

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 багатошарового 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 pre-design 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. Skryn'skyi // 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.