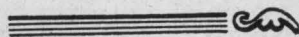


Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



№ 2 — 1966



УДК 621.372.852.22.01

А. И. ПИЛЬЩИКОВ, Н. С. СЕДЛЕЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОТЕРИ В ФЕРРИТАХ

Исследовались нелинейные потери в ферритовом фазовращателе в зависимости от близости рабочей частоты к частоте естественного ферромагнитного резонанса. Измерения проводились в десятисантиметровом диапазоне на образцах MgCg системы, различающихся по частотам естественного резонанса. Показано, что наиболее интенсивный рост нелинейных потерь при повышении уровня высокочастотной мощности и наименьшие значения пороговых мощностей наблюдаются вблизи частоты естественного резонанса.

Введение

Известно, что при работе ферритовых устройств на высоком уровне высокочастотной мощности, наблюдается значительный рост потерь, связанный с нелинейными явлениями в феррите. В большинстве теоретических и экспериментальных работ, посвященных этим вопросам, рассматриваются образцы, малые по сравнению с длиной волны высокочастотного поля, и считается, что образец намагничен до насыщения.

При исследовании устройств с большими образцами на высоком уровне мощности следует учитывать, что характеристики устройства определяются не только свойствами вещества, но и электродинамикой всей системы. В работах Секиотиса и др. [1] и Мартина [2] исследовались нелинейные потери в больших образцах, когда высокочастотная составляющая магнитного поля перпендикулярна постоянному полю.

В настоящей работе изучалось поведение фазовращателя Реджиа—Спенсера на высоком уровне мощности. Сложность анализа нелинейных процессов в фазовращателе Реджиа—Спенсера заключается в том, что отдельные части образца находятся под воздействием высокочастотных полей не только разной интенсивности, но и разной ориентации относительно постоянного поля. Условия нестабильности спиновых волн в различных участках образца будут выполняться не одновременно и для спиновых волн с разными волновыми векторами. Кроме того, фазовращатель обычно работает в слабых постоянных магнитных полях, где сильно влияние доменной структуры. Это особенно существенно в тех случаях, когда частота естественного ферромагнитного резонанса вещества близка к рабочей частоте устройства. Поэтому в данной работе исследовалось влияние близости естественного резонанса на нелинейные потери в фазовращателе.

Экспериментальные результаты

Потери в фазовращателе Реджиа—Спенсера при высоком уровне мощности изучались в диапазоне 10 см. В качестве генератора в установке использовался импульсный магнетрон. Для устранения влияния тепловых эффектов все измерения проводились на частоте повторения импульсов 10 или 3 гц и длительности 1 мксек. Величина потерь (α) определялась как разность между падающей мощностью и прошедшей, так как коэффициент отражения не превышал 0,2, отраженная мощность контролировалась, но поправка на отраженную мощность существенно не изменяла результаты.

Ферритовый стержень прямоугольного сечения помещался в центре прямоугольного волновода, целиком заполняя его по высоте. На концах феррита были сделаны скосы. Продольное магнитное поле создавалось соленоидом. Все измерения проводились в интервале полей от 0 до 30 эрст. Предварительно осуществлялась стабилизация частотной петли гистерезиса образца, и затем измерения велись по одной из ветвей этой петли.

Исследования проводились на ферритах MgCr системы пяти различных составов. Выбирались составы, различающиеся по магнитным характеристикам и в особенности по частотам естественного резонанса. Основные данные статических измерений и измерений на малом уровне мощности приведены в таблице*.

Из приведенных данных видно, что составы P-4, P-8 имеют границы естественного резонанса при длинах волн больше <15 см; P-15 — на 15 см и два состава: P-19 и P-26 — вблизи 11 см. Соответственно этому нарастает активность ферритов при использовании их в фазовращателе. Следует отметить, что с повышением температуры потери возрастают во всех образцах, кроме P-19 и P-26. Наблюдаемый спад потерь в P-19 и P-26 связан с уменьшением константы анизотропии при повышении температуры и уходе частоты естественного резонанса в сторону меньших частот.

