

УДК 621.38

Новий аспект розвитку антенних структур: від рамоквих антен до кільцевих резонаторів та електромагнітних метаматеріалів

Перевертайло В.В., к.т.н., проф. Кузьмичев А.І.

Антенні структури широко використовуються у радіотехніці та суміжних областях, включаючи технологію. Антени бувають приймального, передавального та комбінованого типів. У даній роботі будуть розглянуті антени приймального типу з метою подальшого використання у технології обробки матеріалів.

Чому антени? Бо в технологічних системах використовується генератор енергії, віддалений від камери обробки. І постає питання передачі енергії від генератора в камеру. Одним із варіантів є виконання камери обробки у вигляді замкнутого об'єму, а використання приймальних антен дозволить сконцентрувати в ній енергію. Однак щільність потужності (питома потужність $P_{\text{пит}}$) в камері може бути недостатньою для проведення технологічного процесу, зокрема – для іонізації або збудження газу, або буде необхідність використовувати генератор енергії меншої потужності. Тому у даному випадку можна застосовувати антени, які

були б здатні збільшити $P_{\text{пит}}$ (у певній локальованій області). Мета даної роботи – провести аналіз антенних структур, які можна використовувати для вирішення вказаних задач, і розглянути цей напрям як можливий спосіб організації елементів технологічної системи з НВЧ живленням.

Технологічне використання антен є ще однією областю їх застосування, яке має свої відмінності від радіотехнічного. Особливістю антен технологічного призначення є робота на фіксованій частоті. Це дозволяє використовувати їх як концентратори потужності в системах резонаторного типу.

Антени працюють на збудженні електричною, магнітною або обох складових електромагнітного поля (див. рис. 1). В залежності від потреб вибирається той чи інший тип антен. Для наших цілей вигідніше використовувати антену магнітного типу, оскільки вона має чітко виражену конденсаторну частину. Така особливість магнітної антени дозволяє зібрати енергію з

простору, який визначається площиною антени, та зосередити, сконцентрувати, прийняту енергію у порівняно малому об'ємі, конденсаторній частині, і за певних умов генерувати газорозрядну плазму. Тобто антена магнітного типу виступає відразу у якості приймача випромінювання (через магнітну складову поля), резонатора (на вибраній частоті) та концентратора енергії.

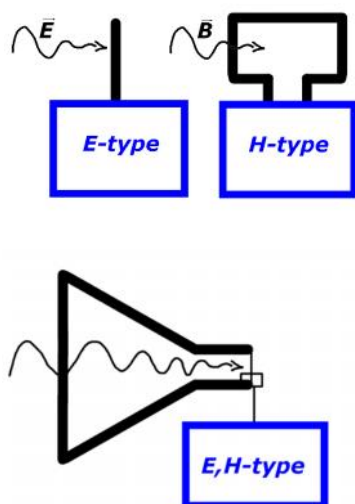


Рис. 1. Антени електричного, магнітного і змішаного типів (у прямокутниках із зазначенням типу антени за замовченням розміщується резонуючий елемент)

Резонатор – це такий пристрій, який вирізняється певними (резонансними) властивостями на окремих (резонансних) частотах. Буває, що у резонатора може бути декілька резонаторних частот, тоді він буде називатись полірезонансним. Мінімальна частота полірезонансного резонаторного пристрою

вважається основною резонансною частотою.

Ємності (C) та індуктивності (L) для створення резонансного контуру резонатора (див. рис. 2) завжди присутні у таких системах, при цьому вони можуть бути звичайними провідниками чи зазорами/розривами, що власне і є індуктивністю та ємністю (див. рис. 3) відповідно. З підвищенням частоти коливань зменшується кількість витків котушки та зазор між обкладками конденсатора (див. рис. 2), що впливає на значення резонансної частоти, яка обчислюється за формулою:

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

При певних частотах L і C можуть почати не зовсім нагадувати звичні радіоелементи електронних схем.

