

М.А. КОПОТЬ

МАГНЕТРОННІ ГЕНЕРАТОРИ
З ХОЛОДНИМ ВТОРИННО-ЕМІСІЙНИМ КАТОДОМ,
ЩО ЗАПУСКАЮТЬСЯ ПОЛЬОВИМИ КАТОДАМИ

Вступ

Магнетрон – електровакуумний прилад з двома електродами, анодом і катодом, між якими існує електричне поле, а магнітне поле перпендикулярне до електричного. Схематично загальний вигляд класичного магнетронного генератора зображений на рис. 1.

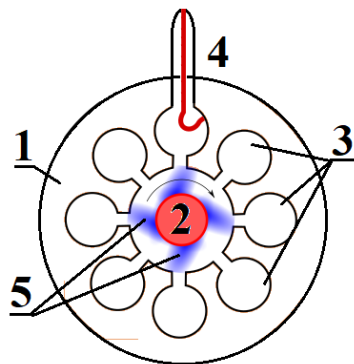


Рис. 1. Загальний вигляд магнетрона: 1 – анод; 2 – катод; 3 – резонатори; 4 – вивід енергії, 5 – електронний потік

У магнетроні електронний потік замкнутий, оскільки конструкція циліндрична та має практично осьову симетрію, якщо не враховувати виведення енергії. Циліндричність конструкції призводить до замкнутості електронного потоку, що, в свою чергу, і створює зворотний зв'язок. У загальному випадку це можна розглядати як своєрідний електронний резонатор, в якому можливе збудження коливань з частотами, що залежать від електричного режиму роботи приладу [1–3].

Оскільки вся система циліндрична, вона є азимутально симетричною. Емісія електронів відбувається з катода, наявність схрещених полів у просторі взаємодії призводить до утворення втулки просторового заряду, яка обертається з певною швидкістю. Електрони групуються в згустки (так звані «спиці»), що обертаються разом з полем навколо катода. При цьому відбувається автофазування електронних згустків.

Робота над вдосконаленням приладів зі схрещеними полями відбувається безперервно. З'являються нові конструкції, які мають поліпшені характеристики. До основних характеристик можна, умовно звичайно, віднести потужність і частоту. Однак є й інші параметри, які необхідно вдосконалити, наприклад довговічність.

Розвиток магнетронних генераторів (з урахуванням їх довговічності)

До традиційних або класичних приладів можна віднести прилади з термокатодом та прилади з холодним вторинно-емісійним катодом, що запускаються все тим же термокатодом. Початкові або первинні електрони в таких приладах потрапляють у простір взаємодії з бічного термокатода [4]. До нетрадиційних приладів можна віднести прилади з основним холодним вторинно-емісійним катодом, але які запускаються катодами, що використовують інші фізичні принципи, а саме автокатооди (польові катооди) та фотокатооди (реальних конс-

трукції автору не відомо). Окремо варто згадати один з нетрадиційних магнетронних приладів, в якому можливий запуск анодною напругою спеціальної форми [5]. Одне з найперших посилань на таке рішення наведено в [6, 7]. Розрахунки форми траєкторій електронів для такої форми імпульсу були проведені в роботі [8].

Як зазначено вище, робота над поліпшенням експлуатаційних характеристик даного класу приладів ведеться безперервно. Як правило, це відбувається в технологічно розвинених країнах, таких як США, Англія, Південна Корея, Японія. До деякого часу такі роботи велися і в кількох країнах, які раніше входили до складу Радянського Союзу, зокрема в Україні. Однак на даний час спостерігається все більше технологічне і наукове відставання від країн-лідерів у цьому напрямку. Слід також зазначити, що в теорії магнетронних приладів досі залишаються недостатньо вивченими деякі важливі питання та особливості роботи приладів, пов'язані з тривимірним характером електронно-хвильової взаємодії (аксіальні коливання електронної хмари, вплив на вихідні характеристики неоднорідних електричних і магнітних полів, запуск приладу за допомогою ін'єкції заряду в простір взаємодії тощо).

