

А. Б. КОНДРАШИХИН, канд. техн. наук, И. Ю. ЩЕРБАКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ У-ЦИРКУЛЯТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Интенсивное развитие техники миллиметровых и субмиллиметровых волн, расширение номенклатуры линий передачи, элементной базы на их основе и технологических возможностей производства ставят в разряд первоочередных проблему перехода к интегральной технологии изготовления пассивных, невзаимных и активных узлов, а также законченных блоков СВЧ трактов различного функционального назначения. С этой точки зрения перспективной базовой линией является полосковый металлодиэлектрический волновод (ПМДВ), обладающий наряду с конструктивно-технологическими преимуществами, также поляризационной устойчивостью основных типов колебаний [3; 4]. При этом из невзаимных устройств наиболее универсальным следует признать У-циркулятор, так как остальные узлы (невзаимные фазовращатели, вентили) могут быть построены на его основе достаточно простыми методами [2], что обуславливает актуальность поиска нетрадиционных путей расчета и оптимизации его параметров.

У-циркулятор на базе ПМДВ (рис. 1) содержит магнитную систему и две плоскопараллельные металлические пластины (на рисунке дан вид циркулятора без верхней пластины), между которыми размещено У-разветвление прямоугольных диэлектрических стержней с цилиндрическим ферритом в центре разветвления, а оставшееся свободное пространство между пластинами занимает диэлектрическая подложка.

У основного типа волны в ПМДВ — E_{y00}^{00} — отсутствуют вариации поля между пластинами, а дисперсионное уравнение имеет вид [3]

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{\pi \sqrt{\epsilon_b} \cos \theta x}{\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \theta x - \epsilon_n / \epsilon_b}}{\cos \theta x}}, \quad (1)$$

где θx — дисперсионный параметр (угол парциальной волны); ϵ_b и ϵ_n — относительные диэлектрические проницаемости материалов волновода и подложки соответственно.

В цилиндрической системе координат, связанной с центром феррита, распределение поля в поперечной плоскости ПМДВ в пределах волноведущего стержня и подложки может быть описано соответственно косинусоидальной и экспоненциальной функциями [3]:

$$\dot{E}_{y1} = \dot{E}_{ym} \cos\left(\frac{\pi \cos \theta x}{2\xi\psi \sqrt{1 - \epsilon_n/\epsilon_b}} \varphi\right); \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{y2} = \dot{E}_{ym} \cos\left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\sin^2 \theta x - \epsilon_n/\epsilon_b}}{\cos \theta x}\right) \times \\ \times \exp\left[-\frac{\pi \sqrt{\sin^2 \theta x - \epsilon_n/\epsilon_b}}{2\xi\psi \sqrt{1 - \epsilon_n/\epsilon_b}} (\varphi - \psi)\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где E_{ym} — напряженность электрического поля волны E_y^{00} в центре ПМДВ ($\varphi = 0$); $\psi = \operatorname{arcsin} \frac{a}{2R}$; $\xi = \frac{\lambda}{\lambda_{\min}}$ — относительная длина волны; λ_{\min} — минимальная длина волны рабочего диапазона, соответствующая отсечке высших мод E_y^{01} и E_y^{10} .

Соотношения (2) и (3) содержат необходимую информацию для инженерного расчета конструктивных и электрических характеристик циркулятора по известной методике [1]. Однако существенное отличие структуры поля ПМДВ от косинусидального поля феррита приводит к необходимости учета высших пространственных гармоник, помимо первой, что делает известную процедуру крайне громоздкой и непригодной для практических расчетов. Для достижения более высоких амплитудно-частотных характеристик проектируемых У-циркуляторов, вероятно, целесообразным будет провести дополнительное согласование полей феррита и ПМДВ по критерию максимального совпадения напряженностей полей по окружности феррита. С учетом соотношений (2) и (3), а также известного распределения поля в феррите [1] данный критерий может быть записан в следующем виде:

$$\int_0^\psi E_{y1} d\varphi + \int_\psi^{\pi/3} E_{y2} d\varphi - \int_0^{\pi/3} E_{ym} \cos\left(\frac{3}{2} \varphi\right) d\varphi = 0. \quad (4)$$

Критерий (4) является приближенным, так как не учитывает влияния несинфазности впадины феррита из-за его кривизны и скачка эффективных значений относительных диэлектрических и магнитных проницаемостей между ферритом и ПМДВ.

