

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 621.317; 621.372.8

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА БЛИЖНЕГО МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

В. И. Безбородов, В. К. Киселев, Е. М. Кулешов, М. С. Яновский

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kiseliiov@ire.kharkov.ua*

Разработаны комплексы радиоизмерительных устройств и компонентов высокочастотных трактов ближнего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе квазиоптической линии передачи – сверхразмерного металлодиэлектрического волновода квадратного поперечного сечения 14x14 мм для диапазона частот 110-260 ГГц и 10x10 мм для диапазона 176-410 ГГц. Ил. 16. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: квазиоптические радиоизмерительные приборы и устройства, металлодиэлектрический волновод, ближний миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны волн.

Комплексы квазиоптических устройств предназначены для осуществления различных измерительных схем на коротковолновом участке миллиметрового и в субмиллиметрового диапазонов волн ($\lambda \approx 0,73-2,7$ мм). Устройства выполнены на основе металлодиэлектрических волноводов (МДВ) квадратного сечения 14x14 мм для диапазона волн 1,15-2,7 мм и 10x10 мм для диапазона 0,73-1,7 мм.

В состав комплекта входят: возбудители МДВ, секции МДВ, угловые переходы, вращающиеся сочленения, неотражающие нагрузки, линейные поляризаторы, преобразователи поляризации, измерительные и установочные аттенюаторы и фазовращатели, резонансные волнометры, делители мощности, зеркальные отражатели, амплитудные модуляторы и пр.

Металлодиэлектрический волновод представляет собой металлическую трубу с поперечными размерами $2a$, $2b$ (рис. 1 и 2), существенно превышающими длину волны. Внутренняя поверхность МДВ покрыта слоями диэлектрика нерезонансной толщины d . МДВ квадратного поперечного сечения обеспечивает распространение волн одной базисной линейной поляризации при покрытии диэлектриком двух противоположных стенок или обеих базисных поляризаций при покрытии диэлектриком всех четырех стенок волновода [1].

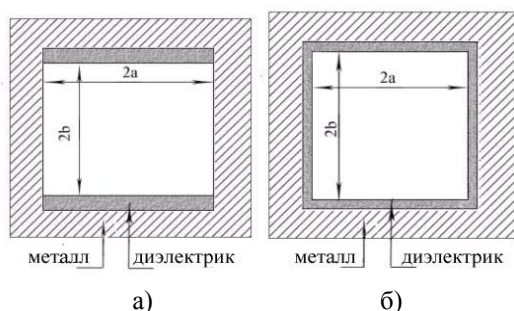


Рис. 1. Поперечное сечение МДВ с диэлектрическими слоями на двух (а) и четырех (б) стенках

Поле волны основного типа имеет одинаковое амплитудное распределение в ортогональных плоскостях с максимумом на оси волновода, практически плоский фазовый фронт и линейную поляризацию. В МДВ обеспечивается предельно малое затухание этой волны, ее высокая поляризационная устойчивость и достаточная степень фильтрации побочных мод.



Рис. 2. Секции МДВ

Затухание волн, распространяющихся в полом металлическом волноводе, связано в основном с потерями при отражении от стенок тех волн Бриллюэна, у которых магнитный вектор \vec{H} перпендикулярен плоскости падения. Диэлектрическое покрытие нерезонансной толщины улучшает условия отражения для этой поляризации и приводит к существенному снижению потерь, так как значительная часть энергии отражается от поверхности диэлектрика и ослабляется тангенциальная составляющая магнитного поля волны основной моды и ток на металлической поверхности волновода.

МДВ имеет узкие по частоте (порядка $1/ka$) области повышенного затухания, соответствующие резонансным условиям в слоях диэлектрика: для волновода с двумя стенками, покрытыми диэлектриком,

$$kd\sqrt{\varepsilon-1} \rightarrow p\pi; \quad (1)$$

для волновода с четырьмя покрытыми стенками, предназначенного для работы с обеими поляризациями,

$$kd\sqrt{\varepsilon-1} \rightarrow p\frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Здесь p – целое; $k=2\pi/\lambda$; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика слоя. Минимальное затухание имеет место при антирезонансной толщине диэлектрического слоя

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon-1}}(2p-1) \quad (3)$$

для МДВ с диэлектрическим покрытием двух стенок;

$$d = \frac{\lambda}{8\sqrt{\varepsilon-1}}(2p-1) \quad (4)$$

для МДВ с диэлектрическими слоями на всех четырех стенках.

