОНКИХ
МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

С.К. Дементьев, В.А. Костяков, П.С. Игнатенко

При определенных условиях в тонких пермалловых пленках возникают низкочастотные субгармонические колебания при частотах переменного возбуждающего поля, начиная от единиц мГц и выше. Эти субгармонические колебания изучались в Институте математики СО АН СССР длительное время [1]. Целью настоящей работы является изложение экспериментальных результатов по определению условий возникновения этих колебаний.

Низкочастотные субгармонические колебания наблюдались в обычных пермалловых пленках (состава 80% Ni , 20% Fe , полученных напылением в вакууме на разогретую стеклянную подложку) при некоторых значениях амплитуды переменного $H_{\sim}$ и постоянного $H_{\pm}$ магнитных полей (направленных параллельно плоскости пленки и друг другу) и угла α между направлением указанных полей и осью легкого намагничивания (рис. 1). Эти колебания возникали также и при наличии дополнительного постоянного поля H_L , направленного перпендикулярно полям $H_{\sim}$ и $H_{\pm}$. Поле H_L , как правило, стабилизировало субгармонические колебания и расширяло области их возбуждения. Однако наибольшее внимание было уделено изучению условий возникновения субгармонических колебаний при $H_L=0$, и здесь будут представлены результаты только для этого случая.

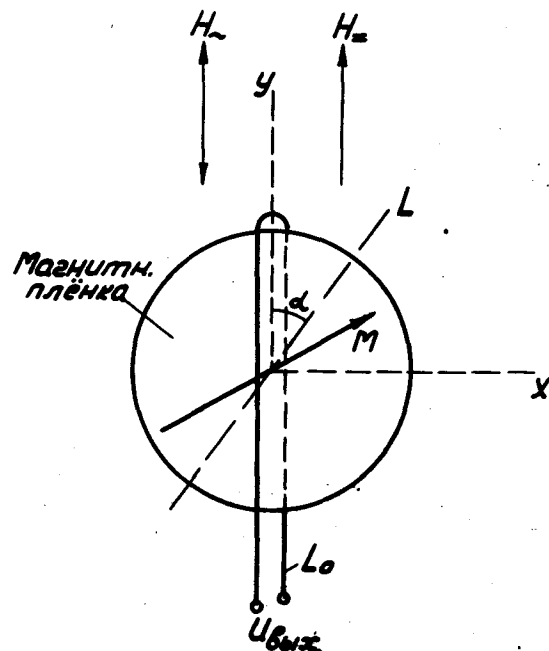


Рис. 1. Принципиальная схема возбуждения субгармонических колебаний в тонких магнитных пленках.

Наиболее легко обнаруживаются субгармоники порядка $\nu = 2$, которые наблюдаются в различных плёнках при изменении частоты переменного поля, начиная от 3 мГц. Эти колебания исследовались до частоты переменного поля в 80 мГц. В диапазоне частот от 3 мГц до 80 мГц были обнаружены также субгармоники порядка 3, 4 и 5. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы напряжения на съемном витке L_0 (рис. 1) при субгармониках порядка 2 и 4 (верхние кривые), где для сопоставления частот также приведены осциллограммы переменных полей $H_~$ (нижние кривые).

