

МОДИФИКАЦИЯ ВОЛНОВОДНОГО У-ЦИРКУЛЯТОРА  
ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Известно, что электрические параметры развязывающих ферритовых приборов миллиметрового диапазона волн ограничены малой намагниченностью насыщения существующих ферритовых материалов [1]. Одним из путей повышения «активности» ферритового материала в данном диапазоне является использование явления магнитодинамического резонанса в ферритовом образце [2]. Хотя использование указанного явления и позволяет увеличить вентиляльное отношение развязывающих приборов, однако рабочая полоса частот их остается сравнительно узкой (1—2 %). Частичное введение ферритового цилиндра в одну из широких стенок волноводного сочленения [3] дает возможность несколько расширить рабочую полосу частот циркулятора, однако конструкция прибора существенно усложняется.

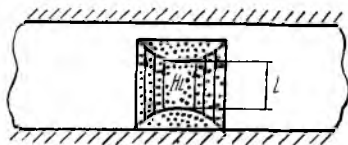


Рис. 1

Создание малозумящих приемников, радиометрических и передающих систем миллиметрового диапазона требует разработки развязывающих приборов, имеющих не только широкую рабочую полосу частот, но и малые электромагнитные потери, причем улучшение электрических параметров не должно приводить к существенному усложнению конструкции этих приборов.

Рассмотрим простую схему построения волноводного У-циркулятора, позволяющую существенно расширить рабочую полосу частот и уменьшить электромагнитные потери прибора. Улучшение электрических параметров достигается обеспечением более активного взаимодействия СВЧ-сигнала с областью ферритового образца, имеющей однородную поперечную намагниченность.

Одним из условий оптимальной работы У-циркулятора является реализация однородности внутреннего магнитного поля. Практически это условие не выполняется, так как ферритовый образец имеет, как правило, неэллипсоидальную форму и находится в однородном магнитном поле. На рис. 1 дано схематическое изображение постоянного магнитного поля внутри ферритового цилиндра, находящегося во внешнем однородном магнитном поле. Известно, что длина  $l$  участка ферритового цилиндра, имеющего однородную поперечную намагниченность, зависит от отношения длины  $L$  к радиусу  $r$  ферритового цилиндра [4]. При увеличении отношения  $L/r$  объем ферритового цилиндра с однородной поперечной намагниченностью возрастает, и тем самым повышается «активность» ферритового образца. С другой стороны,  $L$ ,  $r$  определяют собственные резонансные частоты ферритового цилиндра [5]:

$$f = \frac{\left[ \chi_{mn} + \left( \frac{r l \pi}{L} \right)^2 \right]^{1/2}}{2\pi \varepsilon^{1/2} r} c.$$

$\chi_{mn}$  — корень функции Бесселя или ее производной;  $m$ ,  $n$ ,  $l$  — индекс типа колебаний;  $r$  — радиус ферритового цилиндра;  $L$  — длина ферритового цилиндра;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость феррита;  $c$  — скорость света.

При различных граничных условиях на торцах ферритового цилиндра (когда феррит контактирует с одной из широких стенок волноводного сочленения) рабочими типами колебаний в  $H$ -плоскостных циркуляторах являются несимметричные колебания  $HE_{11\delta}$ , где  $\delta = 0,5; 1,5; 2,5 \dots$ . Для  $Y$ -циркулятора длинные ферритовые цилиндры более перспективны. В связи с этим, по-видимому, целесообразно использовать колебания с наибольшим номером  $\delta$ . Из выражения для определения резонансных частот следует, что при колебании  $HE_{111,5}$  оптимальное  $\delta$  должно быть более 3,06, а при колебании  $HE_{112,5}$  — более 5,14. В противном случае в ферритовом цилиндре возбуждается симметричный тип колебаний  $EH_{010}$ , имеющий по сравнению с указанными колебаниями низкую резонансную частоту и являющийся для  $Y$ -циркулятора паразитным. Колебание  $HE_{112,5}$  использовать нецелесообразно, так как высота ферритового цилиндра в этом случае может превосходить высоту волновода. Очевидно, что для стандартных сечений волноводов наиболее пригоден ферритовый цилиндр с отношением  $L/r > 3,06$ .

