

О.С. МАЗМАНІШВІЛІ, М.Г. РЕШЕТНЯК

Національний Науковий Центр «Харківський Фізико-Технічний Інститут», Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ, ЩО ЕМИТОВАНІ КАТОДАМИ НЕЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННОЇ ГАРМАТИ

Розглянути можливі напрями модифікації магнетронної гармати як джерела електронного потоку с катодами, форма яких відрізняється від аксіально-симетричної циліндричної форми. Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка, емітованого такими катодами, при його транспортуванні в інтенсивному градієнтному магнітному полі соленоїда і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку в області поля. Удосконалення магнетронної гармати, що полягає у застосуванні інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості, дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків, а також дослідити вплив стартових характеристик частинок при емісії на тип траєкторій електронів. Метою досліджень стало створення математичних та програмних моделей руху таких електронних пучків з енергією в десятки кеВ у магнітних полях обраної конфігурації, дослідження формування зображень траєкторій електронів пучка від початкових умов та розподілу магнітного поля вздовж осі системи. Використовано математичні та чисельні моделі перетворення дослідних даних аналітичними функціями. У роботі на основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі синтезовано програмний засіб, що дозволяє провести чисельне моделювання динаміки електронних потоків у магнітному полі соленоїда. Наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Отримані результати моделювання свідчать про можливість за умов експерименту встановити режими зображень, перспективних для корегування структурно-фазових властивостей матеріалу мішеней. Потік електронів на виході магнетронної гармати відчуває перебудову радіального розподілу, яка визначається видом магнітного поля та його градієнтом в каналі транспортування пучка. При цьому форма поперечного розподілу на старті також трансформується відповідно впливу поля. У роботі на прикладах чисельно досліджена еволюція поперечних розмірів електронного пучка, що формується магнетронною гарматою від конфігурації магнітного поля в каналі транспортування частинок. Показано, що зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального перетворення (фокусування або дефокусування) пучка є більш виражений. Наведені результати вказують на можливість фокусування, а також дефокусування, електронного пучка, який емітований катодами міліметрових діаметрів, що може бути використано при опроміненні поверхонь циліндричних зразків, які розміщені в області наростаючого або спадаючого магнітного поля.

Ключові слова: електронний пучок, магнетронна гармата, джерело електронів, динаміка часток, градієнтне магнітне поле, математичне моделювання, досліджені дані.

O.S. MAZMANISHVILI, M.G. RESHETNYAK

National Science Center "Kharkiv Institute of Physics & Technology", Kharkiv, Ukraine

FORMATION OF IMAGES BY ELECTRONIC BEAMS, WHAT IS EMITTED BY NON-CYLINDRICAL CATHODES IN THE MAGNETIC FIELD OF THE MAGNETRON GUN

Consider the possible directions of modification of the magnetron gun as the source of electron flow with cathodes, the shape of which differs from the axially symmetrical cylindrical shape. The object of this work is the study of the parameters of the electron beam emitted by such cathodes during its transport in the intense gradient magnetic field of the solenoid and the construction of the computational model of the movement of the electron flow in the field region. The improvement of the magnetron gun, consisting in the application of intense magnetic fields with the increased gradient of their intensity, makes it possible to consider new phenomena in the spatial picture of the evolution of electron beams, as well as to investigate the influence of the starting characteristics of particles during emission on the type of electron trajectories. The purpose of the research was to create the mathematical and software model of the movement of such electron beams with the energy of tens of keV in magnetic fields of the chosen configuration, to study the formation of images of beam electron trajectories from the initial conditions and the distribution of the magnetic field along the axis of the system. Mathematical and numerical models of experimental data transformation by analytical functions are used. In the paper, based on the Hamiltonian formalism of the motion of electrons in the magnetic field, the software tool was synthesized that allows for numerical modeling of the dynamics of electron flows in a magnetic field of a solenoid. The results of the numerical simulation of the movement of the electron flow are given. The obtained simulation results indicate the possibility of establishing image modes promising for correcting the structural and phase properties of the

