



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259

УДК 537.533:621.314

Научная статья

Электронные циклотронные преобразователи микроволн в системах беспроводной передачи энергии

Ю.А. Пирогов, Г.М. Казарян, В.Л. Саввин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 23 января 2021 г.

Принята к публикации: 29 января 2021 г.

Ключевые слова:

микроволны, электронный циклотронный преобразователь, беспроводная передача энергии, солнечные космические электростанции, ректенны

Аннотация. Рассмотрена возможность использования специальных электронных циклотронных приборов в качестве эффективных преобразователей электромагнитных волн в постоянный ток в современных СВЧ-системах беспроводной передачи на Землю электрической энергии по микроволновому каналу от солнечных космических электростанций, расположенных на борту геостационарных спутников. Такие преобразователи являются продуктом отечественной разработки, могут иметь КПД преобразования выше 80 %, нечувствительны к перегрузкам и гораздо экономичнее известных полупроводниковых ректенн (выпрямляющих антенн – rectifying antennas). Собираемые из множества отдельных полупроводниковых диодов с барьером Шоттки полупроводниковые ректенны в процессе нелинейного преобразования микроволн генерируют паразитные излучения, формирующие мощный электромагнитный фон, представляющий серьезную помеху устойчивой работе информационных систем специальной и общегражданской связи. К тому же стоимость полупроводниковых ректенн значительно выше, нежели электронно-циклотронных преобразователей при одинаковой входной микроволновой мощности. Ввиду высокой компактности электронных преобразователей они могут устанавливаться на промежуточной спутниковой платформе в стратосфере, принимая энергию Солнца по лазерному лучу с геостационарной орбиты и передавая ее на Землю практически без потерь по СВЧ-каналу. Также перспективны возможности применения электронных циклотронных преобразователей в наземных системах беспроводной передачи энергии. Уже первые электронные циклотронные преобразователи, созданные на предприятии «Торий» по проекту МГУ имени М.В. Ломоносова, имели КПД выше 60 % при входной СВЧ-мощности 10 кВт.

Пирогов Юрий Андреевич, профессор кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. ф.-м. н., профессор; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8518-6323>, IstinaresearchID (IRID): 426232; yuri937@gmail.com.

Казарян Гоар Мартиросовна, доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. ф.-м. н.; IstinaresearchID (IRID): 3656311.

Саввин Владимир Леонидович, доцент кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к. ф.-м. н.; IstinaresearchID (IRID): 2523100.

© Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Саввин В.Л., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Введение

Идея передачи энергии с помощью электромагнитного излучения была впервые высказана выдающимся электротехником Николой Тесла в начале XX века. Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов микроволн заложили основу для широкого использования СВЧ-энергетики и вызвали растущий интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного микроволнового излучения [1–9]. Микроволновый диапазон (2,4–5,8 ГГц) дает возможность существенно уменьшить размеры передающих и приемных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения.

Предложение широкомасштабной микроволновой передачи энергии, вырабатываемой космическими солнечными электростанциями, наземным потребителям принадлежит П. Глезеру [3] и интенсивно прорабатывалось в 70-х годах прошлого столетия. Проблемам солнечных космических электростанций и микроволновой передачи энергии посвящен ряд публикаций в отечественной научной печати [2; 4–7]. В последние годы ряд перспективных проектов микроволновой передачи энергии наземного и космического базирования, рассчитанных на меньшую мощность, разрабатываются в США, Японии и ЕС [8–10].

Среди главных проблем создания такого рода микроволновых систем одной из важнейших является разработка наиболее эффективных преобразователей микроволн в постоянный ток на приемном (ректенном) окончании линии передачи энергии. Все зарубежные варианты микроволновых ректенн основаны на применении полупроводниковых выпрямляющих элементов [9], обладающих целым рядом физических и технологических недостатков.

В статье обсуждаются исключаящие такие недостатки предложение российских исследователей использовать в наземных и космических системах передачи энергии специальные отечественной разработки электронные преобразователи микроволн в постоянный ток.

1. Обратное преобразование микроволн в постоянный ток

Наиболее распространенным типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковым диодом Шоттки (рис. 1).

