

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БЕЗРОЗЖАРЮВАЛЬНОГО КАТОДУ В МАГНЕТРОНІ Х-ДІАПАЗОНУ

К. Ільєнко¹, В. М. Гурджян¹, В. П. Дзюба², Т. Яценко³

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

² ДП СКБ «Спектр», вул. Новокостянтинівська, 18, 04080 Київ, Україна
dzjuba86@gmail.com

³ проїзд Рейгана, 9930, 92126 Сан Дієго, Каліфорнія, США
tetyana.yatsenko.yu@gmail.com

Експериментально досліджується робота безрозжарювального катоду імпульсного магнетрону Х-(3-х сантиметрового) діапазону довжин радіохвиль, в якому застосовано автоемісійні тонкі («лезові») фольги з тугоплавкого металу у якості джерела первинних електронів. Обговорюються умови та практичні міркування щодо забезпечення стабільної роботи такого катоду.

Ключові слова: автоелектронна та вторинно-електронна емісія, безрозжарювальний катод, 3-х сантиметровий діапазон довжин радіохвиль, лезовий автоемітер з фольги тугоплавкого металу, вторинно-електронний емітер з просоченого вольфраму.

Вступ

Автоелектронна емісія як джерело електронів у електровакуумних приладах (ЕВП) давно розглядається в якості перспективного підходу до забезпечення робочого струму, досягнення оптимальних масо-габаритних характеристик (відсутність кола розжарювання катодного вузла та відповідне зменшення маси модулятора/джерела живлення) та засобу швидкої, фактично миттєвої, готовності ЕВП до роботи. Проте не так багато ЕВП можуть продемонструвати успішну роботу з використанням переваг автоелектронної емісії (АЕЕ) в реальних застосуваннях [1]. В цій статті досліджується робота безрозжарювального катоду магнетрона Х-(3-х сантиметрового) діапазону «Бутон», див., наприклад, [2,3], у якому застосовуються АЕЕ тонкі («лезові») фольги спеціальної конструкції з тугоплавкого металу для ініціювання первинної емісії електронів [4].

Метою даної роботи є дослідження умов запуску та особливостей роботи повністю безрозжарювального катоду за допомогою вимірювань анодного струму у пакетованому магнетроні.

1. Теоретичні міркування

Збільшення катодного струму за рахунок вторинно-електронної емісії (ВЕЕ) спостерігалось в магнетронах з розжарювальним катодом з самого початку їх використання [5], що природно спонукало пошук нових шляхів забезпечення

працездатності магнетрону, в якому в якості основного джерела струму використовується ВЕЕ катод, що подовжує термін служби приладу, [6]. Зазвичай такі прилади застосовували допоміжний термоелектронний катод як початкове джерело первинних електронів [7]. Таке джерело первинних електронів не повинно було мати значні електронні струми і дослідники почали шукати ефективні рішення для повністю безрозжарювальної конструкції катоду [8,9].

Проте проблема розробки та виготовлення надійної конструкції повністю безрозжарювального магнетронного катода виявилася досить складною: в існуючих конфігураціях катодного вузла й анодного блоку необхідно виконати умови для ефективної АЕЕ на заданому робочому рівні прикладеної катод-анодної напруги (для нерелятивістських магнетронів порядку 10 кВ для катод-анодних проміжків в одиниці міліметрів), а потім забезпечити необхідний рівень ВЕЕ для формування електронної хмари у передгенерувальному режимі. Ця хмара має бути здатною генерувати достатню для застосувань вихідну надвисокочастотну (НВЧ) потужність магнетрона. Крім того, введення джерел АЕЕ з гострої кромки тонкої фольги (ножові “леза”) фактично у катод-анодний проміжок магнетрону має здійснюватися таким чином, щоб не порушувати умови ефективної взаємодії анодної сповільнюючої структури з електронною хмари; бо, саме ця взаємодія призводить до генерування вихідної НВЧ потужності.

Через вищезгадані причини для досягнення необхідних величин струму авто- та вторинно-електронної емісії магнетрону з повністю безрозжарювальним катодом вирішується складна інженерна задача, що включає вибір конфігурації автоелектронних емітерів, співвідношення діаметрів авто- та вторинно-електронних емітерів та їхньої кількості у катодному вузлі.

