

**О ПРИМЕНИМОСТИ ВЕКТОРНОЙ ТЕОРИИ СФЕРОИДАЛЬНЫХ
ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИХ РЕЗОНАНСНЫХ И
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, Ю.А. Крутько,
В.А. Зленко, Ю.В. Шульга**
*Сумский государственный университет,
ул. Р.-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007*

На основании векторной теории ОР и экспериментальных исследований, изучены особенности электродинамических характеристик сфероидального и полусферического ОР, для конкретной геометрии зеркал. Сделаны выводы об адекватности используемой векторной теории ОР для описания эксперимента. Путем использования скалярной теории ОР, получены зависимости радиусов каустика полей основного типа колебания, при изменении расстояния между зеркалами, а также огибающих радиусов каустика полей между зеркалами ОР при фиксированном их положении, что позволило определить конкретные размеры апертур зеркал, которые могут быть использованы в эксперименте.

ВВЕДЕНИЕ

В технике и электронике миллиметровых и субмиллиметровых (МСМ) волн широкое применение нашли сфероидальные и полусферические открытые резонаторы (ОР), которые являются базовыми элементами многих измерительных и функциональных устройств [1-8]. Общие свойства таких ОР достаточно изучены в работах [2,3,9]. Однако при использовании ОР в качестве колебательных систем реальных технических устройств и электровакуумных приборов МСМ волн актуальной является задача идентификации для заданного диапазона частот, экспериментальных данных с теоретическими оценками основных электродинамических характеристик таких систем (резонансных и спектральных характеристик, амплитудного распределения полей в объеме и на зеркалах ОР). Такие исследования являются базовыми при изучении волновых процессов в ОР с металлодиэлектрическими неоднородностями, введенными в их объем [7,10-13].

Целью данной работы является оценка возможности применения векторной теории ОР [14] при описании экспериментальных исследований резонансных и спектральных характеристик сфероидальных и полусферических ОР миллиметрового диапазона волн.

В данной работе, для конкретной геометрии зеркал и заданного диапазона частот (69 – 79 ГГц) проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования сфероидальных и полусферических ОР. Показано, что векторная теория ОР может быть использована при анализе и оценке достоверности данных экспериментальных результатов исследований таких устройств.

1 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемые в работе ОР схематично приведены на рис. 1. В эксперименте и при теоретических расчетах сфероидальный ОР был образован сферическими зеркалами с радиусом кривизны $R = 190$ мм и апертурой $A = 60$ мм. Полусферический ОР содержал сферическое ($R = 190$ мм) и плоское зеркала. Для ввода и вывода энергии использовались волноводные переходы, сопряженные через щель связи в зеркалах с резонансным пространством ОР. Приведенные на рис. 1

системы, исследовались как теоретически, так и экспериментально в диапазоне частот $f = 69 - 79$ ГГц.

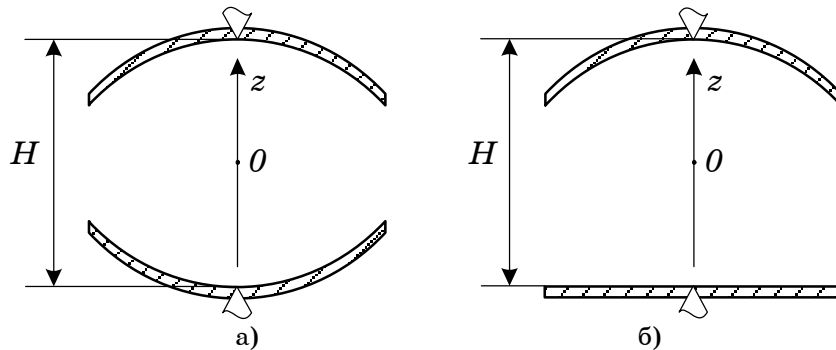


Рисунок 1 – Исследуемые открытые резонаторы

Для определения особенностей приведенных на рис. 1 открытых резонаторов, по стандартным методикам [9,15,16], исследовались спектры колебаний и резонансные кривые ОР. При этом, основой при проведении экспериментальных исследований являлись расчеты резонансных частот по векторной теории ОР.

