

# Способ формирования вихревого поля СВЧ-диапазона

Д.А. Полетаев<sup>1</sup>, Б.В. Соколенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского,  
295007, Россия, г. Симферополь, пр. Вернадского, 4

## Аннотация

Предложена структура в виде неоднородности на торце круглого волновода, предназначенная для формирования вихревого поля СВЧ-диапазона. Проводится построение ее численной модели. Проведенные численные эксперименты подтверждают возможность формирования вихревого поля СВЧ-диапазона на предложенной структуре. В работе также выбран наиболее целесообразный материал для изготовления неоднородности на торце круглого волновода.

**Ключевые слова:** волновод, ближняя зона, дальняя зона, численное моделирование.

**Цитирование:** Полетаев, Д.А. Способ формирования вихревого поля СВЧ-диапазона / Д.А. Полетаев, Б.В. Соколенко // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1084-1087. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1084-1087.

## Введение

Вихревая пространственно-временная структура характерна для многих физических процессов. В настоящее время внимание исследователей, работающих в области лазерной физики и когерентной оптики, привлекли световые поля с винтовыми возмущениями волнового фронта. Такие возмущения обуславливают вихревой характер распространения световой энергии – оптические вихри. Данные физические явления успешно применяются для манипуляции микро- и нанообъектами, осуществления дальней связи, зондирования атмосферы и объектов [1, 2].

Электромагнитные волны терагерцового и СВЧ-диапазона по своим свойствам во многом схожи со световыми: так же характеризуются вектором Пойнтинга и угловым моментом.

Существует ряд статей об успешном формировании вихревых полей терагерцового и СВЧ-диапазона [3–7]. В [3] описывается спиральная антенна, которая позволяет осуществить необходимую деформацию волнового фронта. Однако недостатком данного метода является невозможность получения значительной мощности вихревого поля. В работах [4–5] теоретически и экспериментально исследуется возможность формирования вихревого поля терагерцового диапазона на кремниевых элементах. Однако такие структуры сложны в изготовлении. В работе [6] рассматривается возможность формирования вихревого поля терагерцового диапазона на кристалле ZnTe. Вместе с тем авторы статьи [6] отмечают сложность такой системы, работающей в широком диапазоне длин волн, из-за нелинейных свойств используемого кристалла. В работе [7] отмечается возможность формирования вихревого поля терагерцового диапазона на системе, использующей жидкокристаллическую структуру. Однако данный способ не позволяет получить значительную мощность вихревого поля.

Актуальной задачей является предложение простой структуры для формирования вихревого поля СВЧ-диапазона значительной мощности.

Целью работы является теоретический анализ возможности формирования вихревого поля СВЧ-

диапазона на структуре, в виде неоднородности на торце круглого волновода.

## 1. Теоретическая часть

В СВЧ-технике широко используются круглые волноводы. Наиболее интересным с физической точки зрения, в плане применения для формирования оптических вихрей, представляется тип волны Н01. Несомненным достоинством являются малые омические потери вследствие существования только радиальных токов в волноводе [8]. Однако существуют определенные трудности в возбуждении и обособлении данного типа колебания в волноводе. Электрические силовые линии волны Н01 в круглом волноводе представляют собой замкнутые окружности. Раскрыв круглого волновода с данным типом волны излучает в свободное пространство, то есть является простейшей антенной. Очевидно, данный способ не лишен недостатков. Однако на данном этапе анализируется сама возможность формирования вихревых полей с использованием круглого волновода.

При численном моделировании производится поиск полного распределения электромагнитных полей волновых уравнений методом конечных элементов [9]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \times \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} &= 0, \\ \nabla^2 \times \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряжённости электрического поля;  $k$  – комплексное волновое число;

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon};$$

$\omega$  – циклическая частота;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\mathbf{H}$  – вектор напряжённости магнитного поля.

Граничные условия имеют вид [9]:

$$\mathbf{E}_T = Z_s (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_T), \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}_T$  – тангенциальная к границе раздела компонента вектора напряженности электрического поля;  $\mathbf{H}_T$  – тангенциальная к границе раздела компонента вектора напряжённости магнитного поля;  $Z_s$  – импеданс на границе раздела;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к поверхности.

Вектор напряженности электрического поля, внешний к рассматриваемой поверхности, задается уравнением [9]:

$$\mathbf{E} = \int_S (\mathbf{E}_T \times \nabla G + \mathbf{E}_N \times \nabla G) dS, \tag{3}$$

где  $S$  – поверхность, через которую излучается электромагнитная энергия;  $\mathbf{E}_N$  – нормальная к поверхности компонента вектора напряженности электрического поля;  $G$  – функция Грина.

