

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПЕРЕВЕРТАЙЛО ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 537.525.7; 537.868; 621.396.67.095.3; 621.372.82; 621.396.677.4

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РЕЗОНАНСНІ НАДВИСОКОЧАСТОТНІ СИСТЕМИ У  
ДОПРОБІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ РЕЖИМІ**

Спеціальність:

171 – електроніка

Галузь знань:

17 – електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

В.В. Перевертайло

Науковий керівник: Кузьмичев Анатолій Іванович,  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

Перевертайло В.В. Резонансні НВЧ системи у допробійному електричному режимі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 – електроніка.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Київ, 2020.

В дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки наукових і технічних основ побудови і практичного використання резонансних НВЧ систем у допробійному електричному режимі для електрофізичної та технологічної апаратури з поліпшеними показниками. Для цього досліджувалися:

- принципи побудови та характеристики резонансних НВЧ систем типу "розрізане кільце" та його модифікації багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором за високого тиску робочого газу та з безпровідним НВЧ живленням;
- принципи побудови та характеристики резонансної НВЧ системи розрядно-камерного типу;
- характеристики високоенергетичних нейтральних атомів, відбитих від поверхні елементів розрядної камери резонансної НВЧ системи при іонному бомбардуванні.

Були одержані такі нові наукові результати:

Вперше отримано результати моделювання напруженості електричного поля у резонаторі типу "розрізане кільце", розрахованому на резонансну частоту 2,45 ГГц для роботи за високого тиску робочого газу, при цьому застосовується, замість провідного, безпровідне НВЧ енергоживлення. Максимальна напруженість поля виникає у локалізованій області зазору резонатора, що підтверджено експериментально.

Вперше запропоновано та досліджено багатокільцевий резонатор з устороннім збудженням (як модифікацію резонатора типу "розрізане кільце") у вигляді системи ортогональних розрізаних кілець, що утворюють спільний розрядний зазор, для робочої частоти 2,45 ГГц та отримані результати моделювання напруженості електричного поля у його зазорі в залежності від потужності НВЧ живлення.

Вперше отримано результати фізико-топологічного 3D моделювання розподілу напруженості електричного поля у резонаторі розрядно-камерного типу з урахуванням його геометрії та параметрів матеріалів конструктивних елементів системи за умови поширення в ній основного типу коливань  $H_{11}$ , що дозволило розробити та сконструювати НВЧ резонатор розрядно-камерного типу для роботи за частоти 2,45 ГГц за низького тиску робочого газу у технологічних цілях: іонізація газу для генерації пучків іонів та високоенергетичних нейтральних частинок у електрофізичних і технологічних пристроях.

Вперше отримано результати залежності між потужністю НВЧ генератора та напруженістю поля, що виникає у резонаторі розрядно-камерного типу за низького тиску робочого газу у допробійному електричному режимі, з урахуванням провідності стінок камери хвилеводного тракту, наявності діелектричної вставки та геометрії системи в цілому шляхом фізико-топологічного 3D моделювання. Такий підхід дозволив найбільш точно встановити потужність НВЧ живлення, необхідну для виникнення напруженості електричного пробою та ініціювання газового розряду в системі.

Вперше отримано значення інтегральних коефіцієнтів відбиття високоенергетичних частинок (атомів як нейтралізованих іонів)  $R_N$  і енергії  $R_E$  для іонів кисню та аргону при різних кутах падіння на металеві частини (з алюмінію, титану, цинку, цирконію, ніобію, танталу) та залежності коефіцієнта відбиття  $R_N$  від енергії бомбардувальних іонів (аргону, кисню, азоту) та кута їх падіння, які свідчать, що енергія, яка передається поверхням

елементів резонатора (розрядної камери) відбитими високоенергетичними нейтральними частинками, може створити істотний вплив на відповідні елементи конструкції, тому необхідне врахування відбиття високоенергетичних атомів при проектуванні як резонансних НВЧ систем, так і технологічних процесів, що проводяться з їх використанням.

Отримані результати мають наступне практичне значення:

Розвинені фізико-топологічні моделі резонансних НВЧ систем високого та низького тисків робочого газу з безпровідним НВЧ живленням, результати розрахунків за якими дозволяють передбачати параметри та характеристики НВЧ резонаторів і апаратури на їх основі.

Був розроблений та успішно випробуваний НВЧ резонатор типу "розрізане кільце" для роботи за високого тиску робочого газу при частоті 2,45 ГГц у складі НВЧ дослідної установки. Запропоновано застосовувати безпровідне НВЧ живлення для одночасного живлення низки однакових резонаторів рознесених у просторі і уникнення великої кількості додаткових кабелів при цьому.

Створений оригінальний багатокільцевий резонатор з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором як модифікація резонатора типу "розрізане кільце". Резонатор захищений правом інтелектуальної власності. Застосування цього пристрою сягають від радіотехнічних до технологічної галузей.

Був розроблений та успішно випробуваний НВЧ резонатор розрядно-камерного типу для роботи за низького тиску газу у якості генератора іонного потоку. Використовувався резонатор як незалежний пристрій. В його конструкції реалізовані результати досліджень нових способів поліпшення енергетичних параметрів (завдяки отриманим залежностям потужності НВЧ, напруженості електричного поля, що виникає в розрядній камері, та геометрії елементів системи) та методів спрямування НВЧ хвилі в область електронного циклотронного резонансу (завдяки застосуванню нових конструктивних елементів системи).

Був успішно випробуваний в експериментальному виробництві багат шарового плівкового покриття у складі магнетронної розпилювальної системи (MPC) розроблений НВЧ резонатор розрядно-камерного типу у якості активатора газу. Запропоноване технологічне застосування розробленого приладу дозволило понизити робочий тиск MPC в цілому. У конструкції розробленого технічного рішення реалізовані результати нових досліджень і отриманих даних по коефіцієнтам відбиття частинок та енергій для іонів кисню та аргону при різних кутах падіння на металеві частини конструкції системи.

Запропонована методика фізико-топологічного тривимірного моделювання та результати дослідження застосовується у ряді промислових та науково-дослідних установ для проектування хвилеводних ліній, каналізації електромагнітної енергії та визначення напруженостей полів у хвилеводно-резонаторних трактах різних типів.

Результати дисертаційної роботи у вигляді наукових пропозицій, теоретичних розрахунків, конструкторських та технологічних розробок резонансних НВЧ систем отримані по темі № ЕПП-02/2015 "Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок" (ДР № 0115U006750), яка виконувалась на кафедрі електронних пристроїв та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського у відповідності до цільової програми наукових досліджень НАНУ "Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій" (п. 4. "Низькотемпературна плазма і технології на її основі"). Результати дисертаційної роботи також отримані по темі "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення" (ДР № 0119U103973), яка виконується на кафедрі електронних пристроїв та систем у складі наукової групи ФЕЛ-17 "Комп'ютерне моделювання фізичних процесів в плазмових технологіях".

Результати роботи впроваджені в навчальний процес кафедри електронних пристроїв та систем КПІ ім. Ігоря Сікорського при читанні лекцій та у

лабораторні практикуми курсів "Технологічні основи електроніки", "Плазмова та імпульсна електроніка", "Технологія виробництва електронної техніки" та "Основи аналітичної механіки та теорії коливань".

За результатами досліджень опубліковано 31 наукову працю, при цьому нові конструкторські і технологічні пропозиції захищені патентами України. Отримані результати можуть бути використані для розвитку електронної, радіоелектронної та медичної промисловостей України.

**Ключові слова:** резонатор типу "розрізане кільце", багатокільцевий резонатор з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, усенаправлена індуктивна антена, об'ємний резонатор розрядно-камерного типу, магнетронна розпилювальна система, електронний циклотронний резонанс, фізико-топологічна модель, відбиття енергетичних частинок від поверхонь матеріалів, напруженість поля електричного пробою.

## SUMMARY

Perevertailo V.V. Resonant ultrahigh-frequency systems in pre-breakdown electric mode. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Philosophy Doctor in specialty 171 – Electronics.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Kyiv, 2020.

The scientific and applied problems of development of scientific and technical bases of construction and practical use of resonant ultrahigh-frequency systems in pre-breakdown electric mode for technological equipment are solved in the thesis.

In this regard, the following subjects have been studied:

- construction principles and characteristics of "split ring" type resonant ultrahigh-frequency systems with its modification at high pressure with wireless microwave power consumption;
- construction principles and characteristics of waveguide-type resonant ultrahigh-frequency systems with transverse electric field at low pressure with special dielectric insertion;
- characteristics of the fast neutral atoms flux reflected from the resonator discharge chamber surface and its elements during ion bombardment, in particular the particles reflection coefficient  $R_N$  and energy reflection coefficient  $R_E$  for oxygen and argon ions at different flux incidence angles and respective effect inside the discharge chamber on resonator elements.

The following new scientific results were obtained:

For the first time results of the electric field strength simulation in resonator of the "split ring" type designed for the resonant frequency of 2.45 GHz with a wireless power supply for operation at high pressure have been obtained. The maximum field strength occurs in the localized region of the resonator gap, which was confirmed experimentally.

For the first time the omnidirectional resonant ultrahigh-frequency system (as a modification of the "split ring" type resonator) for the operating frequency of 2.45 GHz was developed and the results of the electric field strength simulation in its gap depending on the microwave power value were obtained.

For the first time results of the electric field strength in the waveguide-type resonator for main mode of  $H_{11}$  type by physical and topological 3D simulation have been obtained which allowed to develop and design an ultrahigh-frequency resonator to operate at 2.45 GHz at low pressure for technological purposes: starting from gas excitation and/or ionization and up to beams of neutral particles generating. Application of the developed models allows to increase accuracy of predesign and the automated construction and final design.

For the first time results of electric field strength (in the waveguide-type resonator in the pre-breakdown electric mode) dependence on microwave generator power taking into account the walls material conductivity of the waveguide chamber and the whole system geometry by physico-topological 3D simulation have been obtained. Such approach allowed to most accurately determine the microwave power required to breakdown voltage in the system, that is reduced the power supply of the developed waveguide resonator. The results of the calculation were confirmed by experiment.

For the first time values of the integral particles reflection coefficient  $R_N$  and integral energy reflection coefficient  $R_E$  for oxygen and argon ions at different incidence angles on metal targets (aluminum, titanium, zinc, strontium, niobium, tantalum) and the reflection coefficient  $R_N$  dependence on ion bombardment energy were obtained, which indicate that the energy transmitted to the substrate surface by these particles can effect a significant impact on the elements of the discharge chamber and on the formation and characteristics of gradient coatings; in particular, it may affect the forming of gradient optical coatings with a specified depth of refractive index distribution. The obtained data indicate, on the one hand, the necessity to take into account the fast atoms reflection during technological resonant ultrahigh-frequency systems and their structural elements designing, because their

technological properties may be lost under the high-energy particles influence, and, on the other hand, during deposition conditions consideration and analysis.

The obtained results have the following practical importance:

Physico-topological models of high-pressure and low-pressure resonant ultrahigh-frequency systems with wireless microwave power supply and transverse electric field have been developed, the calculation results of which allow to predict the parameters and characteristics of ultrahigh-frequency resonators and equipment based on them.

The "split ring" type ultrahigh-frequency resonator for operation at high pressure has been developed and successfully tested as the part of ultrahigh-frequency experimental apparatus at the frequency of 2.45 GHz. It is proposed to use the wireless microwave power supply for simultaneous powering of a number of identical resonators located in specified volume and for avoiding a large number of additional cables at the same time.

The original omnidirectional ultrahigh-frequency resonator was developed as a modification of the "split ring" type resonator. The developed resonator is protected by intellectual property rights. A lot of applications of the resonator start from radio engineering and go to technological industries.

The waveguide-type ultrahigh-frequency resonator at low pressure as an ion flux generator was developed and successfully tested. The resonator was used as an independent device. There are research results of new ways of power parameters improvement and methods of ultrahigh-frequency wave guiding into the electron cyclotron resonance area are realized in its design.

The waveguide-type resonator as a gas activator was successfully tested in experimental industrial production as part of a microwave magnetron sputtering system (MSS). Such technological realization allowed to reduce the MSS operating pressure, which was a problem before integration of the proposed resonant ultrahigh-frequency system. There are results of new research and the obtained data on the reflection coefficients of particles and energies for oxygen and argon ions at

different incidence angles on the metal parts of the system are realized in the new technical solution.

The proposed methodology of physical and topological 3D simulation is used in a number of industrial and research institutions for the waveguide apparatus designing, electromagnetic energy guiding and field strengths determination in waveguide-resonator paths of different types.

The thesis results in the form of scientific proposals, theoretical calculations, design and technological development of resonant ultrahigh-frequency systems were studied during the work of the research program of NASU "Prospective research in plasma physics, controlled thermonuclear fusion and plasma technologies" (p. 4. "Low-temperature plasma and technologies based on it") and FEL-17 research group "Research of electromagnetic effects in devices of vacuum and plasma electronics of technological purpose", and the results of particle and energy reflection coefficients simulation and calculation for oxygen and argon ions at different incidence angles on metal targets and particle reflection coefficient dependence on bombardment ion energy and their incidence angle were included in the initiative topic № ЕІІІІ-02/2015 "Physical and topological mathematical simulation of charged and neutral particle sources" (GR № 0115U006750).

The results of the work are introduced into the educational process of electronic equipment and devices department of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute during lectures and laboratory workshops of the courses "Technological Fundamentals of Electronics" and "Fundamentals of Analytical Mechanics and Theory of Oscillations".

According to the research results 31 scientific works have been published, and new design and technological proposals are protected by patents of Ukraine. The obtained results can be used for the development of the electronic, radio-electronic and medical industries of Ukraine.

**Keywords:** "split ring" type resonator, omnidirectional ultrahigh-frequency antenna, waveguide-type resonator, multi-ring resonator with omnidirectional

excitation and common discharge gap, discharge system, magnetron sputtering system, electron cyclotron resonance, physico-topological model, energetic particles reflection from material surfaces, breakdown electric field intensity.

## СПИСОК ВИБРАНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За результатами досліджень опубліковано 31 наукову працю, нижче наведено список основних (вибраних) публікацій автора. Повний список наведений в Додатку до дисертації.

1. Perevertailo V. Omnidirectional magnetic loop antenna / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // Applied scientific and technical research. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. In Two Volumes – April 1-3, 2020. – Ivano-Frankivsk. – V.2. – P. 88.
2. Kuzmichev A.I. Magnetron Sputtering System for Deposition of Multi-Nanolayered Coatings with Reactive Gas Activation in Microwave Discharge / A.I. Kuzmichev, V.I. Ivashchenko, V.V. Perevertailo, P.L. Skrynskyi // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Vol. 44. – No. 12. – P. 3028-3031.
3. Вольпян О.Д. Безэлектродный активатор реакционного газа для оптической тонкопленочной технологии / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // Наноинженерия. – 2014. – № 9. – С.11-16.
4. Kuzmichev A.I. 3D simulation of the microwave low-temperature plasma generator / A.I. Kuzmichev, V.V. Perevertailo // The report of the Scientific Council "Plasma Physics and Plasma Electronics". – 2016. – P.49
5. Перевертайло В.В. Моделирование надвысокочастотного генератора плазмы / В.В. Перевертайло // Микросистемы, Электроника та Акустика. – 2018. – Т. 23. – №1(102). – С.16-22.
6. Perevertailo V. Microwave plasma generator / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // "Innovations in science and technologies": proceeding of the XI International R&D Students Conference. – 2013. – Part II. – 300 p.
7. Кузьмичёв А.И. Магнетронное распыление с ассистированием плазмой СВЧ разряда / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло, В.И. Иващенко, П.Л. Скрынский // 12-я международная научно-техническая конференция "Быстрозакалённые материалы и покрытия". Сборник трудов в 2-х томах. – 2013. – Т.1. – С. 204-209.

8. Вольпян О.Д. Безэлектродный активатор реакционного газа для тонкопленочной оптической технологии / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // Материалы IX Международной конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». – 2014 – С. 30-33.
9. Перевертайло В.В. Дослідження можливостей моделювання НВЧ генератора плазми у середовищі Comsol Multiphysics / В.В. Перевертайло, С.О. Майкут // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених "Електроніка-2017". – 2017. – С.103-107.
10. Perevertailo V. Simulation of microwave plasma generator of waveguide-resonator type / Volodymyr Perevertailo, Anatoly Kuzmichev // XIII International Conference “Electronics and Applied Physics”. Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. – 2017. – P. 178-179.
11. Perevertailo V.V. Microwave field simulation in waveguide-resonator system for gas discharge ignition / V.V. Perevertailo, A.I. Kuzmichev // II Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження". – 2018. – С. 112.
12. Kuzmichev A. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment / A. Kuzmichev, V. Perevertaylo, L. Tsybulsky, O. Volpian // Journal of Physics. – 2016. – Vol. 729. – P. 012005(1-5).
13. Кузьмичёв А.И. Моделирование плазмовых джерел швидких нейтралів / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло. – Матеріали X науково-практичної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки". – Київ, 7-8 квітня, 2016. – С. 33-40.
14. Kuzmichev A.I. Simulation of fast neutral atom source with microwave plasma unit / A.I. Kuzmichev, V.V. Perevertaylo. – In The report of the Scientific Council "Plasma Physics and Plasma Electronics". – Kyiv: NASU, 2015. – С. 32.

ВСТУП.....	17
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК НВЧ РЕЗОНАТОРНИХ СТРУКТУР ТА ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ ПЛАЗМИ НА ЇХ ОСНОВІ.....	26
2. ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПИС УСТАНОВОК ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЗОНАТОРНИХ НВЧ СИСТЕМ НИЗЬКОГО ТА ВИСОКОГО ТИСКІВ.....	51
2.1. Теорія електромагнітного поля.....	51
2.2. Граничні умови.....	54
2.3. Підхід до моделювання.....	58
2.4. Схеми установок для проведення експериментів.....	60
2.4.1. Схеми дослідної установки для проведення експериментів з НВЧ резонатором низького тиску робочого газу.....	60
2.4.2. Поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм.....	64
2.4.3. Дослідна установка для визначення резонансної частоти НВЧ резонатора високого тиску робочого газу.....	67
2.4.4. Схеми дослідної плазмохімічної установки для проведення експериментів з НВЧ резонатором високого тиску робочого газу.....	73
3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАТОРНИХ СИСТЕМ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ ДЛЯ ВИСОКОГО ТИСКУ РОБОЧОГО ГАЗУ.....	77
3.1. Моделювання резонаторів.....	77
3.2. Проведення експериментів на панорамному вимірювачі. Визначення резонансних частот.....	81

3.3. Проведення експериментів із резонатором типу "розрізане кільце" у газорозрядній НВЧ камері.....	83
3.4. Розробка багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором.....	86
3.5. Висновки.....	91
4. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАТОРНИХ СИСТЕМ КАМЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ НИЗЬКОГО ТИСКУ РОБОЧОГО ГАЗУ .....	94
4.1. Постановка проблеми.....	94
4.2. Розробка конструкції і моделювання розподілу електромагнітного поля у безелектродному НВЧ активаторі газу, побудованого на базі резонаторної системи розрядно-камерного типу .....	96
4.3. Поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм .....	111
4.4. Моделювання нейтралізатора іонів як джерела високоенергетичних частинок.....	114
4.5. Висновки.....	122
ВИСНОВКИ .....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	130
ДОДАТКИ .....	142
Д.1. ДОКУМЕНТИ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....	142
Д.2. ДОКУМЕНТИ ПРО ЗАХИСТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ....	146
Д.3. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....	148

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НВЧ	надвисока частота
МРС	магнетронна розпилувальна система
ЕЦР	електронний циклотронний резонанс
НГП	низькотемпературна газорозрядна плазма
ПС	НВЧ плазмовий світильник
ДБ	діелектричний блок
ДН	діаграма направленості
КСХ	коефіцієнт стійної хвилі
КСХН	коефіцієнт стійної хвилі за напругою
АРП	автоматичне регулювання потужності
ГХЧ	генератор хитної частоти

## **ВСТУП**

### **Актуальність теми**

Однією з найбільш перспективних технологій обробки речовин є плазмова технологія. Це обумовлено її екологічною безпекою, високою чистотою технологічних процесів і якістю продукції [1, 2]. Плазмова технологія базується на газових розрядах, у тому числі на НВЧ розрядах, які мають суттєві переваги [3].

Для реалізації таких технологій необхідні резонатори з НВЧ живленням і широка номенклатура таких резонаторів, оскільки потрібні чисельні варіанти плазмових обробок [3-5].

Користь НВЧ розрядів забезпечується доступністю високоефективних недорогих генераторів потужності НВЧ діапазону [6].

Разом з тим НВЧ діапазон добре відповідає умовам ефективного передавання енергії при типових робочих тисках плазмоутворювального газового середовища [7].

НВЧ енергія може бути підведена до розгалуженої системи процесів обробки матеріалів. Використання НВЧ розрядів є основою створення безелектродних методів та гібридних (по частотам видам розрядів, тощо) процесів обробки матеріалів [1, 2, 8].

Незважаючи на перспективність НВЧ розрядів та їх застосування для генераторів плазми, вони потребують науково обґрунтованих методик моделювання для їх ефективного проектування та подальшого конструювання.

### **Мета і завдання досліджень**

Мета роботи полягає у дослідженні, моделюванні та проектуванні резонансних НВЧ систем у допробійному електричному режимі для роботи за низьких та високих тисків на хвилі з поперечним електричним полем при частоті 2,45 ГГц.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити та дослідити НВЧ резонатор типу "розрізане кільце" на частоті 2,45 ГГц, отримати значення напруженості електричного поля у зазорі резонатора при різних значеннях потужності джерела НВЧ,
- розробити фізико-математичну топологічну модель резонатора, який являтиме модифікацію резонатора типу "розрізане кільце", із квазісферичною діаграмою направленості на частоті 2,45 ГГц, отримати значення напруженості електричного поля у зазорі резонатора при різних значеннях потужності джерела НВЧ,
- розробити фізико-математичну топологічну модель хвилеводно-резонаторній системи – об'ємного резонатора розрядно-камерного типу – у допробійному електричному режимі з поперечним електричним полем для передавання енергії від генератора НВЧ у розрядну камеру, отримати значення напруженості електричного поля у зазорі резонатора при різних значеннях потужності джерела НВЧ,
- провести аналіз характеристик потоку швидких нейтральних атомів, відбитих від поверхонь елементів розрядної камери резонатора при іонному бомбардуванні,
- експериментально дослідити НВЧ резонатор типу "розрізане кільце" на частоті 2,45 ГГц,
- розробити та дослідити прототип НВЧ генератора плазми з об'ємним резонатором розрядно-камерного типу на основному типі коливань  $H_{11}^*$ .

**Об'єкт досліджень:** безелектродні технологічні НВЧ резонатори, розроблені для різних галузей застосування (генерація плазми за низьких та високих тисків, нейтралізація іонних потоків, використання у складі інших установок в якості асистувального пристрою, зокрема, МРС, джерел світла на базі НВЧ плазми, біомедицині, тощо) від обробки поверхонь різних матеріалів до генерації світла.

**Предмет досліджень:** фізико-топологічні моделі резонансних НВЧ систем та параметри електрофізичних та радіочастотних процесів передачі електромагнітної енергії від джерела НВЧ до резонатора та розрядної камери у допробійному електричному режимі; розподіл напруженості електричного поля у НВЧ резонаторах в залежності від їх геометрії та величини потужності НВЧ; характеристики інтегральних коефіцієнтів відбиття частинок та енергії для різних типів іонів і поверхонь; характеристики розподілу енергії зворотно розсіяних високоенергетичних атомів від поверхонь елементів конструкції з різних матеріалів. Розробка апарату для проектування з метою створення наукової основи.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дослідження проводилися на кафедрі електронних пристроїв та систем (ЕПС) КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема в рамках фундаментальних і прикладних робіт, що виконувались за програмами, планами і темами наукових досліджень, які відповідають закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки та техніки" (ст. 3, п.1) "Основним науковим напрямом та найважливішим проблемам фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук" (постанова Президії НАНУ № 179, 20.12.2013, пп. 1.4.8, 1.6.3) і цільової програми наукових досліджень НАНУ "Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій" (п. 4. "Низькотемпературна плазма і технології на її основі"), а також відповідно до планів держбюджетних робіт, що виконувалися на кафедрі ЕПП у період 2017-2020 рр. за темою "Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок" (ДР № 0115U006750), і 2019-2020 у складі наукової групи ФЕЛ-17 "Комп'ютерне моделювання фізичних процесів в плазмових технологіях" за темою "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення" (ДР № 0119U103973).

У вказаних роботах здобувач був провідним виконавцем.

### **Методи наукових досліджень включають:**

- бібліографічний аналіз науково-технічної і патентної літератури, а також інформаційних матеріалів в базах даних та в Інтернеті;
- методи математичної фізики, фізичної кінетики, комп'ютерних обчислень, включаючи розрахунки за методом Монте-Карло для процесів відбиття частинок та їх енергії для різних типів іонів і поверхонь, методи статистичної обробки результатів вимірювань, визначення похибки вимірювань і ступеня відповідності розрахункових і експериментальних даних;
- методи аналітичної геометрії, фізико-топологічного моделювання і числового розрахунку моделей, що використані для побудови математичних фізико-топологічних моделей НВЧ резонатора розрядно-камерного типу та резонатора типу "розрізане кільце", дослідження їх характеристик і визначення шляхів удосконалення конструкцій;
- електричні вимірювання, включаючи НВЧ вимірювання, осцилографія, осцилографія з пам'яттю і масштабно-часовими перетвореннями, спектральні вимірювання для процесів в електричних схемах/колах/резонаторах;

Теоретичні положення та висновки підтверджені результатами експериментальних досліджень з похибкою вимірювань, яка не перевищує 20%, а в більшості випадків похибка комп'ютерного моделювання до 10%.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

В дисертації отримані такі нові наукові результати:

1. Розроблено методичку математичного фізико-топологічного моделювання резонансних НВЧ систем розрядно-камерного типу та типу "розрізане кільце". Моделі дозволяють визначати розподіл напруженості електричного та магнітного полів в просторі резонаторів, розподіл та напрямки струмів в системах та S-параметри при заданих конструкціях резонаторів, фізичних властивостях елементів, частоті генератора НВЧ живлення. Отримані

розподіли та параметри використовуються для обчислення параметрів і визначення характеристик резонаторів.

2. Вперше, запропоновано новий резонатор, який є модифікацією типу "розрізане кільце", з квазісферичною діаграмою направленості. Створені фізико-топологічні тривимірні моделі резонаторів.

3. На принципах фізичної кінетики створено комплекс удосконалених фізико-топологічних моделей, які враховують різноманітність елементарних фізичних процесів у об'ємі та на поверхні стінок камери, включаючи відбивання (зворотне розсіювання) від неї високоенергетичних частинок.

4. Вперше, проведено комп'ютерне моделювання джерела нейтральних частинок, розраховано інтегральні коефіцієнти відбиття частинок та енергії для різних типів іонів і поверхонь елементів розрядної камери, проведено розрахунок розподілу енергії зворотно розсіяних високоенергетичних атомів від різних типів поверхонь.

5. Отримані нові дані по коефіцієнтам відбиття частинок та енергії для різних іонів та поверхонь конструкції під різними кутами показують, що число та енергія таких частинок значні, і вони можуть суттєво впливати як на конструктивні елементи розрядної камери, так і на ведення технологічних процесів в ній.

6. На базі розрахунків створено та досліджено вдосконалені прототипи резонансних НВЧ систем розрядно-камерного типу та типу "розрізане кільце".

7. Запропоновано і перевірено експериментальний макет, по-перше, для незалежного дослідження НВЧ резонатора розрядно-камерного типу і, по-друге, для роботи у складі магнетронної розпилювальної системи. Останній дозволив зменшити робочий тиск технологічної установки в цілому.

8. Запропоновано і теоретично підтверджено, що розроблений прототип НВЧ резонатора розрядно-камерного типу може застосовуватись для активації газу та працювати у складі установок різного технологічного призначення, наприклад, генератора НВЧ плазми, плазмового НВЧ світильника, магнетронної розпилювальної системи, нейтралізатора іонів, ін.

9. Запропонований НВЧ генератор типу "розрізане кільце" і його модифікація можуть стати визначальними конструктивними елементами камер для зберігання радіоелектронної апаратури, медичних інструментів та інших (чутливих до зовнішнього впливу, окиснення або бактерій) стерильних зразків.

#### **Особистий внесок здобувача**

Внесок автора в проведення досліджень, моделювання і одержання результатів, що становлять основний зміст дисертації, є визначальним:

- пошукач особисто спроектував фізико-топологічні тривимірні моделі резонансних НВЧ систем розрядно-камерного типу та типу "розрізане кільце", а в співавторстві з науковим керівником – модель розрахунку коефіцієнтів частинок та енергії відбитих високоенергетичних атомів від поверхонь елементів розрядної камери;
- особисто побудував фізико-топологічну 3D модель модифікації резонатора типу "розрізане кільце" з квазісферичною діаграмою направленості та провів розрахунки, інтерпретацію отриманих результатів, їх аналіз та узагальнення, та у співавторстві з науковим керівником провів проектування;
- розрахунки, пов'язані з моделюванням усіх видів резонаторів, представлених у дисертації, були виконані особисто пошукачем;
- розрахунки інтегральних коефіцієнтів відбиття частинок та енергії для різних типів іонів і поверхонь елементів розрядної камери, розрахунки розподілу енергії зворотно розсіяних атомів від різних типів поверхонь були виконані особисто пошукачем;
- експериментальні дослідження по розрахунку резонансних частот, S-параметрів були виконані особисто пошукачем та експерименти по генерації плазми за допомогою резонаторів були виконані разом зі науковим керівником при активній творчій участі пошукача;
- остаточна редакція наукових результатів, що захищаються, положень і висновків по роботі виконані особисто пошукачем та погоджені із науковим керівником.

## **Апробація результатів дисертації**

Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Українських і Міжнародних конгресах, конференціях, симпозіумах і семінарах (див. список в Додатку №3). Опубліковано 25 текстових матеріалів конференцій, список яких наведено в Додатку №3. Основні положення дисертації опубліковано у 5 статтях у наукових фахових виданнях, з них 2 статті у міжнародних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз, матеріалах конференцій, а також у 2 патентах України.

## **Практичне значення одержаних результатів**

1. Розроблений аналітичний апарат моделювання, комплекс математичних фізико-топологічних моделей процесів у резонансних НВЧ системах та проведений значний обсяг розрахунків і експериментальних досліджень розроблених конструкцій, що в сукупності складають наукові основи моделювання та конструювання поліпшених НВЧ резонаторів. Це дозволяє здійснювати розрахунки електричних, енергетичних, частотних і експлуатаційних характеристик резонансних НВЧ систем широкого і спеціального призначення.
2. Вперше, за результатами теоретичного аналізу та експериментального дослідження характеристик резонансних НВЧ систем запропоновані і апробовані нові способи поліпшення параметрів резонаторів (завдяки отриманим залежностям потужності НВЧ, напруженості електричного поля, що виникає в розрядній камері, та геометрії елементів системи) і можливого зменшення потужності джерела НВЧ для їх безпроводного живлення.
3. Розроблено та запропоновано резонансної НВЧ системи розрядно-камерного типу для роботи у системі для технологічної обробки приповерхневих шарів матеріалів (від зберігання радіоелектронної апаратури, медичних інструментів та інших стерильних зразків до процесів травлення та модифікації структури приповерхневих шарів матеріалів), також для роботи сумісно з МРС та іншого технологічного призначення.

- Створено і досліджено вдосконалені конструкції та режими роботи резонансної НВЧ системи, які забезпечують активацію газів Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> та ін.
4. Розроблені методики і результати моделювання дозволяють використовувати отримані дані як довідникові для проведення подальших розрахунків та досліджень експлуатаційних характеристик резонансних НВЧ систем широкого і спеціального призначення, газорозрядних камер, процесів обміну енергією та нейтралізації потоків іонів на різних типах поверхонь.
  5. Результати роботи були використані у КПІ ім. Ігоря Сікорського при виконанні НДР "Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок" (ДР № 0115U006750) і у складі наукової групи ФЕЛ-17 "Комп'ютерне моделювання фізичних процесів в плазмових технологіях" за темою "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення" (ДР № 0119U103973).
  6. Результати роботи були використані при виконанні цільової програми наукових досліджень НАНУ "Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій" (п. 4 "Низькотемпературна плазма і технології на її основі").
  7. Результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри електронних пристроїв та систем у дисциплінах «Технологічні основи електроніки», «Технологія виробництва електронної техніки» (де відображені схемотехнічні рішення, принципи побудови та характеристики резонаторних НВЧ систем, розділи «Іонно-плазмова та плазмохімічна апаратура і технологія для обробки поверхні підкладок») та у дисципліні «Плазмова та імпульсна електроніка» (де відображені методи поширення електромагнітної енергії та способи отримання високоенергетичних заряджених та нейтральних частинок, розділи «Види плазмових газових розрядів; НВЧ розряди, електродні та безелектродні розряди»).

8. Нові конструкторські і технологічні пропозиції захищені патентами України (№139282 та №141893).

### **Структура і зміст роботи**

Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, викладених на 127 сторінках тексту (виключаючи сторінки, повністю заповнені ілюстраціями), списку використаних джерел із 105 публікацій вітчизняної та зарубіжної літератури. Робота містить 53 ілюстрації, 8 таблиць, 3 додатки із доповнювальними матеріалами та актами і довідками про використання результатів дисертації. Загальний обсяг роботи – 152 сторінка.

## **1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК НВЧ РЕЗОНАТОРНИХ СТРУКТУР ТА ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ ПЛАЗМИ НА ЇХ ОСНОВІ**

В останні роки спостерігається значне зростання зацікавленості до практичного використання НВЧ енергії у промислових цілях [9-11]. Разом з тим швидкість і легкість застосування технології, а також її вивчення забезпечує наявність недорогих і надійних генераторів НВЧ потужності, які працюють на частоті 2,45 ГГц.

НВЧ енергія полегшила впровадження у різні області науки і техніки плазми газового НВЧ розряду [4], який має ряд переваг з-поміж інших методів отримання плазми, зокрема безелектродність (відсутність електродів, що контактують з реакційним газом, – важлива особливість НВЧ систем) енергія до плазми газового розряду підводиться електромагнітною хвилею ззовні через діелектричну радіопрозору стінку з кварцового скла або кераміки. Це дозволяє виключити ефекти руйнування електродів і забруднення матеріалу покриття.

Системи, показані на рис. 1 (а, б, г, е), створюють магнітоактивну плазму за рахунок поглинання енергії геліконової хвилі, при цьому системи «а», «б», «г» використовують магнітне поле соленоїдного типу. Системи, показані на рис. 1 (в, д, ж, з), використовують поглинання в мультикасповому (багатополюсному) магнітному полі, що створюється за допомогою постійних магнітів. У більшості систем застосовують хвилевідне підведення енергії до розрядної камери, але в системах «ж» і «з» – антенне («ж» антена має вигляд диска, відокремленого від плазми шаром діелектрика; в «з» антена виконана з 8 стрижнів, занурених у плазму, стрижні розташовані навпроти полюсів октапольного постійного магнітного поля).

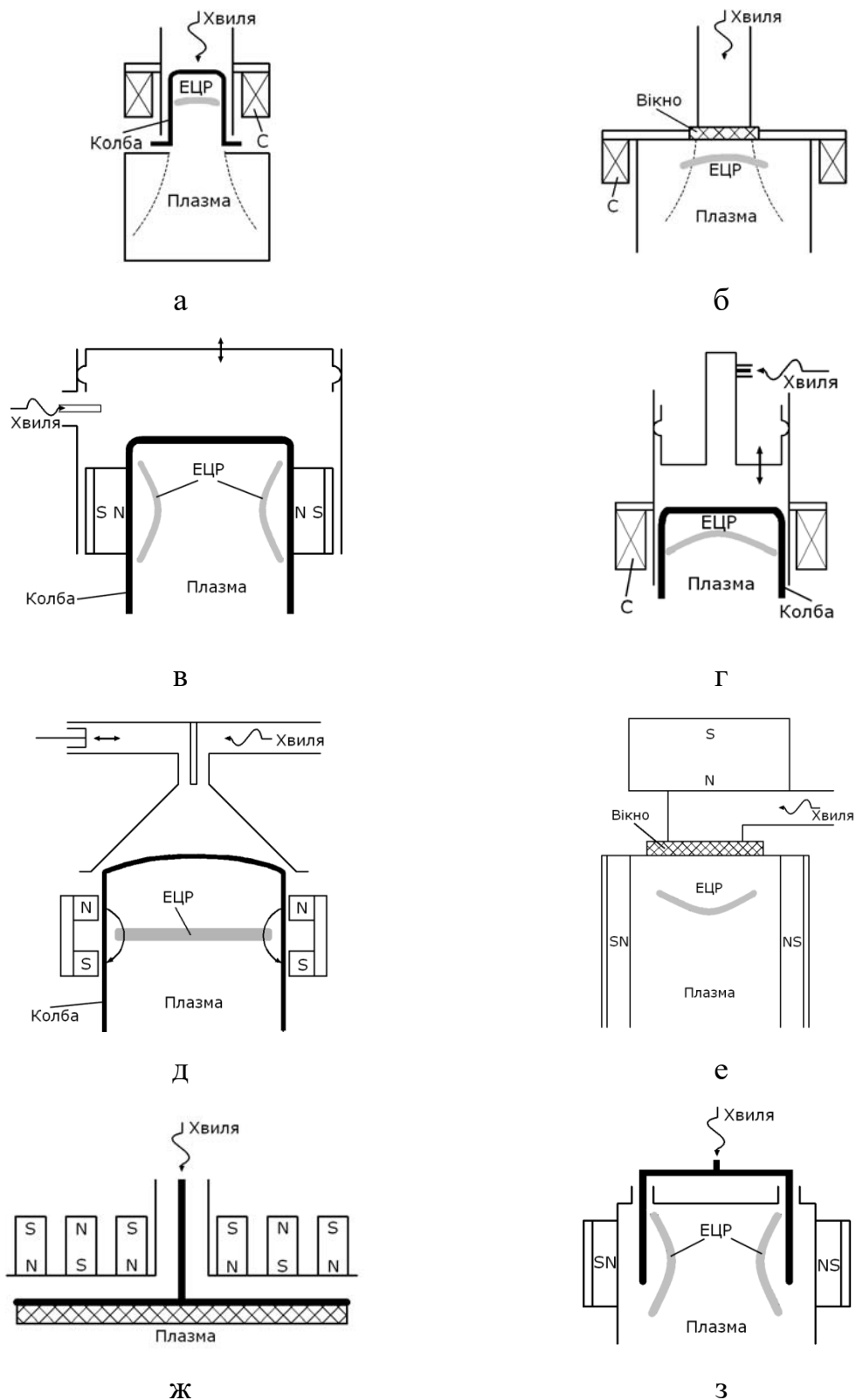


Рис. 1. Схеми можливих конструкцій для активації газу в плазмі НВЧ розряду. С – соленоїд, ЕЦР – електронний циклотронний резонанс.

