

МАГНІТОПРОВІД ДЛЯ МАГНЕТРОНУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ З ОСЬОВИМ КРІПЛЕННЯМ КАТОДУ

В. В. Завертанний¹, К. Ільєнко¹, Т. Яценко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,
вул. Акад. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна
k.ilyenko@gmail.com

² проїзд Рейгана, 9930, 92126 Сан Дієго, Каліфорнія, США

Розроблено композиційний магнітопровід з постійних магнітів та полюсних наконечників з магнітомагнітного матеріалу для пакетованого магнетрону 8 мм діапазону, що працює в режимі просторової гармоніки. Це зменшує необхідне значення магнітної індукції до досяжних значень та дозволяє розробити магнітопровід на постійних магнітах, який має просту структуру, прийнятні масово-габаритні характеристики та помірну вартість.

Ключові слова: магнітопровід на постійних магнітах, міліметровий діапазон, магнетрон на просторовій гармоніці.

Магнетрони міліметрового (мм) діапазону довжин хвиль, розроблені у ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, м. Харків, використовують взаємодію електронної хмари з просторовою гармонікою одного з дублетних видів (не- π -вид) коливань рівнорезонаторного анодного блоку [1,2]; у вітчизняній літературі такий режим роботи магнетрону називається «харківським» [3]. Порівняння комерційних конструкцій добре відомих звичайних нерівнорезонаторних (rising-sun) π -видних магнетронів з такими магнетронами на «просторовій гармоніці» демонструє перевагу останніх за вихідною потужністю у всьому мм-діапазоні довжин хвиль. Для 3-х мм (W-band) діапазону, граничного діапазону, в якому наявні комерційно доступні звичайні магнетони (MG5335, e2v), імпульсна вихідна потужність комерційних магнетонів на просторовій гармоніці (5÷9 кВт) є, принаймні, в два рази більшою, [4]. Перевагою таких конструкцій є, зокрема, прийнятні значення необхідного однорідного магнітостатичного поля, що призводить до загального зменшення маси та габаритів пакетованих приладів. Вимога оптимальних масово-габаритних характеристик призвела до висунення на передній план рідкісно-земельних постійних магнітів як матеріалу для виготовлення компактних фокусувальних систем та магнітопроводів, що забезпечують великі магнітостатичні поля взагалі [5–7] та для малогабаритних резонаторних магнетронів зокрема [8,9].

У ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України нами використовується відомий метод багатократного розкладення простору системи на постійних магнітах разом із власною розробленою методологією геометричної подібності (див., наприклад, [10] та посилання там на літературу), яка базується на тому, що магнітне поле в заданій точці простору залежить від зворотного куба відстані до цієї точки від елемента об'єму з магнітним ма-

теріалом і, одночасно, пропорційне величині об'єму цього ж магнітного матеріалу, що створює магнітне поле. Використовуючи наш досвід у виробництві пакетованих фокусувальних систем і магнітопроводів на постійних магнітах, застосовується спрощений монтаж полюсів магніту (намагнічених поперечно до осі симетрії магнетрону, а не під 'оптимальними' кутами, порівняйте з [7,8]). Конструкції перевірялися, використовуючи пакет CST [www.cst.com].

Зовнішній обід (намагнічений поперечно до та від осі z у лівому та правому полюсах відповідно) кожного полюса збирається з $N = 6$ однакових сегментних блоків з зовнішнім діаметром магнітного матеріалу D_{ext} . Загальна осьова протяжність (довжина) обох полюсних збірок – L ; центральні вставки містять полюсні наконечники з магнітом'якого матеріалу (залізо), які також слугують концентраторами магнітного поля у робочому зазорі магнетрону (див. рис. 2а). Стандартна відстань (розмір проміжка) між лівою та правою збірками полюсів систем фокусування на постійних магнітах для магнетронів мм-діапазону довжин хвиль, що виготовляються у вакуумній лабораторії відділу вакуумної електроніки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, становить 25 мм.

Типові осьові розподіли магнітної індукції для $D_{ext} = 40$ мм та деяких потрібних L показані на рис. 1 для значення залишкової намагніченості $B_r = 0.8$ Тл; тип магнітом'якого матеріалу полюсних наконечників для моделювання у пакеті CST – залізо Steel 1010.

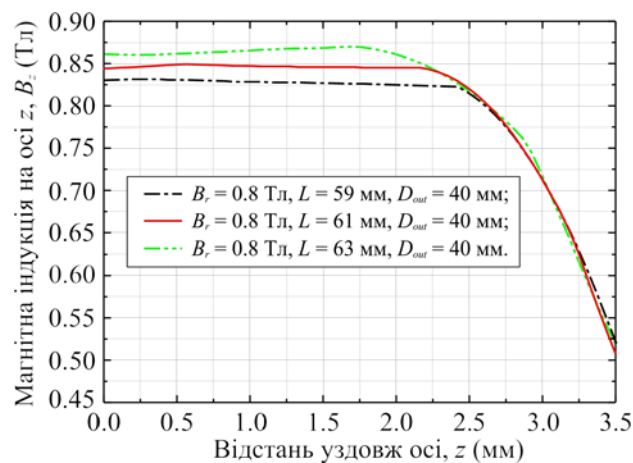


Рис. 1. Розподіли магнітної індукції на осі системи; наведено (праву) половину робочого зазору.