При моделировании пространство разбивается на тетраэдры, в вершинах которых рассчитываются значения электрического и магнитного полей [9]. Для установления факта наличия вихревого поля в СВЧ-диапазоне удобно использовать диаграммы направ-

ленности, подобно как для антенной техники. Они позволяют получить полную картину распределения поля в пространстве.

### 2. Результаты моделирования

В результате численного моделирования процесса излучения из круглого волновода (материал стенок волновода – серебро, толщина стенок – 1 мм, заполнение – воздух) радиусом 19,3 мм на частоте 10 ГГц построены диаграммы направленности, которые отображают модуль напряженности электрического поля в зависимости от углов сферической системы координат в ближней (20 мм) и дальней зонах, представленные на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

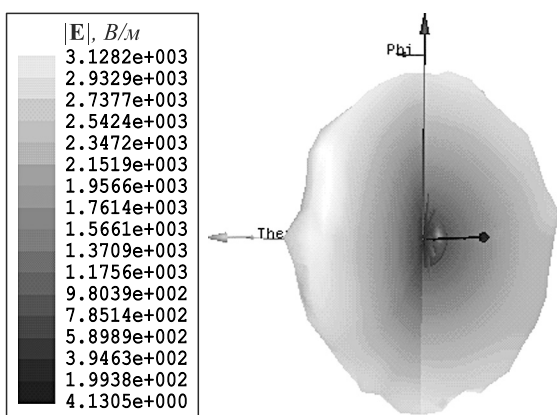


Рис. 1. Диаграмма направленности круглого волновода в ближней зоне

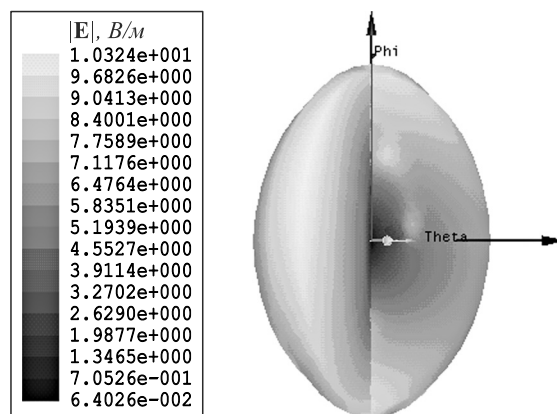


Рис. 2. Диаграмма направленности круглого волновода в дальней зоне

Как видно из графиков (рис. 1, 2), вихревое излучение волны типа Н01 из открытого торца круглого волновода на является вихревым. Требуется введение неоднородности с целью получения сдвига фаз волн, прошедших через неоднородность и свободное пространство без искажений. В качестве неоднородности может выступать диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon > 1$ . В ходе численных экспериментов были подобраны минимальные размеры неоднородности из слюды с  $\epsilon = 5,5$  (выбранной по причине возможности её работы при больших мощностях электромагнитного поля) на торце круглого волновода, формирующей вихревое поле СВЧ. Неоднородность выполнена в виде половины конуса радиусом 19,3 мм и высотой 1 мм (рис. 3).

Данная неоднородность позволяет сдвинуть фазу вектора электрического поля и внести винтовую дислокацию в структуру поля. Численное моделирование круглого волновода с радиусом 19,3 мм с половиной конуса из диэлектрика с  $\epsilon = 5,5$  на торце, частота 10 ГГц, позволяет построить следующие диаграммы направленности в ближней (20 мм) и дальней зонах (рис. 4, 5). Таким диэлектриком может быть слюда, имеющая низкий тангенс угла диэлектрических потерь и указанную относительную диэлектрическую проницаемость. Технология изготовления такого половинного конуса из слюды включает следующие операции: формирование целого конуса и разлом его

на две части. Такая технология оказывается более экономически выгодной по сравнению с технологией изготовления кремниевых элементов, для которых дополнительно требуются ресурсоёмкие процедуры очистки сырья [10].

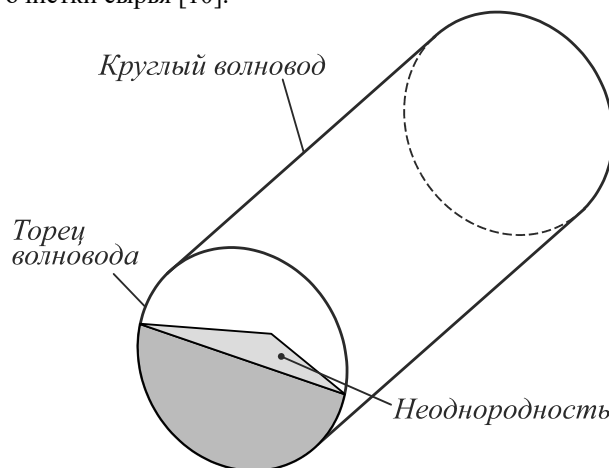


Рис. 3. Неоднородность на торце круглого волновода

Как видно из диаграмм (рис. 4, 5), круглый волновод с неоднородностью на торце позволяет сформировать вихревое поле в дальней зоне. Диаграмма (рис. 5) представляет собой спираль, что подтверждает наличие вихревого поля. Фаза электрического поля изменяется не только во времени, но и в пространстве.

