

ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ИЗ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Овсяников Виктор В.¹, д.т.н., профессор

Мороз С.Н.², магистрант

¹*Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара, Украина*

²*Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»,
г. Днепропетровск, Украина*

Введение и постановка задачи

Плазменные излучатели на основе холодной плазмы (ПИ) как правило, представляют собой диэлектрическую изогнутую или прямолинейную трубку, заполненную инертным газом в состоянии газового разряда [1]. В работах [2, 3] рассмотрен изогнутый U-образный петлевой ПИ, который закреплен на металлическом противовесе, с внутренней стороны которого к U-образной трубке подводятся как низкочастотная разность потенциалов для создания холодной плазмы газового разряда, так и высокочастотный сигнал для возбуждения ПИ в микроволновом диапазоне. Фактически, такой излучатель является несимметричным шлейф-вибратором А.А. Пистолькорса конечной проводимости. Его максимальная эффективность излучения соответствует высоте над противовесом близкой к четверти длины волны рабочего диапазона. В работах [4-6] рассмотрены широкополосные свойства подобных ПИ и их диаграммы направленности (ДН).

В данной работе исследованы радиофизические характеристики собственно холодной плазмы газового разряда и электродинамические характеристики U-образного петлевого и прямолинейного стержневого ПИ, выполненных на основе этой плазмы, включая и эффективность обоих вариантов ПИ.

Собственные характеристики холодной плазмы в исследуемом частотном диапазоне

Частотный диапазон для исследований ПИ был выбран ниже плазменной частоты электронов, значения которой определяются формулой из [7]:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{4\pi \cdot N_e \cdot e_e^2}{m_e}}, \quad (1)$$

где ω_e – угловая плазменная частота; N_e – эффективная концентрация заряженных частиц, см⁻³; e_e – заряд электрона, $e_e=4,80 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ; m_e – масса электрона, $m_e=9,11 \cdot 10^{-28}$.

Удельная проводимость холодной плазмы (σ) в присутствии электромагнитного поля и относительная диэлектрическая проницаемость опреде-

лялись також по соотношениям из [7].

$$\sigma = \frac{e_e^2 N_e v_{ef}}{m_e \cdot (\omega^2 + v_{ef}^2)}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость в См/м.

Относительная диэлектрическая проницаемость преимущественно определялась из соотношений

$$\epsilon_r = 1 - \frac{4 \cdot \pi \cdot e_e^2 \cdot N_e}{m_e \cdot (\omega^2 + v_{ef}^2)}, \quad (3)$$

где v_{ef} – эффективное число столкновений частиц за секунду

$$v_{ef} = \frac{5,5 \cdot N_e}{T^{3/2}} \cdot \log\left(\frac{220 \cdot T_e}{N_e^{1/3}}\right), \quad (4)$$

где T – температура плазмы, °K; T_e – температура электронной компоненты плазмы.

Расчеты удельной проводимости холодной плазмы и ее относительной диэлектрической проницаемости выполнены для метрового диапазона длин волн. Полученные графики удельной проводимости холодной плазмы и относительной диэлектрической проницаемости (с температурой электронной компоненты плазмы $T_e = 10^4$ °K) приведены на рис.1а и 1б для различной эффективной концентрации заряженных частиц в плазме. Гра-

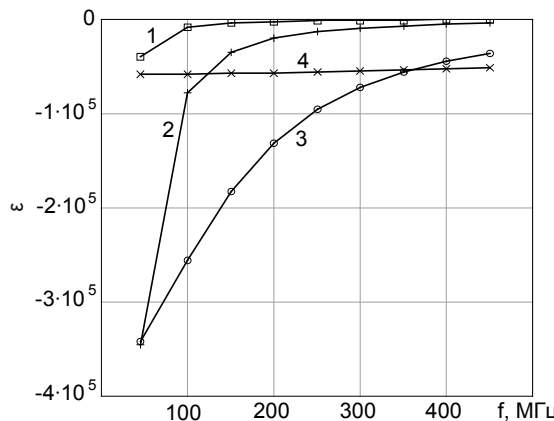


Рис. 1а. Графики зависимости относительной диэлектрической проницаемости холодной плазмы от частоты