Наивысшее значение КПД преобразования ректенны – 91,4 % – было достигнуто в лабораторных условиях при входной мощности микроволн до 10 Вт на единичном экземпляре диода Шоттки для рабочей частоты 2,45 ГГц [7].

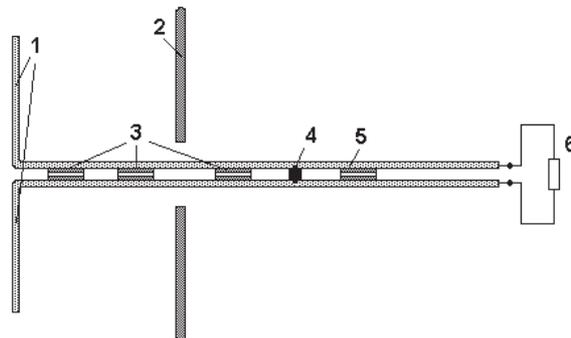


Рис. 1. Ректенный элемент с диодом Шоттки:
1 – полуволновой диполь; 2 – отражающая поверхность;
3 – фильтр нижних частот; 4 – диод Шоттки;
5 – выходной фильтр; 6 – нагрузка

Figure 1. Rectenna element with Schottky diode:
1 – half-wave dipole; 2 – reflective surface; 3 – low-pass filter;
4 – Schottky diode; 5 – output filter; 6 – load

На частоте 5,8 ГГц КПД преобразования ректенн с диодами Шоттки достигает 80 % при входной мощности 50 мВт [8].

Плотность мощности падающего излучения может заметно изменяться на апертуре приемного комплекса микроволновой линии передачи (до 10 дБ). Для крупномасштабных проектов солнечной энергетики плотность мощности уменьшается от 230 Вт/м² в центре приемного комплекса до 23 Вт/м² на краю ректенны (для проекта NASA). При оптимальных значениях плотности диполей (150–200 диполей/м²) нагрузка на один диод в центре приемной ректенны будет близка к номинальной мощности диодов Шоттки (1–2 Вт), при которой реализуется максимальный КПД преобразования микроволн в постоянный ток.

Вместе с тем полупроводниковые ректенны обладают целым рядом существенных недостатков. Они не выдерживают высоких уровней СВЧ-мощности и выгорают, из-за низких значений выходного напряжения требуют создания сложных последовательно-параллельных способов формирования ректенных систем для их включения в магистральные электрические цепи. Кроме того, нелинейные характеристики полупроводниковых диодов приводят к получению не только выпрямленного постоянного напряжения, но и паразитных высокочастотных гармоник.

ник, создающих в интеграле мощный фон в окружающей среде, нарушающий работу связанных, навигационных и разнообразных диагностических приборов. Альтернативным типом устройства для обратного преобразования микроволн в постоянный ток могут быть различные вакуумные приборы, работающие в обращенном режиме (клистроны, магнетроны и др.). Следует особо выделить циклотронный преобразователь энергии (ЦПЭ) с эффективностью до 83 %, входной мощностью микроволн 10 кВт на частоте 2,45 ГГц и выходным напряжением 15–20 кВ [11–15].

Мощные вакуумные преобразователи с высоким выходным напряжением легче могут быть интегрированы в существующие энергосистемы по сравнению с низковольтными ректеннами, которые придется коммутировать в большое число последовательно-параллельных цепочек.

2. Циклотронные преобразователи энергии

Принцип действия циклотронного преобразователя энергии основан на поперечной модуляции электронного потока. Помимо электронной пушки и внешней магнитной системы, циклотронный преобразователь имеет три основных узла: резонатор, область реверсивного изменения продольного магнитного поля (область преобразования) и коллектор (рис. 2).

Сформированный пушкой электронный поток пронизывает емкостной промежуток резонатора с поперечным высокочастотным (ω – частота микроволн на входе) электрическим полем, где приобретает дополнительную поперечную кинетическую энергию в виде вращательного (циклотронного) движения пучка около оси системы. На выходе резонатора поперечная кинетическая энергия электронного потока значительно превышает величину энергии продольного движения потока в $W = P_{\omega} / P_0$ раз, где P_{ω} – входная СВЧ-мощность, P_0 – начальная мощность пучка.

