

**РЕЖИМ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В
ДВУХЗЕРКАЛЬНОМ НЕРЕГУЛЯРНОМ ОТКРЫТОМ ВОЛНОВОДЕ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

**Г.С. Воробьев, В.О. Журба, М.В. Петровский, А.А. Рыбалко,
Ю.В. Шульга**

*Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы,
40007*

Показана возможность направленного ответвления мощности в двухзеркальном открытом волноводе с дифракционно-связанными излучающими апертурами типа периодическая структура – диэлектрический волновод. Экспериментальные исследования макета ответвителя в диапазоне частот 30 – 37 ГГц показали, что принцип организации связи на объемных волнах позволяет реализовать значения переходного ослабления в интервале 3–10 дБ при направленности порядка 30 дБ, что превосходит аналогичные параметры ответвителя на диэлектрических волноводах. Основным достоинством предложенного направленного ответвителя является возможность плавной регулировки переходного ослабления путем изменения расстояния между излучающими апертурами.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие физики, астрономии, биологии и химии привело к резкому увеличению исследований электромагнитных колебаний миллиметровых и субмиллиметровых (МСМ)-волн. Стимулирование разработок в этих диапазонах диктуется также внутренней потребностью собственно радиофизики и электроники, особенно таких ее разделов, как вакуумная электроника, связь, локация, спектроскопия [1-3].

Достигнуть определенных результатов при освоении МСМ диапазонов стало возможным благодаря применению метода масштабного моделирования [4-6]. Закономерности, характерные для сантиметрового диапазона волн, сохраняют свой физический смысл при линейном изменении (сокращении) геометрических размеров электродинамических структур: закрытых резонаторов, волноводов, периодических систем. Однако метод масштабного моделирования позволяет лишь частично решить задачу создания миллиметровой и особенно субмиллиметровой техники, поскольку при использовании данного метода технология изготовления волноводов, резонаторов, отдельных элементов и узлов превращается в прецизионную для указанных диапазонов длин волн. Вместе с этим при возрастании частоты увеличивается затухание волны, распространяющейся по волноводу, уменьшается максимальная мощность, которую можно передавать.

Переходя к более высоким частотам, казалось бы, можно применять колебания и волны высших типов. Однако сгущение спектра препятствует применению высших типов колебаний в резонаторах, а для волноводов, поперечные размеры которых существенно больше длины волны, передаваемая электромагнитная энергия будет распределена между многими волнами. Подобные режимы работы в большинстве случаев недопустимы.

При освоении столь коротких волн изложенное выше приводит к необходимости использования новых принципов, с помощью которых можно устранить недостатки, присущие методу масштабного моделирования.

В МСМ-диапазонах волн в качестве эффективных электродинамических структур для решения проблем канализации,

генерирования и усиления предложены так называемые открытые системы: открытые резонаторы и волноводы [7-9]. Такие системы, образованные гладкими зеркалами различной конфигурации, к настоящему времени достаточно изучены экспериментально и теоретически [7, 8]. Однако непрерывное развитие физики и техники МСМ-волн выдвигает новые требования к выходным параметрам и функциональным возможностям открытых резонаторов и волноводов, которые могут быть реализованы путем создания новых модификаций таких систем [9, 10].

В данной работе впервые рассматривается возможность реализации режима ответвления части мощности, распространяющейся в открытом волноводе (ОВ), образованном двумя излучающими апертурами типа дифракционная решетка (ДР) - диэлектрический волновод (ДВ). Показано, что на базе данной системы может быть реализован направленный ответвитель (НО), который по своим параметрам в миллиметровом диапазоне волн превосходит ответвители на диэлектрических волноводах и щелевых линиях передачи.

1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ МСМ-ВОЛН

Направленные ответвители предназначены для ответвления части мощности, распространяющейся в определенном направлении по волноводу. Они используются для измерений проходящей и отраженной мощности в тракте, а также для ее ослабления при регистрации больших уровней мощности. НО характеризуются переходным затуханием (отношением мощностей сигналов, распространяющихся в прямом и вспомогательном тракте) и направленностью, которая определяется отношением мощностей во вспомогательном тракте при прямом и обратном направлениях распространения сигнала в основном тракте.