2. Експериментальне дослідження

Кілька відомих експериментальних досліджень АЕЕ [10,11] показують, що на практиці вона має, як практичне порогове значення напруженості електричного поля на структурі, що емітує електрони, так і певне значення напруженості електричного поля, за якого відбувається насичення АЕЕ при збереженні усіх інших основних фізичних властивостей катода (відсутність надмірного перегрівання катода через перехід у режим вибухово-електронної емісії). Здається вигідним досягти значення напруженості поля насичення для забезпечення максимального досяжного струму первинних електронів. Ця величина напруженості поля насичення повинна реалізовуватись для напруги, яка нижча за порогову напругу генерування мікрохвильового випромінювання, при цьому, магнетрон залишається у передгенераційному стані. Також необхідна деяка затримка, перш ніж магнетрон буде під повною робочою напругою, оскільки ВЕЕ у катод-анодному проміжку приладу має розвинути у повному обсязі. На етапі проектування пошук відповідних інженерних рішень здійснюється на експериментальних макетах, однак у виготовленому пакетованому магнетроні також можна простежити прояви вищезгаданих процесів емісії електронів.

Хоча не існує повної теорії коливальної динаміки хмари просторового заряду у передгенераційному режимі магнетрона, експериментально струм витоку надає можливість для розуміння процесу розвитку електронної хмари. Дослідники вважають, що струм витоку (як і зворотне бомбардування катода) є проявом свого роду нелінійних колективних коливань хмари просторового заряду у ненейтральній магнітоізолюваній електронній плазмі хмари (див., наприклад, [12]). Потрапляння деяких емітованих катодом магнетрона електронів у певну фазу цих нелінійних колективних коливань

призводить до втрати їхньої енергії, що дозволяє ним досягнути катода; тоді як деякі інші електрони, потрапляючи до відповідної фази цих коливань, здобувають енергію і вдаряються назад у катод, що викликає ВЕЕ. Приймаючи таку точку зору, можна простежити початок первинного автоелектронного струму через вимірювання анодного струму витоку у передгенерувальному пакетованому магнетроні (передгенерувальний струм витоку у магнетроні з безрозжарювальним катодом є показником достатньої АЕЕ).

Для дослідження анодного струму нами зібрано установку, що складається з серійного магнетрону 3-х сантиметрового (X-)діапазону «Бутон» і лабораторного модулятора з мікроконтролерним регулюванням амплітуди, частоти повторення та тривалості імпульсної напруги. Магнетрон має спеціально розроблені та виготовлені ножові («лезові») кільцеві АЕЕ з тонкої танталової фольги, встановлені коаксіально уздовж втулок/шайб з пористого вольфраму, які просочені алюмінатом барію-стронцію та утворюють циліндричні ВЕЕ [2,4].

Середнє значення анодного струму відображається на голівці аналогового мікроамперметра, а прикладена напруга подається в осцилограф за допомогою високовольтного щупа Tektronics P6015A. Генерований магнетроном мікрохвильовий сигнал подається в осцилограф через рупор з мікрохвильовим детектором і додатково контролюється неоновією лампочкою для покращення візуалізації (рис. 1).



Рис. 1. Світіння неоновієї лампочки демонструє наявність мікрохвильового випромінювання через вихідний фланець стандартного хвильоводу поперечним перерізом $10 \times 23 \text{ мм}^2$.

Fig. 1. Neon bulb indicating RF output through $10 \times 23 \text{ mm}^2$ flange at low EM field level.

Результати вимірювань середнього анодного струму \bar{I}_a у передгенерувальному магнетроні представлені у табл. 1. Частота повторення імпульсів становить 240 Гц, тривалість $\sim 200 \text{ нс}$ (коефіцієнт заповнення імпульсу $\sim 5 \cdot 10^{-5}$). Початок НВЧ-коливань відбувається за анод-катодної напруги 6,4 кВ із середнім анодним струмом $\sim 80 \text{ мкА}$.

Табл. 1. Середній анодний струм у передгенерувальному магнетроні
Table 1. Mean anode current in pre-oscillating magnetron

Анод-катодна напруга, кВ	Анодний струм \bar{I}_a , мкА
3,8	5
4,6	10
5,2	35
6,0	70

Осцилограма прикладеної анод-катодної напруги та відеоімпульс (огинача) згенерованого вихідного 3-х сантиметрового випромінювання представлені на рис. 2. Спостережувану затримку та подальше тремтіння переднього фронту вихідного випромінювання ми відносимо до занадто крутого переднього фронту прикладеного імпульсу анод-катодної напруги, створюваного нашим лабораторним модулятором.

