

В. В. Овсяников, С. Н. Мороз*

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара
72, пр. Гагарина, Днепропетровск, 49010, Украина

E-mail: ovsyan_viktor@mail.ru

*Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»
19, пр. Карла Маркса, Днепропетровск, 49600, Украина

E-mail: stasmilm@mail.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ С АНТЕННОЙ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Взаимодействие электромагнитных сигналов с плазменными антеннами (ПА) является актуальной задачей радиофизики и электроники, так как они применяются в различных отраслях радиотехники, в том числе для нужд Вооруженных сил. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных ПА, на данный момент не освещена проблема влияния паров ртути на их электродинамические характеристики. Предложен способ расчета проводимости холодной плазмы с добавлением паров ртути, выполнен расчет характеристик ПА с парами ртути и без них в двух частотных диапазонах в программной среде *FEKO*, проанализировано влияние паров ртути на параметры ПА. Расчеты показали, что введение паров ртути в ПА приводит к существенному снижению ее КПД и изменяет характеристику коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), особенно с повышением частоты электромагнитных сигналов. Для улучшения параметров, особенно КПД исследуемых антенн, выданы рекомендации по снижению количества ртути в них. Рассмотренные антенны могут быть использованы для установки на аэрокосмических аппаратах. Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: плазменная антенна, относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость холодной плазмы, пары ртути, КСВН, КПД.

Известен ряд публикаций по результатам разработки и исследований плазменных антенн (ПА), выполненных на основе холодной плазмы газового разряда [1–4], в работе [1] приведены результаты теоретической оценки и основные разновидности ПА, а в статье [2] приведены результаты исследования внутренних и внешних характеристик петлевой ПА СВЧ-диапазона. Показано, что частотные свойства ПА по входному сопротивлению превосходят соответствующие параметры обычных вибраторных металлических антенн. Предложен метод определения проводимости плазмы. Показано, что коэффициент усиления ПА можно изменять более чем в 2 раза путем регулирования значения постоянного тока в цепи газового разряда. В работе [3] рассмотрены разновидности современных ПА, разрабатываемых в США в интересах Вооруженных сил, а в публикации [4] приведены результаты расчетов и экспериментальной проверки параметров петлевых ПА.

В определенной степени интерес к ПА можно объяснить их свойствами при необходимости исчезать из поля зрения радиолокационных и других средств. Также на основе ПА можно создавать сложные и многофункциональные реконфигурируемые антенны. К сожалению, будучи в определенной степени полупроводящей средой [5], ПА обладают по сравнению с металлическими антеннами несколько пониженной эффективностью излучения или КПД. Как следует из [1], внутрь ПА вместе с нейтральным газом вводится некоторое количество ртути, что возможно, влияет на радиотехнические (РТ) параметры ПА и затрудняет их теоретическую оценку.

В нашей работе исследована актуальная задача о влиянии паров ртути в ПА на их РТ-характеристики. В начале приведены результаты учета влияния паров ртути на удельную проводимость (УП) и относительную диэлектрическую проницаемость (ДП) внутренней среды различных плазменных антенн в двух характерных частотных диапазонах. Затем представлены результаты расчетов коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), КПД, диаграмм направленности (ДН) ПА в двух диапазонах с учетом и без учета влияния паров ртути.

1. Исходные соотношения. Рассмотрим ПА в виде петлевой диэлектрической вакуумной трубки, закрепленной на металлическом диске 2 и заполненной холодной плазмой газового разряда с некоторым добавлением паров ртути (рис. 1). Антенна возбуждается электромагнитным СВЧ-сигналом в точке запитки 1.

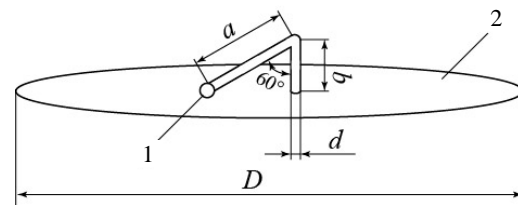


Рис. 1. Петлевая треугольная несимметричная антенна: 1 – порт возбуждения ПА в СВЧ-диапазоне; 2 – металлический диск. Диаметр диска для НЧ-диапазона: $D_{НЧ} = 4 \text{ м} = 3,33\lambda_{НЧ}$, для ВЧ-диапазона $D_{ВЧ} = 0,5 \text{ м} = 0,33\lambda_{ВЧ}$

