

УДК 621.385.644.9

## МАГНЕТРОНЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИКАХ С ХОЛОДНЫМ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ (ОБЗОР)

Д. М. ВАВРИВ, В. Д. НАУМЕНКО, В. А. МАРКОВ

*Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины,  
Украина, Харьков, 61002, ул. Искусств, 4*

**Аннотация.** Магнетроны на пространственных гармониках с холодным вторично-эмиссионным катодом являются эффективными источниками излучения высокой мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. В статье описан прогресс в конструкции, моделировании и изготовлении таких магнетронов. Для иллюстрации этих достижений описаны низковольтные, суб-ТГц магнетроны и магнетроны с анодом из метаматериалов. Также рассмотрен вопрос о строке службы магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом. Описаны основные проблемы, связанные с использованием вспомогательного катода в таких приборах, и обсуждаются альтернативные решения. Проанализирован потенциал для дальнейшего улучшения характеристик магнетронов на пространственных гармониках.

**Ключевые слова:** магнетрон; генератор миллиметровых волн; холодный катод; вторично-эмиссионный катод; вакуумный прибор

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетрон на пространственных гармониках (МПП) представляет собой вакуумный прибор, в котором рабочей является пространственная гармоника ВЧ-поля не  $\pi$ -типа (обычно  $\pi/2$  режим или соседняя мода), в отличие от обычных магнетронов, использующих основную гармонику  $\pi$ -моды. Насколько известно авторам, результаты первых экспериментальных исследований МПП опубликованы в [1]. Коммерческие версии такого типа магнетронов разработаны и произведены в бывшем Советском Союзе [2, 3]. Затем предложены и изготовлены МПП с холодным вторично-эмиссионным катодом [2, 3] и МПП с термокатодом [4, 5].

В данной работе рассмотрены МПП с холодным вторично-эмиссионным катодом, ко-

торые оказались наиболее эффективной альтернативой обычным магнетронам в миллиметровом диапазоне длин волн. Например, решения, использованные в таких магнетронах, позволили разработать источники мощных колебаний для частот до 210 ГГц [6]. Эти приборы характеризуются высоким уровнем как пиковой, так и средней мощности, а также увеличенным сроком службы.

В последние годы продолжалось изучение и развитие МПП с целью реализации их потенциала и удовлетворения новых эксплуатационных требований. В связи с этим стоит упомянуть о разработке низковольтных магнетронов [7], вакуумных приборов суб-ТГц диапазона [6] и МПП с анодом из метаматериалов [8]. Далее рассмотрены их преимущества и проанализированы другие разработки и проблемы в этой области исследований.

DOI: [10.20535/S0021347018070014](https://doi.org/10.20535/S0021347018070014)

