

# Вакуумна, плазмова та квантова електроніка

УДК 621.38

DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.6.105023](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.105023)

## Генерація надвисокочастотної плазми за допомогою еванесцентних хвиль

Перевертайло В. В., ORCID [0000-0001-5706-5946](https://orcid.org/0000-0001-5706-5946)e-mail [vladimir\\_mj@ukr.net](mailto:vladimir_mj@ukr.net)Кузьмичев А. І., к.т.н., доц., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)

Кафедра електронних приладів та пристроїв, Факультет електроніки  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Київ, Україна

**Реферат**—У даній роботі проведено аналіз та порівняння можливих конструктивних особливостей надвисокочастотних генераторів низькотемпературної плазми, які будуються на базі еванесцентних хвиль. Метою дослідження є систематизація різних методів та підходів до генерації НВЧ плазми за допомогою еванесцентних хвиль, пошук технології застосування еванесцентних хвиль НВЧ діапазону у плазмовій техніці, проблема забезпечення зони однорідності оброблюваної поверхні твердого тіла великої площі (метри квадратні). 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. Представлено результати перших експериментів використання таких генераторів та визначені перспективи їх подальшого застосування для іонно-плазмової технології обробки великих підкладок.

Бібл. 13, рис. 6.

**Ключові слова** — генерація надвисокочастотної плазми; низькотемпературна плазма; еванесцентні хвилі; надвисокочастотний генератор.

### І. ВСТУП

В електронній промисловості широко застосовуються плазмові процеси завдяки їх унікальним можливостям [1]–[5]. Для генерації плазми застосовуються різні газові розряди, серед яких визначене місце займають НВЧ розряди завдяки їх здатності генерувати щільну плазму при низькому тиску без застосування електродів. Існують різні варіанти побудови таких НВЧ систем, зокрема резонаторного, багатомодового, хвилеводного типів, на поверхневих хвилях та інших типів [1], [2], [5]. В сучасній технології є необхідність в обробці підкладок з великою поверхнею та розміром від десятків сантиметрів до декількох метрів і виготовленні на них мікро- і наноструктур. Реалізація такої технології корисна для виробництва дисплеїв, сонячних батарей, смартвікон для будівель та багатьох інших. При цьому важливо забезпечити однорідність обробки поверхні і однаковість параметрів електронних структур по всій площині підкладок. Інша проблема пов'язана з можливим негативним електричним, кінетичним

і радіаційним впливом плазми на делікатні електронні структури, які виготовляються на поверхні підкладок [1]–[4]. Очевидно, що найбільший вплив буде тоді, коли підкладки “купаються” в плазмовому середовищі газового розряду, тобто в системах з об'ємною плазмою з сильним полем. Розв'язання вказаних проблем, на наш погляд, можливо очікувати з системами, що використовують плазму у формі однорідного тонкого шару біля стінки технологічної камери, а підкладка розміщена на деякій відстані від плазми поза зоною електричного поля плазми.

Авторами запропоновано використати рішення аналогічної проблеми в плазмоніці, тобто збудження електромагнітної хвилі у вигляді поверхневих плазмонних поляритонів [6], [7]. Тут плазмоном є квант електромагнітних коливань, які пов'язані з коливаннями електронів зони провідності у металах, а плазмонні явища у електронному “газі” металів дуже подібні процесам у газорозрядній плазмі. Особливістю є те, що плазмонні поляритони збуджуються і розповсюджуються у тонкому поверхневому шарі. Один зі способів збудження використовує еванесцентну хвилю з джерела енергії, яка є хвилею згасаючого



типу, що не розповсюджується. Аналог у НВЧ – згаюча хвиля у позамежному хвилеводі [8]. Еванесцентна хвиля і збуджені за допомогою неї плазмонні (плазмові) коливання будуть сконцентровані поблизу поверхні генератора, що цікаво для нашого випадку.

Необхідно з'ясувати: чи можливо генерувати плазму за допомогою цієї хвилі, не дивлячись на те, що вона не поширюється у позамежному хвилеводі і швидко затухає на певній відстані. Потім структурувати можливі варіанти побудови НВЧ генераторів плазми на базі еванесцентних хвиль та провести аналіз їх практичних реалізацій.

Підтвердженнями можливостей використання еванесцентних хвиль для збудження плазми стали роботи [9]–[13].

У статті будуть розглядатись три підходи по збудженню еванесцентної хвилі:

- збудження за допомогою позамежного хвилеводу;
- збудження за допомогою поверхневої хвилі;
- збудження за рахунок ефекту порушення повного внутрішнього відбиття поблизу поверхні діелектрика.