Волноводные НО. Инженерный расчет основных параметров волноводных НО достаточно подробно изложен в ряде монографий (см., например, [11]). Основные типы НО, таких, как интерференционный ответвитель на скрещенных волноводах, ответвитель Бете, щелевой и др., описаны в [12].

В миллиметровом диапазоне волн наиболее широкое распространение получили НО, в которых отверстия связи расположены по широким стенкам основного и вспомогательного волноводов. Основные параметры таких ответвителей: в диапазоне частот 18-110 ГГц переходное затухание от 3 до 20 дБ, направленность более 35 дБ. При повышении частоты направленность уменьшается.

Кроме того, в миллиметровом диапазоне волн нашли применение избирательные НО на круглых многомодовых волноводных, которые предназначены для избирательного отбора одной из распространяющихся в нем волн. В качестве вторичного волновода обычно используется прямоугольный волновод с основной волной H_{10} , что определяет их недостатки описанными выше ограничениями метода масштабного моделирования при возрастании частоты.

Ответвители для квазиоптического тракта [8,13]. В квазиоптических лучеводах в качестве НО и делителей мощности используются диэлектрические пластины и призмы, а также металлические решетки.

Диэлектрическая пластина, расположенная под углом к оси лучевода, делит падающий на нее волновой пучок на два – прошедший и отраженный. В случае тонкой пластины (пленки) смещением пучка и поглощением при переотражениях его в пленке можно пренебречь. В ответвителе с призмными делителями мощности используется явление полного внутреннего отражения на верхней границе призмы. В зазоре Δ

между призмами поле экспоненциально спадает и возбуждает волну в нижней призме. Для уменьшения зависимости коэффициента деления от Δ промежутки между призмами заполняются жидкостью с коэффициентом преломления n_2 , связанным с коэффициентом преломления материала призм n_1 соотношением

$$n_2 \approx n_1 / \sqrt{2}.$$

Для деления мощности широко используются и периодические металлические решетки с периодом $l \ll \lambda_0$. При ориентации вектора электрического поля падающей на решетку волны вдоль оси она практически полностью отражается, волна ортогональной поляризации, напротив, имеет коэффициент прохождения, близкий к единице. С помощью решетки падающий на нее пучок можно разделить на два пучка с практически любым соотношением мощностей. Однако необходимо иметь в виду, что поляризации полей в этих пучках ортогональные.

Направленные ответвители на ДВ и щелевых линиях передачи. Существуют три типа направленных ответвителей на ДВ: с распределенной связью, использующие локальную связь, и с направленным переизлучением сигнала во вторичный канал.

Принцип работы НО с распределенной связью основан на возбуждении синфазных и противофазных волн с различными фазовыми скоростями. В результате взаимодействия этих волн происходит обмен энергией между ДВ и ответвление части мощности во вторичный канал. Основные параметры связанных ДВ в миллиметровом диапазоне волн детально исследованы в [14]. Характеристики НО с распределенной связью при переходном ослаблении, равном 3 дБ, показаны на рис. 1а [13]. Видно, что переходное ослабление в 3 дБ имеет место в достаточно узкой полосе рабочих частот. Это обусловлено сильной частотной зависимостью фазовых скоростей волн четных и нечетных типов у связанных волноводов. Расширить полосу рабочих частот ответвителей на ДВ можно, используя эффект направленного переизлучения сигнала с участка резкого излома ДВ. Параметры такого ответвителя на диэлектрическом планарном волноводе с инвертированной полоской из фторопласта и кварцевой пластиной приведены на рис. 1б [13].