© Д. М. Ваврив, В. Д. Науменко, В. А. Марков, 2018

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Robertshaw, R. D.; Willshaw, W. E. *Proc. IEE, Monograph*, No. 168 R, 103, Pt. B, 1956.
2. Вигдорчик, И. М.; Науменко, В. Д.; Тимофеев, В. П. “Импульсные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом,” *Доклады АН УССР. Сер. А*, № 7, С. 634–637, 1975.
3. Naumenko, V. D.; Suvorov, A. N.; Sirov, A. “Tunable magnetron of a two-millimeter-wavelength band,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 3, P. 129–131, 1996. DOI: [10.1002/\(SICI\)1098-2760\(19960620\)12:3%3C129::AID-MOP3%3E3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2760(19960620)12:3%3C129::AID-MOP3%3E3.0.CO;2-J).
4. А. А. Гурко, “Оценка возможности повышения к. п. д. магнетронов миллиметрового диапазона с использованием не  $\pi$ -видных колебаний,” *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 5, № 1, С. 80–84, 2000. URI: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/961>.
5. Грицаенко, С. В.; Еремка, В. Д.; Копоть, М. А.; Кулагин, О. П.; Науменко, В. Д.; Суворов, А. Н. “Многорезонаторные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом: достижения проблемы перспективы,” *Радиофизика и электроника*, Т. 10, С. 499–529, 2005.
6. Avtomonov, N. I.; Naumenko, V. D.; Vavriv, D. M.; Schunemann, Klaus; Suvorov, A. N.; Markov, V. A. “Toward terahertz magnetrons: 210-GHz spatial-harmonic magnetron with cold cathode,” *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 59, No. 12, P. 3608–3611, 2012. DOI: [10.1109/TED.2012.2217974](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2217974).
7. Naumenko, V. D.; Suvorov, A. N.; Markov, V. A.; Avtomonov, N. I.; Yeryomka, V. D.; Korol', M. A.; Kulagin, O. P.; Kim, Jung-II. “Development of Ka-range magnetron for portable radar,” *Proc. of 20th Int. Crimean Conf. on Microwave & Telecommunication Technology, CriMiCo'2010*, 13–17 Sept. 2010, Sevastopol, Crimea, Ukraine. IEEE, 2010, pp. 305–307. DOI: [10.1109/TED.2012.2217974](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2217974).
8. Esfahani, N. N.; Schunemann, Klaus; Avtomonov, N. I.; Vavriv, D. M. “Epsilon near zero loaded magnetrons, design and realization,” *Proc. of 45th European Microwave Conf.*, 7–10 Sept. 2015, Paris, France. IEEE, 2015, pp. 454–457. DOI: [10.1109/EuMC.2015.7345798](https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7345798).
9. Sosnytskiy, S. V.; Vavriv, D. M. “Theory of the spatial-harmonic magnetron: an equivalent network approach,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 30, No. 3, P. 984–991, 2002. DOI: [10.1109/TPS.2002.801616](https://doi.org/10.1109/TPS.2002.801616).
10. Schunemann, K.; Sosnytskiy, S. V.; Vavriv, D. M. “Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary-emission cathode,” *IEEE Trans. Electron. Devices*, Vol. 48, No. 5, P. 993–998, 2001. DOI: [10.1109/16.918248](https://doi.org/10.1109/16.918248).
11. Schunemann, K.; Serebryannikov, A. E.; Sosnytskiy, S. V.; Vavriv, D. M. “Optimizing the spatial-harmonic millimeter-wave magnetron,” *Phys. Plasmas*, Vol. 10, No. 6, P. 2559, 2003. DOI: [10.1063/1.1565337](https://doi.org/10.1063/1.1565337).
12. Naumenko, V. D.; Schunemann, K.; Vavriv, D. M. “Miniature 1 kW, 95 GHz magnetrons,” *Electron. Lett.*, Vol. 35, No. 22, P. 1960–1961, 1999. DOI: [10.1049/el:19991337](https://doi.org/10.1049/el:19991337).
13. Schunemann, K.; Trush, B. V.; Vavriv, D. M.; Volkov, V. A. “Магнетронные передатчики для когерентных радиолокационных систем миллиметрового диапазона,” *Радиофизика и электроника*, Т. 4, № 4, С. 357–361, 1999. URI: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/971>.
14. Siegel, P. H. “Terahertz technology,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 50, No. 3, P. 910–928, 2002. DOI: [10.1109/22.989974](https://doi.org/10.1109/22.989974).
15. Dragoman, D.; Dragoman, M. “Terahertz fields and applications,” *Proc. Quantum Electron.*, Vol. 28, No. 1, P. 1–66, 2004. DOI: [10.1016/S0079-6727\(03\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6727(03)00058-2).
16. Dong, Y.; Itoh, T. “Promising future of metamaterials,” *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 13, No. 2, P. 39–56, 2012. DOI: [10.1109/MMM.2011.2181447](https://doi.org/10.1109/MMM.2011.2181447).
17. Eleftheriades, G. V. “Metamaterials: The first ten years,” *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 13, No. 2, P. 8–10, 2012. DOI: [10.1109/MMM.2011.2181602](https://doi.org/10.1109/MMM.2011.2181602).
18. Моисеенко, А. Е.; Науменко, В. Д.; Суворов, А. Н.; Сыров, А. Р. “Импульсный 3 мм магнетрон с большим сроком службы,” *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 8, № 4, С. 421–428, 2003. URI: <http://journal.rian.kharkov.ua/index.php/ra/article/view/767>.
19. Автомонов, Н. И.; Сосницкий, С. В.; Ваврив, Д. В. “Исследование и оптимизация бокового катода для магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом,” *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 12, № 3, С. 320–329, 2007. URI: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/595>.
20. Kopylov, M. F. “Design and technology features of heating-free magnetrons with autoemission excitation,” *J. Vacuum Sci. Technol. B: Microelectron. Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 11, No. 2, P. 481, 1993. DOI: [10.1116/1.586845](https://doi.org/10.1116/1.586845).
21. Naumenko, V. D.; Cherenchchikov, S. A. “Investigation of the start-up of a magnetron with a cold secondary-emission cathode of the decay side of the voltage pulse,” *Radiophys. Quantum Electron.*, Vol. 27, No. 2, P. 168–173, 1984. DOI: [10.1007/BF01035126](https://doi.org/10.1007/BF01035126).

---

22. Автомонов, Н. И.; Ваврив, Д. М.; Сосницкий, С. В. “Теоретическое исследование холодного запуска магнетронов с вторично-эмиссионным катодом,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 53, № 1, С. 3–11, 2010. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010010012>.

23. Соин, А. В. “Возбуждение колебаний в магнетронах с вторично-эмиссионным катодом с помощью внешнего СВЧ-сигнала,” *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 8, № 3, С. 313–317, 2003. URI: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/777>.

Поступила в редакцию 18.12.2017

---