Таким чином, мета даної роботи – систематизація різних методів та підходів до генерації НВЧ плазми за допомогою еванесцентних хвиль, пошук технології застосування еванесцентних хвиль НВЧ діапазону у плазмовій техніці.

## II. МЕТОД ОТРИМАННЯ ПЛАЗМИ У ФОРМІ ДОВГОЇ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ

Для прикладу розглянемо прямокутний хвилевід. Зменшення його ширини до певної величини досягаємо збільшення довжини хвилі електричного поля [9]. Ця гранична ширина визначається мінімальним розміром, при якому почне проявлятися режим затухання НВЧ хвилі.

Довжина НВЧ хвилі для частоти  $f = 2,45$  ГГц приблизно дорівнює 12 см у вільному просторі. Довжина хвилі  $\lambda_g$  всередині прямокутного хвилеводу описується наступним виразом [8]–[10]:

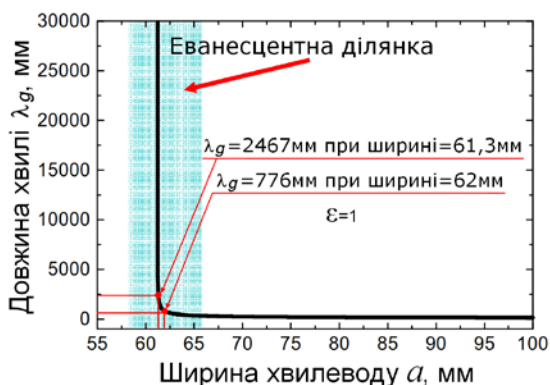


Рис. 1 Залежність довжини хвилі, що розповсюджується у прямокутному хвилеводі, від його ширини ( $f = 2,45$  ГГц) [9]

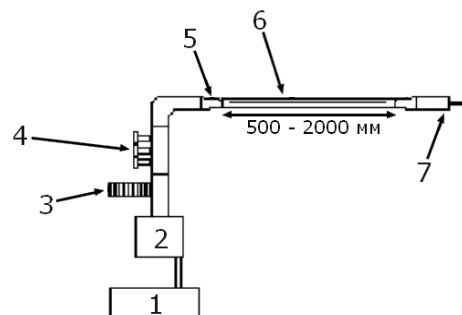


Рис. 2 Схематичне зображення установки для створення газорозрядної плазми лінійної форми [10]

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}},$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі у вільному просторі,  $a$  – ширина хвилеводу.  $\epsilon$ ,  $\mu$  – діелектрична і магнітна проникності відповідно.

На рис. 1 показано залежність між шириною хвилеводу та довжиною хвилі  $\lambda_g$ , що поширюється цим хвилеводом [9]. 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 позамежного хвилеводу, можна отримати довжину хвилі більше 1000 мм. Так, при ширині хвилеводу 62 мм довжина хвилі  $\lambda_g$  складає 776 мм, а при ширині 61,3 мм може досягти 2467 мм [9]. Ця ділянка корисна для генерації плазми, яка буде мати форму довгої лінії. Представлений графік справедливий для  $\epsilon=1$ , якщо ж внутрішнє середовище хвилеводу буде мати  $\epsilon>1$ , то положення зростаючої ділянки кривої буде зміщуватись.

Крім того, у роботі [9] 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 [9]–[11] наведено можливі конструкції НВЧ генераторів на еванесцентних хвилях для отримання НВЧ плазми у формі довгої лінії. Варіант експериментальної установки показаний на рис. 2 [9], [10]. 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 який НВЧ хвиля потрапляє з основного тракту за допомогою перехідного звужувального хвилеводу (5); пристрої узгодження – триштиревий підлаштувач (4), короткозамикальний поршень (7). Відбита хвиля відводиться з основного тракту за допомогою феритового циркулятора (3) із узгодженням навантаженням. Хвилевід основного тракту за допомогою перехідного хвилеводу змінює розміри з 96 мм × 27 мм на 62 мм × 5 мм. Висота

хвилеводу була зменшена з метою збільшення густини потужності в хвилеводі [9]. Живлення подається з одного кінця хвилеводу.

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  $w = 35$  мм. У якості газового наповнення може використовуватись гелій або аргон.

У роботі [11] введено інший тип НВЧ джерела лінійної плазми високої щільності на базі еванесцентних хвиль. У його конструкцію входить два джерела НВЧ потужності з обох кінців. Такий метод називається подвійним живленням. По технології обробки підкладок він досить схожий до попереднього, коли використовується НВЧ потужність від одного магнетрона, але перевагами стали більша концентрація заряджених частинок у НВЧ плазмі та більша площа оброблюваної поверхні. Також були досліджені оптимальні робочі параметри технологічної установки для генерації НВЧ плазми (рис. 4).