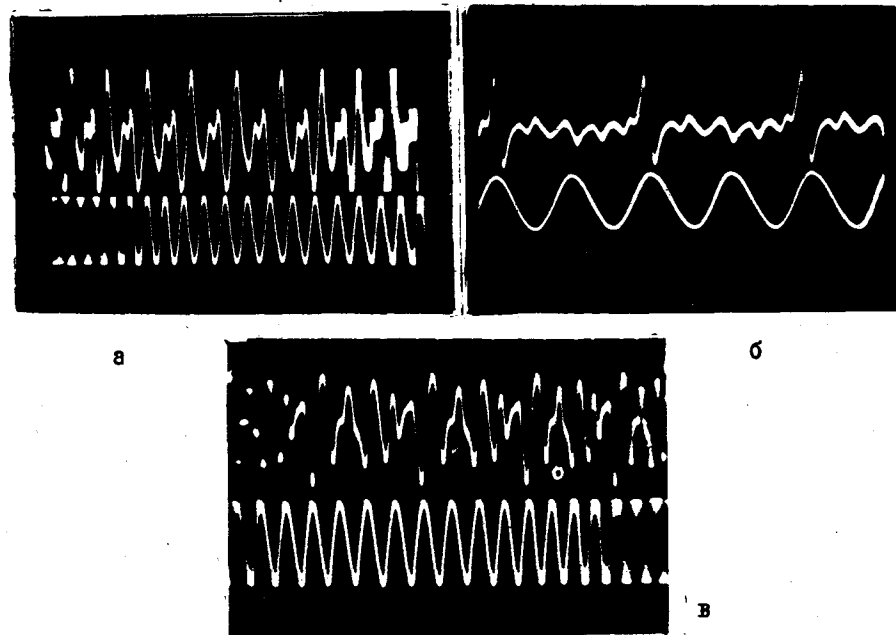


Рис. 2. Осциллограммы выходного напряжения с плёнки в режиме субгармонических колебаний: а) плёнка № 92г. $\nu = 2$, $f = 6,3$ мГц ($D = 3$ мм, $\Delta = 900$ Å, $H_K = 1,9$ а/см, $H_C = 1,36$ а/см, $H_~ = 6,35$ а/см, $H_- = 1,43$ а/см, $\alpha = 250^\circ$); б) плёнка № 86б. $\nu = 2$, $f = 64,6$ мГц ($D = 3$ мм, $\Delta = 800$ Å, $H_K = 1,62$ а/см, $H_C = 1,4$ а/см, $H_~ = 10,8$ а/см, $H_- = 6,15$ а/см, $\alpha = 300^\circ$); в) плёнка № 97ж. $\nu = 4$, $f = 64,6$ мГц ($D = 3$ мм, $\Delta = 1000$ Å, $H_K = 1,36$ а/см, $H_C = 1,08$ а/см, $H_~ = 14,8$ а/см, $H_- = 5,4$ а/см, $\alpha = 1350^\circ$).

При субгармонических колебаниях на частотах переменного поля порядка единиц мегагерц амплитуда поля $H_~$ имеет величину от 2 до 5 а/см, а H_- — от 0,5 до 2 а/см. С увеличением частоты требуемые поля растут до 10 – 15 а/см — переменное и до 5 – 8 а/см — постоянное. Амплитуда переменного поля $H_~$, как правило, выше значения постоянного поля примерно в 2–3 раза. На низких частотах интервалы углов α , при которых наблюдаются субгармонические колебания, составляют всего 10–15°. С увеличением частоты угловые зоны расширяются до 70 – 80°. При $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ субгармонические колебания либо не наблюдаются, либо имеют относительно очень малую амплитуду.

Режим возбуждения субгармоник всегда мягкий. При изменении направления постоянного поля на обратное фаза субгармонических колебаний изменяется на $\pi/2$ радиан с одновременным из-

менением полярности выходного напряжения. Субгармонические колебания порядка 2 возникают в двух фазах, различающихся на π радиан, в зависимости от начальных условий. При отсутствии начального возмущения та или иная фаза возникает с равной вероятностью. В связи с этим изучение явления субгармонических колебаний в тонких магнитных плёнках представляет большой интерес не только для физики магнитных явлений, но и для вычислительной техники.

Следует особо отметить, что описанные субгармонические колебания не являются результатом обычного параметрического резонанса по следующим причинам.

Необходимым условием параметрического возбуждения контура с переменной индуктивностью является выполнение следующего неравенства [2]:

$$\Gamma^2 > \frac{1}{Q^2} + \delta^2, \quad (1)$$

где $\Gamma = \frac{L - L_0}{2L_0}$ - индекс модуляции индуктивности,

$\frac{1}{Q}$ - затухание в контуре,

$\delta = 1 - \left(\frac{2f_0}{f}\right)^2$ - относительная расстройка собственной частоты контура f_0 и частоты субгармоники (равной половине частоты питания) $f/2$.

В описываемых экспериментах не было колебательного контура, настроенного на частоту f_0 , близкую к $f/2$. Паразитные емкости вместе с индуктивностью съемного витка образовывали паразитный контур. Однако его собственная частота была равной $f_0 = 168$ мГц, то есть значительно выше частоты субгармоники. При этом относительная расстройка на любой частоте питания была $|\delta| > 4,8$, а на частоте питания 6 мГц $|\delta| > 3000$.

Подсчет максимально возможной величины Γ (для плёнки диаметром 3 мм, толщиной 1000 Å) даёт $\Gamma \leq 0,13$. По экспериментальным данным Γ - ещё на порядок ниже. Так, при изменении H_z от -20 до +20 а/см (угол α соответствовал зоне субгармонических колебаний) был получен уход резонансной частоты паразитного контура на 1,5 мГц, что соответствует значениям $\Gamma \leq 0,012$. Для сравнения можно указать, что типовые японские параметроны имеют $\Gamma \approx 0,3 + 0,4$; $\frac{1}{Q} \approx 0,18$ и $\delta \approx 0$ [2].

Таким образом, поскольку условие (1) не выполняется, субгармонические колебания возникают не в паразитном контуре за

счет модуляции его индуктивности, а в самой магнитной плёнке.