Измерения показали, что для составов P-4 и P-8 потери слабо зависят от внешнего поля и изменения длины волны в интервале 10—11 см. При повышении уровня высокочастотной мощности потери в P-4 не меняются, а в P-8 наблюдается слабое нарастание потерь от 1 до 1,5 дб. На более активных составах, таких, как P-15, P-19 и P-26, заметно увеличение потерь при увеличении рабочей длины волны и росте высокочастотной мощности. Кроме того, меняется характер кривых $\alpha(H)$, что особенно четко проявляется на образце P-19 (рис. 1). Здесь представлены результаты измерений $\alpha(H)$ при различных уровнях импульсной мощности для $\lambda=9,95, 10,45$ и 11 см. При подходе к естественному резонансу резко возрастают потери в малых полях. На рис. 2 представлена зависимость потерь от уровня падающей мощности для всех составов при $H=30$ эрст. При переходе от образца к образцу меняется общий уровень потерь. Крутизна нарастания потерь с ростом мощности увеличивается при переходе от P-4 к более активным составам и почти одинакова для P-19 и P-26. Наиболее наглядно зависимость $\alpha(P)$ от близости к естественному резонансу показана на рис. 3. Результаты соответствуют $H=30$ эрст. Для образца P-15 с ростом длины волны, т. е. с приближением к естественному резонансу, пороговая мощ-

* Все образцы и данные, приводимые в этой таблице, были любезно предоставлены И. И. Сильвестрович и В. А. Красновой, за что авторы выражают им глубокую благодарность.

ность уменьшается. Здесь, по аналогии с магнитостатическим случаем, под пороговой мощностью подразумевается мощность, выше которой наблюдается рост потерь за счет нелинейных свойств феррита. Ясно, что аналогия не может быть полной, так как в большом образце трудно ожидать достижения порога одновременно во всем объеме. Вероятно, наблюдаемый порог соответствует развитию нелинейных процессов в основной части образца. Выше порога нарастание потерь происходит примерно с одинаковой крутизной при всех частотах. Аналогичные результаты получены на образце Р-19, однако пороговые мощности несколько ниже. Для Р-26 рост потерь начинается уже при мощностях, меньших 3—6 кВт. При $\lambda = 11$ см потери в образце настолько велики, что

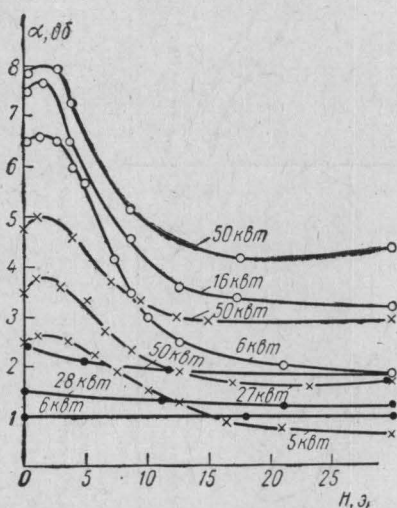


Рис. 1. Зависимость потерь от величины внешнего магнитного поля в образце Р-19 при различных уровнях мощности и длинах волн: \cdot — 9,95 см, \times — 10,45 см, \circ — 11 см

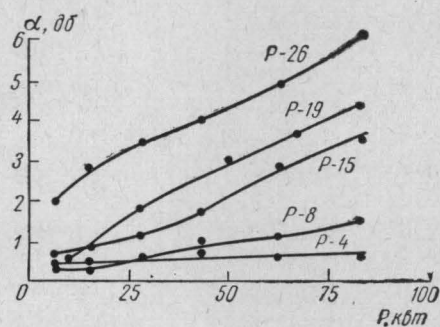


Рис. 2. Изменение потерь с ростом падающей импульсной мощности. $\lambda = 10,45$ см, $H = 30$ эрст

не удается избежать разогрева даже при частоте повторения импульсов 10 гц. Поэтому наблюдаемое «насыщение» $\alpha(P)$ на 11 см скорее всего объясняется компенсацией роста потерь за счет нелинейности, уменьшением потерь за счет разогрева, характерного для Р-26.