В области реверсивного изменения магнитного поля энергия вращения электронов преобразуется в энергию их поступательного движения. Далее сильно ускоренный электронный поток испытывает торможение, попадая в поле коллектора, где происходит рекуперация энергии электронов. Таким образом, мощность микроволн $P_{\text{вх}}$, поступающих в резонатор, преобразуется в мощность постоянного тока в нагрузке.

Создание ЦПЭ было успешно реализовано практически. Уже первый образец преобразова-

теля, сконструированный по проекту МГУ и изготовленный на предприятии НПО «Торий» [11], имел 60%-й КПД преобразования при 10 кВт СВЧ-мощности на входе (рис. 3) с перспективой существенного улучшения достигнутых характеристик.

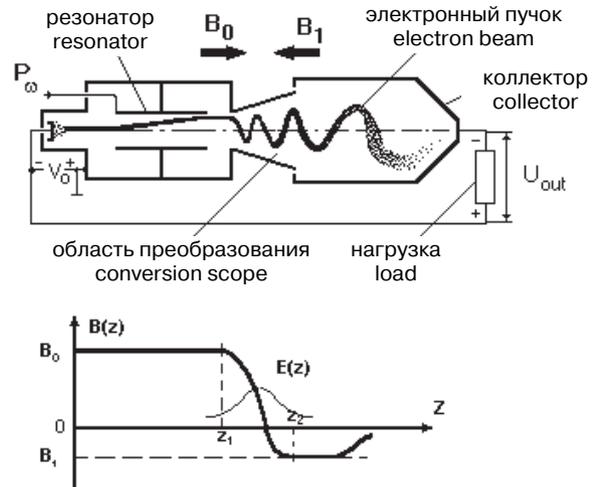


Рис. 2. Схема циклотронного преобразователя энергии и диаграмма распределения магнитного поля на его оси: P_{ω} – входная микроволновая мощность; V_0 – ускоряющее напряжение электронной пушки; B_0, B_1 – фокусирующее и реверсивное значение магнитного поля на оси прибора; $z_2 - z_1$ – протяженность области преобразования; $E(z)$ – проникающее электростатическое поле коллектора; $B(z)$ – магнитное поле в сечении z ; U_{out} – выходное напряжение на нагрузке
[Figure 2. Diagram of a cyclotron energy converter and a diagram of the magnetic field distribution on its axis: P_{ω} – input microwave power; V_0 – the accelerating voltage of the electron gun; B_0, B_1 – focusing and reversible value of the magnetic field on the axis of the device; $z_2 - z_1$ – length of the transformation area; $E(z)$ – the penetrating electrostatic field of the collector; $B(z)$ – magnetic field in the section z ; U_{out} – output voltage across the load]

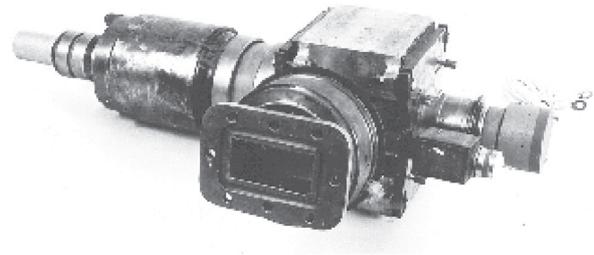


Рис. 3. Опытный образец циклотронного преобразователя, входная мощность – 10 кВт, КПД – 60 % [11]
[Figure 3. A prototype of a cyclotron converter, input power – 10 kW, efficiency – 60% [11]]

Интересно сравнить возможную стоимость эквивалентных по мощности полупроводниковой 10-киловаттной ректенны, которая должна содер-

жать не менее тысячи стодолларовых диодов с барьером Шоттки, с ректенной на одном 10-киловаттном элементе ЦПЭ. Конструктивно такой ЦПЭ при серийном производстве будет стоить примерно столько же, сколько обычный магнетрон сантиметрового диапазона, то есть не более одной тысячи долларов США, что обеспечит стократный выигрыш по стоимости по сравнению с полупроводниковой ректенной. К тому же в отличие от полупроводниковых ректенн использование ЦПЭ полностью исключает возможность выхода преобразователя из строя при любой мощности принимаемого сигнала и генерирования мощной фоновой помехи. С учетом отечественного приоритета в разработках ЦПЭ появляется реальная возможность выгодных поставок российских преобразователей для укомплектования зарубежных космических и наземных систем беспроводной передачи энергии по микроволновому каналу.