Результаты расчета затухания в МДВ сечения 10x10 мм приведены на графиках рис. 3 и 4. Рабочий диапазон частот выделен светлыми полями.

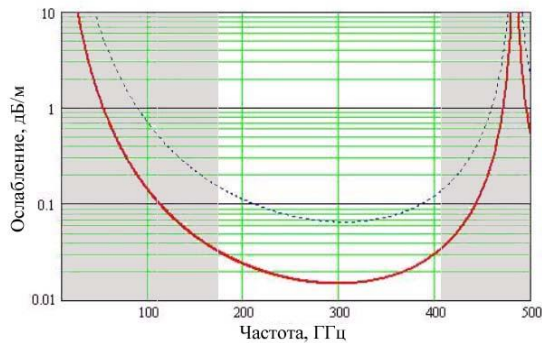


Рис. 3. Частотная зависимость ослабления в квадратном МДВ 10x10 мм со слоями диэлектрика (тефлон 300 мкм) на двух противоположных стенках: — МДВ медный; - - - МДВ из нержавеющей стали

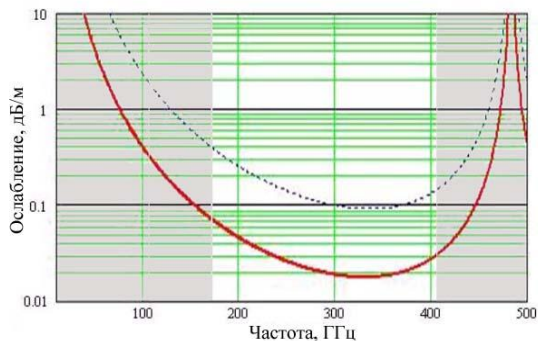


Рис. 4. Частотная зависимость ослабления в квадратном МДВ 10x10 мм со слоями диэлектрика (тефлон 150 мкм) на всех четырех стенках: — МДВ медный; - - - МДВ из нержавеющей стали

Измеренное значение затухания в медных МДВ с диэлектрическими слоями на двух и четырех стенках, а также в МДВ из нержавеющей стали с диэлектрическими слоями на двух стенках на частоте 263 ГГц составило менее 0,2 дБ/м.

Возбудители МДВ (адаптеры) представляют собой пирамидально-скачковые переходы длиной 70 и 100 мм от стандартных волноводов диапазона 0,73 - 1,7 мм и 1,15 - 2,7 мм к сечениям 10x8,4 мм и 14x11,8 мм (оптимальным для возбуждения МДВ 10x10 мм и 14x14 мм соответственно) при наличии в выходных сечениях переходов продольных металлических пластин, корректирующих распределение поля в выходной апертуре [2] (рис. 5).

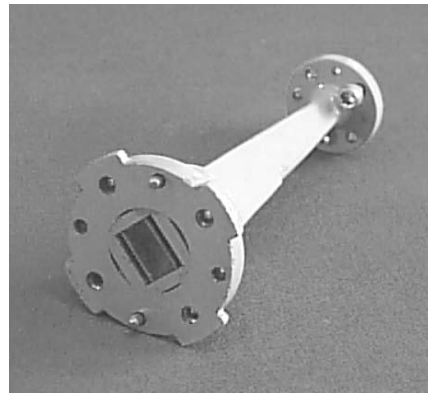


Рис. 5. Возбудитель МДВ (адаптер)

С целью уменьшения осевой длины и снижения потерь в возбудителях, которые в существенной мере определяются омическими потерями в участке волновода малого поперечного сечения, необходимый раскрыв выходной апертуры достигался с помощью секционному пирамидального перехода [3], в котором область малых поперечных сечений волновода существенно короче, чем в плавном переходе. Потери в таких возбудителях не превышали 0,8 дБ.

90°-ный угловой поворот-фазовращатель (рис. 6) предназначен для поворота линии передачи под прямым углом в процессе сборки схем на основе МДВ. Он содержит два пересекающихся под прямым углом отрезка МДВ с нормальными фланцами и плоское металлическое зеркало, проходящее через точку пересечения их осей под углом 45° к ним. Зеркало выполнено перемещающимся в небольших пределах вдоль оси, перпендикулярной его плоскости, и снабжено шкалой отсчета этого перемещения.

Перемещением зеркала на величину l вводится сдвиг фазы $2\sqrt{2}\pi l/\lambda$, рад. Ослабление волны в угловом повороте составляет 0,4 дБ.

