

УДК: 533.9;537.8;621.396.67.095.3;621.396.674.3

ПЛАЗМЕННАЯ АНТЕННА С ЧАСТОТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ

© 2024 г. И. М. Минаев^{а,*}, О. В. Тихоневич^а, Ю. Е. Векшин^б^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Российская Федерация^б16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт МО РФ им. маршала А.И. Белова,
Мытищи-6, Московской обл., 141006 Российская Федерация

*E-mail: minaev1945@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

Исследован разряд ограниченной длины (“плазменный столб”) в газоразрядной трубке, наполненной разреженным газом. Разряд создается за счет одностороннего возбуждения протяженного высокочастотного разряда, поддерживаемого распространяющейся азимутально-симметричной модой поверхностной волны. Показано, что “плазменный столб” может быть эффективной плазменной антенной на рабочих частотах ниже плазменной частоты (ω_p), с частотной перестройкой за счет изменения длины “плазменного столба”.

Ключевые слова: плазменная антенна, плазменный столб, высокочастотный разряд, поверхностная волна, коэффициент стоячей волны

DOI: 10.31857/S0033849424030033, EDN: JVKKXH

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ряде работ [1–9] показано, что использование плазмы в качестве токонесущего элемента позволяет создавать плазменные антенны при выполнении условия

$$n_e \gg n_{кр}, \quad (1)$$

где $n_{кр}$ – концентрация электронов, при которой рабочая частота ω_p равна плазменной частоте ω_p ,

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}}, \quad (2)$$

e – заряд, m – масса электрона, n_e – концентрация электронов.

Плазменные антенны из газоразрядных трубок [4], в отличие от металлических, допускают регулировку электродинамических параметров электронным способом. Разряд в газоразрядной трубке поддерживается излучением передатчика на частоте ω_p .

Отличительная особенность такого способа возбуждения – возможность изменения длины плазменной области (плазменного столба) при изменении мощности излучения передатчика [5, 7].

Цель данной работы – исследовать возможность частотной перестройки антенны за счет изменения длины “плазменного столба”.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Плазменный столб является эффективным излучателем, если выполняется условие $n_e \gg n_{кр}$. Величину n_e можно определить по измерениям сопротивления Z плазменного столба. Комплексное сопротивление Z является функцией рабочей частоты ω_p , частоты электронных столкновений при заданном давлении газа ν_e и концентрации электронов n_e .

Эксперименты проводили с газоразрядной трубкой длиной $\sim \lambda/4$, являющейся макетом плазменных вибраторных антенн, возбуждаемых излучением собственного передатчика на частоте ω_p .

Газоразрядная трубка, длина плазменного слоя в которой зависит от мощности передатчика, является нагрузкой с переменным сопротивлением Z в линии питания (рис. 1) [5]. Измерение коэффициента стоячей волны (КСВ) позволяет определить величину Z в зависимости от длины плазменного слоя.

Измерение КСВ проводили измерителем мощности и КСВ типа SWR-25 МКП.

Плазменный столб в газоразрядной трубке, наполненной разреженным газом, создавался за счет возбуждения протяженного ВЧ-разряда излучением передатчика [5, 7]. В качестве источника высокочастотных колебаний была использована связанная радиостанция (Yaesu-857 на частотах 140 и 430 МГц). Максимальная мощность излучения передатчика 50 Вт.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1 [5].

Экспериментальный стенд установлен на металлическом основании. Вертикально к основанию установлена лампа дневного света (люминесцентная лампа Navigator NTL-T4-16_860-G5, 16W, диаметр 12 (мм), длина с цоколем 455 мм, длина колбы 430 мм, заполненная аргоном при давлении ~1...3 Торр с насыщенными парами ртути). С обратной стороны основания установлена согласующая линия, подключенная коаксиальным кабелем к измерителю КСВ и передатчику. Для калибровки степени согласования линии питания с нагрузкой использовалась стандартная четвертьволновая металлическая антенна. Для измерения КСВ при нагрузке в виде макета плазменной вибраторной антенны макет устанавливали на место металлической антенны. Результаты измерений зависимости КСВ от мощности передатчика (частота 140 МГц) при нагрузке в виде плазменной антенны приведены на рис. 2. Там же приведены результаты измерений зависимости длины плазменного столба от мощности передатчика на частоте 140 МГц.