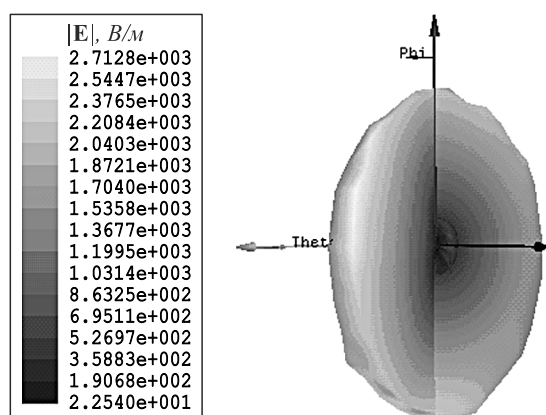


Рис. 4. Диаграмма направленности круглого волновода с неоднородностью на торце в ближней зоне

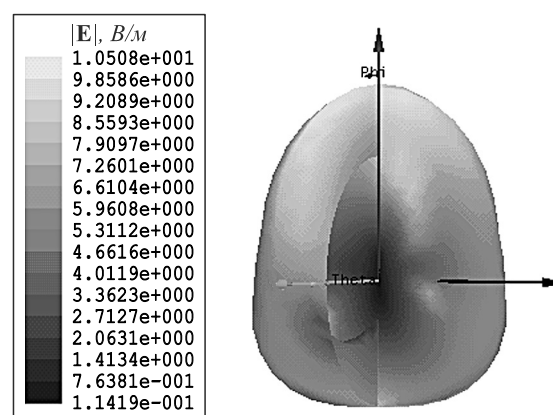


Рис. 5. Диаграмма направленности круглого волновода с неоднородностью на торце в дальней зоне

### Заключение

Проведённое численное моделирование подтверждает возможность формирования вихревого поля СВЧ-диапазона с помощью предложенной структуры в виде неоднородности на торце круглого волновода. В результате расчётов установлено распределение электрического поля в ближней и дальней зонах для предложенной структуры. В дальнейшем планируется провести дополнительную оптимизацию согласования волновых сопротивлений круглого волновода и свободного пространства, установить оптимальные геометрические соотношения конструктивных элементов, оценить энергию вихревого поля для СВЧ- и терагерцового диапазонов.

### Литература

1. **Короленко, В.П.** Оптические вихри / В.П. Короленко // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 94-99.
2. **Fadeyeva, T.A.** The vortex-beam ‘precession’ in a rotating uniaxial crystal / T.A. Fadeyeva, A.F. Rubass, B.V. Sokolenko, A.V. Volyar // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2009. – Vol. 11. – P. 343-354.
3. **Fabrizio, T.** Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test / T. Fabrizio // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – P. 120-134.

4. **Pavelyev, V.S.** Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation / V.S. Pavelyev, B.O. Volodkin, K.N. Tukmakov, B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1989. – 020025. – DOI: 10.1063/1.5047701.
5. **Choporova, Yu.Yu.** High-power Bessel beams with orbital angular momentum in the terahertz range / Yu.Yu. Choporova, B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, V.S. Pavelyev, M.A. Scheglov, N.A. Vinokurov, B.O. Volodkin, V.N. Zhabin // Physical Review A. – 2017. – Vol. 96, Issue 2. – 023846. – DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.
6. **Imai, R.** Generation of broadband terahertz vortex beams / R. Imai, N. Kanda, T. Higuchi, K. Konishi, M. Kuwata-Gonokami // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39, Issue 13. – P. 3714-3717.
7. **Ge, S.** Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal / S. Ge, P. Chen, Z. Shen, W. Sun, X. Wang, W. Hu, Y. Zhang, Y. Lu // Optics Express. – 2017. – Vol. 25. – P. 12349-12356.
8. **Chen, L.** Microwave electronics measurement and materials characterization / L. Chen, C. Ong, C. Neo. – New York: John Wiley & Sons, 2004. – 538 p.
9. **Itoh, T.** Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures / T. Itoh. – New York: John Wiley & Sons, 1989. – 820 p.
10. Physics and applications of terahertz radiation // ed. by M. Perenzoni, D. Paul. – New York: Springer; 2014. – 255 p.