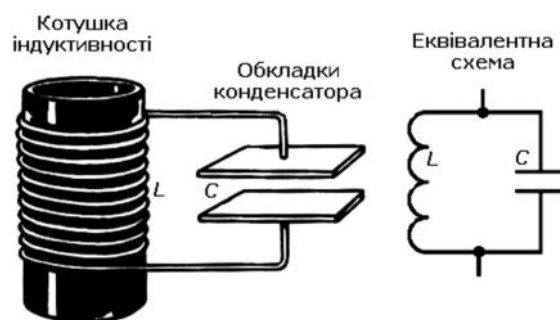


Рис. 2. Приклад найпростішого коливального контуру та його еквівалентна схема

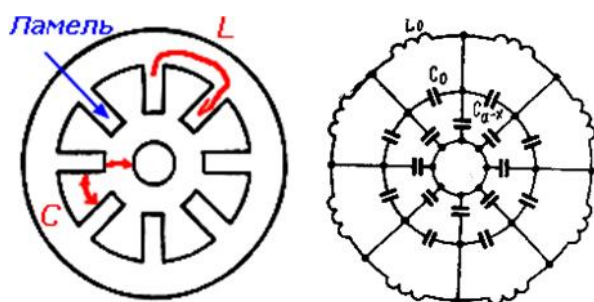


Рис. 3. Анодний блок магнетрону лопаткового типу (ліворуч) та його еквівалентна схема (праворуч)

Так, уже при частоті 2,45 ГГц L буде являти собою провідні елементи (доріжки друкованої плати, листи металу та ін.), а C – розриви між ними (зв'язок між сусідніми доріжками або краями листа металу та ін.). В якості прикладу можна навести анодний блок магнетрону лопаткового типу (див. рис. 3), де кожна його ламель разом зі стінкою циліндричного блоку утворює індуктивність на надвисокій частоті (НВЧ), а зазори між ламелями та катодом – це ємність на НВЧ.

Таким чином, зменшуючи параметри L і C , тобто зменшуючи, наприклад, висоту циліндричного анодного блоку магнетрону, «діаметр» кожного резонатора, товщину ламелей та зменшуючи зазор між ними, досягається збільшення резонансної частоти, аж до, *теоретично*, терагерцевого діапазону частот, тобто оптичного діапазону!

У якості однієї з можливих модифікації вищезазначеного можна навести приклад простого

резонатора у вигляді кільця (його довжина – індуктивність) з розрізом (ємність), див. рис. 4.

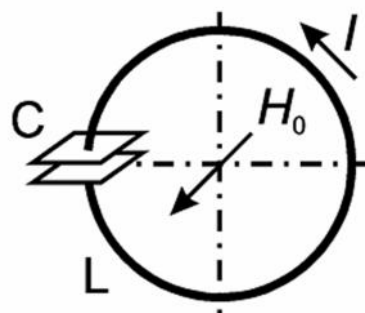


Рис. 4. Приклад найпростішого резонатора на НВЧ типу «розрізане кільце» або «кільцевий резонатор» [1]

Як показано в книзі [1] такий тип резонатора дозволяє вивчити процеси від коливань гігагерцевого (НВЧ) діапазону до хвиль ближнього інфрачервоного (оптичного) спектру, тим самим і визначається його широкий спектр застосувань.

Формула для розрахунку ємності:

$$C = \epsilon \epsilon_0 2\pi r^2 / d$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right)$$

і

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 + \frac{4r}{\pi l} - \frac{r^2}{2l^2} \right)$$

при умові, що довжина витка пропорційна або менша довжині

хвилі. Тут ϵ , ϵ_0 – діелектричні проникності середовища та вакууму відповідно, μ_0 – магнітна проникність вакууму, d – відстань між кінцями дроту (ширина зазору), l – довжина дроту, r – радіус його поперечного перерізу.

Резонатор типу «розрізане кільце» використовувався у антенній справі та був відомий як рамкова або магнітна антена (див. рис. 5). З метою зменшення кількості витків таких антен також використовувались магнітні (феритові) осердя.

