

УДК 621.37-03

Метаматеріальні структури на основі газоплазмових утворень

Лізогуб М.В., проф., д.т.н., Кузьмичев А.І.

Розробка та дослідження електромагнітних метаматеріалів є важливим та актуальним питанням у теоретичній та технічній електродинаміці [1].

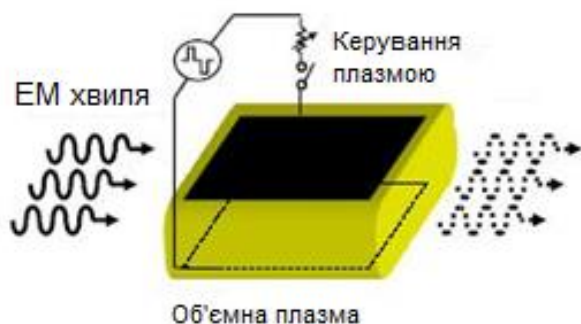
До метаматеріалів відносяться композиції з від'ємним показником заломлення, які складаються з нано- та мікроелектро/радіоелементів (у вигляді наностержнів, пліткових структур, кільцевих резонаторів (SRRs) або передаючих ліній), але й інші електромагнітні структури (наприклад, штучні діелектрики і фотонні кристали), якості яких перевершують індивідуальні властивості речовини структурних елементів. Також можна представити новий клас метаматеріалів на основі газо-плазмових утворень [1,2]. Тобто плазма газового розряду може виступати в ролі речовини, з якої можна будувати електромагнітні структури з новими матеріальними властивостями.

Регулювання параметрів штучного «плазмового» середовища, створеного за допомогою об'ємних дротяних ґраток, можна здійснювати шляхом зміни параметрів металевих ґраток. У випадку газо-плазмового «метаматеріалу», навпаки, плазма заміняє метал (або діелектрик), а

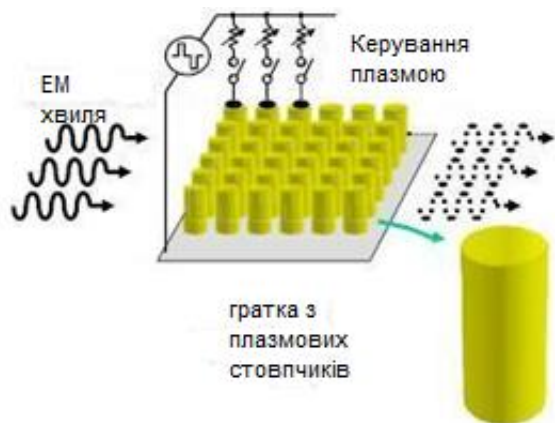
регулювання параметрів метаматеріалу можна здійснювати, змінюючи параметри плазми, у першу чергу – концентрацію плазмових електронів n_e . Зміна n_e призводить до зміни плазмової частоти ω_p і діелектричної проникності $\epsilon_{пл}$. При $\omega < \omega_p$ плазма не пропускає електромагнітну хвилю, тобто її проникність має від'ємний знак.

Газорозрядна плазма може бути не тільки у вигляді об'ємної речовини, а і у вигляді одиничних або масових мікроплазмових утворень. Загальновідомим прикладом утворення мікроплазми є коронний розряд на кінчику металеві голки. Можна створювати одно-, дво-, тримірні структури з мікроплазмових утворень, використовуючи мікроструктуровані електроди. Так як для генерації плазми має сенс застосовувати газовий розряд з ненакопичуваними електродами, то для визначення напруги його виникнення U_v використовуємо криві Пашена. У відповідності з ними робочий тиск газу p для мікророзмірних розрядів ($d \sim 100$ - 200 мкм) має бути високим, аж до атмосферного, якщо працювати в області мінімуму U_v , де $pd_{\min} \sim 1$ - 10 Па·м.

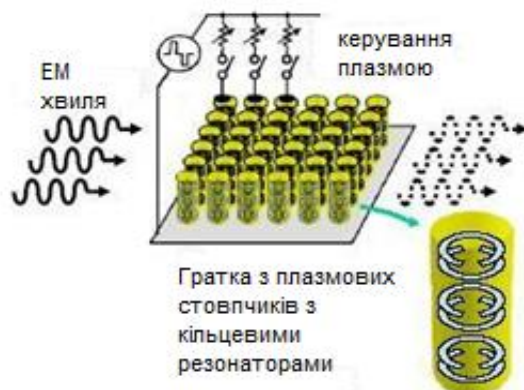
Відомим прикладом мікроструктурованої газорозрядної системи є плазмовий дисплей (плазмова телевізійна панель) з розмірами газорозрядних комірок 200-400 мкм та $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, що відповідає $\omega_p \sim 30 \text{ ГГц}$. Звідси видно, що плазмовий дисплей можна вважати 2D метаматеріалом для гігагерцового діапазона. Історичними передумовами для створення плазмових метаматеріалів служать результати досліджень електромагнітних явищ у плазмі газового розряду та іоносфери, а також розробки плазмових антен, поглиначів високочастотної енергії і приладів плазмової електроніки. На рис.1 представлені схематичні конфігурації, які можна розглядати як плазмові метаматеріали.



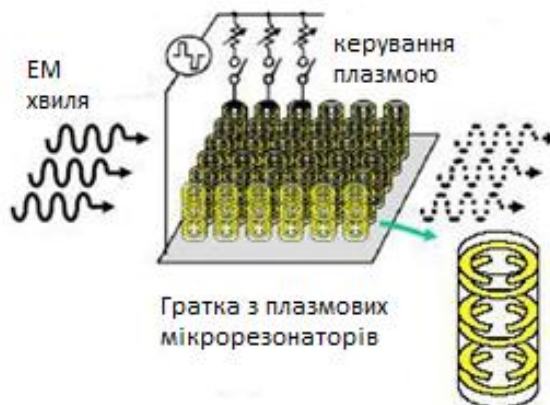
а)



б)



в)



г)

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

На рис. 1.(а) зображено найпростіший випадок однорідної об'ємної плазми, яка добре вивчена і може застосовуватися в якості відбивача і поглиначя розповсюджуваних хвиль. Коли $\omega < \omega_p$, а частота зіткнень електронів з молекулами газу ν невелика, об'ємна плазма добре відбиває електромагнітні хвилі, які проникають в неї тільки на глибину скін-шару. Якщо $\nu \sim \omega$, а

імпеданс плазми узгоджений з імпедансом зовнішнього середовища, плазма працює як поглинач. Коли $\epsilon_{\text{пл}} = -1$ на достатньо різкій границі плазми, вздовж її поверхності може розповсюджуватися поверхнева хвиля, аналогічна поверхневим плазмовим поляритонам.

На рис. 1.(б) представлена схема 2D ґратки з плазмових і металевих частин (рис. 1.(в)). У ньому металеві частини представляють собою кільцеві SRR резонатори (магнітні елементи), поміщені в плазмові стовпчики (електричні елементи). Керування параметрами метаматеріалу може здійснюватися шляхом регулювання параметрів плазмового оточення навколо SRRs, і можна забезпечити отримання від'ємного показника заломлення для випромінювання. При збільшенні діаметрів елементів і відстаней між ними можна здійснювати перехід від метаматеріалу з геометричними параметрами, меншими за довжину хвилі до матеріалу типу фотонного кристалу з забороненою фотонною зоною, у якого постійна ґратка складає половину довжини хвилі.

Рис 1.(г) показує структуру чисто плазмового метаматеріалу, у якого конфігурації плазмових елементів обирається, виходячи з міркувань отримання заданої електромагнітної реакції. Зокрема на рисунку плазмові елементи мають конфігурацію кільцевих резонаторів.

Розглянемо переваги плазмових метаматеріалів перед раніше описаними металічними структурами.

Головною перевагою є можливість неперервно змінювати величину $\epsilon_{\text{пл}}(\omega_p^2, \nu)$ через незалежне керування значеннями $\omega_p(n_e^{1/2})$ та $\nu(p)$. Можна створювати структури з від'ємним заломленням у діапазоні від ГГц до ТГц.

Також можна керувати постійною ґратки (тобто величиною її періоду) і створювати різні конфігурації ґратки шляхом електричного ввімкнення/вимкнення окремих рядів або плазмових елементів ґратки.

Важливий аспект – можливість встановлення і отримання потрібного градієнту параметрів ґратки шляхом відповідного розподілення електричної потужності живлення окремих мікророзрядів.

Другий важливий аспект плазмових метаматеріалів – значна нелінійність характеристик, обумовлена нелінійністю залежності інтенсивності іонізації робочого газу і, відповідно, концентрації плазми від напруженості електричного поля. У результаті можна забезпечити генерацію вищих гармонік і отримання інших нелінійних ефектів.

Висновки

Плазмові структури потенціально здатні працювати при доволі високих рівнях потужності падаючої хвилі на відміну від звичайних напівпровідникових приладів, тому на базі плазмових метаструктур можна, наприклад, створювати фільтри і інші системи для роботи з потужним електромагнітним випромінюванням. Оскільки потужності падаючої хвилі

може бути достатньо для перебудови параметрів плазмових метаструктур, можлива автоматична реалізація різних ефектів: від ефекта «невидимості» для технології «Стелс» до ефекта прозорості для плазмових покриттів. Останнє важливо, наприклад, для збереження радіозв'язку між космічними апаратами і Землею, коли апарати спускаються на Землю і оточені плазмою через тертя повітря.

Плазмові структури можна застосовувати для отримання плазми більш високої густини, так як при досягненні відповідних від'ємних значень магнітної проникності плазма

стає прозорою для випромінювання, яке глибоко в неї проникає і іонізує плазмоутворююче середовище. В іншому випадку плазма відбиває більшу частину зовнішнього випромінювання.

Література

1. Вольян О.Д., Кузьмичев А.І. Отрицательное преломление волн - 2012, -С. 271-275.
2. Sakai O., Tachibana K. Plasmas as metamaterials: a review // Plasma Sources Sci. techol. – 2012.-P.013001(1-18)