

# Спектр собственных мод резонаторов поверхностной волны цилиндрической геометрии

Д.И. Соболев<sup>1,2</sup>, В.Ю. Заславский<sup>1,2</sup>, М.Д. Проявин<sup>1</sup>, В.Е. Котомина<sup>1</sup>, А.А. Орловский<sup>1</sup>,  
Н.С. Гинзбург<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

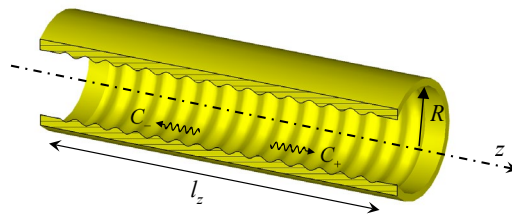
<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского

**Аннотация:** в работе представлены результаты исследований резонатора поверхностной волны Ка-диапазона, формируемых участками цилиндрических волноводов с однопериодической гофрировкой стенок. В рамках трехмерного FDTD-моделирования проведен анализ электродинамических характеристик резонаторов указанного типа. Результаты теоретического анализа достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами по измерению частотных зависимостей коэффициентов отражения. Для проведения «холодных» электродинамических тестов разработаны и изготовлены широкополосные волноводные преобразователи моды  $TE_{1,0}$  в моду  $TM_{0,1}$ .

**Ключевые слова:** поверхностная волна, черенковский генератор, миллиметровые волны

## 1. Введение

Перспективными источниками мощного коротковолнового излучения являются генераторы поверхностной волны (ГПВ), в которых прямолинейно движущийся релятивистский электронный пучок взаимодействует с медленной основной гармоникой волны, распространяющейся в периодической замедляющей системе и представляющую собой поверхностную волну, прижатую к замедляющей системе [1–5]. Важным обстоятельством при теоретическом анализе ГПВ является наличие продольных мод с частотами, сосредоточенными в окрестности коротковолновой границы полосы прозрачности, которая в свою очередь определяется брэгговской частотой. Наличие подобных мод является достаточно общим свойством поверхностных волн, формируемых вблизи периодически гофрированных металлических поверхностей конечных размеров. В случае планарной конфигурации характеристики таких мод детально описаны в работе [6]. Очевидно, что формирование поверхностных мод должно иметь место и в слабо гофрированных участках цилиндрических волноводов, которые обычно используются в релятивистских ГПВ [7]. Обсуждаемые моды имеют конечную добротность, которая тем больше, чем ближе частота моды к верхней границе полосы прозрачности и чем меньше у моды число продольных вариаций поля.



**Рисунок 1.** Схема цилиндрического волновода с периодически гофрированным участком конечной длины  $l_z$ . Стрелками показаны направления распространения парциальных квазиоптических волновых потоков  $C_{\pm}$ , связывающихся на гофрированной поверхности.

При возбуждении указанной электродинамической структуры (рисунок 1) внешним начальным электромагнитным импульсом, частотная зависимость коэффициента отражения должна демонстрировать характерные минимумы, положения которых соответствуют частотам продольных мод, а ширины обратно пропорциональны добротностям. В данной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования резонаторов поверхностной волны на основе сверхразмерных цилиндрических волноводов.