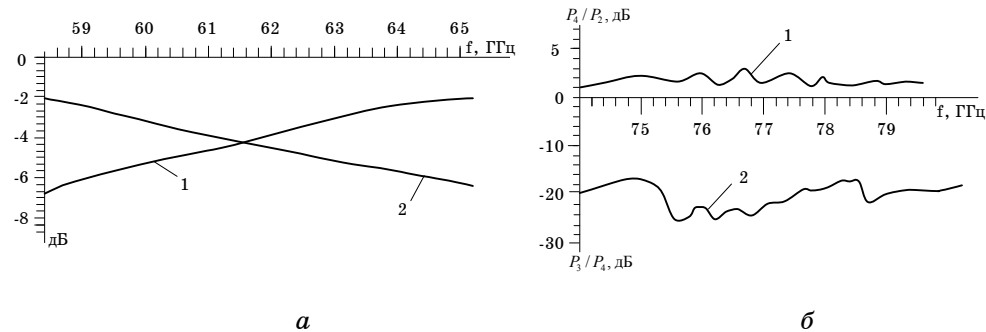


Рисунок 1 – Характеристики НО на базе диэлектрических волноводов: с распределенной связью (а) (передаваемая мощность $P_2 / P_1 - 1$, ответвляемая мощность $P_4 / P_1 - 2$, P_1 – мощность входного сигнала); с изломом волновода (б) (1 – ослабление, 2 – направленность, P_2 и P_4 – передаваемые мощности, P_3 – мощность обратной ответвленной волны)

В ответвителях с локальной связью переходное ослабление пропорционально углу между ДВ. При достаточно больших углах, когда эффект распределенной связи пренебрежимо мал, ответвители с локальной связью достаточно широкополосны и обеспечивают направленность более 25 дБ.

Построение НО возможно также на базе цилиндрических щелевых линий передачи энергии [15], которые по своим свойствам аналогичны ДВ. Доля мощности, ответвленной на единице длины области связи, определяется перекрытием собственных волн, распространяющихся в каждой из линий передачи. Таким образом, она зависит от расстояния между трактами и длины взаимодействия. В частности, на базе такой системы исследован макет НО в восьмимиллиметровом диапазоне волн, который имел следующие параметры в полосе частот $\Delta f = 5 \text{ ГГц}$: переходное ослабление порядка 9 дБ при направленности 20-24 дБ.

Из проведенного выше анализа характеристик, существующих к настоящему времени, НО МСМ диапазона волн следует: области применения волноводных ответвителей с увеличением частоты ограничены физическими принципами метода масштабного моделирования; существующие НО для квазиоптического тракта сложны в технологии их изготовления и эксплуатации. Реализованный ответвитель на ДВ с использованием эффекта направленного переизлучения обладает достаточно высокими выходными параметрами, однако сложен в практической реализации по технологии изготовления; направленный ответвитель на базе цилиндрических щелевых линий уступает по своим параметрам вышеописанным НО миллиметрового диапазона волн.

2. СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОТВЕТВИТЕЛЯ НА ДИФРАКЦИОННОЙ СВЯЗИ

На рис. 2а показаны общий вид НО и схема его реализации на базе плоскоцилиндрического ОВ (рис. 2б). В зависимости от требований, предъявляемых к устройству, возможен также вариант выполнения обеих зеркал плоской или цилиндрической конфигурации [16]. Например, при выполнении НО по планарной технологии предпочтительно использовать плоские отражатели и решетки, нанесенные на диэлектрик.

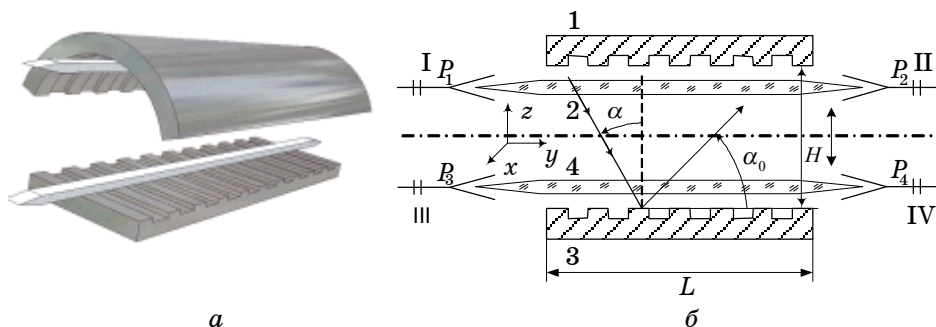


Рисунок 2 – Направленный ответвитель на базе плоскоцилиндрического открытого волновода: общий вид (а); сечение вдоль продольной оси (общая схема построения ответвителя) (б)