Измерения КСВ показали, что с увеличением мощности передатчика величина КСВ с металлической антенной остается постоянной, с плазменной антенной одновременно с ростом длины плазменного столба $l_{ст}$ растет величина

на КСВ от 1.83 до 3.0. Максимальное значение КСВ достигается при длине плазменного столба $\sim 0.9 L_T$. При длине “плазменного столба” примерно равной длине газоразрядной трубки: $l_{ст} \approx L_T$ ($\sim \lambda/4$, мощность передатчика ~ 20 Вт), величина КСВ снижается до 2 и остается на этом уровне при дальнейшем увеличении мощности передатчика. Измерение длины плазменного столба на частоте передатчика 140 и 460 МГц производилось по измерениям длины области свечения люминофора газоразрядной трубки (люминесцентной лампы). Длина плазменного столба на частоте 140 и 460 МГц [7] пропорциональна мощности передатчика в указанном диапазоне мощностей.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отличительной особенностью рассматриваемого способа возбуждения плазменного канала является возможность изменения длины плазменной области (плазменного столба) при изменении мощности излучения передатчика [5, 7]. Разряд в газоразрядной трубке представляет собой плазменный волновод, по которому распространяется поверхностная волна (ПВ), значительная часть энергии которой идет на поддержание плазмы с высокой, превышающей критическую для данной частоты, концентрацией электронов ($n_e > n_{кр}$). Это условие обеспечивает распространение ПВ вдоль плазменного столба [7]. Плазменный столб может быть эффективным излучателем (антенной) если частота ω_n в “плазменном столбе” превышает в два-три раза частоту ω_p [1–3].

Для того чтобы определить возможность управления длиной плазменной антенны, представим плазменную область в виде комплексной нагрузки линии питания генератор-плазменная антенна ($Z_{вх} = R_n + R_p + jX_n$ где R_n , R_p и X_n – сопротивление линии, активное и реактивное сопротивление плазменного столба, соответственно), параметры которой меняются в зависимости от длины плазменного столба и плотности плазмы, создаваемой излучением собственного передатчика [6, 7, 11].

Газоразрядная трубка, заполненная плазмой частично или полностью, с диэлектрической проницаемостью $\epsilon(\omega)$, соответствующей плазме

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_p(\omega_p + i\nu_e)}, \quad (3)$$

где ν_e – частота столкновений электронов с нейтральными частицами, будет иметь импеданс $Z_n(\omega_n)$ [10]

$$Z_n(\omega_n) = i \frac{1}{\omega_p C_0} \frac{\omega_p(\omega_p + i\nu_e) - \omega_n^2}{\omega_p(\omega_p + i\nu_e) - \omega_n^2}, \quad (4)$$

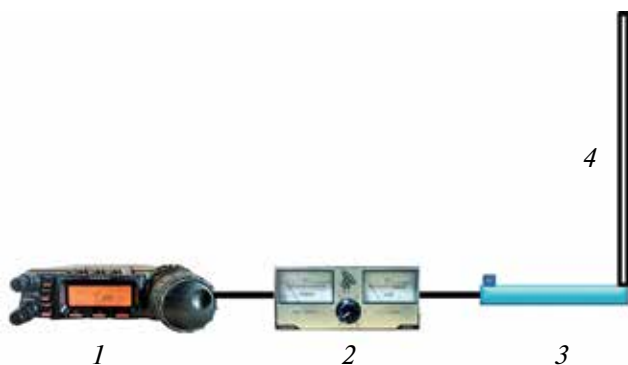


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – передатчик, 2 – измеритель КСВ, 3 – согласующая линия, 4 – газоразрядная лампа.