target material under experimental conditions. The flow of electrons at the output of the magnetron gun undergoes the rearrangement of the radial distribution, which is determined by the type of magnetic field and its gradient in the beam transport channel. At the same time, the shape of the transverse distribution at the start is also transformed according to the influence of the field. In the work, the evolution of the transverse dimensions of the electron beam formed by the magnetron gun from the configuration of the magnetic field in the particle transport channel is numerically studied using examples. It is shown that with the increase in the maximum amplitude and/or field gradient, the effect of radial transformation (focusing or defocusing) of the beam is more pronounced. The given results indicate the possibility of focusing, as well as defocusing, the electron beam emitted by millimeter-diameter cathodes, which can be used to irradiate the surfaces of cylindrical samples placed in the region of the increasing or decreasing magnetic field.

Key words: electron beam, magnetron gun, electron source, particle dynamics, gradient magnetic field, mathematical modeling, experimental data.

Вступ

Опромінювання пучками електронів с заданими параметрами дають можливість корегувати структурно-фазовий стан у поверхневих шарах і змінювати структурні властивості матеріалів. При цьому коло задач, для розв'язання яких використовуються електронні пучки, постійно розширюється. Основна задача полягає в експериментальному дослідженні та чисельному моделюванні динамічних електронних потоків, а також вивченні можливості та ефективності фокусування пучка при транспортуванні у магнітному полі магнетронній гарматі [1, 2, 3]. На основі цих досліджень будуть отримані нові дані по формуванню та транспортуванню щільних електронних трубчатих пучків малого розміру при різних розподілах магнітного поля в каналі транспортування пучка.

На основі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом був створений прискорювач електронів, який використовує осьовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней [3]. Як об'єкт дослідження магнетронна гармата має ту перевагу, що, з одного боку, вона може бути модифікована для проведення експериментів різного типу, з іншого боку, незважаючи на складність виконання аналітичного дослідження, для отримання кількісних залежностей цілком можливе застосування обчислювальних методів та порівняння числових результатів з даними експерименту.

Однією з можливих напрямів модифікації магнетронних гармат є використання джерела електронного потоку – катоди, форма яких відрізняється від аксіально-симетричної циліндричної форми. Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка, емітованого такими катодами, при його транспортуванні в інтенсивному градієнтному магнітному полі соленоїда і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку в області поля. Метою досліджень стало створення математичної та програмної моделей руху таких електронних пучків з енергією в десятки кеВ у магнітних полях обраної конфігурації, дослідження формування зображень траєкторій електронів пучка від початкових умов та розподілу магнітного поля вздовж осі системи. У роботі на основі гамільтонового формалізму руху електронів у магнітному полі синтезовано програмний засіб, що дозволяє провести чисельне моделювання динаміки електронних потоків у градієнтному магнітному полі. Наводяться результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Отримані результати моделювання свідчать про можливість за умов експерименту встановити режими зображень, перспективних для корегування структурно-фазових властивостей матеріалу мішеней.

Актуальність досліджень обумовлена можливістю використання електронних пучків, що формуються магнетронною гарматою, які можуть бути застосовані при створенні надійних джерел електронів для наукових досліджень прискорювальної техніки та їх застосування при створенні первинних електронів, замість термоемісійного бокового катоду, для збудження вторинної емісії в магнетронах з холодним катодом.

Стан проблеми

Електронні пучки різної конфігурації та інтенсивності широко застосовуються в електронно-променевих технологіях, високовольтній імпульсній НВЧ-електроніці, прискорювальній техніці та інше [1-4], при цьому коло завдань, для вирішення яких застосовуються електронні

пучки, постійно розширюється. Проводяться дослідження з електронними пучками з різними енергіями та просторовою конфігурацією. У ННЦ ХФТІ використовуються джерела електронів з холодними катодами, що працюють у режимі вторинної емісії, поміщені в схрещені електричні та магнітні поля, при цьому як джерело електронів використовується магнетронна гармата. Вторинноемісійний механізм генерації пучка такий гарматі, внаслідок його слабо руйнівної дії на матеріал катода, зумовлює збереження емісійних властивостей електронного джерела протягом тривалого часу. Удосконалення магнетронної гармати, що полягає у застосуванні інтенсивних магнітних полів з підвищеним градієнтом їхньої напруженості, дає можливість розглянути нові явища в просторовій картині еволюції електронних пучків, а також дослідити вплив стартових характеристик частинок при емісії на тип траєкторій електронів.