Основной тракт НО образован дифракционной решеткой (ДР) 1, вдоль продольной оси которой на расстоянии a расположен диэлектрический волновод 2. Аналогичным образом выполнен вторичный тракт, который также состоит из ДР (периодической структуры) 3 и ДВ 4. Дифракционные решетки нанесены на поверхности зеркал плоской или

цилиндрической формы с апертурой D , оси которых расположены параллельно на расстоянии H и образуют квазиоптическую линию передачи, формирующую пучок пространственных волн. Один из излучателей системы установлен с возможностью плавного перемещения вдоль оси z , что позволяет изменять расстояние H с погрешностью $\pm 0,1$ мм и корректировать фазовые характеристики волн.

Принцип работы НО с дифракционной связью основан на возбуждении синфазных и противофазных пространственных волн. В результате распространения этих волн вдоль продольной оси НО происходят обмен энергией между излучателями и ответвление части мощности во вторичный канал. Подробно результаты теоретических и экспериментальных исследований преобразования волн ДВ в пространственные и пространственных в поверхностные на периодических структурах изложены в [17]. Остановимся на особенностях волновых процессов в предложенном квазиоптическом НО (рис.2). При подаче на вход I СВЧ сигнала в диэлектрическом волноводе 2 распространяется неоднородная замедленная волна, которая рассеивается на решетке 1. При этом возникает поле дифракции, которое представляет собой суперпозицию плоских волн, часть из которых уходит в объем НО под углами α в виде спектра пространственных волн (рис. 2), а остальные локализованы вблизи решетки в виде спектра медленных гармоник, распространяющихся к выходу волновода 2. Угол излучения пространственных волн определяется соотношением [17]:

$$\alpha = \arccos(1/\beta_e + n/k), \quad (1)$$

где $\beta_e = v_e/c$ - относительная скорость волны в диэлектрическом волноводе; v_e - фазовая скорость волны; c - скорость света; $n = -1, -2, \dots$ - номер пространственной гармоники излучения; $k = l/\lambda$ - волновое число; l - период структуры; λ - длина волны излучения.

Преобладания того или иного типа волн можно добиться путем выбора параметров излучателя: периода решетки, скорости волны в волноводе и прицельного параметра a (расстояния ДВ-ДР). Второй этап возбуждения системы заключается в падении сформированной под углом пространственной волны на структуру 3. В результате дифракции полное поле над ДР состоит из суммы падающего и пространственных гармоник рассеянного поля. Если $l < \lambda/(1 + \sin \alpha)$, то отражаться от решетки 3 под углом $\alpha_0 = 90^\circ - \alpha$ будет только нулевая пространственная гармоника, а остальное поле представляет собой суперпозицию поверхностных пространственных гармоник, распространяющихся вдоль решетки с фазовыми скоростями:

$$v_\phi = kc/(n + k \sin \alpha). \quad (2)$$

При $v_\phi \approx v_e$ в диэлектрическом волноводе 4 также возбуждается неоднородная замедленная волна, которая на периодической структуре 3 трансформируется в пространственную волну. При последовательном преобразовании поверхностных волн в пространственные и пространственных в поверхностные вдоль оси отражателей направленного ответвителя формируются синфазные и противофазные волны, в результате интерференции которых часть падающей и отраженной мощности ответвляется во вторичный тракт.

3. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОТВЕТВИТЕЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Геометрические размеры предложенного НО выбираются из следующих неравенств:

$$\frac{d^2}{H\lambda} \ll \left(\frac{H}{d}\right)^2; \quad L/\lambda \geq 10; \quad 4 < 2R < 6, \quad (3)$$

где H и L соответственно расстояние между зеркалами и их длина; $d = D/2$ - радиус апертуры зеркал излучателей (расстояние от продольной оси системы до периферии зеркал). R - радиус кривизны цилиндрического зеркала.

Выполнение первого неравенства позволяет представить поле исследуемой системы в виде параксиальных волновых пучков (рис. 2б), во многом аналогичных плоской волне [7]. Второе неравенство сводит к минимуму проявление резонансных явлений вдоль продольной оси y , третье неравенство получено эмпирически и определяет оптимальные интервалы значений R при фокусировке квазиоптического волнового пучка цилиндрическим зеркалом [16]. Период структуры l выбирается из соотношения (1) для заданных значений λ, n, β_e и α . Значения прицельного параметра $a < \lambda$ корректируются экспериментально, путем исследования пространственных характеристик излучающих систем по критерию минимального паразитного воздействия ДВ на поле периодической структуры [16].

Приведем пример выбора параметров направленного ответвителя и его элементов в диапазоне частот $f = 30 - 37$ ГГц, который построен на базе излучателей с периодическими структурами типа «гребенка». В качестве источника поверхностной волны использовался полистироловый волновод сечением $7,2 \times 3,4$ мм², который на длине волны $\lambda = 9$ мм обеспечивал относительную скорость $\beta_e \approx 0,9$. Основной лепесток диаграммы излучения ($n = -1$) пространственной волны формировался под углом $\alpha \approx 70^\circ$, что из соотношения (1) соответствовало значению $l = 11,5$ мм. Длина волновода $L = 150$ мм и радиусы излучающих апертур $d = 30$ мм обеспечивали выполнение условий (3), а значение $R = 25$ мм - оптимальную фокусировку квазиоптического волнового пучка вдоль оси НО.

Экспериментальные исследования макета НО проводились на специально разработанной установке [18] путем измерения диаграмм направленности излучающих систем и их ближних полей, а также волноводных характеристик как отдельных элементов НО, так и всей системы в целом. Кроме того, механическая часть установки, содержащая специальные юстирующие устройства, позволяла перемещать излучатели НО в трех плоскостях с точностью $\pm 0,1$ мм и менять в широких пределах значения a и H , что позволяло настраивать ответвитель на оптимальные значения выходных параметров.

В качестве примера приведем основные характеристики НО, аналогичные графикам рис. 1 для системы на диэлектрических волноводах. В частности, на рис. 3 представлены основные характеристики НО на дифракционной связи. Из сравнения графиков рис. 1а и рис. 3а следует, что предложенный НО является более широкополосным, чем ответвитель на связанных ДВ, и по своим параметрам не уступает ответвителю на эффекте переизлучения (рис. 3б):

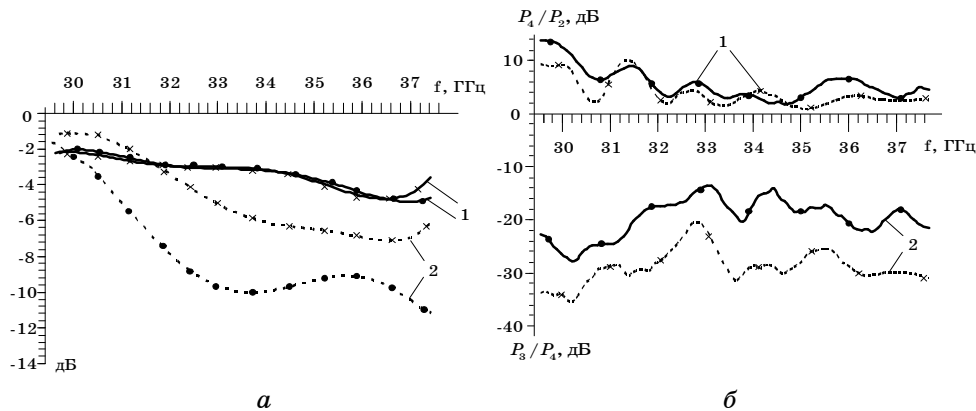


Рисунок 3 – Основные характеристики ответвителя на дифракционной связи для двух расстояний между зеркалами: зависимости передаваемой (1) и ответвленной (2) мощностей в заданном диапазоне частот (а); зависимости переходного ослабления (1) и направленности (2) ($H = 65$ мм – точки, $H = 80$ мм – крестики) (б)