2 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ

В работах [14, 17, 18] представлена векторная теория сфероидального ОР, основанная на концепции комплексного точечного источника. На ее основе для сфероидального ОР с гладкими зеркалами при условии, что радиусы кривизны зеркал резонатора имеют одинаковые значения $R_1 = R_2 = R$, получена точная формула резонансной частоты основной моды TEM_{00q} колебания [14]

$$f = \left(\frac{c}{2H} \right) \left[q + 1 + \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) - \frac{1}{2} \pi k R \right], \quad (1)$$

где c – скорость света; H – расстояние между зеркалами; q – продольный индекс колебаний; R – радиус кривизны зеркал; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – длина волны колебания.

По существующему определению [2] радиус каустики поля представляет собой расстояние от центра отражателей, на котором поле основного типа колебания уменьшается по экспоненциальному закону в e раз. Известно, что если размер каустики поля на плоском зеркале полусферического резонатора значительно меньше его диаметра, то такие резонаторы могут быть с большой степенью точности заменены эквивалентными сфероидальными резонаторами с удвоенным расстоянием между зеркалами, при этом распределения амплитуд в обоих типах резонаторов практически идентичны.

Величины радиусов каустик полей сфероидального ОР при условии $R_1 = R_2 = R$, что соответствует эксперименту, в центральной плоскости $z = 0 - w_0$, и в произвольной плоскости $z - w$, определяются выражениями [14]:

$$w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right) \sqrt{H(2R-H)}, \quad w^2 = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right), \quad (2)$$

где $z_0 = \frac{\pi w_0}{\lambda}$ – характеристическая длина.

Равенство (2) определяет размер радиуса каустики поля на зеркалах при условии, что $z = \pm \frac{H}{2}$.

На основании формулы (1), для используемых в эксперименте радиусов кривизны зеркал $R = 190$ мм, рассчитаны спектры резонансных частот базовых сферoidalного и полусферического ОР для основного TEM_{00q} типа колебания, которые представлены на рис. 2 (левая и правая шкалы на графике соответствуют расстояниям между зеркалами сферoidalного – $H_{сф}$ и полусферического – $H_{нсф}$ резонаторов).

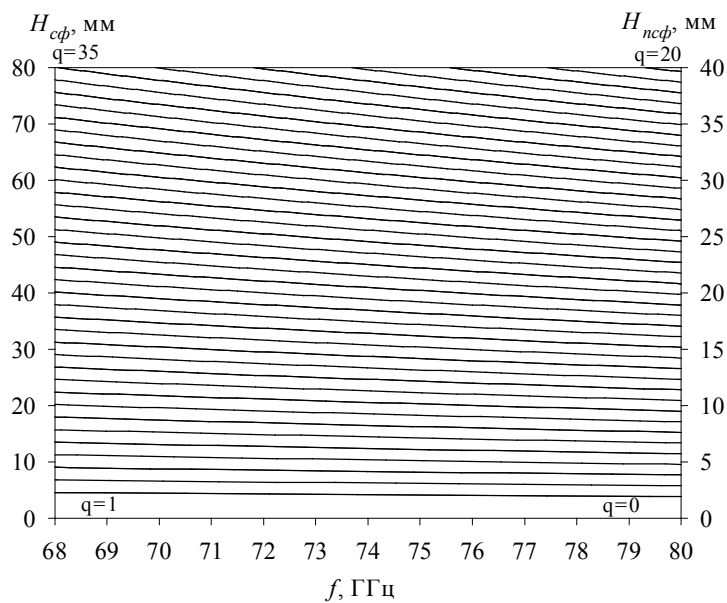


Рисунок 2 – Спектр резонансных частот базовых сферoidalного и полусферического ОР для заданных радиусов кривизны зеркал

Ход зависимостей рис. 2 показывает, что при малых расстояниях между зеркалами, лежащих в районе $H \approx 0 - 0,1R_{сф}$, крутизна перестройки сферoidalного резонатора, посредством перемещения зеркал системы, в несколько раз больше чем в интервале $H \approx R_{сф} - 2R_{сф}$. В частности, это объясняется тем, что ход спектральных кривых при малых H становится практически параллельным частотной оси f для значений $q \approx 0 - 5$. Увеличение H при $f = \text{const}$ приводит к возбуждению типов колебаний с более высокими индексами q . Причем большим значениям H соответствуют большие значения $\Delta H = H_{q+1} - H_q$, определяющие интервал в изменении расстояния между зеркалами для возбуждения колебаний с соседними индексами. Сравнение спектров сферoidalного и полусферического ОР (рис. 2) показывает, что они являются идентичными, когда расстоянию между зеркалами

полусферического ОР, соответствует удвоенное расстояние между зеркалами сфероидального ОР. Однако индексам колебаний $q = 0, 1, 2 \dots$ полусферического ОР соответствуют только нечетные типы колебаний $q = 1, 3, 5 \dots$ сфероидального ОР, так как для них электрическое поле равно нулю в центральной плоскости между зеркалами. Крутизна перестройки полусферического ОР, посредством перемещения зеркал, в два раза больше чем для эквивалентного сфероидального ОР.