Аналіз останніх результатів і публікацій

На основі магнетронної гармати з вторинноемісійним катодом створено електронний прискорювач, в якому використовується осьовий електронний пучок для опромінення металевих мішеней [3-5], з перспективою опромінення внутрішньої циліндричної поверхні за допомогою радіального пучка. Побудовано програмний засіб, використання якого дає змогу промоделювати основні залежності руху електронного пучка у заданому соленоїдальному магнітному полі [6, 7].

Формулювання мети дослідження

У роботі наводяться результати дослідження динаміки електронного пучка в каналі транспортування та результати чисельного моделювання руху електронного потоку. Досліджується можливість керування параметрів та типу руху електронного пучка обраної форми у градієнтному магнітному полі шляхом цілеспрямованого регулювання початкових умов при емісії. Метою дослідження є виявлення таких режимів роботи магнетронної гармати, у яких можлива реалізація нових типів траєкторій руху електронних пучків.

Головний матеріал дослідження

У роботах [3, 7] докладно розкрито схему магнетронної гармати та методи моделювання руху частинок в неї. На рис. 1 наведено набір прикладів розподілів магнітного поля уздовж осі магнетронної гармати і каналу транспортування пучка, для яких проводилися експерименти та чисельне моделювання руху електронів, що емітовані катодами міліметрових діаметрів, при їх транспортуванні вздовж системи. На рисунку для кожного з полів вказані значення струмів (в амперах) в котушках чотирьох секцій соленоїда.

Було виконано математичне моделювання динаміки пучка і порівняння його результатів з отриманими даними досвіду. Застосування розробленого програмного засобу, заснованого на аналітичній моделі розподілу магнітного поля уздовж осі соленоїда, дозволило, спираючись на масив з дослідних даних на осі транспортування електронів, встановити амплітуду $f(z)$ магнітного поля та її похідну $df(z) / dz$ як аналітичні функції поздовжньої координати z . Було проведено чисельні моделюючі розрахунки по динаміці електронного пучка в розглянутих магнітних полях. В побудованому програмному середовищі використовувалися чисельний метод Монте-Карло і метод Рунге-Кутти.

Отримано розв'язок прямої задачі моделювання траєкторій електронів для заданих початкових умов і параметрів системи. Наведено розрахункові залежності розподілу пучка електронів (обсяг вибірки до 500 частинок) у площині мішені.

Чисельно досліджена залежність радіальних розмірів електронного пучка різної форми, що формується магнетронною гарматою в каналі транспортування при однорідному, спадаючому та наростаючому магнітному полі.

На рис. 2a показана послідовність розрахункових поперечних перетин розподілу пучка в однорідному магнітному полі, а на рис. 2b приведена розрахункова залежність середнього