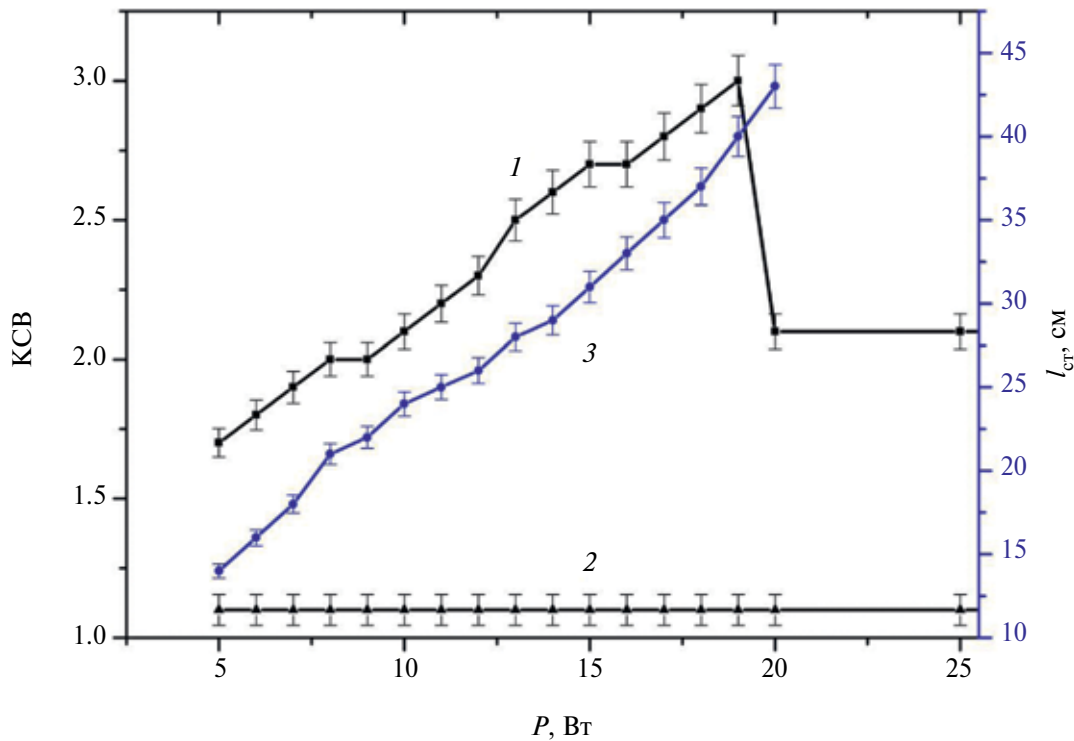


Рис. 2. Зависимость КСВ (1, 2) и длины плазменного столба (3) от мощности передатчика на частоте 140 МГц; 1 – люминесцентная лампа, 2 – штыревая антенна.

где $\omega_r = \omega_p \sqrt{\Delta / L_T}$ – геометрическая плазменная частота, $C_0 = S/4\pi L_T$, Δ – длина вакуумного зазора, v_e – эффективная частота столкновений электронов. Выделяя в (4) действительную и мнимую части, получим активное и реактивное сопротивление $R_p(\omega_p)$ и $X_p(\omega_p)$ газоразрядной трубки, заполненной частично или полностью плазмой:

$$R_p(\omega_p) = \frac{1}{C_0} \frac{v_e(\omega_p^2 - \omega_r^2)}{(\omega_p^2 - \omega_r^2)^2 + \omega_p^2 v_e^2}, \quad (5)$$

$$X_p(\omega_p) = C_0 \frac{(\omega_p^2 - \omega_r^2)^2 + \omega_p^2 v_e^2}{(\omega_p^2 - \omega_r^2)((\omega_p^2 - \omega_r^2) + \omega_p^2 v_e^2)}. \quad (6)$$

На рис. 3 приведены графики реактивной составляющей комплексного сопротивления Z_p для длины плазменного столба $\sim L_T$ и активной составляющей комплексного сопротивления Z_p .

Как видно из рис. 3, величина реактивного сопротивления претерпевает значительные изменения в области $\omega_p \sim (1...2)\omega_r$. Реактивная составляющая Z_p на частотах $> 2.2\omega_r$ мала для всех значений длины плазменного столба. В дальнейшем будем считать сопротивление плазменного столба чисто активным.