Используя (2) на рис. 3 для сфероидального ОР с параметром $R_{сф} = 190$ мм при $f = 77$ ГГц приведены зависимости величин радиусов

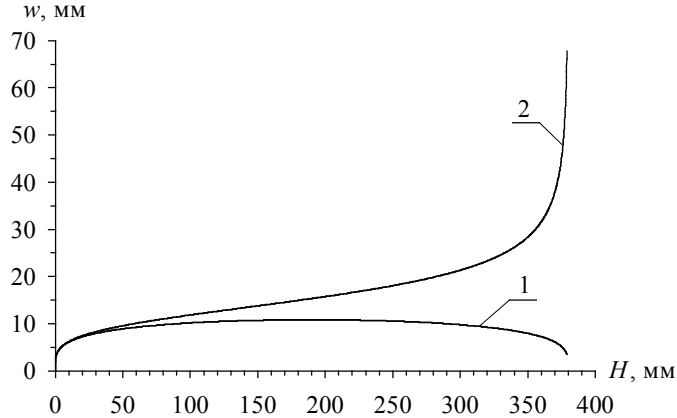


Рисунок 3 – Зависимости радиусов каустик полей сфероидального ОР от расстояния между зеркалами:

1 – радиус каустики поля в плоскости $z = 0$ (w_0);

2 – радиус каустики поля в плоскости $z = \pm \frac{H}{2}$ (w)

каустик полей ОР в плоскости $z = 0$ и в плоскости $z = \pm \frac{H}{2}$ при изменении расстояния между зеркалами в интервале $0 < H < 2R_{сф}$, что соответствует условию „устойчивости” резонатора [2]. На рис. 4 представлены зависимости величин каустик полей для значений вышеуказанных геометрических параметров ОР.

Анализ графиков 1,2 рис. 3 и графиков рис. 4 показывает, что увеличение H приводит к увеличению объема резонатора, занятого электромагнитным полем, что определяется увеличением параметров w и w_0 . Причем их увеличение на интервале $0 < H \leq R_{сф}$ происходит синфазно. Когда $H = R_{сф}$ для кривой 1 на рис. 3 наблюдается максимум, а для кривой 2 – точка перегиба, которая соответствует конфокальному ОР. При этом размеры каустики поля на зеркале в интервале $0 < H \leq R_{сф}$ незначительно превышают размеры каустики поля в центральной плоскости между зеркалами ОР. Дальнейшее увеличение расстояния между зеркалами $R_{сф} < H < 2R_{сф}$ приводит к неограниченному увеличению размера каустики поля на зеркале, с одновременным уменьшением до нуля радиуса каустики поля в центральной плоскости между зеркалами. Данный факт необходимо учитывать в реальных ОР при выборе рабочих расстояний между зеркалами, так как они имеют ограниченную апертуру. Так, например, вплоть до значений $H \approx 1,8R_{сф}$

каустика поля не превышает размер используемой в эксперименте апертуры зеркала $A = 60$ мм, о чем свидетельствует рис. 4в. Известно [9], что если размер каустики поля на плоском зеркале значительно меньше его диаметра (апертуры), то полусферический резонатор может быть с большой степенью точности заменен эквивалентным сферoidalным ОР с удвоенным расстоянием между зеркалами. При этом распределения амплитуд в обоих типах резонаторов будут практически идентичными, что подтверждается, приведенными на рис. 2, спектральными характеристиками.