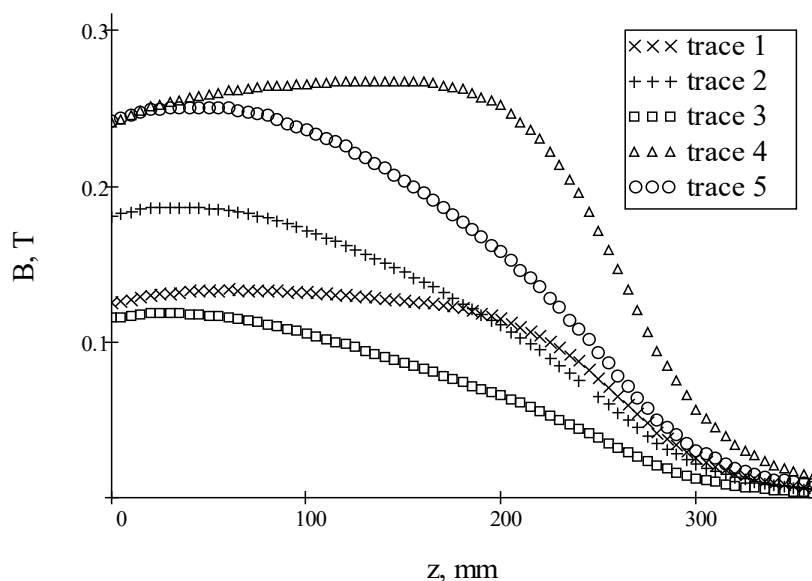


Рис. 1. Розподіли соленоїдального магнітного поля B вдовж осі гармати (криві 1...5) (діаметр катода $D_C=3$ мм, діаметр анодів $D_A=15$ мм і 50 мм), 1 – $B_1=(35,47,30,75$ А), 2 – $B_2=(25,41,26,0$ А), 3 – $B_3=(15,28,14,30$ А), 4 – $B_4=(15,28,14,0$ А), 5 – $B_5=(37,50,40,0$ А)

радіуса r пучка електронів міліметрового розміру від координати z . Розрахунки виконані для поля, наведеного на рис. 2 (крива 1). З рисунків можна бачити, що при зменшенні амплітуди магнітного поля середній радіус пучка збільшується.

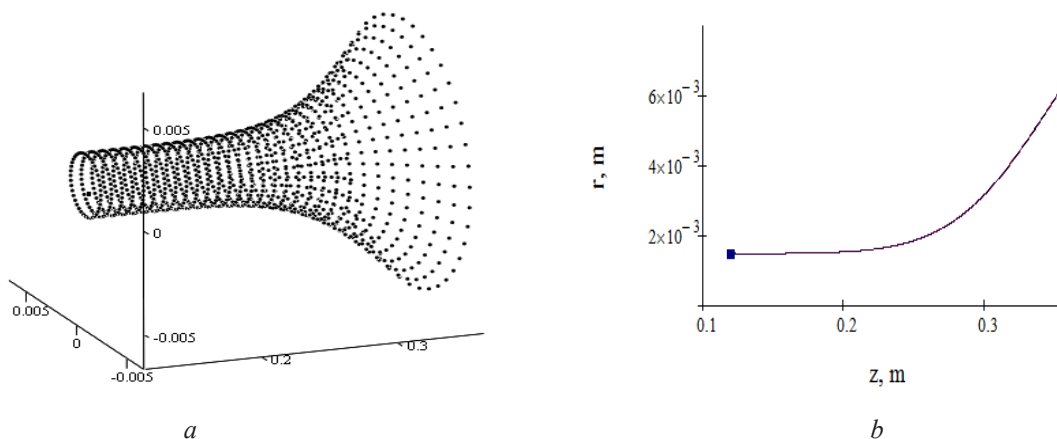


Рис. 2. a – розрахункові поперечні перетини розподілу пучка в однорідному магнітному полі, діаметр катода $D_C=3$ мм, діаметр анода $D_A=15$ мм, $B=(35,47,30,75$ А); b – розрахункова залежність середнього радіуса r пучка від координати z

Було проведено чисельне моделювання для випадку двох конфігурацій магнітного поля, з якими проводилися дослідження еволюції радіальних розмірів електронного пучка, який генерується магнетронною гарматою. Чисельні розрахунки проводилися з метою моделювання руху частинок на інтервалі від $z_0=120$ мм на старті до $z=285$ мм на фініші при різних максимальних амплітудах (0,27 Т і 0,37 Т) градієнтного магнітного поля в каналі транспортування електронного потоку. Конфігурація обох градієнтних магнітних полів наведена на рис. 3.

Перше з них формувалося набором струмів $B=(15,28,14,30 \text{ A})$ в котушках соленоїда сумісно з постійним магнітом M (див. рис. 3а). Друге магнітне поле формувалося за допомогою такого ж набору струмів $B=(15,28,14,30 \text{ A})$ в котушках соленоїда, але сумісно з двома постійними магнітами $M+M$ (див. рис. 3б).