За інженерний критерій нами приймався принцип рівного питомого внеску у z -компоненту магнітної індукції в центрі робочого зазору (рис. 2а) від певного елементарного об'єма магнітного матеріалу (див. [7,10]), $dB_{\alpha_{jk}}^z / dm_{jk} \equiv const$, де $dB_{\alpha_{jk}}^z$ – z -компонента магнітної індукції створена магнітним моментом $dM_{jk} = m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0))dV_{jk}(\alpha_0^j)$ ($m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0)) \approx const$), що заходиться між $j-1$ та j променями (полярний кут α_0^j) та між $k-1$ та k площинами перпендикулярними до осі z , $j = \overline{1, J}$ та $k = \overline{1, K}$;

$$dB_{\alpha, jk}^z(\alpha_0^j, z_k; \alpha) = \frac{3\mu_0 \cos^3 \alpha_0^j}{4\pi z_k^3} m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0)) dV_{jk}(\alpha_0^j) \times \\ \times [b_{\rightarrow j}(\alpha_0^j) \cos \alpha + b_{\uparrow j}(\alpha_0^j) \sin \alpha],$$

$dm_{jk} = \rho dV_{jk}(\alpha_0^j)$. Тут $m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0))$ – питомий (вважається майже постійним) магнітний момент магнітного матеріалу, який використовується для проектування магнітопроводу, ρ – це густина магнітного матеріалу, яка тут вважається сталюю, а \vec{r}_0 є вектором до центру робочого проміжка магнітопроводу від елементарного jk -об'єму магнітного елемента dm_{jk} .

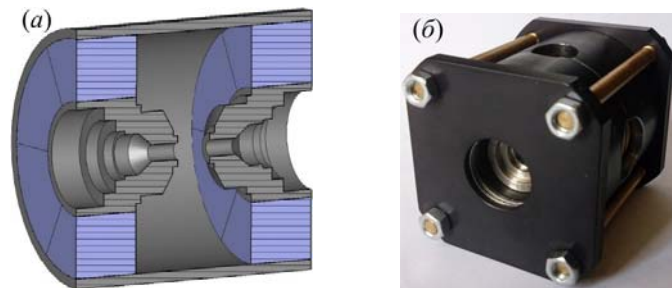


Рис. 2. Розріз обох збірок ободів, кожен з яких складається з $N = 6$ намагнічених поперечно до та від осі системи у лівому та правому полюсах відповідно однакових сегментних блоків, магнітопроводу на постійних магнітах з полюсними наконечниками / концентраторами магнітного поля (а) та магнітопровід з радіатором охолодження у обоймі (б).

З практичних міркувань, для заданої величини магнітної індукції в центрі робочого зазору (у даних нижче, вона дорівнювала 0.85 Тл), нами обчислювався загальний об'єм, v_m , магнітного матеріалу (обох збірок магнітних полюсів) для можливих розмірів (діаметр D_{out} і довжина L) магнітопроводу магнетрону. Ці результати наведені у Таблиці 1:

Таблиця 1.

Розміри та повний об'єм магнітного матеріалу у центрі системи з магнітною індукцією 0.85 Тл.

D_{out} (мм)	38	40	42	44	46
L (мм)	73	61	57	53	51
v_m (см ³)	36.19	31.56	32.17	31.94	33.33

Оптимальними є розміри $D_{ext} = 40$ мм та $L = 61$ мм з $v_m = 31.56$ см³. Фотографія виготовленого магнітопроводу наведена на рис. 2б.

Унаочнення розподілів статичного магнітного поля, що створюється розробленим магнітопроводом, виконувалося за допомогою пакету CST; деякі результати такого моделювання представлені на рис. 3.

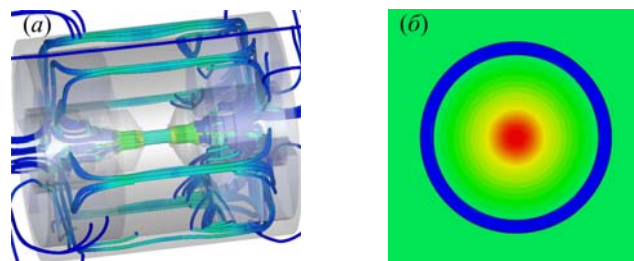


Рис. 3. Ілюстрація розрахунків магнітної індукції у пакеті CST: (а) тривимірна картина силових ліній та (б) розріз площиною, перпендикулярною до вісі системи в середині робочого проміжку.

Кольорове маркування магнітної індукції у довільних одиницях тільки для довідки.

Отже, відпрацьовано конструкцію магнітопроводу на постійних магнітах, яка забезпечує оптимальні масово-габаритні характеристики при заданому значенні магнітної індукції, для магнетронів на просторовій гармоніці мм-діапазону з осьовим кріпленням катоду, що розробляються в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.

