

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА И ФОРМЫ ОБРАЗЦА НА НИЖНЮЮ ЧАСТОТНУЮ ГРАНИЦУ ФЕРРИТОВЫХ ДАТЧИКОВ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ МОДУЛЯЦИИ ПОДМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ

В. Н. Боголюбов, М. А. Волков, В. Ф. Радченко

Москва, Калининград

В настоящее время в технике СВЧ все шире применяются сосредоточенные ферритовые элементы, обладающие узкой линией ферромагнитного резонанса (ФМР), в том числе в ферритовых датчиках-преобразователях (ФДП). ФДП в нашем случае представляет собой отрезок линии передачи СВЧ с помещенным в него ферритовым элементом*, вокруг которого намотана катушка. Датчик снабжается подмагничивающей системой и может быть использован при ферромагнитном резонансе в качестве смесителя, детектора, модулятора, датчика для измерения мощности, частоты и т. д.

ФДП на основе монокристаллов феррогранатов в настоящее время получили наибольшее распространение в сантиметровом диапазоне длин волн. Разработка и применение таких датчиков в миллиметровом диапазоне ограничивается в основном необходимостью создания больших подмагничивающих полей, что влечет за собой резкое увеличение габаритов и веса устройств. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем применения монокристаллов гексаферритов с достаточно узкой полосой ФМР. Разработанные в последнее время монокристаллы нескольких систем на основе феррита бария [1] имеют довольно узкую полосу ФМР (лучшие образцы 13—15 э) и поля анизотропии порядка 10—20 кэ. Последнее обстоятельство позволяет существенно снизить вес подмагничивающих систем и применять эти материалы в ряде резонансных СВЧ устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Что касается нижней частотной границы ФДП, то она обычно определяется требованием магнитного насыщения ферритового элемента, а также требованием достаточно малого уровня дополнительных пиков поглощения, вызванных неоднородными типами прецессии.

Первое из этих требований, как известно [2, 3], выполняется, если резонансная частота f_0 больше так называемой частоты отсечки $f_{от}$:

$$f_{от} = 2,8 N_z 4\pi M_s [Mгц], \quad (1)$$

* Чаще всего применяются монокристаллы железо-иттриевого граната (ЖМГ) или кальций-висмут-ванадиевого граната (КВВГ).

где N_z — размагничивающий фактор ферритового элемента в направлении внешнего поля, $N_z = \frac{1}{3}$ для шариков; $4\pi M_s$ — намагниченность насыщения, гс,

Второе требование для сферических элементов удовлетворяется при $f_0 > 2.8 \frac{8}{3} \pi M_s$, т. е. выше частот, при которых однородная прецессия совпадает с наиболее опасными высшими типами [2]. Однако в большинстве случаев это требование является слишком жестким, так как интенсивность возбуждения неоднородных типов прецессии зависит от степени неоднородности возбуждающего магнитного поля. Поскольку диаметр ферритового шарика и его расположение в линии передачи ФДП выбираются так, чтобы избежать влияния металлических поверхностей на условия его возбуждения, то степень однородности возбуждающего поля (поля падающей волны) оказывается достаточно высокой. Поэтому практически нижняя частотная граница для большинства режимов ФДП определяется условием магнитного насыщения ферритового элемента и с учетом поля анизотропии она будет равна для шариков из ЖИГ 2100—2200 Мгц [3], а для шариков из КВВГ $4\pi M_s = 600$ гс — около 700—800 Мгц.

Если ФДП используется в режиме гармонической модуляции подмагничивающего поля* [4], перечисленных условий недостаточно для определения нижней границы его частотного диапазона.

Специфика работы ФДП в указанном режиме заключается в том, что подмагничивающее поле H_0 модулируется с небольшой амплитудой H_m (порядка ширины полосы ФМР). Таким образом,

$$H(t) = H_0 + H_m \cos \Omega t. \quad (2)$$

Вследствие нелинейной зависимости индукции B ферритового элемента от внешнего поля H наличие модуляции приводит в общем случае к появлению спектра магнитной индукции, который можно представить в виде

$$B(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\Omega t + \varphi_n), \quad (3)$$

где B_n и φ_n — амплитуда и начальная фаза n -й составляющей спектра.