Интересно проследить, как изменяются потери на большом и малом уровне мощности при изменении длины волны. Такие зависимости для Р-26 представлены на рис. 4. Если за меру интенсивности нелинейных потерь принять разность потерь на большом и малом уровнях мощности, то величина интенсивности нелинейных потерь при $H = 30$ эрст нарастает при подходе к естественному резонансу. Здесь же дана зависимость $\alpha(\lambda)$ при $H = 2$ эрст и 6 кВт. Аналогичная зависимость $H = 2$ эрст и $P = 30$ кВт не приведена, так как сильный разогрев образца не позволял получить достоверные результаты.

Ход частотных зависимостей потерь для Р-26 явно обнаруживает близость резонанса. При этом, если для 30 эрст резонанс наступает на $\lambda > 11$ см, то для 2 эрст, по-видимому, на $\lambda < 11$ см.

Такое изменение резонансных частот может быть связано с перестройкой доменной структуры. Действительно, как показано в работах Артмана и др. [3, 4, 5], частота ферромагнитного резонанса при наличии доменной структуры определяется не только внешним полем, эффективным полем анизотропии и размагничивающими полями образца, но и размагничивающими полями, возникающими на границе доменов. Артман рассчитал частоты резонанса в зависимости от внешнего поля

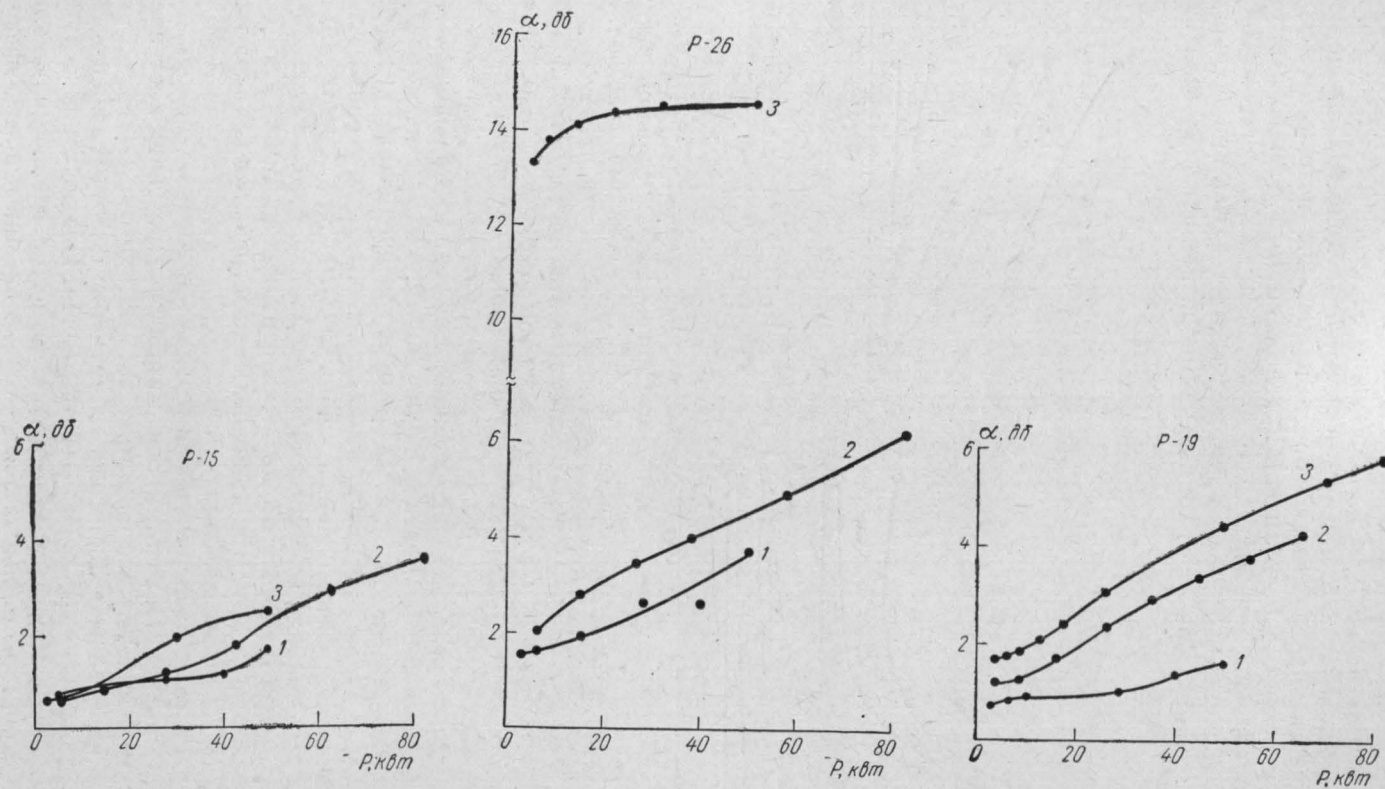