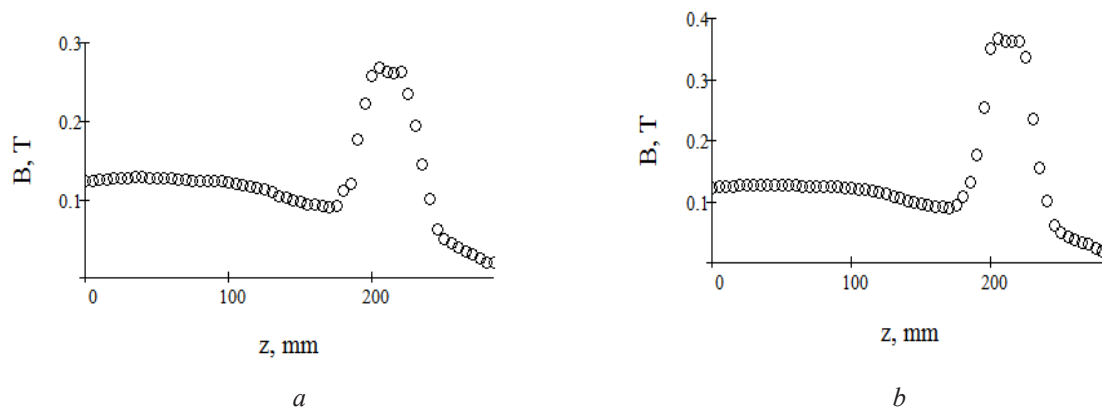


Рис. 3. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка;
 а – наростаюче магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом;
 б – наростаюче поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами

Був розглянутий випадок з двох катодів радіусом $R_C=2 \text{ мм}$ кожний з центрами в точках $(6 \text{ мм}, 6 \text{ мм})$ та $(-6 \text{ мм}, -6 \text{ мм})$ на площині старту. Результати моделювання для випадку цих двох циліндричних катодів наведено на рис. 4.

На рис. 4а можна бачити початкові розподіли частинок електронного пучка, які були обрано однаковими для обох полів.

На рис. 4б зображена послідовність поперечних перетинів пучка для обох випадків поля. З рисунків 4б можна бачити, що профілі пучка відслідковують розподіли магнітних полів вздовж осі системи z .

На рис. 4с показано залежності середнього радіуса пучка $r=r(z)$ для обох полів від поздовжньої координати z (квадратик – старт руху). Можна бачити значне зменшення розмірів пучка в області, в якій збільшилася амплітуда магнітного поля. Таким чином, зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального фокусування пучка є більш виражений.

З метою порівняння було проведено чисельне моделювання для випадку конфігурації, яка містить чотири квадратних катода (див. рис. 5а) та двох конфігурацій магнітного поля. Чисельні розрахунки проводилися з метою моделювання руху частинок від $z_0=120 \text{ мм}$ на старті до $z=285 \text{ мм}$ на фініші при різних максимальних амплітудах $(0,27 \text{ Т}$ і $0,37 \text{ Т})$ наростаючого магнітного поля. Конфігурація обох градієнтних магнітних полів наведена на рис. 3.

Результати моделювання для випадку наведено на рис. 5.

На рис. 5а можна бачити початкові розподіли частинок електронного пучка з 4 квадратних катода, які були обрано однаковими для обох полів.

На рис. 5б зображено поперечні перетини частинок пучка для обох випадків поля. З рисунків 5б можна бачити, що профілі пучка відслідковують розподіли магнітних полів вздовж осі системи z .

На рис. 5с показано залежності середнього радіуса пучка $r=r(z)$ для обох полів від поздовжньої координати z (квадратик – старт руху). Можна бачити помітне зменшення розмірів пучка в області, в якій збільшилася амплітуда магнітного поля. Таким чином, зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля має місце ефект радіального фокусування пучка обраної конфігурації.

З рис. 5с та рис. 4с можна зробити висновок, що загальна тенденція такого ефекту залишається незмінною для різних стартових густин електронного пучка.