УП и относительную ДП среды ПА определяем по формулам работы [5]. Однако при этом

дополняем их слагаемыми, учитывающими влияние паров ртути следующим образом:

$$\sigma_{PA} = \sigma_G + \sigma_{Hg}^{PA}; \quad \varepsilon_{PA} = \varepsilon_G - i\varepsilon''; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_G} = \frac{\sigma_{PA}}{\omega \varepsilon_G},$$

где σ_{PA} , ε_{PA} – суммарные значения УП и ДП ПА с учетом паров ртути; σ_G , ε_G – УП и ДП плазмы по формулам работы [5]; σ_{Hg}^{PA} – УП паров ртути, наполняющих ПА; ε'' – мнимая составляющая ДП ПА; ω – круговая рабочая частота; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в среде ПА с учетом [6].

С учетом выражения (1) расчет суммарного значения УП ПА (σ_{PA} , См/м) для случая наличия в ПА паров ртути выполняем по формуле

$$\sigma_{PA} = 1,11 \cdot 10^{-10} \left(\frac{e_e^2 N_e v_{ef}}{m_e (\omega^2 + v_{ef}^2)} + \frac{4\sigma_{Hg} m}{\pi \rho_{Hg} L d^2} \right), \quad (2)$$

где e_e – заряд электрона $4,80 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ; m_e – масса электрона $9,11 \cdot 10^{-28}$ г; N_e – эффективная концентрация заряженных частиц, см^{-3} ; v_{ef} – эффективное число столкновений частиц за секунду, которое зависит от N_e , T и T_e ; T – температура плазмы, К; T_e – температура электронной компоненты плазмы [6]. Во втором слагаемом в (2): σ_{Hg} – проводимость ртути $1,04 \cdot 10^6$ См/м; m – масса ртути, вводимой в данную ПА; ρ_{Hg} – плотность ртути $1,36 \cdot 10^4$ кг/м³; L , d – длина и диаметр плазменной трубки ПА.

На рис. 2, а приведены результаты расчетов УП по формуле (2) в низкочастотном (НЧ) диапазоне (50...500 МГц, $f_{НЧ} = 250$ МГц, $\lambda_{НЧ} = 1,2$ м) для ПА (рис. 1) с размерами $L_{НЧ} = a_{НЧ} + b_{НЧ} = 0,8$ м = $0,67 \lambda_{НЧ}$, $a_{НЧ} = 0,53$ м, $b_{НЧ} = 0,27$ м, $d_{НЧ} = 26$ мм, $m_{НЧ} = 79,55$ мг, $T = 10^4$ К, $T_e = 10^4$ К.

Результаты расчетов УП ПА по формуле (2) в высокочастотном (ВЧ) диапазоне (1 610...2 500 МГц, $f_{ВЧ} = 2$ ГГц, $\lambda_{ВЧ} = 0,15$ м) для ПА (рис. 1) с параметрами $L_{ВЧ} = 75$ мм = $0,5 \lambda_{ВЧ}$, $a_{ВЧ} = 50$ мм, $b_{ВЧ} = 25$ мм, $d_{ВЧ} = 3,25$ мм; $m_{ВЧ} = 0,12$ мг для указанных выше характеристик ПА приведены на рис. 2, б.

При исследованиях применялся принцип подобия рассмотренных вариантов антенн, при котором размеры ПА приблизительно соответствовали отношению средних частот диапазонов $f_{ВЧ} : f_{НЧ} = 8:1$. Масса ртути, вводимой в ПА НЧ-диапазона принималась приблизительно равной массе ртути для газоразрядной лампы подобного объема [7]. При этом масса ртути для антенны ВЧ-диапазона определялась из условия равенства концентрации паров ртути ПА ВЧ- и НЧ-диапазона.

Как видно из графиков рис. 2, а, наличие паров ртути в ПА для $N_e = 10^{13}$ и $N_e = 10^{12}$ (кривые 2 и 3) приводит к существенному росту сум-

марного значения ее УП σ_{PA} , которое, однако, с увеличением частоты несколько снижается. Для $N_e = 10^{14}$ (кривая 1) и выше пары ртути почти не влияют на УП в данном частотном диапазоне.

