

УДК 621.38

## Дослідження резонатора типу "Розрізане кільце" для застосування у плазмовій технології

*Перевертайло В.В., проф., д.т.н., Кузьмичев А.І.*

Можливості застосування плазми у наукових дослідженнях та промисловості охоплюють досить широкий діапазон, зокрема: хімічний синтез, видозміна поверхні матеріалів, контроль забруднень повітря та води, хіміко-фізичний аналіз та ін. Плазмові технології, як показав досвід, відзначаються істотними добре відомими перевагами [1].

Відомі різні методи отримання плазми. Перспективним є спосіб отримання – за допомогою НВЧ енергії [1-4]. Важливими особливостями методу є відсутність електродів, що контактують із реакційним газом, підвищення чистоти оброблюваної поверхні; можливість безпровідного підведення енергії; наявність промислових джерел НВЧ енергії; відносна простота конструкції НВЧ генераторів... Зазвичай застосовують хвилеводні резонаторні НВЧ системи. У хвилеводних пристроях енергія електромагнітного поля підводиться до газу за допомогою прямокутних або циліндричних хвилеводів, а також – за допомогою коаксіальних ліній.

Крім хвилеводних, великий інтерес представляють системи, побудовані на основі кільцевих резонаторів, тобто резонаторів типу "розрізане кільце" [2-4]. Їх особливістю є можливість концентрації електричного поля у області розрізу кільця, де вдається отримати велику напруженість поля. Це перспективно для роботи за високих тисків (~100 кПа), коли мають місце часті зіткнення електронів з нейтральним газом і потрібні високі напруженості електричного поля. Разом з тим високі тиски цікаві тим, що при них можна вести зручні технологічні процеси плазмової обробки. Резонатор типу "розрізане кільце" представлений на рис. 1, у нього виток – це індуктивність  $L$ , а розріз – ємність  $C$ , як у звичайного коливального контуру. Резонансна частота  $f_{\text{рез}}$  визначається за відомою формулою у випадку нехтування хвилевими процесами:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

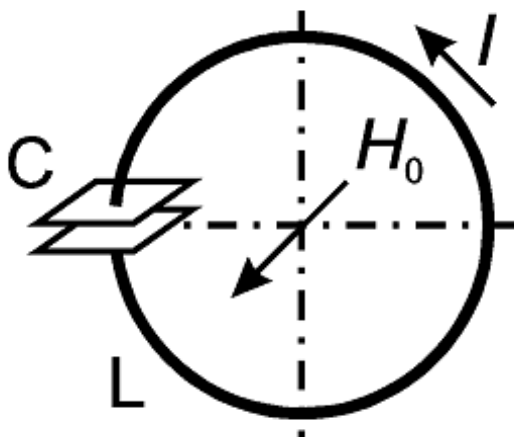


Рис. 1. Приклад найпростішого НВЧ резонатора типу "розрізане кільце"

Коливання у резонаторі можливо викликати магнітним полем  $H_0$ , слові лінії якого перетинають площину витка, у якому виникає електричний струм  $I$ .

Зараз резонатор типу "розрізане кільце" починає широко застосовуватись не тільки для радіотехнічних цілей, але і у плазмовій техніці для генерації плазми [2-4]. Підвід енергії у відомих системах, описаних у [2-4], застосовувався електричний. Але на нашу думку це не є єдиним способом для підведення енергії, можливі і інші варіанти, зокрема, для випадку обробки матеріалів у газоплазмовому середовищі значного об'єму. Для цього необхідно створення об'ємної структури для генерації плазми з використанням великої кількості резонаторів, певним чином розміщених у НВЧ камері, та застосування одного джерела НВЧ енергії, який одночасно буде

збуджувати низку кільцевих резонаторів. І якраз цей метод, як нам відомо, поки що не вивчений та у літературі не представлений. Таким чином, новизна і мета нашої роботи – дослідження резонатора типу "розрізане кільце" для застосування у об'ємних плазмових технологічних пристроях із безпроводним підведенням НВЧ енергії.

Відповідно цьому система, у якій передбачається дослідження та використання резонаторів типу "розрізане кільце", повинна бути значного розміру (не менше 3-10  $\text{дм}^3$ ) щоб у ній можна було розмістити певну кількість резонаторів. В такому випадку на частоті 2,45 ГГц буде реалізовуватися режим багатомодової НВЧ хвилі. З практичної точки зору для проведення наших досліджень відмінно підходить камера і НВЧ система печі «Електроника», до складу якої входить НВЧ генератор – магнетрон типу М105 потужністю 700 Вт. У подальшому на базі такої печі можна створити системи для об'ємної плазмової обробки.