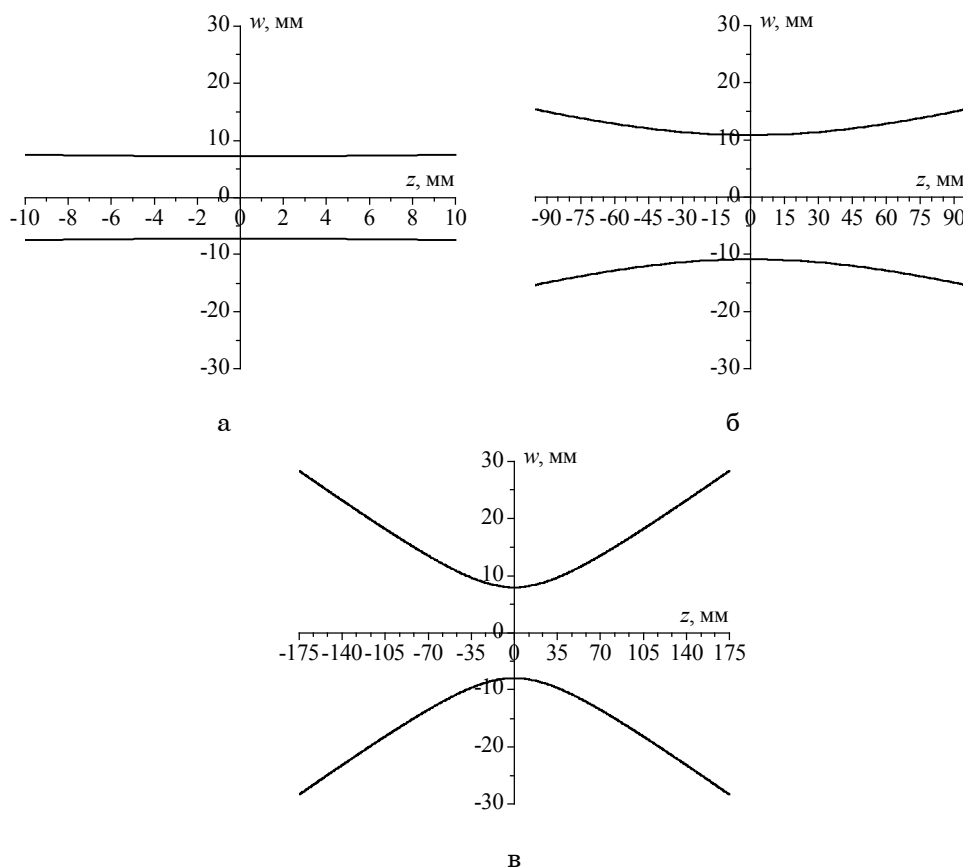


Рисунок 4 – Распределения каустик полей в сферoidalном ОР:
 а) – $H = 20$ мм; б) – $H = 190$ мм; в) – $H = 350$ мм

3 СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Согласно методике экспериментальных исследований, изложенной в [2,9], для определения особенностей электродинамических характеристик сферoidalного и полусферического ОР, исследовались их спектры колебаний и резонансные кривые.

Экспериментально полученные спектры резонансных частот ОР, при изменении расстояния между зеркалами, позволили определить для конкретной геометрии зеркал количество TEM_{mnp} типов колебаний, возбуждаемых в заданном диапазоне длин волн. При этом идентификация типов колебаний осуществлялась путем сравнительного анализа эксперимента с векторной теорией ОР [14]. В частности, на

рис. 5, для указанной выше геометрии зеркал, представлен экспериментально полученный спектр резонансных частот сферoidalного ОР, который коррелирует с теоретическими зависимостями, вычисленными аналитически с использованием вышеописанной векторной теории.

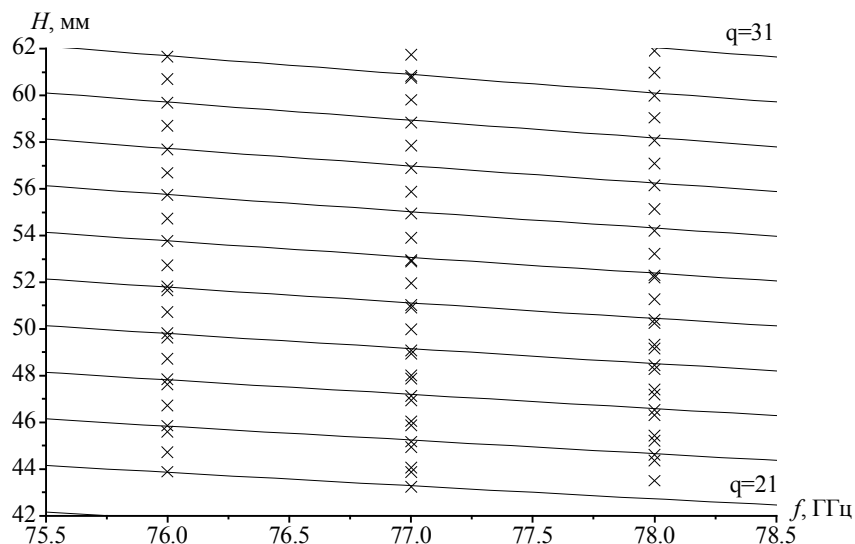


Рисунок 5 – Спектр резонансных частот базового сферoidalного ОР:
 × эксперимент; — теория