Заключение

Успешной альтернативой полупроводниковым ректеннам в системах беспроводной передачи энергии являются циклотронные преобразователи энергии, заметно превосходящие полупроводниковые ректенны по удельной мощности (до 10–20 кВт) и величине выходного напряжения (до 10–20 кВ), а также по устойчивости к электромагнитным и радиационным воздействиям и перегрузкам.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы

1. *Mankins J.* Special report: space-based solar power. Inexhaustible energy from orbit // *Ad Astra*. 2008. Vol. 20. No. 1. Pp. 20–36.
2. *Диденко А.Н.* СВЧ-энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.
3. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its future // *Science*. 1968. Vol. 162. No. 3856. Pp. 857–861.

4. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн // *Успехи физических наук*. 1969. Т. 99. Вып. 4. С. 545–572.

5. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // *Успехи физических наук*. 1977. Т. 123. Вып. 4. С. 633–655.

6. *Ванке В.А.* Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175. № 9. С. 957–978.

7. *Грихилес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б.* Солнечная космическая энергетика. М.: Наука, 1984. 216 с.

8. *Brown W.* History of power transmission by radio waves // *IEEE Transactions on microwave theory and technique*. 1984. Vol. MTT-32. No. 9. Pp. 1230–1242.

9. *McSpadden J., Fan L., Chang K.* A high conversion efficiency 5.8 GHz rectenna // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997. Vol. 2. Pp. 547–550.

10. *Nagatomo M., Sasaki S., Naruo Y., Vanke V.A.* Solar power systems (SPS) investigations at the Institute of Space and Astronautical Science of Japan // *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1994. Vol. 164. No. 6. Pp. 631–641.

11. *Vanke V., Savvin V.* Cyclotron-wave converter for SPS energy transmission system // *Proc. SPS-91*. Paris, 1991. Pp. 515–520.

12. *Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N.* High power converter of microwaves into DC // *Journal of Radio Electronics*. 1999. No. 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep99/1/text.html> (accessed: 11.09. 2020).

13. *Vanke V.A.* Cyclotron and synchronous oscillations and waves of the electron beam. General relations // *Journal of Radio Electronics*. 2002. No. 1. URL: http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text_e.html (accessed: 11.09. 2020).

14. Патент России № 2119691. Циклотронный преобразователь СВЧ-энергии / С.В. Быковский и др. 27.10.1999.

15. US. Patent, No. 6,507,152 B2. Microwave / D.C. cyclotron wave converter having decreased magnetic field / H. Matsumoto, V.A. Vanke, N. Shinohara. 14.01.2003.

Для цитирования

Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Саввин В.Л. Электронные циклотронные преобразователи микроволн в системах беспроводной передачи энергии // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 4. С. 254–259. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259>

Electron cyclotron converters of microwaves in wireless power transmission systems

Yury A. Pirogov, Gohar M. Kazaryan, Vladimir L. Savvin

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 23, 2021

Accepted: January 29, 2021

Keywords:

microwaves, electron cyclotron converter, wireless power transmission, solar space power plants, rectennas