Історично склалося так, що при створенні магнетронних генераторів використовувалися термокатоди. Тобто катоди, які здійснюють електронну емісію у простір взаємодії за рахунок їх розігріву. Звідси відразу видно недолік таких конструкцій – це малий час життя. Без форсмажорних обставин, вихід з робочого стану відбувається завдяки втраті катодом емісійних властивостей [9]. Тому розробники магнетронів стали замислюватися над збільшенням терміну експлуатації приладу за допомогою застосування холодного катода як основного. До холодних катодів можна віднести вторинно-емісійний катод, тобто катод, який забезпечує емісію без нагрівання. Сама назва таких катодів вторинно-емісійні говорить сама за себе. Для емісії з такого катода, його необхідно бомбардувати початковими або затравними, а частіше їх називають «первинними» електронами. Слід зазначити, що в понятті коефіцієнта вторинної електронної емісії присутнє відношення числа вторинних електронів до числа первинних, що викликали емісію. Таким чином, «первинні» електрони – чітке термінологічне поняття.

Цей коефіцієнт залежить від природи опромінюваного або бомбардованого матеріалу, стану його поверхні, енергії частинок, що бомбардують поверхню, та кута їх падіння на поверхню. Для металів максимальний коефіцієнт вторинної емісії не перевищує значень 3, а для напівпровідників він вище і може приймати значення близько 10. Великі значення у напівпровідників, порівняно з металами, пов'язані з малою роботою виходу електронів, переведених у зону провідності з валентної зони, або з донорних рівнів. Максимальне значення спостерігається, коли тонкий шар напівпровідника нанесено на поверхню металу. Звичайно, матеріали для таких катодів повинні мати максимальний коефіцієнт вторинної емісії, що сприятиме більш «полегшеному» утворенню втулки просторового заряду.

Вторинно-емісійні катоди часто виготовляються з металів, що мають високий коефіцієнт вторинної електронної емісії, таких як магній, барій, цезій, а також їх сплавів. Крім того, використовуються тугоплавкі метали, наприклад вольфрам, молібден, тантал, ніобій, реній, а також платинові метали, такі як осмій, іридій, платина, рутеній, родій, паладій.

Як впливає з визначення вторинної емісії, для її реалізації необхідні первинні електрони. І тут ми підходимо до наступного завдання – вибору джерела цих первинних електронів, тобто джерела електронів, що запускає процеси вторинного емісійного розмноження. Це джерело теж є катодом, оскільки емітує саме ці первинні електрони. У цьому завданні спочатку прийшли до використання катода, що нагрівається, оскільки це відповідало історичному розвитку, тобто термокатоду [4].

Але проблематика збільшення часу роботи катодів зберігається, оскільки залишається процес нагрівання допоміжного катода. Варто зазначити, що цей катод працює в більш «легкому» режимі, в порівнянні з основним, оскільки струм, що запускає, досить невеликий за значенням (звичайно знаходиться в діапазоні 0,1–1,0 мА, іноді досягає десятків мА [4]).

Наступним завданням у збільшенні довговічності магнетронних приладів стало завдання збільшення терміну служби катода, якій запускає процес вторинно-емісійного розмноження

електронів. «Піонером» на пострадянському просторі, який запропонував рішення даного завдання, був Копилов М.Ф. та інші [10]. Він запропонував в якості катода, що запускає, використовувати польовий катод. У цій конструкції реалізовувався принцип створення на поверхні, що емітує електрони, напруженості електричного поля, достатньої для подолання електронами потенційного бар'єру. На пострадянському просторі це називалося автоемісією, на Заході ж дотримувалися іншої назви, зокрема – польова емісія. Обидві ці назви описують одне і те ж фізичне явище, яке полягає в тому, що зовнішнє електричне поле знижує потенційний бар'єр, що сприяє виходу електронів з поверхні катода.