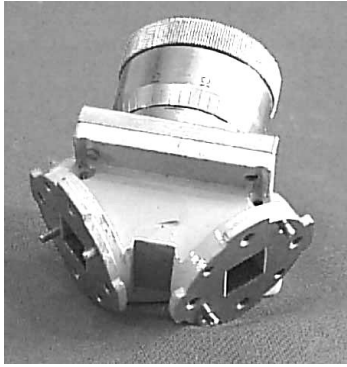


Рис. 6. 90⁰-ный угловой поворот-фазовращатель

Вращающееся сочленение предназначено для взаимного разворота сочленяемых МДВ вокруг их общей оси на любой угол. Оно выполнено на основе МДВ круглого поперечного сечения $\varnothing 16$ мм для МДВ 14x14 мм и $\varnothing 11,4$ мм для МДВ сечения 10x10 мм.

Неотражающая нагрузка (рис 7) содержит поглотитель, имеющий $\text{tg } \delta \sim 0,2$. Во входном участке поглотителя выполнена полость в виде конуса с углом раскрытия 30⁰. Поглотитель помещен в участок МДВ, снабженный нормальным фланцем, и замкнут на конце.

КСВН нагрузки не более 1,05, максимально допустимая рассеиваемая мощность 1 Вт.

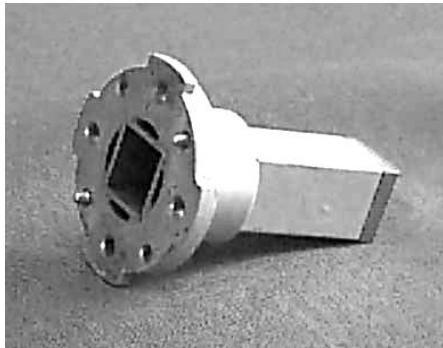


Рис. 7. Неотражающая нагрузка

Линейный поляризатор проходной содержит поляризующую решетку из проволок диаметра 10 мкм с периодом 30 мкм, размещенную наклонно в отрезке МДВ, и поглотитель отраженной от решетки волны побочной поляризации. Дифференциальное ослабление в поляризаторе более 35 дБ, ослабление волны полезной поляризации менее 0,5 дБ. Поляризатор снабжен механизмом поворота решетки на любой угол в пределах 0⁰- 90⁰.

Преобразователь поляризации (рис. 8 и 9) предназначен для преобразования поляризации одного вида в другой либо для поворота плоскости поляризации. Он содержит регулирующую зеркально-решеточную дифференциальную фазо-

вую секцию 1-2, установленную в 90⁰-ном угловом повороте МДВ [4]. Решетка 1 с шагом, намного меньшим длины волны, может поворачиваться вокруг оси перпендикулярной ее плоскости на любой заданный угол, а расстояние l между нею и зеркалом 2 регулируется.

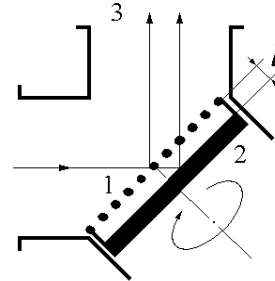


Рис. 8. Схема преобразователя поляризации

Составляющая входной волны, поляризованная в азимутальной плоскости, параллельной проволокам (*E*-поляризация), отражается от решетки, а ортогональная составляющая (*H*-поляризация) отражается зеркалом. Обе составляющие поступают в выходное плечо 3. Вводимый дифференциальный фазовый сдвиг Δ связан с расстоянием l и углом падения φ соотношением

$$\Delta = 4\pi \frac{l}{\lambda} \cos \varphi. \quad (5)$$

Преобразование линейной поляризации в круговую осуществляется при равенстве этих составляющих, т. е. при азимутальном угле решетки $\pm 45^0$ и расстоянии $l_1 = \lambda \sqrt{2}/8$, соответствующем сдвигу фазы между ними, равному $\pi/2$ (угол падения $\varphi = 45^0$). Вращение плоскости поляризации выходной волны на любой заданный угол осуществляется путем поворота решетки при расстоянии $l_2 = \lambda \sqrt{2}/4$, соответствующему сдвигу фаз между составляющими волны, равному π . При этом плоскость поляризации поворачивается на удвоенный азимутальный угол поворота решетки.

