

КОММЕРЧЕСКИЙ СВ-МАГНЕТРОН В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ¹©2025 г. Ю. Д. Черноусов^{а,*}, И. В. Шеболаев^а^а Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, Институтская ул., 3

* e-mail: chern@catalysis.ru

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 14.03.2024 г.

Принята к публикации 26.04.2024 г.

Приведены параметры коммерческих СВ-магнетронов S-диапазона мощностью 1 кВт и оценена возможность их использования в импульсном режиме для ускорительной техники. Коммерческие СВ-магнетроны в стандартном исполнении обладают превосходными импульсными характеристиками: диапазон регулирования импульсной мощности с высоким КПД до 8 кВт, длительность импульса от 0.3 мкс до непрерывного режима, частота следования не менее 1 МГц. Возможен режим формирования последовательностей парных импульсов с регулируемым временным сдвигом от 1 мкс. Параметры имеют место как в режиме автогенерации, так и в режиме синхронизации внешним сигналом. Для измерений применен высоковольтный импульсный источник питания с регулируемыми параметрами. На пассивной резистивной нагрузке источник обеспечивает выходное высокое напряжение 4.0–5.2 кВ, выходной ток до 3 А в импульсном и 0.5 А в среднем режиме, длительность импульса от 0.1 мкс, фронт импульса менее 0.1 мкс, частота следования до 1 МГц.

DOI: 10.7868/S3034564225070159

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетроны широко используются в быту, промышленности, ускорительной и СВЧ-технике, в научных исследованиях [1–21]. По принципу действия магнетрон является автогенератором с относительно низкой стабильностью частоты. Однако в режиме внешней синхронизации стабильность частоты магнетрона определяется стабильностью частоты инжектируемого сигнала, что приближает его по этому параметру к усиливающим клистроном. Предложено и изучается использование синхронизованных магнетронов, работающих с амплитудным и фазовым управлением, для питания даже высокодобротных сверхпроводящих резонаторов [5–7].

Исследованы методы и устройства сложения СВЧ-мощностей магнетронов [8–13]. Работа автогенераторов и магнетронов в режиме внешней синхронизации изучалась в течение многих лет [14–21]. Наиболее распространены коммерческие неимпульсные (Continuous Wave – CW)

магнетроны S-диапазона мощностью 1 кВт. Исходя из общей численности населения, количество таких устройств можно оценить примерно в 10^8 – 10^9 штук, цена устройства лежит в пределах \$(20–50)\$. Приведенные данные объясняют целесообразность использования коммерческих СВ-магнетронов в научных и технологических целях.

В работе приведены характеристики СВ-магнетронов S-диапазона мощностью 1 кВт в мощном импульсном режиме, изучение которых начато в работах [18, 22], и оценена возможность использования этих устройств в ускорительной технике для создания линейного ускорителя электронов.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОНА

Импульсные параметры СВ-магнетронов измерялись на стенде, структурная схема которого представлена на рис. 1 [18, 22]. Приведенные далее данные относятся к серийному

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

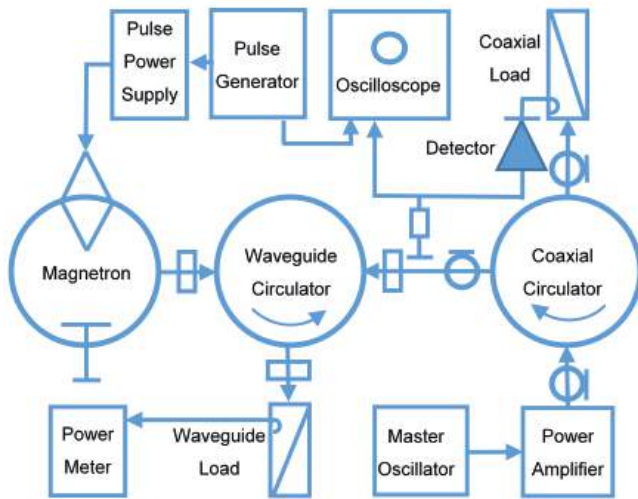


Рис. 1. Блок-схема измерительного стенда.

коммерческому СВ-магнетрону 2М246. Магнетрон подключен к измерительной волноводной нагрузке через волноводный циркулятор (VALVO VHU1131). Импульсный источник питания служит для подачи на магнетрон импульсного высокого напряжения и тока накала катода. Управление источником и запуск осциллографа осуществляется генератором импульсов (Г5-56). Синхронизирующий СВЧ-сигнал на магнетрон поступает от задающего генератора (Г4-79) и усилителя мощности через коаксиальный циркулятор.