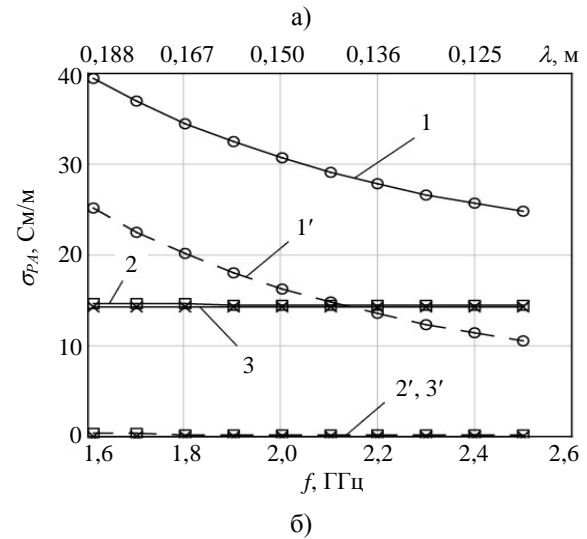
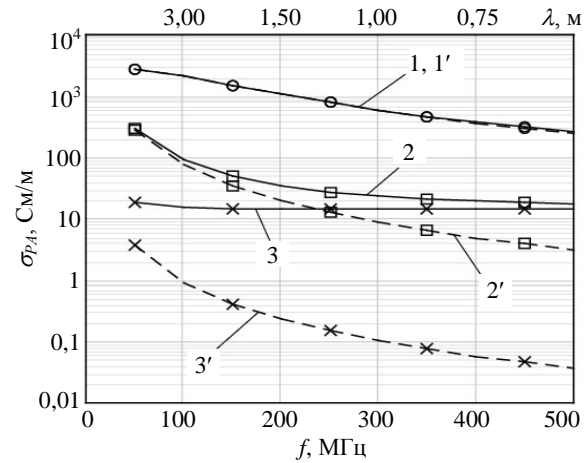


Рис. 2. Графики зависимости УП холодной плазмы от частоты в НЧ-диапазоне (а) и в ВЧ-диапазоне (б) для различной эффективной концентрации заряженных частиц N_e в ПА с учетом и без учета паров ртути: 1, 1' – $N_e = 10^{14}$ см^{-3} ; 2, 2' – 10^{13} см^{-3} ; 3, 3' – 10^{12} см^{-3}

Как следует из графиков рис. 2, б, в ВЧ-диапазоне УП паров ртути в холодной плазме значительно превалирует над собственной УП (σ_G) холодной плазмы газового разряда.

С учетом [5] и выражения (1) выполнены расчеты ДП ПА в двух частотных диапазонах НЧ и ВЧ с размерами антенны и параметрами плазмы подобно вышеуказанным. Результаты расчетов приведены на графиках рис. 3.

Как следует из графиков рис. 3 ДП ПА в обоих частотных диапазонах является отрицательной и снижается по абсолютной величине с увеличением частоты. Влияние паров ртути в такой плазменной среде можно учесть с помощью выражения (1).