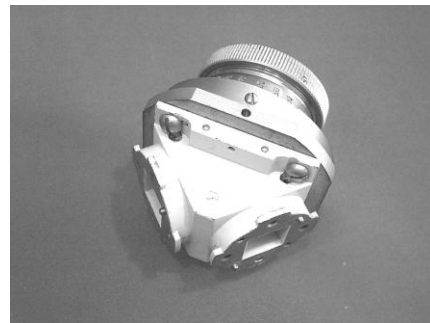


Рис. 9. Преобразователь поляризации

Работа в широком диапазоне частот обеспечивается перестройкой преобразователя путем изменения расстояния l . Общие потери в преобразователе не более 0,5 дБ.

Аттенюатор измерительный поляризационный [5] (рис. 10 и 11) содержит три последовательно включенных в тракт поляризатора 1, 2, 3. Два крайних проходных поляризатора 1 и 3 на основе одномерных проволочных решеток установлены неподвижно в диагональных плоскостях прямоугольных тройниковых H -разветвлений МДВ. Между ними помещен проходной поляризатор 2 с поворотной решеткой в диагональной плоскости прямоугольного крестообразного H -разветвления МДВ.

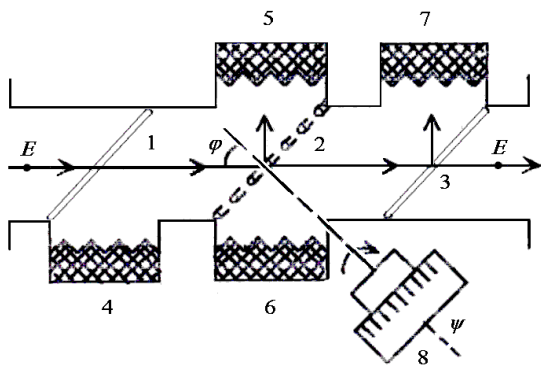


Рис. 10. Конструкция аттенюатора

Решетка 2 среднего поляризатора поворачивается вокруг оси перпендикулярной ее плоскости, она связана через редуктор 1:4 с прямоотсчетной шкалой ослаблений аттенюатора. В свободных плечах разветвлений МДВ помещены неотражающие нагрузки 4, 5, 6 и 7 для поглощения компонентов волны, отраженных поляризирующими решетками при прохождении через аттенюатор волн в обоих направлениях.

Ослабление аттенюатора в зависимости от угла ψ поворота решетки среднего поляризатора и угла φ падения волны на эту решетку дается формулой

$$A_{\text{дБ}} = 20 \lg(1 + sc^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \psi), \quad (6)$$

в соответствии с которой рассчитывается шкала аттенюатора.

Пределы регулировки ослабления аттенюатором с решетками 30×10 мкм составляют 0-45 дБ в длинноволновом участке диапазона и 0-35 дБ в коротковолновом его участке. При этом прямой отсчет ослабления по расчетной шкале аттенюатора осуществляется в пределах 0...35 дБ в длинноволновом участке диапазона и в пределах 0-25 дБ в коротковолновом его участке с погрешностью $\pm (0,1 + 0,02 A)$ дБ. Начальное ослабление волны в аттенюаторе не превышает 0,3 дБ, КСВН $< 1,05$.

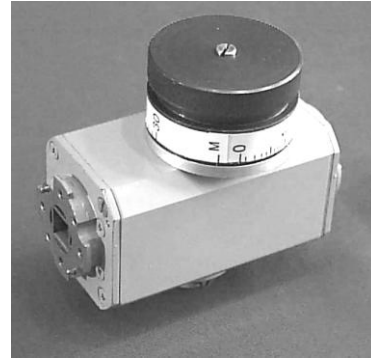


Рис. 11. Аттенюатор

Резонансный волномер с резонатором бегущей волны [6], устройство которого схематично представлено на рис. 12 и фото внешнего вида на рис. 13, содержит мелкоструктурную проволочную решетку 1, установленную в качестве отражателя в 90° -ном угловом переходе МДВ. Позади решетки расположен двугранный уголкообразный отражатель, состоящий из двух плоских металлических зеркал 2 и 3, образующих угол α , равный половине угла излома МДВ ($\alpha = 45^\circ$). Проволоки решетки 1 лежат в плоскости поляризации рабочей волны МДВ. Двугранный отражатель имеет общую биссектрису с изломом МДВ и снабжен микрометрическим механизмом перемещения вдоль нее. Значение перемещения l отсчитывается по шкале волномера.