Очевидно, при заданном ферритовом элементе количество членов ряда (3) и их амплитуд зависят от постоянного поля

* Частота модуляции порядка 0,1—10 Мгц.

H_0 и от амплитуды модуляции H_m . Не рассматривая механизм процессов перемагничивания, вызванных модуляцией, можно считать, что характер спектра определяется видом статической кривой намагничивания ферритового элемента $B(H)$. Отсюда следует, что при малой (как в нашем случае) амплитуде модуляции максимальную интенсивность гармоник ($n \geq 2$) следует ожидать в области приближения к насыщению кривой $B(H)$, т. е. там, где она имеет наибольшую кривизну. С увеличением поля H_0 амплитуды гармоник должны уменьшаться и в области насыщения стремиться к нулю.

Из всего спектра (3) в качестве примера рассмотрим только вторую гармонику, точнее ее амплитуду $B_2(H_0, H_m)$, поскольку она наводит в катушке ФДП паразитный сигнал $U_{2n}(H_0, U_m)^*$, пропорциональный $B_2(H_0, H_m)$. При использовании ФДП для индикации и измерения СВЧ мощности [4] это может привести к недопустимому снижению его чувствительности.

Указанные выше предположения подтверждаются экспериментальными зависимостями $U_{2n}(H_0)$ для сферического элемента (рис. 1). Из рисунка видно, что $U_{2n}(H_0)$ имеет резкий максимум при $H_0 \approx \frac{1}{3} 4\pi M_s$, т. е. в области приближения к насыщению, а при дальнейшем увеличении H_0 амплитуда U_{2n} падает и стремится к постоянному уровню (прямое прохождение второй гармоники модулятора). Левые ветви кривых не изображены на рисунке, так как в этой области зависимость $U_{2n}(H_0)$ неоднозначна из-за необратимых процессов перемагничивания.

Характерно, что с уменьшением амплитуды модуляции максимум $U_{2n}(H_0)$ также уменьшается, причем «ширина» кривой становится меньше. Такое поведение кривой $U_{2n}(H_0)$ с изменением U_m можно объяснить исходя из общих принципов воздействия гармонического колебания на нелинейный момент.

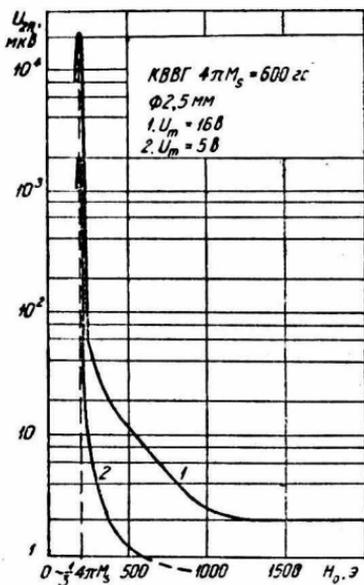


Рис. 1 Зависимость $U_{2n}(H_0)$ для ферритовых элементов с различной намагниченностью.

* $U_m = kH_m$ — амплитуда модулирующего напряжения на катушке ФДП.

Нетрудно видеть, что поведение паразитного сигнала в низкочастотной части рабочего диапазона ФДП существенно нарушает его нормальную работу, тем самым ограничивая его частотный диапазон снизу. Оценить это ограничение можно следующим образом. Коэффициент передачи датчика в рассматриваемом режиме $k_{эф}$ определяется как

$$k_{эф} = \frac{U_{2c} + U_{2n}}{P} = k_0 \left(1 + \frac{U_{2n}}{U_{2c}} \right), \quad (4)$$

где U_{2c} , U_{2n} — амплитуда полезного и паразитного сигналов на выходе ФДП;

P — падающая мощность СВЧ;

k_0 — коэффициент передачи при $\frac{U_{2n}}{U_{2c}} = 0$.