Конструкції магнетронів з автоемісійними (польовими) катодами

Перша розробка магнетрону з запуском від автокатодів була, як зазначено вище, запропонована Копиловим М.Ф. Схематичне зображення цієї конструкції представлено на рис. 2.

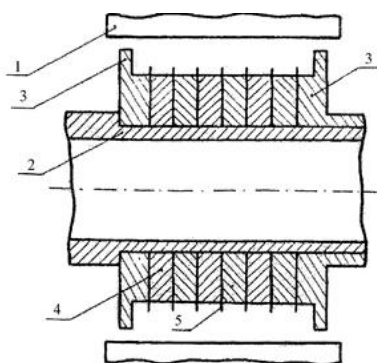


Рис. 2. Конструкція катодного вузла Копилова М.Ф.:
1 – ламелі (анодна система), 3 – торцеві екрани, 2 – основний конструкційний шар,
4 – вторинно-емісійні ділянки, 5 – лезові автокатооди

У цій конструкції є серйозні недоліки, які полягають у тому, що така система вносить сильні неоднорідності в простір взаємодії, зокрема на розподіл електростатичного і магнітного полів, що виникають на виступах лез у простір взаємодії. Вони ж були перешкодами для руху електронів у прикатодній області в аксіальному напрямку.

У цій роботі співавтором був Махов В.І., який згодом запропонував свою конструкцію автокатода, схема якої представлена на рис. 3.

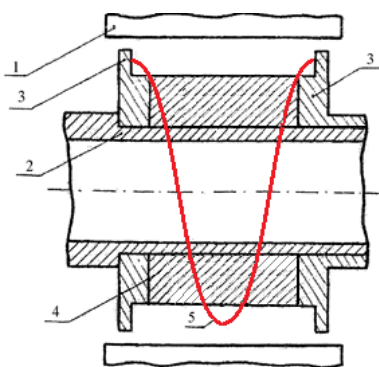


Рис. 3. Конструкція катодного вузла Махова В.І.:
1 – ламелі (анодна система), 3 – торцеві екрани, 2 – основний конструкційний шар,
4 – вторинно-емісійні ділянки, 5 – спіралеподібно розташована нитка автокатода

Особливість даної конструкції полягала в тому, що на рівні автокатодів зберігалася поверхня, що емітує електрони (вона була виконана у вигляді спіралі навколо вторинно-емісійного катода). Це зменшувало неоднорідність магнітного та електростатичного полів в аксіальному напрямку. Крім того, польовий емітер не заважав руху електронів у тому ж аксіальному напрямку.

Слід зазначити, що уявлення про динаміку руху електронної хмари в такому просторі буде більш фізичним. Конструкція Махова дещо вирішує проблему з неоднорідністю полів, але не виключає вплив додаткового електрода на розподіл полів у просторі взаємодії та істотно ускладнює тепловідвід від електрода, з якого відбувається автоемісія.

Проаналізувавши обидві ці конструкції, автором були запропоновані рішення, що використовують позитивні моменти кожної з цих конструкцій. Невеликі зміни цих конструкцій полягали, в першому випадку, в ізоляції лезових катодів від вторинних емісійних ділянок [11], що дає можливість подавати напругу окремо на лезові катоди постійно, або подавати імпульси для запуску основного катода. Відповідна схема представлена на рис. 4.

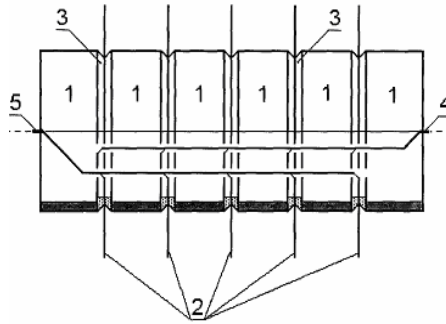


Рис. 4. Модифікована конструкція Копилова М.Ф.:

1 – вторинно-емісійні втулки, 2 – лезові катоди, у вигляді шайб більшого діаметра, ніж катод,
3 – ізолятори між двома катодами, 4 і 5 – підведення напруги на кожен з катодів

На кожен катод можна подавати напругу окремо і, отже, можна автокатооди вимикати.