Коаксиальный циркулятор служит для защиты усилителя мощности, снабжен зондом для регистрации огибающей СВЧ-мощности магнетрона. Усилитель обеспечивал импульсную СВЧ-мощность до 150 Вт. Для измерения уровня СВЧ-мощности магнетрона и формы огибающей волноводная нагрузка оснащена СВЧ-зондом с калиброванным переходным затуханием -60 дБ. СВЧ-мощность измерялась соответствующим прибором (Agilent E4418B). СВЧ-сигнал детектировался и регистрировался осциллографом (Tectronix TDS-2014). Стабильность частоты определялась по анализу формы СВЧ-сигнала, отраженного от измерительного резонатора.

Импульсный источник питания (рис. 2) питает магнетрон током накала катода, импульсами высокого напряжения с регулируемой амплитудой, длительностью и частотой следования и управляется внешним генератором импульсов. Схема источника содержит выходную накопительную емкость, которая с помощью управляемого высоковольтного ключа подключается к нагрузке — катоду магнетрона.



Рис. 2. Высоковольтный источник импульсного питания.

Основные параметры источника: выходное напряжение 4.0–5.2 кВ, выходной ток до 3 А в импульсном и 0.5 А в среднем режиме, длительность импульса от 0.1 мкс, фронт импульса менее 0.1 мкс, частота следования до 1 МГц. Источник оснащен датчиками формы импульса, значений высокого напряжения и среднего тока. Устройство имеет габариты $480 \times 520 \times 190$ мм³ и может быть установлено в стойку стандартных размеров. Вес прибора 14.6 кг.

Зависимости КПД магнетрона от уровня генерируемой импульсной СВЧ-мощности как для коротких, так и для длинных импульсов представлены на рис. 3. Характеристика рассчитывалась как отношение средней мощности

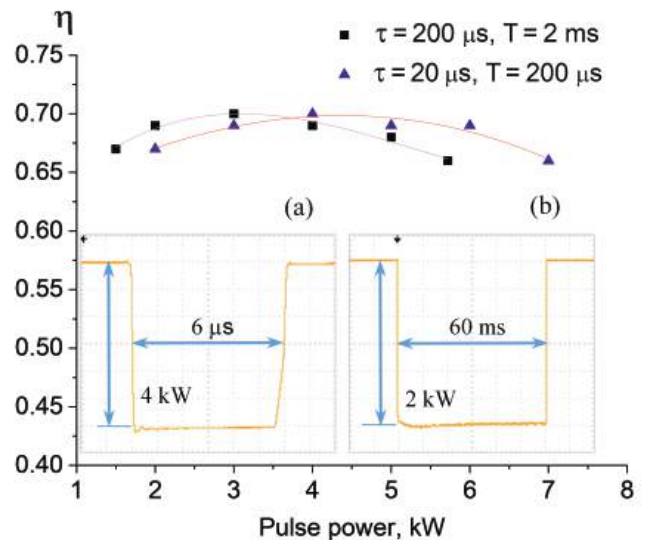


Рис. 3. Зависимость КПД магнетрона η от мощности СВЧ-импульса при постоянной скважности $T/t = 10$ (T — период следования импульсов, t — длительность импульса). На вставках представлена форма огибающей СВЧ-импульсов при коротком (а) и длинном (б) импульсах: а — развертка 1 мкс/дел, длительность импульса $t = 6$ мкс, фронты менее 0.5 мкс, импульсная СВЧ-мощность около 4 кВт; б — развертка 10 мс/дел, длительность импульса $t = 60$ мс, импульсная СВЧ-мощность около 2 кВт.

СВЧ к средней выходной мощности импульсного источника питания. КПД коммерческих СВЧ-магнетронов близок к 70% как в импульсном (рис. 3), так и в непрерывном [21] режимах.

Типичная форма огибающей СВЧ-импульсов показана на вставке к рис. 3. В возможном диапазоне регулировки длительности импульса от 0.3 мкс до 1 с форма огибающей близка к прямоугольной. Время нарастания СВЧ-импульсов не более 0.1 мкс. При минимальной длительности импульса 0.3 мкс максимальная частота повторения до 1 МГц.

Работа магнетрона с высокой частотой следования парных импульсов продемонстрирована на рис. 4. Возможна настройка как частоты следования пар импульсов, так и временного интервала между ними. В таком режиме парных импульсов магнетрон пригоден для использования в системах таможенного контроля для быстрого переключения энергии ускоренного пучка [23] и для импульсной ЭПР-спектроскопии [24].

Были проведены измерения работы магнетрона в режиме синхронизации внешним СВЧ-сигналом. В работе [18] показано, что экспериментальная зависимость полосы захвата магнетрона в режим синхронизации от мощности сигнала инжекции соответствует теоретической формуле, приведенной в [14, 15, 18].