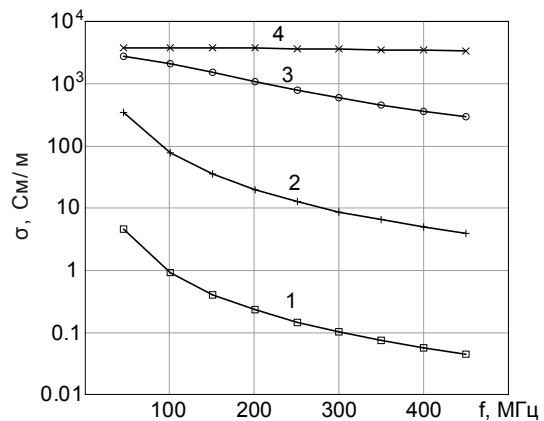


Рис. 1б. Графики зависимости удельной проводимости холодной плазмы от частоты

фики: 1 – $N_e = 10^{12}$ см⁻³; 2 – $N_e = 10^{13}$ см⁻³; 3 – $N_e = 10^{14}$ см⁻³; 4 – $N_e = 10^{15}$ см⁻³.

Входные сопротивления и диаграммы направленности *U*-образного петлевого плазменного излучателя

Рассмотрим характеристики *U*-образного ПИ, опубликованные Виктором Овсяниковым в 2001г. [2] и аналогичного ПИ, заимствованного другими авторами в 2007 г. [3].

Нами в программной среде *FEKO* был смоделирован и исследован петлевой ПИ, общий вид которого представлен на рис. 2.

Результаты компьютерных расчетов коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе узла возбуждения петлевого ПИ в частотном диапазоне для обычной концентрации заряженных частиц в плазме $N_e = 10^{13} \text{ см}^3$ приведены на рис.3. При этом в качестве исходных данных принимались значения удельной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости σ и ϵ , полученные из формул (2) и (3) в исследуемом частотном диапазоне, рис. 3 (кривая 1). Здесь же для сравнения приведена расчетная зависимость КСВН подобного ПИ аналогичной конфигурации, но из алюминия (кривая 2). Как видно из сравнения зависимостей 1 и 2, частотный диапазон петлевого ПИ на основе холодной плазмы приблизительно вдвое шире по уровню КСВН < 2 и втрое – по уровню КСВН < 5, чем для ПИ аналогичной конфигурации, выполненного из алюминия. Такой результат и следовало ожидать, учитывая известные публикации о широкополосных свойствах не только плазменных, но и излучателей из резистивных стержней с конечной (малой) проводимостью. Результаты расчетов диаграмм направленности (ДН) рассматриваемого ПИ в программной среде *FEKO* на трех фиксированных частотах рассматриваемого диапазона приведены на рис.4. Как видно характер ДН приблизительно изотропный, учитывая относительно малый диаметр $\Phi = 0,4\lambda_{cp}$ проводящего диска-противовеса 2 (рис.2). Однако на верхних частотах диапазона (кривые 2 и 3) возникают довольно глубокие провалы в ДН. Глубокие провалы вдоль оси ПИ подобны провалам для обычных петлевых (штыревых) несимметричных антенн над проводящим диском ограниченных размеров, а глубокий провал в ДН слева (кривая 3) до -38 дБ объясняется наличием в этом направлении узла возбуждения ПИ (3,4, рис.2), который вносит не симметрию в ДН, особенно на верхней частоте диапазона (кривая 3).

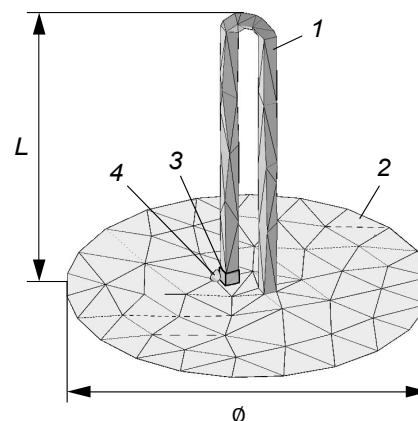


Рис. 2. Компьютерная модель ПИ: 1 – плазменная петля; 2 – проводящий диск; 3 – порт узла возбуждения; 4 – проводящее кольцо в основании ПИ.