Рис. 3. Зависимость потерь от мощности при $H=30$ эрст для длин волн: 1 — 9,95 см, 2 — 10,45 см, 3 — 11 см

Марка	Состав, %	Намагниченность насыщения, M_s , гаусс	Первая константа анизотропии, $k \cdot 10^{-3}$, эрг/см ³	Температура Кюри, T_c	ΔH , эрст	ϵ'	ϵ''	$\rho \cdot 10^{-7}$ ом/см	зерно, μ	$\lambda_{e.p.}$, см	$H=30$ э	$\lambda=10$ см
											φ°	α , дБ
P-4	20 Cr ₂ O ₃ 47,5 MgO 32,5 Fe ₂ O ₃	30,3	2,0	72	<200	8,2÷10	0,02	—	—	>15	63	0,3
P-8	20 Cr ₂ O ₃ 45 MgO 35 Fe ₂ O ₃	40,5	3,8	104	<200	9,6	0,01	2,4	4÷10	>15	102	0,5
P-15	15 Cr ₂ O ₃ 47,5 MgO 35 Fe ₂ O ₃	53,5	4,7	156	200	9,1	0,01	1	—	15	155	0,5
P-19	20Cr ₂ O ₃ 40 MgO 40 Fe ₂ O ₃	62,0	4,0	214	200÷ ÷300	9,4 10,3	0,02	3,7	4÷16	>11	130	1,0
P-26	17,5 Cr ₂ O ₃ 40 MgO 42,5 Fe ₂ O ₃	73,5	12,1	239	300	10,3	0,08	1	—	<11	250	5,0
1	близкий к P-15	—	—	—	2% Mn		2% Cu		—	—	240	0,7
2	близкий к P-15	—	—	—	3% Mn		3% Cu		—	—	380	1,3

ΔH —ширина линии при ферромагнитном резонансе в насыщенном образце, измерено при длине волны 3 см; ϵ' , ϵ'' —действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости на СВЧ; ρ — удельное сопротивление; $\lambda_{e.p.}$ —граница естественного резонанса со стороны коротких волн, за которой μ'' можно считать постоянной; φ°, α — набег фазы и потери на малом уровне мощности при подмагничивающем поле 30 эрст, длине волны 10 см и комнатной температуре.