Стандартным методом определения стабильности частоты СВЧ-сигнала является исследование формы огибающей СВЧ-мощности, отраженной от высокодобротного резонатора [3]. Анализируя форму такого сигнала (рис. 5), можно сравнить стабильность частоты синхронизированного магнетрона и задающего генератора. Добротность измерительного резонатора выбиралась близкой к добротности реальных ускоряющих резонаторов, коэффициент связи резонатора с питающей линией $k \geq 1$.

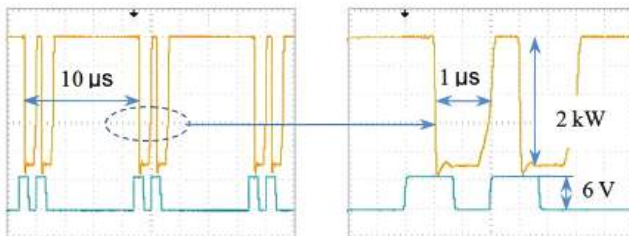


Рис. 4. Последовательность парных импульсов. Импульсная СВЧ-мощность магнетрона около 2 кВт (отрицательные импульсы). Триггерные импульсы 6 В (положительные импульсы): **a** – частота развертки 2.5 мкс/дел; **b** – частота развертки 0.5 мкс/дел.

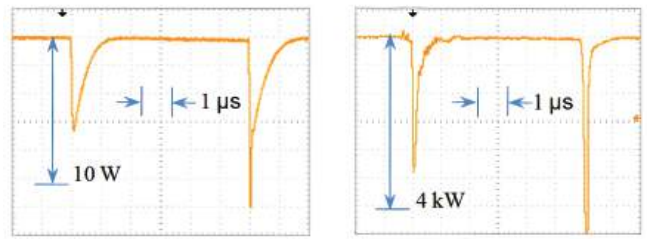


Рис. 5. Форма огибающей микроволновых импульсов, отраженных от измерительного резонатора: **a** – задающий генератор, мощность СВЧ-импульса 10 Вт; **b** – магнетрон в режиме синхронизации внешним сигналом, мощность СВЧ-импульса 4 кВт. Развертка 1 мкс/дел.

3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА СВЧ-МАГНЕТРОНАХ

Ускоритель электронов может состоять из набора последовательно расположенных высокодобротных резонаторов с нагруженной добротностью $Q = 5 \cdot 10^3$, каждый из которых питается от отдельного магнетрона, синхронизированного внешним СВЧ-сигналом. В регулярной части ускорителя при энергии пучка более 1 МэВ можно использовать идентичные резонаторы оптимизированной формы. Ускоряющее напряжение U резонатора определяется известным соотношением: $U = (2\sqrt{ZPk} - ZI)/(1+k)$, где Z – эффективное шунтирующее сопротивление резонатора, P – входная мощность СВЧ, k – коэффициент связи резонатора с питающей линией, I – ток пучка. Принимая для оценки $Z = 2.5$ МОм, $P = 5$ кВт, $k = 1.5$, $I = 0.01$ А, получаем прирост энергии электронов $eU = 100$ кэВ и прирост мощности пучка $P = UI = 1$ кВт на резонатор.

Как показали исследования, фаза синхронизированного магнетрона слабо (не более нескольких градусов) меняется как в течение импульса, так и от импульса к импульсу [25], поэтому для обеспечения режима ускорения электронов резонаторами необходима только система подстройки фазы колебаний отдельных магнетронов.

На рис. 5 приведены осциллограммы, характеризующие стабильность частоты синхронизированного СВЧ-магнетрона 2М246. Нагруженная добротность измерительного резонатора составляла $Q = 5 \cdot 10^3$, частота колебаний магнетрона $f_0 \approx 2.47 \cdot 10^9$ Гц, время установления колебаний $\tau = Q/\pi f_0 \approx 6 \cdot 10^{-7}$ с. Как видно на рисунке, переходный процесс установления колебаний в измерительном резонаторе завершается менее

чем за микросекунду. На плато амплитуда отраженного сигнала не меняется, частота генерации магнетрона постоянна. При таких параметрах СВЧ-мощность синхронизованного магнетрона может быть использована для ускорения заряженных частиц в высокодобротных резонаторах с собственной добротностью $Q > 10^4$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коммерческие СВ-магнетроны S-диапазона (2450 МГц) со средней мощностью 1 кВт (например, магнетрон 2М246) показали превосходные характеристики, и в импульсном режиме обеспечивают СВЧ-мощность до 8 кВт, устойчиво работают в широком диапазоне регулировки длительности импульса от 0.3 мкс до непрерывного режима. Такие магнетроны в режиме внешней синхронизации могут быть применены для создания линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) малой энергии.

В то же время требованию по уровню СВЧ-мощности для создания ЛУЭ удовлетворяет, например, промышленный СВ-магнетрон М-117 производства “Торий” (Москва). В соответствии с паспортом выходная микроволновая мощность такого магнетрона составляет 5 кВт в непрерывном режиме на рабочей частоте 2450 МГц. Для получения пучка электронов с энергией 10 МэВ необходимо 100 резонаторов. Соответственно, мощность пучка ЛУЭ на таких магнетронах будет составлять 100 кВт.