Автори вдячні за часткову фінансову підтримку Підрозділу сучасних проблем безпеки НАТО у рамках програми «Наука заради миру та безпеки» (грант № G5195).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / [Усиков А. Я., Канер Э. А., Трутень И. Д. и др. ; под ред. А. Я. Усикова]. – Киев : Наук. думка, 1986. – 368 с.
2. Kim J.-I. Investigation of millimeter-wavelength 20-vane spatial-harmonic magnetron using three-dimensional particle-in-cell simulation / Jung-II Kim, Seok-Gy Jeon, Geun-Ju Kim, Jaehong Kim, V. D. Yeryomka, O. P. Kulagin, A. S. Tishchenko, V. D. Naumenko // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – Vol. 40, N 8. – P. 1966–1971.
3. Гурко А. А. Оптимизация условий работы катода в магнетроне миллиметрового диапазона / А. А. Гурко, В. П. Марин // 14th International Crimean Microwave Conference “Microwave & Telecommunication Technologies”. – Sebastopol, Ukraine, 2004. – P. 230–232.
4. Гурко А. А. Состояние и перспективы развития магнетронов миллиметрового диапазона волн / А. А. Гурко, В. Д. Ерёмка // 10th International Crimean Microwave Conference “Microwave & Telecommunication Technologies”. – Sebastopol, Ukraine, 2000. –, P. 23–26.
5. А. с. 513396 СССР, МКЛ² Н 01 F 7/00. Магнитная система / Я. Д. Рабинович (СССР). – № 1983433/24–7 ; заявл. 28.12.73 ; опубл. 05.05.76, Бюл. № 17.
6. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material / K. Halbach // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. – 1980. – Vol. 169, N 1. – P. 1–10.
7. Капитонов В. Е. Метод синтеза оптимальных магнитных систем / В. Е. Капитонов. – Харьков : ИРЭ АН УССР, 1984. – 26 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т радиофизики и электроники ; ИРЭ 256).

8. *Clark M.* Miniature magnetrons for coherent high-duty operation / M. Clark, B. Vyse // *Microw. Sys. News & Communicat. Technol.* – 1988. – Vol. 18, N 5. – P. 166–171.
9. *Christopher T.* Novel geometries for magnetic circuit optimization / T. Christopher // 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference. – London, UK, 2017. – Paper ID348 P. 1–2.
10. *Ільєнко К.* Оптимізація фокусувальної системи на постійних магнітах для клинотронів субміліметрового діапазону / К. Ільєнко, Ю. Новосел, Т. Яценко // *Електроніка та інформаційні технології.* – 2017. – Вип. 8. – С. 118–126.

MAGNETIC CIRCUIT FOR MM-WAVEBAND MAGNETRON WITH AXIAL CATHODE SUPPORT

V. V. Zavertanniy¹, K. Ilyenko¹, T. Yatsenko²

¹ *O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine,
Akad. Proskury St., 12, UA-61085 Kharkiv, Ukraine
k.ilyenko@gmail.com*

² *9930 Reagan Rd, San Diego, CA 92126, USA*

We report composite permanent magnet and iron pole-piece magnetic circuit for 8 mm waveband (35 GHz) non-incandescent cathode magnetrons operating in the spatial-harmonic regime. This reduces required values of magnetic induction to affordable figures and allows one to design magnetron permanent magnet magnetic circuits that have simple system assembly, reasonable mass-dimensional characteristics, and low cost impact.

We chose to assemble the outer rim (magnetized normally towards to and away from the z-axis in the left and right poles, respectively) of each pole from a number of identical segment blocks with the same external diameter of magnetic material. Total axial extent of the both pole assembly and its external diameter are varied to achieve optimal mass-dimensional characteristics; central inserts house the iron pole-pieces, which also serve as magnetic field concentrators in the work gap of magnetron. Standard distance between the left and right pole assemblies of the permanent magnet focusing systems for mm waveband magnetrons manufactured at the Vacuum Laboratory of Department of Vacuum Electronics of IRE NAS of Ukraine is 25 mm.

As the engineering criterion, we adopted the principle of the equal specific contribution into the z-component of the magnetic induction at the center of the work gap from a given portion of magnetic material. Practically, for the given magnetic induction value at the center of the work gap (which was set at 0.85 T), we calculated the total volume of magnetic material (of the both magnet poles) for possible dimensions of the magnetic circuit and chose those with minimal possible total mass.

Thus, we worked out the design of permanent-magnet magnetic circuit for millimeter wavelength range magnetrons, which ensures optimum mass-dimensional characteristics at a given value of magnetic induction necessary for their operation.

This work is supported in part by Emerging Security Challenges Division in the framework of NATO Science for Peace and Security Programme (Grant G5195).

Key words: magnetic circuit; permanent magnet; spatial-harmonic magnetron; vacuum electron device; mm-waveband.

Стаття: надійшла до редакції 21.06.2019,
доопрацьована 04.07.2019,
прийнята до друку 05.07.2019.