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 ( $P$ ).

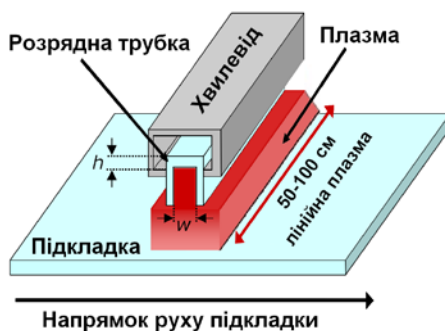


Рис. 3 Пояснення методу обробки поверхні підкладки великої площі за допомогою газорозрядної плазми однорідної лінійної форми

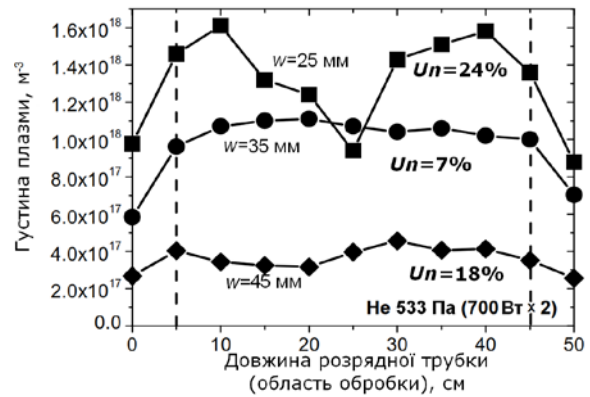


Рис. 4 Вибір оптимальної ширини газорозрядної трубки  $w$ ; газ – He, тиск 533 Па, потужність НВЧ 1,4 кВт ( $Un$  – неоднорідність плазми) [11]

### III. ДЖЕРЕЛО ПЛАЗМИ НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВОЇ ХВИЛІ

Нещодавні дослідження [12] показали, що джерело НВЧ 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 має отвори, інша – суцільна. 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 НВЧ 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.

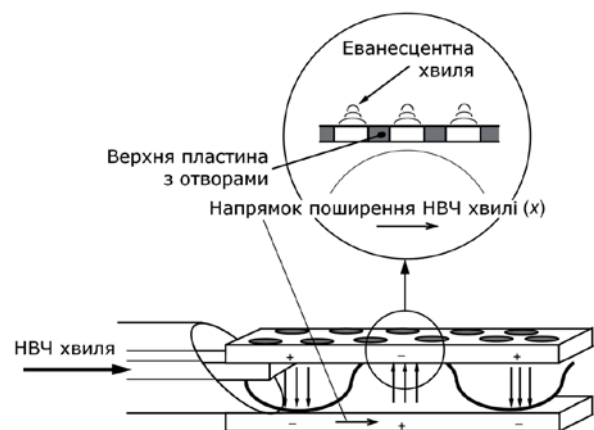


Рис. 5 Схематичне зображення двохпластинчастого плазмового генератора на основі еванесцентних хвиль [12]

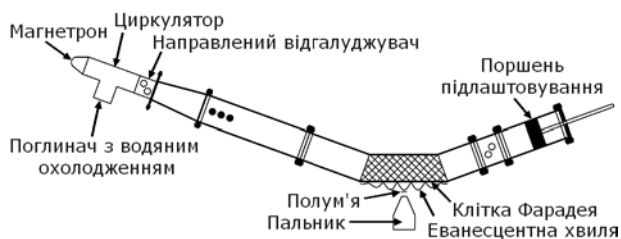


Рис. 6 Конструкція генератора еванесцентної хвилі, що збуджується поблизу поверхні діелектрика внаслідок ефекту порушення повного внутрішнього відбиття [13]

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 (хвильоводу). Хвильовід і пластини знаходяться у вакуумній камері при тиску 3 Па. Пластини розташовуються паралельно один одному, відстань між ними складає 10 мм. Матеріал пластин – алюміній, товщина – 2 мм, площа – 100 мм × 140 мм. Газ – аргон.