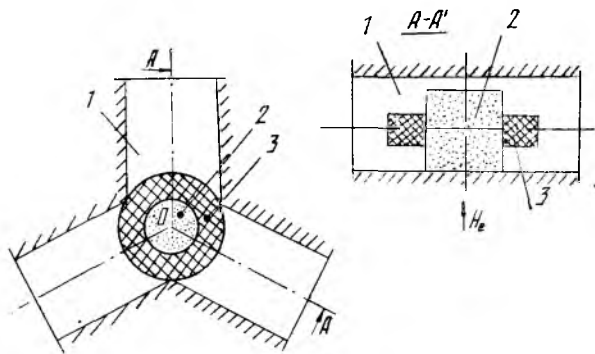


Рис. 2

Результаты расчета [4] показывают, что если  $L/r \geq 3,06$ , то длина участка ферритового цилиндра, имеющего однородную поперечную намагниченность, составляет более 0,3 длины цилиндра. Локализацию возбуждения ферритового цилиндра, на указанном участке можно повысить взаимодействием СВЧ-сигнала с ферритом и тем самым улучшить параметры циркулятора. Конструктивно  $Y$ -циркулятор (рис. 2) представляет собой  $H$ -плоскостное трехплечее 120-градусное сочленение волноводных линий передачи. В центре сочленения установлен поперечно намагниченный ферритовый цилиндр, на который соосно надето диэлектрическое кольцо, расположенное на одинаковом расстоянии от торцов феррита. Сечение волновода составляет  $2,4 \times 1,2$  мм, марка феррита 1СЧ-4. Ориентировочно размеры ферритового цилиндра для заданного диапазона частот рассчитываются по формуле для определения собственных резонансных частот цилиндра, причем отношение его длины к радиусу выбирается из соотношения  $L/r > 3,06$ . Уточнение размеров производилось экспериментально. Для центральной частоты рабочего диапазона диаметр ферритового цилиндра составляет  $d = 0,63^{+0,012}$  мм, высота  $h = 1,00^{+0,012}$  мм. Толщина диэлектрического кольца выбирается в соответствии с указанными рекомендациями и составляет 0,33 мм. Внутренний диаметр кольца равен диаметру ферритового цилиндра, внешний — диаметру окружности, вписанной в волноводное сочленение. Включение диэлектрического кольца в средней части ферритового цилиндра (рис. 2) позволяет перераспределить поток мощности распространяющейся волны между областями с неоднородной и однородной поперечной намагниченностью ферритового цилиндра и тем самым повышает эффективность взаимодействия феррита с распространяющейся волной.

На рис. 3 представлены электрические параметры разработанных циркуляторов. Расширение полосы частот (пунктирная линия) при некотором увеличении прямых потерь достигнуто в результате увеличения на 0,15 мм толщины диэлектрического кольца. Циркулятор в полосе частот 1,5 % имеет прямые потери не более 0,15 дБ (уровень прямых потерь определяется путем измерения суммарных потерь четырех циркуляторов и вычисления среднего значения). Вентильное отношение составляет более 200 (максимальное вентильное отношение 250). Циркулятор в полосе частот 4 % имеет вентильное отношение 66  $\left(\frac{20}{0,3}\right)$  дБ. Циркулятор с полосой частот 8 % имеет

вентильное отношение, равное 15, причем в более узкой полосе частот 6 % вентильное отношение составляет 40. Уровень коэффициента стоячей волны (КСТ) для всех разработанных циркуляторов соответствует уровню развязки. Приведенные электрические параметры сохраняются в рабочем интервале температур  $-50 \div +85$  °С. При температуре  $+120$  °С изменение центральной частоты циркулятора составляет 300 МГц, уровень прямых потерь практически не изменяется.

Таким образом, предложенная схема построения волноводных Y-циркуляторов позволяет без существенного усложнения конструкции создавать широкополосные приборы с малым уровнем электромагнитных потерь. Кроме того, данная схема благодаря малым прямым потерям перспективна при создании многоплечных каскадируемых циркуляторов, а также даст возможность создавать циркуляторы с улучшенными электрическими параметрами в более коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

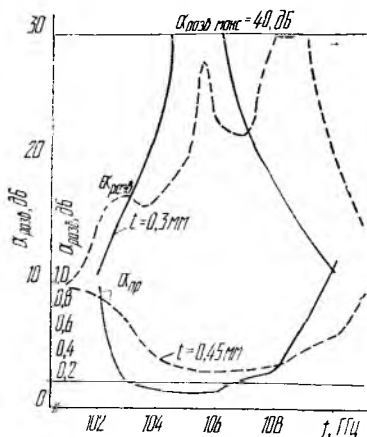


Рис. 3

Список литературы: 1. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферримагнетики.— М.: Мир, 1965.— 469 с. 2. Корнеев И. В. Вентильфланцы резонансного типа на основе поликристаллических гексаферритов. // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.— 1982.— №4.— С. 59—60. 3. Okean H. C., Steffek L. J. Low-loss, 3-mm junction circulator // Microwave J.— 1974.— 17, N 4.— P. 58—62. 4. Joseph R. I., Schlömann E. Demagnetizing Field in Nonellipsoidal Bodies // J. of Applied Physics.— 1965.— 36, N 5.— P. 1579. 4. Кацеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика.— М.: Наука, 1966.— 237 с.

Поступила в редколлегию 14.04.86

УДК 621.385

А. Г. ЛИТВИНОВ, П. В. НЕШМОНИН, В. К. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук  
**К ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА ГРЕБЕНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

Одной из наиболее распространенных в электронике СВЧ является гребенчатая замедляющая система. Анализ ее проводится, как правило, методом «сшивания полей» на границах частичных областей, который позволяет получать результаты с любой точностью. Последняя зависит от числа учитываемых членов ряда. Однако при таких расчетах необходимо сначала задавать геометрические размеры, затем производить расчет характеристик и сравнивать их с требуемой. Чтобы получить хорошее совпадение этих