

УДК 621.372.832.8

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ФЕРРИТОВЫЕ УСТРОЙСТВА

A. A. Костенко, Г. И. Хлопов

Рассмотрены основные особенности разработки квазиоптических ферритовых устройств на эффекте Фарадея. Показано, что потери, обусловленные преобразованием поля квазиоптического волновода, можно значительно уменьшить в случае расположения плоскопараллельного ферритового элемента нормально оси волновода. Рассмотрены варианты построения ферритового элемента в виде многослойной структуры, позволяющей добиться полного согласования в квазиоптическом тракте.

При создании невзаимных квазиоптических устройств миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СУБММ) диапазонов волн широко используется эффект Фарадея в продольно намагниченном ферритовом образце [1–4]. В первую очередь это связано с тем, что в отличие от приборов, основанных на других физических принципах, устройства на эффекте Фарадея требуют сравнительно малых полей подмагничивания, что особенно важно в ММ и СУБММ диапазонах, где разработка активных ферритовых материалов представляет собой достаточно сложную техническую задачу. Кроме того, использование различных комбинаций фарадеевского ротора вектора электрического поля и поляризационного разделителя в виде разветвления линии передачи с мелкопериодной металлической решеткой в диагональном сечении позволяет реализовать любое ферритовое устройство в квазиоптическом исполнении (рис. 1). В частности, при использовании ротора, который обеспечивает поворот вектора электрического поля на угол $\alpha = 45^\circ$, возможно построение невзаимных циркулятора (рис. 1а) и вентиля (рис. 1б), а в случае $\alpha = 90^\circ$ — взаимных коммутатора (рис. 1в) и выключателя (рис. 1г). На рис. 1 цифрами обозначены плечи устройств и показана ориентация вектора электрического поля со стороны плеча 1, а также введены следующие сокращения: ФЭ — ферритовый элемент, ПР — поляризационный разделитель, СН — согласованная нагрузка, МС — магнитная система.

Потери СВЧ энергии в подобных устройствах включают в себя затухание в линии передачи, ПР и ФЭ, которые в свою очередь определяются диссипативным затуханием в феррите, потерями преобразования, обусловленными трансформацией поля рабочего типа колебаний в высшие, а также потерями рассогласования за счет отражений от ФЭ. Погонное затухание в квазиоптическом волноводе (КВ) при большом поперечном размере $k_0 a \gg 1$ ($k_0 = 2\pi/\lambda_0$, a — радиус линии передачи) может быть весьма низким и, в частности, для сверхразмерного волновода (СРВ) круглого сечения с волной H_{11} в коротковолновой части ММ диапазона не превышает 0,1 дБ/м [5]. ПР на основе металлической решетки обладает достаточно малыми потерями (0,3–0,5 дБ) [6], что также относится к диссипативным потерям в материале ФЭ, которые для иттриевых ферритов (марки 10СЧ6, 10СЧ6Б) не превышают 0,1 дБ/мм в ММ диапазоне волн [7]. В то же время потери в ФЭ на преобразование поля КВ в высшие типы колебаний и рассогласование за счет отражений могут иметь значительную величину и зависят, в свою очередь, от электродинамических параметров системы, совершенствование которой является основным резервом для улучшения характеристик устройств в целом.