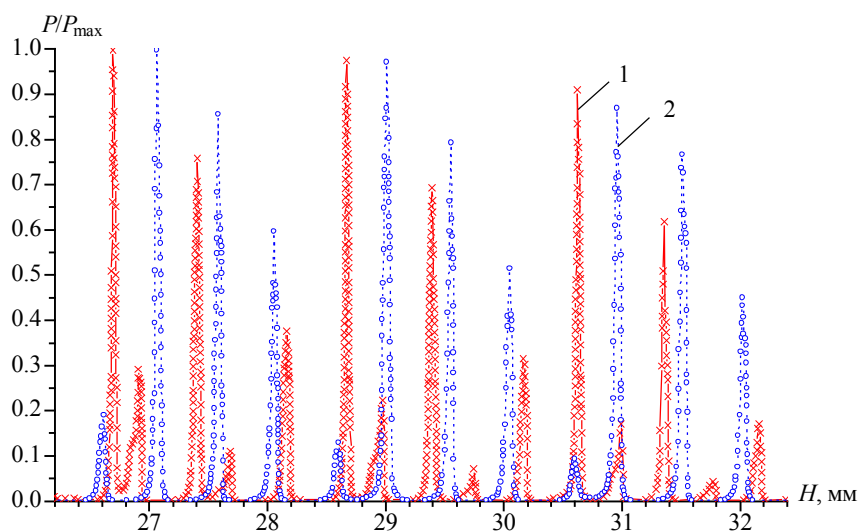


Рисунок 6 – Экспериментальный спектр колебаний открытых резонаторов:
 1 – сферoidalный ОР; 2 – полусферический ОР

На рис. 6 приведены типичные спектры колебаний сферoidalного и полусферического ОР на частоте $f = 77$ ГГц (P/P_{\max} – относительные значения мощности колебаний). Они характеризуют возможность возбуждения в данной резонансной системе ограниченного количества типов колебаний, основным из которых является TEM_{00q} – тип. Из

графиков рис. 5, 6 видно, что колебания основного типа TEM_{00q} существуют во всем интервале частот при изменении расстояния между зеркалами H . Установлено, что с изменением частоты возбуждения ОР его свойства качественно не изменяются: с уменьшением частоты f увеличиваются резонансные значения H , а с увеличением частоты происходит обратный процесс.

Результаты измерения резонансных кривых показали, что для сфероидального и полусферического ОР в интервале значений $H = 22 - 65$ мм, в заданном диапазоне частот, присутствуют высокодобротные колебания $Q \geq 1000$, которые соответствуют TEM_{00q} моде. Исследование резонансных кривых сфероидального и полусферического ОР, для фиксированных значений H показало, что такие резонаторы имеют дискретный спектр резонансных частот и соответствующие им собственные колебания с малыми потерями на излучение в свободное пространство. С увеличением расстояния между зеркалами наблюдается уменьшение ширины резонансных кривых с одновременным уменьшением числа высших типов колебаний, что свидетельствует о повышении добротности основных типов колебаний в 1.5 раза за счет увеличения резонансного объема, а также увеличения потерь высших типов колебаний. Известно, что если радиус апертуры зеркала равен удвоенному радиусу волнового пучка на поверхности зеркала w , то дифракционными эффектами можно пренебречь. Однако зеркала, имеющие апертуру, размеры которой достаточны для предотвращения потерь основной моды, могут дать существенное понижение добротности мод высших порядков при дифракционном затухании. Резонансные кривые исследуемых ОР, вблизи резонансной частоты, указывают на симметричное их поведение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании векторной теории ОР и экспериментальных исследований, изучены особенности электродинамических характеристик сфероидального и полусферического ОР для конкретной геометрии зеркал. Сделаны выводы об адекватности используемой векторной теории ОР для описания эксперимента. Путем использования скалярной теории ОР получены зависимости радиусов каустик полей основного типа колебания, при изменении расстояния между зеркалами, а также огибающих радиусов каустик полей между зеркалами ОР при фиксированном их положении, что позволило определить конкретные размеры апертур зеркал, которые могут быть использованы в эксперименте.