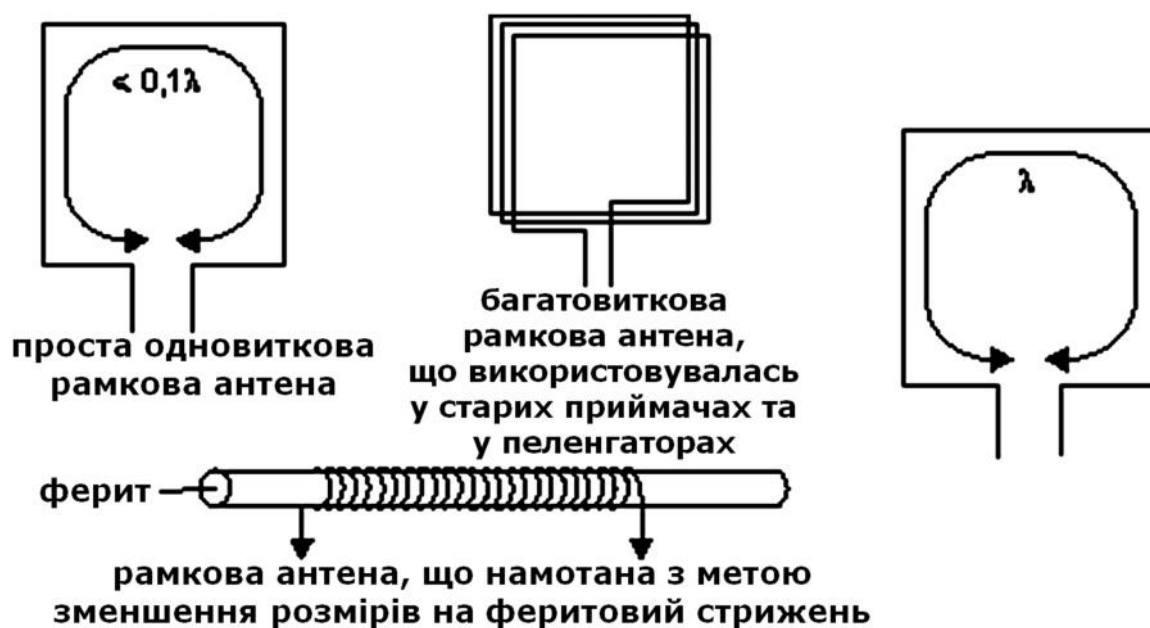
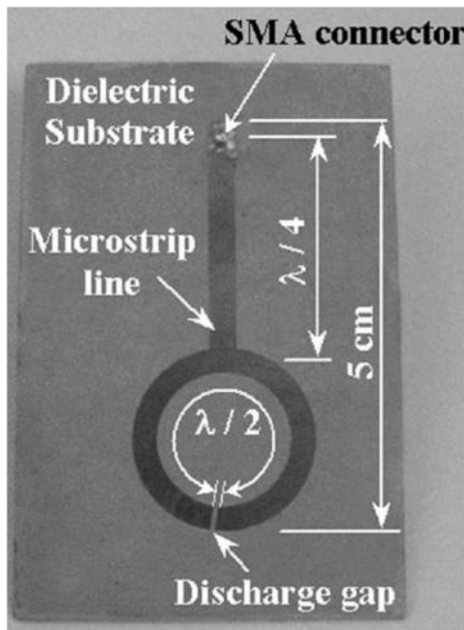


Рис. 5. Рамкові магнітні антени

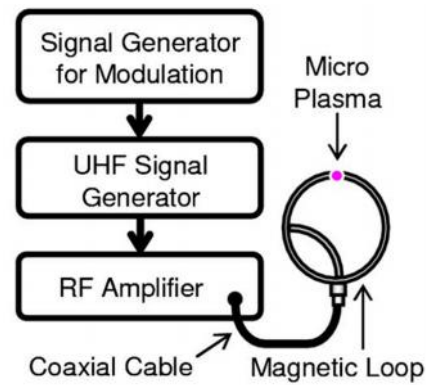
Прагнення використовувати магнітну антену полягає у її "діаграмі сприйнятливості", можливості варіації частоти за рахунок геометричних розмірів, які напряму впливають на ємність та індуктивність, відносну компактність та можливість зосередження/локалізації електромагнітної потужності у малому об'ємі. Оскільки це антена резонансного типу, то на вибраній частоті, крім приймання енергії, вдасться добитись і її підсилення. Відомі деякі експериментальні результати з мініатюрними

мікроантенами [3], див. рис. 5; [4], див. рис. 6 та [5], рис. 7.

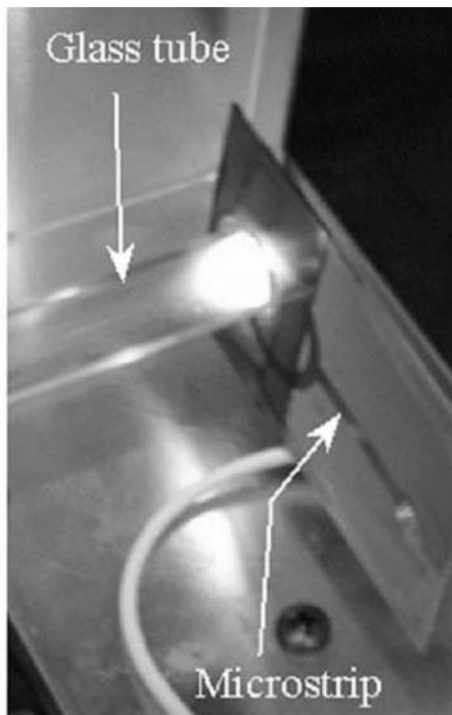
Такі резонатори лягли в основу побудови метаматеріальних структур, див. рис. 8, які використовувались для дослідження ефектів від'ємного заломлення [1].