Друга запропонована автором конструкція характеризувалася тим, що в лезах пророблялися отвори [12]. Відповідна схема представлена на рис. 5.

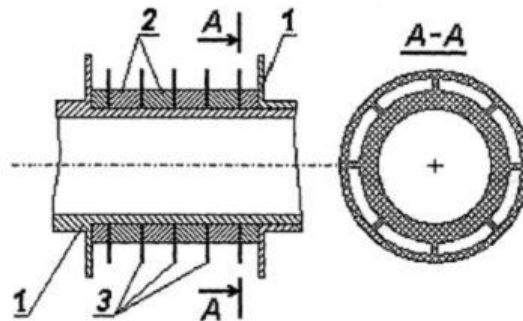


Рис. 5. Другий варіант модифікації конструкції Копилова М.Ф.:

1 – несучий керн з торцевими наконечниками, 2 – вторинно-емісійні втулки, 3 – лезові катоди

Обидві ці модифіковані конструкції усували певні недоліки, але не вирішували їх повністю. Протягом років були технічні рішення в цій галузі в організації, де працював Копилов М.Ф., наприклад [13]. Однак ці рішення не були принципово відмінними від базової конструкції.

Слід зазначити, що на підприємстві «ГЕНЕРАТОР» (м. Київ) була створена конструкція магнетрону, що представляє собою певний симбіоз розглянутих вище конструкцій. Суть нового підходу полягала в тому, що «лезові» автокатооди зазнали змін. На кінці цих «лез», звернених до анодної системи, були виконані зубці і зроблені отвори в «лезових» катодах подібно [12]. Це підвищувало концентрацію електростатичного поля на кінчиках зубців.

Прилад був виготовлений, і на його основі побудували радіолокаційну станцію. Вона була встановлена в Криму і проходила випробування.

Подальша робота в цьому напрямку призвела до застосування автокатодного запуску основного холодного вторинно-емісійного катода за допомогою використання додаткових електродів спеціальної форми, які були закріплені на торцевих наконечниках. На додаткові електроди подавалися певні імпульси напруги [14]. Хоча варто зазначити, що ці електроди продовжували залишатися в просторі взаємодії, що є не зовсім бажаним. Ця конструкція зображена на рис. 6. Було два можливих технічних рішення: з використанням цих електродів на одному торцевому наконечнику (рис. 6, а) та на обох наконечниках (рис. 6, б).

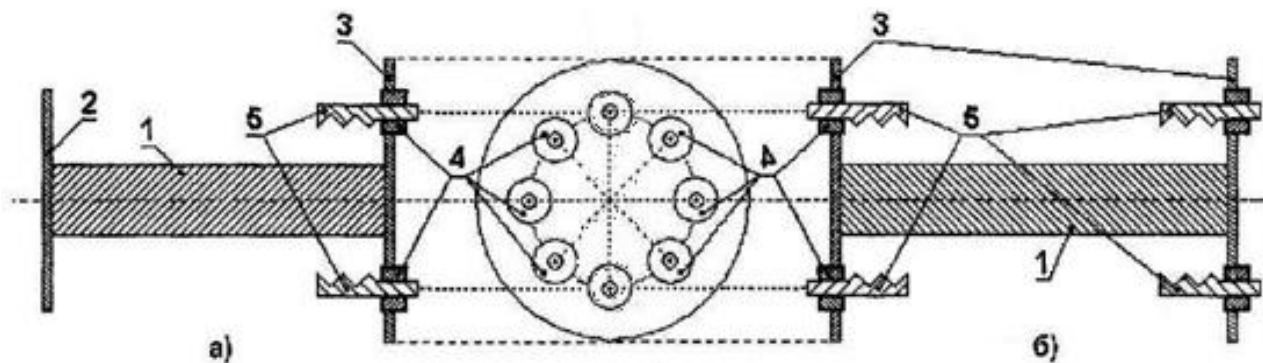


Рис. 6. Конструкція з додатковими електродами:

1 – основний ВЕК, 2 – торцевий наконечник, 3 – наконечник з встановленими електродами, 4 – ізолятори, 5 – самі електроди

Отже, на рис. 6 зображено дві можливі конструкції з різним розташуванням електродів, з яких здійснюється автоемісія електронів (з одного боку торцевого наконечника або з двох боків). На ці електроди подається напруга відносно катода (холодного вторинно-емісійного). З гострих кінців вилітають електрони і бомбардують основний катод, викликаючи процеси вторинної емісії. У цей момент кінці цих електродів виконують роль торцевих наконечників. Коли втулка просторового заряду сформована, напруга з електродів знімається.

Наступним кроком удосконалення конструкції катодного вузла магнетрона було використання автокатода, розташованого за межами простору взаємодії. В одній роботі пропонувалося розмістити автокатод всередині вторинно-емісійного катода [15], а другий підхід полягає в розташуванні автокатода в торці вторинно-емісійного катода [16]. Відповідні конструкції наведені на рис. 7, 8. Такі конструкції можливо реалізувати і для зворотних схем магнетронів.

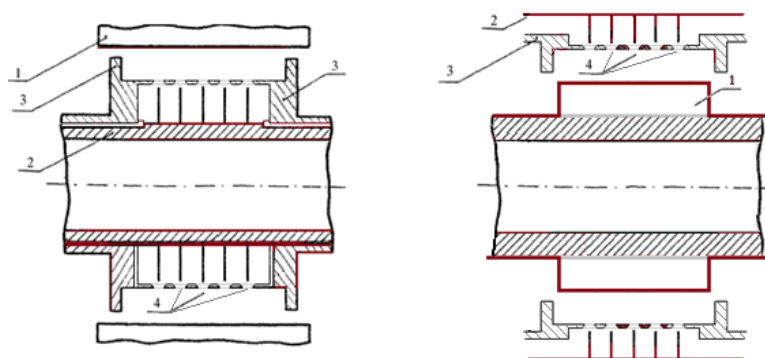


Рис. 7. Конструкції автора. Традиційна і зворотна:

1 – анодна сповільнювальна система, 2 – сердечник з голками автокатода, 3 – торцеві наконечники, 4 – отвори у вторинно-емісійному катоді

У вторинно-емісійному катоді є отвори, під якими розташовані голки автокатода. Принцип дії простий: на вторинно-емісійний катод подається напруга відносно голок. Утворене електростатичне поле на кінцях голок досить велике, але недостатнє для автоемісії з їх кінців. При подачі анодної напруги відносно вторинно-емісійного катода з'являється електростатичне поле в просторі взаємодії. Суперпозиція цих полів призводить до зростання

напруженості поля на кінцях голок, що призводить до автоемісії електронів. Після досягнення певної щільності просторового заряду відбудеться екранування дії поля анодної системи і таким чином процес автоемісії буде зупинений. Це дозволяє автоматично в місцях розрядження електронної втулки запускатися кожній голці окремо, що сприяє вирівнюванню щільності заряду втулки. З урахуванням мініатюрності, зворотна конструкція легше виконується технологічно.

Друга конструкція, що дозволяє використовувати автокатоди, які запускають, представлена на рис. 8. Вона теж може бути застосована як для класичної конструкції, так і для зворотної.