Для оценки характера изменения плотности плазмы при увеличении длины плазменного столба на рис. 4 представлены зависимости активной составляющей сопротивления плазменного столба от ω_p ($\omega_p = 9 \times 10^8$ рад/с) для длины плазменного столба l_{ct} , равного $0.5L_T$, $0.75L_T$ и $1.0L_T$.

Из рис. 4 видно, что величина активного сопротивления плазменного столба зависит как от ω_p , так и от длины плазменного столба. При заданной длине плазменного столба (вакуумного зазора), зная величину сопротивления $R(l_{ct})$, можно определить ω_p (n_e).

По результатам измерений КСВ определим величину сопротивления $R_p(l_{ct}, \omega_p)$ плазменного столба определенной длины и соответствующее значение ω_p .

Величина КСВ показывает, какая часть падающей на нагрузку мощности отражается, т.е. позволяет определить величину коэффициента отражения r

$$r = (КСВ - 1)/(КСВ + 1), \quad (7)$$

или при чисто активной нагрузке

$$r = (R_p - R_0)/(R_p + R_0), \quad (8)$$

где R_0 – волновое сопротивление линии питания ($R_0 = 50$ Ом).

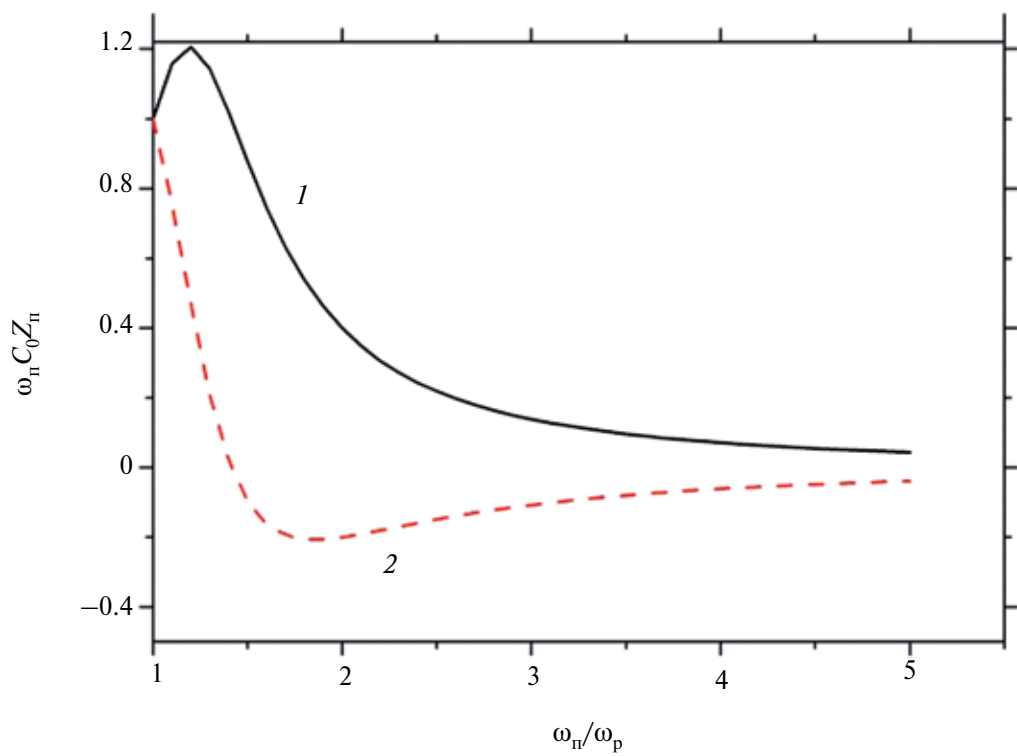


Рис. 3. Зависимости активной (1) и реактивной (2) составляющих сопротивления Z_{π} плазменного конденсатора от ω_{π}/ω_p .