НВЧ потужність змінювалась у діапазоні від 40 до 120 Вт, а густина плазми при цьому знаходилась у межах  $1,7 \dots 9,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

#### IV. ЗБУДЖЕННЯ ЕВАНЕСЦЕНТНИХ ХВИЛЬ ПОБЛИЗУ ПОВЕРХНІ ДІЕЛЕКТРИКА ВНАСЛІДОК ЕФЕКТУ ПОРУШЕННЯ ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИТТЯ

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

Цей метод був розглянутий у роботі [13]. Конструкція НВЧ тракту показана на рис. 6. НВЧ хвиля поширюється у хвильоводі, 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 пальника електро-полум'яної системи. Та хвиля, яка утворюється поблизу клітки Фарадея, і є еванесцентною хвилею. Вона стимулює фізико-хімічні процеси горіння за рахунок енергії хвилі і високо енергетичних плазмових частинок. Ця система може застосуватися в енергетиці, полум'яно-електрохімічній технології та для полум'яно-емісійного і полум'яно-іонізаційного аналізу речовин.

Потужність магнетронного генератора 1,3 кВт, частота НВЧ хвилі 2,45 ГГц.

#### ВИСНОВКИ

Таким чином, еванесцентні хвилі НВЧ діапазону у плазмовій техніці можуть знайти застосування, при цьому з їх допомогою можливо генерувати НВЧ плазму, не дивлячись на те, що вони не поширюються

у позамежному хвильоводі і швидко затухають на певній відстані.

Можливі варіанти побудови НВЧ генераторів плазми на базі еванесцентних хвиль, що наведені у даній статті, та аналіз їх практичних реалізацій приводить до висновку, що такі генератори мають практичне значення і можуть бути застосовані в обробці підкладок з різних матеріалів, з великою поверхнею і розміром від десятків сантиметрів до кількох метрів та виготовленні на них мікро- і наноструктур.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] B. Danilin, *Primenenie nizkotemperaturnoi plazmy dlia naneseniia tonkih plenok* [Low-temperature plasma application for thin film deposition]. Moscow, USSR: Energoatomizdat, 1989. ISBN 5-283-03939-0
- [2] B. Danilin and V. Kireev, *Primenenie nizkotemperaturnoi plazmy dlia travleniia i ochildki materialov* [Low-temperature plasma application for etching and cleaning of materials]. Moscow, USSR: Energoatomizdat, 1987.
- [3] N. G. Einspruch and D. M. Brown, *Plasma processing for VLSI*. Orlando, USA: Academic Press, 1984.
- [4] Y. N. Korkishko, *Tehnologicheskie aspekty* [Technological aspects], vol. 2. Moscow, Russia: BINOM. Laboratory of knowledge, 2011. ISBN 5-9963-0336-6
- [5] O. Volpian, A. Kuzmichev, and V. Perevertailo, "Bezelektroodnyi activator reaktsionnogo gaza dlia opticheskoi tonkoplenochnoi tehnologii." [Electrodeless activator of reactive gas for optical thin-film technology], *Nanoingeneria*, no. 9, pp. 11–16, 2014.
- [6] O. Volpian and A. Kuzmichev, *Otritsatelnoe prelomlenie voln. Vvedenie v fiziku i tehnologiiu elektromagnitnykh metamaterialov* [Negative refraction of waves. Introduction to the physics and technology of electromagnetic metamaterials]. Kyiv, Ukraine: Avers, 2012.
- [7] O. Volpian and A. Kuzmichev, "Nanorazmernye elektronno-fotonnye ustroistva na osnove poverhnostnykh plazmonnykh polaritonov." [Nanoscale electron-photon devices based on surface plasmon polaritons], *Electron. Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–11, 2011.
- [8] I. Lebedev, *Tehnika i pribory SVCh* [Microwave technique and devices], vol. 1. Moscow, USSR: Vyshaya shkola, 1970.
- [9] E. F. Abdel, M. Suzuki, Y. Kitamura, and H. Shindo, "Large-scaled line plasma production by evanescent microwave in a narrow rectangular waveguide," in *28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, ICPIG'2007*, 2007.
- [10] E. A. Fattah, S. Fuji, and H. Shindo, "Large-scaled line plasma production by evanescent microwave," *Plasma Devices Oper.*, vol. 17, no. 3, pp. 221–228, 2009. DOI: [10.1080/10519990902958029](https://doi.org/10.1080/10519990902958029)
- [11] G. Shanmugavelayutham, R. Ramasamy, T. Fukasawa, H. Kajiyama, and T. Shinoda, "Development of uniform line-shaped plasma under long wavelength evanescent microwave (LWEM) for PDP processing," in *9th Asian Symposium on Information Display, ASID'2006*, 2006.
- [12] Y. Yoshida and H. Ogura, "Compact holey-plate plasma source," *Vacuum*, vol. 74, no. 3–4, pp. 509–513, 2004. DOI: [10.1016/j.vacuum.2004.01.022](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.01.022)
- [13] E. Stockman, J. Michael, A. Fuller, S. Zaidi, and R. Miles, "Toward High Q, Evanescent Coupled Microwave Controlled Combustion," in *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009. DOI: [10.1016/j.vacuum.2004.01.022](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.01.022)

Надійшла до редакції 24 червня 2017 р.