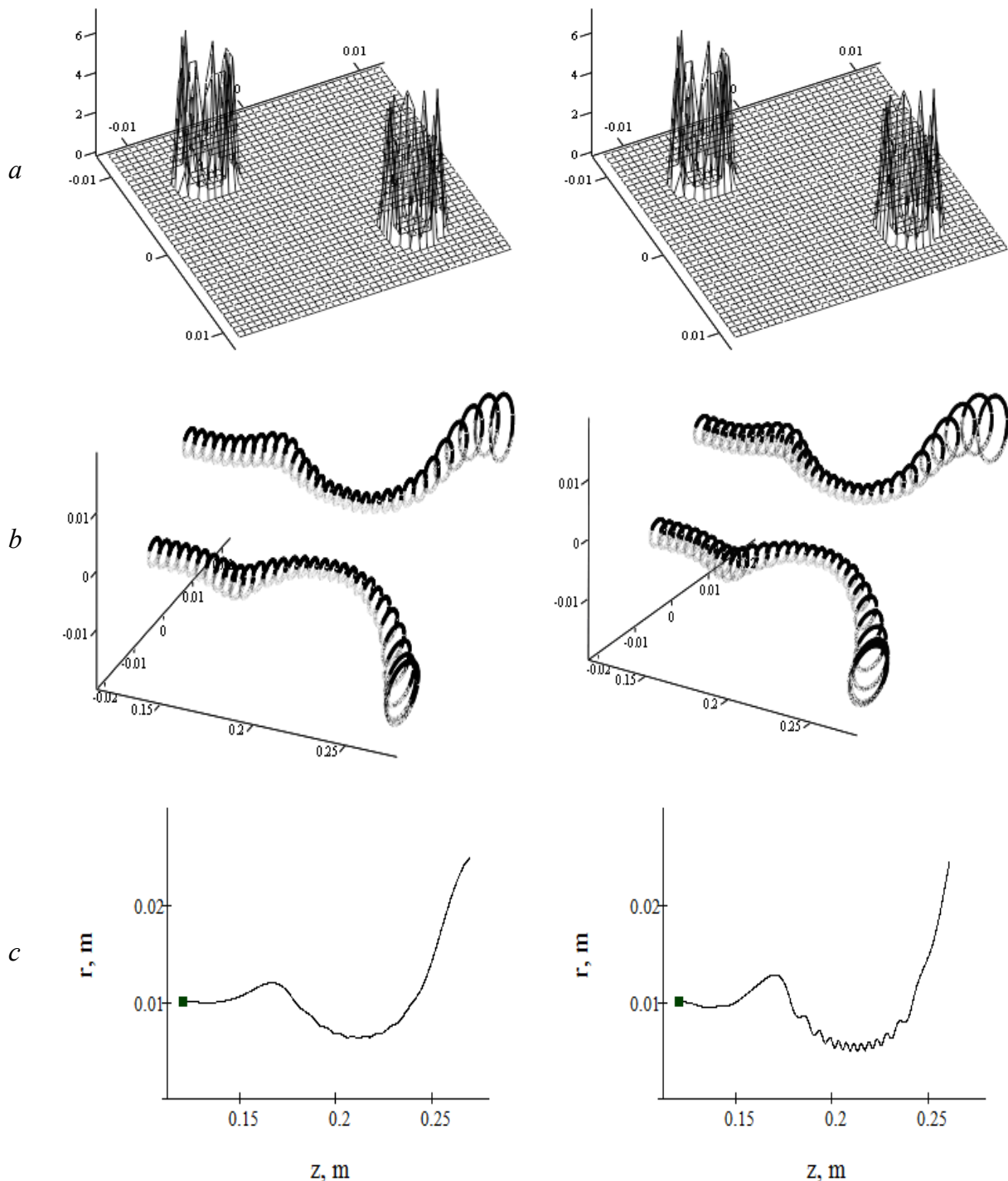


Рис. 4. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка; випадок з двох катодів радіусом $R_c=2$ мм кожний з центрами в точках (6 мм, 6 мм) та (-6 мм, -6 мм) на площині старту; ліворуч – наростаюче магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом; праворуч – наростаюче поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами;
a – початкові розподіли частинок пучка;
b – послідовність поперечних перетин пучка;
c – розрахункові залежності середнього радіуса r пучка від координати z