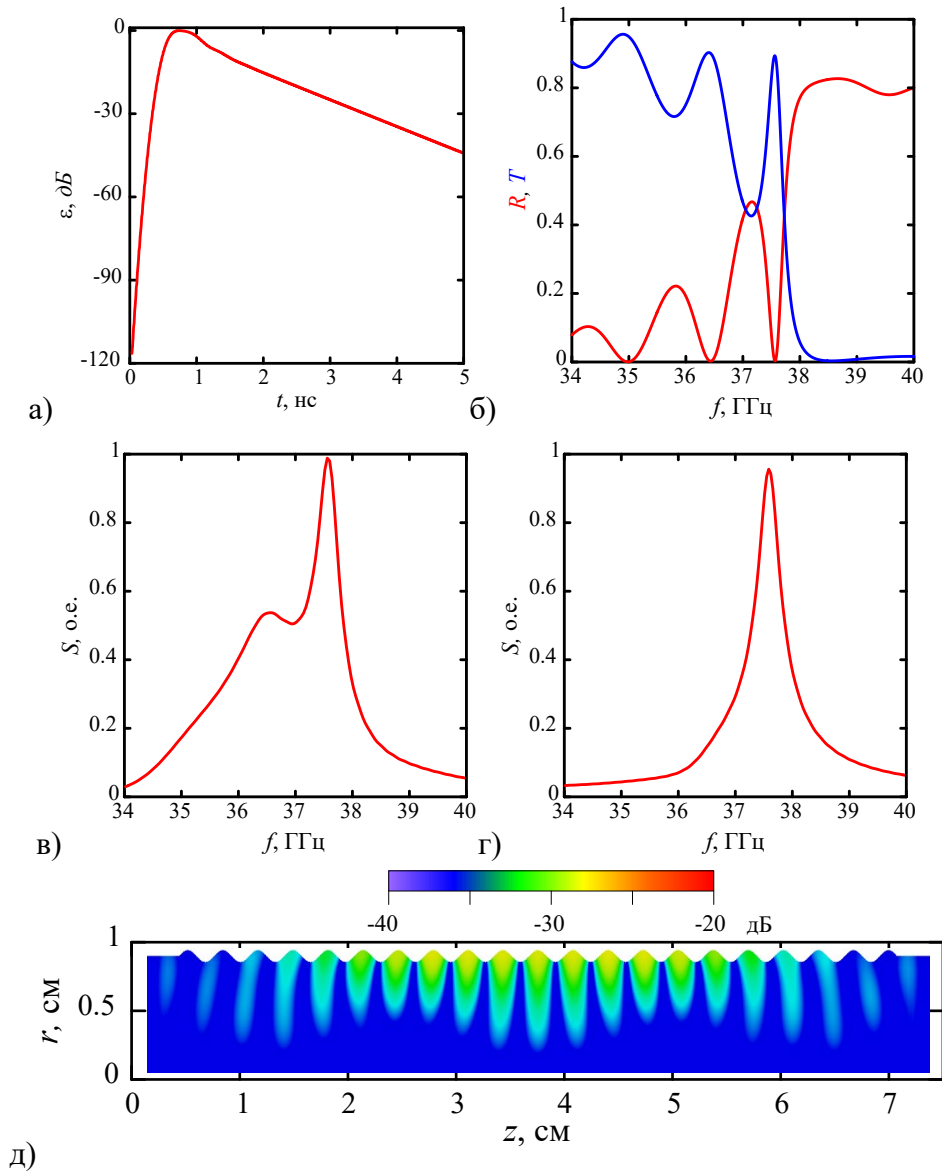
## 2. Исследование резонаторов поверхностной волны в рамках трехмерного моделирования

Первоначальная оценка параметров проводилась на основе квазиоптического подхода [8]. Дальнейшие детальные исследования были проведены с помощью трехмерного FDTD-кода CST Microwave Studio. Параметры моделирования соответствовали экспериментальной макету, исследованному далее в разделе 3: период структуры  $d = 3,7$  мм, длина гофрированного участка  $l_z = 74$  мм (20 периодов), глубина гофра  $2r_0 = 1$  мм, средний радиус системы  $R_0 = 10$  мм. Использовался нестационарный метод определения собственных мод системы и  $S$ -параметров. Структура возбуждалась внешним начальным электромагнитным импульсом, падающим с торца резонатора и представляющим собой волновой пучок с заданным поперечным распределением поля (поперечная структура поля соответствовала моде  $TM_{0,1}$  цилиндрического волновода). Длительность падающего импульса составляла  $\Delta t \approx 0,1$  нс, что соответствовало спектральной ширине  $\Delta f \approx 10$  ГГц. Анализировалась эволюция поля внутри резонатора. Очевидно, что после нескольких проходов волн по резонатору, в спектре излучения должны формироваться характерные максимумы, соответствующие положению наиболее высокодобротных собственных мод. Добротность каждой моды пропорциональна ширине спектральной линии. Моделирование проводилось в диапазоне 37 ГГц.

Результаты моделирования при возбуждении волной  $TM_{0,1}$  приведены на рисунке 2. Полное время моделирования составило 5 нс, что соответствует примерно 15 прохождениям волн по резонатору. Затухание поля в резонаторе представлено на рис. 2а, где показана временная эволюция запасенной энергии. На заключительной стадии затухания в спектре излучения доминирует основная мода вблизи коротковолновой границы полосы прозрачности, с одной продольной вариацией поля (рисунок 2д), обладающая наибольшей добротностью. Частота этой моды около 37,6 ГГц, добротность, вычисленная по ширине спектральной линии, составляет  $Q \approx 200$ . Кроме того, наблюдалось возбуждение нескольких продольных мод резонатора с меньшими добротностями в области меньших частот как показано на рисунках 2б, в. Таким образом, найденные в прямом численном моделировании положения наиболее добротных мод и абсолютные значения добротностей находятся в хорошем соответствии с результатами аналитической теории.

Мгновенное распределение поля в резонаторе при выделении основной наиболее высокодобротной моды показано на рисунке 2д для  $H_\varphi$  компоненты при  $\varphi = \text{const}$ . Мода формируется двумя встречными парциальными потоками энергии, в результате чего формируется интерференционная картина, характерная для стоячей волны.

Наряду с моделированием возбуждения различных мод, используемый метод позволяет получить частотные зависимости интегральных коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$  при падении внешней волны на исследуемую структуру. Результаты такого моделирования представлены на рис. 2б и могут быть сопоставлены с результатами «холодного» тестирования. Видно, что частоты собственных мод резонатора расположены в минимумах коэффициента отражения. При этом результаты хорошо совпадают с результатами квазиоптической теории.



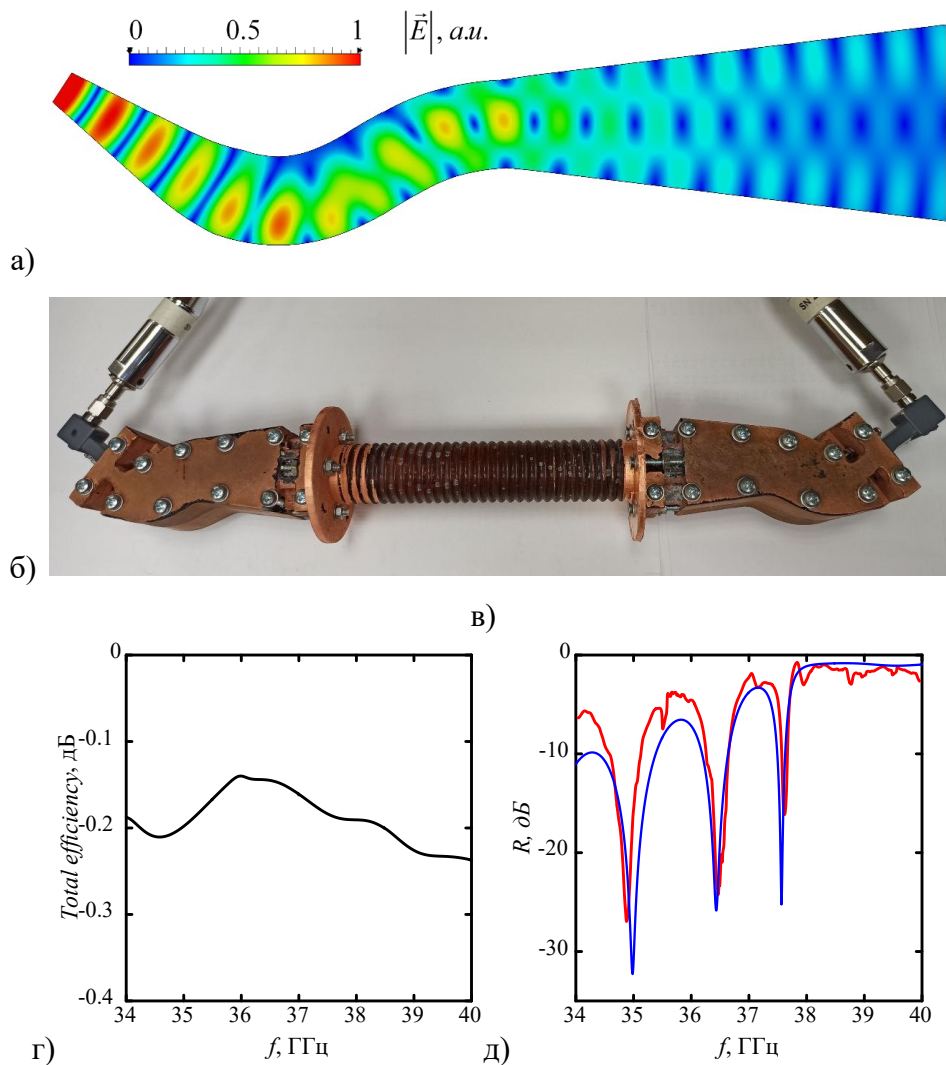
**Рисунок 2.** Результаты *FDTD* моделирования электродинамических характеристик цилиндрического резонатора поверхностной волны. **(а)** Зависимость от времени энергии электромагнитного поля, **(б)** частотные зависимости коэффициентов отражения  $R$  и прохождения  $T$ , **(в)**, **(г)** спектры поля на начальной **(в)** и конечной **(г)** стадии, соответствующий выделению основной поверхностной моды с добротностью  $Q \approx 200$ , **(д)** – пространственная структура поля  $H_\varphi$  в плоскости  $(r, z)$  при  $t = 5$  нс, соответствующая селективному выделению основной моды с одной продольной вариацией поля.

## 2. Экспериментальное исследование

Предшествующие теоретические исследования были основаны на предположении о возбуждении сверхразмерной цилиндрической брэгговской структуры модой  $TM_{0,1}$ . Таким образом становится актуальной задача разработки и реализации широкополосного волноводного преобразователя моды  $TE_{1,0}$  стандартного прямоугольного волновода в моду  $TM_{0,1}$  сверхразмерного цилиндрического волновода. Последняя широко используется в различных приложениях, и поэтому существует большое количество вариантов преобразователей, например, описанные в работе [9]. Тем не менее, использование современного метода оптимизации поверхности преобразователей [10] позволило существенно улучшить характеристики. Основным требованием являлось максимизация эффективности в

частотной полосе 34–40 ГГц при выходном диаметре волновода 20 мм. Синтезированный преобразователь является изогнутым волноводом переменного сечения. Для проверки результатов синтеза было выполнено трехмерное моделирование преобразователя с помощью программы *CST MICROWAVE STUDIO*. Сечение преобразователя и структура электрического поля в нем показана на рисунке 3а, эффективность – на рисунке 3в. Преобразователи и резонаторы были напечатаны на 3D-принтере из фотополимера с последующей металлизацией поверхности [12],

Экспериментальное исследование электродинамических характеристик проводилось на панорамном источнике при милливаттном уровне мощности в окрестности частоты 37 ГГц. Возбуждение структуры осуществлялось описанным выше преобразователем. Результаты измерений частотных зависимостей коэффициентов отражения достаточно хорошо согласуются с теоретическими как по положению собственных мод, так и добротностям (рисунок 3г).