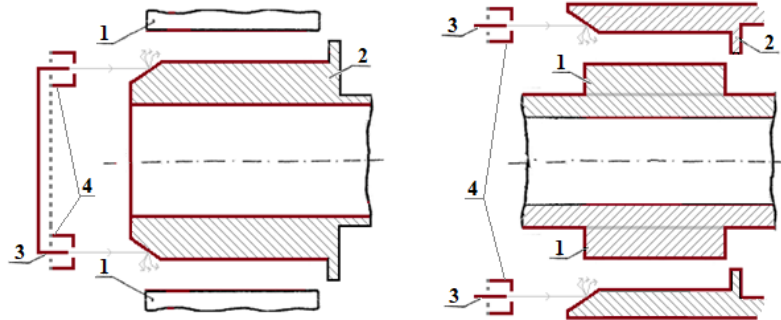


Рис. 8. Конструкції автора [17, 18]:
1 – ламель, 2 – основний вторинно-емісійний катод, 3 – голки автокатода, 4 – електрод для створення умов автоемісії

Автокатод реалізований з використанням додаткового електрода, який створює необхідну напруженість електричного поля на кінчику голки. Нахил на основному вторинно-емісійному катоді визначається кутом ефективного бомбардування, оскільки коефіцієнт вторинної емісії залежить від цього кута. Тобто він вибирається в залежності від застосованого матеріалу, в якості основного катода.

Подальше удосконалення конструкції катодного вузла магнетрона призвело до розроблення модифікованих конструкцій [19], де автокатод реалізується на самому основному катоді, використовуючи складові його частини як в аксіальному, так і в азимутальному напрямках. Запропоновані схеми катодних блоків представлено на рис. 9.

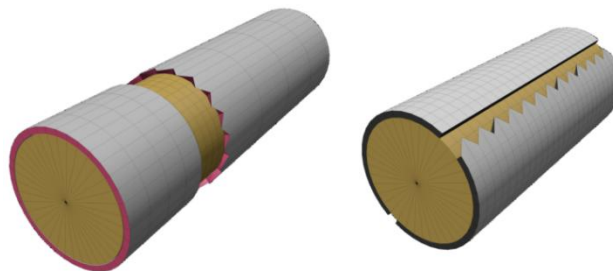


Рис. 9. Удосконалені схеми анодних блоків магнетрону

Ці рисунки виконані досить умовно, але з них можна зрозуміти суть пропозиції. Зрозуміло, що вони можуть бути реалізовані як в «класичному» виконанні, так і в зворотних конструкціях магнетронів. Таких сегментів може бути скільки завгодно. Вибір кількості елементів здійснюється з конструкторських міркувань і необхідного значення первинних електронів. Різниця напруг між сегментами повинна бути в межах робочої зони генерації. У запропонованих конструкціях напруга між сегментами така, що явище автоемісії ще не настає. Як тільки з'являється анодна напруга, то суперпозиція електростатичних полів досягає напруженості поля, що дозволяє вихід електронів з гострих зубців, тобто здійснює автоемісію електронів.

Висновки

1. У просторі взаємодії має підтримуватися рівномірний розподіл електростатичного поля, а будь-який електрод, що знаходиться в цьому просторі, заважає цьому.

2. Катоди, що запускають, повинні розташовуватися або в торці основного катода, або всередині нього. В крайньому випадку на його поверхні.

3. Особливо варто звернути увагу на створення приладів, що використовують запуск анодним імпульсом [5].

З огляду на сказане, слід зазначити, що складність математичного моделювання нелінійних процесів взаємодії електромагнітних коливань з електронним потоком у схрещених полях призводить до необхідності використання в теорії магнетронних приладів великої кількості припущень та наближень.

Список літератури:

1. Slutskin A.A. The Mechanism of Oscillation Excitation in Multi-segment Magnetrons // Journal of Technical Physics. 1947. Vol. 17. No. 4. P. 425–434.

2. Alekseev N.F., & Malyarov D.E. Generation of high-power magnetron oscillations in the centimeter-wave range // ZhTF. 1940. No. 10. P. 1297.