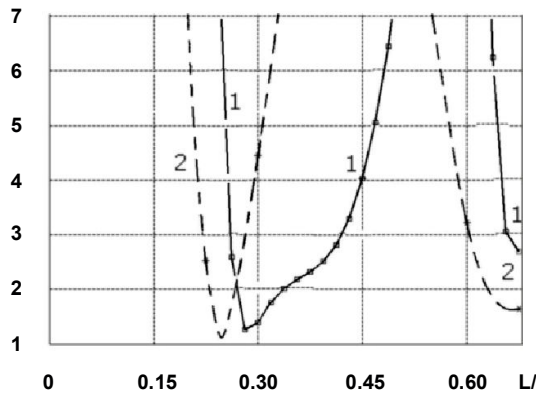


Рис. 3. Графики КСВН в частотном диапазоне ПИ рис.2: 1 – при частотной дисперсии $\epsilon_r = \text{var}$ и $\sigma = \text{var}$ в исследуемом диапазоне; 2 – для алюминия той же конфигурации.

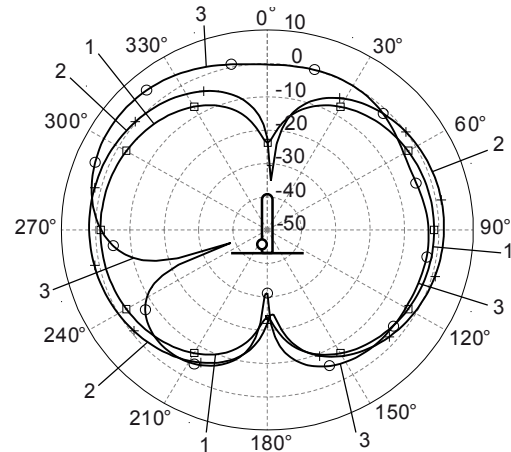


Рис. 4. Диаграммы направленности ПИ рис. 2 при $\epsilon_r = \text{var}$ (рис. 1а) и $\sigma = \text{var}$ (рис.1б) : 1 – $L/\lambda=0,07$; 2 – $L/\lambda=0,23$; 3 – $L/\lambda=0,7$.

Учитывая некоторые публикации, например, [8], в которых делается попытка взять под сомнение результаты работы В.Л. Гинзбурга [7] относительно отрицательных значений диэлектрической проницаемости холодной плазмы, вытекающих из выражения (3), мы выполнили расчеты электродинамических характеристик ПИ не только при отрицательных, но и положительных значениях ϵ_r холодной плазмы (3). При этом проводимость σ в исследуемом частотном диапазоне определялась, как и выше по формуле (2) для всех частот исследуемого диапазона.

Значение $\epsilon_r = \text{const}$ для данного варианта ПИ отыскивается методом оптимизации по критерию минимума целевой функции КСВН (ϵ_r) в исследуемом диапазоне частот, путем последовательного сопоставления и анализа двух частотных зависимостей КСВН (экспериментальной и расчетной) и определения минимума целевой функции $K_{SVN}(\epsilon_r)$ [9]:

$$\min K_{SVN}(\epsilon_r) , \quad \epsilon_r \in (-\infty < \epsilon_r < \infty) , \quad f \in [f_i, f_a] \text{ MHz.} \quad (5)$$

В качестве целевой функции применялось выражение:

$$\hat{E}\hat{N}\hat{A}\hat{I}(\epsilon_r) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{K_{pl}(f_j) - K_{cl}(f_j, \epsilon_r)}{K_{pl}(f_j)} \right]^2 , \quad (6)$$

где N – общее число дискретных частот в исследуемом диапазоне; j – номер по порядку дискретной частоты в частотном диапазоне; $K_{pl}(f_j)$, $K_{cl}(f_j, \epsilon_r)$ – экспериментальные и расчетные значения КСВН в частотном диапазоне соответственно.

В работе [6] приведены результаты определения ε_r с использованием данных экспериментальных исследований и применения оптимизации в соответствии с выражениями (5) и (6). С учетом полученных положительных значений ε_r при $\sigma = \text{var}$ (2), которые соответствуют плотности заряженных частиц в ПИ $N_e \approx N_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ были проведены расчеты КСВН ПИ (рис.2) в том же частотном диапазоне, в котором проводились расчеты КСВН, приведенные графически на рис.3. В результате было получено, что при положительных значениях ε_r , например, $\varepsilon_r = 500$ ПИ обеспечивает более широкую полосу пропускания, чем для случая, рассмотренного на рис. 3 для отрицательных значений $\varepsilon_r = \text{var}$ (3), а именно, частотный диапазон петлевой ПИ на основе холодной плазмы при $\varepsilon_r = 500$ приблизительно в три раза шире по уровню КСВН < 2 , чем для ПИ аналогичной конфигурации, выполненной из алюминия. ДН при $\varepsilon_r = 500$ для ПИ (рис. 2) аналогичны ДН, приведенным на рис.4.