### Сведения об авторах

**Полетаев Дмитрий Александрович**, кандидат физико-математических наук, 1984 года рождения, в 2006 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского по направлению подготовки «Радиофизика», работает доцентом кафедры радиофизики и электроники ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». Область научных интересов: СВЧ-техника, микроволновая диагностика, нанотехнологии, программирование, робототехника, оптика. E-mail: [poletaevda@cfiv.ru](mailto:poletaevda@cfiv.ru).

**Соколенко Богдан Валентинович**, кандидат физико-математических наук, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, работает в должности доцентом кафедры общей физики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». E-mail: [simplexx.87@gmail.com](mailto:simplexx.87@gmail.com).

ГРНТИ: 29.35.23

Поступила в редакцию 4 октября 2018 г. Окончательный вариант – 12 сентября 2019 г.

## A method for generating a microwave vortex field

*D.A. Poletaev<sup>1</sup>, B.V. Sokolenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 295007, Russia, Simferopol, 4 Vernadsky av.*

### Abstract

In this paper, we propose an on-end structure of a circular waveguide that forms a vortex field of the microwave range. We construct its numerical model. The numerical experiments conducted confirm the possibility of generating a microwave vortex field by means of the proposed structure. The best suitable material for fabricating this structure is also selected in the work.

**Keywords:** waveguide, near-field zone, far-field zone, numerical simulation.

**Citation:** Poletaev DA, Sokolenko BV. A method for generating a microwave vortex field. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1084-1087. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1084-1087.

### References

- |  |   |
|--|---|
| <p>[1] Korolenko P. Optical vortices [In Russian]. <i>Soros Educational Journal</i> 1998; 6: 94-99.</p> <p>[2] Fadeyeva TA, Rubass AF, Sokolenko BV, Volyar AV. The vortex-beam precession in a rotating uniaxial crystal. <i>J Opt A: Pure Appl Opt</i> 2009; 11: 343-354.</p> <p>[3] Fabrizio T. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test. <i>New J Phys</i> 2012; 14: 120-134.</p> <p>[4] Pavelyev VS, Volodkin BO, Tukmakov KN, Knyazev BA, Choporova YuYu. Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation. <i>AIP Conf Proc</i> 2018; 1989: 020025. DOI: 10.1063/1.5047701.</p> <p>[5] Choporova YuYu, Knyazev BA, Kulipanov GN, Pavelyev VS, Scheglov MA, Vinokurov NA, Volodkin BO, Zhabin VN. High-power Bessel beams with orbital angular mo-</p> | <p>mentum in the terahertz range. <i>Phys Rev A</i> 2017; 96(2): 023846. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023846.</p> <p>[6] Imai R, Kanda N, Higuchi T, Konishi K, Kuwata-Gonokami M. Generation of broadband terahertz vortex beams. <i>Opt Lett</i> 2014; 39(13): 3714-3717.</p> <p>[7] Ge S, Chen P, Shen Z, Sun W, Wang X, Hu W, Zhang Y, Lu Y. Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal. <i>Opt Express</i> 2017; 25: 12349-12356.</p> <p>[8] Chen L, Ong C, Neo C. <i>Microwave electronics measurement and materials characterization</i>. New York: John Wiley &amp; Sons; 2004.</p> <p>[9] Itoh T. <i>Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures</i>. New York: John Wiley &amp; Sons; 1989.</p> <p>[10] Perenzoni M, Paul D, eds. <i>Physics and applications of terahertz radiation</i>. New York: Springer; 2014.</p> |
|--|---|

### Author's information

**Dmitrii Alexandrovich Poletaev**, PhD (b. 1984) graduated from Taurida National V.I. Vernadsky University in 2006, works as an associate professor of Radiophysics and Electronics department Crimean Federal University (Simferopol). Research interests: microwave, microwave diagnostics, nanotechnology, programming, robotics, optics. E-mail: [poletaevda@cfuv.ru](mailto:poletaevda@cfuv.ru).

**Bogdan Valentinovich Sokolenko**, PhD (b. 1987), graduated from Taurida National V.I. Vernadsky University in 2010. Entered in postgraduate study in 2013 on speciality 01.04.05 "Optics", finished his education in 2013. He received the PhD degree in Physics in 2015. Candidate in Physics and Mathematics. He works on General Physics department of Institute of Physics and Technology of V.I. Vernadsky Crimean Federal University (Simferopol) as an associate professor. Also, he is researcher of Singular Optics laboratory at the area of microscopy, optical systems construction, anisotropic media and crystals. He is co-author of 14 papers indexed by Scopus and 3 inventions. E-mail: [simplexx.87@gmail.com](mailto:simplexx.87@gmail.com).

*Received October 4, 2018. The final version – September 12, 2019.*