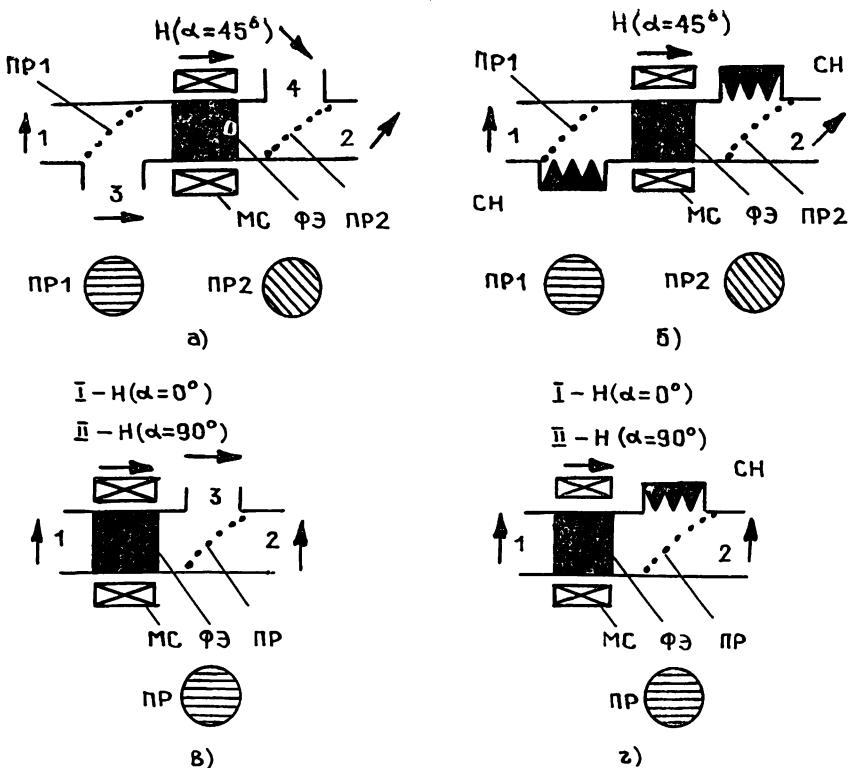


Рис. 1.

1. ПОТЕРИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ПРОДОЛЬНО НАМАГНИЧЕННЫМ ФЕРРИТОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Потери преобразования поля КВ связаны с трансформацией поля рабочей волны E_0 в результате геометрооптических искажений (смещения оси, наклона фазового фронта и т. д.), а также вследствие спектральных искажений, обусловленных зависимостью коэффициентов Френеля от угла падения парциальной плоской волны в пространственно-частотном спектре поля КВ [8].

При $k_0a \gg 1$ потери преобразования $\eta_{\text{пр}}$ можно вычислить в виде [9]

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{\left| \int_{S_0} ds E_0 E \right|^2}{\int_{S_0} ds |E_0|^2 \int_{S_0} ds |E|^2}, \quad (1)$$

где интегрирование ведется по поперечному сечению линии передачи S_0 , а E — трансформированное поле. Физически очевидно, что в рассматриваемом случае радикальный путь уменьшения потерь — применение однородной по поперечному сечению структуры ФЭ. При этом важно обеспечить не только однородность магнитных и диэлектрических свойств материала, но также высокую степень плоскопараллельности рабочих граней образца и его нормальное расположение относительно оси волновода. Оценки потерь преобразования, обусловленных наклоном плоскопараллельного ферритового образца, а также непараллельностью его граней, показывают, что для значений параметров ферритовых образцов, обычно реализуемых на практике в ММ диапазоне [10], потери, вызванные наклоном, быстро возрастают при $\Psi > 5^\circ$, а при $\Psi = 10^\circ$ уже составляют 0,3 дБ (Ψ — угол наклона плоскопараллельного ферритового образца относительно оси волнового пучка).

Еще в большей степени на потери преобразования влияет непараллельность рабочих граней образца. Например, если ограничить потери величиной 0,1 дБ, то непараллельность не должна превышать 5—10 угл. мин, что требует прецизионной обработки ФЭ.

Что касается спектральных искажений пучка за счет зависимости коэффициентов Френеля от угла падения парциальной плоской волны на границу раздела сред, то при $k_0a \gg 1$ угловой спектр поля КВ заключен в узком интервале углов, в пределах которого коэффициенты Френеля являются медленно меняющимися функциями, причем, в первом приближении потери, вызванные этими искажениями, при нормальном падении отсутствуют [11].

Тензорный характер магнитной проницаемости продольно намагниченной ферритовой среды качественно не меняет описанных выше закономерностей, а дополнительно приводит к характерным искажениям углового спектра поля КВ за счет отличия фазовых скоростей поляризованных по кругу волн противоположного знака. Как показано в работе [12], потери, обусловленные гиротропными свойствами среды, пренебрежимо малы ($\leq 0,1$ дБ), если толщина l ферритового элемента не превышает величины $(l/\lambda_0)\gamma_e \leq 20$, что соответствует реальной геометрии устройства в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [13].

2. СОГЛАСОВАНИЕ ФЕРРИТОВОГО ЭЛЕМЕНТА В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ ТРАКТЕ

Важным этапом при разработке невзаимных квазиоптических устройств является согласование ФЭ в квазиоптическом тракте. Для взаимных устройств, у которых $\alpha = 90^\circ$, разность фаз этих компонент кратна π и согласование ФЭ может быть осуществлено традиционными для оптики методами, так как условие согласования для обеих компонент идентично и соответствует случаю изотропного диэлектрического слоя [14].