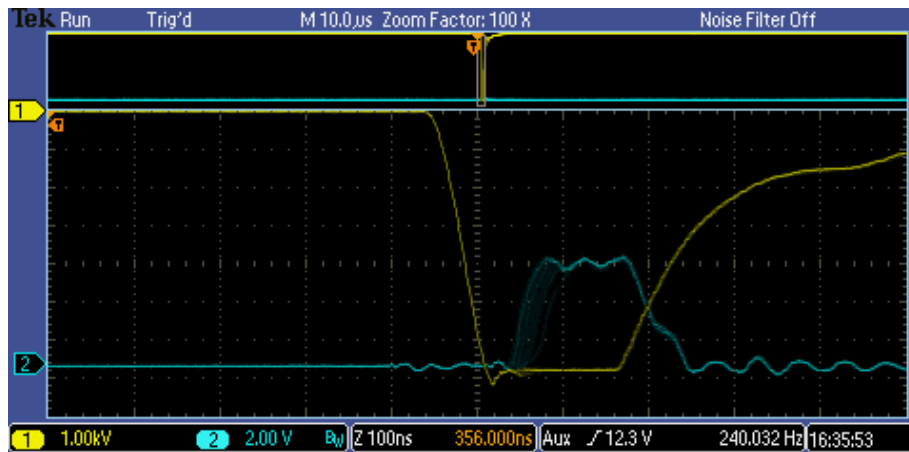


Рис. 2. Прикладена анод-катодна напруга (жовта крива негативної амплітуди) амплітудою 6,8 кВ та згенерований мікрохвильовий імпульс (синя крива позитивної амплітуди), зафіксовані осцилографом.

Fig. 2. Applied A-K voltage (yellow curve of negative amplitude) of 6.8 kV amplitude and generated microwave pulse (blue curve of positive amplitude) recorded by an oscilloscope.

Висновки

Практична реалізація повністю безрозжарювальної конструкції катоду в магнетроні 3-х сантиметрового (X-)діапазону «Бутон» та подальша експлуатація приладу в складі радіолокаційної станції спостереження за морською поверхнею «Буревісник-1» [13] показали високу надійність розробленої катодної конструкції, в тому числі за рахунок виключення підігрівача катоду у робочому режимі, перегорання якого є основною причиною виходу з ладу магнетронів з розжарювальним катодом. При цьому із схеми передавача виключається модуль розжарювання катоду, що додатково підвищує надійність комплексу. Це дозволило збільшити мінімальний час напрацювання на

відмову до понад 15 тис. год., що значно більше, ніж у звичайних магнетронів з розжарювальним катодом традиційної конструкції.

Приклад використання безрозжарювального катода у магнетроні 3-х сантиметрового (X-)діапазону «Бутон» показав, що таке конструктивне рішення є цілком придатним і для приладів, які працюють в інших (у тому числі і в міліметровому, див. [14]) діапазонах довжин хвиль.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] *Yeryomka V.D., Dzyuba V.P., Zikov A.F., Melezhik P.N., Milinevskiy L.P., Prokopenko O.I. and Roskoshniy D.V.* Development of up-to-date sea surface-object monitory radar facility "Burevestnik-1" installed at naval and sea border guard surveillance points, 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunications Technologies" (CriMiCo) , pp. 1248-1250, 13–17 September 2010, Sevastopol, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632917>.
- [2] *Yeryomka V.D. and Dzyuba V.P.* Coaxial cold-cathode magnetron, 5th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 246-247, 27–29 April 2004, Monterey, CA, USA. <https://doi.org/10.1109/IVELEC.2004.1316294>.
- [3] *Yeryomka V.D., Dzyuba V.P., Zakhrabov M.N., Mytnyk A.P. and Tokovenko O.M.* "Magnetron" [Magnetron], Ukraine Patent 83534, H01J 25/00, Bulletin, no. 1, 25 July 2008.
- [4] *Yeryomka V.D. and Dzyuba V.P.* X-band pulse coaxial magnetron with field and secondary emitters, Proceedings of IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computing Engineering (UKRCON), pp. 762-765, 29 May – 2 June 2017, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100349>.
- [5] *Jepsen R.L. and Muller M.W.* Enhanced emission from magnetron cathodes, Journal of Applied Physics, no. 9(22), pp. 1196-1207, 1951. <https://doi.org/10.1063/1.1700133>.
- [6] *Wigdorchik I.M., Naumenko V.D. and Timofeev V.P.* "Impulsnyye magnetrony s kholodnym vtorichno-emissionnym katodom" [Pulsed magnetrons with cold secondary-emission cathode], Reports of Academy of Sciences of ex-USSR, Series A: Physical-Mathematical and Engineering Sciences, no. 7, p. 634, 1975.
- [7] *Naumenko V.D.* Survey of existing designs of millimetre waveband magnetrons, Radio Electronics Communication Systems, No. 4(60), pp. 141-160, 2017. <https://doi.org/10.3103/S073527271704001X>.
- [8] *Spencer P.L.* Electron devices with a sharp edged cathode, US Patent 3 109 123, Cl. 315-39.63, 1962.
- [9] *Afanasiev V.A., Bondarenko B.V., Kopylov M.F., Makhov V.I., Nazarov V.A. and Pliasunov V.A.* "SVCh pribor M-tipa" [M-type ultrahigh-frequency vacuum device], ex-USSR Patent 1780444, H01J 1/30, Bulletin of Inventions, no. 8, 1994.
- [10] *Bondarenko B.V.* "Sposob povysheniya stabilnosti emissii i sroka sluzhby avtoelektronnykh katodov" [Method for increasing emission stability and service life of field-emission cathodes], Electronics Engineering Series 1: UHF Electronics, no. 6, pp. 74-82, 1973.