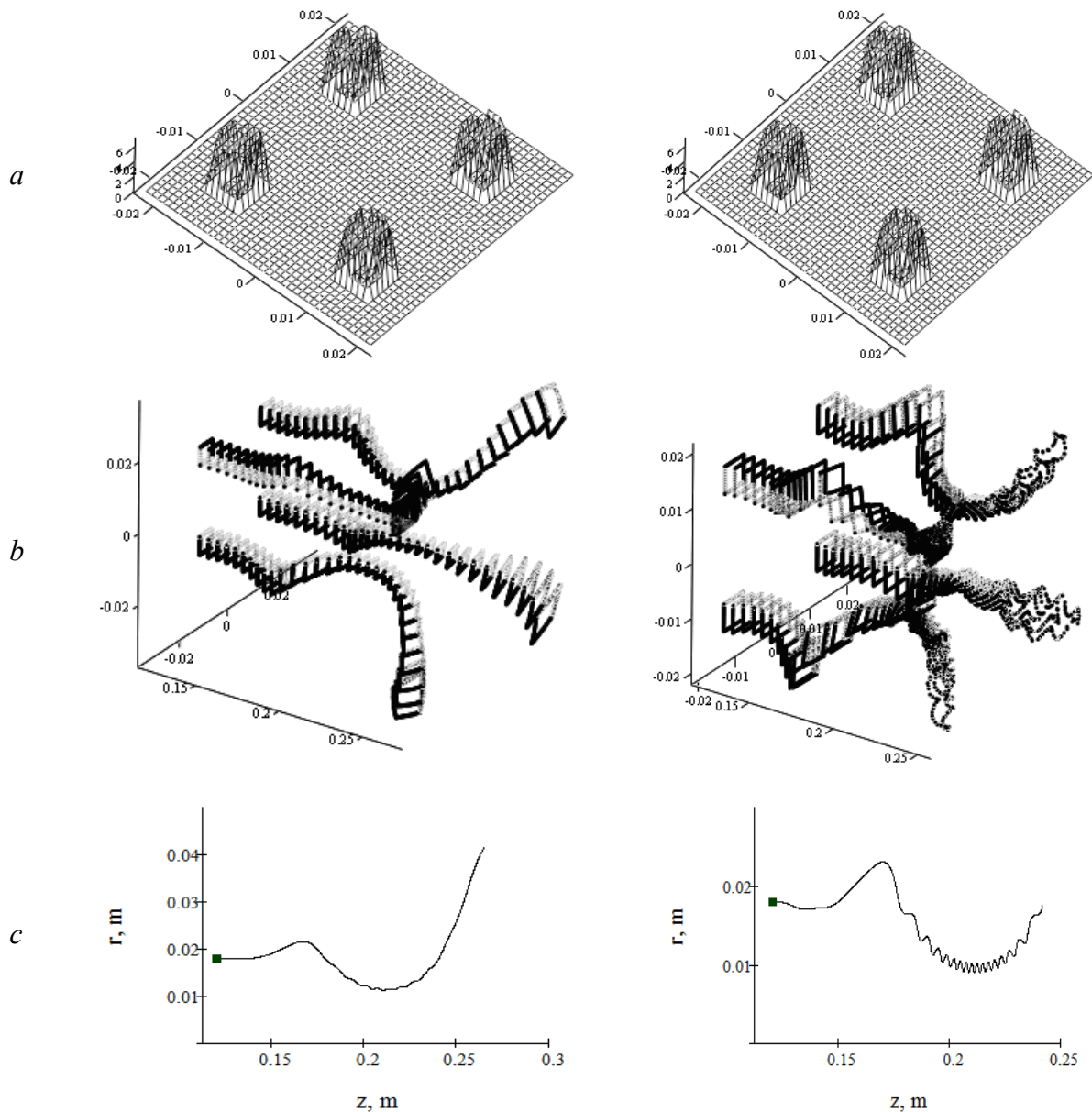


Рис. 5. Розподіли градієнтного магнітного поля вздовж осі гармати та властивості пучка в випадку конфігурації, яка містить 4 квадратних катода;
 ліворуч – магнітне поле створено сумісно соленоїдом з постійним магнітом;
 праворуч – поле створено сумісно соленоїдом з двома постійними магнітами;
a – початкові розподіли частинок пучка;
b – послідовність поперечних перетин пучка;
c – розрахункові залежності середнього радіуса r пучка від координати

Висновки

Потік електронів на виході магнетронній гармати відчуває перебудову радіального розподілу, яка визначається видом магнітного поля та його градієнтом в каналі транспортування пучка. При цьому форма поперечного розподілу, обраного на старті, також трансформується відповідно впливу поля. У роботі на прикладах різних форм поперечного розподілу на старті чисельно досліджена еволюція поперечних розмірів електронного пучка, що формується

магнетронною гарматою від конфігурації магнітного поля в каналі транспортування частинок. Показано, що зі зростанням максимальної амплітуди та/або градієнта поля ефект радіального перетворення (фокусування або дефокусування) пучка є більш виражений. Наведені результати вказують на можливість фокусування/дефокусування, електронного пучка різних форм, який емітований катодами міліметрових діаметрів, що може бути використано при опроміненні поверхонь зразків, які розміщені в області магнітного поля.

Список використаної літератури

1. Dovbnya A.N., Lavrinenko S.D., Zakutin V.V. Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*. 2011, № 2. P. 39-45.
2. Ayzatsky M.I., Dovbnya A.N., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Romasko V.P., Chertishchev I.A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016. Iss. 66. № 3(103). P. 11-16.
3. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Chertishchev I.A. Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2015. № 6. P. 77-82.
4. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2019. Iss. 72, № 6(124). P. 106-113.
5. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Shovkoplyas O.A. Beam and sector modes of electron fluxes in cylindrical magnetic field of magnetron gun. *Journal of Nano- and Electron Physics*. 2020. Vol. 12, № 3, 03001(5pp).
6. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2017. Iss. 69. № 6(112). P. 96-100.
7. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Transformation of the data array of the cylindrical magnetic field of the magnetron gun and the problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*. 2020. Vol. 3, № 1. P. 108-116.

References

1. Dovbnya, A.N., Lavrinenko, S.D., & Zakutin, V.V. (2011) Surface modification of zirconium and Zr1%Nb alloy by the electron beam of the magnetron gun-based accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science"*. **2**, 39-45.
2. Ayzatsky, M.I., Dovbnya, A.N., Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., Romasko, V.P., & Chertishchev, I.A. (2016). Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. **3(103)** (66), 11-16.
3. Dovbnya, A.N., Dovbnya, N.A., Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., & Chertishchev, I.A. (2015). Transport simulation of a high-current electron beam formed by the magnetron gun with a secondary-emission cathode in a decreasing solenoid field. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. **6**, 77-82.
4. Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2019). Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. **6(124)** (72), 106-113.

5. Mazmanishvili, A.S., Reshetnyak, N.G., & Shovkoplyas, O.A. (2020). Beam and sector modes of electron fluxes in cylindrical magnetic field of magnetron gun. *Journal of Nano- and Electron Physics*. **12** (3), 03001(5pp).
6. Dovbnya, A.N., Dovbnya, N.A., Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2017). Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. **6(112)** (69), 96-100.
7. Mazmanishvili, A.S., & Reshetnyak, N.G. (2020). Transformation of the data array of the cylindrical magnetic field of the magnetron gun and the problem of the radial motion of electrons. *Applied Problems of Mathematical Modeling*. **3** (1), 108-116.

Мазманішвілі Олександр Сергійович – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626.

Решетняк Микола Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ, e-mail: nreshetnyak@kipt.kharkov.ua, ORCID: 0000-0002-2345-6789.