**Рисунок 3.** (а) Мгновенное значение модуля электрического поля в продольном сечении преобразователя волноводного преобразователя моды  $TE_{1,0}$  прямоугольного волновода стандартного сечения в моду  $TM_{0,1}$  цилиндрического волновода радиусом 10 мм на частоте 36 ГГц (б) Собранная система из резонатора поверхностной волны и двух волноводных преобразователей. (в) Полные расчетные потери в преобразователе со стенками из меди. (г) Результат измерения коэффициента отражения  $R$  для цилиндрической гофрированной структуры (красная кривая) в сравнении с *FDTD* моделированием (синяя кривая).

### 3. Заключение

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования демонстрируют существование собственных мод резонаторов поверхностной волны цилиндрической геометрии. Резонаторы указанного типа используются в релятивистских генераторах поверхностной волны и играют роль замедляющей системы. Рассматриваемый метод 3D-печати для изготовления трехмерных структур показывает возможность продвижения данного класса генераторов в субмиллиметровый диапазон.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00877)**.

#### Список литературы

1. Бугаев С. П., Канавец В. И., Кошелев В. И., Черепенин В. А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука. 1991.
2. Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые генераторы и их возможные применения // УФН. – 2006. – Т. 176. – № 10. – С. 1124 – 1130.
3. Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.S. et al. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – Т. 28. – № 3. – С. 235–245.
4. Annaka Y. et al. Experimental study of surface-wave oscillator with different electron beam forms // Jpn. J. Appl. Phys. – 2020. – Т. 59 – С. SHHD02.
5. Li S., Wang J., Wang D. Relativistic Surface Wave Oscillator in Y-Band with Large Oversized Structures Modulated by Dual Reflectors // Sci Rep. – 2020. – Т. 10. – С. 336.
6. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., Fil'chenkov S.E., Zaslavsky V.Yu. Highly selective surface-wave resonators for terahertz frequency range formed by metallic Bragg gratings // Phys. Lett. A. – 2018. – Т. 382. – № 13. – С. 925-929.
7. Malkin A.M., Zheleznov I.V., Sergeev A.S., Ginzburg N.S. Quasi-optical theory of relativistic Cherenkov surface-wave oscillators with oversized cylindrical waveguides // Physics of Plasmas. – 2021. – Т. 28. – № 6. – С. 063102.
8. Malkin A, Ginzburg N, Zaslavsky V, Zheleznov I, Sergeev A. Quasi-Optical Theory of Relativistic Cherenkov Oscillators and Amplifiers with Oversized Electrodynamical Structures. // Electronics. – 2022. – Т. 11(8). – С. 1197.
9. Vinogradov D.V., Denisov G.G. Waveguide mode converters with step type coupling // Int. Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1991. – Т. 12. – № 2. – С. 131–140.
10. Sobolev D.I., Denisov G.G. Principles of Synthesis of Multimode Waveguide Units// IEEE Trans. on Plasma Science. – 2010. – Т. 38. – № 10. – С. 2825 – 2830.
11. Myasnikova S.E., Bogdashov A.A., Parshin V.V. and Rodin Y.V. Metal reflectivity investigation at 120-140 GHz // 4-th Inter Kharkov Symposium 'Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves'. Symposium Proceedings (Cat. No.01EX429). – 2001. – Т. 2. – С. 857-859.
12. Proyavin, M.D.; Vikharev, A.A.; Fedotov, A.E.; Sobolev, D.I.; Peskov, N.Y.; Makhlov, P.B.; Shmelev, M.Y.; Kuzikov, S.V. Development of Electrodynamical Components for Microwave Electronic Devices Using the Technology of 3D Photopolymer Printing with Chemical Surface Metallization // Radiophys Quantum Electron. – 2020. – Т. 63. – С. 469–478.