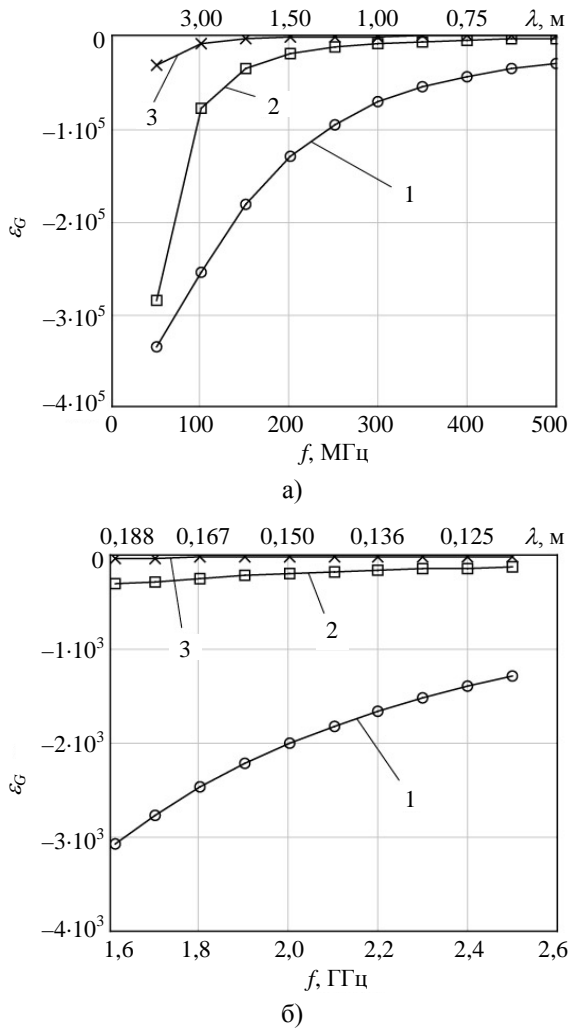


Рис. 3. Графики зависимости ДП холодной плазмы от частоты в НЧ-диапазоне (а) и в ВЧ-диапазоне (б) для различной эффективной концентрации заряженных частиц в ПА: 1 – $N_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 2 – 10^{13} см^{-3} ; 3 – 10^{12} см^{-3}

Наряду с полученными значениями ДП плазмы в дальнейших расчетах РТ-параметров ПА принимался во внимание тот факт, что по мнению автора работы [8], ДП холодной плазмы равна 1, а в работе [9] выражается сомнение, что ДП имеет отрицательные значения. Для оценки этих суждений проводились расчеты РТ-характеристик антенн как с ДП, рассчитанной согласно [5], так и при $\epsilon_{PA} = 1$.

2. РТ-параметры ПА с учетом паров ртути. Полученные данные по УП и ДП при расчетах по формулам (1), (2) были использованы при исследовании РТ-параметров ПА в программной среде *FEKO*, где плазма задавалась как диэлектрик. Расчеты также проводились для значения $\epsilon_{PA} = 1$ согласно [8]. Были получены ДН, КСВН и КПД исследуемых антенн.

В качестве примера рассмотрена петлевая треугольная несимметричная плазменная антенна, установленная на металлическом основании

диаметром D , имитирующем корпус аэрокосмического аппарата (см. рис. 1).

При этом исследовано 4 варианта одной и той же конфигурации антенны, установленной на металлическом диске 2 с различными параметрами стержня антенны:

- 1 вариант: антенна из холодной плазмы с УП (σ_G) и относительной ДП (ϵ_G), рассчитанными по формулам работы [5] (без паров ртути).

- 2 вариант: антенна из плазмы с парами ртути с суммарной проводимостью плазмы и паров ртути (σ_{PA}), рассчитанной по формуле (2) и ДП (ϵ_G) согласно [5].

- 3 вариант: антенна из плазмы с парами ртути с суммарной проводимостью плазмы и паров ртути (σ_{PA}) и ДП с учетом согласно работе [8] ($\epsilon_{PA} = 1$).

- 4 вариант: антенна из алюминиевой трубки с проводимостью $\sigma_{Al} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ и $\epsilon = 1$.

Отметим, что вариант 3 (σ_{PA} , $\epsilon_{PA} = 1$) рассматривается с целью проверки мнения, высказанного, например, в работе [8], о том, что ДП холодной плазмы $\epsilon_{PA} = 1$, а также сомнений автора работы [9], что ДП плазмы является отрицательной величиной.

На рис. 4 приведены усредненные значения ДН для четырех рассмотренных вариантов в двух главных плоскостях.

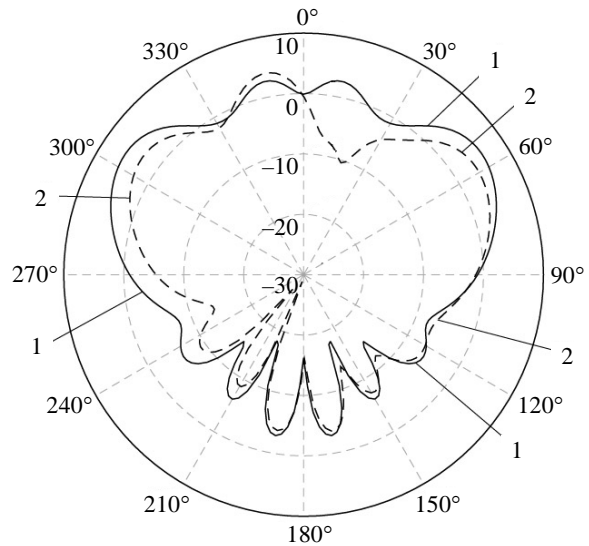


Рис. 4. ДН (дБ) угольковых антенн на средних частотах исследуемых диапазонов ($f_{НЧ}$, $f_{ВЧ}$): 1 – в плоскости, перпендикулярной плоскости антенны; 2 – в плоскости антенны

ДН для всех перечисленных четырех вариантов стержня антенны близки между собой, поэтому представлены в виде усредненных значений. Форма ДН свидетельствует о том, что большая часть излучения антенны сосредоточена в верхнем полупространстве в обеих главных плоскостях. Несимметрия ДН в плоскости антен-

ны (кривая 2) обусловлена несимметрией антенны в этой плоскости.