В то же время для невзаимных устройств при $\alpha = 45^\circ$ разность фаз ортогонально поляризованных круговых компонент кратна $\pi/2$, в связи с чем согласование по одной из компонент приводит к максимальным отражениям по другой. Подбирая оптимальные соотношения между коэффициентами отражения каждой из компонент с помощью согласующих покрытий и ФЭ специально подобранный толщины [1–4], можно добиться компромиссного решения, когда результирующие потери составляют 1—2 дБ. Однако для получения максимально достижимых параметров, и в первую очередь в части развязки плечей и вентильного отношения, необходимо обеспечить полное отсутствие отражений одновременно для двух ортогональных компонент поля с круговой поляризацией.

Нами был предложен метод согласования гиротропных сред [10], основанный на использовании многослойных ферритовых структур в виде резонаторов Фабри—Перо, независимо настраиваемых для каждой из ортогонально поляризованных компонент поля. Как было отмечено в предыдущем разделе, исследования подобных систем можно проводить в приближении плоской волны, что также подтверждается экспериментально [10, 13].

В простейшем случае рассматриваемая система представляет собой пару идентичных ферритовых слоев толщиной l_1 и расстоянием между слоями l_2 (рис. 2а). Анализ показывает, что для подобной двухслойной структуры условие согласования сводится к системе уравнений

$$\gamma_z^{\pm} l_1 = m\pi; \quad (2)$$

$$2\gamma_z^{\mp} l_1 + k_0 l_2 = n\pi \quad (m, n = 1, 2, \dots), \quad (3)$$

где $\gamma_z^{\pm} = k_0 \gamma_e (\mu \mp \mu_a)$ — постоянные распространения в продольно намагниченном феррите, μ , μ_a — компоненты тензора магнитной проница-

емости [15]. Приведенные уравнения физически соответствуют случаю, когда для одной из круговых компонент поля каждый из слоев имеет полуволновую толщину l_1 (2), а для ортогональной — согласование обеспечивается подбором расстояния между слоями l_2 согласно (3). Коэффициенты прохождения для обеих круговых компонент поля и линейнополяризованной волны были рассчитаны и экспериментально исследованы в диапазоне частот 140 ГГц, а полученные результаты представлены на рис. 3, где гладкие кривые соответствуют расчетным зависимостям (кривые 1, 2 — для волн с круговой поляризацией правого и левого направления вращения соответственно, кривая 3 — для линейнополяризованной волны). При этом использовались два идентичных плоскопараллельных диска из феррита марки 10СЧ6, каждый из которых был согласован подбором толщины согласно условию (2) для волны с круговой поляризацией правого направления так, что потери для данной компоненты равняются 0,2—0,3 дБ и не зависят от расстояния между дисками. В то же время для волны левого направления коэффициент прохождения в зависимости от расстояния между дисками осциллирует с периодом, равным половине длины в свободном пространстве, и в точках, где выполняется условие (3), принимает свое максимальное значение, соответствующее потерям 0,2—0,3 дБ. В результате для угла поворота плоскости поляризации $\alpha = 45^\circ$ на выходе ФЭ удалось обеспечить полное согласование, так что потери для линейнополяризованной волны не превышают 0,3 дБ.

Описанная двухслойная структура не является единственной возможной технической реализацией предложенного метода согласования гиротропных сред. В частности, нами также была исследована структура, у которой каждый из двух слоев согласован для одной из компонент поля при помощи просветляющих покрытий (рис. 2б).

В этом случае параметры ФЭ и их частотные характеристики мало отличаются от аналогичных зависимостей рассмотренной выше двухслойной структуры, несмотря на лучшую широкополосность каждого из слоев, так как результирующая частотная характеристика определяется комбинацией диапазонных свойств гиротропных резонаторов Фабри—Перо для ортогональных компонент поля с круговой поляризацией. Однако оба рассмотренных варианта не могут перестраиваться по частоте, так как условия согласования и равенства угла поворота плоскости поляризации на выходе ФЭ величине $\alpha = 45^\circ$ однозначно определяют толщину