УДК 621.38

# Генерация сверхвысокочастотной плазмы при помощи эванесцентных волн

Перевертайло В. В., ORCID [0000-0001-5706-5946](https://orcid.org/0000-0001-5706-5946)

e-mail [vladimir\\_mj@ukr.net](mailto:vladimir_mj@ukr.net)

Кузьмичёв А. И., к.т.н., доц., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)

Кафедра электронных приборов и устройств, Факультет электроники

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

*Реферат*—В данной работе проведен анализ и сравнение возможных конструктивных особенностей сверхвысокочастотных генераторов низкотемпературной плазмы, которые строятся на базе эванесцентных волн. Целью исследования является систематизация различных методов и подходов к генерации СВЧ плазмы с помощью эванесцентных волн, поиск технологии применения эванесцентных волн СВЧ диапазона в плазменной технике, проблема обеспечения зоны однородности обрабатываемой поверхности твердого тела большой площади (метры квадратные). В статье рассмотрены три подхода, обеспечивающие возбуждение эванесцентной волны: возбуждение с помощью запердельного волновода; эванесцентная волна возбуждается с помощью поверхностной волны; эванесцентная волна, которая возбуждается вблизи поверхности диэлектрика за счет эффекта нарушения полного внутреннего отражения. Представлены результаты первых экспериментов использования таких генераторов и определены перспективы их дальнейшего применения для ионно-плазменной технологии обработки больших подложек. На основе проведенного исследования выдвинуты предположения будущих разработок в данном направлении.

Библ. 13, рис. 6.

*Ключевые слова* — генерация сверхвысокочастотной плазмы; низкотемпературная плазма; эванесцентные волны; сверхвысокочастотный генератор.

UDC 621.38

## Microwave plasma generation using evanescent waves

V. V. Perevertailo, ORCID [0000-0001-5706-5946](https://orcid.org/0000-0001-5706-5946)

e-mail [vladimir\\_mj@ukr.net](mailto:vladimir_mj@ukr.net)

A. I. Kuzmichev, PhD, Assoc.Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)

Department of Electronic Devices and Devices, Faculty of Electronics

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

*Abstract*—Analysis and comparison of possible design features of microwave low-temperature plasma generators, which are based on evanescent waves, was carried out in this paper. The aim of the study are systematization of different methods and approaches to the generation of microwave plasma using evanescent waves, the search of evanescent waves application in microwave plasma technology, the problem of providing a homogeneity zone of the solid surface area under treatment (up to square meters), which could be used in flat-panel displays, presentation screens, solar panels, etc. Three approaches which provide excitation of evanescent wave are discussed: excitation based on below cutoff waveguide; evanescent wave which is excited by surface waves; evanescent wave which is excited near the surface of the dielectric based on effect of violation of total internal reflection. These three methods make it possible to get the evanescent wave for generation of gas-



discharge plasma. Equipment and technology based on these methods are not fully studied yet and required analysis and improvements. The results of this study could be applied in new designs and processes in the field of treatment of the surface layer of solids. The results of the first experiments using such generators are presented in this paper and prospects of further applications for ion-plasma treatment of the surface layer of solids (deleting, printing material and surface modification) are determined. The issue of microwave plasma generation and other technological processes based on evanescent waves is extremely important. The cause of that is their concern of various branches of science and technology including plasmonics, nanoelectronics, optics and they are widely discussed in recent years. By analogy with the effects in optics, evanescent waves can cause similar effects in gas-discharge technology. “Evanescent waves” – separate direction in electrodynamics associated with the study of these waves: their properties and possibilities of their application. Now this trend is taking on widespread development, especially in nanophotonics (excitation of plasmon oscillations and waves of plasmon polariton type). In this paper, the possibility of using the evanescent mode of the microwave waves for excitation of plasma formation is considered. Also in the paper was devoted the attention to prototyping of microwave generators that will provide the technological requirements for the surface treatment of solids and deposited coatings, giving competitive results, thus are environmentally safe, easy-to-work and relatively inexpensive design on the market. On the basis of the research, propositions of the future developing in this direction are put forward.

Ref. 13, fig. 6.

*Keywords* — *microwave plasma generation; low-temperature plasma; evanescent waves; microwave generator.*