При больших значениях $f_0 \approx 2,8 H_0$ величина U_{2n} постоянна (рис. 1), а k_0 мало зависит от частоты. С приближением частоты f_0 к частоте отсечки $f_{от}$ и при фиксированном значении P величина U_{2n} начинает расти и становится соизмеримой с амплитудой полезного сигнала U_{2c} , а при дальнейшем снижении f_0 — превышает его.

Задаваясь необходимым превышением полезного сигнала над паразитом, т. е. $1/\alpha = \frac{U_{2c}}{U_{2n}}$, мы тем самым однозначно определяем нижнюю граничную частоту ФДП при заданном уровне падающей мощности P . С уменьшением уровня P нижняя частотная граница, очевидно, будет смещаться в сторону более высоких частот до тех пор, пока величина U_{2n} не достигнет стационарного уровня. В этот момент $1/\alpha = \frac{U_{2c} \min}{U_{2n}}$, т. е. достигается предельная чувствительность датчика (при заданном α). Если теперь задаться допустимой величиной падения чувствительности (например, в 2 раза, или на 3 дБ), то таким образом мы однозначно определим нижнюю граничную частоту ФДП $f_{он} \approx 2,8 H_0$ по графику зависимости $U_{2n} = f(H_0)$ в тот момент, когда U_{2n} возрастает в 2 раза по сравнению со стационарным уровнем. Смещение нижней граничной частоты ФДП в режиме модуляции подмагничивающего поля относительно частоты отсечки или относительную «ширину» кривой $U_{2n}(H_0)$ на указанном уровне можно оценить с помощью коэффициента

$$\beta = \frac{f_{он}}{f_{от}} = \frac{H_{он}}{N_z 4\pi M_s}. \quad (5)$$

Экспериментальное определение граничной величины $H_{он}$ позволило выявить зависимость $H_{он}$ и β от амплитуды моду-

ляции, намагниченности насыщения $4\pi M_s$ и диаметра ферритовых шариков. Исследование проводилось при частоте модуляции 5 Мгц с ферритовыми элементами, изготовленными из монокристаллов ЖИГ и КВВГ. Ферритовые образцы, ориентированные по оси легкого намагничивания, имели одинаковые катушки. Результаты эксперимента сведены в табл. 1, 2, 3.

Величина $H_{он}$ растет с увеличением намагниченности насыщения материала, поскольку максимум U_{2n} , как уже отмечалось ранее, для сферических элементов наблюдается при $H_0 \approx \frac{1}{3} 4\pi M_s$. В то же время коэффициент β (см. табл. 1) уменьшается с ростом намагниченности насыщения*.

Это объясняется тем, что с увеличением $4\pi M_s$ пропорционально расширяется область приближения к насыщению кривой намагничивания, что при постоянной амплитуде модуляции приводит к относительному сужению кривой $U_{2n}(H_0)$ (о чем говорилось выше), в результате чего коэффициент β падает.

Таблица 1

| Материал | ЖИГ | | КВВГ |
|----------------|------|------|------|
| $4\pi M_s, гс$ | 1800 | 600 | 500 |
| $H_{он}, э$ | 1000 | 830 | 650 |
| β | 1,7 | 4,15 | 3,9 |

Таблица 2

| Диаметр образца, мм | 3 | 2,5 | 1,8 | 1,03 |
|---------------------|------|------|------|------|
| $H_{он}, э$ | 1270 | 830 | 450 | 250 |
| β | 6,35 | 4,15 | 2,25 | 1,25 |

Таким образом, при стремлении улучшить чувствительность ФДП в низкочастотной части СВЧ диапазона за счет увеличения диаметра образца необходимо учитывать и сдвиг его нижней рабочей частоты.