Эффективность U-образного петлевого ПИ и стержневого плазменных излучателей

В той же программной среде *FEKO* были исследованы эффективность U-образного петлевого ПИ (рис.2) и стержневого прямолинейного ПИ из холодной плазмы длиной 6λ , с диаметром стержня $0,7\lambda$ при проводимостях, определяемых по формуле (2) и ε_r , найденных как по формуле (3), так и оптимизацией целевой функции (6).

В результате для петлевого ПИ при отрицательных значениях $\varepsilon_r = \text{var}$ (3) и $\sigma = \text{var}$ (2), на центральной частоте исследуемого диапазона получены очень высокие расчетные значения эффективности, до 100%. Это не соответствует действительности и не согласуется с экспериментальными результатами других исследователей, например [10], которые получили КПД подобного ПИ порядка 20%. При расчетах петлевого ПИ с $\varepsilon_r = 500$ и $\sigma = \text{var}$ (2) получен КПД 50-60%, что ближе к экспериментальным результатам.

Для стержневого ПИ расчетные значения КПД не превышают 20% в том же частотном диапазоне.

Выводы

1. Основными преимуществами ПИ перед проволочными аналогичной конфигурации можно считать расширенный частотный диапазон, как по входным импедансам так и ДН, возможность управления ДН и коэффициентом усиления ПИ при постоянной мощности микроволнового передатчика, возможность ПИ мгновенно “исчезать” из поля зрения радиолокационных и других средств отключением генератора плазмы ПИ.

2. При исследованиях петлевого ПИ получено, что по уровню КСВН ≤ 2 он обеспечивают частотный диапазон до 50% в сравнении с аналогичным излучателями из алюминия. Диаграммы направленности ПИ сохра-

няют свою относительную стабильность приблизительно в том же частотном диапазоне.

3. Эффективность ПИ обладает частотной дисперсией как при постоянных, так и переменных отрицательных и положительных значениях ε_r . При классических значениях σ и классических отрицательных значениях ε_r холодной плазмы [1] на частотах, близких к резонансным, эффективность ПИ достигает 100 %. При постоянном положительном значении ε_r эффективность не превышает 70 %.

4. При использовании ПИ следует учитывать [11], что его минимально возможные, но при этом значительные коэффициенты шума составляют, например, для ксенона 14,5 дБ и для неона 18 дБ при соответствующих шумовых температурах 9000 и 25000 °К.

Литература

1. Jenn D.C. Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art / D.C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for: SPAWAR PMW 189 San Diego, CA, USA, 2003. – 27 p.
2. Овсяников В.В. Широкополосный микроволновый излучатель на основе газоразрядной плазмы, / В.В. Овсяников // Mag. Radiophysics and Radioastronomy, Kharkiv. Vol. 6, No. 3, 2001.– p. 261-267.
3. Anderson T.R. and Alexeff I. Stealthy, Versatile, and Jam Resistant Antennas made of Gas / T.R. Anderson APS Division of Plasma Physics annual meeting, November 12, - 2007.
4. Research of the New UNF Loop Emitter on a Basis of Gas Discharge Cold Plasma. Proc. of Int. 2008 Loughborough Antennas & Propagation Conference. – 17 –18 Marh 2008, Loughborough, UK. – p. 409-412.
5. Ovsyanikov V.V. The plazma antennas mounted on fragments of mobile objects / V.V. Ovsyanikov, O.L.Olshevskiy, V.M. Popel, Y.D. Romanenko, Y.V. Ponomarenko, S.N. Moroz, The International Conf. Ultrawideband and ultrashort impulse signals, 6-10 September, 2010, Sevastopol, Ukraine, - p. 233-235.
6. Bezpalov A. Research of Antennas Made Gas Plasma on Microwave Band / A. Bezpalov, V.V. Gnatushenko, V.V. Ovsyanikov, O. Reuta, V. Safonov, O. Sydorenko, The European Conference on Antennas and Propagation 12-16 April 2010, in Barcelona, Spain, Thur-Poster Session A7: Spesial Antennas, Thur-35.
7. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург – М., 1960. – 552 с.
8. Менде Ф.Ф. Существуют ли ошибки в современной физике / Ф.Ф. Менде, Харьков, Константа, 2003.-72 с.
9. Моисеев Н.Н. Методы оптимизации / Н.Н Моисеев, Ю.П. Иванилов, Е.М. Столярова – М.: Наука, 1978. – с. 352.
10. Левитский С.М. Излучение электромагнитных волн плазменными волноводами / С.М. Левитский, Ю.Л. Бурькин / Радиотехника и электроника, т. 18, № 12, 1973. - С.2642-2644.
11. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Справочное руководство / Ф. Тишер – пер. Нем. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 367с.