На рис. 5 приведены расчетные графики КСВН и КПД ПА (см. рис. 1) в НЧ-диапазоне при $N_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $L_{\text{НЧ}} = 0,8 \text{ м} = 0,67\lambda_{\text{НЧ}}$, установленных на диске диаметром $D_{\text{НЧ}}$. При этом РТ-характеристики ПА с учетом наличия паров ртути определяются путем задания в программу FEKO частотной зависимости УП (см. рис. 2, а).

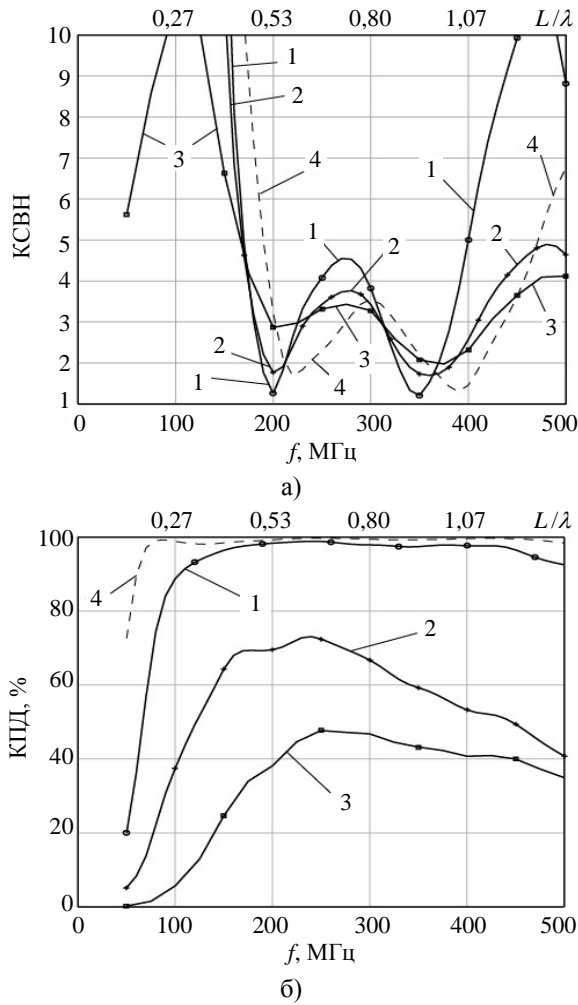


Рис. 5. Графики зависимости КСВН (а) и КПД (б) от частоты в НЧ-диапазоне: 1 – без учета влияния паров ртути (σ_G, ϵ_G); 2 – с учетом паров ртути (σ_{PA}, ϵ_G); 3 – с учетом паров ртути ($\sigma_{PA}, \epsilon = 1$); 4 – антенна из алюминиевой трубки

Как и следовало ожидать, для всех четырех вариантов рассмотренных антенн при значениях L/λ , близких к 0,5 и 1,0, имеют место благоприятные значения КСВН, близкие к 1, что присуще петлевым антеннам. При этом наиболее резко вблизи понижений КСВН изменяется значение КСВН для варианта 1. Для варианта 2 присутствие в ПА паров ртути несколько сглаживает частотную зависимость КСВН, особенно в области высоких частот (350...500 МГц). Малореальный вариант 3 выглядит несколько необычно в

области низких частот (100 МГц), что свидетельствует о некорректности задания для холодной плазмы газового разряда $\epsilon = 1$.

Зависимости КПД (рис. 5, б) свидетельствуют о том, что наличие паров ртути в ПА (вариант 2) приводит к снижению КПД приблизительно с 97–98 % до 74 % и ниже. Расчеты КПД для несколько необычного варианта 3 показывают снижение КПД на 50 % и более.

На рис. 6 приведены графики зависимости КСВН и КПД ПА для ВЧ-диапазона со следующими параметрами: $N_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $L_{\text{ВЧ}} = 75 \text{ мм} = 0,5\lambda_{\text{ВЧ}}$.

