

УДК 621.365.64

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК МАГНЕТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН. ОБЗОР

В. Д. НАУМЕНКО

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

Аннотация. В статье рассмотрены основные направления совершенствования импульсных магнетронов миллиметрового диапазона волн. Представлены основные характеристики приборов производимых различными предприятиями. Статья предназначена для широкого круга научных работников и инженеров, использующих магнетроны миллиметрового диапазона в своих исследованиях и разработках.

Ключевые слова: магнетрон; миллиметровый диапазон; характеристики

Среди других СВЧ-генераторных ламп магнетроны выделяются высоким КПД, компактностью конструкции и сравнительно низкими анодными напряжениями. Если принять во внимание преимущества, которые предоставляет использование более коротких волн, то становится понятным, почему проблеме создания магнетронов миллиметрового диапазона волн (МДВ) всегда придавалось большое значение. Первые магнетроны, работающие в этом диапазоне, разработаны вскоре после окончания второй мировой войны, т.е. менее чем через 10 лет после создания первых многорезонаторных магнетронов.

За более чем полувековой период развития магнетронов МДВ в США, Великобритании, странах Западной Европы и Японии для миллиметрового диапазона исследовались и разрабатывались приборы, работающие на основной волне π -вида колебаний, в том числе в режиме слабого поля. В СССР, а затем в Украине и России, кроме того, исследовались и разрабатывались приборы с равнорезонаторными замедляющими системами (ЗС), работающие на

первой отрицательной пространственной гармонике одного из низших видов колебаний.

В данной работе рассмотрены основные направления совершенствования магнетронов МДВ и достигнутые результаты на примере приборов, выпускаемых различными фирмами в настоящее время.

1. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАГНЕТРОНОВ МДВ

1.1. Магнетроны классического типа

К магнетронам классического типа относятся приборы, работающие на основной волне противофазного вида колебаний (π -вида). В магнетронах этого типа, работающих в МДВ, используются только разнорезонаторные анодные блоки ввиду невозможности применения связок из-за малых размеров.