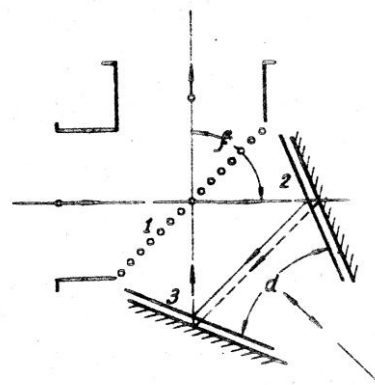


Рис. 12. Конструкция волномера

При достижении условий резонанса в резонаторе бегущей волны (когда длина пути при отражении волны от элементов 1-2-3 равна целому числу длин волн) имеет место отсос энергии в резонатор. Этот отсос можно зарегистрировать на выходе волномера. Все параллельные лучи пучка проходят одинаковый путь в резонаторе, т. е. условие резонанса наступает одновременно для всего пучка. Соотношение между длиной волны λ и разностью l_1 двух отсчетов по шкале, соответствующих двум соседним резонансам, $\lambda = l_1 / \sqrt{2}$.

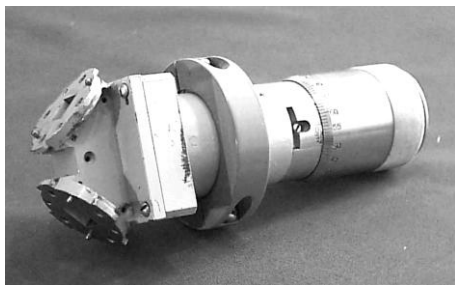


Рис. 13. Волномер

При использовании решеток из проволок диаметром 10 мкм с периодом 100 мкм глубина отсоса на волне 1,15 мм составляет 15%. Потери в угловом повороте в отсутствие резонанса составляют 0,3 дБ. Измеренное значение нагруженной добротности резонатора бегущей волны ~2000, относительная погрешность измерения длины волны $5 \cdot 10^{-3}$ при фиксации двух соседних резонансов и $2 \cdot 10^{-3}$ при фиксации пяти последовательных резонансов.

Делитель луча (рис. 14) предназначен для направленного ответвления определенной части электромагнитной энергии волнового пучка из основного канала МДВ в боковой, а также для осуществления различных интерферометрических схем. Он представляет собой прямоугольное четырехплечее разветвление МДВ, в диагональной плоскости которого установлено делительное зеркало в виде тонкой диэлектрической пленки, натянутой в специальной кассете. Параметры делителя определяются толщиной и диэлектрической проницаемостью пленки [7]. Делитель снабжен сменными кассетами с пленками, конструкция его обеспечивает быструю и удобную смену кассет. Направленность делителя луча не хуже 40 дБ, КСВН не более 1,1.

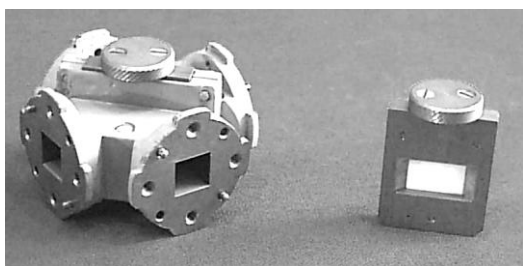


Рис. 14. Делитель луча и сменная кассета

Делитель луча поляризационный представляет собой прямоугольное разветвление МДВ с поляризующей проволочной решеткой (неподвижной либо поворотной) в диагональной плоскости. Такой делитель находит применение во многих радиоизмерительных схемах и, в частности, в поляризационных интерферометрах.

Подвижный отражатель (рис. 15) предназначен для осуществления обратного зеркального отражения волны с регулировкой его фазы. Он представляет собой плоское металлическое зеркало, перпендикулярное оси МДВ, помещенное в отрезок МДВ с нормальным фланцем. Зеркало может перемещаться вдоль оси с помощью микрометрического винта. При смещении зеркала на расстояние l фаза отраженной волны изменяется на $4\pi l/\lambda$ рад. Пределы перемещения зеркала 0-15 мм, точность отсчета его положения по шкале 0,01 мм.

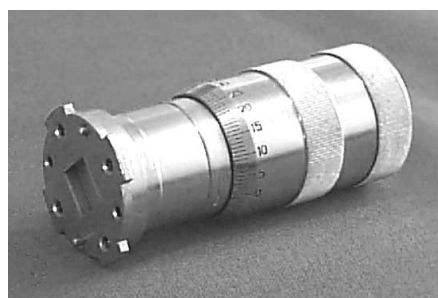


Рис. 15. Подвижный отражатель

Подвижный двугранный уголкоый отражатель предназначен для поворота плоскости поляризации отраженной волны на угол 90° и регулирования ее фазы. Он содержит двугранное прямоугольное металлическое зеркало, ребро которого образует угол 45° со сторонами МДВ. Зеркало снабжено микрометрическим механизмом перемещения со шкалой отсчета.