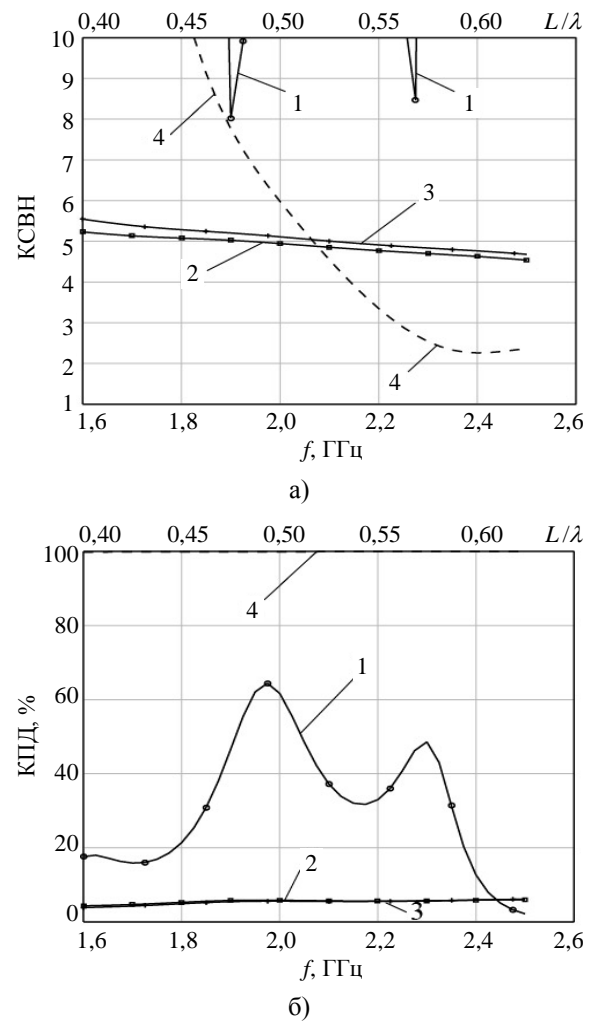


Рис. 6. Графики зависимости КСВН (а) и КПД (б) от частоты в ВЧ-диапазоне: 1 – без учета влияния паров ртути (σ_G, ϵ_G); 2 – с учетом паров ртути (σ_{PA}, ϵ_G); 3 – с учетом паров ртути ($\sigma_{PA}, \epsilon = 1$); 4 – антенна из алюминиевой трубки

Из графиков (рис. 6, а) следует, что ПА без паров ртути (кривая 1) имеет понижение КСВН при длине волны $0,48\lambda_{\text{ВЧ}}$, а также второе понижение КСВН при $0,57\lambda_{\text{ВЧ}}$. КСВН антенн при наличии паров ртути (кривые 2, 3) слабо зависят от частоты и имеет линейный характер.

В отличие от НЧ-диапазона, в ВЧ-диапазоне понижения КСВН имеют место при более близких значениях относительных периметров рамочной антенны L/λ : 0,48 и 0,57 для ВЧ-диапазона против 0,53 и 1,05 для НЧ-диапазона. Как видно из графиков рис. 6, а, такие понижения КСВН имеют место при частотах 1,9 и 2,3 ГГц. При наличии в ПА паров ртути (кривые 2 и 3) частотные зависимости КСВН имеет необычно линейный характер по сравнению с любой замкнутой антенной, что можно объяснить значительным превышением проводимости паров ртути над обычной проводимостью холодной плазмы (см. рис. 2, б), что блокирует собственные свойства ПА как излучателя электромагнитных волн. Это подтверждается результатами расчета КПД ПА с присутствием паров ртути (рис. 6, б, кривые 2 и 3). Как видно из графиков, КПД при этом снижается до приблизительно 4–6 % тогда как без паров ртути КПД находится в пределах 47–64 %.

Выводы. Предложен и исследован в различных частотных диапазонах метод расчета РТ-параметров и КПД ПА с учетом влияния паров ртути, вводимых внутрь ПА.

Расчеты показали, что пары ртути в ПА оказывают различное влияние на КСВН ПА на разных рабочих диапазонах. В диапазоне 50...500 МГц график КСВН антенны с парами ртути более плавный по сравнению с графиком ПА без паров ртути, но принципиально не отличается от него.