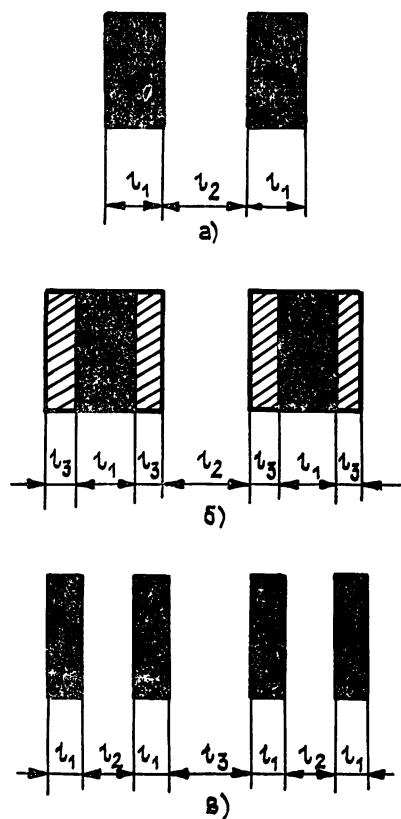


Рис. 2.

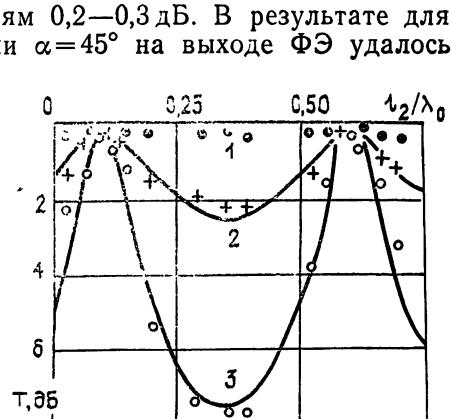


Рис. 3.

ферритовых слоев в структуре и величину намагниченности на заданной частоте.

В этом отношении выгодно отличается четырехслойная структура, предложенная в [10] и состоящая из двух пар ферритовых слоев толщиной l_1 с независимо регулируемыми расстояниями в каждой паре l_2 и между парами слоев l_3 (рис. 2в). В этом случае согласование ФЭ обеспечивается для одной из компонент поля с круговой поляризацией выбором расстояния между слоями в каждой паре, а для ортогональной компоненты — расстояния между парами, что соответствует следующему условию:

$$2\gamma_z^{\pm} l_1 + k_0 l_2 = m\pi; \quad (4)$$

$$2\gamma_z^{\pm} l_1 + k_0 (2l_2 + l_3) = n\pi \quad (m, n = 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Однако благодаря частотной зависимости коэффициентов прохождения и отражения полное согласование ФЭ возможно только в ограниченной полосе, которая определяется требованиями, предъявляемыми к прибору в целом. В частности, для циркулятора основным фактором, лимитирующим рабочую полосу, является развязка плечей, которая зависит от уровней отражений ортогональных компонент поля с круговой поляризацией. Анализ показывает, что при развязке 17 дБ в устройстве на основе двухслойной структуры возможна реализация полосы рабочих частот $<0.5\%$, а в случае четырехслойной структуры достигается расширение полосы до 1 %. Дальнейшее расширение рабочей полосы частот может быть осуществлено при увеличении общего количества слоев и использовании методов широкополосного согласования для каждой из круговых компонент на основе синтеза многослойных согласующих покрытий.

Таким образом, предложенные ФЭ представляют собой резонансные гиротропные структуры типа Фабри—Перо, независимо настраиваемые для ортогональных компонент поля с круговой поляризацией, что позволяет достичнуть их полного согласования в квазиоптическом тракте.

3. КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ФЕРРИТОВЫХ СТРУКТУР

Базовое устройство, на основе которого возможно реализовать практически все типы невзаимных квазиоптических приборов, представляет собой соединение фарадеевского роторатора плоскости поляризации и двух ПР (рис. 1а).

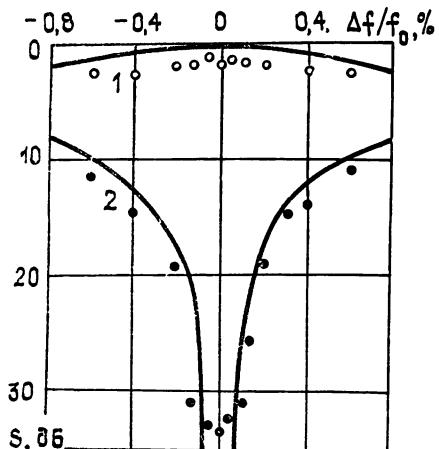
Нами были разработаны и экспериментально исследованы в диапазоне 140 ГГц ферритовые циркуляторы для квазиоптических трактов различных типов, в том числе на основе полого диэлектрического лучевода и СРВ круглого сечения с волной H_{11} . При разработке подобных устройств важно выбрать параметры МС, так как неравномерность продольного распределения магнитного поля, обусловленная краевыми эффектами, не позволяет достичнуть идентичности электрических характеристик намагниченных ферритовых элементов и отрицательно сказывается на качестве согласования. Экспериментальные исследования, проведенные с МС различной длины, показали, что удовлетворительные результаты можно получить, если ее длина составляет три—четыре продольных размера ФЭ. В этом случае в пределах указанного размера напряженность магнитного поля изменяется не более чем на 5 %, что гарантирует достаточно высокие параметры устройства в целом.