Модулятор амплитудный (рис. 16) предназначен для модуляции волны в МДВ по синусоидальному закону. Он содержит поляризатор с наклонной проволочной решеткой, установленный в МДВ круглого поперечного сечения, проходящем через ротор электродвигателя и вращающемся совместно с ним. На выходе установлен линейный поляризатор. Двигатель питается от генератора звуковой частоты с усилителем мощности. Частота модуляции до 150 Гц.



Рис. 16. Модулятор амплитудный

Выводы. Разработанные комплексы квазиоптических приборов и устройств по своим функциональным возможностям и параметрам не уступают аналогичной по назначению аппаратуре более длинноволновых диапазонов, а в ряде случаев превосходят ее. Указанные комплексы могут служить основой для создания различных радиоизмерительных и других устройств и систем в терагерцевой области электромагнитного спектра.

Авторы благодарят инженеров Котляра И. П. и Нестерова П. К., механиков Красникова Л. И. и Устинова Н. И. за участие в конструировании и наладке радиоизмерительных устройств.

1. Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Прямоугольные волноводы класса «полый диэлектрический канал» // Радиотехника и электроника. - 1978. - 23, №10. - С.2060-2068.
2. Айвазян М. Ц. Исследование возбуждения рабочих волн ДК-волноводов // Дисс. канд. техн. наук. - М.: 1985. - С.42-69.
3. Киселев В. К. Квазиоптические волноводные оптимальные секционные переходы // Материалы 8-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». - Севастополь. - 1998. - 2. - С.553-554.
4. Яновский М. С., Князьков Б. Н. Поляризационный квазиоптический фазовращатель // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1970. - 13, №10. - С.1199-2004.
5. Безбородов В. И., Киселев В. К. и др. Сверхширокополосный квазиоптический поляризационный аттенуатор для металлодиэлектрического волновода // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 1998. - 3, №1. - С.102-104.
6. А.с. 366421 СССР, МКИ G01r 29/08. Квазиоптический волномер / Б. Н. Князьков, Е. М. Кулешов, В. В. Стенько, В. Л. Шуменко, М. С. Яновский // Открытия. Изобретения - 1973. - №7.
7. Кулешов Е. М., Литвинов Д. Д. К вопросу о делении луча в квазиоптических СВЧ-трактах. Сб. «Радиотехника», Харьков, изд. ХГУ, 1971. - 18. - С.98-104.

QUASIOPTICAL RADIOMEASURING DEVICES NEAR MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVE RANGES ON THE BASE OF METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE OF SQUARE CROSS-SECTION

V. I. Bezborodov, V. K. Kiseliov,
Ye. M. Kuleshov, M. S. Yanovsky

Quasi-optical and radio-measuring devices and components of high frequency sections produced on the basis of metal-dielectric waveguides of 10x10 mm and 14x14 mm square cross-sections operating in 176-410 GHz and 110-260 GHz frequency ranges, respectively, have been described. The functional capabilities and parameters of the devices don't yield to analogous devices operating in longer-wave ranges and in a number of cases exceed them.

Key words: quasi-optical radio-measuring devices and components, metal-dielectric waveguide, near millimeter and submillimeter wave ranges.

КВАЗІОПТИЧНІ РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ ПРИБОРИ БЛИЖНЬОГО МІЛІМЕТРОВОГО ТА СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ МЕТАЛОДІЕЛЕКТРИЧНОГО ХВИЛЕВОДУ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ

В. І. Безбородов, В. К. Кісельов,
Є. М. Кулешов, М. С. Яновський

Розроблено комплекси радіовимірювальних пристроїв та компонентів надвисокочастотних трактів ближнього міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль на основі квазиоптичної лінії передачі – надрозмірного металодіелектричного хвилеводу квадратного перерізу 14x14 мм для діапазону хвиль 110-260 ГГц та 10x10 мм для діапазону 176-410 ГГц.

Ключові слова: квазиоптичні радіовимірювальні прилади і пристрої, металодіелектричний хвилевод, ближній міліметровий та субміліметровий діапазон хвиль.

Рукопись поступила 21 июня 2007 г.