для сферического образца из монокристалла с кубической симметрией при наличии пластинчатой доменной структуры. Для того чтобы приблизиться к случаю, имеющему место в фазовращателе Реджиа—Спенсера, был проведен расчет, аналогичный расчету Артмана, для цилиндра, ось которого параллельна постоянному магнитному полю и кристаллогра-

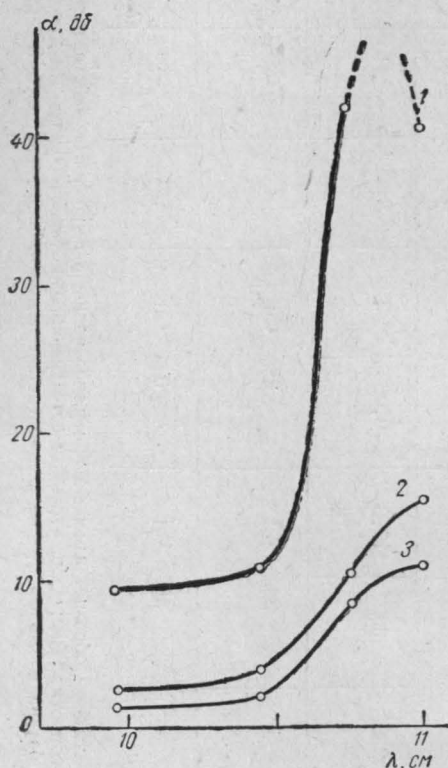


Рис. 4. Рост потерь с увеличением длины волны в образце P-26: 1—2 эрст, 6 квт; 2—30 эрст, 30 квт; 3—30 эрст, 6 квт

фической оси [110]. Рассматривались две равновероятные пластинчатые доменные структуры: а) границы доменов перпендикулярны оси [110], б) границы доменов параллельны оси [110].

Как и следовало ожидать, для продольно намагниченных цилиндров условия резонанса выполняются в более слабых полях, чем для сферы и захватывают область отрицательных внешних магнитных полей, когда поле и средняя намагниченность противоположны по направлению. Зависимость резонансных частот от поля при наличии доменной структуры нелинейная. При увеличении внешнего поля возможен как рост, так и уменьшение резонансной частоты в зависимости от вида доменной структуры и взаимной ориентации постоянного и высокоча-

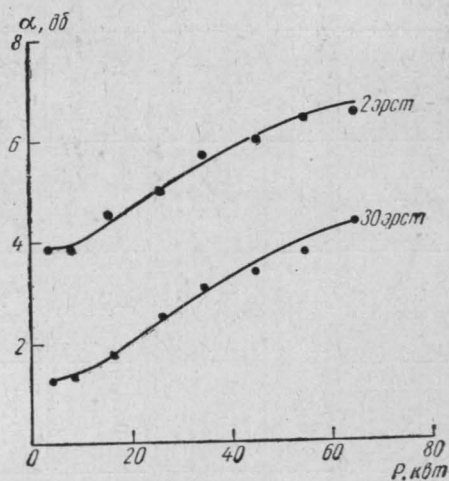


Рис. 5. Рост потерь в образце P-19 с увеличением мощности в полях $H=2$ эрст и $H=30$ эрст, длина волны 10,45 см

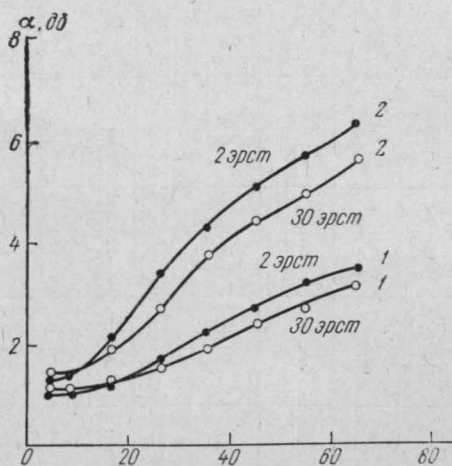


Рис. 6. Зависимость потерь от мощности для активных образцов 1 и 2 при различных магнитных полях и $\lambda=10,45$ см

стотного магнитных полей. По-видимому, этим объясняются результаты, полученные на образце Р-26 (см. рис. 4), для которого резонансная частота при $H=2$ эрст выше, чем при $H=30$ эрст.