Ферритовый циркулятор на основе полого диэлектрического лучевода [16] был разработан с использованием двухслойной ферритовой структуры в виде двух плоскопараллельных дисков из материала марки 10СЧ6. В конструкции обеспечивалась плавная регулировка расстояния между дисками, а в качестве ПР применены делители луча из комплекта квазиоптических элементов [17] с одномерной проволоч-

ной решёткой в диагональном сечении (диаметр проволоки — 8 мкм, период — 40 мкм). Толщина ферритовых дисков выбрана в соответствии с условием согласования (2), (3) и составляет 6,2 мм, а поворот плоскости поляризации на угол $\alpha=45^\circ$ обеспечивается при магнитном поле $H=240$ Э в центральном сечении МС.

Результаты исследования циркулятора в полосе частот приведены на рис. 4, где расчетные характеристики потерь в прямом канале S_{12} и развязка S_{13} получены для параметров ферритового материала, измеренных в работах [10, 13]. Как

видно, на центральной частоте прямые потери не превышают 2,8 дБ, развязка составляет 33 дБ, а при расстройке частоты в полосе $\pm 0,25\%$ параметры ухудшаются до значений 3,5 и 17 дБ соответственно. Если учесть, что потери влучеводе и ПР составляют 2,5 дБ, то суммарные потери в ФЭ, включая диссипативные потери в феррите и потери рассогласования, не превышают 0,3 дБ, что хорошо согласуется с расчетом. С другой стороны, значительные потери в пассивных элементах устройства могут быть существенно уменьшены при использовании квазиоптических линий передачи с малым погонным затуханием, например СРВ круглого сечения с волной H_{11} [5]. При этом следует учитывать гибридный характер поля, однако в области малой намагниченности отличие волны квази- H_{11} заполненного волновода от волны H_{11} незаполненного пренебрежимо мало [15]. Кроме того, экспериментальные исследования показывают, что в случае $k_0a \gg 1$ отличие поляризации волны H_{11} от линейной незначительно сказывается на работе ПР с использованием мелко-периодной решетки, внося дополнительные потери не более 0,3 дБ [6].



слойной структуры процесс настройки существенно упрощается. В этом случае достаточно выбрать необходимые расстояния между дисками, исходя из условия согласования (4), (5). Суммарная толщина использованной ферритовой структуры составляла 12,4 мм. Напряженность магнитного поля $H=107$ Э, а потери, вносимые ФЭ, не превышали 0,3 дБ, как и в предыдущем случае.

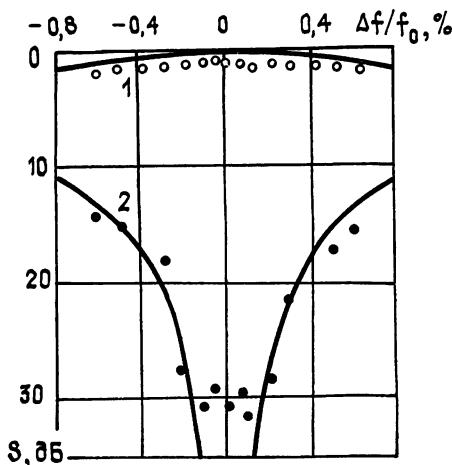


Рис. 6.

На рис. 5 приведена фотография разработанного устройства, а на рис. 6 показаны частотные характеристики прямых потерь S_{12} и развязки S_{13} (кривые 1 и 2 соответственно). Из приведенных зависимостей видно, что на центральной частоте прямые потери составляют 0,8 дБ, развязка превышает 30 дБ, причем в полосе частот $\pm 0,25\%$ указанные параметры ухудшаются только до значений 1 и 22 дБ соответственно. Как видно, по сравнению с устройством на основе двухслойной ферритовой структуры использование четырехслойной структуры позволяет расширить полосу рабочих частот в два раза.