Адаптовано з [12]

Такі системи активації газу можуть працювати як незалежні пристрої для певних технологічних цілей, які будуть описані далі, так і у складі інших

систем в якості асистувальних елементів, які призначені для розширення діапазону технологічних параметрів [13]. Так в магнетронні розпилювальні системи (MPC), до прикладу, вводять додаткові асистувальні пристрої, які сприяють підвищенню рівня іонізації і знижують нижню межу робочого тиску газів. Ці ж пристрої можуть підвищувати хімічну активність робочого реактивного газу та інтенсивність іонного бомбардування поверхні підкладки з осаджуваним покриттям. В [7, 14, 15] розглянуті різні варіанти подібного підходу, серед яких як перспективний виділяється асистування за допомогою плазми НВЧ (гігагерцевого) розряду, який до того ж можна реалізувати досить простим способом. Як результат, розвиток НВЧ вакуумно-плазмової техніки призвів до її впровадження в сучасні технології синтезу наноматеріалів, покриттів і обробки наноструктур [3].

Оптичні покриття, електроізоляційні плівкові елементи мікроелектронних виробів та інші (тверді, зносостійкі, захисні) покриття найчастіше представляють собою тонкоплівковий діелектрик складного вмісту у вигляді оксидів, нітридів, карбідів і комбінацій металів та напівпровідників, що наносяться на підкладку в реакційному газовому середовищі. Для отримання стехіометричного складу, як правило, підвищують тим чи іншим способом хімічну активність реакційного газу. Активація газу особливо необхідна при використанні вихідної речовини (джерела) у вигляді ще непрореагованих металів і напівпровідників. Кращими способами стимулювання синтезу покриттів складного вмісту є нетермічні методи – активація газу в плазмі електричного розряду з подальшою подачею до поверхні підкладки, її бомбардування іонами газу і ультрафіолетове опромінення [14, 15].

Для нетермічного нанесення покриттів широко застосовується іонне розпилення у магнетронному розряді низького тиску робочого газу [7]. Цей метод дозволяє розпилювати будь-яку вихідну речовину – джерело матеріалу покриття та проводити процес в реакційному газовому середовищі. При магнетронному розпиленні можна робити ефективний іонно-плазмовий вплив

на процес формування покриття [7, 13]. В результаті, цей метод успішно конкурує з іншими, в тому числі з електронно-променевим випаровуванням з іонно-плазмовим підтриманням.

Магнетронний розряд здійснюється в двохелектродній газорозрядній системі з холодним (нерозжарювальним) катодом, обмеженість робочих умов якої неминує призводить до обмеження діапазону допустимих параметрів технологічного процесу формування покриттів [7, 12, 13]. Але, як зазначалось вище, завдяки асистуванню НВЧ генераторів плазми вдається розширити діапазон технологічних параметрів. Прикладом такої сумісної роботи є системи, проілюстровані на рис. 2.

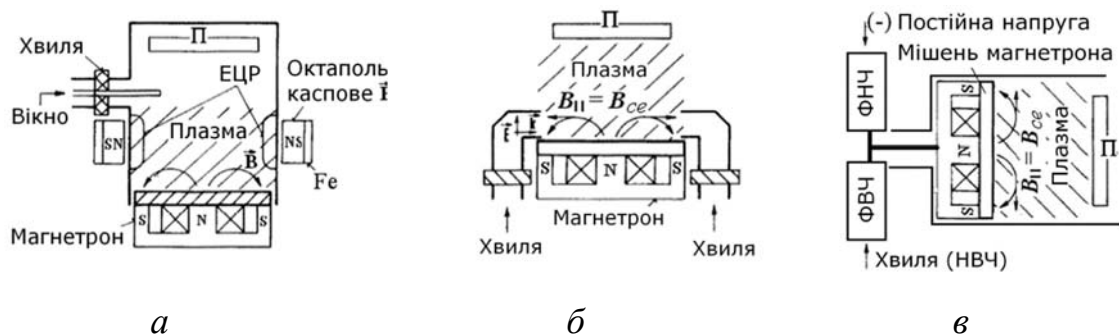


Рис. 2. Схеми можливих магнетронних розпилювальних систем, суміщених з НВЧ розрядними системами. П – підкладка, ЕЦР – зона електронного циклотронного резонансу, ФВЧ і ФНЧ – фільтри верхніх і нижніх частот.

Адаптовано з [12]

Системи з НВЧ активаторами реакційного газу по суті представляють собою певну газорозрядну систему, в якій енергія високочастотної електромагнітної хвилі витрачається на підтримання газового розряду і супутні процеси. Головним процесом, що підтримує безелектродний розряд, є іонізація газу, її супроводжують процеси руйнування і збудження молекул і радикалів газу в результаті протікання різноманітних фізико-хімічних реакцій, які і призводять до появи в розрядному об'ємі хімічно активних частинок [3, 16, 17]. Ці частинки настільки активні, що реакції за їх участю

інтенсивно протікають навіть при кімнатній температурі, що робить їх надзвичайно корисними для низькотемпературного синтезу покриттів складного вмісту [1, 15].

Отже, НВЧ активатори можна умовно розділити на дві групи: автономні джерела активованого газу, що працюють незалежно від розпилювальних або випарних пристроїв, і активатори, безпосередньо сполучені з магнетронно-розпилювальними пристроями. На рис. 1 наведені можливі конструкції активаторів першої групи. На рис. 2 – активатори другої групи.

Коли розглядається система для генерації плазми при низькому тиску, тоді для асистування доцільно застосовувати НВЧ розряд зі схрещеними полями (змінне електричне поле ортогональне постійному магнітному) в режимі електронного циклотронного резонансу (ЕЦР) [7], при якому найбільш ефективно перетворюється енергія електромагнітної хвилі в енергію електронів, що, відповідно, призводить до посилення активації та іонізації газу. На частоті 2,45 ГГц електронний резонанс має місце при індукції магнітного поля  $B_{ce} = 87,6$  мТл (876 Гс). На рис. 1 позначено області у розрядних камерах, де виконується умова ЕЦР. В режимі ЕЦР нижня межа діапазону можливих робочих тисків опускається до 0,01 Па і нижче [13, 15].

Спадне магнітне поле (див. рис. 3) виштовхує плазму і супутні частинки в область слабшого поля – до вихідної сітки [18], де і розміщують розпилювальну мішень (рис. 1 і 2). Сильніше поле в області передньої діелектричної стінки колби розрядної камери або вікна (рис. 1 і 2) сприяє проникненню електромагнітної хвилі в плазму НВЧ розряду завдяки збудженню поверхневої геліконової хвилі [3, 12]. У [19] пояснений та проілюстрований принцип дії сил, що діють на заряджену частинку, у магнітному полі, яке сходиться. На рис. 3 бачимо, що траєкторія частинки, крім руху по колу (сила Лоренца  $\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}]$ , де  $q$  – заряд частинки,  $v$  – швидкість,  $B$  – індукція магнітного поля. В залежності від знаку заряду обертання відбуватиметься за або проти годинникової стрілки), буде також зміщуватись у сторону спадання напруженості магнітного поля під дією сил,

які зображені на рис. 4. На ньому зображений один виток траєкторії в наростаючому полі і для спрощення взятий випадок, коли поздовжня складова швидкості дорівнює нулю. Вектор  $MA$  – це вектор напруженості магнітного поля у деякій точці  $M$  на траєкторії частинки. Цей вектор можна розкласти на дві компоненти: одну, що перпендикулярна площині витка, та другу, що напрямлена до його центра вздовж радіуса. В однорідному магнітному полі силові лінії були б паралельними і вектор  $H$  мав би лише компоненту  $MB$ . Ця компонента, що діє на частинку, створює центросиметричну силу  $F_1$ , що підтримує обертання. Компонента ж вектора поля  $MA$  обумовлена кутовою розбіжністю силових ліній, тобто неоднорідністю поля. Вона створює силу, яка буде перпендикулярна до  $MC$  і до напрямку швидкості, тобто до дуги кола у точці  $M$ . Як результат ми отримуємо силу  $F_2$ , що виштовхує частинку із області сильного поля у сторону більш слабкого поля (при цьому знак частинки не впливає на напрям руху, і, як результат, плазма рухається як єдине ціле у сторону спадання напруженості магнітного поля).

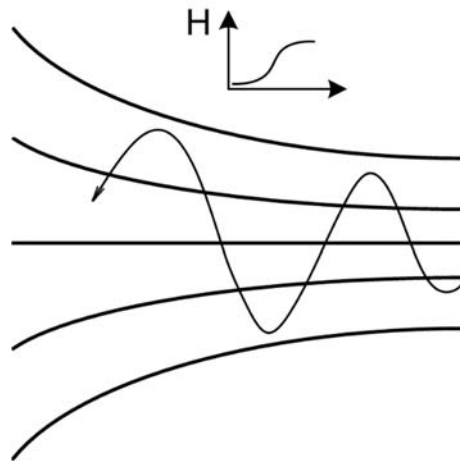


Рис. 3. Рух зарядженої частинки у неоднорідному магнітному полі (зі спадом напруженості вздовж горизонтальної осі справа наліво). Адаптовано з [18]

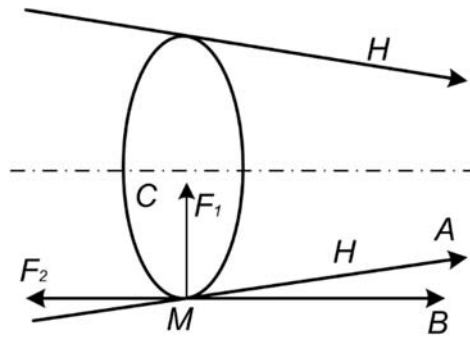


Рис. 4. Сили, що діють на частинку у магнітному полі, силові лінії якого сходяться. Сила  $F_1$  підтримує ларморовське обертання, а сила  $F_2$  виштовхує частинку у сторону спадання магнітного поля. Адаптовано з [19]

Підведення НВЧ енергії та можливість її концентрації в певній локальній області також відіграє важливу роль та складає практичну цінність, коли розглядається процес генерації плазми при підвищених тисках, зокрема при атмосферному. За певних умов, які будуть описані в роботі далі, доцільно застосовувати процес отримання електромагнітної НВЧ енергії, розподіленої в просторі, та концентрації її в певній області, тобто фокусуванні напруженості електричного поля. Такі системи чутливі до вектора магнітної складової поля та будуються на базі рамкових антен. Одним із видів таких антен є резонатори типу "розрізане кільце" або кільцеві антени [20-23]. Зовнішній вигляд – кільце з розрізом, розподіл силових ліній електричного поля  $E$  в якому, і яке викликається зовнішнім магнітним полем  $H$ , представлений на рис. 5.

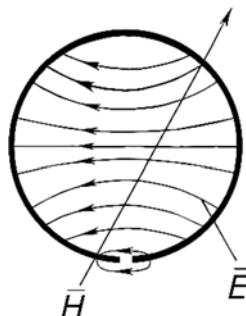


Рис. 5. Розподіл електричного поля  $E$  у кільцевому резонаторі та напрямок вектора магнітного поля  $H$

Водночас важливо розробити структуру, не чутливу до орієнтації вектора напруженості магнітного поля, тобто іншими словами створити антену із круговою діаграмою направленості на базі резонатора типу "розрізане кільце". Схожі структури було описано у [24] та представлено на рис. 6, а також експериментально вивчено у [23] та зображено на рис. 7, але недоліком таких рішень є рознесення в просторі розрізів резонаторів, в яких фокусуватиметься електрична енергія.

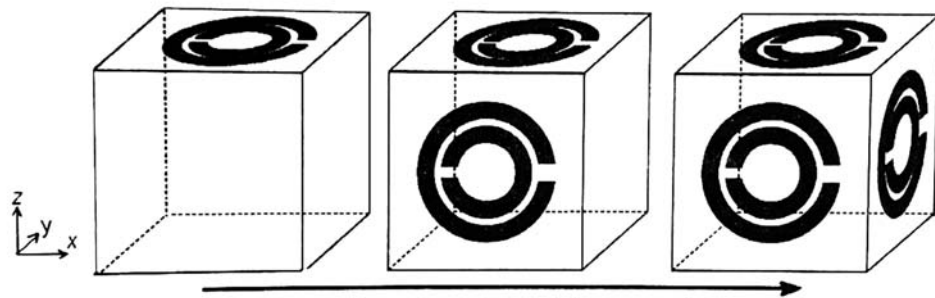


Рис. 6. Послідовне утворення резонаторної структури, не чутливої до орієнтації вектора напруженості магнітного поля, шляхом розташування резонаторних пар у трьох площинах декартової системи координат.

Адаптовано з [24]

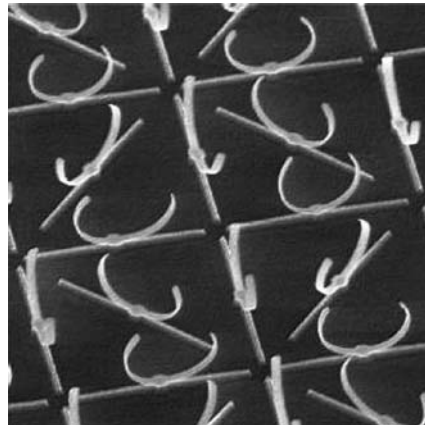


Рис. 7. Структура на базі резонаторів типу "розрізане кільце", не чутлива до напрямку поширення хвилі. Адаптовано з [23]

Відповідно варто було б розробити резонаторну структуру зі спільним розрізом, в якому буде фокусуватись електрична енергія, результати чого описані у наступних розділах дисертаційного дослідження.

Серед **основних застосувань** НВЧ розрядів і відповідно пристроїв для їх генерації, разом з тим газорозрядної НВЧ плазми, іонних потоків та пучків нейтральних атомів можна виокремити наступні.

**Застосування у радіоелектроніці** знаходить місце від захисних НВЧ газових розрядників до технології "Stealth". Утворення плазмових приповерхневих шарів у літальному апараті, зокрема літаку, може знайти ряд застосувань, одне з яких – технологія зникнення з поля зору радіолокаційних систем. У патенті США 8220753 В2 2012 року були розглянуті системи та методи управління потоками заряджених частинок на поверхні літального апарату, що генеруються імпульсними розрядами [25], у патенті 8157528 В1 того ж року представлена система керування та контролю повітряних потоків навколо лопатей гвинтокрила за допомогою каскадних масивів, що генерують плазму [26], у патенті 8016247 В2 2011 року показані система та спосіб регулювання плазмових потоків на мобільних платформах, що перебувають у повітрі [27], у патенті 8016246 В2 того ж року описана система і спосіб генерації плазмового шару з метою його застосування на високошвидкісних мобільних платформах, наприклад, літаках [28], у патенті 7988101 В2 приведена установка і спосіб контролю потоку плазмового покриття на крилі літального апарату [29], а у патенті 7744039 В2 2010 року описані системи та методи управління іонізованими потоками за допомогою електричних імпульсів [30].

Такі надбання інтелектуальної власності підтверджують, що технології отримання та застосування плазми у авіації мають місце вже сьогодні і водночас випереджають свій час. Плазмові технології хоч і відомі, але і не достатньо вивчені, тому з кожним роком знаходяться їхні нові застосування.

В додаток можна сказати, що описана технологія плазмової генерації та керування може застосовуватись у радіоелектроніці не лише у технології "Stealth", але і в якості ізоляції від зовнішнього радіохвильового впливу будь-якої природи, що може стати у нагоді, наприклад, при попередженні терористичних атак та терактів на об'єктах масових заходів, коли необхідно

розірвати зв'язок між об'єктом і "зовнішнім світом", для обмеження можливості передачі сигналу віддалено. Розвиток маловивченої технології для одних цілей може завжди стати поштовхом до неочікуваних відкриттів та її подальшого застосування.

Крім того, плазмова технологія може використовуватись **в апаратурі, яка потребує спеціального захисту**. Серед багатьох типів НВЧ захисних пристроїв виділяють зазвичай три: газорозрядні, вакуумні, напівпровідникові (та їх комбінації) [31]. Саме газорозрядні посідають провідне місце з-поміж інших типів завдяки можливості витримати велику потужність, а присутні недоліки по швидкості спрацювання та відновлення вирішують комбіновані конструкції із напівпровідниковими захисними пристроями. Компанія, що посідає чільне місце на ринку розробок таких пристроїв, є, наприклад, TDK Electronics [5] (раніше у цьому напрямку працювала компанія EPCOS AG із штаб-квартирою у місті Мюнхен, її акції викупила TDK Electronics), наразі вона також впроваджує новітні технології з плазмової обробки матеріалів [32].

**У технології при розробці інтегральних мікросхем (ІМС) [3]** при переході до субмікронної технології постає питання пошуку альтернативи рідинним методам травлення, які стають неприйнятними в силу двох основних причин [33]:

- 1) рідинне травлення носить ізотропний характер, тобто швидкість його однакова в усіх напрямках. Це створює проблему бокового підтравлювання під маску, при цьому фактичний розмір протравленої області в шарі під маскою істотно перевищує заданий розміром вікна в масці;
- 2) застосування рідинних методів супроводжується забрудненнями поверхні продуктами реакцій і сторонніми домішками, що містяться у вихідних реагентах і у воді, що використовується для їх приготування.

Заміна рідинних методів на "сухі" – плазмохімічні і іонно-плазмові – дозволяє істотно поліпшити анізотропію процесу травлення і збільшити його роздільну здатність [34]. При цьому, змінюючи склад плазмоутворювального газу [2, 33], параметри розряду можна в широких межах варіювати швидкості

цільових процесів, їх анізотропію і селективність відповідно до вимог, що пред'являються до розмірів і характеристик виробів.

Розробкою НВЧ генераторів плазми для обробки поверхонь і розробкою технологічних НВЧ резонаторів загалом займаються вчені та дослідники з Великобританії (Дж.Р. Брендон, І. Фріел, М.Е. Купер, Дж.А. Скасбрук, Б.Л. Грін [35], Дж.Дж. Вілман, Дж.М. Додсон [36] та ін.), з Республіки Корея (Й.-Ч. Хонг [37]), з Японії (Я. Огоши, М. Морімото, Й. Ухірабару, Т. Оно [38], Т. Комацу, Ш. Касай [39], Е. Хара, Т. Харада [40], Т. Вада [41] та ін.)

В Україні розробкою НВЧ генераторів та плазмотронів, процесами НВЧ нагріву та НВЧ сушіння, досягненням більш якісного рівня використання НВЧ енергії у різних сферах промисловості, підвищення енергетичної ефективності від використання НВЧ енергії, а також розробкою нових та перспективних НВЧ технологій займається зокрема НВП "Плазмові технології" спільно з Plasma Kraft AS (Норвегія) [42].

Окремо слід згадати проблем, що виникають при мікромонтажі, які пов'язані з наявністю забруднень на поверхнях виробів. Як правило, це органічні речовини, які можуть як природним чином адсорбуватись з атмосфери, так і привноситься при необережному поводженні з виробами, наприклад при тактильному контакті.

При монтажі напівпровідникового кристала на клей необхідно забезпечити його рівномірне нанесення. З цією метою підбирається оптимальний розподіл клею по посадковому місцю, але забруднення можуть значно знизити ефективність цього заходу. Вони перешкоджають якісній адгезії клею до підкладки, внаслідок чого навіть при найкращим чином підбраному способі нанесення клею в подальшому утворюються відшарування. Крім низької якості монтажу з точки зору його механічної міцності, важливим негативним фактором при цьому є низька теплопровідність, що веде до перегріву кристала при роботі електронного пристрою. Плазмове очищення перед нанесенням клею забезпечує міцність з'єднання кристала з підкладкою і хороший тепловідвід [43].

Інша проблема виникає при формуванні дротяних контактних виводів з використанням контактної-резистивної або ультразвукової мікрозварки. Наявність забруднень на контактних площинах перешкоджає утворенню якісного електричного контакту, знижуючи його ефективну площу і міцність на відрив. Плазмове очищення видаляє забруднювачі і оксидні плівки, таким чином сприяючи підвищенню міцності дротяних з'єднань, що, крім усього іншого, дозволяє зменшити розміри контактних площин.

Ще одна характерна проблема може виникнути при герметизації корпусів при заливанні компаундом. Компаунд контактує з багатьма матеріалами: вивідна рамка (або, як варіант, друкована плата), припій, напівпровідниковий кристал, металеві контактні площини. При наявності забруднень на таких поверхнях компаунд відшаровується, і в місці відшарування накопичується волога. Її різке випаровування при нагріванні під час пайки призводить до утворення тріщин в корпусі. Таким чином, герметизація порушується.

Плазмове очищення не тільки видаляє забруднення, а й збільшує енергію поверхневої зв'язку між компаундом і перерахованими вище матеріалами. Цей ефект називається активацією і обумовлений розривом хімічних зв'язків в приповерхневому шарі матеріалу, що піддається впливу плазми. Так усувається відшарування і забезпечується герметичність [43].

Ще необхідно згадати про **вплив** плазми низького тиску робочого газу **на органічні матеріали**, який призводить до найрізноманітніших ефектів [33]: зміни морфології поверхні; утворення нових функціональних груп; появи ненасичених зв'язків і радикалів; виникненню поперечних зв'язків (зшивок) між ланцюгами макромолекул і, нарешті, до очищення – утворення летких продуктів, які, в решті-решт, повністю переводять опрацьований матеріал в газову фазу. Всі ці прояви мають місце завжди, і завдання технології полягає в тому, щоб створити умови, що забезпечують переважне протікання того процесу, який максимально приводить до бажаного ефекту. До складу цих умов входить вибір плазмоутворювального газу і режимів горіння розряду (тиск, потужність і т.д.).

Схожі ефекти мають місце при **обробці текстильних матеріалів**, коли необхідно змінити властивості матеріалів, зокрема гідрофільні, адгезійні, антизабруднювальні та інші властивості. Гідрофільність є однією з найбільш загальних і добре вивчених характеристик полімерного матеріалу, придбаних ним у результаті впливу газового розряду, яка для тканин виражається в збільшенні капілярності, швидкості змочування і водопоглинання [44]. Обробка в плазмі призводить до поліпшення змочуваності полімеру, до зростання косинуса крайового кута змочування, який є мірою поверхневої енергії полімеру, що забезпечує підвищення адгезійної активності поверхні матеріалу. Німецька компанія Diener Electronic досягла немалої успіху у цих сферах, займаючись практично всіма видами плазмової обробки [45].

Усі описані області застосування плазми та її вплив на текстильні вироби може знайти застосування у галузях, які напряду не зв'язані з текстильною промисловістю, але використовують її вироби в комбінаціях із своїми продуктами, наприклад, кабельна ізоляція в електроніці, фібробетон в будівництві, радіопрозорі покриття в антенній промисловості, легкі і міцні матеріали в автомобільній, гірничодобувній промисловостях та багатьох інших.

Не варто також забувати про **екологічний аспект** плазмових технологій. Якщо розглянути найпростіший випадок – видалення фоторезисту, то традиційний рідинний метод у свою чергу потребує ще й спеціальних умов утилізації, а метод плазмового окиснення стає більш екологічно чистий, продуктами якого є нейтральні гази, тому йому варто віддавати перевагу. Крім того, увагу варто приділяти процесам, що відбуваються в низькотемпературній газорозрядній плазмі (НГП) [8]. У такій плазмі температура атомів і молекул близька до температури навколишнього середовища. В той же час електрони мають енергію, достатню для збудження, дисоціації, іонізації атомів і молекул. В результаті цього вихід продуктів реакції в НГП значно більше термодинамічно рівноважного, розрахованого тільки на основі температури газу. Тому в НГП можна значно ефективніше,

тобто з меншими витратами енергії і реагентів по порівняно з традиційними термічними, газовими та рідинними хімічними середовищами, проводити багато технологічних процесів такі, як плазмохімічне отримання порошків, плазмохімічне осадження полімерних і неорганічних плівок, полум'яне анодування, плазмохімічний синтез [1] та ін.

**В медицині** НВЧ плазма та її генератори можуть застосовуватись для зберігання, знезараження, стерилізації інструментів та інших приладів . Для очищення та знезараження поверхні матеріалів, на відміну від інших методів, плазмові дозволяються проводити процеси технологічно чистіше, швидше і автоматизованіше [34]. Генератори, зокрема озону, можуть застосовуватись ще й у лікувальних цілях [46]. Розробка плазмових інструментів також має значення для медицини і, можливо, в найближчі роки знайде свої нові застосування. Це стосується таких напрямків, як зупинка кровотечі, розсікання тканин, програмування клітинного росту, вплив на процеси регенерації та загоювання і т.д.

**Для аналізу речовини** [47]. Спектральні методи аналізу засновані на можливостях атомів і молекул поглинати або випромінювати електромагнітне випромінювання при зміні внутрішньої енергії речовини. Характер цього випромінювання і визначає методи спектрального аналізу, до яких відносяться, наприклад, рентгеноспектральні, радіоспектральні і оптичні методи аналізу. Радіоспектральні методи аналізу вивчають спектри молекул радіохвильового діапазону. Оптичні методи досліджують спектри, що лежать в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях. НВЧ плазма охоплює можливості вивчення обох методів.

**Освітлення** [48, 49]. Є ще один вельми цікавий напрямок – плазмові світильники (ПС) з використанням сірки в якості плазмоутворювальної речовини. Створення середовища з потужним та близьким до сонячного спектром світіння досить важливо як для соціокультурної сфери (освітлення на презентаційних виставках, рекламно-інформаційних щитів, будинків [49], освітлення спортивних ділянок, парків, проїзних шляхів та приміщень із

висотою стелі більше 6 м [50] та ін.), так і для аграрної промисловості, зокрема тепличний комплекс [49, 50]. НВЧ плазмові освітлювальні прилади із високою світловидатністю і природним спектром випромінювання, і, на відміну від світлодіодних, ще й суцільним спектром. Ступінь розробки НВЧ газорозрядних освітлювальних пристроїв окреслюється роботами ряду вчених, зокрема С.М. Бондаренко, Е.М. Гутцайт, Р.А. Жидков, О.Ю. Александрова [51-54], Г. Н. Рохлин [55], А.Н. Диденко, О.В. Прокопенко, А.Ю. Щукин [56].

Початок розвитку високоефективного джерела квазісонячного світла на базі безелектродної газорозрядної лампи з НВЧ накачуванням на частоті 2,45 ГГц було закладено у 1992 р вченими І.Т. Доланом, М.Г. Урі, Ч.Х. Вудом і їх колегами [52]. Роботи по розробці НВЧ освітлювальних приладів продовжилися в компанії Fusion System Corporation (США), а потім у дочірній компанії Fusion Lighting. Згодом всі патенти компанії Fusion System Corporation були викуплені компанією LG Electronics (Республіка Корея), яка розробила свої плазмові світильники (Plasma Lighting System). В останні роки створена європейська група з дослідження НВЧ розряду у світильниках з аргонно-сірчанним наповненням Plasma International Group [52].

Такі світильники не вимагають спеціальних заходів щодо утилізації, як, наприклад, лампи денного світла, що містять пари ртуті [51, 53]. Споживана потужність вуличних ПС вже починає виходити на рівень світлодіодних, тобто 280-350 Вт, а в окремих випадках є навіть меншою.

Основними достоїнствами НВЧ розрядів з-поміж інших типів (постійного струму, низьких частот, ін.) є [3, 7, 57, 58]:

- простота отримання плазми з високим питомим енерговкладом ( $> 1 \text{ Вт} / \text{см}^3$ );
- простота отримання плазми з малим питомим енерговкладом ( $\ll 1 \text{ Вт} / \text{см}^3$ );
- широка область робочих тисків (від  $10^{-5}$  Тор до тисків, що перевищують атмосферний тиск);
- можливість створення як квазірівноважної, так і істотно нерівноважної плазми;

- простота управління внутрішньою структурою розряду шляхом зміни електродинамічних характеристик пристрою введення НВЧ енергії в плазму;
- можливість створення плазми в електродних і безелектродних системах (в останньому випадку відсутнє забруднення об'єму розрядної камери і зразків продуктами ерозії електродів);
- можливість створення плазми в малих і великих об'ємах, включаючи вільний простір (атмосфера Землі);
- можливість обробки великих поверхонь шляхом сканування певної області плазмовим утворенням, що має малі розміри;
- можливість обробки великих поверхонь за допомогою протяжної плазми, яка генерується за допомогою евенесцентних хвиль [59, 60];
- можливість спільного впливу плазми і електромагнітного поля на об'єкти в плазмі для збільшення ефективності процесу;
- розроблені сімейства різноманітних ефективних НВЧ генераторів плазми дозволяють вибрати конструкцію для будь-яких застосувань.

Для вирішення проблем та забезпечення сучасних потреб для галузей, що описані вище, необхідно, по-перше, дослідити наукові засади розуміння процесів, що протікають в пристроях для генерації плазми, і умови, необхідні для її виникнення; по-друге, вивчити принципи розробки, проектування та конструювання пристроїв для генерації плазми.

Притримуючись такого підходу, робота присвячена системам для генерації плазми високого та низького тисків, при чому особливістю першої системи є поглинання енергії з навколишнього простору та концентрування у точковій області, а другої, навпаки, – отримання енергії із точкового джерела НВЧ потужності та розподіл енергії в просторі генератора і розрядної камери. Такий підхід ґрунтується на особливостях виникнення розрядів за відповідних тисків і можливості їх застосування при зазначених умовах. При цьому розглядається допробійний режим, тобто коли створюються передумови для виникнення розряду і не розглядається і не досліджується плазма, що є власне окремим напрямком подальших досліджень.

Діапазон робочих тисків ( $p$ ): 0,01-10<sup>5</sup> Па.

Газ: аргон Ar.

Рід частинок: іони аргону Ar<sup>+</sup>.

Довжина вільного пробігу електрона в газі визначається за формулою [61]:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi ND^2}}$$

де  $N$  – концентрація частинок, яка визначається із співвідношення  $N = \frac{p}{kT}$ , де  $p$  – тиск в системі,  $k$  – стала Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $T$  – температура в системі (К),  $D$  – діаметр молекул газу або переріз іонізації.

Переписавши формулу з урахуванням концентрації частинок та газокінетичного перерізу зіткнень ( $\sigma = \pi D^2$ ) [62], отримуємо формулу для довжини вільного пробігу електрона в газі у наступному вигляді:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} p \sigma}$$

Напруженість електричного поля, достатня для генерації НВЧ плазми в залежності від тиску в системі представлена на рис. 9 для гелію [63], на рис. 8 для аргону [64], на рис. 10 для водню та кисню, на рис. 11 для ксенону [65] та рис. 12 для повітря [66].

Характеристична дифузійна довжина  $\Lambda$ , що визначає "частоту" дифузійних втрат  $\nu_d = D/\Lambda^2$  [58]:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{2,4}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \text{ – циліндр з радіусом } R \text{ та довжиною } L;$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\pi}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L_3}\right)^2 \text{ – паралелепіпед зі сторонами } L_1, L_2, L_3;$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\pi}{R}\right)^2, \quad \Lambda = \frac{R}{\pi} \text{ – куля з радіусом } R.$$

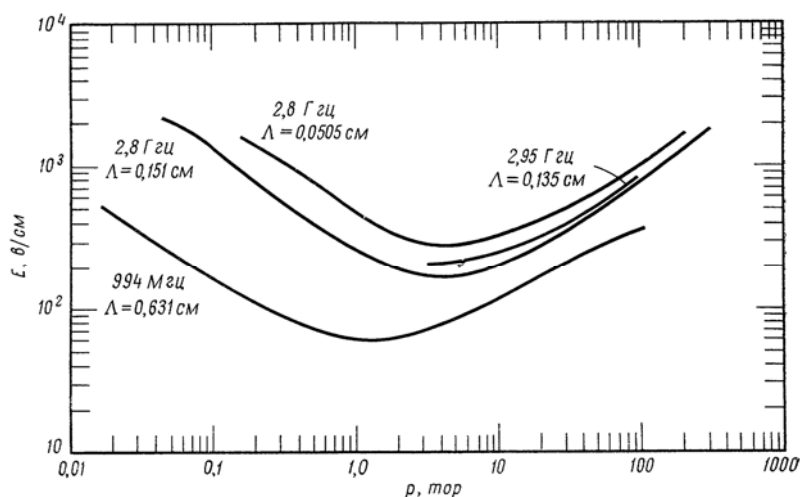


Рис. 8. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від тиску в системі  $p$  для аргону. Адаптовано з [64]

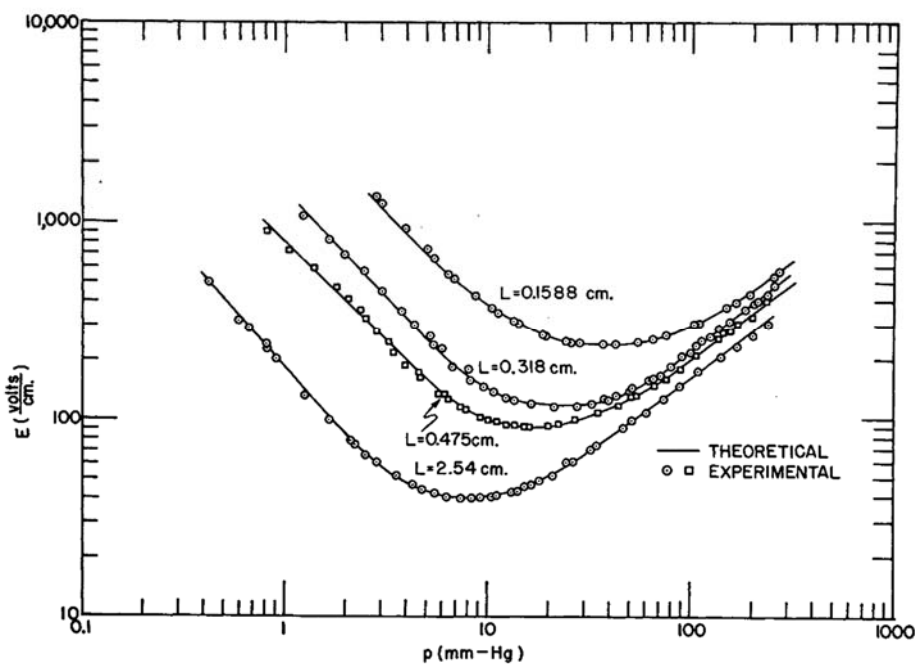


Рис. 9. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від тиску в системі  $p$  для гелію:

кільця – значення отримані практично;

суцільна лінія – теоретичні дані. Адаптовано з [63]

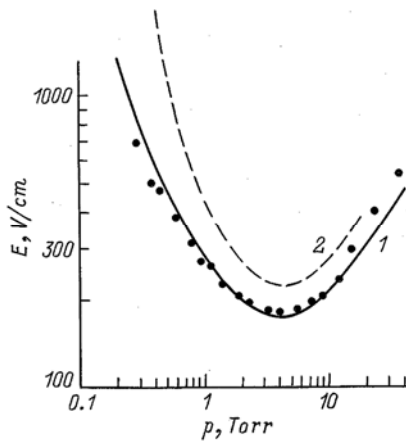
Для хвильоводно-резонаторного тракту циліндричного типу може визначатись з умови [58]:

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2,4}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2}}$$

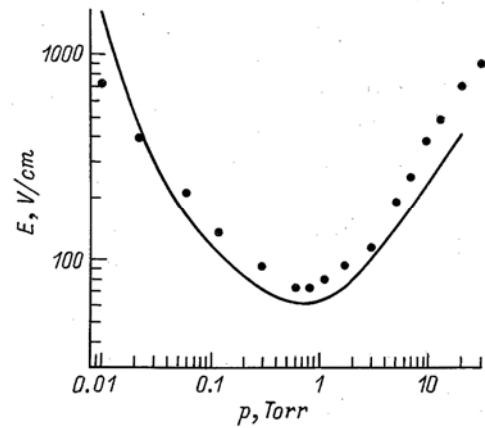
1

Радіус поперечного перерізу розрядної камери, модельованої у даній роботі, дорівнює 4,1 см, довжина – 12 см. Для системи, яка буде описуватись далі, дифузійна довжина за формулою (1) буде:

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2,4}{4,1}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{12}\right)^2}} = 1,56 \text{ см}$$



(а)



(б)

Рис. 10. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від тиску в системі  $p$  для водню (а) за частоти 3 ГГц (довжина системи 2,54 см, радіус 4,07 см) та кисню (б) за частоти 994 МГц (довжина системи 4,74 см, радіус 4 см).