Овсяников В. В., Мороз С.Н. Параметри випромінювачів з холодної плазми. Досліджено в мікрохвильовому діапазоні радіофізичні характеристики холодної плазми газового розряду та електродинамічні характеристики U-образного петльового і прямолінійного стрижневого плазмових випромінювачів (ПВ), виконаних на основі цієї плаз-

ми. Проведена оцінка в метровому діапазоні довжин хвиль питомої провідності холодної плазми і відносної діелектричної проникності. У програмному середовищі FEKO з урахуванням цих даних змодельовані та досліджено петльовий і прямолинійний стрижневий ПВ. Отримано, що при позитивних значеннях ϵ_r петльовий ПВ забезпечує більшу широкую смугу пропускання, ніж для від'ємних значень. При цьому частотний діапазон петльового ПВ на основі холодної плазми приблизно в чотири рази ширше за рівнем КСХН < 2 і втричі - за рівнем КСХН < 5 , ніж для випромінювача аналогічної конфігурації з алюмінію. При розрахунках ефективності петльових ПВ з позитивними значеннями ϵ_r ККД ПВ складає 50-60%. Для стрижневого ПВ розрахункові значення ККД не перевищували 20%.

Ключові слова: відносна діелектрична проникність і провідність холодної плазми, U-образний петльовий і прямолинійний стрижневий плазмові випромінювачі, електродинамічні характеристики ПВ, ефективність ПВ.

Овсяников В. В., Мороз С.Н. **Параметры излучателей из холодной плазмы.** Исследованы в микроволновом диапазоне радиофизические характеристики холодной плазмы газового разряда и электродинамические характеристики U-образного петлевого и прямолинейного стержневого плазменных излучателей (ПИ), выполненных на основе этой плазмы. Проведена оценка в метровом диапазоне длин волн удельной проводимости холодной плазмы и относительной диэлектрической проницаемости. В программной среде FEKO с учетом этих данных смоделированы и исследованы петлевой и прямолинейный стержневой ПИ. Получено, что при положительных значениях ϵ_r , петлевой ПИ обеспечивает более широкую полосу пропускания, чем для отрицательных значений. При этом частотный диапазон петлевого ПИ на основе холодной плазмы приблизительно в четыре раза шире по уровню КСВН < 2 и втрое – по уровню КСВН < 5 , чем для излучателя аналогичной конфигурации из алюминия. При расчетах эффективности петлевых ПИ с положительными значениями ϵ_r КПД ПИ составляет 50-60%. Для стержневого ПИ расчетные значения КПД не превышали 20%.

Ключевые слова: относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость холодной плазмы, U-образный петлевой и прямолинейный стержневой плазменные излучатели (ПИ), электродинамические характеристики ПИ, эффективность ПИ.

Ovsyanikov V.V., Moroz S.N. **Parameters of the emitters of a cold plasma.** Investigated in the microwave range radiophysical characteristics of cold plasma gas discharge and electromagnetic characteristics of the U-shaped loop and a straight rod plasma emitters (PE) performed on the basis of the plasma. Evaluated in the meter wavelength range of conductivity of cold plasma and the relative permittivity. In FEKO software environment, taking into account these data are simulated and studied loop and a straight rod PE. It was found that for positive values ϵ_r , loop PE provides more bandwidth than for negative values. The frequency range of the loop PE through a cold plasma is about four times larger in terms of VSWR < 2 and three times - in terms of VSWR < 5 , than for the same emitter configuration of aluminum. When calculating the effective loop PE with positive values ϵ_r of PE efficiency is 50-60%. For rod PE calculated efficiency does not exceed 20%.

Keywords: relative permittivity and conductivity of cold plasma, U-shaped loop and a straight rod plasma emitters, the electrodynamic characteristics of the PE, the effectiveness of the PE.