SUMMARY

ABOUT APPLICABILITY OF VECTORIAL THEORY OF THE SPHEROIDAL OPEN RESONATORS AT ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THEIR RESONANCE AND SPECTRAL DESCRIPTIONS

*G.S. Vorobjov, M.V. Petrovsky, Y.A. Krutko, V.A. Zlenko, Y.V. Shulga
Sumy State University, R.-Korsakova Str., 2, Sumy, 40007*

On the basis of the vectorial theory OR and experimental researches, the features of electrodynamic descriptions of spheroidal and hemispheric OR are studied, for concrete geometry of mirrors. Conclusions about adequacy of the used vectorial theory of OR for description of experiment are done. By the use of the scalar theory of OR, dependences of radiuses of caustic of the fields of basic type of oscillation at the change of distance between mirrors, and also rounding radiuses of caustic of the fields between the OR mirrors at fixed their position are got, that allowed to define the concrete sizes of apertures of mirrors which can be used in the experiment.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
2. 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.
3. Шестопапов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники: В 2 т. – К.: Наукова думка, 1985. – Т.1.: Открытые структуры. – 216 с.
4. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции. Электроника СВЧ. – М.: Радио и связь, 1995. – 600 с.
5. Диплексер на основе открытого резонатора с гофрированными зеркалами / Ю.И. Кошуринов, В.Г. Павельев, М.И. Петелин и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т.31, Вып. 16. – С. 73 – 79.
6. Квазиоптическая резонансная система для твердотельного генератора А.В. Архипов, О.И. Белоус, И.К. Кузьмичев, А.С. Тищенко // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2005. – Т.10, № 2. – С. 166 – 171.
7. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Журба В.О. Резонансные квазиоптические структуры в технике и электронике КВЧ (обзор) // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – № 6(90). – С. 5 – 21.
8. Открытые резонаторы для измерения малых диэлектрических потерь / С.Н. Власов, Е.В. Копосова, С.Е. Мясникова, В.В. Паршин // ЖТФ. – 2002. – Т.72, Вып. 12. – С. 79 – 87.
9. Шестопапов В.П. Дифракционная электроника. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1976. – 232 с.
10. Моделирование черенковского и дифракционного излучений на периодических металлодиэлектрических структурах (обзор) / Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский, А.И. Рубан, А.И. Цвык // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – №10(56). – С. 110 – 130.
11. О возможности применения периодических металлодиэлектрических структур в электронике КВЧ / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.С. Кривец, А.И. Цвык // 14-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2004). – Севастополь: Вебер, 2004. – С. 211 – 212.
12. Перспективы использования пространственно-развитых резонансных структур в дифракционной электронике / Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, В.О. Журба, Ю.А. Крутько // 15-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо’2005). – Севастополь: Вебер, 2005. – С. 265 – 266.
13. Воробьев Г.С., Петровский М.В., Кривец А.С. О возможности применения квазиоптических открытых резонансных металлодиэлектрических структур в электронике КВЧ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т.49, №7. – С. 56 – 61.
14. Cullen A.L. Millimeter-wave open-resonator techniques // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1983. – Vol.10. – P. 233–281.
15. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника / Под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
16. Вальднер О.А., Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот: Учебная лаборатория. – М.: Атомиздат, 1974. – 232 с.
17. Cullen A.L., Yu P.K. The accurate measurement of permittivity by means of an open resonator // Proceedings of the Royal Society of London. – 1971. – A 325. – P. 493 – 509.
18. Yu P.K., Cullen A.L. Measurement of permittivity by means of an open resonator I. Theoretical // Proceedings of the Royal Society of London. – 1982. – A 380. – P. 49 – 71.

Воробьев Г.С., декан физико-технического факультета СумГУ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники СумГУ;

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

Крутько Ю.А., ведущий инженер кафедры физической электроники СумГУ;

Зленко В.А., студент кафедры физической электроники СумГУ;

Шульга Ю.В., студент кафедры физической электроники СумГУ

Поступила в редакцию 26 марта 2007 г.