Суцільна та штрихова лінії – теоретичні розрахунки за різними формулами, крапки – експеримент. Адаптовано з [65]

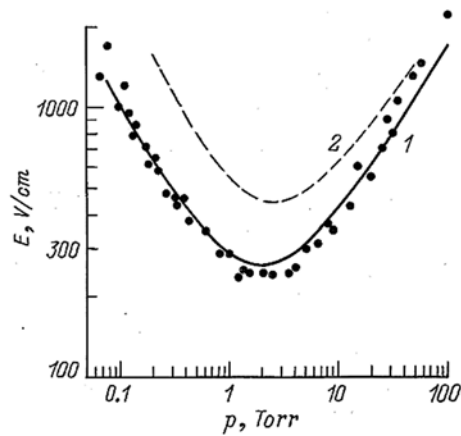


Рис. 11. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від тиску в системі  $p$  для ксенону за частоти 2,8 ГГц (довжина системи 0,318 см, радіус 3,67 см). Суцільна та штрихова лінії – теоретичні розрахунки за різними формулами, крапки – експеримент. Адаптовано з [65]

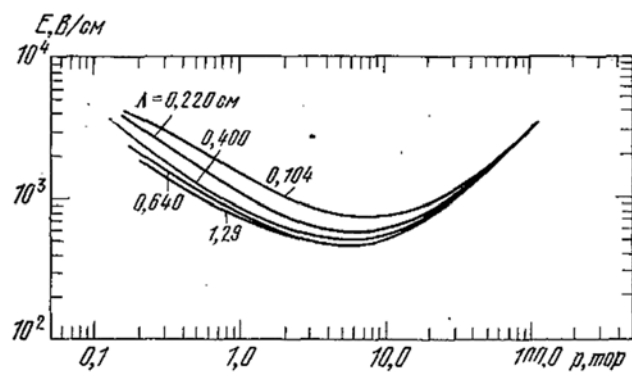


Рис. 12. Залежність напруженості електричного поля  $E$  від тиску в системі  $p$  для повітря за частоти 9,4 ГГц (дифузійні довжини вказані на рисунку біля кривих).

Адаптовано з [66]

Спосіб аналітичного визначення напруженості електричного поля, достатньої для виникнення газового розряду, був наведений у [67]. Хоча розрахунок дає тільки якісну інформацію, і його можна застосовувати тільки в навчальних цілях, але обмежуючись цією метою, був виконаний такий розрахунок і представлені порівняння результатів розрахунку і моделювання.

Для резонатора при тиску 1 Па, частоти 2,45 ГГц, температури 293 К та з газом аргон розрахунок буде наступним.

Рух електрона під дією змінного поля описується виразом:

$$F = eE = m \frac{\partial \vartheta}{\partial t},$$

звідки

$$\partial \vartheta = \frac{e}{m} E_0 \sin(\omega t) dt,$$

де  $e$  – заряд електрона,  $E$  – напруженість електричного поля,  $m$  – маса частинки (у конкретному випадку – електрона),  $\vartheta$  – швидкість руху частинки.

У кінці півперіода коливань (всі електрони моноенергетичні і рухаються в одному напрямку, але є стохастичний нагрів):

$$\vartheta = \frac{e}{m} E_0 \int \sin(\omega t) dt = 2 \frac{e E_0}{m \omega}$$

енергія електрона:

$$e\varphi_i = \frac{m\vartheta^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot 4 \left( \frac{e E_0}{m \omega} \right)^2$$

$\varphi_i$  – потенціал іонізації газу.

Звідси отримуємо:

$$E_0 = \sqrt{\frac{\varphi_i}{2 \frac{e}{m}}} \cdot \omega \quad 2$$

За потенціалу іонізації  $e\varphi_i = 15,7$  еВ:  $E_0 = 1,03$  кВ/см.

Потенціал іонізації плазми (рис. 13-15), можна отримати із експериментальних результатів перерізу зіткнень іонів  $Ar^+$  та електронів із атомами аргону [7]:

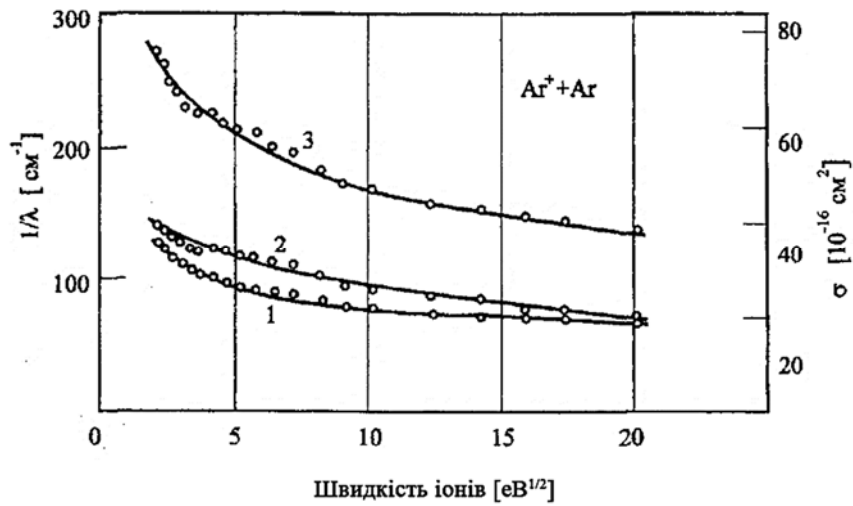


Рис. 13. Експериментальні дані перерізів зіткнень іонів аргону з атомами аргону. Адаптовано з [7, 61]. 1 – пружне розсіювання, 2 – резонансне перезарядження, 3 – загальний переріз. Величина  $\lambda$  приведена до тиску 133,3 Па (1 Торр) і температури 0°C

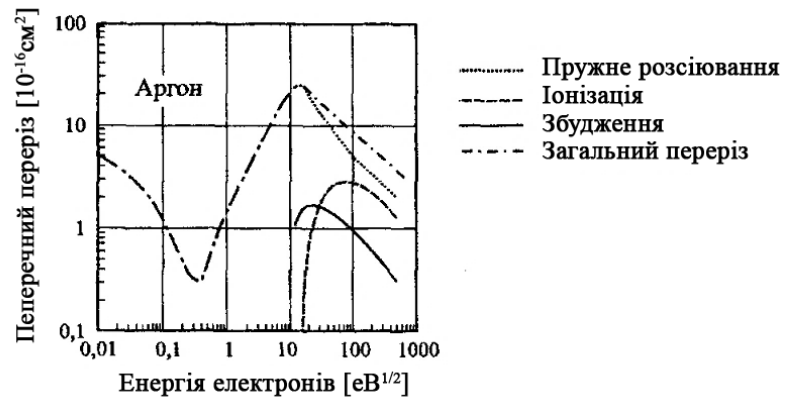


Рис. 14. Експериментальні значення перерізів зіткнень електронів з атомами аргону. Адаптовано з [7, 68]

З іншої сторони треба враховувати, що за півперіод електрон проходить шлях, рівний середній довжині вільного пробігу для іонізації [67], та приймаємо за довжину вільного пробігу  $\lambda_i$  газокінетичний переріз. Таким чином, довжина вільного пробігу електрона в газі:

$$\lambda_i = \frac{\sqrt{2}k_B T}{p\sigma^2},$$

де  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – константа Больцмана,  $p$  – тиск (Па),  $\sigma = 3,66 \cdot 10^{-10}$  м – діаметр молекули газу (аргону).

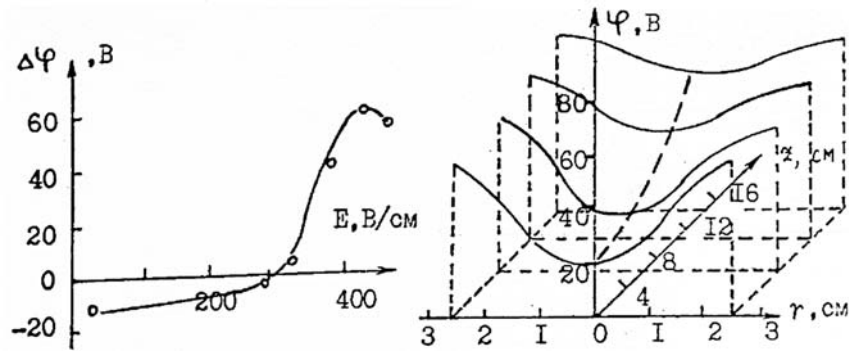


Рис. 15. Потенціал плазми  $\varphi$ ;  $\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_0$  – це різниця між максимальним значенням потенціалу в плазмі  $\varphi_M$  та значенням на осі осесиметричного циліндричного резонатора  $\varphi_0$  при напруженості поля у діапазоні  $0 \dots 300$  В/см. Адаптовано з [69]

За півперіод коливань потрібно, щоб електрон перемістився не більше, ніж на довжину вільного пробігу, щоб він набрав енергію, достатню для іонізації [67] газу (аргону).

Середня швидкість електрона за період:

$$\bar{v} = \frac{v}{2} = \frac{e \cdot E_0}{m \omega}$$

Час, рівний півпероду коливань:

$$\frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} = \frac{t}{2}$$

$$\frac{t}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{\pi}{\omega}$$

$$\frac{\bar{\lambda}}{\frac{e \cdot E_0}{m \omega}} = \frac{\pi}{\omega}$$

Звідси:

$$E_0 = \frac{\lambda \omega^2}{\pi} \frac{e}{m}$$

Інший метод розрахунку напруженості електричного поля у розрядній камері наведений у [70, 71] Довжина електромагнітної хвилі у відкритому просторі визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{c}{f_p},$$

де  $c=3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $f_p=2,45$  ГГц – резонансна частота.

Зв'язок довжин хвиль у хвилеводі  $\lambda_{\text{хв}}$ , відкритому просторі  $\lambda$  та критичної  $\lambda_{\text{кр}}$  визначається наступним виразом:

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2}}$$

Критична довжина хвилі основної моди (хвилі  $H_{11}$ ) для циліндричного хвилеводу радіусом  $R$ :

$$\lambda_{\text{кр}}(H_{11}) = 3,41 \cdot R$$

Якщо записати електромагнітну енергію  $W$ , що запасється у резонаторі, у вигляді [72]:

$$W = \frac{\epsilon_0 E_0^2 V}{2} = \frac{P Q_0}{\omega},$$

то середньоквадратична напруженість електричного поля навантаженого резонатора для того ж типу хвилі може визначатись за формулою [72, 73]:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2PQ_0}{\epsilon_0 V \omega}}$$

де  $P$  – потужність, що передається НВЧ магнетроном,  $Q_0$  – добротність резонатора,  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму ( $8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м),  $V$  – об'єм резонатора (для циліндричного резонатора  $V = \pi R^2 h$ , де  $h$  – висота резонатора або резонаторної області),  $\omega$  – циклічна частота.

При цьому, застосовуючи останню формулу, отримуємо, що при використанні в якості джерела електромагнітних коливань НВЧ магнетрон

середнього рівня потужності ( $\approx 650$  Вт), напруженість електричного поля в резонаторі (за добротності  $Q \approx 150$ ) складатиме величину  $E \approx 110$  В/см, що є близькою до мінімально необхідної для виникнення НВЧ розряду в резонаторі [64].

Оскільки електричне поле, що необхідне для пробою у молекулярному газі, залежить від сорту газу, тиску газу, розмірів камери, вихідної густини (первинних) електронів, частоти електромагнітного поля та ін., то результати розрахунків величини  $E_0$  по відношенню до збудження НВЧ плазми в обмеженому об'ємі несуть приблизний характер. Але отримані розрахункові данні у деякій мірі дають уявлення про величину НВЧ енергії, що необхідна для збудження НВЧ розряду низького вакууму. Тому для більш детального вивчення процесу плазмоутворення при НВЧ плазмохімічній обробці та у технології загалом необхідно проведення експериментальних досліджень електрофізичних характеристик НВЧ розряду [71].

## 2. ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПИС УСТАНОВОК ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЗОНАТОРНИХ НВЧ СИСТЕМ НИЗЬКОГО ТА ВИСОКОГО ТИСКІВ

### 2.1. Теорія електромагнітного поля

У діапазоні НВЧ опис фізичних явищ і структури електромагнітного поля у вимірювальних трактах і вимірюваних пристроях зводиться до рівнянь Максвелла або хвильових рівнянь, що впливають з них, при заданих координатах, параметрах границь досліджуваної області (граничних умовах) і параметрах середовища, що заповнює цю область [74].

Максвел сформулював основні рівняння електродинаміки, два з яких – шляхом узагальнення експериментальних законів повного струму і індукції. Він припустив, що змінне в часі електричне поле  $\vec{E}$ , наприклад, поле між обкладками конденсатора, здатне, подібно струму провідності, створювати магнітне поле  $\vec{H}$ . Для якісної оцінки цього ефекту Максвелом введено поняття густини струму зміщення  $\vec{J}_{zm}$ , яка визначається з наступного рівняння:

$$\vec{J}_{zm} = \partial \vec{D} / \partial t = \epsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t + \partial \vec{P} / \partial t = \epsilon_a \partial \vec{E} / \partial t$$

де  $\vec{D}$  – індукція електричного поля,  $\vec{P}$  – поляризованість середовища.

Густина струму зміщення  $\vec{J}_{zm}$  у даному рівнянні складається з двох частин: перша ( $\epsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$ ) відповідає тільки зміні електричного поля  $\vec{E}$  (струм зміщення у вакуумі), друга ( $\partial \vec{P} / \partial t$ ) обумовлюється рухом пов'язаних в атомах зарядів у результаті їхньої поляризації змінним струмом (поляризаційний струм).

Таким чином, розглядаючи середовище, у якому може поширюватись електромагнітна енергія, Максвел прийшов до висновку, що густина повного струму, що створюється змінним електричним полем, у цьому середовищі повинна включати у себе і густину струму провідності  $\vec{J}_{np}$ , і густину струму зміщення  $\vec{J}_{zm}$  [74]:

$$\vec{J} = \vec{J}_{np} + \vec{J}_{zm}$$

Узагальнюючи закон повного струму і використовуючи даний висновок, Максвел сформулював своє перше рівняння, яке для гармонічних коливань матиме вигляд [74-76]:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J}_{np} + \vec{J}_{zm} = \sigma\vec{E} + i\omega\epsilon_a\vec{E} = i\omega\epsilon_{ka}\vec{E}$$

а у декартовій системі координат переписеться у систему [77]:

$$\begin{aligned} \partial H_z / \partial y + \gamma_1 H_y &= i\omega\epsilon_{ka} E_x \\ -\gamma_1 H_x - \partial H_z / \partial x &= i\omega\epsilon_{ka} E_y \\ \partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y &= i\omega\epsilon_{ka} E_z \end{aligned}$$

де  $\vec{H}$  – напруженість магнітного поля,  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля,  $\epsilon_{ka} = \epsilon_a - i\sigma/\omega$  – комплексна діелектрична проникність середовища,  $\epsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність,  $\sigma$  – об'ємна питома провідність середовища,  $\gamma_1$  – коефіцієнт поширення [75].

Із рівняння Максвела випливає, що в деякій точці простору існує змінне електричне поле, що створює струми провідності та зміщення, то в околі цієї точки виникає змінне вихрове магнітне поле, що створюється цими струмами. За вектором електричного поля можна визначити створюване ним магнітне поле за правилом "правого гвинта", як показано на рис. 16.

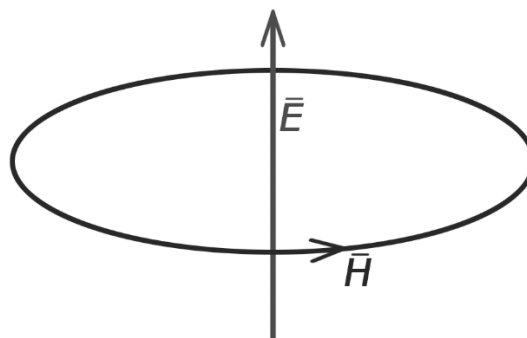


Рис. 16. Визначення вектора магнітного поля за допомогою вектора електричного поля

Узагальнюючи закон індукції, Максвел припустив, що будь-яка зміна магнітного поля у часі викликає (незалежно від параметрів середовища) появу

електричного поля, і сформулював наступне рівняння, яке для гармонічних коливань записується у вигляді [74-77]:

$$\text{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t = -i\omega\mu_a\vec{H}$$

а в декартовій системі координат:

$$\partial E_z / \partial y + \gamma_1 E_y = -i\omega\mu_a H_x$$

$$-\gamma_1 E_x - \partial E_z / \partial x = -i\omega\mu_a H_y$$

$$\partial E_y / \partial x - \partial E_x / \partial y = -i\omega\mu_a H_z$$

де  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля,  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність.

Друге рівняння Максвелла стверджує: якщо у деякій точці простору існує змінне магнітне поле, то в околі цієї точки виникає змінне вихрове електричне поле. Визначити напрямок вектора електричного поля на базі магнітного можливо за допомогою правила "лівого гвинта", як показано на рис. 17:

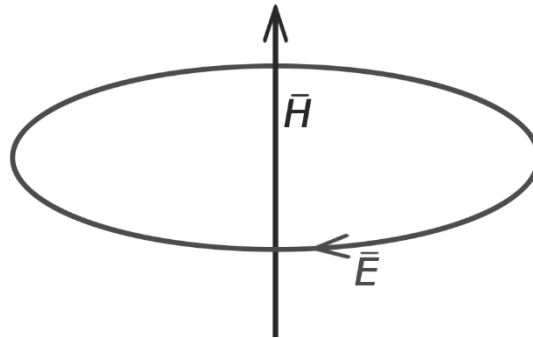


Рис. 17. Визначення вектора електричного поля за допомогою вектора магнітного поля

Для опису та визначення характеристик електромагнітного поля (поширення хвиль у середовищі або просторі) частіше користуються однорідними хвильовими рівняннями [76], які витікають з рівнянь Максвелла та мають наступний вигляд:

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \text{ де } k \text{ – хвильове число.}$$

Матеріальні рівняння характеризують вплив середовища на електромагнітні процеси, що протікають у ньому, та записуються у вигляді [74]:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon_a \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \vec{B} / \mu_a = \vec{B} / (\mu_0 \mu) \\ \vec{J}_{np} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}$$

де  $\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність,  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнітна проникність вакууму,  $\mu = \mu_a / \mu_0$  – відносна магнітна проникність.

## 2.2. Граничні умови

Граничні умови визначають зв'язок між значеннями векторів електромагнітного поля біля поверхні розподілу двох середовищ. У випадку гармонічних коливань можна обмежитись співвідношеннями, що визначають зв'язок між комплексними амплітудами тангенціальних складових векторів напруженості електричного  $\vec{E}_\tau$  та магнітного  $\vec{H}_\tau$  полів. Граничні умови біля поверхні розподілу двох діелектриків [74, 77]:

$$\vec{E}_{1\tau} = \vec{E}_{2\tau}, \quad \vec{H}_{1\tau} = \vec{H}_{2\tau}$$

а на границі діелектрик/провідник (за умови, що поле у провіднику нехтовно мале):

$$\vec{E}_{0\tau} = 0; \quad \vec{H}_{1\tau} = \vec{J}_s$$

де  $\vec{J}_s$  – поверхнева густина струму.

Тангенціальні складові векторів напруженості електричного та магнітного полів на границі розподілу двох діелектричних середовищ неперервні [74]. На поверхні ідеального провідника тангенціальна складова вектора напруженості електричного поля  $\vec{E}_{1\tau}$  рівна нулю, а тангенціальна складова вектора напруженості магнітного поля  $\vec{H}_{1\tau}$  по величині рівна густині поверхневого струму і напрямлена перпендикулярно напрямку  $\vec{J}_s$ .

Структура електромагнітного поля – це зображення форми, напрямку и розподілу силових ліній електричної та магнітної складових поля у НВЧ пристрої для певного моменту часу. Якщо хвиля поширюється, наприклад у напрямку осі  $z$ , то складові полів змінюватимуться за законом [76]:

$$E_z(x, y, z) = E_z(x, y)e^{-\gamma_1 z}; H_z(x, y, z) = H_z(x, y)e^{-\gamma_1 z}$$

Останнє рівняння описує біжну хвилю, яка є електромагнітною хвилею, що поширюється у лінії передачі у певному напрямку (додатних значень осі  $z$ ). Відповідно біжна хвиля – це хвиля, що поширюється від генератора до навантаження, та називається падною хвилею. При цьому, якщо навантаження не узгоджене за опором, то може з'являтися відбита від навантаження хвиля, що буде поширюватись у зворотному напрямку.

Розв'язанням хвильових рівнянь у декартовій системі координат для складових поля, напрямлених вздовж осі поширення, будуть наступні співвідношення:

$$E_z(x, y, z) = [E_1 \sin(\gamma_{2x}x) + E_2 \cos(\gamma_{2x}x)][E_3 \sin(\gamma_{2y}y) + E_4 \cos(\gamma_{2y}y)]e^{-\gamma_1 z}$$

$$H_z(x, y, z) = [H_1 \sin(\gamma_{2x}x) + H_2 \cos(\gamma_{2x}x)][H_3 \sin(\gamma_{2y}y) + H_4 \cos(\gamma_{2y}y)]e^{-\gamma_1 z}$$

Використовуючи ці рівняння, тепер можна визначити поперечні складові поля, застосувавши рівняння Максвелла, записані у декартовій системі координат [76, 78]:

$$E_x = (-i/\gamma_2^2)(\omega\mu_a \partial H_z / \partial y + \gamma_1 \partial E_z / \partial x)$$

$$E_y = (i/\gamma_2^2)(\omega\mu_a \partial H_z / \partial x - \gamma_1 \partial E_z / \partial y)$$

$$H_x = (i/\gamma_2^2)(\omega\varepsilon_a \partial E_z / \partial y - \gamma_1 \partial H_z / \partial x)$$

$$H_y = (-i/\gamma_2^2)(\omega\varepsilon_a \partial E_z / \partial x + \gamma_1 \partial H_z / \partial y)$$

де  $\gamma_2 = \sqrt{\gamma_1^2 + k^2} = \sqrt{\gamma_{2x}^2 + \gamma_{2y}^2}$  – поперечний коефіцієнт поширення,  $k = \omega\sqrt{\mu_a \varepsilon_{ka}}$  – хвильове число,  $\gamma_{2x}$  і  $\gamma_{2y}$  – поперечні хвильові числа,  $E_1, E_2, E_3,$

$E_4, H_1, H_2, H_3, H_4$  – константи електромагнітного поля, які визначаються за допомогою граничних та початкових умов.

На базі останніх рівнянь видно, що у площині поперечного перерізу лінії передачі складові електромагнітного поля змінюються за синусоїдальними та косинусоїдальними законами. При цьому константи  $\gamma_{2x}$  і  $\gamma_{2y}$  визначають зміну поля у площині поперечного перерізу, структуру поля, тип хвилі ( $E, H, T$  і т.д.).

$\gamma_1 = \alpha + i\beta$  – це коефіцієнт поширення, комплексна величина, що визначає зміну амплітуди та фази хвилі при її поширенні вздовж передавальної системи.

Для хвиль  $E$  та  $H$  типів складові хвилі  $E_z$  та  $H_z$  не дорівнюють нулю,  $\gamma_2$  не дорівнює нулю, а коефіцієнт поширення буде визначатись наступним чином:

$$\gamma_1 = \sqrt{\gamma_2^2 - k^2}$$

Критична довжина хвилі  $\lambda_{кр}$  характеризує максимальну довжину хвилі збуджувальних електромагнітних коливань, що здатні поширюватись у заданій конструкції передавальної лінії при певній структурі електромагнітного поля. Для хвиль  $E$  та  $H$  типів значення  $\gamma_1$  залежить від  $\gamma_2$ . Так, у випадку, коли  $\gamma_2 > k$ ,  $\gamma_1$  – дійсне число, і хвилі у напрямку поширення (осі  $z$ ) значно затухають. Якщо ж  $\gamma_2 < k$ , то  $\gamma_1$  – уявне число, відповідно хвиля поширюється без затухання. У випадку, коли  $\gamma_2 = k$ ,  $\gamma_1$  – рівне нулю, критичний режим.

Отже, хвилі  $E$  та  $H$  типів у передавальній лінії при заданій структурі можуть поширюватись лише за тих частот, для яких виконується умова:

$$\gamma_2 \leq \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = 2\pi f_{кр} \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$$

де  $f_{кр}$  – це критична (мінімальна) частота електромагнітних коливань, здатних поширюватись у передавальній лінії із повітряним наповненням. Цій частоті відповідає критична довжина хвилі [75, 76]:

$$\lambda_{кр} = 2\pi/\gamma_2 = c/f_{кр} \approx 3 \cdot 10^8 / f_{кр}$$

Якщо ж передавальна лінія заповнена діелектриком з  $\epsilon > 1$  і  $\mu > 1$ , тоді критична частота зменшиться на  $\sqrt{\mu\epsilon}$ , а довжина хвилі відповідно збільшиться на  $\sqrt{\mu\epsilon}$ .

У більшості випадків, досліджуючи НВЧ систему у цілому, не обов'язково враховувати усі деталі явищ всередині НВЧ пристроїв або в їхніх елементах, а достатньо знати лише реакцію НВЧ пристрою на вплив сигналів. В однорідній передавальній лінії енергія від генератора до навантаження передається у вигляді хвиль струму та напруги (тобто електромагнітних хвиль), які описуються наступними співвідношеннями:

$$U = U_0 e^{-\gamma_1 z} \text{ – для напруги;}$$

$$I = I_0 e^{-\gamma_1 z} \text{ – для струму.}$$

де  $U_0$  та  $I_0$  – це амплітудні значення напруги та струму (значення на початку передавальної лінії).

При цьому у вимірювальних трактах присутні хвилі, які поширюються не лише від генератора до навантаження (падна хвиля), а також і у зворотному напрямку (відбита хвиля). При короткому замкненні, холостому ході або навантаженні кінця передавальної лінії на реактивний (що не поглинає енергію) опір амплітуди падної та відбитої хвиль будуть рівними:

$$U_{mпад} = U_{mвідб} = U_m, \quad I_{mпад} = I_{mвідб} = I_m$$

У результаті інтерференції таких хвиль утворюється стійна хвиля напруги та струму. Якщо ж у передавальній лінії присутні неоднорідності, що відбивають чи поглинають частину енергії, тоді відбиті хвилі будуть мати

відмінну від падних хвиль амплітуду. У результаті при синусоїдальному вхідному сигналі будуть спостерігатись не нульові та амплітудні значення струму або напруги, а мінімальні та максимальні значення. Такі хвилі прийнято оцінювати за допомогою коефіцієнта відбиття за напругою, що представляє собою відношення комплексних амплітуд напруг (або напруженостей електричного поля) відбитої та падної хвиль у певному перерізі передавальної лінії [76, 79]:

$$\Gamma_{\kappa} = \Gamma e^{i\varphi} = \frac{U_{\text{відб}}}{U_{\text{над}}}$$

Зрозуміло, що значення цього коефіцієнта буде різним в залежності від місця передавальної лінії, в якому будуть вимірюватись значення амплітуд падної та відбитої хвиль. Тому частіше користуються коефіцієнтом стійкої хвилі за напругою (КСХН), який пов'язаний із коефіцієнтом відбиття наступним чином [76, 79]:

$$K_{\text{cmU}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{U_{\text{над}} + U_{\text{відб}}}{U_{\text{над}} - U_{\text{відб}}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}}$$

Також зручно користуватись коефіцієнтом ослаблення, який вимірюється у децибелах, та дозволяє оцінити відношення потужностей сигналу, одна з яких надходить від генератора сигналу, а друга вимірюється на виході передавальної лінії [76]:

$$L = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}} \right)$$

### 2.3. Підхід до моделювання

В роботі досліджуються два типи резонансних НВЧ систем: низького та високого тисків. У моделюванні обох систем є спорідненість у типі хвилі, який генерується у них. Якщо умовно зобразити картину електричного поля для НВЧ резонатора високого тиску робочого газу та НВЧ резонатора низького тиску робочого газу, то буде результат, представлений на рис. 18.

Але відмінною особливістю обох систем є, крім роботи за різних тисків, принцип обробки енергії, що надходить від НВЧ генератора: НВЧ резонатор, розрахований для роботи за високих тисків, отримує енергію із зовнішнього електромагнітного поля та концентрує у певній області – зазорі, а НВЧ резонатор, розрахований для роботи за низьких тисків, отримує енергію від умовно точкового джерела НВЧ (генератора НВЧ потужності) та формує поле у просторі (обсязі) хвилеводу.



Рис. 18. Картина електричного поля для НВЧ резонатора високого тиску (а) та НВЧ резонатора низького тиску (б) робочого газу (у площинах поперечного перерізу резонатора типу "розрізане кільце" та розрядно-камерного типу відповідно)

Не дивлячись, що моделювання хвилеводно-резонаторної НВЧ системи виконувалось в холодному (допробійному) електричному режимі, все ж варто було оцінити кількість частинок та їх енергію, що утворюватимуться у розрядній камері під дією НВЧ, бо вплив таких енергетичних частинок може здійснюватись на конструктивні елементи системи: стінки камери, вихідну сітку або вікно, – які проектуються. Дослідження є корисними і для технології нанесення покриттів на вироби в оптичній та електронній промисловостях, а також в техніці генерації пучків різних частинок, у тому числі нейтральних частинок. Так, у технологічних процесах взаємодії іонів з мішенню найбільш часто застосовують іонне розпилення твердої мішені, як джерела матеріалу для покриття. Для цього на мішень направляють прискорені іони (зазвичай використовують іони аргону  $Ar^+$ ), що генеруються в плазмі газового розряду, створюваного поблизу мішені, або в спеціальному пристрої – іонній гарматі

[7, 16, 80, 81]. Оскільки оптичні покриття, як правило, являють собою сполуки кремнію і металів з киснем або азотом [81], їх вводять в атмосферу технологічних камер для отримання покриттів відповідного стехіометричного складу. Тому мішень може бомбардуватись не тільки іонами  $Ar^+$ , але й іонами  $O_2^+$  ( $O^+$ ),  $N_2^+$  ( $N^+$ ). Іноді тільки ці іони (без  $Ar^+$ ) використовують для розпилення, щоб виключити проникнення аргону в покриття. Ці частинки досліджувались при моделюванні процесів нейтралізації іонів на стінках розрядної камери. Конструктивно ця частина роботи є доповненням попереднього етапу моделювання (див. рис. 50), коли після розрядної камери НВЧ резонатора розрядно-камерного типу розташовується нейтралізатор іонів, які під різними кутами проходячи крізь нейтралізатор на виходу утворюють пучок нейтральних частинок. Цей пристрій не достатньо вивчений у літературі, тому стане непоганим доповненням для аналізу: впливу на конструктивні елементи резонатора, так і для областей технології, де є корисним отримання і робота із пучками нейтральних частинок (наприклад, для обробки широкозонних напівпровідників та діелектриків).

## **2.4. Схеми установок для проведення експериментів**

Оскільки в роботі досліджуються дві системи НВЧ генераторів плазми: низького та високого тисків, відповідно і стенди для проведення вимірювань відрізняються один від одного. Спершу буде розглянутий стенд для проведення експерименту для НВЧ генератора плазми, який розроблений для роботи за низьких тисків. Він може працювати як незалежний пристрій, так і у складі інших установок в якості асистувального елемента, зокрема магнетронної розпилювальної системи (МРС).

### **2.4.1. Схеми дослідної установки для проведення експериментів з НВЧ резонатором низького тиску робочого газу**

#### Основні теоретичні положення

Дослідження НВЧ генератора плазми (активатора газу), який є резонатором низького тиску, проводились у складі МРС.

Схема роботи МРС із плоскою мішенню представлена на рис. 19.

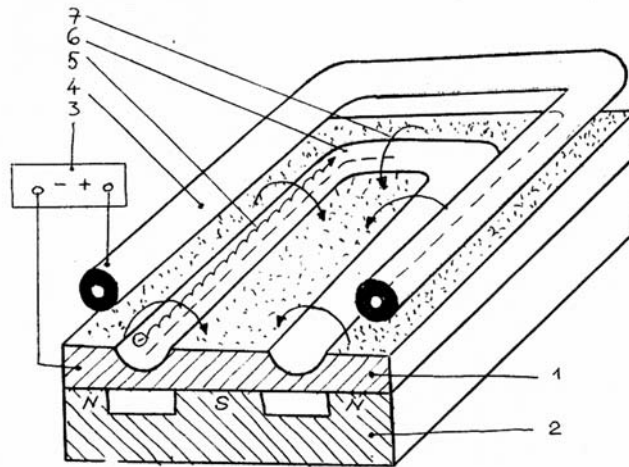


Рис. 19. Схема магнетронної розпилювальної системи із плоскою мішенню:  
 1 – мішень-катод; 2 – система постійних магнітів; 3 – джерело живлення;  
 4 – анод; 5 – траєкторія руху електронів; 6 – зона інтенсивного розпилення;  
 7 – силові лінії магнітного поля. Адаптовано з [82].

При ввімкненні напруги між катодом і анодом при тиску робочого газу порядку 0.3 Па запалюється тліючий розряд. Іони з розряду, бомбардуючи катод, викликають емісію електронів. Прискорюючись електричним полем ці електрони підтримують розряд, і, під впливом поперечного магнітного поля, рухаються по складних циклоїдних траєкторіях [82]. При цьому електрони потрапляють ніби у пастку: з одного боку, магнітне поле повертає їх на катод, а з іншого – поверхня катода їх відштовхує. Тривала циркуляція електронів сприяє посиленню процесу іонізації, концентрація іонів у поверхні катода росте. Плазма концентрується в області магнітного поля безпосередньо в мішені. Розроблений НВЧ резонатор розрядно-камерного типу при застосуванні в якості активатора газу дозволяє зменшити тиск робочого газу МРС, разом з тим полегшити і пришвидшити запалювання тліючого розряду завдяки виникненню первинного потоку іонів, який бере участь у процесі іонізації у системі МРС. В результаті, інтенсивність бомбардування мішені іонами із плазми в такій конструкції і, отже, швидкість розпилення катода й нанесення плівок значно збільшуються.

Технічні дані [82].

Вакуумна установка УВН-2 призначена для відпрацювання технології наплення тонких плівок [82]. Розроблений НВЧ резонатор розрядно-камерного типу розташовується у області навпроти МРС (див. рис. 20, № 20).

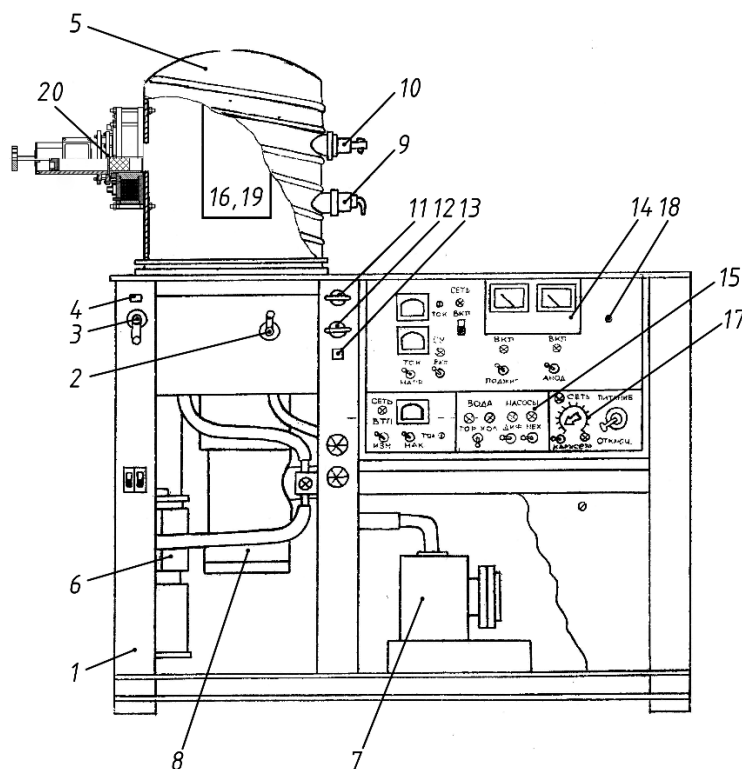


Рис. 20. НВЧ резонатор розрядно-камерного типу у складі вакуумної установки УВН-2. Адаптовано з [82]

Технічні параметри вакуумної установки УВН-2 [82].