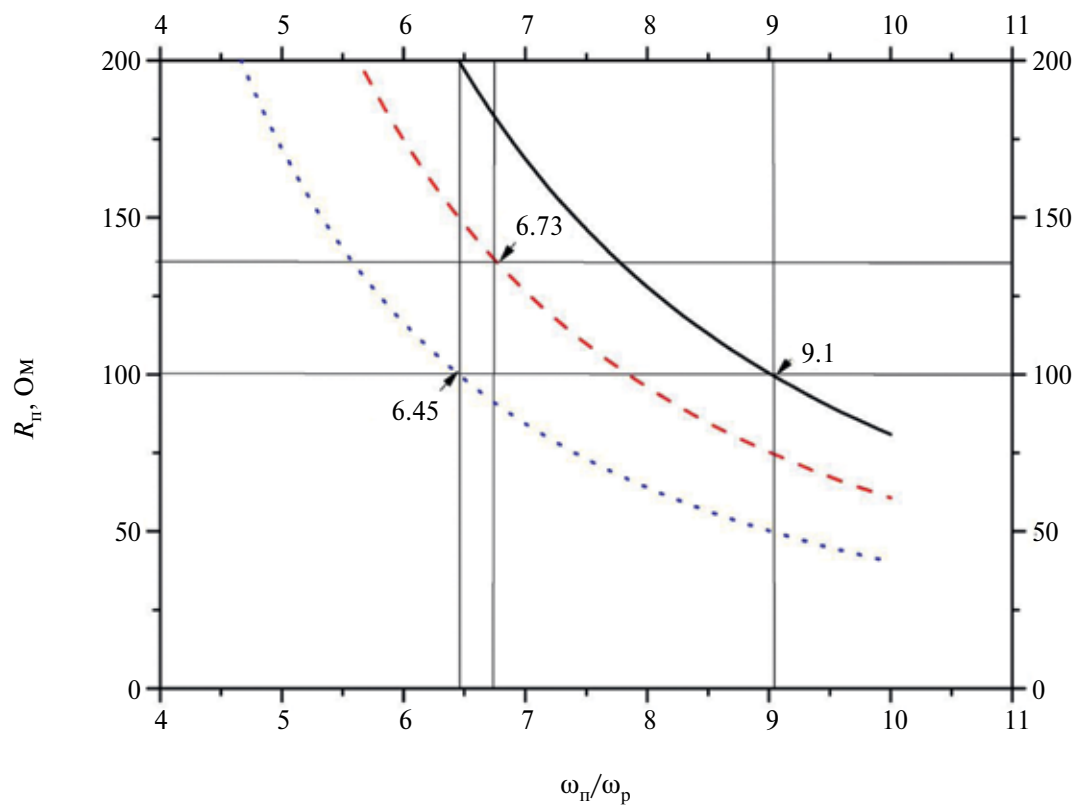


Рис. 4. Зависимости активной составляющей сопротивления плазменного столба от ω_{π} ($\omega_p = 9 \times 10^8$ рад/с) для длины плазменного столба $l_{ст}$: $0.5 L_T$ (пунктир), $0.75 L_T$ (штриховая кривая), $1.0 L_T$ (сплошная). Стрелками отмечены точки, соответствующие значениям сопротивления плазменного столба, полученным по измерениям КСВ.

Результаты измерений и расчетов

r	$l_{\text{ст}}/L_T$	P , Вт	КСВ	$\omega_{\text{п}} \times 10^9$, рад/с	$\omega_{\text{п}}/\omega_{\text{р}}$	$R_{\text{п}}$, Ом	$n_e \times 10^{10}$, см ³
0.33	0.5	8.0	2.0	5.8	6.45	100.8	1.0
0.46	0.75	15.5	2.7	6.2	6.73	135.2	1.2
0.33	1	20	2.0	8.2	9.1	100.8	2.1

Результаты измерений КСВ и расчетов r , $R_{\text{п}}$, $\omega_{\text{п}}$, n_e для длины плазменного столба $(0.5, 0.75, 1.0) \times L_T$ приведены в табл. 1. Расчеты проводились для $\nu_e \approx 1.0 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\text{р}} = 0.9 \times 10^9 \text{ рад/с}$. По значениям сопротивления $R_{\text{п}}$ для плазменного столба заданной длины (см. рис. 4) можно определить значение $\omega_{\text{п}}$ (n_e), табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что с увеличением мощности, вкладываемой в разряд, вместе с ростом плазменного столба происходит рост $\omega_{\text{п}}$.