В режиме парных импульсов магнетрон удобен для использования в системах таможенного контроля для быстрого переключения энергии ускоренного пучка ЛУЭ.

Приведенные данные показывают, что синхронизованные внешним сигналом коммерческие СВ-магнетроны в импульсном режиме пригодны для использования как в СВЧ-технике, научных исследованиях, так и в ускорительной технике для создания ЛУЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vyas S.K., Verma R.K., Maurya S., Singh V.V. P. // Frequenz. 2016. V. 70. № 9. P. 455.*
<https://doi.org/10.1515/freq-2015-0196>
2. *Hoz A., Loupy A. Microwaves in organic synthesis. Weinheim: Wiley-VCH. 2012.*
<https://doi.org/10.1002/9783527651313>
3. *Wangler Th. P. RF Linear accelerators. Berlin: Wiley-VCH. 2008.*
<https://doi.org/10.1002/9783527623426>
4. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В., Иванников В.И., Икрянов И.М., Болотов В.А., Танашев Ю.Ю. // ПТЭ. 2019. № 2. С. 136.*
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020046>
5. *Dexter A.C. // Proc. LINAC2014. Geneva, Switzerland. 2014. P. 751.*
6. *Kazakevich G., Lebedev V., Yakovlev V., Pavlov V. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2016. V. 839. P. 43.*
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.09.044>
7. *Read M., Ives R.L., Bui T., Collins G., Marsden D., Chase B., Reid J., Walker C., J. Conant. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2019. V. 47. № 9. P. 4268.*
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2932264>
8. *Zhang Y., Huang K., Agrawal D.K., Slawecki T., Zhu H., Yang Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. V. 64. P. 4272.*
<https://doi.org/10.1109/TED.2017.2737555>
9. *Liu Z., Chen X., Wan J., Wu P., Yang M., Huang K., Liu C. // IEEE Electron Device Lett. 2018. V. 39. № 9. P. 1425.*
<https://doi.org/10.1109/LED.2018.2857808>
10. *Yang B., Mitani T., Shinohara N. // IEEE Trans. Electron Devices. 2019. V. 66. № 1. P. 709.*
<https://doi.org/10.1109/TED.2018.2877204>
11. *Chen X., Yang B., Shinohara N., Liu C. // IEEE Trans. Electron Devices. 2020. V. 67. № 9. P. 3802.*
<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3009901>
12. *Lai C., Zhao C., Li K. et al // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2020. V. 68. № 10. P. 4424.*
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3006488>
13. *Chen X., Yang B., Shinohara N., Liu C. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2021. V. 69. № 4. P. 2267.*
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3056550>
14. *David E.E. In Crossed Field Microwave Devices. V. 2. New York: Academic Press. 1961. P. 375.*
15. *Райнер М.М. // Вопросы радиоэлектроники. Серия 1: Электроника. 1961. № 8. С. 12.*
16. *Pengvanich P., Neculaes V.B., Lau Y.Y., Gilgenbach R.M., Jones M.C., White W.M., Kowalczyk R.D. J. // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. № 11. P. 114903.*
<https://doi.org/10.1063/1.2132513>
17. *Tahir I., Dexter A., Carter R. // IEEE Trans. Electron Devices. 2006. V. 53. № 7. P. 1721.*
<https://doi.org/10.1109/TED.2006.876268>
18. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В., Икрянов И.М., Болотов В.А., Танашев Ю.Ю., Медведев Л.Э., Воскобойников Р.В. // Письма в ЖТФ. 2020. Т.46. № 1. С. 36.*
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.01.48862.18051>

19. *Zarghani M., Mohsenzade S., Kaboli S.* // IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021. V. 9. № 3. P. 3019. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3006013>.
20. *Mitani T., Shinohara N., Matsumoto H.* // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC). (Kitakyushu, Japan). 2007. P. 1.
21. *Wang H., Plawski T., Rimmer R.A., Neubauer M., Dudas A.* // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC). (Monterey, CA. USA). 2016. P. 1.
22. *Chernousov Y.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2023. V. 70. № 2. P. 826. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3225760>
23. *Арлычев М.А., Бельх А.В., Наливаев А.В., Новиков В.Л., Огородников С.А., Шевелев И.Е.* Патент на изобретение RU 2 566 468 С1. Оpubл. 27.10.2015. Бюл. № 30.
24. *Tsvetkov Yu. D., Bowman M.K., Grishin Yu. A.* Pulsed Electron–Electron Double Resonance: Nanoscale Distance Measurement in the Biological, Materials and Chemical Sciences. Springer. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05372-7>
25. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. С. 1546.