



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-81-85>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385.6

ТЕРАГЕРЦОВАЯ ЛАМПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ НА СВЕРНУТОМ ПО КРУГОВОЙ СПИРАЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 11 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Наиболее перспективными в терагерцовом диапазоне являются лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ) на змееобразно изогнутом (свернутом зигзагообразно) прямоугольном волноводе. Они реализованы в ТГц-диапазоне (220 ГГц), хотя их характеристики далеки от удовлетворительных из-за жесткого ограничения на ширину ленточного электронного потока, что не позволяет достичь оптимального уровня суммарного тока пучка. Радиальное решение, снимающее ограничение на ширину ленточного пучка, для ЛБВ и ЛОВ на изогнутом прямоугольном волноводе – заменить зигзагообразный свернутый волновод на спирально свернутый. Тогда ширина ленточного пучка принципиально не ограничена. В ранней конструкции ЛБВ и ЛОВ предполагается планарная спираль волновода, плоская в верхней и нижней частях, соединенных вертикальными холостыми (без пучка) переходами. Такая конструкция может быть существенно улучшена как в отношении процесса взаимодействия электронов с полем волновода, так и в отношении упрощения технологии изготовления ЛБВ–ЛОВ, если вместо планарной спирали волновода использовать круговую. Представлена конструкция ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе терагерцового диапазона. Эта конструкция отличается от ранее предложенной ЛБВ с планарно-спиральным волноводом улучшенными условиями взаимодействия электронного потока с полем волновода, а также упрощением технологии ее изготовления в терагерцовом диапазоне. На основе численного моделирования показано, что в диапазоне 220 ГГц при числе витков волновода $n = 40\div 50$ в предложенной ЛБВ достижимы коэффициенты усиления в насыщении $G_n = 42\div 48$ дБ. Предложенная конструкция ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе является более технологичной, чем ЛБВ на планарно-спиральном волноводе. Ее эффективность в наиболее востребованном диапазоне 220 ГГц весьма высока и может обеспечить потребность в усилителях и генераторах в этом и других диапазонах. Кроме того, ЛБВ на спирально свернутом волноводе может работать в режиме ЛОВ и, более того, одновременно в режимах ЛБВ и ЛОВ.

Ключевые слова: терагерцовая лампа бегущей волны, свернутый по круговой спирали волновод, электронный поток с кольцевым сечением, коэффициент усиления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Терагерцовая ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 81–85.

TERAHERTZ TRAVELING-WAVE TUBE ON A RECTANGULAR WAVEGUIDE FOLDED IN A CIRCULAR SPIRAL

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 11 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The most promising in the THz range is traveling-wave tubes (TWTs) and backward-wave tubes (BWTs) on a serpentine-curved (zigzag-rolled) rectangular waveguide. They are implemented in the THz range (220 GHz), although their characteristics are far from satisfactory due to the strict restriction on the tape electron beam width, that does not allow reaching the summarizing beam current optimum level. To replace the zigzag convoluted waveguide with the spiraled for the TWT and BWT on a curved rectangular waveguide is the best way to remove the ribbon beam width restriction. In the early TWT and BWT design a waveguide planar spiral was also flat in the upper and lower parts connected by vertical idle (without beam) transitions. Proposed design can be significantly improved both in relation to the electron interaction process with the waveguide field and in relation to the TWT-BWT manufacturing technology if instead of a planar waveguide spiral, a circular one is used. The article proposes the TWT designing a terahertz rectangular waveguide folded as a circular spiral. The design differs from the previously proposed TWT with a planar-spiral waveguide by the improved interaction conditions between the electron beam and the waveguide field, as well as the manufacturing technology simplification for terahertz range. Based on numerical simulation, it is shown that proposed TWT achieves $G_n = 42 \div 48$ dB saturation gain in the 220 GHz range with the waveguide turn number $n = 40 \div 50$. The proposed TWT design on a rectangular waveguide folded in a circular spiral is more technologically advanced than the TWT on a planar-spiral waveguide. In the most necessary 220 GHz range the efficiency is very high and can provide the need for amplifiers and generators in this and other ranges. We also note that the TWT on a spirally folded waveguide can operate in the BWT mode and, moreover, simultaneously in the TWT and BWT modes.

Keywords: terahertz traveling-wave tube, waveguide folded as a circular spiral, electron beam with circular cross section, gain.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Terahertz traveling-wave tube on a rectangular waveguide folded in a circular spiral. *Doklady BGUIR*. 2019; 7–8(126): 81-85.

Введение

Проблема освоения терагерцового диапазона частот (0,1–10 ТГц) является одной из самых важных в электронике СВЧ и радиофизике. Эта проблема имеет две стороны. С одной стороны, без освоения терагерцового диапазона невозможен прогресс в создании высоких технологий во многих отраслях науки и техники. К ним относятся: создание сверхскоростных (5 G) и защищенных коммуникационных систем, систем дистанционного распознавания химических веществ (спектроскопия в терагерцовом диапазоне), замена рентгеновских лучей на неионизирующие T -лучи в медицине (например, томография) и в охранных сканерах, локация в системах военного назначения. Во многих других областях использование T -лучей может радикально решить сложные проблемы. С другой стороны, терагерцовый диапазон относится к «технологическому провалу» (THz Gap), отделяющему электронику от фотоники. Здесь нет эффективных приборов электроники СВЧ, нет и оптических генераторов, и усилителей (слишком мала энергия фотона). Этот диапазон в принципе могут перекрыть лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), но они требуют использования ускорителей типа микротрона, циклотрона или бетатрона, а их коэффициент полезного действия невысок.