В разное время различными фирмами разработано множество конструкций таких приборов на длины волн вплоть до 3 мм. Однако оказалось, что эти магнетроны обладают приемлемой долговечностью только в длинновол-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bernstein, M. J.; and Kroll, N. M. Conventional pulsed rising sun magnetrons, in *Cross-Field Microwave Devices*, Vol. 2 (ed. by E. Okress). — New York : Academic Press, 1961. — P. 224–228.
2. Патент США № 2.734.148 Кл.315–39.61. Заявитель: фирма «Compagnie Generale de Telegraphie Sans Fil». Изобретатель: Charles Asema.
3. Pat. USA № 2.951.182, Cl. 315–39.77, заявл. 25.11.1957, опубл. 1960, J. Feinstein.
4. Скрипкин, Н. И.; Гурко, А. А.; Марин, В. П. Возможность создания в двухмиллиметровом диапазоне длин волн импульсного коаксиального магнетрона. *Научно-технические ведомости ВГТУ*. — 2006. — Т. 6, № 7–8. — С. 17–18. — URL : <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr8&art=4379>.
5. Гурко, А. А.; Еремка, В. Д. Состояние и перспективы развития магнетронов миллиметрового диапазона длин волн. *СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: 10-я междунар. Крымская конф. «Крымико-2000»*, 11–15 сент. 2000 г., Крым, Украина : материалы конф. — Севастополь : Вебер, 2000. — С. 23–26.
6. Трутень, И. Д.; Крупаткин, И. Г.; Баранов, О. Н.; Галушко, Н. Н.; Игнатов, В. Е. Импульсные магнетроны миллиметрового диапазона волн в режиме пространственной гармоник. *Украинский физический журнал*. — 1975. — Т. 20, № 7. — С. 1170–1176.
7. *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн*. Под общ. ред. А. Я. Усикова. — К. : Наукова думка, 1986. — 386 с.
8. Georg V. Collins (ed.). *Microwave Magnetrons*. — N. Y. : McGraw Hill, 1948. — 806 p.
9. Атласман, А. В.; Гурко, А. А.; Трутень, И. Д.; и др. О физических условиях устойчивой одночастотной генерации в магнетронах с поверхностной волной. *Труды ИРЭ АН УССР*. — 1970. — Т. 18. — С. 5–21.
10. Копылов, М. Ф.; Бондаренко, Б. В.; Махов, В. И.; Назаров, В. А. А. с. СССР №1780444. МКИ Н 01 J 35/50. Магнетрон. *Бюл. Изобр.* — 1994. — № 8. — С. 216.
11. 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*. — 1993. — Vol. 11, No. 2. — P. 481–483. — DOI : [10.1116/1.586845](https://doi.org/10.1116/1.586845).
12. Гурко, А. А.; Еремка, В. Д.; Науменко, В. Д.; Скрипкин, Н. И. О физических процессах при образовании пространственного заряда в безнакальном магнетроне с автоэмиссионным запуском. *Радиофизика и электроника*. — 2008. — Т. 13, № 1. — С. 99–104.
13. Патент США № 3.109.123. Кл.315–39.63. Приоритет в США-1962 г. Заявитель: «Raytheon». Изобретатель: Persy L. Spencer.
14. Зыбин, М. Н. Безнакальные магнетроны — вчера, сегодня, завтра. *Электроника: наука, технология, бизнес*. — 2011. — № 3. — С. 90–91. — Режим доступа : <http://www.electronics.ru/journal/article/2792>.
15. Jepsen, R. L.; Muller, M. W. Enhanced emission from magnetron cathodes. *J. Appl. Phys.* — 1951. — Vol. 22, No. 9. — P. 1196–1207. — DOI : [10.1063/1.1700133](https://doi.org/10.1063/1.1700133).
16. Вигдорчик, И. М.; Науменко, В. Д.; Тимофеев, В. П. Импульсные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом. *Доклады АН УССР*. Сер. А. — 1975, № 7. — С. 634–637.
17. Вигдорчик, И. М.; Науменко, В. Д. Магнетроны миллиметрового диапазона с холодным катодом. *Труды ИРЭ АН УССР*. — Харьков, 1979. — Т. XXV. — С. 25–41.
18. Naumenko, Vasily; Suvorov, Alexander; Sirov, Alexey. Tunable magnetron of a two-millimeter-wavelength band. *Microw. Opt. Technol. Lett.* — 1996. — Vol. 12, No. 3. — P. 129–131. — 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).
19. Науменко, В. Д.; Суворов, А. Н.; Моисеенко, А. Е. Мощные импульсные магнетроны диапазона 95 ГГц. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : 21-я междунар. Крымская конф. «КрыМиКо 2011». 12–16 сент. 2011 г., Крым, Украина: материалы конф. — Севастополь : Вебер, 2011. — С. 335–337.
20. Naumenko, V. D.; Schunemann, K.; Vavriv, D. M. Miniature 1 kW, 95 GHz magnetrons. *Electron. Lett.* — 1999. — Vol. 35, No. 22. — P. 1960–1961. — DOI : [10.1049/el:19991337](https://doi.org/10.1049/el:19991337).
21. Моисеенко, А. Е.; Науменко, В. Д.; Суворов, А. Н.; Сыров, А. Р. Импульсный 3 мм магнетрон с большим сроком службы. *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2003. — Т. 8, № 4. — С. 421–428. — Режим доступа : <http://journal.rian.kharkov.ua/index.php/ra/article/view/767>.
22. Naumenko, V. D.; Suvorov, A. N.; Markov, V. A.; Avtomonov, N. I.; Yeryomka, V. D.; Korol', M. A.; Kulagin, O. P.; Kim, Jung-Il. 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. — P. 305–307. — DOI : [10.1109/CRMICO.2010.5632848](https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632848).
23. 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*. — 2012. — Vol. 59, No. 12. — P. 3608–3611. — DOI : [10.1109/TED.2012.2217974](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2217974).