Спочатку було проведено 3D моделювання поля у НВЧ печі «Електроника» у середовищі COMSOL Multiphysics® [5]. НВЧ хвиля, потрапляючи у НВЧ камеру за допомогою хвилеводного підводу енергії (див. рис. 2), створює електромагнітне поле, яке певним чином орієнтується в об'ємі (розміри НВЧ камери в сантиметрах та результати моделювання

представлені на рис. 2). Бачимо, напруженість електричного поля розподілялась неоднорідно, її середня напруженість поля була невисока, але, як пізніше показав експеримент, у таких умовах зосередженої напруженості поля в

області ємнісного зазору резонатора вдалось отримати достатньо для генерації плазми (фотографія представлена на рис. 7, на якому умовно штриховою лінією показано місце розташування досліджуваного резонатора).

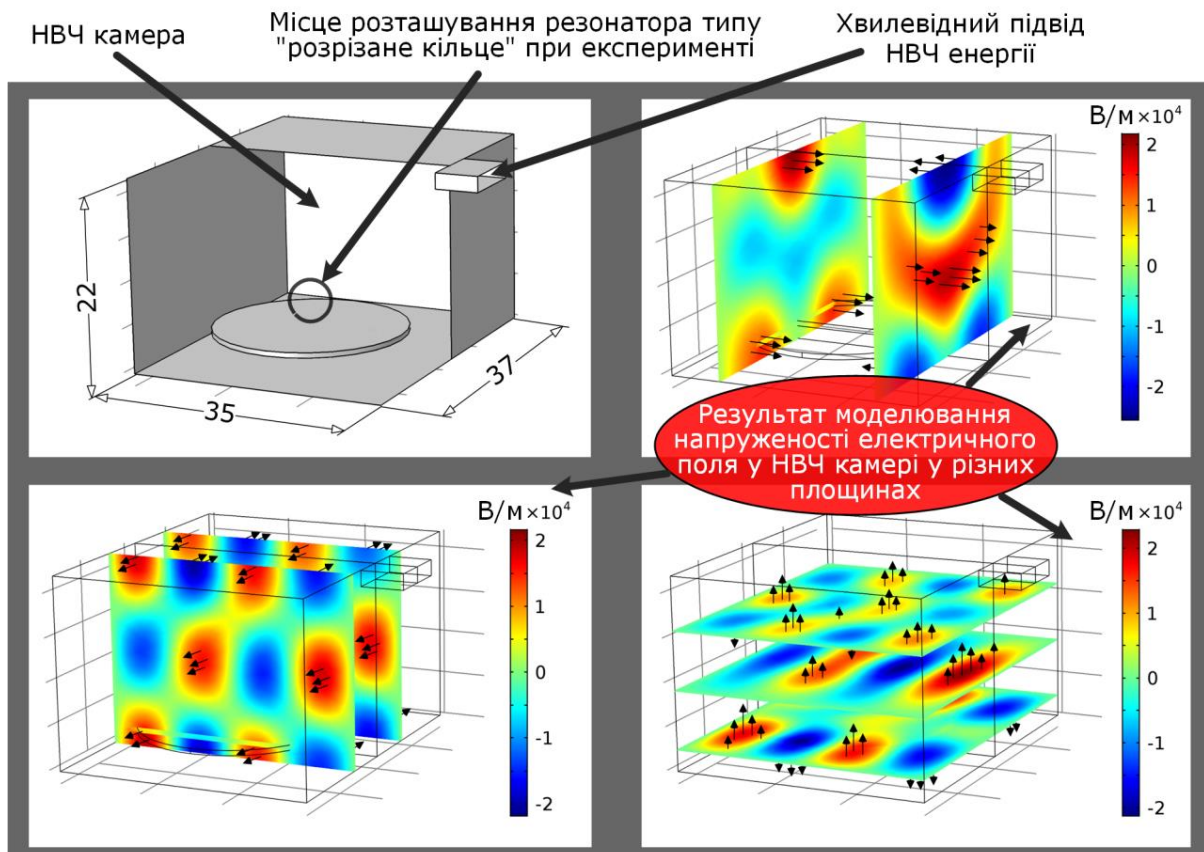


Рис. 2. Результат 3D моделювання напруженості електричного поля у НВЧ камері, у якій проводились дослідження по генерації плазми за допомогою резонатора типу "розрізане кільце". Розміри наведені в сантиметрах.

Далі розв'язувалося питання проектування резонаторів типу "розрізане кільце". Тільки після цього можна конструювати всю систему з камерою об'ємної обробки плазмою при атмосферному тиску на базі них.

Для дослідження резонаторів можна застосовувати різні підходи. У наш час загальноприйнято, що на ряду з експериментальними гарно

проводити дослідження у віртуальних лабораторіях, зокрема у програмному середовищі COMSOL Multiphysics® (в якому були отримані результати 3D моделювання напруженості електричного поля у НВЧ камері, які представлені на рис. 2).

Визначимо зв'язок геометрії кільця з його резонансною частотою. Спочатку визначимо

довжину провідника кільця. Вона напряму зв'язана із резонансною довжиною хвилі  $\lambda_{рез}$ , яка є максимальною довжиною хвилі, здатною поширюватись вдовж витка, у нашому випадку у повітряному середовищі чи вакуумі. Загальновідомо  $\lambda_{рез}$  визначається наступним чином:

$$\lambda_{рез} = c / f_{НВЧ} = 2 \cdot l_{рез}$$

де  $c$  – швидкість світла ( $\approx 3 \cdot 10^8$  м/с),  $f_{НВЧ}$  – частота генератора НВЧ,  $l_{рез}$  – довжина резонатора.

Наступним етапом було обчислення параметра  $S_{11}$  матриці розсіювання, яке проводилось у модулі електромагнітних хвиль COMSOL Multiphysics® (рис. 3). Діапазон частот розрахунку 1...4 ГГц. Потужність НВЧ 1 Вт. Середовище – вакуум. Матеріал резонатора – алюміній з електропровідністю  $3,56 \cdot 10^7$  См/м. Розрахований  $D_{теор.}$  (1,950 см,  $l_{рез} = \pi \cdot D_{теор.}$ ) та уточнений в результаті моделювання  $D$  діаметр резонатора типу "розрізане кільце" показаний на рис. 4.

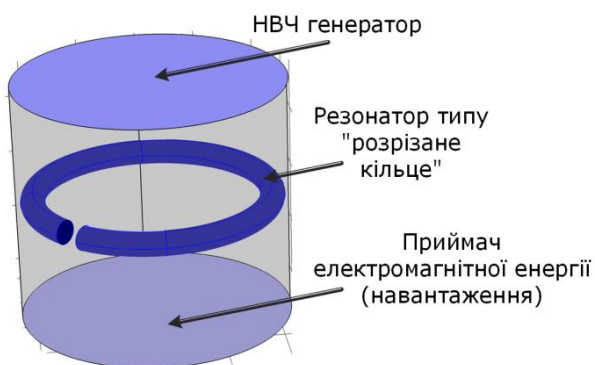


Рис. 3. Схема досліджень резонатора

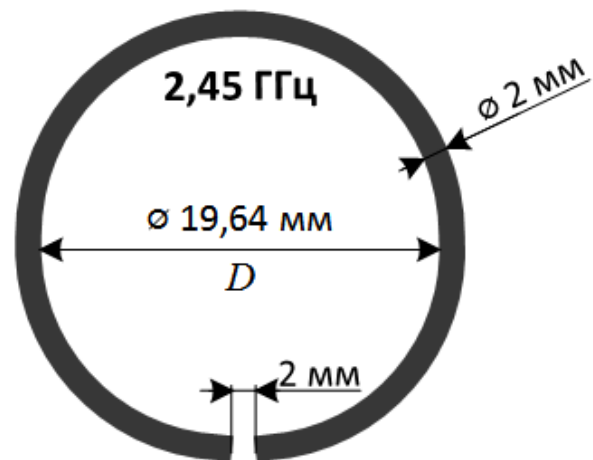


Рис. 4. Геометричні розміри резонатора для частоти 2,45 ГГц

Параметр  $S_{11}$  матриці розсіювання визначається як відношення амплітуди відбитої хвилі (від резонатора назад у сторону НВЧ генератора) до амплітуди хвилі, що надходить від НВЧ генератора (за умови узгодженого навантаження, тобто за умови, що відбиття хвилі після резонатора немає – повне поглинання приймачем, див. рис. 3). На резонансній частоті відбувається поглинання електромагнітної хвилі резонаторною структурою, що можна бачити на графіку рис. 5 – значення менші 0 дБ. На базі отриманих результатів бачимо, що при наближенні до резонансної частоти проявляється умова поглинання енергії електромагнітної хвилі.