Наиболее перспективными в ТГц-диапазоне являются лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ) на змееобразно изогнутом (свернутом зигзагообразно)

прямоугольном волноводе. Они реализованы [1] в ТГц-диапазоне (220 ГГц), хотя их характеристики далеки от удовлетворительных из-за жесткого ограничения на ширину ленточного электронного потока, что не позволяет достичь оптимального уровня суммарного тока пучка.

Радиальное решение, снимающее ограничение на ширину ленточного пучка, для ЛБВ и ЛОВ на изогнутом прямоугольном волноводе предложено в [2, 3]: заменить зигзагообразный свернутый волновод на спирально свернутый. Тогда ширина ленточного пучка принципиально не ограничена. В [2, 3] в конструкции ЛБВ и ЛОВ предполагается планарная спираль волновода, плоская в верхней и нижней частях, соединенных вертикальными холостыми (без пучка) переходами. Такая конструкция может быть существенно улучшена как в отношении процесса взаимодействия электронов с полем волновода, так и в отношении упрощения технологии изготовления ЛБВ–ЛОВ, если вместо планарной спирали волновода использовать круговую.

Описанию конструкции и характеристикам ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе посвящена настоящая статья.

Конструкция ЛБВ

Конструкция ЛБВ изображена на рис. 1. Здесь 1, 2 – соответственно внешняя и внутренняя втулки, которые изготавливаются отдельно, а затем спаиваются вакуумно-плотным швом; 3 – круговая электронная пушка, формирующая тонкий кольцевой (по сечению) электронный поток; 4 – вводы питания электронной пушки; 5 – изоляторы вводов, если корпус лампы 1, 2 находится под более высоким потенциалом; 6 – входной волновод (как продолжение рабочей части спирально скрученного волновода 7); 7 – спирально скрученный (свернутый) прямоугольный волновод на моде H_{10} (электрическое поле E_z нормально к широкой стенке волновода); 8 – выходной волновод; 9 – кольцевая пролетная щель для электронного потока; 10 – кольцевой коллектор электронов; 11 – ввод коллектора; 12 – изолятор ввода (коллектор может находиться под пониженным потенциалом относительно корпуса ЛБВ 1, 2).