* Уменьшение коэффициента β для материала $4\pi M_s = 500 гс$ по сравнению с материалом $4\pi M_s = 600 гс$ объясняется меньшим диаметром первого образца.

| | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|
| $U_m, \text{ в}$ | 5 | 15 | 16 | 17 | 20 |
| $H_{\text{он}}, \text{ э}$ | 335 | 815 | 830 | 870 | 1010 |
| β | 1,67 | 4,07 | 4,15 | 4,35 | 5,05 |

На рис. 2 изображена зависимость $U_{2n}(H_0)$ для одного образца из КВВГ при разных амплитудах модуляции. Смещение

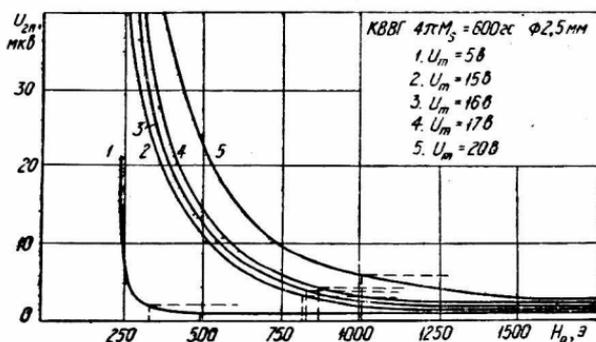


Рис. 2. Зависимость $U_{2n}(H_0)$ при различных амплитудах модуляции.

кривых подтверждает наше предположение о том, что с ростом амплитуды U_m «ширина» кривой $U_{2n}(H_0)$ увеличивается, т. е. величина β растет (см. табл. 3).

Приведенные зависимости представляют практический интерес, поскольку с их помощью можно судить о нижней частотной границе датчика в данном режиме работы. Учитывая, что при изменении ширины полосы ФМР образцов от 0,5 до 1,7 э (а это охватывает наиболее часто применяемые материалы) оптимальная амплитуда модуляции [4] меняется слабо — в нашем случае 15—18 в, — то относительное смещение нижней рабочей частоты составляет $\beta = 4\text{—}4,5 \times (\phi = 2,5 \text{ мм}, 4\pi M_s = 600 \text{ гс})$.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. За счет спецификации работы ФДП в режиме модуляции подмагничивающего поля нижняя граница его частотного диапазона превышает частоту отсечки, в 1,5—4,5 раза для исследованных случаев.

2. Использование материалов с меньшей намагниченностью насыщения с целью снижения $f_{\text{он}}$ не дает существенного выиг-

рыша. Так, если ЖИГ $4\pi M_s = 1800$ гс (диаметр шарика 2,06 мм), граничная частота $f_{\text{он}} = (1,7 - 2)$, $f_{\text{от}} = (2800 - 3300)$ Мгц, то для КВВГ с $4\pi M_s = 600$ гс (диаметр шарика 2,5 мм) граничная частота $f_{\text{он}} = (4 - 4,5)$, $f_{\text{от}} = (2200 - 2500)$ Мгц.

3. Ширина линии ФМР ферритовых элементов мало влияет на нижнюю граничную частоту датчиков при частоте модуляции, соизмеримой или превышающей частоту релаксации ферритового элемента.

4. С ростом диаметра ферритового шарика нижняя граничная частота ФДП увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Медведев, Б. П. Поллак, В. П. Чепарин, Ю. А. Свешников, А. Е. Ханамиров. Разработка, исследование и применение монокристаллов гексаферритов — новых СВЧ материалов. Доклады научно-технических конференций по итогам НИР за 1968—69 гг. Секция радиотехническая, подсекция ферритовой СВЧ радиофизики, МЭИ, М., 1969.

2. В. Г. Калина, С. В. Беляков. К применению сосредоточенных ферритовых элементов в СВЧ технике. ВРЭ, серия 1, 1965, № 10.

3. В. В. Нелепец. Высокооборотные перестраиваемые резонаторы из монокристаллов ферромагнитов для фильтров СВЧ. «Обзоры по электронной технике, серия ферритовая техника», вып. 17. Ин-т «Электроника», 1969.

4. Л. К. Михайловский, В. Ф. Балаков, В. Ф. Радченко. Малоинерционный частотно-избирательный датчик мощности для СВЧ пикового милливаттметра. ВРЭ, сер. РИТ, вып. 6, 1968.