На рис. 5 приведена зависимость потерь от мощности для Р-19 при разных H . Интенсивность нелинейных потерь для данного состава на длине волны 10,45 см практически не зависит от величины поля.

Кроме указанных пяти составов измерялись потери в образцах, близких по составу Р-15, но содержащие добавки Mn и Si и обладающие большей активностью на малом уровне мощности. Из полученных результатов (рис. 6) видно, что более активный феррит 2 имеет больший рост нелинейных потерь и ниже пороговую мощность, чем феррит 1. Для этих составов интенсивность нелинейных потерь в малых полях ($H=2$ эрст) больше, а пороговая мощность меньше, чем в более сильных полях ($H=30$ эрст).

Выводы

Нелинейные потери фазовращателя Реджиа—Спенсера так же, как его линейные свойства (набег фазы и потери на малом уровне мощности), существенно зависят от близости рабочей частоты к частоте ферромагнитного резонанса при наличии доменной структуры.

Для образцов, частота ферромагнитного резонанса которых далека от рабочей частоты, нелинейные явления в пределах использованных мощностей проявляются слабо (ферриты Р-4, Р-8).

На частотах, отличных от резонансных, интенсивность нелинейных потерь одинакова во всем интервале постоянных магнитных полей (феррит Р-19).

При подходе к частотам резонанса пороговые мощности уменьшаются (ферриты Р-15, Р-19), нелинейные потери возрастают. Эти явления особенно резко проявляются в области резонанса (феррит Р-26).

Указанные выводы согласуются с результатами измерений, проведенных на малых сферах магний—марганцевых ферритов на высоком уровне мощности при параллельной накачке на частоте, далекой от частоты естественного резонанса. Эти измерения показали, что для составов с малой намагниченностью и мелким зерном доменная структура не влияет на величину пороговых полей, тогда как на образцах с большой намагниченностью и крупным зерном наблюдается снижение порога в полях, меньших поля насыщения. В последнем случае доменная структура изменяет условия возбуждения спиновых волн. Хотя исследованные образцы магний—хромовой системы все имели малую намагниченность и мелкое зерно, наблюдавшееся вблизи резонанса уменьшение пороговой мощности и возрастание интенсивности нелинейных явлений выше порога может быть объяснено усилением влияния доменной структуры в условиях резонанса.

Уменьшение пороговой мощности при подходе к частоте резонанса может быть в то же время связано с увеличением магнитной высокочастотной проницаемости вблизи резонанса, в результате чего возрастает концентрация поля внутри феррита. Похожее снижение пороговой мощности наблюдалось Секиотисом и др. [1] при увеличении диаметра ферритового стержня.

Для выяснения истинного механизма изменения нелинейных явлений при подходе к ферромагнитному резонансу в ненасыщенном образце

предполагается провести исследование нелинейных явлений для тех же составов в условиях магнитостатического приближения.

Авторы выражают благодарность В. Н. Бокову за участие в проведенных измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sakiotis N. G., Chait H. N., Kales M. L. Trans. IRE, AP-4, 2, 111, 1956. Сб. «Ферриты в нелинейных сверхвысокочастотных устройствах». М., ИЛ, 1961.
2. Martin R. L. Jour. Appl. Phys. suppl., 30, No. 4, 159, 1959. Сб. «Ферриты в нелинейных сверхвысокочастотных устройствах». М., ИЛ, 1961.
3. Artman J. O. Proc. IRE, 44, No. 10, 1284, 1956.
4. Smit J., Beljers H. G. Philips Res. Rep., 10, 113—130, 1955.
5. Власов К. Б., Оноприенко Л. Г. ФММ, 5, вып. 1, 1963.

Поступила в редакцию
9. 11 1964 г.

Кафедра
радиотехники