Было исследовано более тысячи плёнок диаметром (D) от 3 до 15 мм и толщиной (Δ) от 500 до 3500 Å. Субгармонические колебания были получены примерно на 80% плёнок от общего числа исследованных. В их числе были плёнки всех диаметров в указанных выше пределах. Было выяснено, что наиболее благоприятная толщина плёнки для возникновения субгармонических колебаний лежит в пределах 1500 - 2000 Å. С увеличением толщины относительное число работоспособных плёнок падает. В плёнках толщиной менее 800 Å, как правило, субгармонические колебания не наблюдаются.

Диапазон изменения коэрцитивной силы вращения H_K исследованных плёнок составлял 0,9 - 11,0 а/см. С увеличением H_K вероятность возбуждения субгармонических колебаний падала. В плёнках с $H_K > 4$ а/см в подавляющем большинстве случаев субгармонические колебания не возникали. Наилучшие результаты показывали плёнки с $H_K = (1,5 \div 2,0)$ а/см. Коэрцитивная сила смещения границ H_C исследованных плёнок лежала в пределах от 0,1 до 5,5 а/см. Максимум относительного числа плёнок, дающих субгармонические колебания, приходился на интервал $H_C = (0,7 \div 1,1)$ а/см. С изменением величины H_K и H_C поля H_z и H_y изменялись очень слабо, причем с увеличением H_K требуемые поля могли как возрастать, так и убывать.

Типичные области возбуждения субгармонических колебаний порядка 2 приведены на рис. 3. При изучении областей возбуждения субгармонических колебаний экспериментальная установка была расположена так, что направление поля Земли совпадало с направлением приложенных полей. При этом поле Земли складывалось с постоянным полем H_z , что было учтено при построении областей. Как видно из рис. 3, с увеличением частоты области расширяются и смещаются в сторону больших полей.

На рис. 4 показана зависимость амплитуды субгармонических колебаний от угла α . При малых частотах лепестки круговых диаграмм располагаются вблизи лёгкой оси и имеют малую ширину. С увеличением частоты угловые зоны расширяются и амплитуда субгармоники увеличивается. Круговые диаграммы имеют несимметричный вид, что более резко проявляется на низких частотах. При некоторых режимах амплитуда субгармонических колебаний очень сильно зависит от величины возбуждающих полей, особенно на низких частотах. Вследствие некоторой механичес-

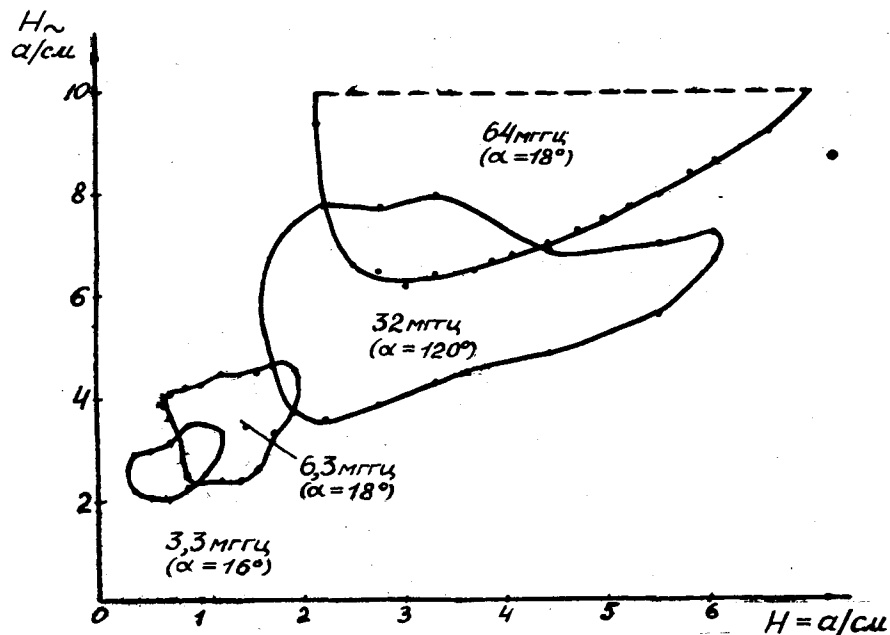


Рис. 3. Области возбуждения субгармонических колебаний порядка 2 для пленки № 782 ($D=3\text{ мм}$, $\Delta=1300\text{ Å}$, $H_k=0,99\text{ а/см}$, $H_c=0,66\text{ а/см}$)

кой неточности изготовления поворотного устройства экспериментальной установки угол между плоскостью плёнки и плоскостью питающей полосковой линии при вращении плёнки мог слегка изменяться, что приводило к изменению величины составляющих полей $H_{\sim}$ и $H_{=}$, параллельных плоскости плёнки. Это могло быть одной из причин асимметрии круговых диаграмм рис. 4. Однако ввиду высокой чувствительности субгармонических колебаний к положению плоскости плёнки относительно питающих полей устранить указанное нежелательное явление не удалось и вопрос об асимметрии требует дополнительного исследования. Многие плёнки обладали угловым гистерезисом, особенно заметным на высоких частотах, который заключается в том, что лепестки круговой диаграммы смещаются по углу в зависимости от того, в какую сторону вращать плёнку при снятии диаграммы – по часовой стрелке или против.