3. Shevchik B.H., Shevtsov G.H., Soboleva A.Z. Wave and Oscillatory Phenomena in Electron Flows at the CBCh. Saratov : Saratov State University Press, 1962. 294 p.

4. Magnetron with an end-face gun: USSR Patent No. 392819: IPC Class N 01 J 25/28 // Discoveries and Inventions. 1973. No. 4. P. 89.

5. Спосіб створення просторового заряду в магнетроні : пат. 160766 Україна : H01J 25/00, H01J 49/00. № u202406341 ; заявл. 31.12.2024 ; опубл. 08.10.2025, Бюл. № 41. 4 с.

6. Черенщиков С.А. Про запуск магнетрона з холодним катодом на спаді імпульсу напруги // Електронна техніка. Сер. 1: Електроніка НВЧ. 1973. Вип. 6. С. 20–28.

7. Науменко В.Д., Черенщиков С.А. Дослідження запуску магнетрона з холодним вторинно-емісійним катодом на спаді імпульсу напруги // Вісті вищих навчальних закладів. Радіофізика. 1984. Т. XXVII. № 2. С. 250–256.

8. Копоть М.А., Нікітенко А.М. Траекторний аналіз руху зарядженої частинки при спеціальній формі анодної напруги // Радіофізика та електроніка. 2004. Т. 9. № 2. С. 437–441.

9. K. Kitagama et al. The reliability of magnetrons for microwave ovens // J. Microwave Power. 1988. V. 21. № 3. P. 149–158.

10. Magnetron : Patent No. 2007777: H01J 25/00. No. 5043987/32; filed April 15, 1992; published February 15, 1994 // Bulletin No. 3. 8 p.

11. Катодний вузол магнетрона : пат. 81149 Україна : H01J 23/02, H01J 25/00. № a200510618 ; заявл. 10.11.2005 ; опубл. 10.12.2007 // Бюл. № 6. 2 с.

12. Катодний вузол безрозжарювального магнетрона : пат. 83566 Україна : H01J19/00. № a200611424 ; заявл. 30.10.2006 ; опубл. 25.07.2008 // Бюл. № 14. 2 с.

13. Magnetron with a cathode-less anode : Patent No. 2380782: H01J 25/00. No. 2008142022/09; filed Oct. 24, 2008; published Jan. 27, 2010 // Bulletin No. 3. 16 p.

14. Катодний вузол безрозжарювального магнетрона : пат. 93007 Україна : H01J23/02, H01J25/00. № a200900900 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 27.12.2010 // Бюл. № 24. 2 с.

15. Магнетрон : пат. 62691 Україна : H01J25/00. № 2003044025; заявл. 30.04.2003 ; опубл. 15.12.2003 // Бюл. № 12. 2с.

16. Катодний вузол оберненого магнетрона : пат. 133970 Україна : H01J25/00, H01J25/50. № u201811918 ; заявл. 03.12.2018 ; опубл. 25.04.2019 // Бюл. № 8. 4 с.

17. Магнетрон : пат. 87042 Україна : H01J25/00, H01J1/30. № a200710485 ; заявл. 21.09.2007 ; опубл. 25.03.2009 // Бюл. № 6. 6 с.

18. Катодний вузол оберненого магнетрона : пат. 130571 Україна : H01J 23/05, H01J 25/50. № u201807421 ; заявл. 02.07.2018 ; опубл. 10.12.2018 // Бюл. № 23. 4 с.

19. Катодний вузол оберненого магнетрона : пат. 135392 Україна : H01J23/05, H01J25/50. № u201901091 ; заявл. 04.02.2019 ; опубл. 25.06.2019 // Бюл. № 12. 4 с.

Надійшла до редколегії 05.01.2026

Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026

Публікація (оприлюднення) 30.04.2026

Відомості про автора:

Копоть Михайло Андрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач навчальної лабораторії кафедри Програмної інженерії, Україна; e-mail: mykhaylo.kopot@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7163-8904>.