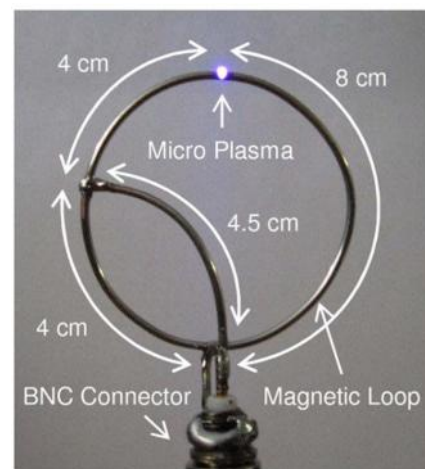
а)



а)



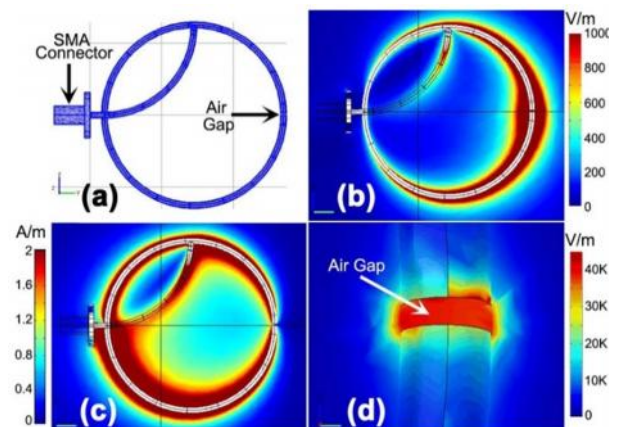
б)



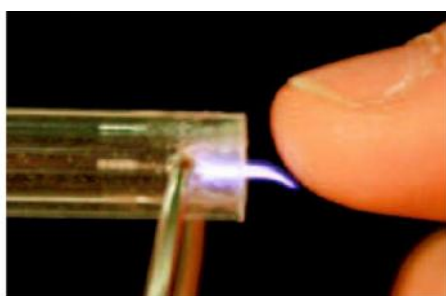
б)

Рис. 6. Схема дослідної установки (а) та результати експерименту (б), який демонструє можливість отримання мікроплазми [4]

Рис. 6. Схема дослідної установки (а) та результати експерименту (б), який демонструє можливість отримання мікроплазми [4]



(1)



(2)

Рис. 7. Результати моделювання резонатора типу «розрізане кільце» (1) та експерименту (2) [5]



Рис. 8. Плазмові конфігурації, на основі яких можуть бути створені плазмові метаструктури [1]

Висновки

Отже, у результаті розвитку антенних структур вони почали впроваджуватись також і у технологію обробки матеріалів, де виконують не лише приймальнопередавальну функцію і виступають у ролі резонатора, а почали впроваджуватись також і в плазмову техніку. Останніми роками відкриваються нові рішення в області плазмових метаструктур,

які будуються на базі резонаторів типу «розрізане кільце». Решітка з плазмових мікрорезонаторів може застосовуватись для генерації плазми і знайти широкий спектр застосувань: від технологічного (різні процеси плазмової обробки матеріалів) до техніко-конструкторського (побудова нових приладів на базі плазми).

Нашими ж задачами, які були б актуальні у даній області, є створення теорії побудови антенних структур резонаторного типу, на базі якої буде створена методика інженерного розрахунку; в подальшому – проведення експериментальних досліджень і знаходження оптимальних способів конструювання об'ємних метаматеріальних структур.

Наступним кроком на етапі розвитку метаматеріальних плазмових структур (резонаторного типу), на етапі освоєння терагерцевого діапазону частот, може стати стрибок в оптичну область, де нас чекатимуть нові цікаві відкриття.

Література

1. Вольпян О.Д., Кузьмичёв А.И. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов / Под ред. Г.М. Зверева. – К.-М.: Аверс, 2012.– 360 с.

2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986.– 488 с.
ultrahigh frequency air microplasma in a magnetic loop and effects of pulse modulation on operation. Applied Physics Letters 96, 191502 (2010).
3. 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.
5. 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.
4. Mazdak Taghioskoui, Joshua Perlow, Mona Zaghoul and Akbar Montaser. Generation of