- [11] Kotov V.D., Tolstikova L.P., Savitskij E.M., Burov I.V., Litvak L.I. and Kryvda V.V. “Avtoemissionnye svoystva tonkikh folg Ta i ego splava s Nb” [Field emission properties of thin foils made of Ta and its alloy with Nb, in Research and Application of Refractory Metal Alloys], E.M. Savitskij, Ed. Moskva: Nauka, 1983, pp. 118-119.
- [12] Ilyenko K., Yatsenko T., Vekslerchik V., Opanasenko A., and Portillo S. Upper-hybrid oscillations of high current relativistic electron beam under conditions of magnetic self-insulation, *Physics of Plasmas*, no. 7(31), 072303 pp. 1-7, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0206628>.
- [13] Yakovenko V.M. “Fizychni osnovy ta radioelektronni zasoby kontrolyu nadvodnoij obstanovky ta sudnoplavstva” [Physical foundations and radio-electronic means of maritime and shipping surveillance] / Yakovenko V.M., Ed. Sevastopol, Ukraine: Weber Publisher, 196 p., 2012, pp. 115-180. ISBN 978-966-335-383-8.
- [14] Bekirov B., Terekhin S.N., Zavertanniy V.V., Yeryomka V.D., Milcho M.V., Ilyenko K., Dzyuba V.P., and Yatsenko T. Ka-band 20-vane non- π -mode magnetron, 21st IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 19–22 October 2020, USA. <http://doi.org/10.1109/IVEC45766.2020.9520622>.

NON-INCANDESCENT CATHODE OPERATION IN X-BAND MAGNETRON

K. Ilyenko¹, V. M. Gurdzhian¹, V. P. Dzyuba², T. Yatsenko³

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, vagan.gurdzhian@gmail.com

² State Enterprise Special-Research and Engineering Office “Spektr”
Novokostiantynivska St., 18, UA–04080 Kyiv, Ukraine
dzjuba86@gmail.com

³ 9930 Reagan Rd., San Diego, CA 92126, USA
tetyana.yatsenko.yu@gmail.com

A study of operation of non-incandescent cathode of X-band magnetron is reported, which employs field electron emission thin foil sharp blade-type sources to instigate the primary emission of electrons. We discuss conditions and practical considerations necessary to provide stable operation of the cathode.

The problem of engineering and manufacturing a reliable design of totally non-incandescent magnetron cathode turned out to be rather challenging: in the existing cathode-anode block configurations one needs to fulfil conditions for efficient FEE at a given operating level of applied A-K voltage (for non-relativistic magnetrons of the order of 10 kV for A-K gaps in the units of millimetres) and then ensure sufficient level of SEE to develop electron cloud capable of producing enough output magnetron microwave power. Moreover, introduction of thin foil sharp blade/knife-edge sources of FEE essentially into the A-K gap of a magnetron anode block should be done in a manner not disrupting electron cloud-anode slow-wave structure interaction resulting in production of microwave output power. Finding of appropriate engineering solutions to these goals is done on test A-K gaps at the design stage; however, in the manufactured packaged device, one can also trace evidence of described emission processes. Although there is no complete theory of a pre-oscillating dynamics of space-charge cloud in a magnetron,

experimentally the leakage current provide a means of an insight into the development of electron cloud. The leakage current (as well as the back cathode bombardment) is a manifestation of a kind of nonlinear collective space-charge cloud oscillation in a non-neutral magnetically insulated electron plasma of the cloud. Accepting such a viewpoint, we can trace the onset of primary electron current as measurable anode leakage current in the pre-oscillating packaged magnetron. We can also experimentally observe the saturation of the FEE current as manifested by the saturation of the anode current before the start of microwave generation.

Key words: non-incandescent cathode, field and secondary electron emission, thin foil sharp blade field emitter, impregnated tungsten secondary emitter, X-band

Стаття надійшла до редакції 11.08.2024

Прийнята до друку 15.08.2024