24. Еремка, В. Д.; Кулагин, О. П.; Науменко, В. Д. Разработка и исследование магнетронов в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова и Радиоастрономическом институте НАН Украины. *Радиофизика и электроника*. — 2004. — Т. 9, спец. вып. — С. 42–67.
25. Еремка, В. Д.; Науменко, В. Д. Исследование и разработка магнетронов миллиметрового диапазона. *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2008. — № 4. — С. 23–58. — Режим доступа : <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=2125>.
26. Касаткин, Л. В.; Рукин, В. П.; Еремка, В. Д.; [и др.] *Электрорадиотехнические приборы диапазона миллиметровых волн*. Под ред. В. П. Рукина. — Севастополь : Вебер, 2007. — 252 с.
27. 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*. — 2005. — Т. 10. — С. 499–529.
28. Vyse, B.; Smith, V. H. The evolution of miniature rugged magnetrons. In: *Proc. of 2nd Conf. on Military microwaves '80*, London, England, October 22–24, 1980. (A82-18901 07-32), Sevenoaks, Kent, England. Microwave Exhibitions and Publishers, Ltd., 1981, P. 506–513.
29. Касаткин, Л. В. Импульсные автогенераторы в режиме фазовой синхронизации импульсным когерентным сигналом (когерентные магнетроны). *Известия вузов. Радиоэлектроника*. — 2006. — Т. 49, № 4. — С. 38–45. — Режим доступа : <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347006040054>.
30. Еремин, В. П.; Мацелис, Л. И.; Пастухова, А. В.; Хохлова, О. М. Генераторное двухкаскадное комплексированное устройство 3 мм диапазона длин волн с электрической перестройкой частоты с выходной мощностью 10 кВт. *Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике*. Нижегородская область, п. Хахалы, 6–8 сентября 2011 г. Нижний Новгород.
31. Иванов, И.; Петюшин, Н.; Скрипкин, Н. Сумматор мощности магнетронов 3-миллиметрового диапазона длин волн. *Электроника: наука, технология, бизнес*. — 2015. — № 5. — С. 92–94. — Режим доступа : <http://www.electronics.ru/journal/article/4713>.
32. Иванов, И. М.; Ефремова, М. В.; Скрипкин, Н. И.; и др. Расчет и экспериментальное исследование сумматора мощности магнетронов 3-мм диапазона с выводом энергии в свободное пространство тремя когерентными излучателями. *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. — 2015. — № 3. — С. 22–25.
33. Донецкий, Р. В.; Иванов, И. М.; Петюшин, Н. В.; Скрипкин, Н. И. Регенеративный усилитель на синхронизированных магнетронах 3-миллиметрового диапазона длин волн. *Научно-технические технологии*. — 2015. — № 11. — С. 51–55. — Режим доступа : <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr8&art=17026>.
34. Науменко, В. Д.; Федий, Р. П. Импульсный магнетрон миллиметрового диапазона в режиме авто-синхронизации. *Известия вузов. Радиофизика*. — 1986. — Т. 29, № 11. — С. 1399–1400.
35. <http://www.salut.nn.ru/>.
36. <http://www.pluton.msk.ru/catalog/>.
37. Скрипкин, Н. И. Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: новые разработки компании «Плутон». *Электроника НТБ*. — 2011. — № 7. — С. 66–67. — Режим доступа : <http://www.electronics.ru/journal/article/3034>.
38. <http://www.oao-tantal.ru/cat.php>.
39. Ляшенко, А. В.; Солопов, А. А.; Федоренко, Е. А.; и др. Мощный импульсный 2-мм магнетрон с долговечностью 2000 часов. *Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике*. Нижегородская область, п. Хахалы, 6–8 сентября 2011 г. Нижний Новгород.
40. <http://www.salut.nn.ru/index.php/mamp/50--.html>.
41. Завьялов, С. X.; Цуканов, А. А. Импульсный коаксиальный магнетрон диапазона длин волн 2 мм. *Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике*. Нижегородская область, п. Хахалы, 6–8 сентября 2011 г. Нижний Новгород.
42. Schuenemann, K., Sosnytskiy, S. V.; Vavriv, D. M. Self-consistent simulation of the spatial-harmonic magnetron with cold secondary-emission cathode. *IEEE Trans. Electron Devices*. — 2001. — Vol. 48, No. 5. — P. 993–998. — DOI : [10.1109/16.918248](https://doi.org/10.1109/16.918248).
43. Esfahani, Nasrin Nasr; Schuenemann, Klaus; Avtomonov, Nickolay; Vavriv, Dmytro. Epsilon near zero loaded magnetrons, design and realization. *Proc. of 45th European Microwave Conf.*, 7–10 Sept. 2015, Paris, France. — IEEE, 2015. — P. 454–457. — DOI : [10.1109/EuMC.2015.7345798](https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7345798).
44. Schuenemann, Klaus; Serebryannikov, A. E.; Sosnytskiy, S. V.; Vavriv, D. M. Optimizing the spatial-harmonic millimeter-wave magnetron. *Phys. Plasmas*. — 2003. — Vol. 10, No. 6. — P. 2559–2565. — DOI : [10.1063/1.1565337](https://doi.org/10.1063/1.1565337).
45. Li, Shengen; Li, Fengling; Yang, Jinsheng; Yan, Tiechang; Du, Bo; Shi, Wei. Development of a miniaturized W-band spatial harmonic magnetron. *IEEE Trans. Electron Devices*. — 2016. — Vol. 63, No. 6. — P. 2925–2929. — DOI : [10.1109/TED.2016.2569002](https://doi.org/10.1109/TED.2016.2569002).
46. Голант, М. Б.; Маклаков, А. А.; Шур, М. Б. *Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов*. — М. : Сов. Радио, 1969.

Поступила в редакцию ? По-сле переработки ?