В диапазоне 1 600...2 500 МГц введение паров ртути в ПА приводит к блокированию свойств холодной плазмы и утрате обычных резонансных свойств петлевой антенны.

Введение паров ртути в ПА снижает КПД ПА в НЧ- и ВЧ-диапазонах.

Для улучшения РТ-характеристик ПА, особенно в рассмотренном ВЧ-диапазоне, улучшения экологии окружающего пространства рекомендуется уменьшать объем вводимых паров ртути.

Библиографический список

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, 2003. – 27 p.
2. Овсянников В. В. Широкополосный СВЧ-излучатель на основе плазмы газового разряда / В. В. Овсянников // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – 6, № 3. – С. 261–267.
3. Alexeff I. Plasma Antennas [Электронный ресурс] / I. Alexeff, T. Anderson // XI Kharkiv Young Scientists Conf. on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.
4. Research Antenna Made of Gas Plasma on Microwave Band / A. Y. Bezpalo, V. V. Gnatushenko, V. V. Ovsyanikov et al. // 4th Europ. Conf. on Antennas and Prop. (EuCAP2010): proc. – Barcelona, 2010. – 4 p.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – М.: Физматгиз, 1960. – 552 с.
6. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М.: Наука, 1973. – 607 p.

7. Миленин В. М. Плазма газоразрядных источников света низкого давления / В. М. Миленин, Н. А. Тимофеев – Л., Изд-во Ленинград. ун-та, 1991. – 240 с.
8. Давидович М. В. Диагностика плазмы и плазменных наноструктур: решение обратной задачи для волноводного зонда / М. В. Давидович // 21-я Междунар. Крымская конф. (КрыМиКо'2011). – Севастополь, 2011. – С. 483.
9. Менде Ф. Ф. Существуют ли ошибки в современной физике? / Ф. Ф. Менде. – Х.: Константа, 2003. – 72 с.

Рукопись поступила 06.12.2012 г.

V. V. Ovsyanikov, S. M. Moroz

INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC SIGNALS WITH AN ANTENNA MADE OF A GAS-DISCHARGE PLASMA

The interaction of electromagnetic signals with the plasma antenna is an important task of radiophysics and electronics, as they are used in various branches of radio engineering, including the armed forces. Despite the considerable number of publications on plasma antennas, currently the problem of the influence of mercury vapor on their electromagnetic characteristics is not covered. A method for calculating the conduction of cold plasma with the addition of mercury vapor is provided. The characteristics of plasma antennas with mercury vapor and without them in the two frequency bands in the software environment FEKO are calculated. The effect of mercury vapor on the parameters of plasma antennas is analyzed. The calculations have shown that the introduction of mercury vapor into the plasma antenna leads to a significant reduction in its efficiency and the changing characteristics of VSWR, especially with increasing frequency electromagnetic signals. To improve the parameters, especially the efficiency of the studied antennas, the recommendations to reduce the amount of mercury in them have been given. The considered antennas can be used for installation on aerospace vehicles.

Key words: plasma antenna, relative permittivity and conductivity of cold plasma, mercury vapor, VSWR, efficiency.

В. В. Овсянников, С. М. Мороз

ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ З АНТЕНОЮ, ВИКОНАНОЮ З ПЛАЗМИ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ

Взаємодія електромагнітних сигналів з плазмовими антенами (ПА) є актуальним завданням радіофізики та електроніки, так як вони застосовуються в різних галузях радіотехніки, у тому числі для потреб Збройних сил. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених ПА, на сьогодні не висвітлено проблему впливу парів ртути на їх електродинамічні характеристики. Запропоновано спосіб розрахунку провідності холодної плазми з додаванням парів ртути, виконано розрахунок характеристик ПА з парами ртути та без них у двох частотних діапазонах в програмному середовищі FEKO, проаналізовано вплив парів ртути на параметри ПА. Розрахунки показали, що введення парів ртути в ПА призводить до істотного зниження її ККД і змінює характеристику коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі (КСХН), особливо з підвищенням частоти електромагнітних сигналів. Для поліпшення параметрів, особливо ККД досліджуваних антен, видано рекомендації щодо зниження кількості ртути в них. Розглянуті антени можливо використати для установки на аерокосмічних апаратах.

Ключові слова: плазмова антена, відносна діелектрична проникність і провідність холодної плазми, пари ртути, КСХН, ККД антени.