Расчет по формуле (4) показывает, что величина a/R не зависит от соотношения ϵ_n и ϵ_b , а определяется только значением ξ (рис. 2).

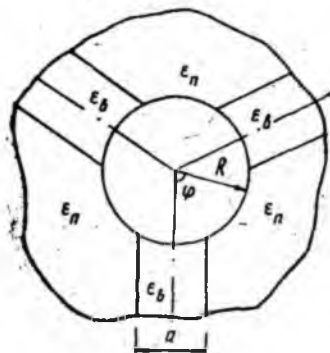


Рис. 1

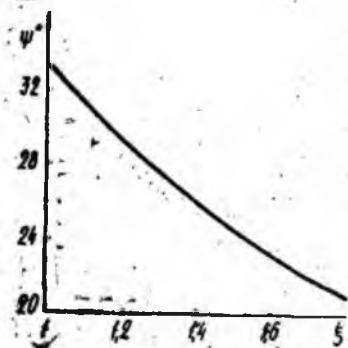


Рис. 2

Следует отметить, что увеличение параметра ξ в практических расчетах нецелесообразно, так как при этом плотность потока мощности в пределах волноведущего стержня ПМДВ падает, что ведет к ухудшению связи с волноводом. Известно также, что широкополосность циркуляторов на открытых металлодиэлектрических линиях передачи, где обеспечиваются приемлемые потери и развязка, не превышает 10 % [5]. Поэтому оптимальным будет выбор величины $\xi' = 1,06 - 1,15$, где $\lambda_{cp} = \xi' \lambda_{min}$ — средняя длина волны рабочего диапазона.

Учитывая, что значения ϵ_b и ϵ_n определяются конструктивными, технологическими и другими соображениями, а с величиной $\Delta\epsilon = \epsilon_b - \epsilon_n$ непосредственно связан размер волновода в заданном частотном диапазоне [3], при известных параметрах феррита (диаметре и величине подмагничивания) и рабочем диапазоне длин волн оптимизация характеристик У-циркулятора может быть достигнута вариациями величин $\Delta\epsilon$ либо a в пределах одномодового диапазона работы ПМДВ.

Дополнительного увеличения развязки и уменьшения прямых потерь устройства можно добиться изменением граничных условий на поверхности феррита, если контакт его с волноводом осуществляется в одной точке, а не по дуге окружности, что соответствует случаю $\xi \rightarrow \infty$ и приближает поле ПМДВ к косинусоидальному.

Был осуществлен комплекс экспериментальных исследований У-циркуляторов на феррите марки 1СЧ-12 и ПМДВ из композиционных диэлектриков типа СТ и парафиновой подложке ($\epsilon_n = 2,23$) в восьмимиллиметровом диапазоне. Исследованные устройства обладали следующими характеристиками: прямые потери — менее 0,5 дБ; развязка — на уровне 18 дБ; КСВН по входу — не превышала 1,35; рабочий диапазон частот — не менее 10 % от f_n . Средняя длина волны варьировалась в зависимости от диаметра феррита и величины подмагничивания.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанные циркуляторы по своим характеристикам не уступают лучшим образцам [5] и могут быть использованы в интегральных схемах миллиметрового диапазона.

Список литературы: 1. *Вамберский М. В., Қазанцев В. И.* Инженерный расчет волноводных H -плоскостных У-циркуляторов // Радиотехника. 1968. № 10. С. 15—22. 2. *Разработка пассивных элементов КВЧ диапазона на полосковом металлодиэлектрическом волноводе / В. В. Саламатин, А. Б. Кондрашихин, А. В. Мельников, А. Ю. Сидоров* // Функциональные электродинамические системы и элементы. Саратов, Изд-во Саратов ун-та. 1988. С. 54—59. 3. *Расчет параметров металлодиэлектрических волноводов / В. В. Саламатин, А. В. Мельников, А. Б. Кондрашихин, И. В. Кудрявченко* // Приборостроение. 1988. Вып. 40. С. 32—37. 4. *О деполаризации волн в прямоугольных диэлектрических волноводах / В. В. Саламатин, А. Б. Кондрашихин*. К., 1986. 23 с. Деп. в УкрНИИТИ. 27.09.86. № 2312. 5. *Stern P. R. A., Babbit R. W.* Dielectric waveguide circulator // Int. J. Infrared and millimeter waves. 1982. N 1. P. 11—18.

Поступила в редколлегию 24.11.89