В частности, при расстояниях между излучателями $H = 65$ мм для заданного интервала частот $\Delta f = 7$ ГГц значения коэффициента ослабления (P_4/P_2) находятся в пределах 3-12 дБ, а коэффициенты направленности (P_3/P_4) – в интервале 15-25 дБ. Улучшения выходных характеристик НО можно достигнуть путем корректировки фазы распространяющихся вдоль оси ОВ волн путем изменения H , что продемонстрировано графиками на рис. 3б: $P_4/P_2 \approx 3-7$ дБ, $P_3/P_4 \approx 30$ дБ.

Установлено, что квазиоптические волновые свойства исследуемой системы сохраняются в интервале значений $H = 5 - 10\lambda$, для которого выполняется первое из неравенств (3).

В частности, на рис. 4 проиллюстрированы относительные зависимости уровней мощности $P_4/P_{4\max} = f(H)$ и $P_3/P_{4\max} = f(H)$, регистрируемых в плечах III и IV (1 - плечо IV, 2 - плечо III на рис. 2). Из графиков видно, что оптимальными с точки зрения развязки ответвленного и отраженного сигналов являются значения $H = 60 - 90$ мм. При значениях $H > 10\lambda$ происходит рост дифракционных потерь и система становится критичной к юстировке зеркал.

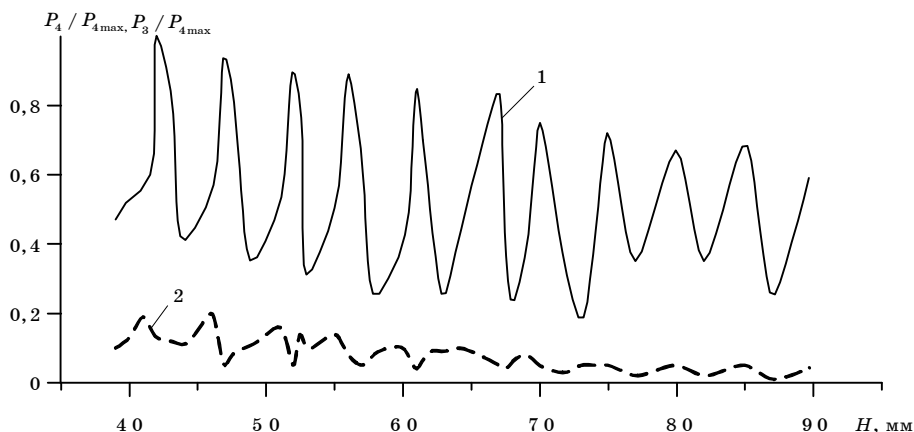


Рисунок 4 - Относительные значения уровней мощности во вторичном канале с изменением расстояния между зеркалами: 1 - $P_4/P_{4\max}$; 2 - $P_3/P_{4\max}$; $P_{4\max}$ - максимальное значение мощности поступающей во вторичный канал

ВЫВОДЫ

1 В работе проведен краткий анализ существующих типов направленных ответвителей и показано, что в силу физических и технологических причин при продвижении в субмиллиметровый диапазон области их применения ограничены.

2 На базе нерегулярного открытого волновода рассмотрена конструкция НО, использующая принцип дифракционной связи двух излучающих апертур, которые образованы дифракционными решетками и линиями передачи поверхностной волны в виде диэлектрических волноводов.

3 Представлена методика эмпирически-физического подхода по выбору параметров НО, которая базируется на подходах квазиоптики.