Таким образом, проведенные исследования экспериментальных макетов квазиоптических невзаимных устройств подтвердили возможности предложенного метода согласования гиротропных структур и целесообразность рассмотренной геометрии устройства с плоскопараллельными ФЭ, расположенными нормально к оси квазиоптического волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hindin H. J., Taub J. J. // Proc. IEEE. 1966. V. 54. № 7. P. 64.
2. Кулешов Е. М., Кононенко В. К., Полупанов В. Н. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1976. Вып. 7. С. 90.
3. Крафтмакер Г. А., Мериакри В. В. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 4. С. 875.
4. Айвазян М. Ц., Харлашкин О. А. // Тезисы докл. 3 Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам.—Горький: ИПФ АН СССР, 1981. Т. 1. С. 104.
5. King H. E., Wong J. L. // IEEE Trans. 1971. V. MTT-19. № 1. P. 116.
6. Хлопов Г. И. Препринт ИРЭ АН УССР № 128.—Харьков, 1979.
7. Крафтмакер Г. А., Мериакри В. В. // Радиотехника и электроника. 1971. Т. 16. № 11. С. 2221.
8. Ваганов Р. Б. // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14. № 3. С. 455.
9. Бурштейн Э. А. // Радиотехника и электроника. 1958. Т. 3. № 2. С. 186.
10. Костенко А. А. Препринт ИРЭ АН УССР № 139.—Харьков, 1979.
11. Хлопов Г. И. В кн.: Радиотехника.—Харьков: Вища школа, 1972. Вып. 21. С. 150.
12. Костенко А. А. В кн.: Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн.—Киев: Наукова думка, 1983. С. 126.
13. Костенко А. А. // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26. № 10. С. 2044.
14. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.—М.: Наука, 1973.—719 с.
15. Микаэлян Л. А. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах.—М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.—664 с.

16. Горошко А. И., Кулешов Е. М. В кн.: Радиотехника. — Харьков: Вища школа, 1972. Вып. 21. С. 215.
17. Кулешов Е. М., Яновский М. С., Литвинов Д. Д. и др. // Тезисы докл. Всесоюзного симпозиума по распространению субмиллиметровых и миллиметровых волн в атмосфере Земли и планет. — Москва—Горький, 1974. С. 124.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
5 мая 1987 г.,
после доработки
19 мая 1988 г.

QUASIOPTICAL FERRITE DEVICES

A. A. Kostenko, G. I. Khlopov

The main features of the development of quasioptical ferrite devices for Faraday effect are considered. It is shown that the losses specified by the field transformation of the quasioptical waveguide may be essentially decreased when the ferrite element is placed normally to the waveguide axis. Variants of the construction of the ferrite element in the form of the multilayer structure which allows to reach a full agreement in the quasioptic tract are considered.

ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТОВ

1. В реферате кратко излагается основное содержание статьи. Реферат должен дать читателю представление о характере освещаемой работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и его основных результатах.

2. Реферату должно предшествовать библиографическое описание в следующем виде: название статьи, фамилия и инициалы автора, название журнала, где помещается статья. Текст реферата начинается непосредственно с изложения существа работы без повторения заголовка. Форма изложения материала не обязательно должна повторять форму изложения оригинальной статьи.

3. Если оригинал содержит большое количество цифровых данных, их следует обобщить и систематизировать.

4. Средний объем реферата 1,5—2 страницы машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×21) в двух экземплярах с полем 4 см с левой стороны.

5. Таблицы, схемы, графики и пр. могут быть включены в том случае, если они отражают основное содержание работы или сокращают текст реферата. Сообщение о наличии в реферируемой работе таблиц, схем, графиков, фотографий, карт, рисунков необходимо давать в конце реферата. Например, табл. 2, ил. 10.

6. Формулы приводятся только в том случае, если они необходимы для понимания статьи. Громоздкие математические выражения помещать не следует. Формулы следует вписывать четко, не изменяя принятых в оригинале обозначений величин. Формулы и буквенные обозначения вписываются черными чернилами во второй экземпляр. Вписывание формул и буквенных обозначений, а также исправление замеченных опечаток в первом экземпляре не делается.

7. В конце реферата в квадратных скобках указывается название учреждения или предприятия, в котором автор реферируемой работы (если эти данные приводятся в статье) провел работу. Подпись автора и дату написания реферата следует ставить в левом нижнем углу на обоих экземплярах реферата.