Abstract. A proposal to use special electron cyclotron devices as effective converters of electromagnetic waves into direct current in modern microwave systems for wireless transmission of electrical energy to the Earth via a microwave channel from solar space power plants located on board geostationary satellites is considered. Such converters are a product of domestic development, they can have a conversion efficiency of more than 80%, they are insensitive to overloads and are several orders of magnitude more economical than the well-known semiconductor rectennas (rectifying antennas). Semiconductor rectennas, assembled from a multitude of individual semiconductor diodes with a Schottky barrier, in the process of nonlinear conversion of microwaves, generate parasitic radiation that forms a powerful electromagnetic background, which seriously interferes with the stable operation of information systems of special and general civil communications. In addition, the cost of semiconductor rectennas is several orders of magnitude higher than that of electron-cyclotron converters with the same input microwave power. Due to the high compactness of the electronic converters, they can also be installed on an intermediate satellite platform in the stratosphere, receiving the energy of the Sun through a laser beam from a geostationary orbit and transmitting it to the Earth with practically no loss through the microwave channel. The possibilities of using electron cyclotron converters in ground-based systems for wireless energy transmission are also promising. Already the first electron cyclotron converters, created at the “Torii” enterprise according to the project of the Lomonosov Moscow State University, had an efficiency of over 60% at an input microwave power of 10 kW.

Acknowledgements

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow University “Photonic and Quantum Technologies. Digital Medicine”.

References

1. Mankins J. Special report: Space-based solar power. Inexhaustible energy from orbit. *Ad Astra*. 2008; 20(1):20–36.

2. Didenko AN. *SVCH-energetika: teoriya i praktika [Microwave energetics: theory and practice]*. Moscow: Nauka Publ.; 2003. (In Russ.)

3. Glaser PE. Power from the Sun: its future. *Science*. 1968;162(3856):857–861.

4. Vanke VA, Lopukhin VM, Savvin VL. Sverhmaloshumyashchie usiliteli ciklotronnyh voln [Super-low noise amplifiers of cyclotron waves]. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1969;99(4):545–572. (In Russ.)

5. Vanke VA, Lopukhin VM, Savvin VL. Problems of the Sun Space Electrical Plants. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1977;123(4):633–655. (In Russ.)

6. Vanke VA. Transverse electron-beam waves for microwave electronics. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 2005;48(9):917–937.

Yury A. Pirogov, Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, Dr.Sci.(Phys. & Math.); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8518-6323>, IstinaresearchID (IRID): 426232; yupi937@gmail.com.

Gohar M. Kazaryan, Associate Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, PhD (Phys. & Math.); IstinaresearchID (IRID): 3656311.

Vladimir L. Savvin, Associate Professor of the Photonics and Microwave Physics Department of the Faculty of Physics of the MSU, PhD (Phys. & Math.); IstinaresearchID (IRID): 2523100.

7. Grikhiles VA, Orlov PP, Popov LB. *Solnechnaya kosmicheskaya energetika [Sun space energetics]*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. (In Russ.)

8. Brown W. History of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*. 1984;MTT-32(9):1230–1242.

9. McSpadden J, Fan L, Chang K. A high conversion efficiency 5.8 GHz rectenna. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997;2:547–550.

10. Nagatomo M, Sasaki S, Naruo Y, Vanke VA. Solar power systems (SPS) – investigations at the Institute of Space and Astronautical Science of Japan. *Physics-Uspkhi (Advances in Physical Sciences)*. 1994;164(6):631–641.

11. Vanke V, Savvin V. Cyclotron-wave converter for SPS energy transmission system. *Proc. SPS-91*. Paris; 1991. p. 515–520.

12. Vanke VA, Matsumoto H, Shinohara N. High power converter of microwaves into DC. *Journal of Radioelectronics*. 1999;9. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/sep99/1/text.html> (accessed: 11.09.2020).

13. Vanke VA. Cyclotron and synchronous oscillations and waves of the electron beam. General relations. *Journal of Radio Electronics*. 2002;1. Available from: http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text_e.html (accessed: 11.09.2020).

14. Bykovskiy SV, et al. Tsiklotronnyi preobrazovatel' SVCh-energii [*Cyclotron converter of microwave energy*]. Russian Patent No. 119691. 1999, October 27. (In Russ.)

15. Matsumoto H, Vanke VA, Shinohara N. *Micro-wave/D.C. cyclotron wave converter having decreased magnetic field*. US Patent No. 6,507,152 B2. 2003, January 14.

For citation

Pirogov YuA, Kazaryan GM, Savvin VL. Electron cyclotron converters of microwaves in wireless power transmission systems *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):254–259. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-254-259>