4 Экспериментально в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн показано, что предложенный НО по своим выходным параметрам и функциональным возможностям превосходит существующие типы ответвителей на диэлектрических волноводах с распределенной и локальной связью, направленным переизлучением во вторичный канал.

5 Основным преимуществом ответвителя на дифракционной связи является возможность плавной регулировки переходного ослабления путем изменения расстояния между излучающими апертурами в пределах 3-10 дБ при направленности порядка 30 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумная СВЧ-электроника: Сборник обзоров. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. – 160 с.
2. Миллиметровые и субмиллиметровые радиоволны: Электровакуумные приборы, газовая и лучевая спектроскопия, элементы и устройства сверхпроводниковой электроники / Р.П. Быстров, А.П. Выставкин, М.Б.Голант и др. // Зарубежная радиоэлектроника.– 1997.– №11.– С.3–31.
3. Материалы 18-й Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии».– Севастополь: Вебер, 2008. – Т.2.– 836 с.
4. Голант М.Б., Бобровский Ю.Л. Генераторы СВЧ малой мощности. Вопросы оптимизации параметров.– М.: Сов. радио, 1977.– 336с.
5. Лампы бегущей волны. Коллекторы, выводы энергии, поглощающие устройства, вопросы технологии, схемные вопросы, работы зарубежных фирм в области создания ЛВВ: Обзоры по электронной технике. Серия 1; Электроника СВЧ / Л.Ф. Тесленко, А.В. Иванова и др.– М.: ЦНИИ "Электроника", 1990.– 92 с.
6. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / А.Я. Усиков, Э.А. Канер, И.Д. Трутень и др. –К: Наук. думка, 1986.– 368 с.
7. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
8. Техника субмиллиметровых волн / Р.А. Валитов, С.Ф. Дюбко, В.В. Камышан и др.; Под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио, 1969. – 480 с.
9. Шестопапов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т.1.: Открытые структуры. – К.: Наукова думка, 1985. – 216 с.
10. Perspectives of application of new modifications of resonant quasi-optical structures in ENF equipment and electronics / G.S. Vorobyov, M.V. Petrovsky, A.I. Ruban, V.O. Zhurba at al. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – №66(20). – P. 1839 – 1862.
11. Фельдштейн А.П., Явич П.Р., Смирнов В.Л. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 359 с.
12. Конструирование экранов и СВЧ - устройств / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др.; Под ред. А.М. Чернушенко. - М: Радио и связь, 1990 - 352с.
13. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Р.А. Валитов, С.Ф. Дюбко, Б.И. Макаренко и др.; Под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984.– 296с.
14. Распределенная связь разных диэлектрических волноводов/ В.Ф. Взятыхшев, А.П. Меркурьев, Г.П. Раевский и др. // Труды МЭИ. – 1974. – Вып. 194. – С. 59-65.
15. Шестопапов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т.2. Источники. Элементная база. Радиосистемы. – Киев: Наук. думка, 1985 – 256 с.
16. Воробьев Г.С., Журба В.О., Кривец А.С., Крутько Ю.А., Рыбалко А.А. Экспериментальное моделирование волновых процессов в открытом волноводе с фазовой коррекцией зеркал // Всеукраинский межведомственный научно – технический сборник "Радиотехника". – 2008. - №153. – С. 65 – 73.
17. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. Шестопапова В.П.– Киев: Наук. думка, 1991.– 320 с.

18. Экспериментальное моделирование волновых процессов в усилителе на эффекте Смита-Парселла / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский и др. // Вісник СумДУ. – 2002. – №5(38) – 6(39). - С. 117-124.

Воробьев Г.С., доктор физ.-мат. наук, профессор;
Журба В.О., аспирант кафедры физической
электроники;

Петровский М.В., младший научный сотрудник
кафедры физической электроники;

Рыбалко А.А., аспирант кафедры физической
электроники;

Шульга Ю.В., студент

Поступила в редакцию 16 декабря 2008 г.