Плотность плазмы в плазменном столбе достигает значений, удовлетворяющих условию $\omega_{\text{п}} > (2...3) \omega_{\text{р}}$ при длине плазменного столба $> 0.5L_T$. Таким образом, при изменении частоты передатчика в пределах границ области перестройки имеется возможность регулировки длины плазменной антенны, т.е. частотной подстройки линии передатчик–антенна.

Концентрация электронов в плазменном столбе повышается вместе с ростом длины плазменного столба и мощности передатчика. При длине плазменного столба, равной половине длины разрядной трубки, плазменный столб может быть эффективной антенной на длине волны $\lambda \sim \lambda_{\text{р}/2}$. Если для возбуждения плазменной области использовать отдельный генератор, то плазменный столб может быть использован в качестве антенны для нескольких передатчиков, длина волны излучения которых лежит в диапазоне $\lambda/4 = (0.5...1)L_T$. Чем выше частота источника возбуждения плазменного столба, тем короче длина волны передатчика, на которой плазменный столб будет эффективным излучателем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

— измерение величины КСВ позволяет определить активное сопротивление плазменного столба и среднее значение плотности n_e в плазменном столбе при заданных значениях мощности и частоты источника возбуждения плазмы;

— с увеличением мощности, вкладываемой в разряд, вместе с ростом плазменного столба происходит рост n_e ;

— возбуждение плазменного столба рассмотренным методом позволяет, меняя мощность источника возбуждения, создавать эффективные излучатели (вибраторные плазменные антенны), длиной которых можно управлять.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alexeff I., Anderson T. // IEEE Trans. 2006. V. PS-34. № 2. P. 166.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2006.872180>
- Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 4. С. 423.
- Alexeff I., Anderson T., Farshi E. et al. // Phys. Plasm. 2008. V. 15. № 5. P. 057104.
<https://doi.org/10.1063/1.2919157>
- Сергейчев К.Ф., Минаев И.М. // Труды ИОФАН. М.: Наука, 2014. Т. 70. С. 143.
- Коновалов В.Н., Кузьмин Г.П., Минаев И.М. и др. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 9. С. 833.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X15090068>
- Тихонович О.В., Векишин Ю.Е., Кузьмин Г.П. и др. // РЭ. 2020. Т. 65. № 2. С. 165.
<https://doi.org/10.31857/S0033849420020199>
- Минаев И.М., Рухадзе А.А. // Инж. физика. 2016. № 8. С. 24.
- Shahzad M.H., Ghaffar Ab., Naz M.Y., Bhatti H.N. // PIER. 2020. V. 92. P. 11.
<https://doi.org/10.2528/PIERM20022403>
- Kazantsev S.Y., Brusentsev A.S., Titovets P.A. et al. // Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 2022. P. 11.
<https://doi.org/10.1109/IEEECONF53456.2022.9744361>
- Александров А.Ф., Кузев М.В. Теоретическая плазменная электротехника. М.: Изд-во МГУ, 2011.
- Минаев И.М., Тихонович О.В. // Тр. III Межд. конф. “Газоразрядная плазма и синтез наноструктур”. Казань, 1–4 декабря 2022 г. Казань: Бук, 2022. С. 455.

PLASMA ANTENNA WITH FREQUENCY ADJUSTMENT

I. M. Minaev^{a,*}, O. V. Tikhonovich^a, Yu. E. Vekshin^b

^a*Prokhorov General Physics Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^b*16 Central Research Testing Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation
named after Marshal A. I. Belov, Mytishchi Moscow oblast, 140006 Russia*

^{*}*E-mail: minaev1945@mail.ru*

Received March 6, 2023; revised April 24, 2023; accepted May 25, 2023

A discharge of limited length (“plasma column”) in a gas-discharge tube filled with a rarefied gas was studied. The discharge is created due to the one-sided excitation of an extended high-frequency discharge supported by a propagating azimuthally symmetric mode of the surface wave. It is shown that a “plasma column” can be an effective plasma antenna at operating frequencies below the plasma frequency (ω_p), with frequency tuning due to changes in the length of the “plasma column”.

Keywords: plasma antenna, plasma column, high-frequency discharge, surface wave, standing wave ratio