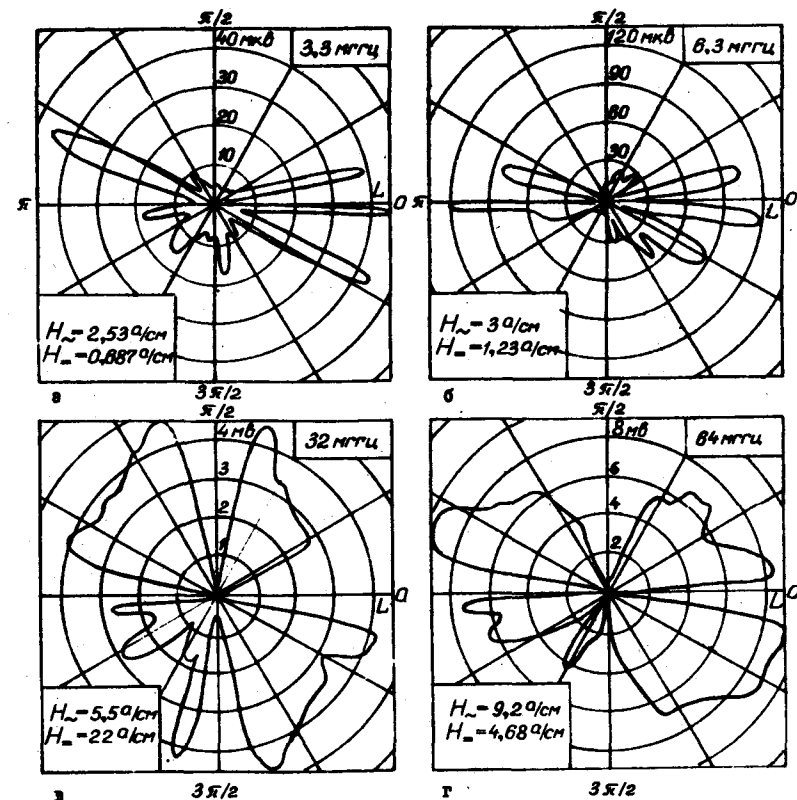


Рис. 4. Плёнка № 782. Зависимость амплитуды субгармоники порядка 2 от угла α между легкой осью плёнки и направлением приложенных полей: а) $f=3,3\text{ мГц}$; б) $f=6,3\text{ мГц}$; в) $f=32\text{ мГц}$; г) $f=64\text{ мГц}$.

Если в режиме субгармонических колебаний выключить постоянное поле и снять зависимость выходного напряжения от угла α между лёгкой осью и направлением приложенного высокочастотного поля $H_{\sim}$, то полученная угловая диаграмма будет иметь четырехлепестковый вид с нулевыми минимумами как по легкой, так и по трудной осям. Такой же вид имеет и круговая диаграмма в режиме субгармонических колебаний для интегрального сигнала с пленки. Совершенно ясно, что в случае однодоменной пленки нулевого минимума в направлении трудной оси не должно быть. Поэтому можно сделать вывод, что пленка в режиме субгармонических колебаний разбита на домены. О том, что пленка при субгармонических колебаниях разбита на домены, свидетельствует также и тот факт, что напряжение на съемном витке на 1 - 2 порядка меньше, чем напряжение, которое должно быть для однодоменной пленки. Изложенные в данной работе эксперименты не позволяют однозначно решить вопрос о том, какие процессы имеют место в режиме субгармонических колебаний - некогерентное вращение, смещение границ, либо то и другое вместе. Для этого необходимы дополнительные эксперименты и сопоставление их с результатами расчета различных моделей.

В заключение авторы выражают благодарность за помощь в работе к.т.н. В.Л. Дятлову, к.ф.-м.н. А.П. Парсанову, м.н.с. А.Б. Голишникову и Г.М. Камаловой.

Л и т е р а т у р а

1. В.Л. Дятлов, С.К. Дементьев, Ю.А. Пьянков. Параметрические колебания и вращение в ферромагнитных пленках. - Вычислительные системы, Новосибирск, 1962, вып. 2.
2. Параметроны. Перев. с японск. и англ., ИЛ, Москва, 1962.

Поступила в редакцию
4.I.1966 г.