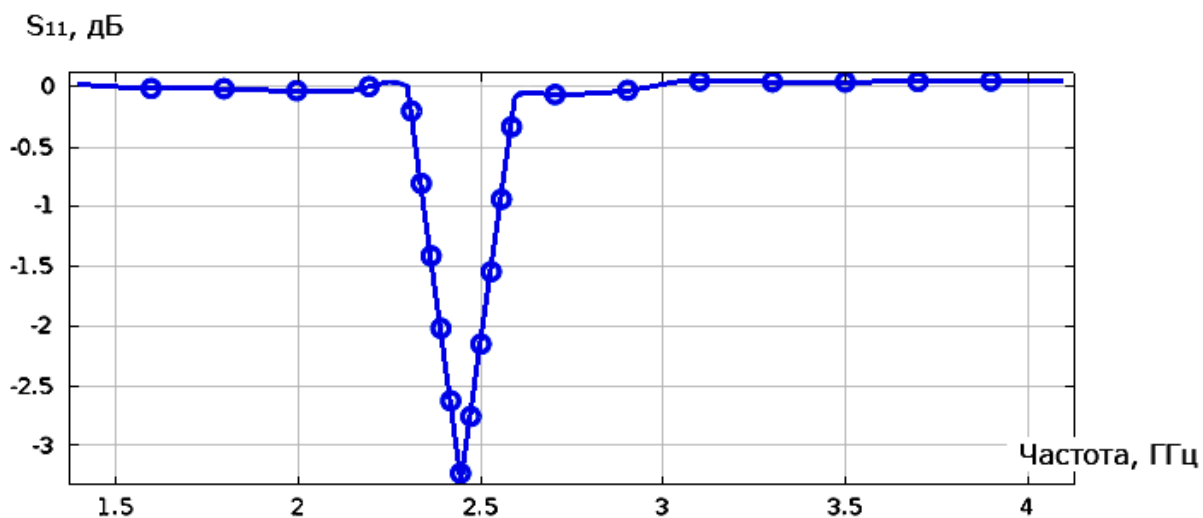


Рис. 5. Параметр  $S_{11}$  для резонатора (розрахованого під частоту 2,45 ГГц) для  $D = 19,64$  мм

Результати розрахунку напруженості електричного поля у ємнісному зазорі резонатора, максимальна величина якого

становить 50 кВ/м при заданій нами потужності збудження кільцевого резонатора, представлена на рис. 6.

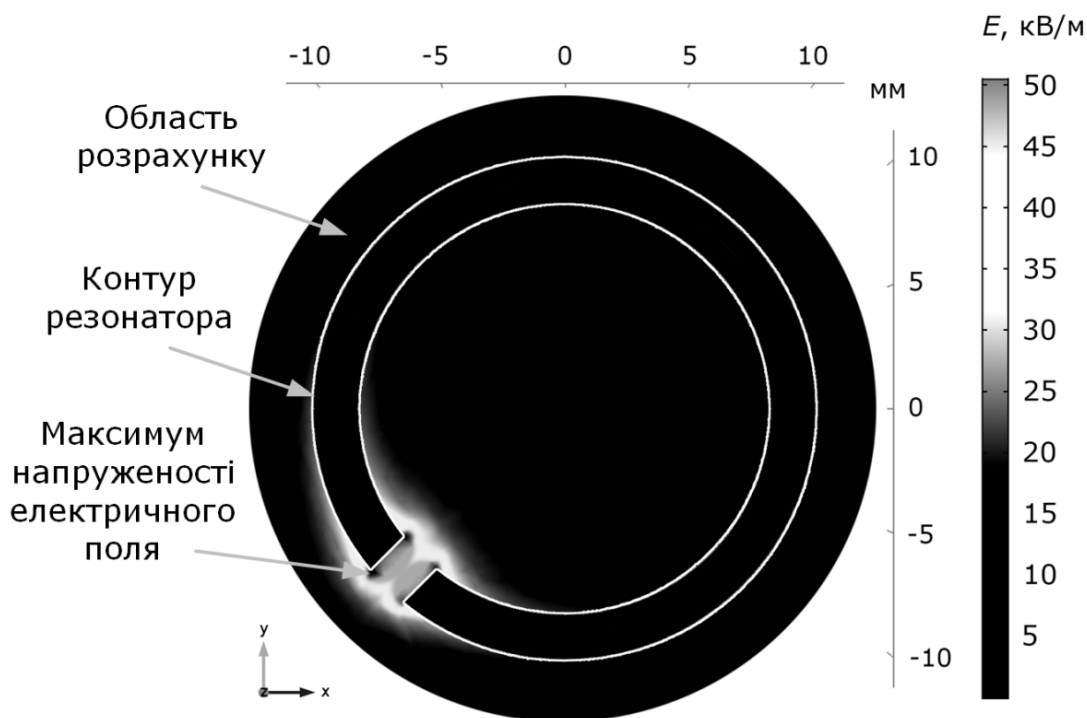


Рис. 6. Розрахунок напруженості електричного поля за частоти 2,45 ГГц

Апробація ініціювання плазموутворення у системі розподіленого електромагнітного поля здійснювалось у камері НВЧ печі "Електроника". Візуально було підтверджено можливість генерації плазми за допомогою резонатора типу "розрізане кільце" (рис. 7) за умови об'ємного неоднорідного НВЧ поля в системі.

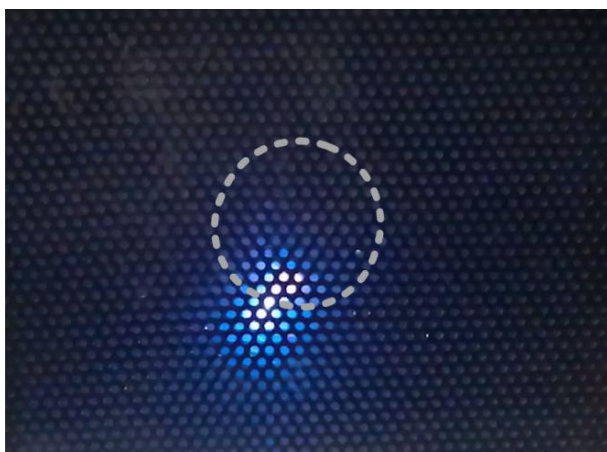


Рис. 7. Фотографія плазموутворення в області ємнісного зазору резонатора типу "розрізане кільце"

### Висновки

Було змодельовано об'ємне електромагнітне поле у НВЧ камері та апробовано програмне середовище COMSOL Multiphysics® для проектування резонаторів типу "розрізане кільце", розміри якого набагато менше камери, в якій в подальшому може розмішуватиметься серія таких резонаторів. Для перевірки резонаторів на практиці була вибрана камера НВЧ піч

"Електроника", яка створює умови тотожні тим, які моделювались.

Показано, що в системі з об'ємним неоднорідним електромагнітним полем та безконтактним збудженням одновиткового резонатора типу "розрізане кільце" можливо створити умови для генерації плазми.

Наразі стоїть питання розробки технологічної НВЧ установки на базі кільцевих резонаторів для практичного дослідження плазмової обробки поверхонь матеріалів.

### Література

1. Максимов А.И. Плазмохимия неравновесных процессов. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2010. – 114 с.
2. Felipe Iza and Jeffrey A. Hopwood. Low-Power Microwave Plasma Source Based on a Microstrip Split-Ring Resonator. IEEE Transactions On Plasma Science, Vol. 31, No. 4, August 2003, pp. 782-787.
3. Mazdak Taghioskoui, Joshua Perlow, Mona Zaghoul and Akbar Montaser. Generation of ultrahigh frequency air microplasma in a magnetic loop and effects of pulse modulation on operation. Applied Physics Letters 96, 191502 (2010).

4. Mazdak Taghioskoui and Mona Zaghoul. U-Shaped Ultrahigh Frequency Atmospheric Pressure Plasma Jet With Magnetic Loop Antenna. IEEE Transactions On Plasma Science, Vol. 45, No. 1, January 2017, pp. 43-53.

5. Веб-сайт COMSOL Multiphysics®, URL: [www.comsol.com](http://www.comsol.com) (дата звернення: 10 березня, 2019).