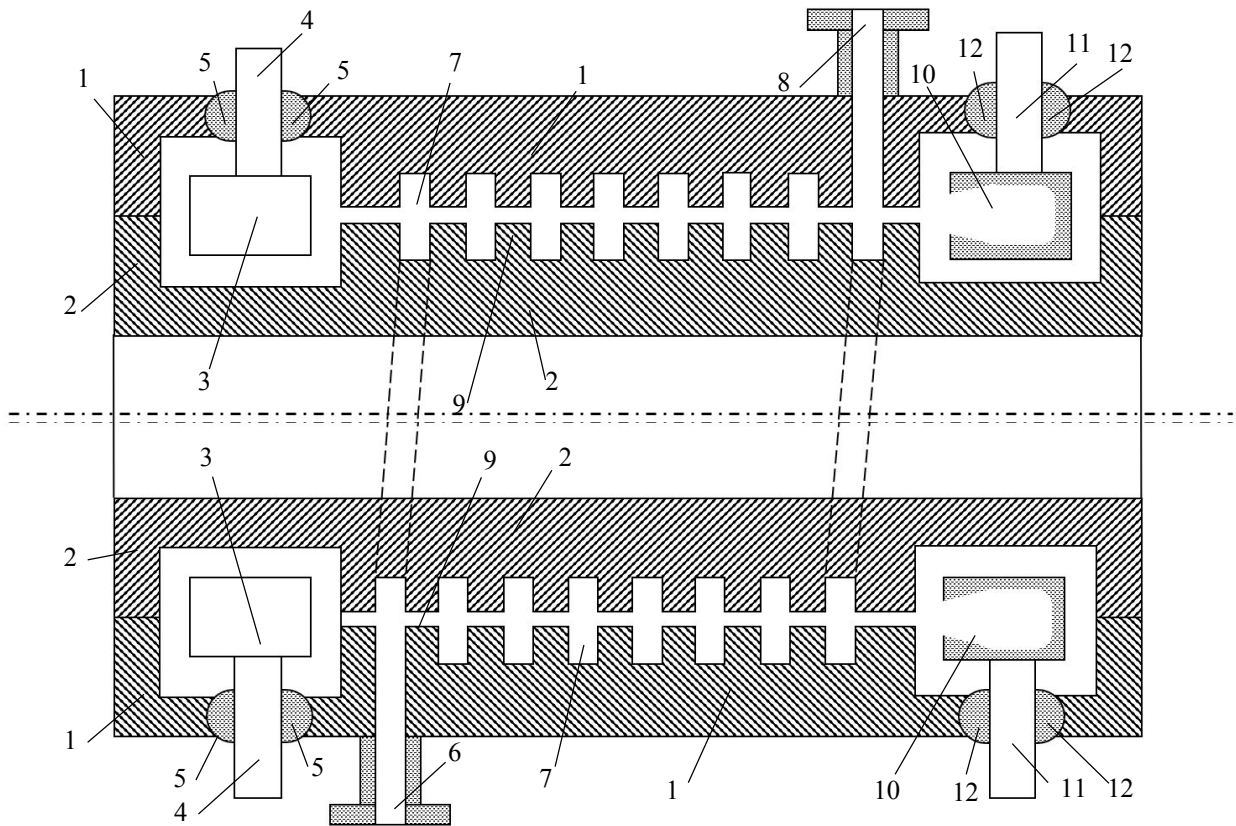


Рис. 1. Схема терагерцовой ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе
Fig. 1. Terahertz TWT scheme on a rectangular waveguide folded in a circular spiral

Такая конструкция ЛБВ допускает упрощенный процесс изготовления с использованием современных технологий. Втулки 1, 2 изготавливается отдельно. Канавки спирального волновода («половинки» волновода) формируются методами рентгенометрографии (LIGA), которые позволяют выдерживать очень высокую точность изготовления. Затем, после монтажа на втулке 1 электронной пушки и коллектора, они спаиваются, образуя общий блок ЛБВ.

Заметим, что втулки 1, 2 – не обязательно металлические, они могут быть и пластмассовыми с последующей металлизацией рабочих поверхностей (серебряное или медное напыление).

Полюса фокусирующего магнита, расположенные у торцевых стенок корпуса ЛБВ, не показаны.

Результаты расчетов

Модели процесса взаимодействия ЛБВ на спирально изогнутом прямоугольном волноводе как для планарной спирали, так и для круглой идентичны, поскольку в том и другом случае взаимодействие электронов каждого элемента потока подобно одно другому. Поэтому при расчете использовалась модель, развитая в [2, 3].

Расчет для $f = 220$ ГГц дал следующие результаты:

- радиус кольцевого пучка $r_0 = 5$ мм;
- ток пучка $I_0 = 0,5$ А, $V_0 = 16$ кВ;
- входная мощность $P_{\text{вх}} = 0,01$ Вт.

При заданной входной мощности и токе пучка получено: при числе витков волновода $n = 40$ усиление G_n в насыщении составляет 42 дБ; при $n = 50$ – $G_n = 48$ дБ.

Зависимость G_n от тока пучка при $P_{\text{вх}} = 0,01$ Вт, $n = 48$: $I_0 = 0,2$ А – $G_n = 35$ дБ; $I_0 = 0,5$ А – $G_n = 45$ дБ; $I_0 = 0,7$ А – $G_n = 50$ дБ.

Таким образом, расчеты подтверждают высокую эффективность терагерцовой ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе.

Заключение

Предложенная конструкция ЛБВ на свернутом по круговой спирали прямоугольном волноводе является более технологичной, чем ЛБВ на планарно-спиральном волноводе. Ее эффективность в наиболее востребованном диапазоне 220 ГГц (здесь окна прозрачности в атмосфере) весьма высока и может обеспечить потребность в усилителях и генераторах в этом и других диапазонах. Заметим также, что ЛБВ на спирально свернутом волноводе может работать в режиме ЛОВ [3] и, более того, одновременно в режимах ЛБВ и ЛОВ [3].

Список литературы

1. Huarong Gong, Yubin Gong, Tao Tang, Wenxiang Wang. High Power Ka-band Folded Travelling-Wave Tube. *IVEC*. 2010;499-500.
2. Кураев А.А., Матвеев В.В., Рак А.О. Двухлучевая лампа обратной волны на изогнутом волноводе. *Доклады БГУИР*. 2017;105:100-103.
3. Кураев А.А., Рак А.О. Двухлучевая ЛБВ на спирально изогнутом прямоугольном волноводе. *СВЧ техника и телекоммуникационные технологии*. 2015;1:161-162.

References

1. Huarong Gong, Yubin Gong, Tao Tang, Wenxiang Wang. High Power Ka-band Folded Travelling-Wave Tube. *IVEC*. 2010;499-500.
2. Kurayev A.A., Matveyenko V.V., Rak A.O. [Backward Wave Dual Beam Lamp]. *Doklady BGUIR*. 2017;105:100-103. (In Russ.)
3. Kurayev A.A., Rak A.O. [Two-Beam TWT on a Spiral-Curved Rectangular Wave]. *Microwave equipment and telecommunication technologies = SVCH tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii*. 2015,1: 161-162. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors contribution

All authors made an equal contribution to the article writing.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвееенко В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka V.V., PhD, Associate Professor, associate professor of Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich