

УДК 621.328

## **НВЧ генератори плазми на базі еванесцентних хвиль**

*Перевертайло В.В., к.т.н., доц. Кузьмичев А.І.*

В електроніці особливості протікання плазмових процесів викликають необхідність вивчення умов генерації низькотемпературної плазми, дослідження елементарних процесів, що проходять у газорозрядній камері, де відбувається генерація плазми, діагностики потоків низькотемпературної плазми [1]. Розгляд питання можливості застосування НВЧ плазми для обробки поверхні твердого тіла великої площі (метри квадратні) приводить науковців до фундаментальної проблеми: зона однорідності поверхні, яка бере участь у процесі обробки. Знайдена інформація підтверджує, що в останні роки іде робота по створенню прототипів НВЧ генераторів, які будуть забезпечувати технологічні вимоги до поверхні обробки твердого тіла та наношуваного покриття, давати конкурентоспроможні результати, при цьому будуть екологічно безпечними, простими у конструюванні та порівняно недорогими на ринку.

У даній роботі зосереджено увагу на можливості генерації низькотемпературної газорозрядної плазми (НГП) за допомогою еванесцентних хвиль та зроблено порівняння сучасних приладів, які будуються на базі таких хвиль.

Еванесцентна хвиля – це хвиля, що затухає, поступово перестає розповсюджуватись (прикладом може бути хвиля у позамежному хвилеводі). Оскільки така хвиля не поширюється у позамежному хвилеводі, тобто швидко затухає, тому генерація плазми за допомогою цієї хвилі може відбутись лише поблизу позамежної ділянки, яка називається еванесцентною, про що буде йти мова далі. Теоретично така хвиля має квазінезмінну амплітуду вздовж певної довжини, сама ж довжина хвилі може сягати декількох метрів. Завдяки таким особливостям еванесцентні хвилі могли б використовуватись в іоно-плазмовій технології для генерації плазми, крім того такі відомості уже були знайдені у деяких наукових роботах, зокрема – [2-6].

У статті розглянуто три підходи, що забезпечують збудження еванесцентної хвилі:

- збудження за допомогою позамежного хвилеводу;
- еванесцентна хвиля, що збуджується за допомогою поверхневої хвилі;
- еванесцентна хвиля, що збуджується поблизу поверхні діелектрика за рахунок ефекту

порушення повного внутрішнього відбиття.

У результаті проведеного аналізу вдалось визначитись із напрямками подальших досліджень і розробок у даній області.

### Метод отримання плазми у формі довгої однорідної лінії

Для прямокутного хвилеводу (ПХ) одним з підходів до збільшення довжини хвилі електричного поля може стає зменшення ширини хвилеводу до певної величини [1]. Ця гранична ширина визначається мінімальним розміром, при якому почне проявлятися стан відсічення.

**Еванесцентна хвиля у прямокутному хвилеводі.** Довжина НВЧ хвилі для частоти 2,45 ГГц обмежується приблизно 12 см у вільному просторі. Довжина хвилі  $\lambda_g$  збудженого НВЧ поля (TE<sub>10</sub>) всередині прямокутного хвилеводу описується наступним виразом [2,3]:

$$\lambda_g(\varepsilon) = \frac{\lambda(\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda(\varepsilon)}{2a}\right)^2}},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі,  $a$  – ширина хвилеводу.

На Рис. 1 показано залежність між шириною хвилеводу та довжиною хвилі  $\lambda_g$ , що поширюється цим хвилеводом [3]. Окіл точки відсічення, 61,3 мм, на рисунку позначений як еванесцентна ділянка, де довжина хвилі  $\lambda_g$  різко зростає. Коли ширина хвилеводу наближається до ширини поза межного хвилеводу, можна

отримати довжину хвилі більше 1000 мм. Так, при ширині хвилеводу 62 мм довжина хвилі складає 776 мм, а при ширині 61,3 мм може досягти 2467 мм [3]. Ця ділянка дуже корисна для генерації плазми, яка буде мати форму довгої лінії. Представлений графік справедливий для  $\varepsilon=1$ , якщо ж внутрішнє середовище хвилеводу буде мати  $\varepsilon>1$ , то положення зростаючої ділянки кривої буде зміщуватись.

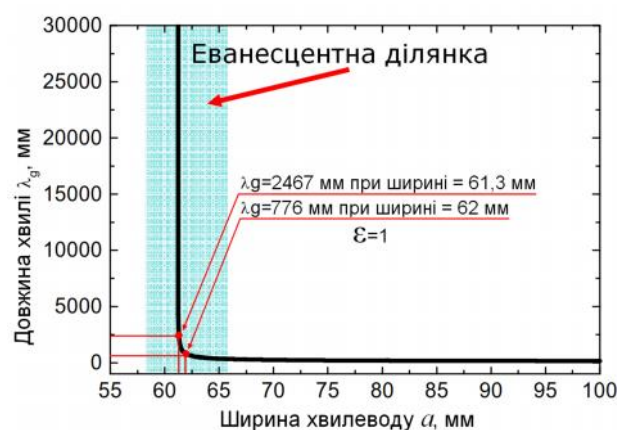


Рис. 1. Залежність довжини хвилі, що розповсюджується у прямокутному хвилеводі, від його ширини

Крім того, у роботі [2] показано, що при генерації НВЧ хвилі у вакуумі отримання плазми однорідної по концентрації заряджених частинок та лінійної протяжної форми буде забезпечуватись при ширині хвилеводу 61,3 мм, тобто за умови генерації еванесцентної хвилі.

В роботах [2-4] наведено можливі конструкції НВЧ генераторів на еванесцентних хвилях для отримання плазми у формі довгої лінії. Варіант експериментальної установки показаний на Рис. 2 [2,3]. Джерело НВЧ плазми однорідної лінійної

форми складається з таких основних частин: джерело живлення (1); магнетронний НВЧ генератор (2), що працює на частоті 2,45 ГГц, має потужність 700 Вт; хвилевід для поширення основної моди; більш вузький хвилевід (6) для забезпечення умов генерації еванесцентної хвилі, у якій НВЧ хвиля потрапляє з основного тракту за допомогою перехідного звужувального хвилеводу (5); та пристрої узгодження – триштиревий підлаштувач (4), короткозамикальний поршень (7). Відбита хвиля відводиться з основного тракту за допомогою феритового циркулятора (3) з добре узгодженим навантаженням. Хвилевід основного тракту за допомогою перехідного хвилеводу змінює розміри з  $96 \text{ мм} \times 27 \text{ мм}$  на  $62 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$ . Висота хвилеводу була зменшена з метою збільшення щільності потужності в хвилеводі [2]. Живлення подається з боку входу.

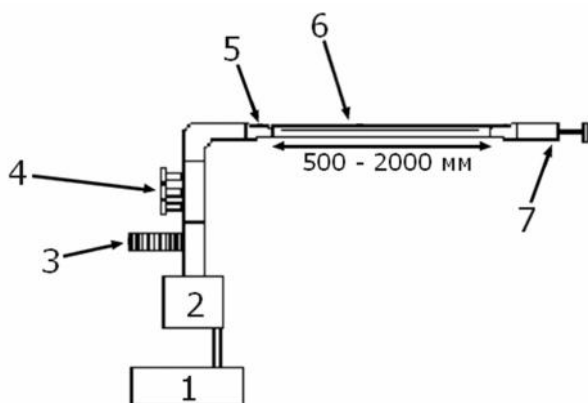


Рис. 2. Схематичне зображення установки для створення газорозрядної плазми лінійної форми

Для того, щоб розділити НВЧ тракт та область генерації плазми,

використовується спеціальна розрядна трубка (газорозрядна камера), конструктивне розміщення якої показано на Рис. 3. Вона виготовлена з жаростійкого кварцового скла загальною висотою 15 мм і товщиною 3 мм, кріпиться за допомогою затискачів та розташована вздовж щілини канавки, де напруженість електричного поля досягає свого максимуму. Відстань від внутрішньої нижньої стінки хвилеводу до верхньої зовнішньої стінки газорозрядної камери (глибина вставленої розрядної трубки)  $h$  складає 1,5 мм для He плазми при тиску 533 Па, відстань між внутрішніми стінками камери  $w = 35 \text{ мм}$ . У якості газового наповнення може використовуватись гелій або аргон.

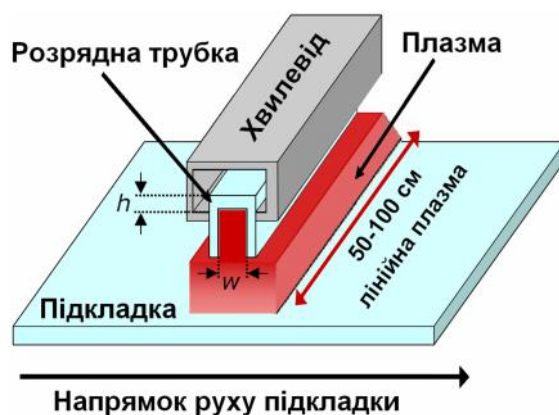


Рис. 3. Пояснення методу обробки поверхні підкладки великої площі за допомогою газорозрядної плазми однорідної лінійної форми

У роботі [3] введено інший тип НВЧ джерела лінійної плазми високої щільності на базі еванесцентних хвиль. У його конструкцію входить два джерела НВЧ потужності. Такий метод називається випадком

подвійного живлення. По технології обробки підкладок досить схожий до попереднього, коли використовується НВЧ потужність від одного магнетрона, але перевагами стали більша концентрація заряджених частинок у плазмі та більша площа оброблюваної поверхні. Також були досліджені оптимальні робочі параметри технологічної установки для генерації плазми (Рис. 4).

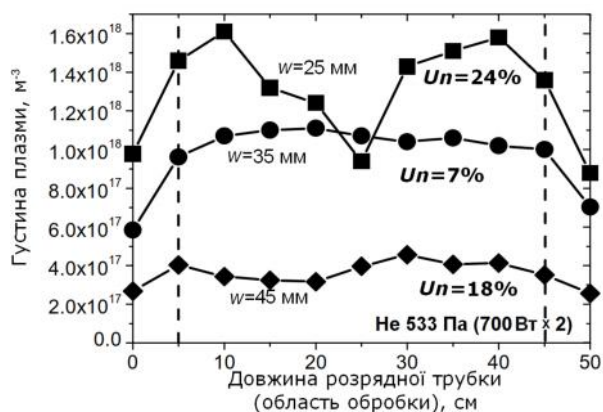


Рис. 4. Вибір оптимальної ширини газорозрядної трубки  $w$ ; газ – He, тиск 533 Па, потужність НВЧ 1,4 кВт ( $Un$  – неоднорідність плазми)

Як видно з рисунку, при однаковій довжині розрядної трубки (50 см) в області обробки 5...45 см найменша неоднорідність  $Un = 7\%$  отримана при ширині газорозрядної трубки 35 мм. Важливо зазначити, що при тих же умовах роботи відсоток неоднорідності складає майже у двічі менше (3,7%), якщо область обробки розташувати на проміжку 10...40 см.

Робочі параметри останніх двох методів: ширина хвилеводу ( $a$ ), глибина вставленої розрядної трубки ( $h$ ), ширина трубки ( $w$ ), тиск ( $p$ ), споживана потужність ( $P$ ).

## Джерело плазми на основі поверхневої хвилі

Нещодавні дослідження [4] показали, що джерело плазми на поверхневій хвилі може створювати щільний і рівномірний плазмовий потік. Було розроблено нове джерело плазми на основі еванесцентних хвиль з використанням двох паралельних пластин. Одна з пластин з отворами, інша – без. Структура джерела показана на Рис. 5.

Основною перевагою такого джерела є те, що на поверхні дірчастої пластини (ДП) через сильне електричне поле, яке генерується на її поверхні, можна отримати плазму високої щільності. Інтенсивність і однорідність поверхневих хвиль залежать від діаметра отворів і відстані між отворами у ДП. Діаметр отворів лежить в межах 2...8 мм. Отвори розташовані симетрично і займають до 50% від загальної площі ДП. Плазма утворюється поблизу поверхні ДП завдяки еванесцентному полю.

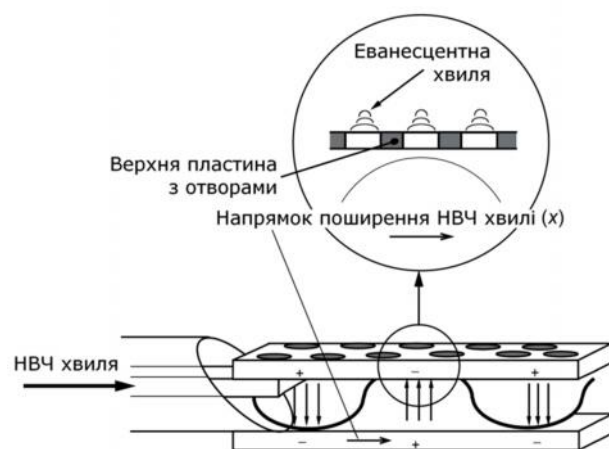


Рис. 5. Схематичне зображення двохпластинчастого плазмового генератора на основі

## еванесцентних хвиль

У своєму складі джерело плазми містить блок НВЧ потужності із частотою 2,45 ГГц. НВЧ потужність підводиться до двох металевих пластин за допомогою коаксіального кабелю (хвилеводу). Хвилевід і пластини знаходяться у вакуумній камері. Пластини розташовуються паралельно один одному, відстань між ними складає 10 мм. Матеріал пластин – алюміній, товщина – 2 мм, площа – 100 мм × 140 мм.

### Збудження еванесцентної хвилі поблизу поверхні діелектрика внаслідок ефекту порушення повного внутрішнього відбиття

Ще один з методів генерації еванесцентної хвилі – генерація поблизу поверхні діелектрика внаслідок ефекту порушення повного внутрішнього відбиття.

Цей метод був розглянутий у роботі [9]. Конструкція НВЧ тракту показана на Рис. 6. НВЧ хвиля поширюється у хвилеводі, потрапляє у тіло діелектрика, де частина хвилі, що падає, відбивається від грані діелектрика і продовжує поширення у сторону поршня, а частина тунелює, проникаючи через клітку Фарадея у сторону горілки. Та хвиля, яка утворюється поблизу клітки Фарадея, і є еванесцентною хвилею.



Рис. 6. Конструкція генератора

еванесцентної хвилі, що збуджується поблизу поверхні діелектрика внаслідок ефекту порушення повного внутрішнього відбиття

Три метода дозволяють отримати еванесцентну хвилю для генерації газорозрядної плазми. Пристрої та технологія, що базуються на цих методах, ще не повністю вивчені та потребують аналізу і вдосконалень. Результатом розвитку дослідження можуть стати нові конструкції та технологічні процеси у області обробки приповерхневого шару твердого тіла.

### Висновки

На основі проведеного дослідження можна розробити технологію створення джерел НВЧ плазми на базі еванесцентних хвиль. Корисним застосуванням таких джерел може стати виробництво плоских дисплеїв, презентаційних екранів, сонячних панелей і т.п., де висуваються жорсткі вимоги до однорідності оброблюваних поверхонь та визначена необхідність у підкладках великих площ (метри квадратні).

### Література

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 328 с.;
2. Abdel Fattah E., Suzuki M., Kitamura Y. and Shindo H. Large-Scaled Line Plasma Production by

- Evanescent Microwave in a Narrow Rectangular Waveguide // 28th ICPIG. – 2007, July 15-20. – Prague, Czech Republic;
3. Abdel Fattah E., Fuji S. and Shindo H. Large-scaled line plasma production by evanescent microwave // Plasma Devices and Operations. – 2009, Vol. 17, No. 3, pp. 221–228;
  4. Shanmugavelayutham G., Ramasamy R., Fukasawa T., Kajiyama H. and Shinoda T. Development of uniform line-shaped plasma under long wavelength evanescent microwave (LWEM) for PDP processing // Proc. of ASID. – 2006, October 8-12. – New Delhi. – pp. 328-331;
  5. Yoshida Y., Ogura H. Compact holey-plate plasma source // Vacuum 74. – 2004, pp. 509-513;
  6. Emanuel S. Stockman, James B. Michael, Alex Fuller, Sohail H. Zaidi, and Richard B. Miles. Toward High Q, Evanescent Coupled Microwave Controlled Combustion // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition – 2009, January 5-8. – USA, Orlando, Florida, pp. 1-10.