1. Гранично допустимий тиск в робочій камері з використанням азотної пастки –  $10^{-6}$  мм.рт.ст.
2. Швидкість відкачування робочого об'єму при тиску  $2 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. 700 л/сек.
3. Живлення установки здійснюється 3-х фазним струмом від 4-х провідної лінії (з нульовим проводом) частотою 50 Гц, напругою 380 В.
4. Електрична потужність, споживана установкою при сталому режимі, не більше 7,2 кВт.

5. Мінімальна витрата холодної води – 400 л/година.

6. Габаритні розміри:

а. довжина × ширина × висота, мм – 1550×1050×1950;

б. підйом ковпака – 650 мм.

7. Вага установки – 700 кг.

Установка (рис. 20) складається з [82] металевого корпусу 1, що має знімні бічні, передні й задні щити. На передній панелі знаходиться рукоятка керування вакуумним затвором 2 і органи керування гідروприводом 3 і 4 і підйомом ковпака 5.

Вакуумний ковпак 5 виконаний з нержавіючої сталі, має два оглядових вікна діаметром 150 мм. Підймання й опускання ковпака здійснюється гідроприводом 6 [82].

Вакуумна система складається з обертального насоса ВН-6-2Н (7), паромасляного високовакуумного насоса Н-2Т (8), клапанної коробки для перемикання механічного насоса, високовакуумного насоса, системи натікачів 9, 10 для напуску повітря й інших газів у ковпак, трубопроводів і охолоджуваної пастки [82].

Рукоятки клапанної коробки 11, 12 виведені на середню стійку каркаса. При витягуванні верхньої рукоятки 11 механічний насос відкачує робочий обсяг ковпака, при витягуванні нижньої рукоятки 12 відкачується порожнина паромасляного насоса [82].

Вентиль–натікач 9 (голчастий), укріплений на ковпаку, дозволяє підтримувати заданий ступінь вакууму в діапазоні  $10^{-1}$  -  $10^{-5}$  мм.рт.ст. Натікач (грубий) 10 призначений для напуску атмосфери під ковпак. Електромагнітний вентиль-натікач відкриває напуск атмосфери в трубопровід обертального вакуумного насоса й може використатися для напуску повітря у високовакуумний насос при висунутій рукоятці 12 [82].

Вимірювання вакууму в підковпаковій частині здійснюється за допомогою приладу ВІТ-2 (14). Похибка вимірювання по аналоговому виходу сягає не

більше 7%. На лівій стійці закріплені органи керування вакуумною установкою 15. У підковпаковій частині також перебуває підкладкотримач і карусель 16, органи керування якої перебувають унизу стійки керування 17. У середині стійки керування розташований блок живлення 18 для магнетрона 19. В установці використовується магнетрон 19 із прямокутним катодоміщенню [82]. Магнетрон 19 закріплений вертикально – на стінці ковпака 5, де також монтується НВЧ резонатор розрядно-камерного типу 20, який розробляється та досліджується.

#### Блок живлення

Блок живлення складається з 3-х частин: катодного вузла живлення, вузла живлення анода й системи підпалу [82].

Катодний вузол працює наступним способом: за допомогою системи керування й семістора відбувається плавне регулювання струму в первинній обмотці трансформатора. Згладжування пульсацій здійснюється за допомогою RC-ланцюга і дроселя. Вихідна напруга – 400...1000 В при струмі 2...10 А [82].

Анодний вузол створює напруга зміщення на аноді (50...100 В) щодо корпусу установки.

Система підпалу призначена для запалювання розряду магнетрона. Вона складається з підвищувального трансформатора, діодного випрямляча й RC-ланцюга фільтра. Вихідна напруга системи підпалу 1,5 кВ. Також використовується діод для розв'язки катодного вузла живлення й системи підпалу [82].

#### **2.4.2. Поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм**

Рис. 21 та рис. 22 представляють схему поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм. Пристрій містить два розпилювальні магнетрони (М1 і М2), на які одночасно або по чергово подаються напруги від двох силових джерел живлення (ДЖ1 і ДЖ2); живлення може бути на постійному струмі або змінній напрузі в

кілогерцевому (22-880 кГц) або мегагерцевому (13,56 МГц) діапазонах. Джерела живлення керуються за допомогою блоку СК, який забезпечує задану послідовність і тривалість включення окремих магнетронів для нанесення покриттів з різною структурою (багатошарових, градієнтних і т.д.).

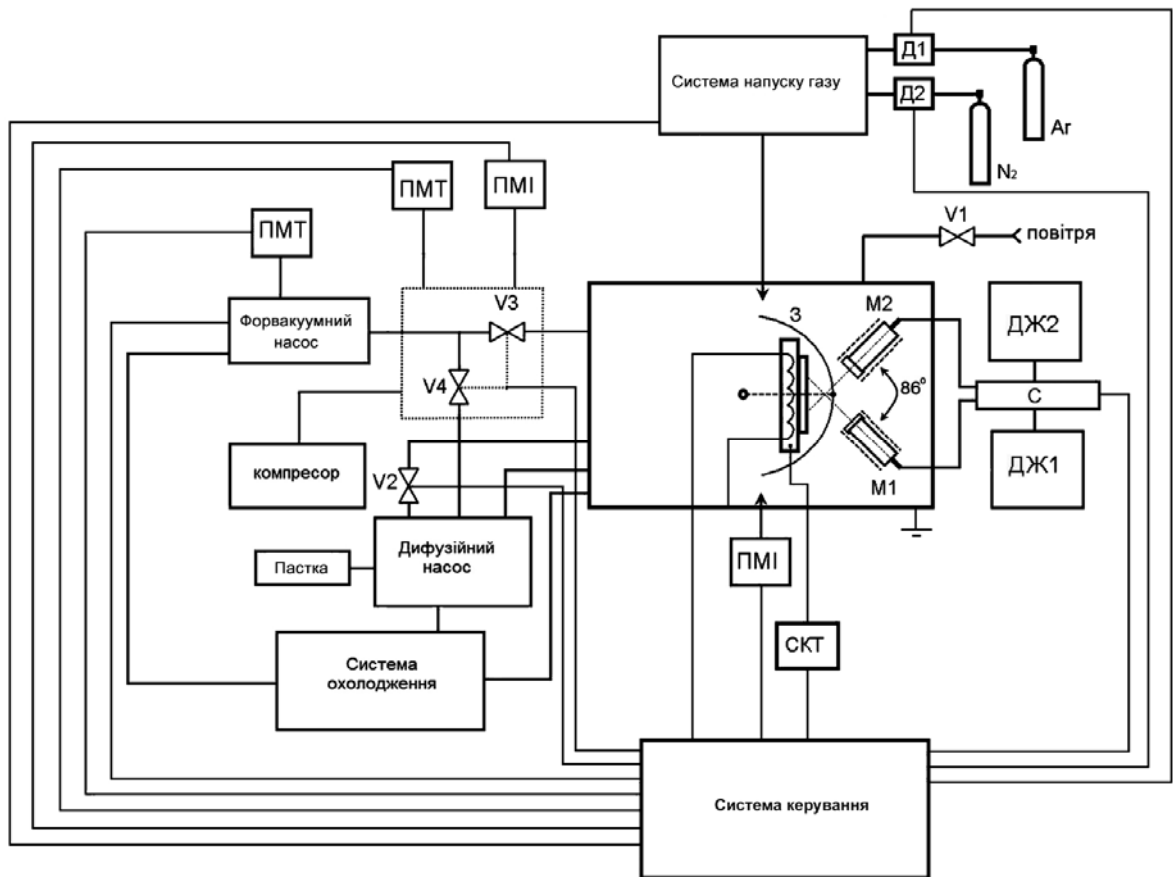


Рис. 21. Схема поєднання НВЧ активатора реакційного газу з подвійно-магнетронним розпилювальним пристроєм. Загальна схема. З – заслінки; ДЖ1, ДЖ2 – джерела живлення магнетронів; М1, М2 – розпилювальні магнетрони (мішені показані товстою лінією); С – спектровізор; Д1 та Д2 – регулятори напуску газів; ПМТ – перетворювач манометричний тепловий; ПМІ – перетворювач манометричний іонізаційний; СКТ – система контролю температури; V1- V4 – вентилі.

Активатор розташований над магнетронною системою; через його вихідну сітку (показана штрих-пунктирною лінією) активований кисень подається в область підкладки П (див. рис. 22). Для переривання потоків розпилених частинок з мішеней магнетронів на підкладку і в період їх тренування

використовуються заслінки 31 і 32 (на рис. 22 заслінки показані в закритому стані). Проводяться 10-15 дослідів із 5 хвилинними інтервалами часу між кожним. Для поточного та фінального контролю оптичних параметрів покриття використовується спектровізор С.

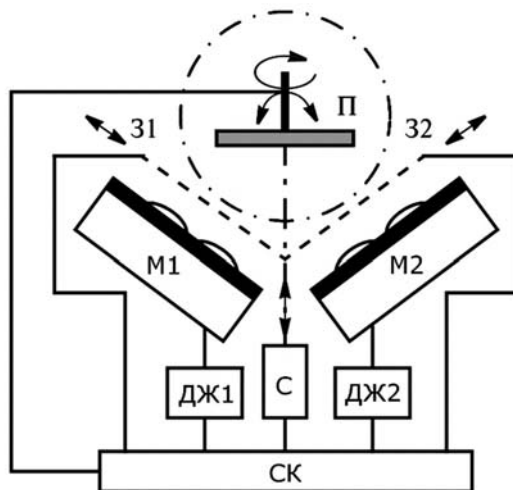


Рис. 22. Схема поєднання НВЧ активатора реакційного газу з подвійно-магнетронним розпилювальним пристроєм. Збільшений фрагмент місця розташування розробленого НВЧ активатора. 31, 32 – заслінки; П – підкладка; СК – програмована система керування. Розташування вихідної сітки активатора газу показано штрих-пунктирною лінією (положення перпендикулярне до площини рисунку). Магнітні силові лінії магнетронів показані над мішенями суцільними лініями

Для оцінки параметрів нанесених покриттів використовувався пристрій KLA Tencor MicroXAM-1200. Він об'єднує фазозміщувальну технологію інтерферометра і оптичний мікроскоп, що дозволяє проводити безконтактні 3D вимірювання поверхневої шорсткості з субнанометровою роздільною здатністю [83]. Основні параметри вимірювального пристрою наведені у табл. 1.

Механічний привід підкладки забезпечує її обертання навколо власної осі і погойдування щодо вертикальної осі для поліпшення однорідності покриття, що наноситься по товщині, а також установа підкладки паралельно

площині одного або іншого магнетрона. Кругові стрілки на рис. 22 показують можливі напрямки руху підкладки.

Таблиця 1. Параметри приладу KLA Tencor MicroXAM-1200 [83]

<b>Вимірювальні характеристики</b>	
Відтворюваність вимірювання вертикальної сходинки (мін)	1 нм
Похибка вимірювань	<0,1%
Вертикальний діапазон сканування	10 мкм
Швидкість вертикального сканування	до 7,2 мкм/с
Площа огляду	82×62 мкм – 5,3×4,0 мм
<b>Характеристики обладнання</b>	
Роздільна здатність відеокамери	720×480
Діапазон переміщення предметного столика	100×100 мм
Діапазон відхилення зонда	±7°
Привід обертання відеокамери	
Збільшення об'єктивів	50×; 20×; 10×; 5×; 2,5×

Мікропроцесорна програмована система керування СК управляє електричним живленням магнетронів і НВЧ активатора газу, заслінками перед мішенями, електроприводом підкладки, а також аналізує інформацію, що отримується від спектровізора і коригує роботу розпилювальної системи.

#### **2.4.3. Дослідна установка для визначення резонансної частоти НВЧ резонатора високого тиску робочого газу**

Перед проведенням експериментальних досліджень у складі плазмохімічної установки були виміряні характеристики коефіцієнта зворотних втрат резонатора типу "розрізане кільце". Дослідження проводились на панорамному вимірювачі, до складу якого входить індикатор

КСХН та ослаблення "Я2Р-67". Зовнішній вигляд дослідного стану представлений на рис. 23.

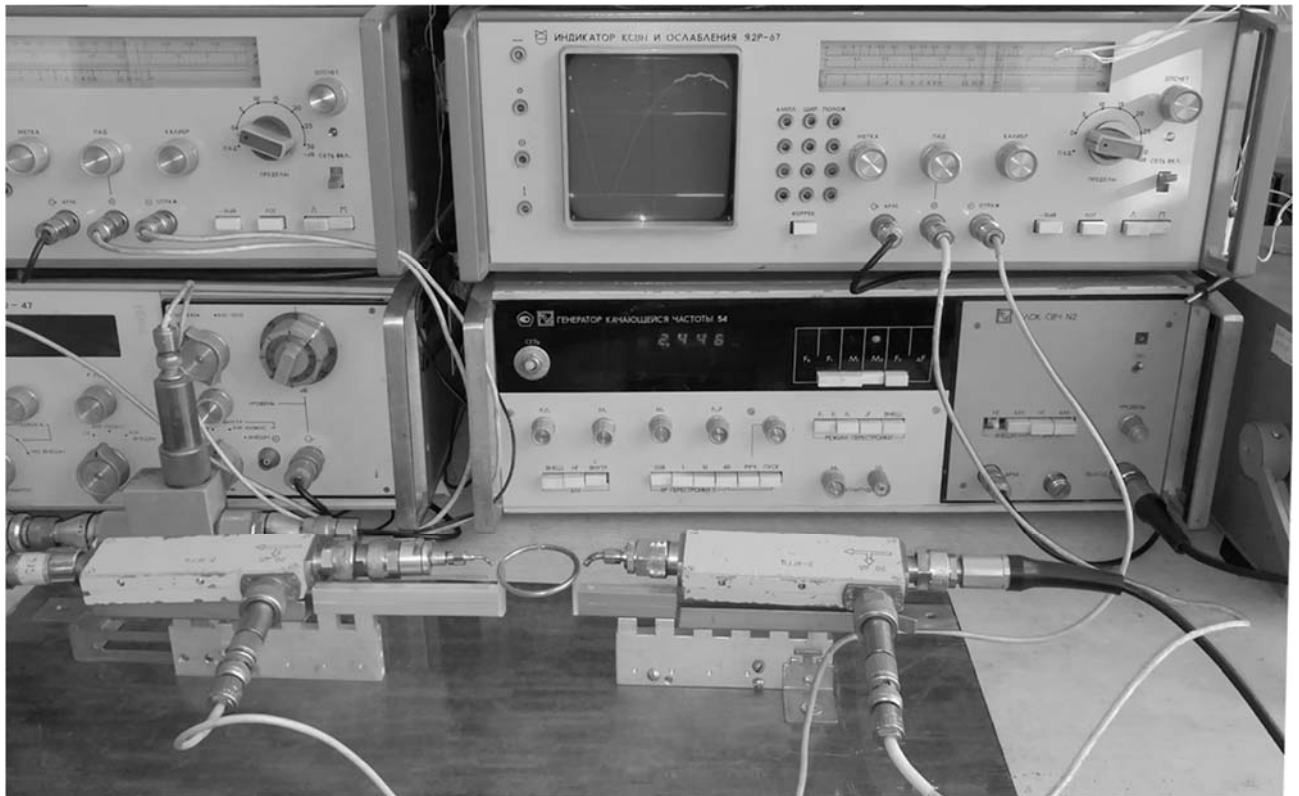


Рис. 23. Лабораторний стенд для досліджень резонаторів типу "розрізане кільце"

Методика вимірювань частотних характеристик коефіцієнта стійкої хвилі за напругою (КСХН) пристроїв за допомогою панорамного вимірювача

Панорамний вимірювач призначений для вимірювання та зображення на екрані електронно-променевої трубки (ЕПТ) частотних характеристик КСХН (далі у формулах –  $K_{cmU}$ ), а також визначення зворотних втрат та втрат на прохід елементів резонаторних трактів.

Робота вимірювача базується на принципі рефлектометра – розділеного виділення сигналів, пропорційно потужності, що надходить від генератора, і відбитої від досліджуваного НВЧ пристрою (у режимі КСХ) хвилі. Сигнали знімаються з детекторних голівок, тому рівень напруги пропорційний квадрату коефіцієнта відбиття, але шкали індикатора враховують це і проградуєвані відповідно КСХ.

Рівень напруги на виході детекторної голівки направленою відгалужувача падної хвилі підтримується постійною системою автоматичного регулювання потужності (АРП) генератора.

Нерівномірність рівня калібрування при вимірюванні и при визначенні похибки вимірювань КСХН і ослаблення досягається не більше  $\pm 0,3$  дБ (табл. 2).

Таблиця 2. Діапазон вимірювання КСХН ( $K_{cmU}$ ), ослаблення ( $A$ ) та формули для визначення граничних значень похибок вимірювання

Діапазон вимірювань	КСХН		1,05÷5,00	
	Ослаблення, дБ		0÷35	
Границі допустимих похибок вимірювань	$\delta K_{cmU}$ , %	на фіксованій частоті	$K_{cmU} \leq 2,0$	$\pm 4K_{cmU}$
			$K_{cmU}$ 2,0÷5,0	$\frac{\pm 4K_{cmU}}{100 - (\pm 4K_{cmU}) \frac{K_{cmU}}{K_{cmU} + 1}} 100$

(продовження табл. 2 див. на наступній сторінці)

(початок табл. 2 див. на попередній сторінці)

		у діапазоні частот	$K_{cmU} \leq 2,0$	$\pm 5K_{cmU}$
			$K_{cmU}$ $2,0 \div 5,0$	$\frac{\pm 5K_{cmU}}{100 - (\pm 5K_{cmU}) \frac{K_{cmU}}{K_{cmU} + 1}} 100$
	$\Delta A,$ дБ	на фіксованій частоті	$\pm (0,05A_x + 0,3)$	
		у діапазоні частот	$\pm (0,05A_x + 0,3)$	

Зовнішній вигляд панорамного вимірювача разом з генератором хитної частоти (ГХЧ) у діапазоні 2-4 ГГц представлений на рис. 24.

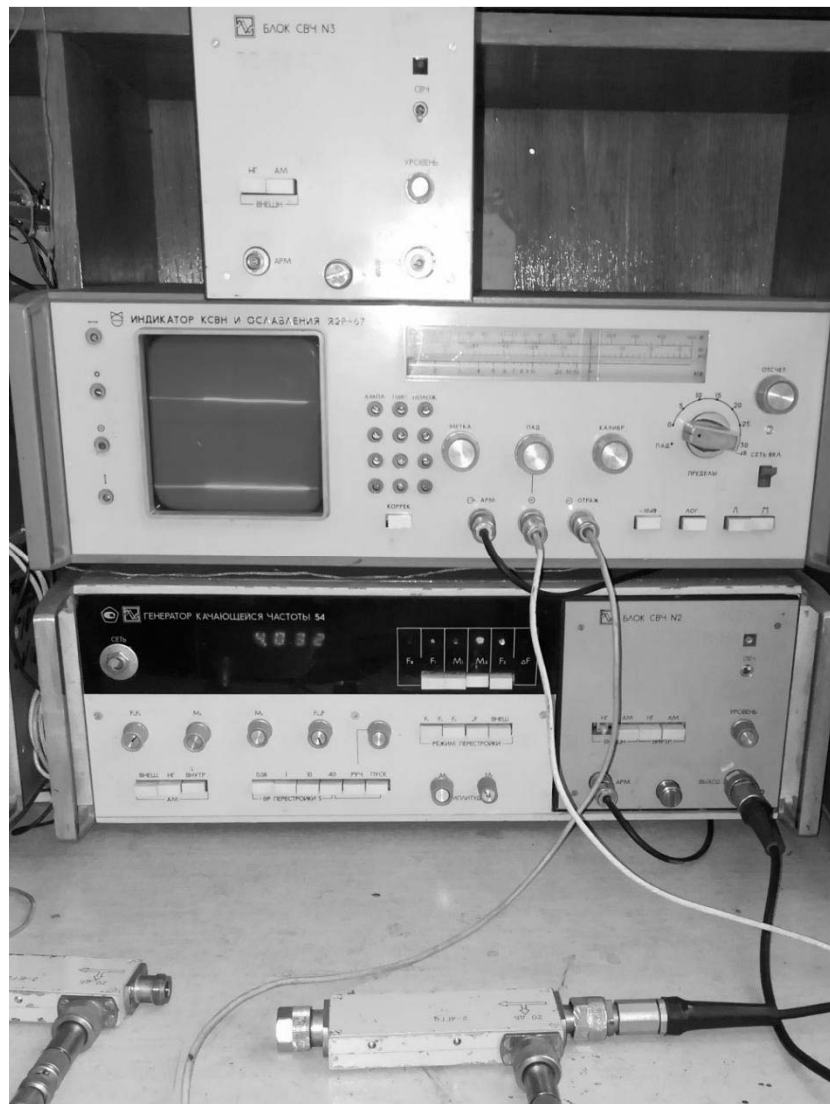


Рис. 24. Зовнішній вигляд панорамного вимірювача разом з генератором хитної частоти у діапазоні 2-4 ГГц

Генератор хитної частоти, індикатор та НВЧ вузли з'єднуються відповідно до режиму роботи стенду: схема для калібрування – на рис. 25, вимірювання КСХН – на рис. 26, вимірювання ослаблення – на рис. 27.

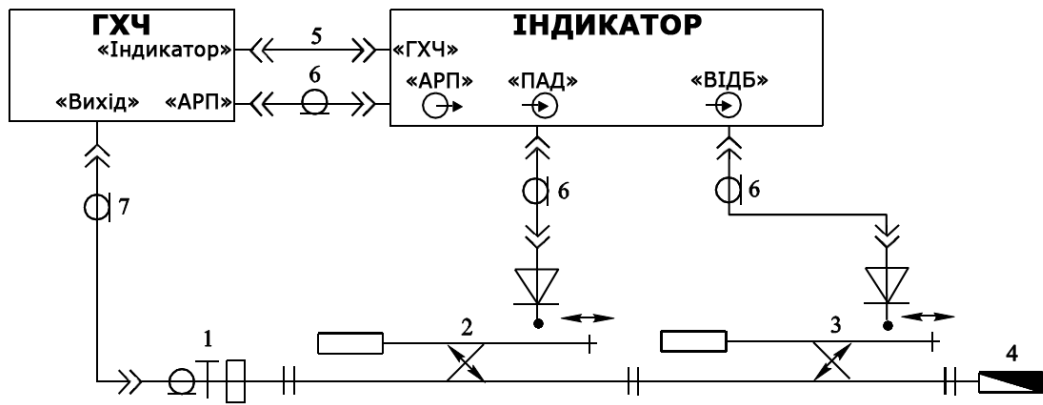


Рис. 25. Схема з'єднань панорамного вимірювача для виконання калібрування

Цифри відповідають елементам електричної схеми:

- 1 – коаксіально-хвильоводний перехід;
- 2 – детектор направлений "Падна хвиля";
- 3 – детектор направлений "Відбита хвиля";
- 4 – узгоджене навантаження "УН";
- 5 – кабель;
- 6,7 – коаксіальний НВЧ кабель.

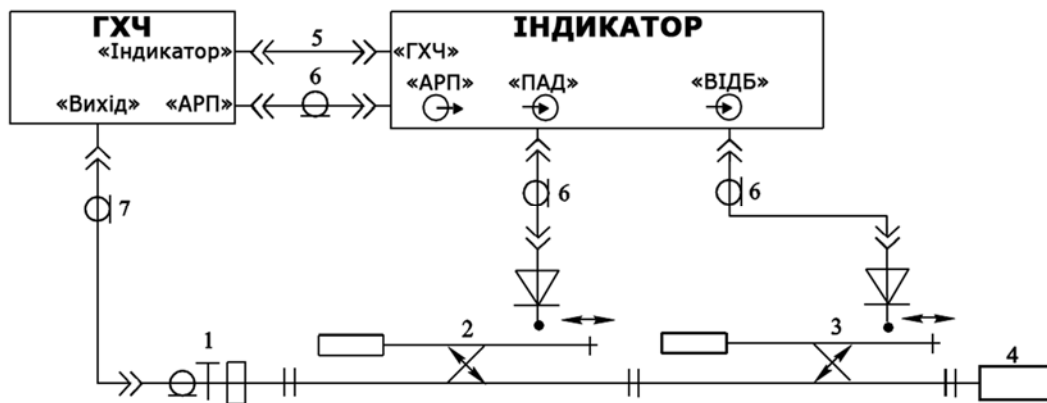


Рис. 26. Схема панорамного вимірювача в режимі "вимірювання КСХН"  
(4 – досліджуваний об'єкт)

Після калібрування стенду збирається схема (рис. 27) для вимірювань ослаблення дослідних резонаторів.





поглинач енергії 12. Для вимірювання параметрів електромагнітного поля в камері використовуються частотомір 13 і індикатор НВЧ потужності 14.

Для запобігання перегріву металевих деталей реактора й гумового ущільнення використовується проточне водяне охолодження. Крім того, для захисту гуми від впливу газового розряду ущільнення розміщене в глибокій вузькій щілині (фіксаторній канавці 15), відстань між стінками канавки і скляного ковпака становить 1 мм.

Для відключення насоса від реактора передбачений вентиль 16.

Система керування роботою вакуумного насоса також містить: реле контролю фаз типу ЕЛ-10; автоматичний вимикач АЕ-2026; електромагнітний пускач ПМЛ; теплове реле РТЛ; електромагнітний натікач 17 для напуску повітря в насос після його вимикання. Органи керування роботою установки розміщені на передній панелі. Крім того, там же розташовані світлові індикатори, що показують правильність фазування мережі живлення, ввімкнення насоса й водяного охолодження [82].

Для керування роботою НВЧ камери використовуються елементи, розташовані на її передній панелі: кнопки ввімкнення печі й підсвічування в робочій камері, реле часу [82].

Конструктивно лабораторна установка складається з [82] настільного блоку, що містить НВЧ камеру "Електроніку" з системою керування, і вакуумного насоса, розміщеного під лабораторним столом.

На рис. 29 показаний зовнішній вигляд плазмохімічної установки [82], де: А – ручка дверцят робочої камери; Б – кнопка ввімкнення магнетрона; В – кнопка ввімкнення підсвічування камери; Г – мережевий автоматичний вимикач; Д – індикація ввімкнення мережі; Е – попереджувальне табло; З – табло, що сигналізує про порушення мережі живлення; Ж – табло, що сигналізує про припинення подачі води; И – кнопка ввімкнення насоса; К – кнопка вимикання насоса й ввімкнення електромагнітного натікача для напуску повітря в насос; Л – регулятор напуску газу в реактор; М – рукоятка вентиля "Швидкість відкачки"; Н – реле часу.

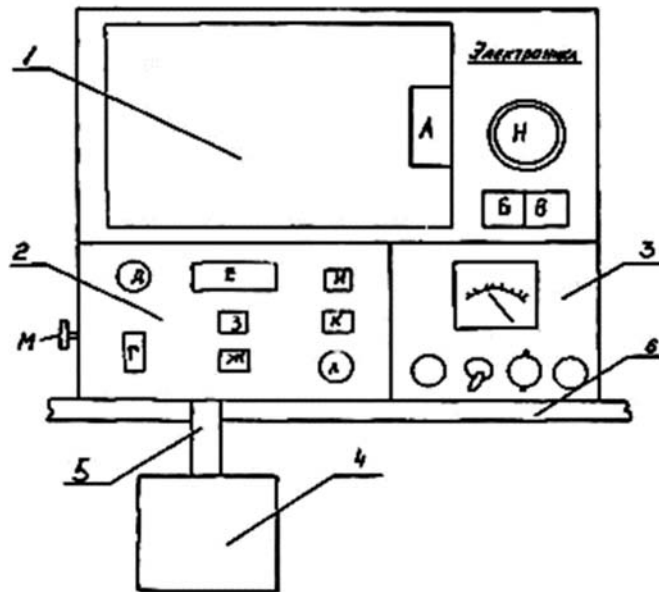


Рис. 29. Плазмохімічна установка: 1 – піч "Електроніка"; 2 – блок керування й захисту; 3 – блок виміру тиску ВДГ-1; 4 – вакуумний насос; 5 – вакуумопровід, 6 – стіл установки. Адаптовано з [82]

У плазмохімічній установці встановлюється резонатор типу "розрізане кільце". При поданні газу аргон у розрядну камеру, де знаходиться досліджуваний резонатор, та увімкненні НВЧ живлення візуально оцінюється наявність розряду та генерації плазми.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАТОРНИХ СИСТЕМ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ ДЛЯ ВИСОКОГО ТИСКУ РОБОЧОГО ГАЗУ

#### 3.1. Моделювання резонаторів

Метою досліджень резонаторів для роботи за високих тисків була їх розробка для подальшого застосування із генераторами НВЧ потужності, які працюють на частоті 2,45 ГГц. Як зазначалось у попередніх розділах, такі генератори не складно придбати, оскільки на ринку присутня значна кількість промислових аналогів різних виробників, також вони працюють у частотному діапазоні, який не потребує спеціальної сертифікації, і наявність готових рішень газорозрядних камер дозволяє їх застосовувати із подальшою модифікацією в експериментальних дослідженнях.

Експериментальні дослідження проводились на кафедральному обладнанні – панорамному вимірювачі із генератором змінної (хитної) частоти від 2 до 4 ГГц. Технічні характеристики та опис експериментального стенду наводяться у попередньому розділі. Для підготовки дослідних зразків для проведення експериментальних досліджень попередньо були розраховані розміри резонаторів типу "розрізане кільце" (їх довжини  $l_{рез}$ ) для 11 значень резонансних частот  $f_{рез}$  в інтервалі 2-4 ГГц, результати представлені у табл. 3:

Таблиця 3. Розрахунок довжин резонаторів типу "розрізане кільце" для резонансних частот в інтервалі 2-4 ГГц

$f_{рез}$ , ГГц	2	2,2	2,45	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4
$l_{рез}$ , см	15	13,64	12,24	11,54	10,71	10	9,38	8,82	8,33	7,89	7,5
$R$ , мм	23,9	21,7	19,5	18,4	17,0	15,9	14,9	14,0	13,3	12,6	11,9

Розрахунки проводились за відомими формулами для резонаторів порядку довжини хвилі [20-22]:

$$l_{рез} = c / f_{рез}$$

$$R = l_{рез} / 2 \pi$$

де  $c$  – швидкість світла  $3 \cdot 10^8$  м/с,  $R$  – радіус кільцевого резонатора,  $\pi$  – константа 3,14. Кільце з розрізом у даному випадку можна розглядати як двопровідну лінію, яка закорочена на вході та навантажена на ємність зазору на виході.

Шляхом фізико-математичного моделювання [84] в інтервалі частот  $f$  від 0 до 6 ГГц були перевірені розрахунки довжин резонаторів  $l_{\text{рез}}$ , які відповідають певним резонансним частотам  $f_{\text{рез}}$ , та виявлені незначні відхилення  $f_{\text{рез}}$  від цільових значень, наведених у табл. 3. Взявши за вихідні значення радіуси кільця із табл. 3, були визначені резонансні частоти  $f_{\text{рез}}$  по мінімальним значенням параметра зворотних втрат.

Параметри матеріалу [85, 86]:

алюміній;

електрична провідність  $3,56-3,79 \cdot 10^7$  См/м;

густина  $2,6989$  г/см<sup>3</sup>;

температура плавлення  $933,5$  К;

термічне розширення при температурі  $293$  К становить  $23 \cdot 10^{-6}$  і практично лінійно зростає, сягаючи до  $37,3 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> при температурі  $900$  К;

теплопровідність в твердому стані знижується з ростом температури від  $237$  Вт/(м·К) при  $298$  К до  $208$  Вт/(м·К) при  $933,5$  К.

Результати моделювання зворотних втрат в залежності від частоти для кожного резонатора типу "розрізане кільце" разом із їх зовнішнім виглядом представлені на рис. 30:

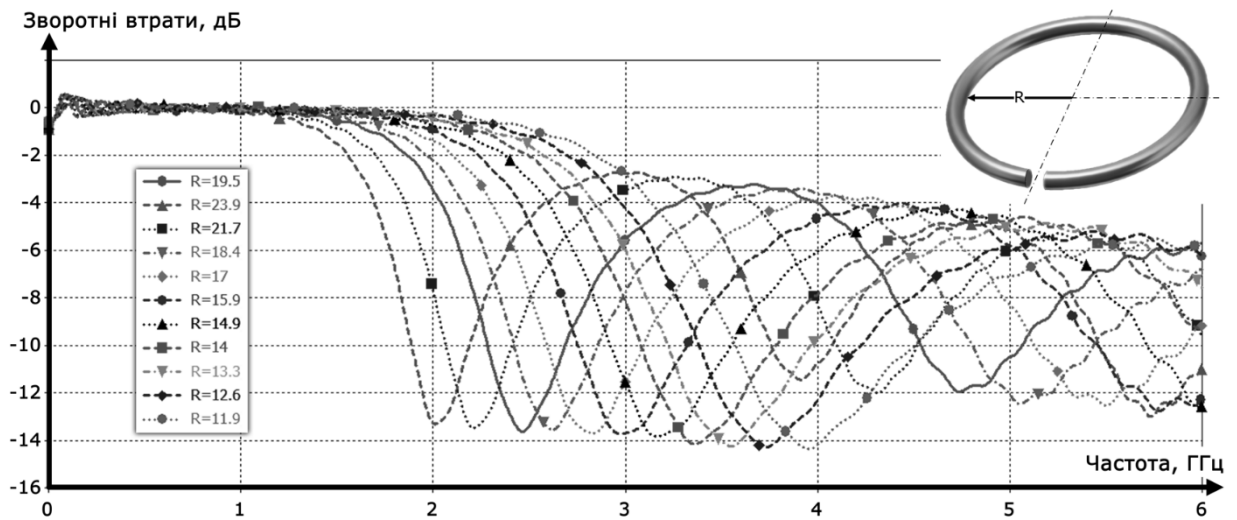


Рис. 30. Сімейство кривих параметра зворотних втрат резонаторів в інтервалі частот 0-6 ГГц (діаметр провідника та зазор 2 мм, матеріал – алюміній)

На рисунку бачимо незначний зсув резонансних частот на 8-74 МГц (в залежності від резонатора), оскільки розраховані значення табл. 3 не враховують ємнісний зазор кільцевого резонатора 2 мм та діаметр провідника 2 мм. Значення резонансних частот, отриманих шляхом моделювання, та розрахована похибка наведені у табл. 4.

Таблиця 4. Значення резонансних частот, отриманих за допомогою моделювання, та розрахована відносна похибка результатів

$f_{рез}, ГГц$	2,01	2,208	2,466	2,622	2,832	2,976	3,162	3,36	3,552	3,726	3,954
$\delta f_{рез}, \%$	0,12	0,09	0,16	0,21	0,28	0,20	0,30	0,30	0,34	0,49	0,29

Таким чином, похибка знаходиться у діапазоні від 0,09 до 0,49 %.

Похибка розраховувалась за формулою [87]:

$$\delta = (A - B) / (A + B) / 2 \cdot 100\%$$

де  $A - f_{рез}$  із табл. 3, а  $B - f_{рез}$  із таблиці 4 відповідно.

Завдяки комп'ютерному моделюванню вдалось перерахувати розміри резонаторів для відповідних значень резонансних частот із табл. 3, урахувавши зазори резонаторів та зменшивши похибки на округлення. Сімейство кривих параметра зворотних втрат, за якими визначались

резонансні частоти резонаторів типу "розрізане кільце", представлені на рис. 31, а значення резонансних частот і відповідно внутрішні радіуси кілець резонаторів зведені у табл. 5.

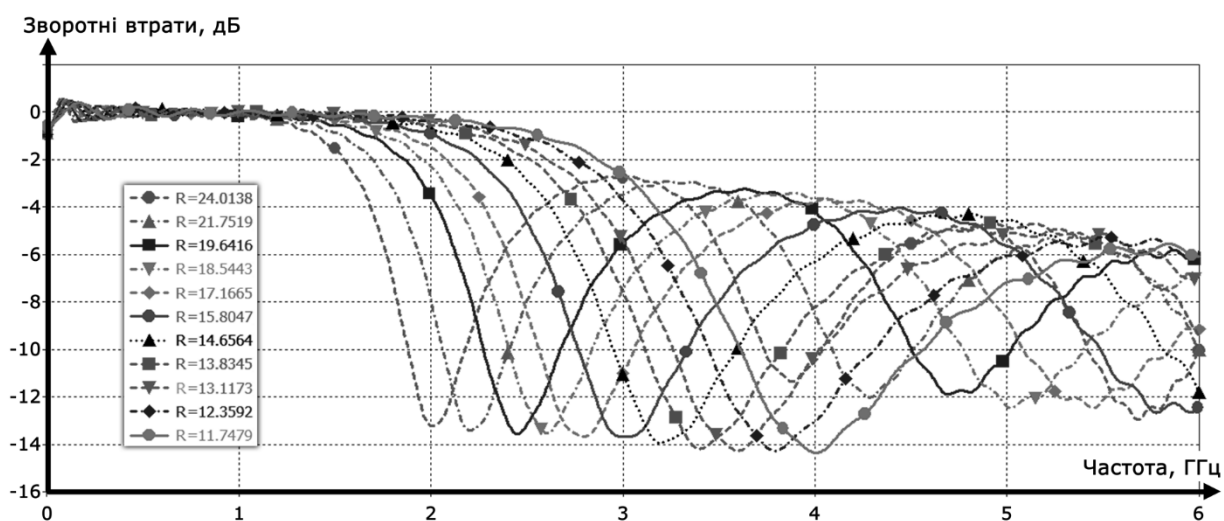


Рис. 31. Сімейство кривих параметра зворотних втрат, за якими визначались резонансні частоти резонаторів типу "розрізане кільце" (діаметр провідника та зазор 2 мм, матеріал – алюміній)

Таблиця 5. Значення резонансних частот та відповідні внутрішні радіуси кілець резонаторів

$f_{рез}$ , ГГц	2	2,2	2,45	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4
$R$ , мм	24,01	21,75	19,64	18,54	17,17	15,80	14,66	13,83	13,12	12,36	11,75

Таблиця 6. Радіуси кілець резонаторів з урахуванням діаметра провідника та розрахована відносна похибка результатів

$R_{табл. 3}$ , мм	23,9	21,7	19,5	18,4	17,0	15,9	14,9	14,0	13,3	12,6	11,9
$R_{табл. 5}$ , мм	25,01	22,75	20,64	19,54	18,17	16,8	15,66	14,83	14,12	13,36	12,75
$\delta f_{рез}$ , %	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,4	1,2	1,4	1,5	1,5	1,7

Оскільки початкові аналітичні розрахунки не врахували товщину (діаметр) провідника, з якого виготовлятиметься резонатор, тобто радіуси кілець вимірювались від центра кільця до центра провідника, а моделювання вже

враховувало і товщину провідника 2 мм, і ємнісний зазор 2 мм, то у табл. 6 для порівняння результатів аналітичного розрахунку та моделювання зведені вихідні дані радіусів кілець, отриманих обома методами, та представлена відносна похибка.

У результаті завдяки комп'ютерному моделюванню вдалось отримати розміри резонаторів (наведеним у табл. 5), які відповідають точним вихідним значенням резонансних частот  $f_{рез}$ . Отримані результати лягли в основу наступного експерименту.

### **3.2. Проведення експериментів на панорамному вимірювачі. Визначення резонансних частот**

Виготовивши 11 резонаторів згідно розмірів отриманих в результаті моделювання (див. табл. 5), на панорамному вимірювачі були перевірені резонансні частоти дослідних зразків. (У даному експерименті не важливе значення ослаблення, важливе саме значення резонансної частоти, яка в подальшому буде робочою і повинна відповідати фіксованій частоті НВЧ генератора.) Виявилось, що, крім похибки оператора, діелектричний матеріал тримачів (АБС пластик, діелектрична проникність 5 [88]) додатково впливав на резонансну частоту (зсув спостерігався маже на 50-100 МГц в залежності від резонатора, див. рис. 32, на якому позначений зсув у 50 МГц в сторону пониження частоти).

Це можна пояснити, оскільки у формулу для розрахунку резонансної частоти входить ефективна діелектрична проникність  $\epsilon_{эф}$ , яка залежить від діелектричної проникності матеріалу, на якому знаходиться резонатор [89]:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{эф}LC}};$$
$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_{эф}LC}},$$

діелектрична проникність знаходиться у знаменнику, тобто коли вона більше 1, то викликає зменшення частоти. Це і було отримано в результаті експерименту. Частоти не збігались із розрахованими.

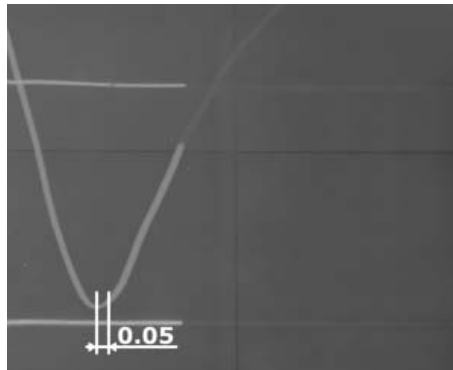


Рис. 32. Осцилограма параметра зворотних втрат в залежності від частоти для резонатора, сконструйованого на 2,45 ГГц (по осі абсцис початок координат 2 ГГц, кінець – 4 ГГц). На рисунку показаний мінімальний зсув резонансної частоти на 50 МГц від розрахованої (максимальний – 100 МГц для резонатора з іншою резонансною частотою, на осцилограмі не показаний)

Тому, вдосконаливши дослідний стенд, зменшивши вплив діелектричної проникності на результати вимірювань (замінений пластик на більш радіопрозорий матеріал – фторопласт-4 (діелектрична проникність 1,9 [90]), зменшена площа дотику діелектрика з поверхнею резонатора), були проведені дослідження повторно. Результати представлені на рис. 33:

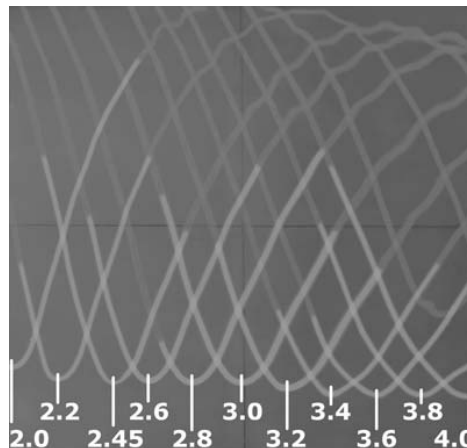


Рис. 33. Осцилограма сімейства характеристик параметра зворотних втрат (вісь ординат), виміряна на панорамному вимірювачі. По осі абсцис – частота. Резонансні частоти (у ГГц) відмічені на кожній кривій.

Осцилограми з розгорткою по частоті відносяться зліва направо до радіусів кілець, наведених у табл. 5 (резонансна частота показана на осцилограмі на кожній кривій)

Як видно із сімейства характеристик коефіцієнта зворотних втрат (див. рис. 33; дане сімейство характеристик вдалось отримати у результаті серії знімків осцилограм різних резонаторів, які потім були суміщенні одне з одним, утворивши єдину картину; резонансні частоти позначені для кожної кривої внизу рис. 33), резонансні частоти співпадають із результатами моделювання (див. табл. 5). Максимальне відхилення при визначенні резонансної частоти становить 30 МГц (мінімальне 10 МГц), воно викликане точністю виготовлення резонаторів та точністю вимірювань і обробки результатів.

Звідси відразу можна зробити ряд висновків:

1. З метою мініатюризації систем на базі кільцевих резонаторів достатньо ввести до їх складу діелектрик, який понизить резонансну частоту, необхідну для роботи системи.
2. Результати фізико-математичного моделювання та уточнення результатів попередніх розрахунків вкрай необхідні та корисні в інженерній практиці, оскільки дозволяють зменшити кількість факторів, які можуть вплинути на розбіжність результатів моделювання та експерименту, залишивши тільки людський фактор (який виражається у виготовленні зразків, налаштуванні стенду, проведенні вимірювань...).
3. Важливо та правильно проводити аналіз проведених експериментів, не обмежуючись лише поставленими цілями, оскільки отримані висновки можуть наштовхнути на подальші дослідження, відкриття та вдосконалених об'єктів.

Із досліджених зразків був узятий один резонатор (розрахований на частоту 2,45 ГГц) для проведення наступного експерименту.

### **3.3. Проведення експериментів із резонатором типу "розрізане кільце" у газорозрядній НВЧ камері**

Не так давно стало відомо, що резонатори типу "розрізане кільце", або їх комбінації можуть застосовуватись для генерації плазми [24, 91-93]. В основу даного дослідження було покладено перевірити, чи достатня напруженість

електричного поля виникатиме у зазорі резонатора (ємнісній частині) для генерації плазми. Перш, ніж почати розрахунок напруженості електричного поля, один дослідний зразок був розміщений у газорозрядній камері, схема установки та опис якої наводився у попередньому розділі. Результати експерименту зображені на рис. 34

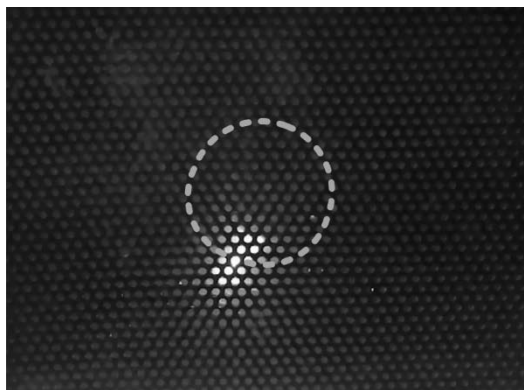


Рис. 34. Фотографія, що ілюструє результат генерації плазми НВЧ розряду кільцевим резонатором (штрихова лінія), який розміщений у центрі камери дослідної НВЧ установки вертикально до вихідної сітки

На фото видно, що він, дійсно, резонує на частоті 2,45 ГГц та за його допомогою можливо отримати плазму НВЧ розряду. Але яка напруженість поля виникає в зазорі (те, що вона достатня для генерації плазми при використанні джерела потужністю НВЧ 860 Вт, перевірено та видно з рис. 34), і чи, можливо, буде достатньо застосовувати НВЧ джерело меншої потужності? Для відповіді на ці запитання необхідно було вдатись до фізико-топологічного тривимірного моделювання. Також було перевірено реакцію резонатора типу "розрізане кільце" на напрямок вектора магнітного поля, який збуджує коливання у ньому. Результати моделювання при проходженні хвилі із вектором магнітного поля, який пронизує площину кільця по нормалі та проходить по дотичній до неї, представлені на рис. 35 а і б, та розрахунок напруженості електричного поля у зазорі резонатора в залежності від потужності магнетрона – джерела НВЧ живлення – представлений на рис. 36.

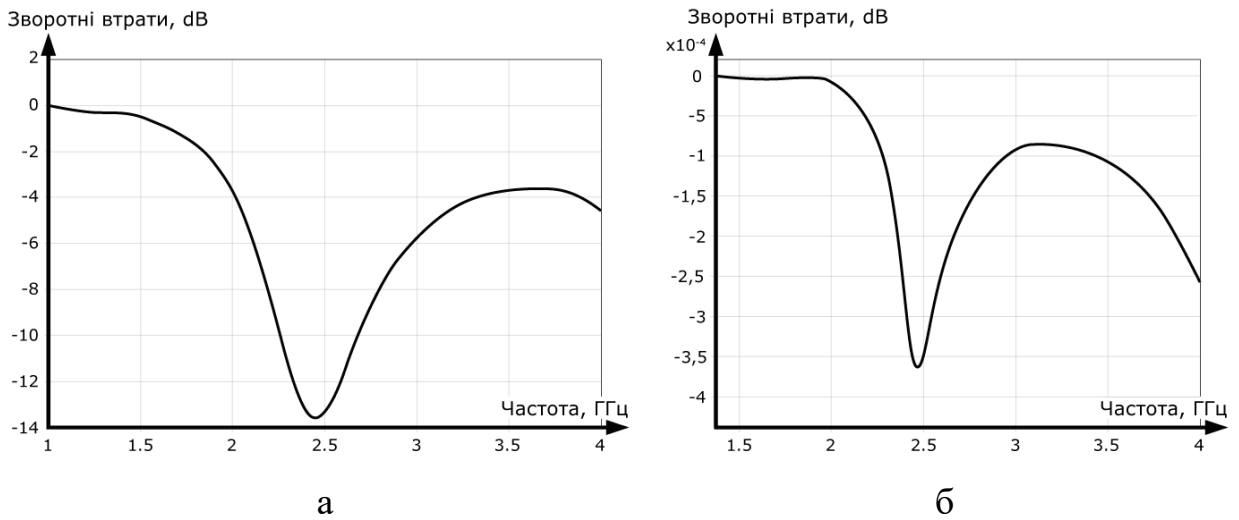


Рис. 35. Результати моделювання реакції резонатора типу "розрізане кільце" на напрямок вектора збуджувального магнітного поля (а – нормальне падіння, б – по дотичній до площини резонатора)

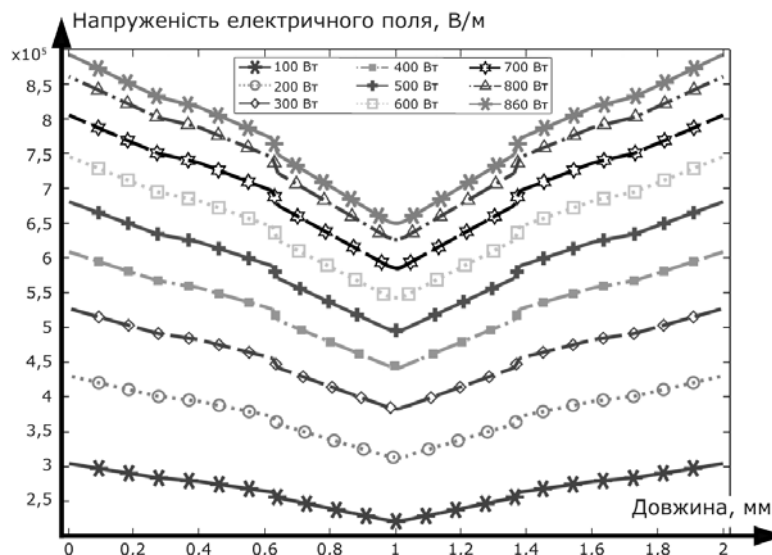


Рис. 36. Розрахунок напруженості електричного поля у зазорі резонатора типу "розрізане кільце" в залежності від потужності джерела НВЧ коливань

Із результатів моделювання отримано:

1. Максимальний вплив від зовнішнього електромагнітного поля на резонатор типу "розрізане кільце" (реакція резонатора на вектор магнітної складової поля) видно при нормальному проходженні магнітного поля крізь площину кільця (що підтверджується теорією про

рамкові антени, які використовувались/ються в якості пеленгаторів електромагнітної енергії).

2. Впливає з попереднього, в газорозрядній камері (або в іншій системі) поширюються хвилі, вектор магнітного поля яких не обов'язково може перетинати площину резонатора по нормалі до кільця. Чи не варто створити резонаторну систему на базі резонатора типу "розрізане кільце", яка була б чутлива до будь-якого напрямку вектора магнітного поля?

Із проведеного аналізу впливає наступне:

1. Необхідно створити модифікацію резонатора типу "розрізане кільце", який буде чутливим до вектора магнітного поля із будь-якою поляризацією або, якщо розглядати резонатор не лише як приймальний, але і як передавальний пристрій (оскільки антена завжди може працювати в обидві сторони), тому іншими словами новостворена модифікація резонатора повинна мати сферичну або квазісферичну діаграму направленості.
2. Перевірити чи достатня напруженість електричного поля виникатиме в резонаторі при роботі від джерела НВЧ потужністю 860 Вт.
3. Висунути пропозиції до можливих застосувань пропонованої конструкції.

Починаючи виконання поставлених задач, необхідно розібратись із технічними і конструктивними особливостями резонатора.

#### **3.4. Розробка багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором**

Основним конструктивним елементом резонатора є зазор (ємнісна частина), оскільки саме в ньому концентрується електромагнітна енергія, яка необхідна для генерації плазми. Металева частина – кільце резонатора – відповідає за приймання (або передавання) енергії. Тому завдяки своїй конструкції резонатор може увібрати енергію із зовнішнього простору та сфокусувати її у обмеженій області – зазорі. Резонатор типу "розрізане кільце"

завдяки своїй рамковій формі чутливий до напрямку, з якого надходить електромагнітна хвиля. Було проведено моделювання та отримана діаграма направленості такого резонатора і показана на рис. 37.

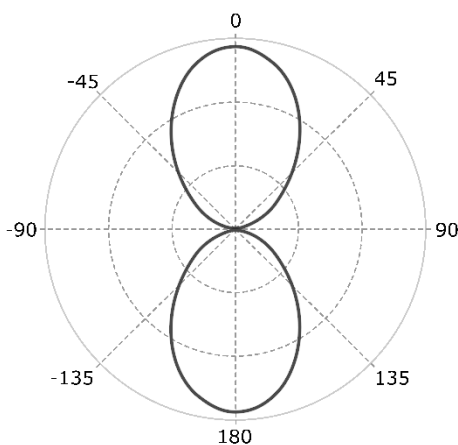


Рис. 37. Діаграма направленості резонатор типу "розрізане кільце" у горизонтальній площині (яка перпендикулярна до площини витка)

З рис. 37 видно, що лише при певній орієнтації площини резонатора до напрямку поширення електромагнітної хвилі резонатором буде поглинута та відповідно сконцентрована в зазорі максимальна частина енергії – коли площина резонатора розташована перпендикулярно напрямку поширення хвилі.

Тому необхідно було зберегти перевагу резонатора – зазор для фокусування енергії, та пропрацювати недоліки, створивши резонатор, незалежний від напрямку поширення хвилі, так званий резонатор з усестороннім збудженням. Як варіант – зорієнтувати декілька кілець відносно основних напрямків поширення хвилі (вектора магнітної складової поля), при цьому сумістивши ємнісну частину, утворивши єдиний зазор для всіх кілець. Пропонована модифікація зображена на рис. 38.

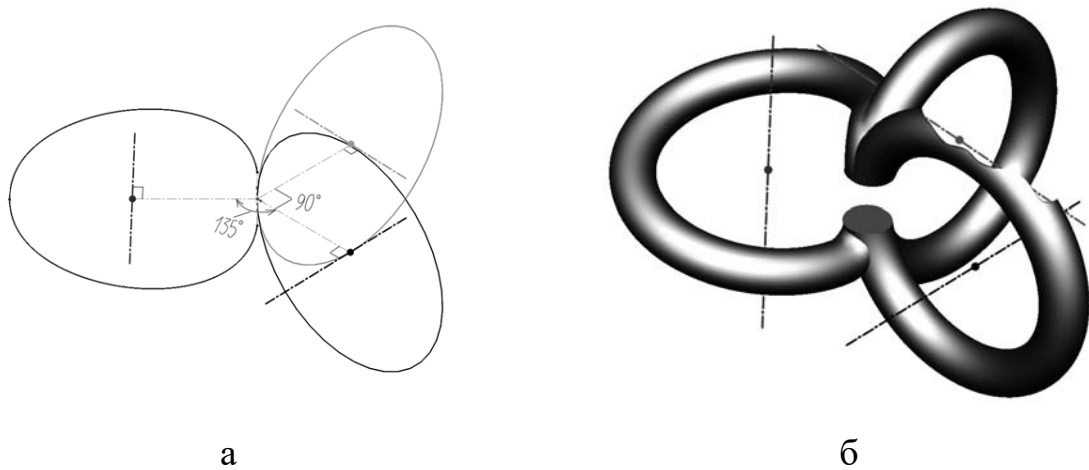


Рис. 38. 3-вимірна модель резонатора із сферичною діаграмою направленості:

а – схематичний ескіз, б – 3-вимірна модель

У літературі знайдений варіант структури на базі резонаторів типу "розрізане кільце", який розроблявся також із метою реакції на хвилю [23] та [24], яка надходить до структури із будь-якого напрямку. Але знайдений варіант структури [23] та [24] (див. рис. 6 та рис. 7) базується на значній кількості окремих резонаторів із рознесеними ємнісними зазорами в просторі, чим власне і відрізняється від розробленої НВЧ системи у даному розділі дисертації.

Провівши моделювання, для такого резонатора були отримані точні геометричні розміри (для роботи на резонансній частоті 2,45 ГГц) та діаграма направленості, які представлені на рис. 39 (параметри матеріалу, з якого повинен виготовлятися резонатор, приведені на рис. 39, а)

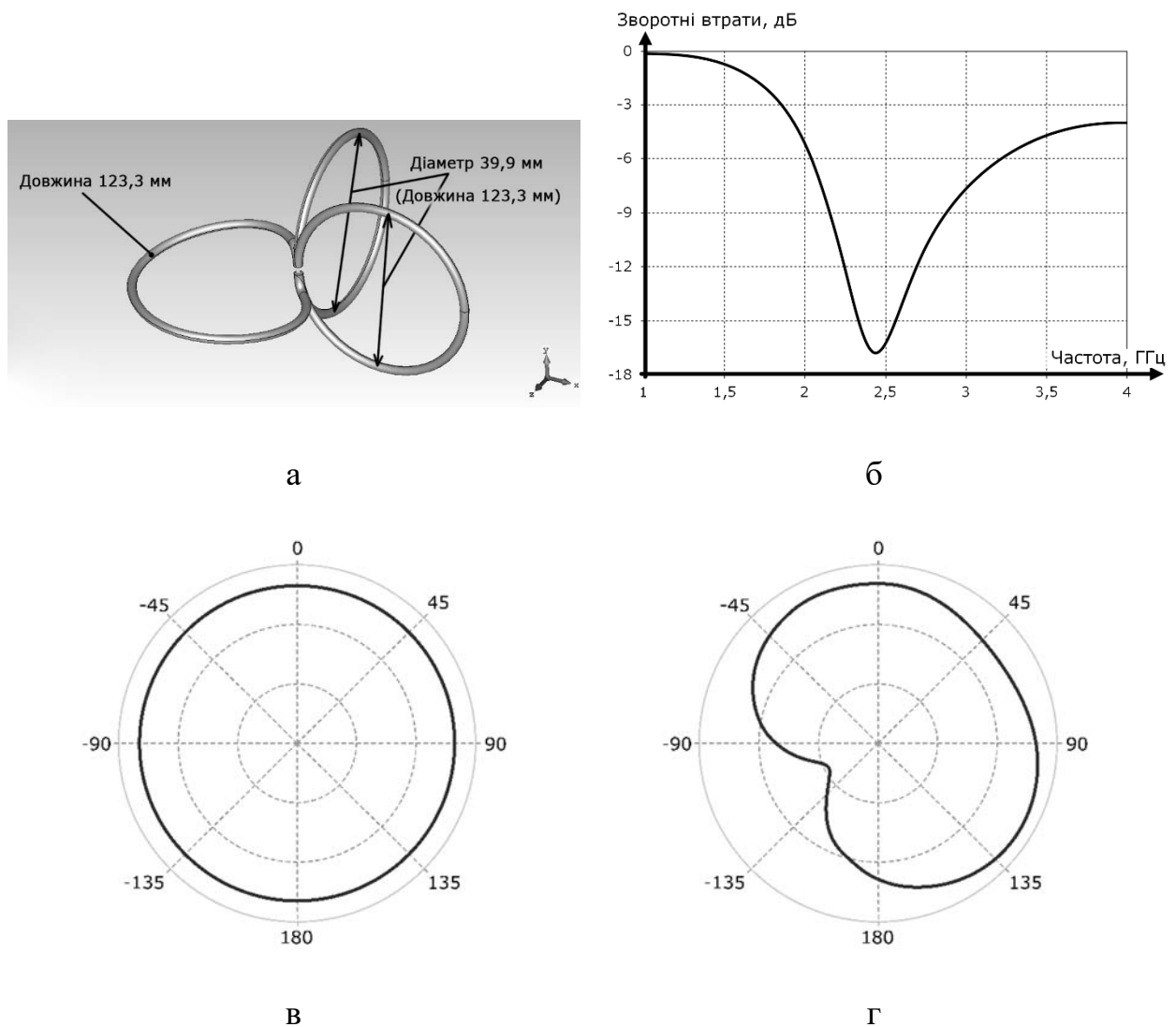
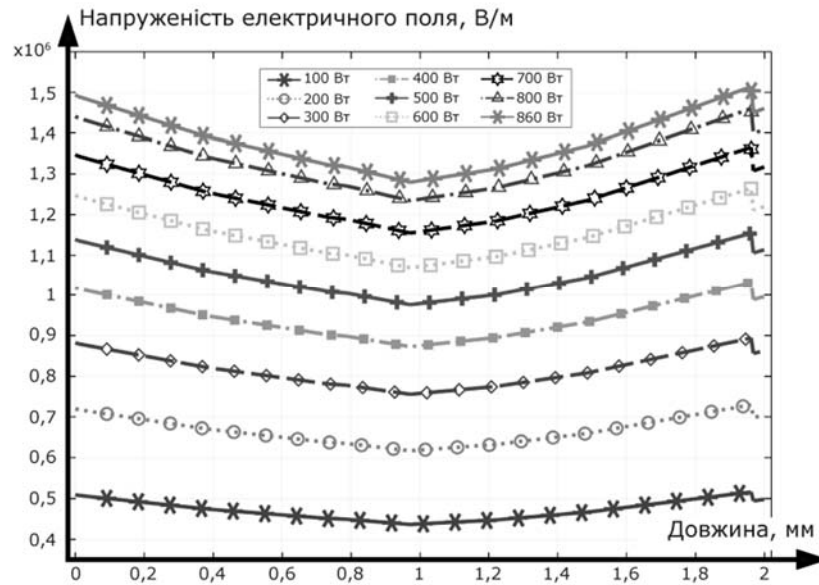


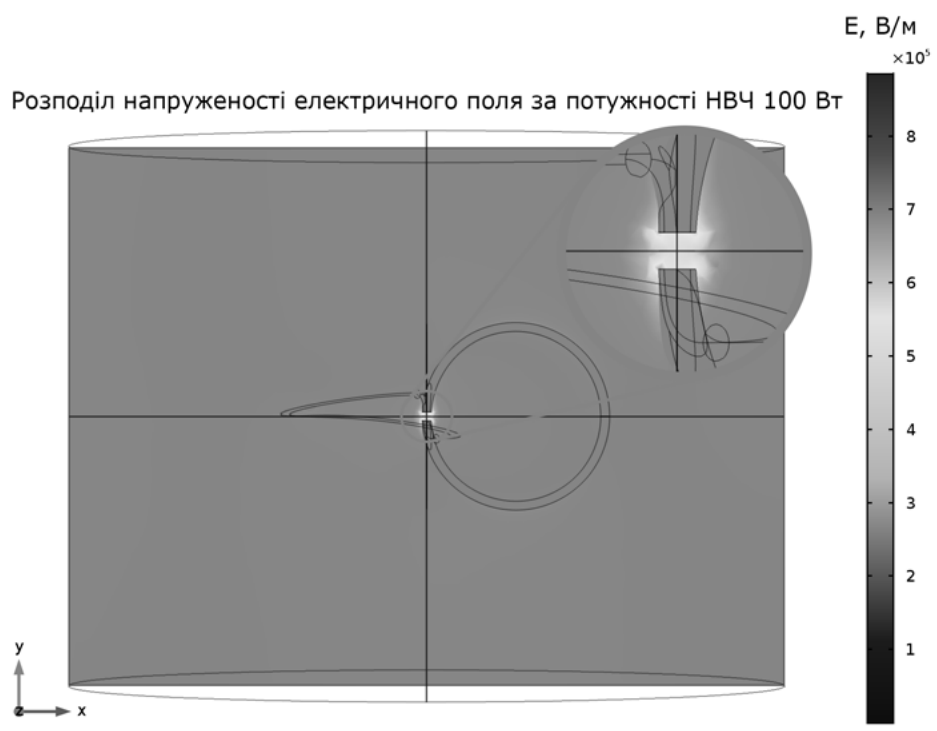
Рис. 39. Зовнішній вигляд та геометричні розміри багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, розробленого для роботи за резонансної частоти 2,45 ГГц (а), параметр зворотних втрат у частотному діапазоні 1-4 ГГц (б), діаграма направленості на резонансній частоті у вертикальній (в) та горизонтальній (г) площинах

Така модифікація резонатора типу "розрізане кільце", зображена на рис. 38, запатентована (публікація відомостей про видачу патенту: 27.04.2020, Бюл.№ 8, патент №141893).

Результати моделювання напруженості електричного поля показані на рис. 40.



а



б

Рис. 40. Розрахунок напруженості електричного поля у зазорі резонатора типу "розрізане кільце" в залежності від НВЧ потужності джерела (а) та картина розподілу напруженості електричного поля за НВЧ потужності джерела 100 Вт (б). В останньому випадку верхня грань – це випромінювач НВЧ, а нижня – узгоджене навантаження (відбиття НВЧ енергії від останньої відсутні)

Згідно опублікованих експериментальних результатів [71] напруженість електричного поля, достатня для пробую, сягає усього 110 В/см (при цьому були знайдені теоретичні дані та результати експериментів для різних типів газів і умов досліджень, коли необхідна для пробую напруженість поля становила від 0,05-30 кВ/см [94, 95] (у тому числі аналогічне підтверджують рис. 9-12)). Отже, по-перше, досліджений НВЧ резонатор дозволяє отримати у його зазорі напруженості поля, достатні для пробую, за відповідних значень НВЧ потужності джерела, по-друге, досягнення необхідної пробійної напруженості електричного поля можливе при менших за 860 Вт значеннях НВЧ потужності магнетрона (генератора НВЧ), і, по-третє, розробка генератора НВЧ потужності на твердотільних елементах також стає актуальною для подібних цілей. Водночас ті потужності, які забезпечують НВЧ магнетрони (наприклад, для НВЧ камер частотою 2,45 ГГц), що пропонуються на сьогочасному ринку, будуть достатніми для генерації плазми за допомогою розробленого НВЧ резонатора типу "розрізане кільце" та його модифікації.

### **3.5. Висновки**

1. Розраховані резонансні характеристики резонаторів типу "розрізане кільце" різних геометричних розмірів. Розрахована напруженість електричного поля у зазорі резонатора, яка була порівняна із відомим експериментальними значеннями для виникнення пробую газів.
2. Зібрані установки для дослідження резонансних властивостей кільцевих резонаторів та виникнення пробую газу.
3. Експериментальні дані роботи розрахованого та сконструйованого НВЧ резонатора на частоту 2,45 ГГц показали, що, дійсно, пробій має місце при використанні НВЧ генератора потужністю 860 Вт.
4. У свою чергу можна зробити висновок, що промислові генератори НВЧ потужності, що присутні на сьогочасному ринку, зокрема потужністю 860 Вт за робочої частоти 2,45 ГГц, задовольняють вимоги до виробництва НВЧ генераторів плазми на базі резонаторів типу

- "розрізане кільце" та їх модифікації – запропонованого багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором.
5. Напруженість електричного поля, що виникає у зазорі резонатора типу "розрізане кільце", сягає 0,22-0,89 МВ/м, у багатокільцевому резонаторі з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, – 0,42-1,5 МВ/м у діапазоні НВЧ потужності 100-860 Вт, чого достатньо для виникнення пробою.
  6. Запропонований багатокільцевий резонатор з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, на відміну від звичайного резонатора типу "розрізане кільце", малочутливий до напрямку вектора магнітного поля, що дозволяє застосовувати його у приладах без чіткої орієнтації векторів складових НВЧ хвилі відносно площини резонатора і навпаки.
  7. Запропонований багатокільцевий резонатор з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, на відміну від поширених резонаторів типу "розрізане кільце", розроблений для безпроводного підведення НВЧ живлення від генератора НВЧ, що значно спрощує його використання та розширює спектр його застосувань.

Одним із варіантів застосування резонаторів типу "розрізане кільце" можна навести патент №139282, в якому описана конструкція НВЧ генератора плазми, в якому серія резонаторів розташована у хвилеводі, а резонатори ємнісним зазором підведені до поздовжньої вихідної сітки, через яку відводиться плазма на оброблювану поверхню. У результаті можна проводити плазмову обробку поверхонь значних площ за один прохід технологічної лінії.

Результати, які представлені в даному розділі дисертації, дали можливість сформулювати наступні наукові положення (наукову новизну роботи):

1. У результаті 3D моделювання отримана напруженість електричного поля, що виникає у зазорі розробленого багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором за НВЧ потужності у діапазоні 100-860 Вт і складає 0,42-1,5 МВ/м, чого

достатньо для виникнення пробою із газовим наповненням (аргон) за тиску 100 кПа, що підтверджують експерименти.

2. Збудження резонатора типу "розрізане кільце" безпровідним шляхом за допомогою генератора коливальної частоти у діапазоні 2-4 ГГц при моделюванні у різних програмних пакетах, які базуються на різних математичних методах розрахунку, дає однакову резонансну частоту, що підтверджено експериментом, що дозволяє використовувати такий розрахунок для конструювання подібних резонаторів для різних резонансних частот.
3. Розроблений НВЧ резонатор із безпровідним живленням має квазісферичну діаграму направленості на частоті 2,45 ГГц.
4. Розроблений НВЧ резонатор із квазісферичною діаграмою направленості не тільки є не чутливим до напрямку поширення електромагнітної енергії, але і дозволяє отримати в 1.7 раз більші значення напруженості поля у зазорі у порівнянні зі звичайним резонатором типу "розрізане кільце", про що свідчать розрахунки, тобто поглинає енергію із навколишнього простору із будь-якого напрямку і водночас у порівняно більшій кількості, яку потім концентрує у області зазору для подальшого застосування.

## 4. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАТОРНИХ СИСТЕМ КАМЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ НИЗЬКОГО ТИСКУ РОБОЧОГО ГАЗУ

### 4.1. Постановка проблеми

Системи з НВЧ активаторами реакційного газу по суті представляють собою певну газорозрядну систему, в якій енергія НВЧ електромагнітної хвилі витрачається на підтримання газового розряду і супутні процеси. Головним процесом, що підтримує безелектродний розряд, є іонізація газу. Її супроводжують процеси руйнування і збудження молекул і радикалів газу в результаті протікання різноманітних фізико-хімічних реакцій, які і призводять до появи в розрядному об'ємі хімічно активних частинок. Ці частинки настільки активні, що реакції за їх участю інтенсивно протікають навіть при кімнатній температурі [7], що робить їх надзвичайно корисними для низькотемпературного синтезу покриттів складного вмісту [81].

Даний розділ присвячений моделюванню НВЧ системи, який може бути застосований у двох варіантах: як автономне джерело активованого газу, що працює незалежно від розпилювальних або випарних пристроїв; та як активатор, безпосередньо сполучений із магнетронно-розпилювальними пристроями.

НВЧ активатори першого та другого типів вкрай необхідні у промисловості для застосування у технології нанесення покриттів, травлення, знезараження робочих камер та інструментів і для проведення інших технологічних операцій.

На відміну від резонатора, розглянутого у попередньому розділі, поточна система працюватиме за низького тиску. Геометрично резонатор складається з декількох технологічних частин (див. рис. 41): 1) хвилевід, в якому розміщується антена генератора НВЧ потужності – магнетрона; 2) розрядна камера, де відбувається процес генерації плазми (в роботі аналізуються умови, що передують виникненню розряду, тобто розраховується значення напруженості електричного поля, достатнє для утворення заряджених та нейтральних (збуджених, атомарних) частинок); 3) кварцове вікно, яке

розділяє дві попередні частини, та 4) спеціальний діелектричний (фторопластовий) блок (ДБ, функціональне значення якого буде пояснюватись далі).



Рис. 41. Схематичний вигляд резонаторної системи низького тиску робочого газу, досліджуваної в поточному розділі (ДБ – діелектричний блок, ЕЦР – область електронного циклотронного резонансу)

На рис. 41 показана область електронного циклотронного резонансу (ЕЦР), в якій змінне електричне поле ортогональне постійному магнітному. Для забезпечення постійного магнітного поля у конструкцію модельованої НВЧ системи входить соленоїд. Утворення та проведення процесів генерації плазми у технологічній області ЕЦР дозволяє найбільш ефективно перетворювати енергію електромагнітної хвилі в енергію електронів, що, відповідно, призводить до посилення активації та іонізації газу. Крім того, у режимі ЕЦР нижня межа діапазону можливих робочих тисків опускається до 0,01 Па і нижче, що істотно менше звичайного тиску при магнетронному розпиленні [3, 12]. Тому така особливість особливо корисна для асистування магнетронному розрядові. На частоті 2,45 ГГц (для якої виконувалось проектування системи) електронний резонанс має місце при індукції магнітного поля  $B_{ce} = 87,6$  мТл (876 Гс).

#### 4.2. Розробка конструкції і моделювання розподілу електромагнітного поля у безелектродному НВЧ активаторі газу, побудованого на базі резонаторної системи розрядно-камерного типу

На основі аналізу переваг і недоліків відомих інженерних рішень (рис. 1) був обраний варіант конструкції (рис. 41), і був спроектований, а також виготовлений безелектродний активатор газу на базі НВЧ ЕЦР генератора плазми резонаторного типу. Для генерації НВЧ потужності застосований вакуумний магнетрон типу 2М214 ( $f = 2,45$  ГГц,  $P_{\text{НВЧ}} = 860$  Вт [96]). Конструкція спроектованого активатора-генератора плазми представлена на рис. 42.

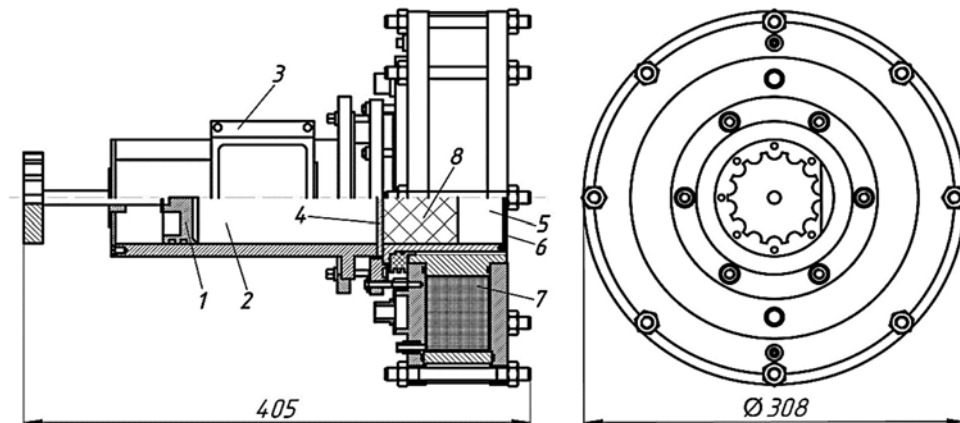


Рис. 42. Конструкція НВЧ активатора газу (робоче положення – вертикальне). 1 – поршень, 2 – хвилеводна частина, 3 – НВЧ вакуумний магнетрон 2М214, 4 – вікно з кварцового скла, 5 – розрядна камера, 6 – вихідна сітка, 7 – соленоїд, 8 – діелектричний радіопрозорий блок. На вигляді справа магнетрон 2М214 не показаний

У круглому хвилеводі 2 (діаметр 8,2 см) магнетрон збуджує хвилю типу  $H_{11}$ , яка поширюється в сторону розрядної камери 5, куди подається робочий газ (кисень, азот). Плазмові частинки з камери виходять у робочу камеру установки через отвори сітки 6. За допомогою регулювання струму соленоїда 7 задається робочий режим іонізації і активації газу, який визначається по струму іонів на колектор. Колектор розташовується в робочій камері

установки під вихідною сіткою 6. Поршень 1 необхідний для налаштування на резонанс. Охолодження магнетрона 2М214 – примусове повітряне; соленоїда – водяне; інших частин – природне.

Прагнення працювати на одному типі хвилі пов'язано з тим, що існування декількох типів хвиль у тракці еквівалентно включенню між генератором і навантаженням не однієї, а декількох передавальних ліній (за числом поширюваних типів хвиль). При цьому буває важко створити конструкцію збуджувальних пристроїв й інших елементів хвилеводного тракту, що одночасно задовольняє вимогу високого ККД при передачі енергії кожним з типів хвиль.

Для того, щоб забезпечити роботу хвилеводу тільки на одному типі хвилі, зручніше всього використовувати нижчий тип, критична довжина хвилі якого має найбільшу величину, тому для хвилеводу круглого перерізу був вибраний тип хвилі  $H_{11}$ .

Якщо  $\lambda$  – робоча довжина хвилі у вільному просторі, то повинні дотримуватися співвідношення:

$$(\lambda_{\text{кр}})_{\text{ближньої вищої хвилі}} < \lambda < (\lambda_{\text{кр}})_{\text{нижчої хвилі}}$$

Довжина хвилі у просторі визначається, як відношення швидкості світла  $c$  ( $3 \cdot 10^8$  м/с) до частоти  $f$ , що генерує хвилю (у конкретному випадку частота магнетронного генератора 2,45 ГГц):

$$\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / 2,45 \cdot 10^9 = 12,25 \text{ см.}$$

Як зазначалось вище, радіус поперечного перерізу хвилеводу  $R = 4,1$  см.

Критична довжина хвилі основної моди (хвилі  $H_{11}$ ) для циліндричного хвилеводу:

$$\lambda_{\text{кр}}(H_{11}) = 3,41 \cdot R = 13,98 \text{ см.}$$

Довжина хвилі, що поширюється хвилеводом:

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} = \frac{12,25}{\sqrt{1 - \left(\frac{12,25}{13,98}\right)^2}} = 25,8 \text{ см}$$

Наступними за величиною критичної довжини хвилі є типи  $E_{01}$  та  $H_{21}$  [75, 77]:

$$\lambda_{\text{кр}}(E_{01}) = 2,61 \cdot R = 10,7 \text{ см.}$$

$$\lambda_{\text{кр}}(H_{21}) = 2,06 \cdot R = 8,45 \text{ см.}$$

Таким чином, хвилеводом із радіусом 4,1 см за частоти 2,45 ГГц повинна поширюватись хвиля тільки  $H_{11}$  довжиною 25,8 см (рис. 43).

Вибір геометрії і розмірів НВЧ елементів (розрядної камери, хвилеводу, вікна, електромагнітної антени та діелектричного блоку) був виконаний за допомогою 3-вимірною фізико-топологічного моделювання [97]. Розрахунок проводився без врахування плазмового наповнення, за умови вакууму, тобто у холодному режимі роботи пристрою (діелектрична  $\epsilon$  та магнітна  $\mu$  проникності вакууму становлять 1). Матеріали: хвилеводу – дюралюміній (питома електропровідність –  $2,33 \cdot 10^7$  См/м), вікна – кварцове скло (діелектрична проникність – 2,09; питома електропровідність –  $1 \cdot 10^{-14}$  См/м), діелектричного блоку – фторопласт-4 (діелектрична проникність – 2,5), антени (магнетронного генератора НВЧ) – мідь (питома електропровідність –  $5,998 \cdot 10^7$  См/м). Діелектричний блок введений з метою розміщення границі плазми, на яку падає електромагнітна хвиля, в області максимуму магнітного поля соленоїда (див. рис. 47). Як відомо [3, 12], виконання цієї умови сприяє кращому проникненню НВЧ хвилі в плазму. Також спадне (від вікна до вихідної сітки) магнітне поле сприяє відходу плазмових частинок від вікна і знижує їх взаємодію з матеріалом вікна, тобто зменшує його руйнування. Звичайно, можна було б змістити соленоїд в область кварцового вікна, але тоді прийшлося б збільшити його діаметр на величину кріпильних елементів, а отже і споживану потужність, необхідну для досягнення бажаної напруженості магнітного поля. Тому радіопрозора вставка стала цікавим предметом і для вивчення, і для застосування.

Теоретично необхідно було перевірити, чи вистачить потужності НВЧ генератора для отримання напруженості електричного поля у розрядній камері, достатньої для виникнення розряду, а також – можливість забезпечити роботу системи при менших потужностях (менших за 860 Вт, яка є максимальною для обраної моделі магнетрона). Провівши моделювання [98, 99] спочатку за потужності  $P_{\text{НВЧ}} = 100$  Вт, було перевірено, що хвилеводним трактом, дійсно, поширюється хвиля  $H_{11}$  (див. рис. 43), інших типів хвиль не спостерігається, тому розміри поперечного перерізу хвилеводу для робочої частоти 2,45 ГГц розраховані правильно.

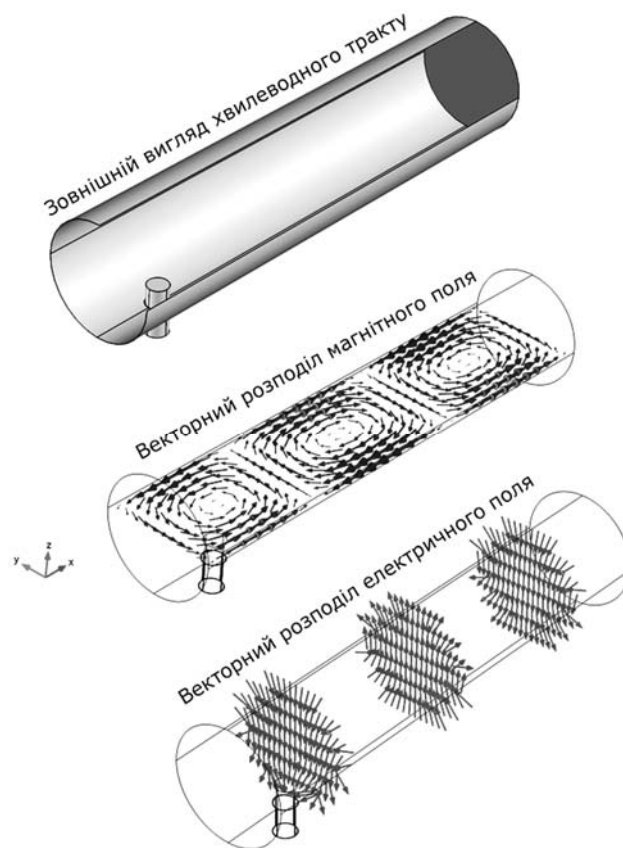
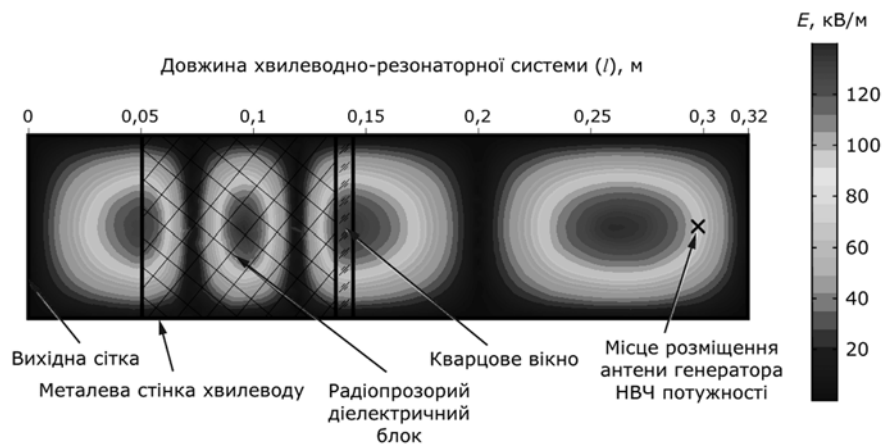
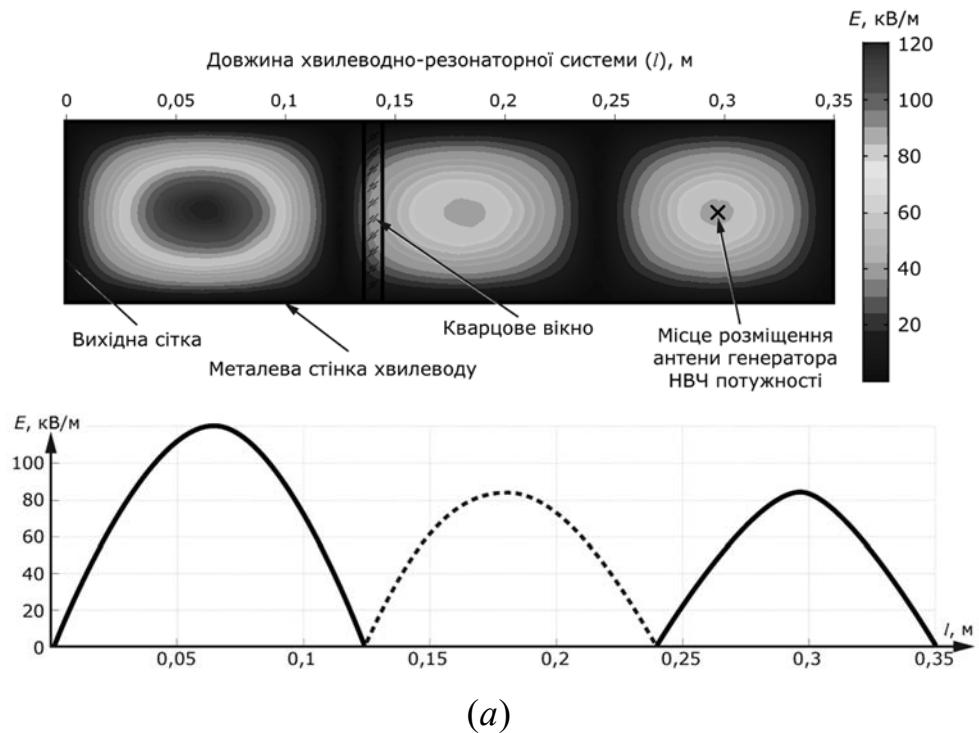


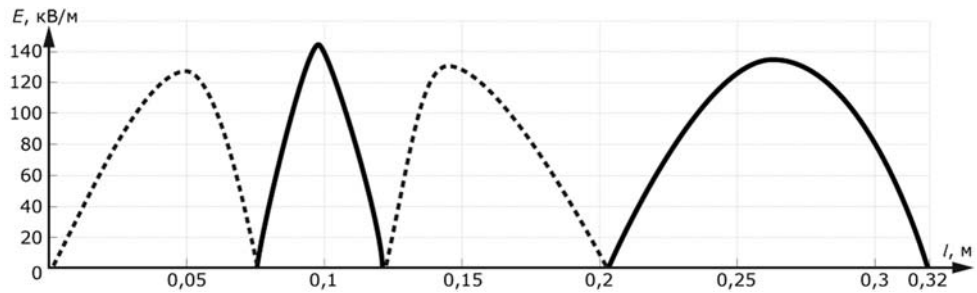
Рис. 43. Результат 3-вимірного моделювання та розрахунку типу хвилі, який поширюватиметься хвилеводом (радіус поперечного перерізу 41 мм) на частоті 2,45 ГГц (детальніше елементи тракту будуть описуватись на наступних рисунках)

Додавши кварцове вікно та розділивши розрядну камеру та хвилевідний тракт і провівши моделювання, було отримано, що у НВЧ генераторі плазми встановлюється резонаторний режим з передачею НВЧ потужності від

магнетрона 2М214 до розрядної камери при вихідній частоті 2,45 ГГц. Вимоги технічної експлуатації описані у технічних умовах 2М214. На рис. 44 показані картини розподілу напруженості електричного поля в резонаторі для двох геометрій резонаторної частини пристрою до виникнення розряду. Як видно, в резонаторі встановлюються стійні хвилі типу  $H_{113}$  або  $H_{114}$  в залежності від відсутності або присутності діелектричного блоку в розрядній камері відповідно.



(початок на попередній сторінці)



(б)

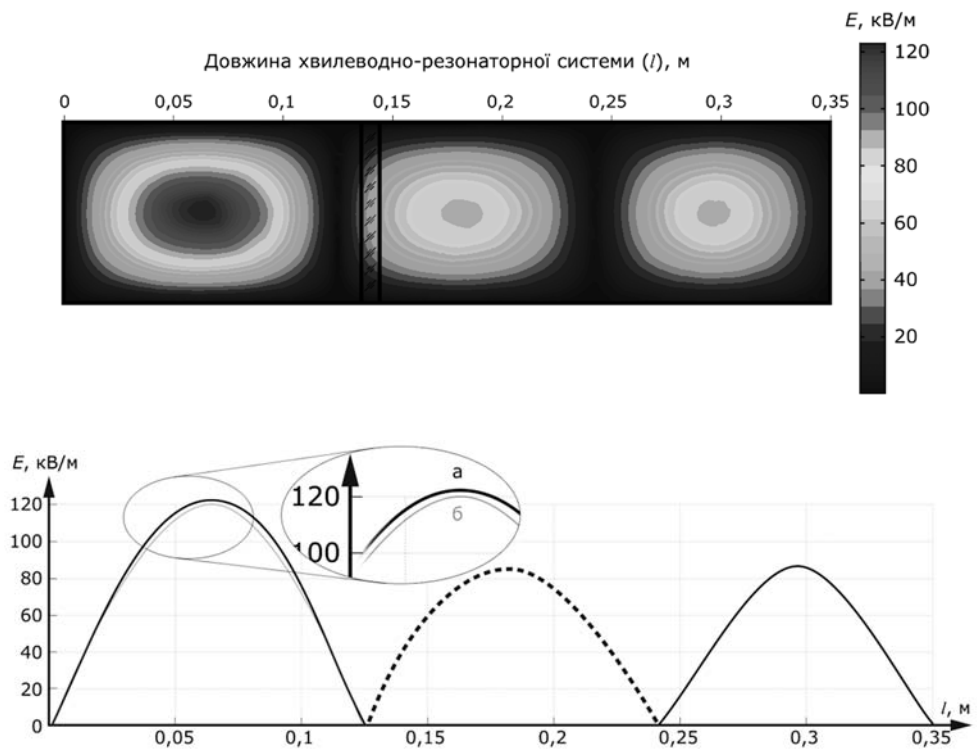
Рис. 44. Розподіл електричного поля в резонаторі при відсутності радіопрозорого діелектричного блоку (*a* – хвиля  $H_{113}$ ) та за його наявності (*б* – хвиля  $H_{114}$ ) (НВЧ потужність при розрахунку була прийнята 100 Вт і частота 2,45 ГГц. Максимальна напруженість електричного поля у розрядній камері для випадку (*a*) – 120 кВ/м, для випадку (*б*) – 126,3 кВ/м. Штриховою лінією позначена від’ємна частина графіка (у фіксований момент часу) з метою порівняння значень напруженості поля вздовж осі тракту)

На рис. 44, *a* представлений випадок без введення додаткового діелектричного блоку в розрядну камеру. На рис. 44, *б* представлений варіант із введенням блоку, діелектричної радіопрозорої вставки, в передню частину розрядної камери (з боку кварцового вікна).

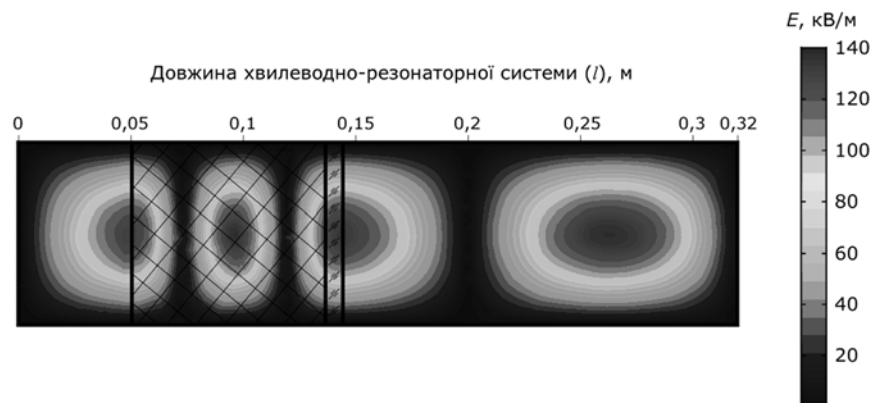
Окремо була досліджена антена (ввід електромагнітної енергії в хвилеводно-резонаторну систему) магнетрона: її форма, розміри та місце розташування, – і вплив її параметрів на величину напруженості електричного поля в камері. В результаті моделювання максимальне значення напруженості електричного поля в розрядній камері (область між вихідною сіткою та кварцовим вікном (або діелектричним блоком за його наявності), див. рис. 44, *a* (та 44, *б*)) було отримане при наступних умовах: технологічно краще закінчувати антену сферичною формою (порівнюючи з формою плоского (зрізаного) циліндра), при цьому антена у просторі хвилеводу повинна займати відстань (вимірюючи від внутрішньої поверхні стінки хвилеводу) 16,5 мм, діаметр антени 15 мм та 52,5 мм – відстань від короткозамкненої стінки хвилеводу. За таких параметрів вдалось отримати

максимальне значення напруженості електричного поля у розрядній камері 123,1 кВ/м (варіант без використання фторопластової вставки). При аналогічних параметрах антени, але за умови розташування її на відстані 22 мм від короткозамкненої стінки хвилеводу (при наявності фторопластової вставки) вдалось отримати напруженість електричного поля 127,6 кВ/м. Останній розрахунок порушує режим звичного розташування антени (підведення НВЧ енергії) на чверті довжини хвилі від короткозамкненої стінки хвилеводу, оскільки, очевидно, що має місце зміна довжини хвилі за рахунок її часткового поширення у діелектричному середовищі (наявна фторопластова вставка). Це, дійсно, треба враховувати, і моделювання зекономило час на прорахунок та виготовлення робочого дослідного зразку НВЧ резонатора, його конструктивного елементу, і водночас дозволило підвищити значення напруженості електричного поля на 3,1 кВ/м (на 2,55%) без вставки та на 1,3 кВ/м (на 1,02%) з нею (див. значеннями і розподіл електричного поля на рис. 44 і порівн. відповідно з рис. 45). Так, зростання напруженості не значне, але воно є, і досягнуте за рахунок нової форми антени генератора НВЧ.

Було цікаво дослідити, чи значно впливатиме провідність матеріалу стінки хвилеводно-резонаторного тракту на напруженість електричного поля у розрядній камері. Для цього було виконано моделювання для матеріалів: дюралюміній, з якого виготовлялась система, провідністю 23,26 МСм/м; золото провідністю 45,6 МСм/м; мідь – 59,98 МСм/м; срібло – 61,6 МСм/м та додаткові уявні матеріали із провідностями у діапазоні 1-1000 кСм/м, які були включені в розрахунок для наочності. На рис. 46 представлені результати моделювання.

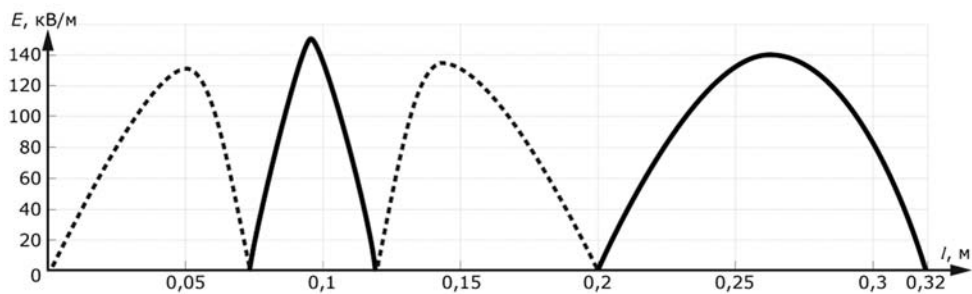


(1)



*(продовження на наступній сторінці)*

(початок на попередній сторінці)



(2)

Рис. 45. Розподіл електричного поля в резонаторі за нової геометрії НВЧ антени при відсутності радіопрозорого діелектричного блоку (1 – хвиля  $H_{113}$ ) та за його наявності (2 – хвиля  $H_{114}$ ) (НВЧ потужність при розрахунку була прийнята 100 Вт і частота 2,45 ГГц. Максимальна напруженість електричного поля у розрядній камері для випадку (1) – 123,1 кВ/м (для порівняння: графік а – нові результати, графік б – попередні), для випадку (2) – 127,6 кВ/м. Штриховою лінією позначена від’ємна (у певний момент часу) частина графіка з метою порівняння значень напруженості поля вздовж осі усього тракту)

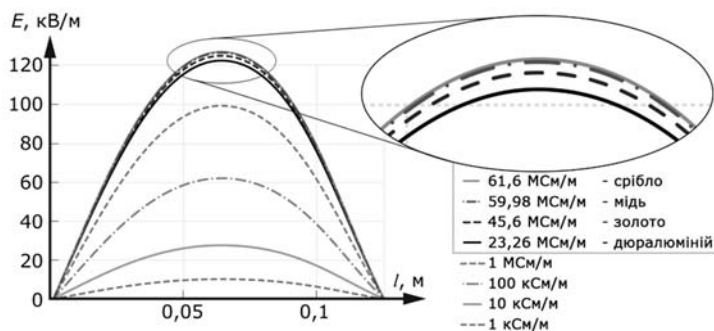


Рис. 46. Залежність напруженості електричного поля у резонаторній камері від провідності матеріалу стінки хвильоводно-резонаторного тракту

Із представленої залежності на рис. 46 видно, що різниця між максимальними значеннями напруженості для дюралюмінієвого та срібного матеріалів стінки хвильоводно-резонаторного тракту скала 3 кВ/м. Зважаючи на ціну матеріалу, додаткової технологічної операції створення покриття на стінки камери і подальшого відновлення покриття, а також враховуючи

зручність, простоту обробки та доступність дюралюмінію, приймається рішення, що швидше і дешевше збільшити значення напруженості поля шляхом регулювання потужності джерела НВЧ. А питання, на скільки треба збільшити потужність джерела НВЧ, буде досліджуватись далі.

Не може не привертати увагу те, що в останньому випадку на рис. 45 максимум напруженості електричного поля знаходиться не в області розрядної камери, де повинна відбуватись генерація плазми, а в області антени генератора НВЧ, на відміну від першого випадку, коли розглядається система без діелектричної суцільної вставки. Тому цей момент був вирішений за рахунок вдосконалення діелектричного блоку, який отримав порожнисту форму. Це дозволило не тільки досягти бажаного результату і отримати максимум напруженості електричного поля в області розрядної камери, але і зменшити витрати на саму діелектричну вставку та зменшити масу НВЧ резонатора загалом. Результати 3-вимірного моделювання представлені на рис. 47, товщина стінки фторопластової вставки 3 мм. Моделювання проводилось зі змінним джерелом НВЧ потужності у діапазоні 10-860 Вт, щоб оцінити можливість зменшення потужності, яка необхідна для досягнення значення пробійної напруженості електричного поля. На рис. 47 показаний також і розподіл магнітного поля, створюваного соленоїдом. Висота соленоїда 70 мм, кількість витків з мідного дроту 11526, площа поперечного перерізу дроту  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , товщина тора 25 мм, струм живлення 1 А. На базі отриманих даних в результаті моделювання був побудований графік розподілу магнітного поля вздовж осі хвилеводно-резонаторної системи.

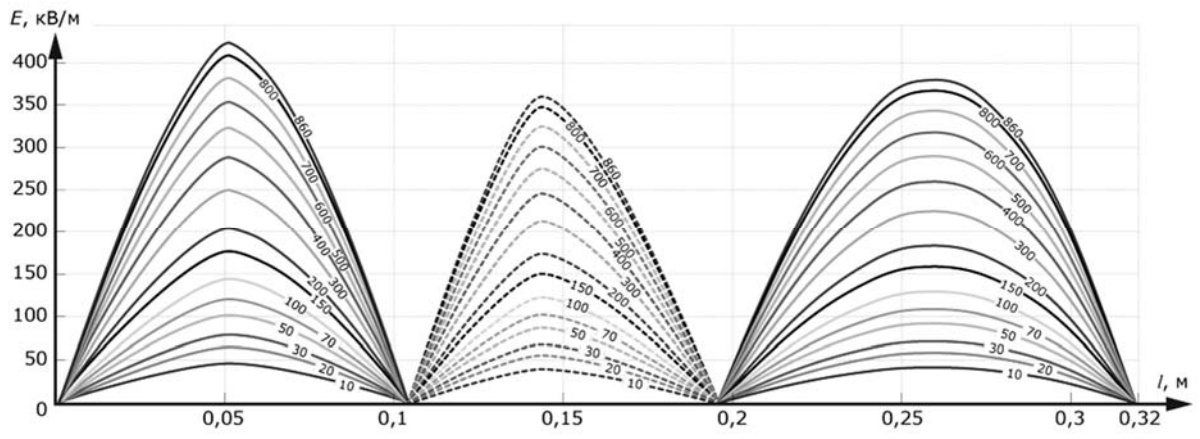
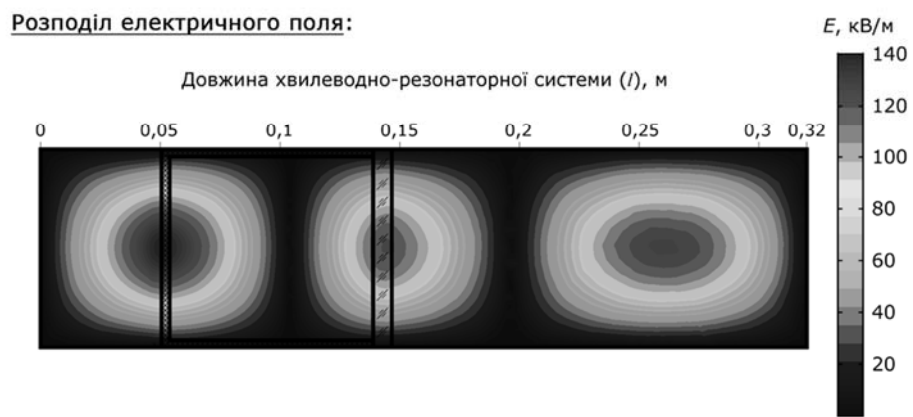
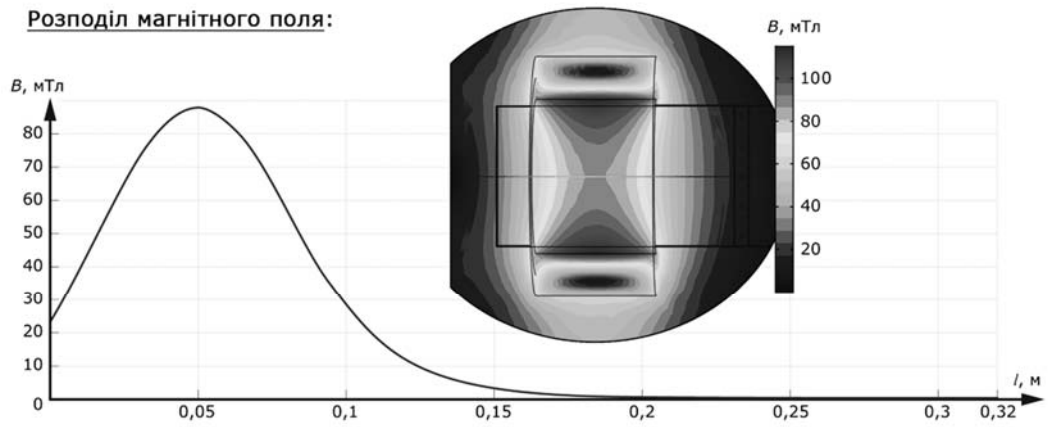


Рис. 47. Картини розподілу магнітного та електричного полів у хвильоводно-резонаторному тракті та залежність напруженості електричного поля на осі системи від потужності джерела НВЧ у діапазоні 10-860 Вт

Із результатів видно, щоб збільшити напруженість електричного поля в розрядній камері у діапазоні 140-175 кВ/м треба регулювати значення потужності джерела НВЧ у діапазоні 100-150 Вт. Із новою вставкою не тільки

змістився максимум електричного поля із області вставки у область максимуму напруженості постійного магнітного поля, утворивши зону ЕЦР, але і максимальне значення напруженості електричного поля у розрядній камері стало більшим, ніж у попередніх розрахунках із іншими типами неоднорідностей (вікно, суцільна діелектрична вставка) і сягало значення 140 кВ/м, що на 12,4 кВ/м більше за найкращий попередній результат (мається на увазі напруженість електричного поля саме у розрядній камері, а не в області діелектрика чи хвилеводу).

Діаметр вставки відповідає внутрішньому діаметру хвилеводу/резонатора. Висота вставки обрана такою, щоб вона одним торцем стикувалась із кварцовим вікном, а другим торцем знаходилась в площині соленоїда, де утворений максимум напруженості постійного магнітного поля (див. результати моделювання постійного магнітного поля соленоїда на рис. 47 – максимум напруженості магнітного поля знаходиться посередині висоти соленоїда, на рис. 44 та 45 соленоїд не показаний). Таким чином, вставка витісняє газ з передньої частини камери (між вікном і максимумом магнітного поля), тому взаємодія електромагнітної хвилі з газом починається в області максимального магнітного поля і продовжується у спадному полі. Це сприяє проникненню електромагнітної хвилі в плазму НВЧ розряду завдяки збудженню поверхневої геліконової хвилі [3, 12] та уникненню відбиття НВЧ хвилі від плазмового об'єму із критичною концентрацією електронів  $n_{e,кр}$  на заданій частоті [18]. Для  $n_{e,кр}$  маємо [58]:

$$n_{e,кр}[\text{см}^{-3}] = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2} = 1,24 \cdot 10^4 \cdot (f[\text{МГц}])^2 = 1,11 \cdot 10^{13} \cdot (\lambda_0[\text{см}])^{-2} \quad 4$$

де  $m$  – маса електрона,  $e$  – заряд електрона,  $f$  – частота,  $\lambda_0$  – довжина хвилі у вакуумі ( $\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}$ ,  $c$  – швидкість світла  $2,998 \cdot 10^{10}$  см/с).

Для частоти 2,45 ГГц отримуємо:

$$n_{e,кр} = 1,24 \cdot 10^4 \cdot (2450)^2 \approx 7,44 \cdot 10^{10} \text{ (см}^{-3}\text{)}$$

Доцільно порівняти отримані нами дані з розрахунку максимальної електричної напруженості електромагнітного поля з експериментальними даними або теоретичними розрахунками пробійних значень напруженості поля  $E_{пр}$ , відомими з літератури. Це необхідно для того, щоб підтвердити, що в системі повинен виникати НВЧ розряд при використанні магнетрона 2М214. Однак, на даний момент не було знайдено публікацій з експериментальними даними або з розрахунками  $E_{пр}$  для описуваної або подібної циліндричної системи з хвилею типу  $H_{11}$  або  $H_{11}^*$ . Наявні дані з НВЧ пробою газів [17, 18, 57, 64, 65] відносяться до циліндричних резонаторів з хвилею  $E_{010}$  типу. Це пояснюється тим, що для цієї хвилі резонансна частота не залежить від висоти резонатора, простіше і однозначно визначати залежно  $E_{пр}$  від розмірів резонатора і тиску газу. У зв'язку з цим переносити відомі дані на описуваний випадок – не коректно. Якщо це і робити, то з досить значними допущеннями.

У даній ситуації для якісної оцінки  $E_{пр}$  скористаємося методом розрахунку, описаним в [67]. Автор виходить із наступних припущень:

- 1) розглядається необмежений об'єм газу (аргону), тобто не враховується вплив стінок і дифузійних втрат електронів;
- 2) поле є однорідним, тобто силові лінії поля – прямолінійні;
- 3) всі електрони синхронно коливаються в електричному полі і мають однакову енергію, тобто є моноенергетичними; насправді електронний колектив характеризується якоюсь 3D функцією розподілу по енергіях;
- 4) для розвитку пробою необхідно, щоб за напівперіод коливань поля електрони набрали енергію, рівну  $e\varphi_i = 15,7$  еВ, де  $\varphi_i$  – потенціал іонізації газу; тут не враховується наявність поперечної по відношенню до поля швидкості електронів, отриманої в результаті стохастичного нагріву електронів, що характерно для високочастотних розрядів; крім того, для здійснення іонізації необхідно, щоб енергія деякої кількості електронів перевершувала (істотно) 15,7 еВ;

5) середня довжина вільного пробігу електронів приймається рівною газокінетичній (з молекулярної теорії газу); ясно, що вона відрізняється від середнього пробігу електронів для іонізації;

б) приймається, що вільний пробіг електрона за півперіод не перевищує амплітуди механічних коливань електрона у прискорювальному полі; автор [67] визначає амплітуду коливань через швидкість, рівну половині максимальної швидкості, що набирається за півперіод.

Автор [67] також наводить приклад розрахунку для тиску аргону 140 Па (близько 1 Торр). Отримані ним дані  $E_{пр}$  потрапляють у діапазон 0,64 ... 1,26 кВ/см.

Таким чином, метод розрахунку А.М. Діденка [67] дає тільки якісну інформацію, і його можна застосовувати тільки в навчальних цілях. Обмежуючись цією метою, було виконано такий розрахунок і представлено порівняння розрахунку з результатами моделювання на рис. 48. Можна зробити висновок, що в НВЧ системі може виникати розряд без магнітного поля при тиску близько 60 Па, що і було зафіксовано при проведенні відповідних експериментів.

Результати теоретичних розрахунків необхідної напруженості поля для виникнення розрядку у НВЧ системі представлені на рис. 48. разом із максимальною напруженістю поля, отриманої в результаті моделювання при потужності НВЧ генератора 100 Вт на осі хвилеводно-резонаторної системи.

Перший графік, побудований згідно формули (2, див. стор. 46), ілюструє розрахунок напруженості електричного поля, враховуючи, що за півперіод електрон набирає максимальну швидкість  $v_{max}$ , достатню для іонізації, тобто яка відповідає  $\varepsilon_{іоніз}$ .

Другий графік ілюструє розрахункові значення напруженості електричного поля, отримані з розрахунку за формулою (3, див. стор. 48), яка враховує, що за півперіод електрон проходить шлях, рівний середній довжині вільного пробігу для іонізації, та приймаємо за довжину вільного пробігу  $\lambda$  газокінетичний переріз.

Третій – результати 3D моделювання хвилеводно-резонаторного тракту за умови вакууму без урахування газового наповнення та магнітного поля соленоїда, який може бути розташований навколо розрядної камери. Результат представлений на осі симетрії системи в області камери в місці максимального значення напруженості електричного поля.

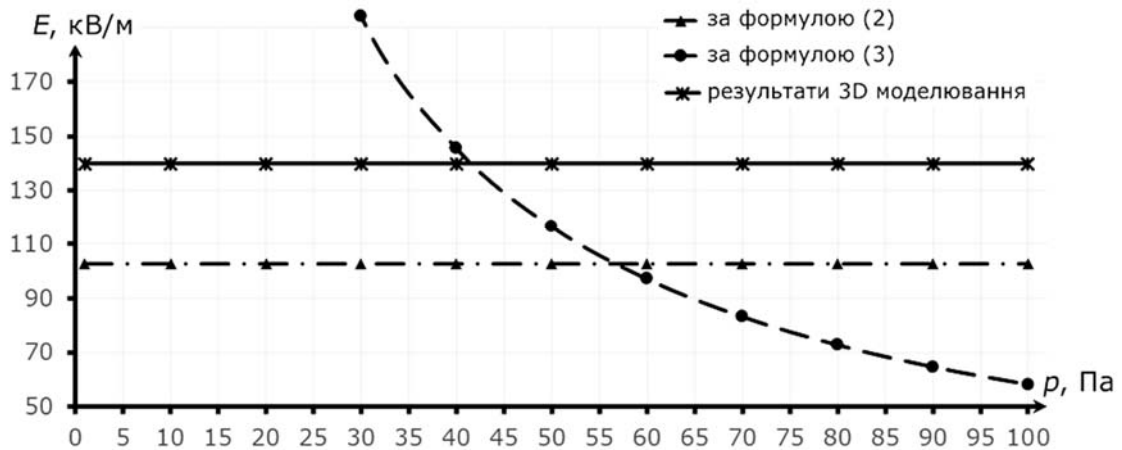


Рис. 48. Результати теоретичних розрахунків напруженості поля, необхідної для виникнення розряду у НВЧ системі

На базі розрахунків за методом А.М. Діденка [67] (вільного пробігу електрона у змінному електричному полі) і 3D моделювання хвилеводно-резонаторного тракту НВЧ системи отримано дві критичні точки: 42 Па та 56,7 Па. Представлені теоретичні криві відображають нижню межу тисків (42 Па), який необхідно забезпечити у системі і вище якого створюються достатні умови для генерації плазми (газ – аргон).

У літературі [71] наводяться дані, що для збудження плазми в обмеженому об'ємі потрібно сконцентрувати НВЧ енергію до рівня напруженості електричної складової електромагнітного поля  $E_{пр}$ , близької до пробійної (для розрядів низького тиску (близько 67 Па)), величина  $E_{пр}$  має становити від 8-30 кВ/м. При цьому в [64] наводяться практичні дані для аргону (див. рис. 8), з яких випливає, що при збільшенні тиску від 57 до 140 Па напруженість електричного поля, необхідна для пробою газу, змінюється в межах від 6 до 5 кВ/м (при частоті 994 МГц), того ж порядку є результати і для інших типів

газів (див. у першому розділі рис. 9, 10-12). У конкретному випадку наведені дані використовувались як опорні, оскільки точних даних стосовно типу розряду та його умов його виникнення не зазначено. Тільки варто відмітити, що поле можна вважати однорідним лише в обмеженій області резонатора. Тому аналіз та порівняння даних повинні проводитись в області, де поле достатньо однорідне, але це не є гарантією електричного пробою усього газового проміжку.

У хвилеводно-резонаторній НВЧ системі додатково використовуватиметься неоднорідне осесиметричне постійне магнітне поле, індукція якого регулюватиметься струмом соленоїда. При індукції магнітного поля  $B_{ce} = 87,6$  мТл на частоті 2,45 ГГц, як зазначалось раніше, матиме місце електронний циклотронний резонанс (див. рис. 41), який відповідно сприятиме генерації плазми за навіть нижчих тисків.

#### **4.3. Поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм**

Рис. 21 та рис. 22 представляють схему поєднання НВЧ активатора реакційного газу з двухмагнетронним розпилювальним пристроєм. На рис. 49 зображено зібраний дослідний стенд для проведення експериментів.

Випробування активатора газу на базі НВЧ резонаторної системи низького тиску у складі двомагнетронної розпилювальної системи підтвердили його працездатність протягом тривалого періоду часу та різних типів тестів. Щільність струму іонів на колектор, віддалений від вихідної сітки НВЧ резонаторної системи на 5-10 см, становила  $j_{i, \text{від. кол.}} = 1-3$  мА/см<sup>2</sup> при використанні в якості робочих газів кисню, азоту та повітря при тиску 0,1-1,5 Па. Регулювання іонного струму здійснювалася зміною струму соленоїда. Зміна режиму роботи вакуумного магнетрона 2М214 не проводилося відповідно до технічних умов його експлуатації. Фінальні випробування системи в цілому завершилися процесами розпилення Ti та В<sub>4</sub>С мішеней та нанесенням мультишарових покриттів Ti-B-C-N (TiN/BCN) на монокристалічних підкладках Si.

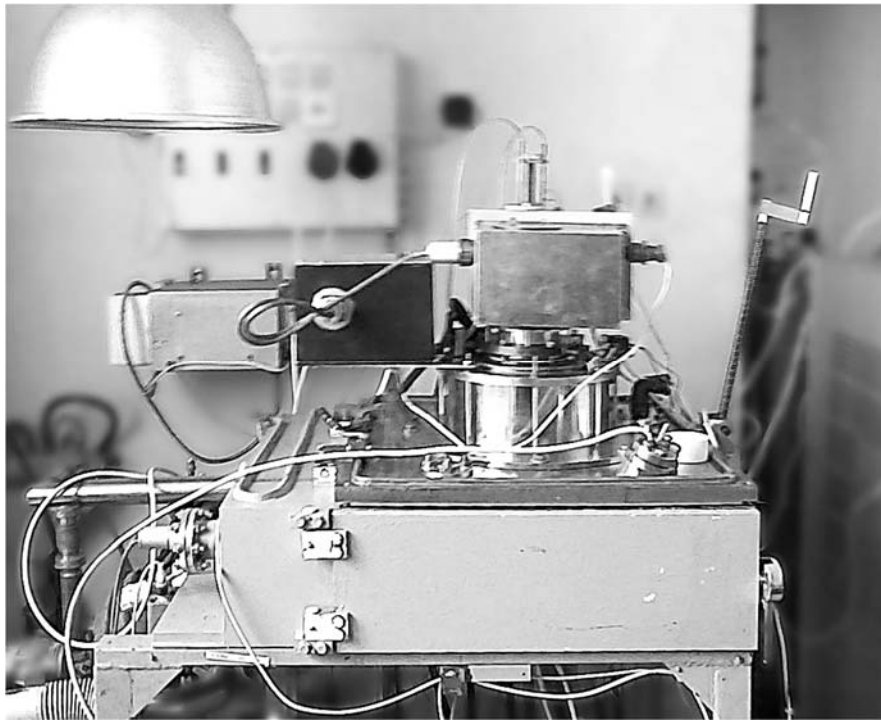


Рис. 49. Схема поєднання НВЧ активатора реакційного газу з подвійно-магнетронним розпилювальним пристроєм

Структура, хіміїний склад та механічні властивості були досліджені при різних умовах нанесення покриттів, схожа методика була описана у [100]. Струм розпиленого пучка іонів з мішені Ti складав 200 мА, а з мішені  $\text{W}_4\text{C}$  100 мА, температура підкладки була  $350^\circ\text{C}$ . Потенціал зміщення підкладки був  $-50\text{ В}$ , значення потоку  $\text{N}_2$  складав 4-20 сксм, загальний потік газу  $\text{Ar}+\text{N}_2$  був 20-80 сксм при тиску газу у розрядній камері 0,15 Па. Мультишарові покриття Ti-B-C-N складались із 58 пар шарів TiN та BCN із загальною товщиною покриття 0,5 мкм.

Вимірювання показали наступну структуру мультишарових покриттів  $nc\text{-TiN}_x/(a\text{-BN}+a\text{-C})$ : Ti-B-C-N покриття складались із нанокристалічних  $\text{TiN}_x$  шарів і аморфних BN шарів із добавками аморфного  $sp^2$  карбону. Іншими словами, нанокристалічні шари  $\text{TiN}_x$  (товщиною 3,4–6,5 нм) були введенні у аморфну матрицю, що складалась із боронітридної ( $a\text{-BN}$ ) та аморфнокарбоненої ( $a\text{-C}$ ) суміші. Модулі твердості та пружності мультишарових покриттів Ti-B-C-N були порівняні із опублікованими даними [101] та було підтверджено, що фаза  $a\text{-C}$  у шарі аморфного BN

покращує механічні властивості покриття в цілому. В залежності від умов осадження модулі нанотвердості та еластичності складали 8-35 ГПа та 100-420 ГПа відповідно. Випробування методом "дряпання" показали, що адгезія між мультишаровими покриттями та підкладкою вища для покриттів із товщими аморфними шарами. Коефіцієнт тертя для нан шарового покриття змінювався у незначному діапазоні і складав 0,1 для всіх напилених зразків. Оптимальні показники були отримані для мультишарової структури з аморфними шарами  $a$ -BCN у покриттях з TiN, оскільки така комбінація дозволила збільшити нанотвердість з 25 до 35 ГПа, а твердість по Кнупу зросла з 35 до 52 ГПа. Таким чином, мультишарові покриття Ti-B-C-N, що наносяться на підкладки із відносно низькою температурою, можуть бути застосовані як зносостійкі та захисні покриття.

Додатково була проведена оцінка концентрації електронів в приграничній області плазми перед вихідною сіткою активатора  $n_{e,вих}$  і порівняння її з критичною концентрацією електронів  $n_{e,кр} = 7,44 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , яка визначена за формулою (4, див. стор. 107).

Для цього спочатку була визначена концентрація іонів в приграничній області плазми за допомогою формули Бома [58] для іонного струму насичення на електричній зонд Ленгмюра (на колектор іонів) з негативним потенціалом відносно плазми. Цю формулу на пряму можна застосовувати для зонда-колектора, який розташовується перед вихідною сіткою для безпосереднього контакту з плазмою. Таким чином, концентрацію іонів в приграничній області плазми перед вихідною сіткою  $n_{i,вих}$  визначено за формулою (5) [58]:

$$n_{i,вих} = \frac{j_i}{ae \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}}, \quad 5$$

де коефіцієнт  $a=0,8$  для сферичного чи плоского зонда (іонного колектора), заряд електрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, стала Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, температура електронів  $T_e = 10$  еВ, маса іонів аргону  $m_i = 39.948$  а.о.м. і струм

іонів на зонд-колектор перед сіткою  $j_i = 10 \dots 30 \text{ А/м}^2$ . У конкретному випадку було взято значення для  $j_i = j_{i,\text{від.кол}}$ , оскільки не враховувались втрати іонів при їх проходженні крізь сітку. Таким чином, маємо:

$$n_{i,\text{вих}} \Big|_{j_i = 10 \text{ А/м}^2} = \frac{10}{0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10 \cdot 11610}{39,948 \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-24}}{1000}}}} = 1,12 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3},$$

$$n_{i,\text{вих}} \Big|_{j_i = 30 \text{ А/м}^2} = \frac{30}{0,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10 \cdot 11610}{39,948 \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-24}}{1000}}}} = 3,37 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}.$$

Виходячи з того, що плазма в активаторі – квазінейтральна, можемо допустити, що  $n_{e,\text{вих}} \approx n_{i,\text{вих}}$ . Як бачимо, отримані значення концентрації електронів  $n_{e,\text{вих}}$  виявляються порядку критичної, коли враховано втрати іонів на вихідній сітці, тобто прийнято  $j_i > j_{i,\text{від.кол}}$ . З досвіду відомо, що струм іонів  $j_{i,\text{від.кол}}$  знижується в декілька разів на вихідній сітці іонних джерел. Тут потрібно знати, що концентрація заряджених частинок плазми біля стінок розрядної камери активатора і сітки менше концентрації у об'ємі камери через рекомбінацію іонів на поверхні стінок. Цей процес сильніше проявляється, коли стінки і сітка мають негативний потенціал відносно плазми.

#### 4.4. Моделювання нейтралізатора іонів як джерела високоенергетичних частинок

Перша частина – це модель генератора іонів, які направляють на мішень нейтралізатора (або які потрапляють на елемент розрядної камери, її внутрішню поверхню, де іони зазнають нейтралізації). Іони зазвичай генерують за допомогою електричного розряду у відповідному газі (Ar, O<sub>2</sub>,

N<sub>2</sub>). На рис. 50 [16] показано приклад НВЧ джерела пучка нейтральних атомів, який являє собою нейтралізатор іонного пучка та з'єднаний з ним через кварцове вікно хвильоводний тракт НВЧ резонаторної системи, що описувалась перед цим і яка може використовуватись як джерело заряджених частинок. Джерело має розрядну камеру з плазмою і дві сітки. Одна сітка – для прискорення, а друга – для екстракції іонів. Для спрощення задачі моделювання будемо розглядати генератор іонів як джерело одиноких іонів на вході у нейтралізатор, тобто будемо моделювати подальші процеси нейтралізації для індивідуальних частинок [102]. При цьому нейтралізацію можна розглядати на стінці розрядної камери або іншому конструктивному елементі, тобто врахувати можливість нейтралізації іонного пучка всередині розрядної камери.

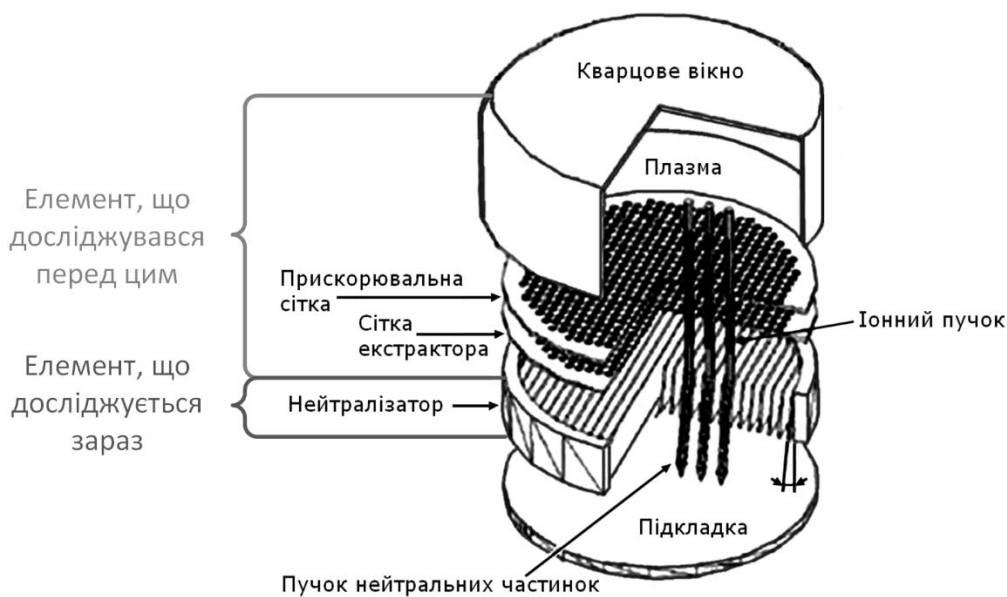


Рис. 50. Один із варіантів побудови генератора потоку (пучка, променя) нейтральних атомів для бомбардування підкладки оптичного чи електронного виробу

Друга частина моделі описує процес взаємодії окремих іонів з тілом металевого нейтралізатора (або газорозрядної камери) на принципах фізичної кінетики з використанням методу Монте-Карло [103]. При моделюванні зроблено припущення, що відбитий атом виходить тільки з одної пластини

нейтралізатора і не взаємодіє з іншими пластинами, тобто пластини нейтралізатора розміщені достатньо рідко. Також зроблено припущення, що тиск газу в області нейтралізатора малий і відсутні зіткнення швидких частинок (іонів та відбитих атомів) з молекулами газу. Таким чином, названі частинки рухаються в просторі між пластинами і під нейтралізатором по закону балістики [103] за рахунок початкової енергії іонів (на виході з екстрактора) і нейтральних атомів (на виході з тіла пластин).

Розрахунок характеристик відбитих потоків атомів Ar і O виконувався за допомогою програми TRIM (*TR*ansport of *I*ons in *M*atter) [104, 105]. Він заснований на методі Монте-Карло для дослідження випадкових блукань 99500 високоенергетичних частинок (колишніх іонів) у твердому тілі мішені у наближенні парних зіткнень частинок з атомами мішені. Цей метод найбільше підходить для подібних розрахунків, бо процес уповільнення (гальмування) атомних частинок носить статистичний характер, оскільки окремі атоми зазнають неоднакового числа зіткнень і втрачають різну енергію [103]. Внаслідок цього бомбардувальні частинки проходять різні траєкторії і довжини пробігів до зупинки у твердому тілі.

Проникнення швидких іонів у тверде тіло мішені (складний за складом матеріал) супроводжується взаємодією їх з ядрами атомів та електронами твердого тіла. Іон при першому зіткненні з атомом матеріалу передає йому частину своєї кінетичної енергії, створюючи при цьому атом віддачі. Потім первинна частинка і атом віддачі генерують нові атоми віддачі й втрачають свою енергію і т.д. Траєкторії кожної частинки простежуються до того часу, поки вона не втратить свою енергію. Зіткнення атомів відбуваються хаотично і вони розсіюються під різними кутами відносно початкового напрямку руху іонів. При цьому частина первинних частинок може вийти з тіла мішені (поверхні матеріалу). Ці частинки і є зворотно розсіяними (відбитими). А частинки (атоми) самої мішені, що вийшли, є розпиленими частинками [103].

Для характеристики процесу відбиття використовують інтегральні коефіцієнти відбиття частинок  $R_N$  і енергії  $R_E$ . Коефіцієнт  $R_N$  визначається як

відношення кількості відбитих атомів  $N$  до кількості первинних частинок  $N_0$  (у перерахунку на атоми), що бомбардують мішень.  $R_E$  визначається як частина початкової енергії  $E_0$ , що поглинається відбитим атомом [102, 103].

$$R_N = N / N_0$$

$$R_E = E_{\text{сеп}} / E_0 \cdot R_N$$

$R_N$  не залежить від того, чи відбувається бомбардування мішені (поверхні) молекулярним або атомарним іоном, якщо зроблено відповідний перерахунок енергії на одну атомну частинку. Також не впливає на  $R_N$  наявність заряду у бомбардувальної частинки. Це означає, наприклад, що при розрахунку розсіювання іонів кисню задаємо енергію, що припадає на одну бомбардувальну атомну частинку, і вважаємо один молекулярний іон як дві незалежні атомні частинки [103].

В табл. 7 і табл. 8 наведені результати розрахунку  $R_N$  і  $R_E$ , де  $E_0$  – початкова енергія бомбардувальних частинок в перерахунку на атоми.

Таблиця 7. Розрахунок коефіцієнтів відбиття частинок та енергії для іонів кисню при нормальному падінні

$E_0$ , кеВ	Коефіцієнт відбиття	Матеріал і атомна маса мішені (поверхні)					
		Al	Ti	Zn	Zr	Nb	Ta
		26,98	47,90	65,38	91,22	92,91	180,95
0,5	$R_N$	0,0502	0,1282	0,2065	0,2217	0,2353	0,3653
	$R_E$	0,0041	0,0214	0,0518	0,0610	0,0665	0,1555
1,0	$R_N$	0,0398	0,1143	0,1885	0,2015	0,2124	0,3545
	$R_E$	0,0033	0,0199	0,0474	0,0558	0,0598	0,1481
5,0	$R_N$	0,0244	0,0774	0,1436	0,1622	0,1650	0,3106
	$R_E$	0,0021	0,0133	0,0365	0,0435	0,0455	0,1282

Як видно з табл. 7 і 8, а також з рис. 51,  $R_N$  складає одиниці-десятки відсотків (в залежності від роду іонів та матеріалу поверхні), що є досить великою величиною. Чим легше бомбардувальний іон, менше його енергія і важче атоми мішені (поверхні), тим більше  $R_N$  (наприклад, взяти для порівняння коефіцієнти для алюмінію і танталу).

Таблиця 8. Розрахунок коефіцієнтів відбиття частинок та енергії для іонів аргону при нормальному падінні

$E_0$ , кеВ	Коефіцієнт відбиття	Матеріал і атомна маса мішені (поверхні)					
		Al	Ti	Zn	Zr	Nb	Ta
		26,98	47,90	65,38	91,22	92,91	180,95
0,5	$R_N$	0,00083	0,0290	0,0925	0,1273	0,1353	0,2840
	$R_E$	0,00001	0,0012	0,0074	0,0157	0,0179	0,0798
1,0	$R_N$	0,00072	0,0266	0,0791	0,1152	0,1241	0,2687
	$R_E$	0,00001	0,0011	0,0060	0,0145	0,0165	0,0728
5,0	$R_N$	0,00067	0,0175	0,0507	0,0877	0,0925	0,2208
	$R_E$	0,00001	0,0008	0,0044	0,0112	0,0123	0,0615

Розсіяння від кремнієвої мішені (поверхні) було отримано найменше (в табл. 7 і 8 не наведено). Коефіцієнт відбиття енергії  $R_E$  також досягає одиниць-десятиків відсотків, але за величиною в кілька разів менше, ніж  $R_N$ . Збільшення кута падіння іонів призводить до суттєвого підвищення  $R_N$  (див. рис. 51, з), при цьому відбиті частинки несуть енергію, яка набагато більше, ніж при нормальному падінні. Це наочно демонструють рис. 52 і рис. 53, на яких показані розподіли по відносній енергії атомів кисню, відбитих (зворотно розсіяних) від мішені (поверхні) з титану і танталу.

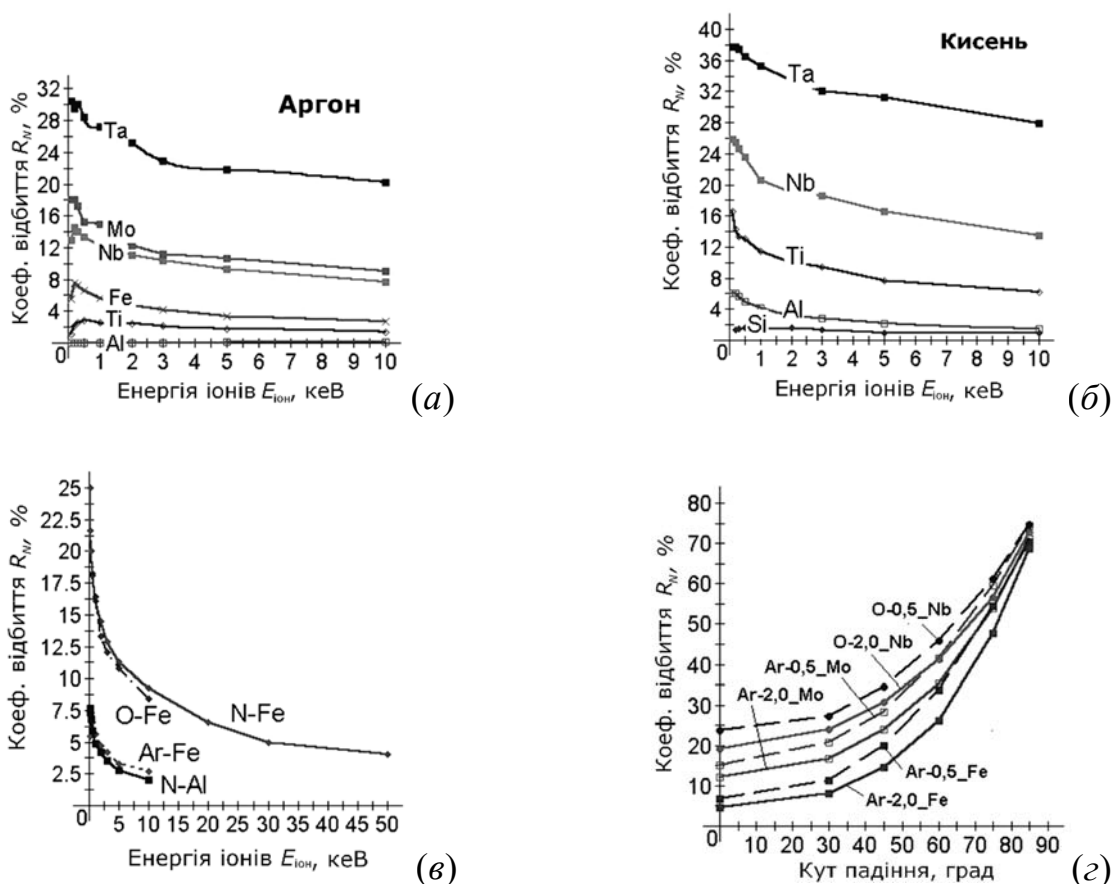


Рис. 51. Залежності коефіцієнта відбиття  $R_N$  від енергії бомбардувальних іонів  $E_{\text{іон}}$  при нормальному падінні (а-в) та від кута падіння при енергії іонів 0,5 та 0,2 кеВ (г). Вид іон-утворювального хімічного елемента та матеріал мішені (поверхні) вказані на полі графіків. Величини  $R_N$  та  $E_{\text{іон}}$  розраховувались на один атом бомбардувальної частинки, тобто у випадку двохатомного іона ( $O^{+2}$  або  $N^{+2}$ ) зазначені енергії відносяться до одного із атомів іона

На рис. 52 і рис. 53 наведені результати розрахунку розподілів по енергії відбитих частинок для трьох значень енергії бомбардувальних іонів (0,5 кеВ, 1 кеВ і 5 кеВ) і трьох значень кута падіння (0, 45 і 75 градусів). Результати представлені у вигляді полігону.

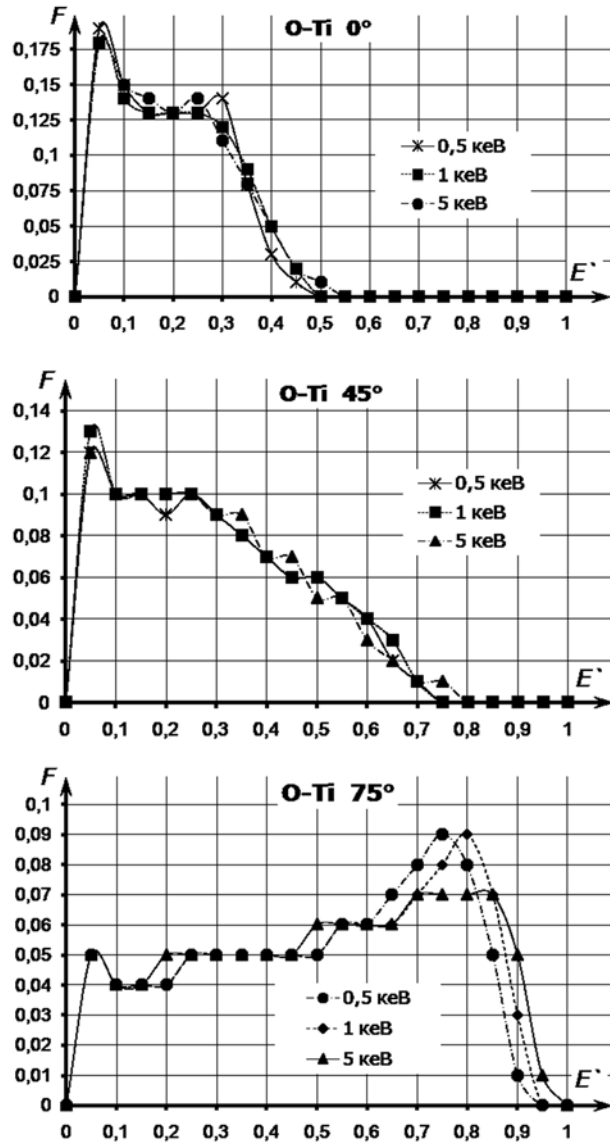


Рис. 52. Розподіл по енергії зворотно розсіяних від титану атомів кисню при різних кутах падіння.  $E' = E/E_0$

Тут  $E' = E/E_0$  – відносна енергія відбитих атомів, а  $F$  визначалася як відношення кількості частинок, що мають енергію у діапазоні  $[E' - 0,05, E']$ , до загальної кількості відбитих атомів  $N$ , при цьому весь діапазон можливих енергій був розбитий на 20 частин; таким чином, сума 20 дискретних значень  $F$  дорівнює 1.

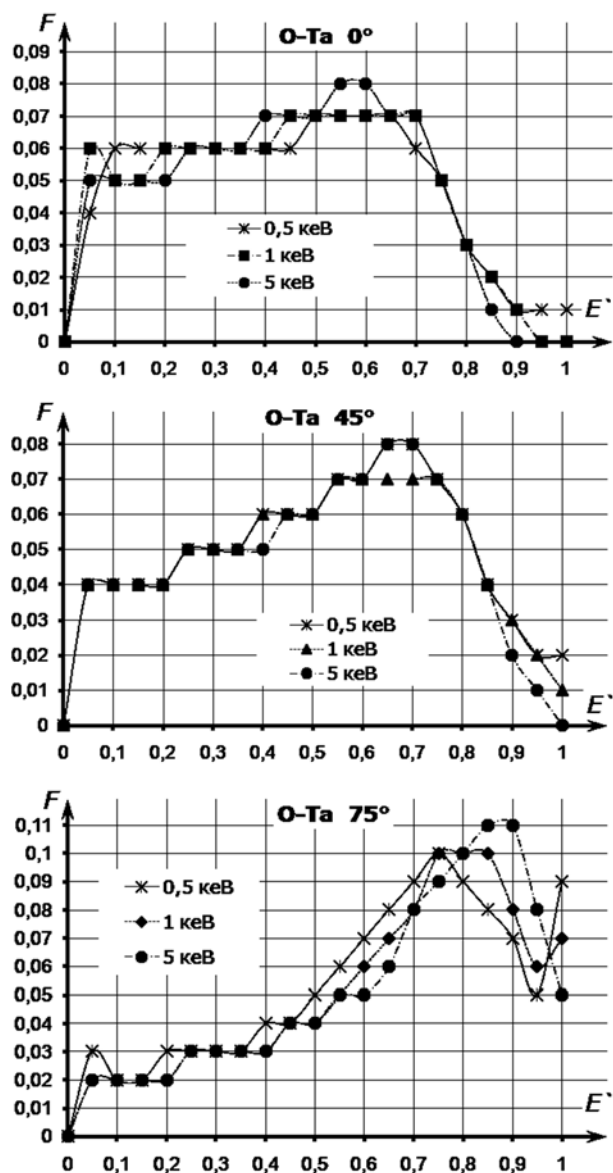


Рис. 53. Розподіл по енергії зворотно розсіяних від танталу атомів кисню при різних кутах падіння.  $E' = E/E_0$

Як видно, загальний вигляд функцій розподілу відбитих атомів по відносній енергії не сильно залежить від величини початкової енергії бомбардувальних частинок в діапазоні 0,5...5,0 кеВ, але збільшення кута падіння  $\varphi$  здійснює сильний вплив на функцію розподілу енергії. Якщо при  $\varphi = 0^\circ$  розподіл має П-подібну форму, то при  $\varphi = 75^\circ$  він набуває трикутної форми з великою кількістю частинок з  $E' \sim 0,7...1,0$ . Потoki атомів, відбитих від мішеней з великою атомною масою, містять більше високоенергетичних частинок. Останнє є особливо цінним для отримання потоків швидких нейтральних

атомів з іонних пучків шляхом нейтралізації іонів на металевій поверхні [16], це також вкрай важливо при прогнозуванні терміну використання складових частин резонаторної камери – енергія, що передається поверхням елементів резонатора (розрядної камери) відбитими високоенергетичними нейтральними частинками, може створити істотний вплив на відповідні елементи конструкції, тому необхідне врахування відбиття високоенергетичних атомів при проектуванні як НВЧ резонаторів, так і технологічних процесів, що проводяться з їх використанням.

#### **4.5. Висновки**

Був розроблений, сконструйований та успішно випробовуваний прототип НВЧ резонаторної системи розрядно-камерного типу. Система розроблялась для майбутніх досліджень і використання в якості активатора газу при роботі спільно з іонними розпилювальними пристроями та нейтралізаторами іонів. Водночас спектр застосувань не обмежується даними пристроями і може знайти використання в інших цілях без/із відповідними модифікаціями. У конкретному дослідженні було удосконалено конструкцію НВЧ резонаторної системи розрядно-камерного типу із циліндричним поперечним перерізом, базуючись на відомих технологічних рішеннях, з метою покращення її характеристик.

На базі результатів, отриманих у ході розрахунків і 3D моделювання розподілу напруженості електромагнітного поля, було визначено геометричні параметри та критичні тиски в НВЧ системі, при яких вдасться досягти пробою газу (аргону) за основного типу хвилі  $H_{11}^*$ .

На базі фізико-топологічного 3D моделювання системи у дорозрядний/допробійний період була отримана картина розподілу напруженості електричного поля в НВЧ системі та визначена максимальна напруженість поля, яка знаходилась у діапазоні 140-412 кВ/м при зміні потужності НВЧ випромінювання магнетрона від 100 Вт до 860 Вт. Практична перевірка розробленої НВЧ системи показала, що у вказаному

діапазоні напруженостей електричного поля у розрядній камері, дійсно, має місце явище пробою (виникнення НВЧ розряду).

Результати моделювання показали залежність величини напруженості електричного поля від провідності матеріалу стінки хвилеводного тракту і розрядної камери; зокрема досліджувались дюралюміній, мідь, срібло та золото, і висновок є наступним – використання додаткової технологічної операції (утворення покриття з відповідного матеріалу) або виконання хвилеводно-резонаторного тракту із матеріалу, відмінного від дюралюмінію, не є виправданими заходами, оскільки ефект від використання матеріалу із більшою провідністю є порівняно нехтовним (приріст складає лише до декількох відсотків), отже, цілком достатньо використовувати найменш коштовний із перерахованих матеріал – дюралюміній.

Була сконструйована дуальна магнетрона розпилювальна система із активатором реакційного газу, у якості його застосовувалась розроблювана НВЧ система хвилеводно-резонаторного типу. Проведені успішні випробування цього пристрою з отриманням багат шарових наноструктурованих покриттів.

Була виконана оцінка генерації потоків високоенергетичних атомів робочого газу у результаті зворотного розсіювання плазмових іонів, що бомбардують внутрішню поверхню резонатора, на базі комп'ютерного моделювання у програмному пакеті TRIM. З отриманих результатів розрахунку випливає, що в процесах іонного бомбардування з використанням іонів аргону і більш легкого кисню генеруються значні потоки відбитих (зворотно розсіяних) від поверхні швидких атомів Ag і O, а це вкрай важливо при прогнозуванні терміну використання складових частин резонаторної камери. Енергія, що передається поверхням елементів резонатора (розрядної камери) відбитими високоенергетичними нейтральними частинками, може створити істотний вплив на відповідні елементи конструкції, тому необхідне врахування відбиття високоенергетичних атомів при проектуванні як НВЧ резонаторів, так і технологічних процесів, що проводяться з їх використанням.

Результати, які представлені у даному розділі, дали можливість сформулювати наступні наукові положення (наукову новизну роботи):

1. При частоті генератора НВЧ  $f = 2,45$  ГГц, довжині НВЧ хвилі типу  $H_{11}^*$  (що виникає у системі) 25 см та змінній НВЧ потужності джерела у діапазоні  $P_{\text{НВЧ}} = 100\text{-}860$  Вт у прототипі НВЧ резонаторної системи розрядно-камерного типу виникає напруженість поля у діапазоні 140-412 кВ/м, що достатня для виникнення розрядку за тиску 50 Па.
2. При частоті генератора НВЧ  $f = 2,45$  ГГц, потужності  $P_{\text{НВЧ}} \sim 860$  Вт у прототипі НВЧ генератора плазми густина струму іонів на колектор, що віддалений від вихідної сітки на 10 см, складає 1 – 3 мА/см<sup>2</sup> при використанні в якості робочого газу кисню, азоту, аргону та повітря при тиску 0,1 – 1,5 Па.
3. Показано, що метод фізико-топологічного тривимірного моделювання дозволив встановити взаємозв'язок між потужністю генератора НВЧ та напруженістю поля у НВЧ хвилеводно-резонаторній системі, що вкрай корисно для розрахунку подібних пристроїв та їх подальшого конструювання.
4. Показано, що метод фізико-топологічного тривимірного моделювання дозволяє встановити взаємозв'язок між провідністю матеріалу стінки хвилеводного тракту та напруженістю поля, що виникає у хвилеводно-резонаторній НВЧ системі (при фіксованій потужності генератора НВЧ), і результати розрахунку показали, що приріст напруженості при використанні більш коштовного матеріалу хвилеводу з міді або покриття зі срібла, замість матеріалу дюралюміній, є нехтовним для підвищення максимальної напруженості електричного поля у розрядній камері.
5. Вперше отримані інтегральні коефіцієнти відбиття частинок  $R_N$  і енергії  $R_E$  для іонів кисню та аргону при нормальному падінні на поверхні з алюмінію, титану, цинку, цирконію, ніобію, танталу та залежності коефіцієнта відбиття  $R_N$  від енергії бомбардувальних іонів (аргону,

кисню, азоту) та кута їх падіння, які свідчать, що енергія, що передається поверхні елементів розрядної камери цими частинками, може здійснювати на них істотний вплив. Тому необхідно враховувати відбиття швидких атомів при проектуванні як НВЧ резонаторів, в тому числі аналізі термінів служби елементів розрядної камери НВЧ системи (оскільки під таким впливом вони втрачають свої технологічні властивості), так і технологічних процесів, що проводяться з їх використанням.

6. Метод моделювання та розрахунку інтегральних коефіцієнтів відбиття високоенергетичних частинок  $R_N$  і енергії  $R_E$  може застосовуватись і для іонів інших типів (не лише представлених в роботі), і показано, що результат розрахунку дозволяє визначати вплив внутрішніх процесів на резонатор, і які домішки можуть бути присутніми в плазмі за рахунок бомбардування стінок камери.

## ВИСНОВКИ

В дисертації представлено результати розробок та досліджень двох резонансних НВЧ систем на базі НВЧ резонаторів типу "розрізане кільце", включаючи його модифікацію, (перша) та розрядно-камерного типу (друга) шляхом моделювання фізичних процесів, проведення аналітичних розрахунків та експериментів. Аналіз результатів моделювання потоків високоенергетичних атомів став корисним як для урахування їх впливу на елементи конструкції НВЧ систем, формування покриттів різного типу, так і для закладення базису для розробки нейтралізаторів іонних потоків. Що в сукупності дало змогу побудувати базис з розробки резонансних НВЧ систем низького та високого тисків робочого газу у допробійному електричному режимі.

Вибір конфігурації описаних пристроїв був зроблений, виходячи із відносної близькості конфігурацій електричних полів у даних НВЧ резонаторах (більше того вони схожі на поле у плоскому конденсаторі), і така відносна близькість дозволяє розглядати їх в рамках єдиної теорії. При чому особливістю першої системи є поглинання енергії з навколишнього простору та концентрування у точковій області, а другої, навпаки, – отримання енергії із точкового джерела НВЧ потужності та розподіл енергії в просторі генератора і розрядної камери.

1. У результаті 3D моделювання отримані резонансні характеристики резонаторів типу "розрізане кільце" різних геометричних розмірів. Розрахована напруженість електричного поля у зазорі резонатора, яка була порівняна із відомим експериментальними значеннями для виникнення пробою газів.
2. Зібрані установки для дослідження резонансних властивостей кільцевих резонаторів та виникнення пробою газу. Експериментальні дані роботи розрахованого та сконструйованого НВЧ резонатора на частоту 2,45 ГГц показали, що, дійсно, пробій має місце при використанні НВЧ генератора потужністю 860 Вт. У свою чергу можна зробити висновок,

що промислові генератори НВЧ потужності, що присутні на сьогочасному ринку, зокрема потужністю 860 Вт за робочої частоти 2,45 ГГц, задовольняють вимоги до виробництва НВЧ генераторів плазми на базі резонаторів типу "розрізане кільце" та їх модифікації – запропонованого багатокільцевого резонатора з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором.

3. Напруженість електричного поля, що виникає у зазорі резонатора типу "розрізане кільце", сягає 0,22-0,89 МВ/м, в багатокільцевому резонаторі з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, – 0,42-1,5 МВ/м у діапазоні НВЧ потужності 100-860 Вт, чого достатньо для виникнення пробою. Запропонований багатокільцевий резонатор з усестороннім збудженням та спільним розрядним зазором, на відміну від звичайного резонатора типу "розрізане кільце", малочутливий до орієнтації вектора магнітного поля, що дозволяє застосовувати його у приладах без чітко заданої поляризації векторів складових НВЧ хвилі відносно площини резонатора і навпаки, він також, на відміну від поширених резонаторів типу "розрізане кільце", розроблений для безпровідного підведення НВЧ живлення від генератора НВЧ, що значно спрощує його використання та розширює спектр його застосувань.
4. Був розроблений, сконструйований та успішно випробовуваний прототип НВЧ резонаторної системи розрядно-камерного типу. На базі результатів, отриманих у ході розрахунків і 3D моделювання розподілу напруженості електромагнітного поля, було визначено геометричні параметри та критичні тиски в НВЧ системі, при яких вдасться досягти пробою газу (аргону) за основного типу хвилі  $H_{11}^*$ . На базі фізико-топологічного 3D моделювання системи у дорозрядний/допробійний період була отримана картина розподілу напруженості електричного поля в НВЧ системі та визначена максимальна напруженість поля, яка знаходилась у діапазоні 140-412 кВ/м при зміні потужності НВЧ

випромінювання магнетрона від 100 Вт до 860 Вт. Практична перевірка розробленої НВЧ системи показала, що у вказаному діапазоні напруженостей електричного поля у розрядній камері, дійсно, має місце явище пробою (виникнення НВЧ розряду).

5. З отриманих результатів розрахунку випливає, що в процесах іонного бомбардування з використанням іонів аргону і більш легкого кисню генеруються значні потоки відбитих (зворотно розсіяних) від поверхонь швидких атомів Ar і O, а це вкрай важливо при прогнозуванні терміну використання складових частин резонаторної камери. Енергія, що передається поверхням елементів резонатора (розрядної камери) відбитими високоенергетичними нейтральними частинками, може створити істотний вплив на відповідні елементи конструкції, тому необхідне врахування відбиття високоенергетичних атомів при проектуванні як резонансних НВЧ систем, так і технологічних процесів, що проводяться з їх використанням.
6. Отримані дані по відбиттю газових частинок від поверхні можуть бути також використані при проектуванні технологічних генераторів пучків нейтральних частинок з нейтралізацією первинного іонного пучка на металевій поверхні, а також при аналізі явищ в плазмових пристроях, де металеві частини та елементи конструкцій бомбардуються прискореними іонами, наприклад, з плазми НВЧ розряду, яка має позитивний потенціал відносно металевих частин пристроїв.
7. Оскільки вплив енергетичних частинок значний, зокрема він може позначитись на вікні між розрядною камерою та хвилеводним трактом, тому діелектричний блок у розрядній камері виконає у складі НВЧ резонатора подвійну функцію: 1 – змістить газовий обсяг в область ЕЦР, 2 – захистить вікно від руйнування під впливом заряджених частинок (у разі вимушеної заміни блока на місце старого буде встановлений новий, а вікно залишиться неушкодженим).

У даний час активатор газу використовується у складі двухмагнетронної розпилювальної установки для проведення досліджень і розробки технології нанесення багат шарових і градієнтних оптичних покриттів.

Результати даних досліджень опубліковані у роботах, які наведені у Додатку №3.

Зроблено висновок, що доцільно розвивати НВЧ резонаторні системи низького і атмосферного тисків з метою різних технологічних застосувань у різних галузях науки і техніки.

Результати дисертаційної роботи можуть бути в подальшому використані в розробках нових високоефективних резонансних НВЧ систем для електронної, радіоелектронної та медичної промисловостей України. Вони також використовуються в навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського. Використання результатів роботи підтверджено листами-довідками організацій і підприємств, які наведені в додатку. Таким чином, розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки наукових і технічних основ побудови і практичного використання резонаторних НВЧ систем у допробійному електричному режимі для технологічної апаратури з поліпшеними показниками.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Б. С. Данилин, Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок, М: Энергоатомиздат, 1989, 328 с.
- [2] Б. С. Данилин и В. Ю. Киреев, Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов, М: Энергоатомиздат, 1987, 263 с.
- [3] Р. К. Яфаров, Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий, М: Физматлит, 2009, 216 с.
- [4] А. П. Достанко и С. В. Бордусов, «Плазменные СВЧ технологии в процессах инженерии поверхности,» *ФИП*, т. 1, № 1, с. 7-18, 2003.
- [5] «TDK Electronics • TDK Europe,» [Онлайновый]. Available: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en>. [Дата звернення: 26 02 2020].
- [6] A. K. Datta and R. C. Anantheswaran, Handbook of microwave technology for food application, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001, 528 p.
- [7] А. И. Кузьмичёв, Магнетронные распылительные системы, Киев: Аверс, 2008, 244 с.
- [8] В. В. Перевертайло, «Применение СВЧ плазмы в технологии микроэлектроники,» в *Конференція молодих вчених «Електроніка-2015»*, Київ, с. 130-133, 2015.
- [9] В. П. Вербій, Сучасні методи обробки харчових продуктів, К: КНТЕУ, 2004, 134 с.
- [10] А. П. Достанко, С. В. Бордусов и И. В. Сवादковский, Плазменные процессы в производстве электронной техники, Минск: ФУАинформ, 2001, 244 с.

- [11] С. В. Бордусов, Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники, Минск: Бестпринт, 2002, 451 с.
- [12] Й. Мусил, *Осадження тонких плівок з використанням мікрохвильової плазми. Сучасний стан і тенденції розвитку*, Звенигород: Презентація на міжнародному семінарі по мікрохвильовій плазмі та її застосуванню, 1994.
- [13] О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичёв и В. В. Перевертайло , «Безэлектродный активатор реакционного газа для тонкоплёночной оптической технологии,» *IX Международная научно-техническая конференция "Вакуумная техника, материалы и технология"*, с. 30-33, 2014.
- [14] О. Д. Вольпян, А. И. Кузьмичёв и А. С. Самокиш, «Современные оптические плёночные покрытия,» *Электроника и связь*, т. 5, № 46, с. 5-19, 2008.
- [15] О. Д. Вольпян и А. И. Кузьмичёв, «Дизайн и технология прецизионных многослойных и градиентных оптических покрытий, их применение,» *21-ый международный симпозиум "Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике"*, с. 397-414, 2008.
- [16] А. И. Кузьмичёв, Н. А. Бабинов и А. А. Лисенков, Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц, Киев: Аверс, 2016, 181 с.
- [17] С. Браун, Элементарные процессы в плазме газового разряда, М: Гос. изд-во лит в обл. атомной науки и техники, 1961, 323 с.
- [18] J. R. Roth, *Industrial Plasma Engineering*, UK: IOP Publishing Ltd., 1995, 542 p.
- [19] Л. А. Арцимович, Элементарная физика плазмы, М: Госатомиздат, 1963, 192 с.

- [20] J. D. Kraus, *Antennas*, New Delhi: Tata McGraw-Hill, Inc., 1997, 895 p.
- [21] C. A. Balanis, *Antenna theory. Analysis and design*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, 1104 p.
- [22] R. C. Johnson, *Antenna engineering handbook*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1993, 1392 p.
- [23] C.-C. Chen, A. T. Y.-H. Ashikawa and M.-H. Shiao, "Uniaxial-isotropic metamaterial by three-dimensional split-ring resonators," *Advanced optical materials*, pp. 1-5, 2014.
- [24] О. Д. Вольпян и А. И. Кузьмичёв, *Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов*, Киев: Аверс, 2012, 360 с.
- [25] S. J. Silkey and P. Smereczniak, "Systems and methods for controlling flows with pulsed discharges". USA Patent 8,220,753, 17 July 2012.
- [26] V. Khozikov, S. Liu and G. M. Roe, "Active directional control of airflows over rotorcraft blades using plasma actuating cascade arrays". USA Patent 8,157,528, 17 April 2012.
- [27] S. L. Schwimley and J. S. Silkey, "Plasma flow control actuator system and method". USA Patent 8,016,247, 13 September 2011.
- [28] S. L. Schwimley and D. V. Drouin Jr., "Plasma actuator system and method for use with a weapons bay on a high speed mobile platform". USA Patent 8,016,246, 13 September 2011.
- [29] B. A. Osborne and C. D. Wilson, "Airfoil trailing edge plasma flow control apparatus and method". USA Patent 7,988,101, 2 August 2011.

- [30] R. B. Miles, S. O. Macheret, M. Shneider, A. Likhanskii and J. S. Silkey, "Systems and methods for controlling flows with electrical pulses". USA Patent 7,744,039, 29 June 2010.
- [31] А. И. Белоус, В. А. Солодуха и С. В. Шведов, Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств, М.: Техносфера, 2017, 872 с.
- [32] «Cold Plasma Technology,» TDK Electronics, [Онлайновый]. Available: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/2307668/products/product-catalog/cold-plasma-technology>. [Дата звернення: 26 02 2020].
- [33] А. М. Ефремов, В. И. Светцов и В. В. Рыбкин, Вакуумно-плазменные процессы и технологии, Иваново: ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2006, 260 с.
- [34] «Plasma Etch. Progress through innovation,» [Онлайновый]. Available: [https://www.plasmaetch.com/?gclid=EAIaIQobChMI4KHF4YrN6gIVj6myCh0IPwZCEAAAYASAAEgLI\\_\\_D\\_BwE](https://www.plasmaetch.com/?gclid=EAIaIQobChMI4KHF4YrN6gIVj6myCh0IPwZCEAAAYASAAEgLI__D_BwE). [Дата звернення: 14 Травень 2020].
- [35] J. R. Brandon, I. Friel, M. A. Cooper, G. A. Scasbrook and B. L. Green, "A microwave plasma reactor for manufacturing sytheticdiamond material". США Patent US 2017/0040145 A1, 09 02 2017.
- [36] G. A. Scarsbrook, J. J. Wilman, J. M. Dodson, J. R. Brandon, S. E. Coe and C. J. H. Wort, "Microwave plasma reactor for manufacturing sythetic diamond material". США Patent US 9,410,242 B2, 09 08 2016.
- [37] Y.-C. Hong, "Microwave plasma torch". США Patent US 2017/0095787 A1, 06 04 2017.
- [38] Y. Ohgoshi, M. Morimoto, Y. Oohirabaru and T. Ono, "Plasma processing apparatus". США Patent US 2017/0040143 A1, 09 02 2017.

- [39] T. Komatsu, T. Ikeda and S. Kasai, "Antenna for plasma generation, plasma processing apparatus and plasma processing method". США Patent US 9,552,966 B2, 24 01 2017.
- [40] T. Harada, E. Hara and T. Ikeda, "Microwave plasma source and plasma processing apparatus". США Patent US 2017/0032933 A1, 02 02 2017.
- [41] T. Wada, "Plasma processing method and plasma processing apparatus". США Patent US 9,583,317 B2, 28 02 2017.
- [42] «НПП "Плазменные технологии",» [Онлайновый]. Available: [www.plasmatech.com.ua](http://www.plasmatech.com.ua). [Дата звернення: 12 03 2020].
- [43] О. Симонов, «Технология плазменной очистки при микросборке,» *Печатный монтаж*, № 3, с. 148-152, 2016.
- [44] М. В. Акулова, Применение тлеющего разряда в текстильной и строительной, Иваново: Иван. гос. хим.-техн., 2008, 232 с.
- [45] «Diener Electronic – плазменная обработка,» Diener Electronic, [Онлайновый]. Available: <https://www.plasma.com/>. [Дата звернення: 29 02 2020].
- [46] В. И. Крижановский и А. И. Кузьмичёв, «Воспроизводимость генерации озона в коронном разряде с острийными электродами,» *Известия академии наук*, т. 64, № 12, с. 1302-1306, 2000.
- [47] А. И. Кузьмичев, Атомно-спектральный анализ, Киев: НТУУ «КПИ», 2000, 83 с.
- [48] А. И. Кузьмичёв, В. В. Перевертайло и А. В. Мумладзе, «СВЧ газоразрядный светильник на парах серы,» *Электроника и связь*, т. 20, № 5(88), с. 15-21, 2015.

- [49] А. И. Кузьмичёв та В. В. Перевертайло, «Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ разряда,» в *IX-а науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки"*, Київ, с. 31-36, 2015.
- [50] V. Perevertailo and A. Kuzmichev, «Microwave sulfur vapor lamp for everyday life: public and agricultural lightning,» в *Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження"*, Івано-Франківськ, pp. 111-112, 2017.
- [51] Р. А. Жидков и В. В. Малышев, «Плазменный облучатель для выращивания зеленных культур в теплицах,» *Вестник ВИЭСХ*, т. 10, № 1, с. 45-47, 2013.
- [52] О. Ю. Александрова, С. М. Бондаренко, Э. М. Гутцайт та Р. А. Жидков, «Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ-разряда,» *Технологии информационного общества. Т-Сотт*, № 9, с. 9-11, 2013.
- [53] Р. А. Жидков, «Облучатель с серной лампой для растениеводства,» в *Всероссийская научная конференция «Проблемы СВЧ Электроники»: сб. начн. трудов*, с. 65-67, 2013.
- [54] Р. А. Жидков, «Камерные, погружённые и антенно-облучательные бактерицидные устройства комбинированного воздействия СВЧ-УФ-излучений и озона,» *Высоковольтная вакуумно-плазменная электроника: сб. трудов ВЭИ*, с. 216-220, 2008.
- [55] Г. Н. Рохлин, *Справочная книга по светотехнике*, Под ред. Айзенберга Ю.Б., Ред., М: Знак, 2006, 972 с.
- [56] А. Н. Диденко, А. В. Прокопенко та А. Ю. Щукин, «Высокоэффективная серная лампа малой мощности,» *Светотехника*, № 5, с. 22–24, 2009.

- [57] В. Е. Голант, «Газовый разряд на сверхвысоких частотах,» *УФН*, т. 65, № 1, с. 39-86, 1958.
- [58] Ю. П. Райзер, Физика газового разряда, М: Наука, 1992, 536 с.
- [59] А. І. Кузьмичев та В. В. Перевертайло, «Генерація надвисокочастотної плазми за допомогою еванесцентних хвиль,» *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, т. 22, № 6(101), с. 12-17, 2017.
- [60] А. І. Кузьмичев та В. В. Перевертайло, «НВЧ генератори плазми на базі еванесцентних хвиль,» в *XI-а науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки"*, Київ, с. 28-33, 2017.
- [61] И. Мак-Даниель, Процессы столкновений в ионизированных газах, М: Мир, 1967, 832 с.
- [62] Ю. Королёв, Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме, Томск: Томский политехнический институт, 2008, 128 с.
- [63] A. D. MacDonald and S. C. Brown, "High-frequency gas-discharge breakdown in Helium," *Massachusetts Institute of Technology, Research Laboratory of Electronics*, vol. Technical Report No. 86, p. 16, 23 October 1948.
- [64] А. Мак-Доналд, Сверхвысококачественный пробой в газах, П. р. М. Рабиновича, Ред., М: Мир, 1969, 213 с.
- [65] В. А. Лисовский, «Критерий пробоя газа в СВЧ поле,» *ЖТФ*, т. 69, № 11, с. 25-29, 1999.
- [66] Ю. П. Райзер, Основы современной физики газоразрядных процессов, М: "Наука", 1980, 416 с.
- [67] А. Н. Диденко, СВЧ-энергетика: Теория и практика, М: Наука, 2003, 446 с.

- [68] I. Kolev and R. Bogaerts, "Influence of electron recapture by the cathode upon the discharge characteristics in DC magnetrons," *Phys. Rev. E.*, vol. Vol. 72, pp. 056402-(1-11), 2005.
- [69] В. Д. Дугар-Жабон и Б. А. Кондратов, «Формирование амбиполярных барьеров в СВЧ-разряде низкого давления в неоднородном магнитном поле,» в *Материалы 9 конференции молодых ученых: Математика, физика, химия*, с.74-76, 1986.
- [70] Я. Д. Ширман, Радиоволноводы и объемные резонаторы, М: Связьиздат, 1959, 380 с.
- [71] С. И. Мадвейко, С. В. Бордусов и М. С. Лушакова, «Анализ условий возбуждения СВЧ-разряда низкого вакуума в плазмотроне резонаторного типа,» *Доклады БГУИР*, т. 94, № 8, с. 44-50, 2015.
- [72] Б. М. Бржозовский, С. Г. Гестрин, Е. П. Зинина и В. В. Мартынов, «Упрочнение поверхностного слоя металлических изделий воздействием плазмы комбинированного газового разряда,» *Журнал технической физики*, т. 87, № 12, с. 1857-1864, 2017.
- [73] Э. Д. Шлифер, Ред., СВЧ-энергетика. Т. 1: Генерирование. Передача. Выпрямление. Под ред. Э. Окресса, т. Т.1, М: Мир, 1971, 464 с.
- [74] В. В. Никольский, Теория электромагнитного поля, М: Государственное издательство «Высшая школа», 1961, 372 с.
- [75] Б. М. Петров, Электродинамика и распространение радиоволн, М: Горячая линия - Телеком, 2007, 558 с.
- [76] И. В. Лебедев, Техника и приборы СВЧ, М: "Высш. школа", 1970, 440 с.
- [77] С. И. Баскаков, Электродинамика и распространение радиоволн, М: Высшая школа, 1992, 416 с.

- [78] И. И. Гроднев и С. М. Верник, Линии связи, М: Радио и связь, 1988, 544 с.
- [79] І. В. Гордієнко, Пристрої НВЧ та антени, Дніпро: Коледж радіоелектроніки, 2017, 207 с.
- [80] Н. В. Плешивцев и А. И. Бажин, Физика воздействия ионных пучков на материалы, М: Вузовская книга, 1998, 392 с.
- [81] О. Д. Вольпян и А. И. Кузьмичёв, «Наноградиентные оптические покрытия,» *Российский химический журнал*, т. 56, № 1-2, с. 58-69, 2012.
- [82] А. І. Кузьмичев, С. Б. Сидоренко та О. М. Бевза, Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу – Технологічні основи електроніки для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої», Київ: НТУУ «КПІ», 2013, 53 с.
- [83] «Оптический профилометр KLA-Tencor MicroXAM-1200,» [Онлайновий]. Available: <https://theseuslab.by/p66089289-opticheskiy-profilometr-kl.html>. [Дата звернення: 12 09 2019].
- [84] «CST STUDIO SUITE 2017 Technology Highlights (America),» [Онлайновий]. Available: <https://www.3ds.com/events/single-eseminar/cst-studio-suite-2017-technology-highlights-america/>. [Дата звернення: 10 June 2017].
- [85] «Фізичні таблиці,» [Онлайновий]. Available: <https://www.slideshare.net/ssuser89a9ee/ss-70148616>. [Дата звернення: 18 09 2018].
- [86] «Material properties of carbon steel, aluminium and stainless steel,» [Онлайновий]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Material-properties-of-carbon-steel-aluminium-and-stainless-steel\\_tb11\\_245409132](https://www.researchgate.net/figure/Material-properties-of-carbon-steel-aluminium-and-stainless-steel_tb11_245409132). [Дата звернення: 18 09 2018].

- [87] Т. М. Демків, О. І. Конопельник та Я. І. Шопа, *Основи теорії похибок фізичних величин*, Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2008, 40 с.
- [88] «Строение АБС-пластика, свойства,» [Онлайновый]. Available: <https://polymers.com.ua/строение-абс-пластика-свойства-абс-пл/>. [Дата звернення: 17 02 2019].
- [89] Ю. В. Прокопенко и П. Ю. Сергиенко, «Кольцевой микрополосковый резонатор с микромеханической перестройкой частоты,» *Электроника и связь*, т. 4, с. 23-27, 2012.
- [90] «Фторопласт - 4 (PTFE, ПТФЕ - політетрафторетилен),» [Онлайновый]. Available: <https://santex-kiev.com.ua/plasmass/ftoroplast>. [Дата звернення: 17 02 2019].
- [91] I. Felipe and J. A. Hopwood, "Low-Power Microwave Plasma Source Based on a Microstrip Split-Ring Resonator," *IEEE Transactions On Plasma Science*, vol. 31, no. 4, pp. 782-787, August 2003.
- [92] M. Taghioskoui, J. Perlow, M. Zaghoul and A. Montaser, "Generation of ultrahigh frequency air microplasma in a magnetic loop and effects of pulse modulation on operation," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 19, pp. 191502-191502-3, May 2010.
- [93] M. Taghioskoui and M. Zaghoul, "U-Shaped Ultrahigh Frequency Atmospheric Pressure Plasma Jet With Magnetic Loop Antenna," *IEEE Transactions On Plasma Science*, vol. 45, no. 1, pp. 43-53, January 2017.
- [94] Л. П. Грачев, И. И. Есаков, П. Б. Лавров и А. А. Раваев, «Индукционное поле электромагнитного вибратора, расположенного над помещенным в сверхвысокочастотный пучок проводящим экраном,» *ЖТФ*, т. 82, № 2, с. 73-78, 2012.

- [95] Л. П. Грачев, И. И. Есаков, А. А. Раваев и Л. Г. Северинов, «Инициация электрического пробоя газа в поле бегущей вдоль металлической поверхности сверхвысокочастотной волны,» *ЖТФ*, т. 88, № 7, с. 1000-1003, 2018.
- [96] "2M214 model magnetron spec. LG Electronics Inc.," [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/mobile-pdf/853105/LG/2M214-21GKH.html>. [Accessed 12 04 18].
- [97] «Comsol® Multiphysics,» [Онлайновый]. Available: [www.comsol.com](http://www.comsol.com). [Дата звернення: 8 12 2019].
- [98] W. Frei, «Guide to Frequency Domain Wave Electromagnetics Modeling,» [Онлайновый]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/guide-to-frequency-domain-wave-electromagnetics-modeling/>. [Дата звернення: 19 07 2018].
- [99] «Automated Meshing for Electromagnetic Waves, Frequency Domain Simulations,» [Онлайновый]. Available: <https://www.comsol.eu/video/automated-meshing-electromagnetic-waves-frequency-domain-simulations>. [Дата звернення: 19 07 2018].
- [100] P. L. Skriskii and e. at., "Structural and mechanical properties of TIN/BCN," *Powder Metallurgy Metal Ceram.*, vol. 52, no. 1, pp. 73-82, 2013.
- [101] J. Musil, "Properties of hard nanocomposite thin films," *Nanocomposite Thin Films and Coatings: Processing, Properties and Performance*. London, U.K.: Imperial College Press, pp. 281-328, 2007.
- [102] A. Kuzmichev, V. Perevertaylo, L. Tsybulsky and O. Volpian, "Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment," *Journal of Physics*, vol. 729, pp. 012005(1-5), 2016.

- [103] А. І. Кузьмичёв та В. В. Перевертайло, «Моделювання плазмових джерел швидких нейтралів,» в *Матеріали X науково-практичної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки"*, Київ, с. 33-40, 2016.
- [104] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, "A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets," *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, vol. 174, pp. 257-269, 1980.
- [105] В. Экштайн, Компьютерное моделирование взаимодействия частиц с поверхностью твёрдого тела, М: Мир, 1995, 321 с.

## **ДОДАТКИ**

### **Д.1. ДОКУМЕНТИ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Використання і впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджують акт КПП ім. Ігоря Сікорського та листи-довідки від організацій і підприємств:

кафедра електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

ПрАТ «РОКС» (м. Київ),

ТОВ «ЮМТ» (м. Київ).

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор КПІ ім. Ігоря Сікорського  
академік НАН України,  
д.т.н., проф. Якимівко Ю.І.


Вихідний № \_\_\_\_\_  
від « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.


### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
випускника аспірантури кафедри електронних пристроїв та систем Національного  
технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» Перевертайла В.В. у навчальному процесі

Ми, що нижче підписалися, декан факультету електроніки КПІ ім. І. Сікорського д.т.н., проф. Жуйков В.Я., зав. кафедрою електронних пристроїв та систем д.т.н., проф. Ямненко Ю.С., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., склали цей Акт про те, що результати дисертаційної роботи Перевертайла В.В. «Резонансні надвисокочастотні системи у допробійному електричному режимі» впроваджені у навчальний процес кафедри електронних пристроїв та систем. У дисциплінах «Технологічні основи електроніки» та «Технологія виробництва електронної техніки» відображені схемотехнічні рішення, принципи побудови та характеристики резонаторних НВЧ систем, розділи «Іонно-плазмова та плазмохімічна апаратура і технологія для обробки поверхні підкладок». У дисципліні «Плазмова та імпульсна електроніка» відображені методи поширення електромагнітної енергії та способи отримання високоенергетичних заряджених та нейтральних частинок, розділи «Види плазмових газових розрядів; НВЧ розряди, електродні та безелектродні розряди».

Декан факультету електроніки  д.т.н., проф. Жуйков В.Я.

Зав. каф. електронних пристроїв та систем  д.т.н., проф. Ямненко Ю.С.

Професор каф. електронних пристроїв та систем  д.т.н., Кузьмичев А.І.



ВХ.№ \_\_\_\_\_ від "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2019р.

**ПрАТ "РОКС"**

 03148, м. Київ-148,  
вул. Героїв Космосу, 2Б  
тел/ факс +38 (044) 407-25-25  
email: [info@roks-tv.com](mailto:info@roks-tv.com)  
[www.roks-tv.com](http://www.roks-tv.com)

## ДОВІДКА

про застосування результатів  
науково-дослідної роботи

У період 2017-2019 рр. аспірант кафедри електронних приладів та пристроїв факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського Перевертайло Володимир Володимирович приймав участь у наших пошукових і експериментально-технічних роботах у якості наукового співробітника.

Методика та результати тривимірного моделювання хвильового та резонаторного трактів надвисокочастотного генератора плазми, запропоновані Перевертайлом В.В., були успішно застосовані у виробництві та наступних проектах компанії:

- 1) НДІ радіолокаційних систем «Квант-Радіолокація» дог.№79К/2017 (10.04.17)
- 2) Служба зовнішньої розвідки України дог.№548/18 (02.08.18)
- 3) Національний центр управління та випробувань космічних засобів дог.№167/13/11 (13.11.18)
- 4) ПрАТ «Датагруп» дог.№ДГ-РОКС-04-19 (12.04.19)
- 5) ТОВ «Альтаір» дог.№19/2019 (04.10.19)

Голова правління ПрАТ "РОКС"

Ксьонзенко П.Я.





**ТОВ «ЮКРЕЙНІЕН МАЙКРОВЕЙВ ТЕКНОЛОДЖІЗ»**  
**ЄДРПОУ 41386708**

тел. (099) 184 34 30, (050) 330 77 99. email: info@umt-tv.com

сайт: www.umt-tv.com

Юридична адреса:

03148, м. Київ, вул. Василя Верховинця, буд. 10

р/р № 26006053012142 в ПАТ КБ «ПРИВАТБАНК», МФО 321842 ІПН 413867026572

Вих. № 0110 від 10.08.2019р.

## Д О В І Д К А

про впровадження результатів  
науково-дослідної роботи

У період 2018-2019 рр. аспірант кафедри електронних приладів та пристроїв факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Перевертайло Володимир Володимирович приймав участь у науково-технічних, дослідних і технологічних роботах нашої компанії у якості наукового співробітника і консультанта.

Методика дослідження та результати комп'ютерного моделювання резонаторів хвилеводного типу та типу «розрізане кільце» з поперечним електричним полем, запропоновані Володимиром Володимировичем, були успішно застосовані у проектах згідно наступних контрактів:

- контракт №3 від 08.02.18 з компанією DSL-Elektronika d.o.o. (Боснія та Герцеговина, Модріца);
- контракт №9 від 30.05.2018р. з компанією MM Comunicaciones SA (Аргентина, Санта Фе);
- контракт №5 від 27.03.2019р з компанією JSC Silknet, Грузія, Тбілісі;
- контракт №13 від 08.07.2019р. з компанією Telecom cable fibra sl, Іспанія, Аліканте;
- договір №17 від 07.08.19р. з ТОВ «АЙ СІЕМ ГРУП», Україна, Київ.

Директор ТОВ «ЮМТ»



Кухоль Є.М.

## Д.2. ДОКУМЕНТИ ПРО ЗАХИСТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 141893

ВСЕСПРЯМОВАНА ІНДУКТИВНА АНТЕНА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.04.2020**.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Д.О. Романович



### Д.3. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kuzmichev A.I. Magnetron Sputtering System for Deposition of Multi-Nanolayered Coatings with Reactive Gas Activation in Microwave Discharge / A.I. Kuzmichev, V.I. Ivashchenko, V.V. Perevertailo, P.L. Skrynskyi // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Vol. 44. – No. 12. – P. 3028-3031.
2. Kuzmichev A. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment / A. Kuzmichev, V. Perevertaylo, L. Tsybulsky, O. Volpian // Journal of Physics – 2016. – Vol. 729. – P. 012005(1-5).
3. Вольпян О.Д. Безэлектродный активатор реакционного газа для оптической тонкопленочной технологии / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // Наноинженерия. – 2014. – № 9. – С.11-16.
4. Kuzmichev A.I. 3D simulation of the microwave low-temperature plasma generator / A.I. Kuzmichev, V.V. Perevertailo // The report of the Scientific Council "Plasma Physics and Plasma Electronics". – 2016. – P.49
5. Перевертайло В.В. Моделювання надвисокочастотного генератора плазми / В.В. Перевертайло // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2018. – Т. 23. – №1(102). – С.16-22.
6. Perevertailo V. Microwave plasma generator / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // "Інновації в науці та техніці": proceeding of the XI International R&D Students Conference. – 2013. – Part II.– 300 p.
7. Кузьмичёв А. И. СВЧ газоразрядный светильник на парах серы / А. И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло, А.В. Мумладзе // Электроника и связь. – 2015. – Том 20, №5(88). – С.15-21.
8. Кузьмичёв А. І. Генерація надвисокочастотної плазми за допомогою еванесцентних хвиль / А.І. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло //

- Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2017. – Том 22, №6(101) – С.12-17.
9. Кузьмичёв А.И. Магнетронное распыление с ассистированием плазмой СВЧ разряда / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло, В.И. Иващенко, П.Л. Скрынский // 12-я международная научно-техническая конференция "Быстрозакалённые материалы и покрытия". Сборник трудов в 2-х томах. – 2013. – Т.1. – С. 204-209.
  10. Вольпян О.Д. Безэлектродный активатор реакционного газа для тонкопленочной оптической технологии / О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // Материалы IX Международной конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». – 2014 – С. 30-33.
  11. Перевертайло В.В. Дослідження можливостей моделювання НВЧ генератора плазми у середовищі Comsol Multiphysics / В.В. Перевертайло, С.О. Майкут // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених "Електроніка-2017". – 2017. – 25-27 квітня, Київ. – С.103-107.
  12. Perevertailo V. Simulation of microwave plasma generator of waveguide-resonator type / Volodymyr Perevertailo, Anatoly Kuzmichev // XIII International Conference "Electronics and Applied Physics". Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. – 2017. – P. 178-179.
  13. Perevertailo V.V. Microwave field simulation in waveguide-resonator system for gas discharge ignition / V.V. Perevertailo, A.I. Kuzmichev // II Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження". – 2018. – С. 112.
  14. Кузьмичёв А.И. Моделирование плазмовых джетов быстрых нейтралей / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло. – Материалы X научно-практической конференции "Перспективные направления современной электроники". – 2016. – Київ, 7-8 квітня. – С. 33-40.

15. Kuzmichev A.I. Simulation of fast neutral atom source with microwave plasma unit / A.I. Kuzmichev, V.V. Perevertailo. – In The report of the Scientific Council "Plasma Physics and Plasma Electronics". – 2015. – НАНУ. – С. 32.
16. Perevertailo V. Microwave plasma generator / V. Perevertailo // Proceeding of the XI International R&D Students Conference. National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». – 2013. – Part II. – Kyiv. – 300 p.
17. Perevertailo V. The device on the evanescent microwaves for generation of gas discharge plasma / V. Perevertailo // Матеріали XIII міжнародної студентської науково-практичної інтернет-конференції “Innovations in science and technology” (“Інновації в науці та техніці”) – 2014. – 1-10 грудня. – Київ.
18. Применение СВЧ плазмы в технологии микроэлектроники / // VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених "Електроніка-2015". – 2015. – Київ, 15-17 квітня. – С.130-133.
19. Perevertailo V. Holey-plate plasma source for ion-plasma surface treatment of semiconductor wafers based on evanescent wave / V. Perevertailo // Матеріали XIV міжнародної студентської науково-практичної інтернет-конференції “Innovations in science and technology”. 2015. – Київ.
20. Perevertailo V. Microwave power application in plasma light technology / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // International Scientific and Technical Conference «Radioengineering Fields, Signals, Devices and Systems». 2017. – March 20– 26. – Kyiv. – P.78-80.
21. Perevertailo V. Microwave sulfur vapor lamp for everyday life: public and agricultural lightning / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // Міжнародна науково-практична конференція "Прикладні науково-технічні дослідження". – 2017. – 5-7 квітня, Івано-Франківськ. – С. 111-112.
22. Perevertailo V. Low-temperature plasma simulation in microwave generator / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // II Міжнародна науково-практична

- конференція «Прикладні науково-технічні дослідження». – 2019. – 3-5 квітня, Івано-Франківськ. – С. 116-117.
23. Perevertailo V. Omnidirectional magnetic loop antenna / V. Perevertailo, A. Kuzmichev // Applied scientific and technical research. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. In Two Volumes. – 2020. – April 1-3, Ivano-Frankivsk. – V.2. – P. 88.
24. Козлов С.С. Повышение безопасности при работе с СВЧ приборами и обнаружение локальных участков СВЧ излучений / С.С. Козлов, А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки Збірник матеріалів одинадцятої всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів). «Основа». – 2014. – 11-13 листопада, Київ.
25. Перевертайло В.В. Застосування плазми НВЧ розряду як перспективний напрям обробки напівпровідникових поверхонь і нанесення покриттів складного складу / В.В. Перевертайло // XII Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених "Молодь: освіта, наука, духовність". У двох частинах. – 2015. – 21–22 квітня, Київ. – Університет «Україна». – Частина II.
26. Кузьмичев А.И. Применение СВЧ энергии в ионно-плазменной технологии / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // VIII-а науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки”. – 2014. – 14-15 травня, Київ.
27. Кузьмичев А.И. Плазменные осветительные устройства на основе СВЧ разряда / А.И. Кузьмичёв, В.В. Перевертайло // IX-а науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки”. – 2015. – 13-14 травня, Київ, С.31-36.
28. Перевертайло В.В. Проблеми моделювання генерації НВЧ плазми та її застосування у електроніці та світловій техніці / В.В. Перевертайло // XX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Дні науки ФСП: «Людина у вимірах

- сучасних суспільних трансформацій». – 2017. – 20-21 квітня, Київ. – С.29-30.
29. Перевертайло В.В. НВЧ генератори плазми на базі еванесцентних хвиль / В.В. Перевертайло, А.І. Кузьмичев // XI-а науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки”. – 2017. – 6-7 квітня, Київ. – С.28-33.
30. Перевертайло В.В. Новий аспект розвитку антенних структур: від рамкових антен до кільцевих резонаторів та електромагнітних метаматеріалів / В.В. Перевертайло, А.І. Кузьмичев // XII-а науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки”. – 2018. – 19-20 квітня, Київ. – С.20-26.
31. Перевертайло В.В. Дослідження резонатора типу "розрізане кільце" для застосування у плазмовій технології / В.В. Перевертайло, А.І. Кузьмичев // XII-а науково-практична конференція “Перспективні напрямки сучасної електроніки”. – 2019. – 19-20 квітня, Київ. – С.20-26.