

Применение газоразрядной плазмы при пониженном давлении в качестве излучающего тела несимметричной вибраторной антенны

© М.С. Усачёнок,¹ Л.В. Симончик,¹ Н.Н. Богачев,² С.Е. Андреев²

¹ Институт физики НАН Беларуси,
220072 Минск, Беларусь

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: m.usachonak@dragon.bas-net.by

Поступило в Редакцию 10 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 20 февраля 2024 г.

Принято к публикации 22 февраля 2024 г.

Исследована плазменная несимметричная вибраторная антенна в диапазоне частот 1–3 GHz, излучающим телом которой являлся положительный столб тлеющего разряда в неоне при пониженном давлении. Показано, что антенна обладает круговой азимутальной диаграммой направленности с одним главным лепестком, направленным под углом 60° к горизонту, с шириной около 30° по углу места. Экспериментально исследовано влияние плотности электронов в плазменном столбе на S параметры и коэффициент усиления плазменной антенны. Показано, что при плотности электронов более 10^{14} cm^{-3} максимальный коэффициент усиления составляет более -6 dBi . Отмечена важность одновременных измерений S_{11} и S_{21} параметров плазменной антенны. Рассмотрена возможность применения разрядов атмосферного давления в качестве плазменной вибраторной антенны. Полученные результаты важны для развития быстродействующих адаптивных систем радиоэлектроники.

Ключевые слова: газовый разряд, несимметричный вибратор, антенна, диаграмма направленности, коэффициент усиления, плотность электронов.

DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57530.279-23

Введение

В настоящее время активно разрабатываются адаптивные („умные“) системы беспроводной передачи данных различного назначения, такие как программно-определяемые радиосистемы, системы связи поколения 6G, системы радиолокации, навигации и радиоэлектронной борьбы [1,2]. Для таких систем необходимы антенны с возможностью программируемого электронного управления их параметрами и характеристиками. Существует различные типы таких антенн и антенных систем: линейные и апертурные антенны, фазированные решетки, ММО антенны и др. Электронное управление реализуется с помощью применения полупроводниковых элементов или интегральных схем, применения „умных“ материалов и др. [2–4]. Одним из направлений разработки антенн и антенных систем с управляемыми характеристиками являются плазменные антенны. Плазменные антенны можно условно разделить на два класса: первый — плазма является частью излучающего элемента антенны (вибраторные, рамочные антенны) [5–8] и второй — плазма служит для управления прохождением и экранированием радиоволн (например, антенна барабанного типа) [9–12]. По конструкции антенны могут быть вибраторного, рамочного, зеркального, линзового, рупорного и других типов. Создание газоразрядной плазмы осуществляется различными способами, это могут быть ВЧ или СВЧ разряды, НЧ разряды, разряды на

постоянном токе [13,14]. Отличительной чертой плазменных антенн является возможность электрической подстройки ее характеристик за счет изменения электронной плотности плазмы n_e [15–17]. В антеннах, использующих плазменный столб в качестве излучающего тела, изменение параметров плазмы приводит главным образом к изменению обратного рассеяния S_{11} и коэффициента усиления антенны с несущественным изменением диаграммы направленности [18,19]. В антеннах, использующих плазму в качестве управляющего элемента, изменение параметров плазмы может приводить к изменению формы диаграммы направленности [12] и ее направления (электронное сканирование и изменению уровня передаваемой мощности) [20].

Главными характеристиками газоразрядной плазмы, определяющими ее взаимодействие с внешними электромагнитными волнами, являются диэлектрическая проницаемость ϵ_p и проводимость σ . В общем случае, они являются функциями $\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}$ — электронной плазменной частоты, ν — частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и $f_0 = \omega_0/2\pi$ — частоты электромагнитной волны [21]:

$$\begin{aligned} \epsilon_p &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \left(1 - i \frac{\nu}{\omega_0}\right)} = \epsilon_{re} + i \epsilon_{im} \\ &= 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \nu^2} - i \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega_0 (\omega_0^2 + \nu^2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{re} + i\sigma_{im}, \quad \sigma_{re} = \frac{e^2 n_e}{m_e} \cdot \frac{\nu}{\omega_0^2 + \nu^2},$$

$$\sigma_{im} = -\frac{e^2 n_e}{m_e} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0^2 + \nu^2}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума и m_e — масса электрона.

Основная задача любой антенны — передача или прием энергии электромагнитной волны через окружающее ее пространство. Для успешного выполнения этой задачи антенна должна быть хорошо согласована с фидерным трактом, т. е. иметь малое обратное рассеяние (малые значения параметра S_{11}) в диапазоне рабочих частот. Подавляющее большинство исследований плазменных антенн сводится к выявлению существенного снижения отраженного сигнала на входе антенны ($S_{11} < -10$ dB) в зависимости от плотности электронов в плазменном столбе и последующем моделировании диаграмм направленности реализуемых антенн [13,22]. По нашему мнению, такой подход является ограниченным, так как резкое снижение коэффициента S_{11} может быть обусловлено различными факторами взаимодействия волн с плазмой газоразрядного столба, соответственно требуется одновременная регистрация уровня излучения в окружающем пространстве. В большинстве литературных источников в основном представлены исследования по применению разрядов при низком давлении порядка нескольких Торр [5–19], что часто мотивируется простотой экспериментальной реализации и анализа взаимодействия радиоволн с плазмой, так как $\nu < \omega_p$ и $\nu < \omega_0$, применение же газовых разрядов при пониженном и атмосферном давлении для реализации плазменных антенн авторам настоящей работы не известны. В работах [16,17] показано, что для достижения плазменной антенной вибраторного типа характеристик излучения близких характеристикам аналогичной металлической антенны (линейный режим) необходимо, чтобы вдоль ее плазменного столба была сформирована поверхностная электромагнитная волна с дисперсионной характеристикой, линейная часть которой близка к линии kc в рабочем диапазоне частот (k — волновое число, c — скорость света в вакууме). Для формирования такой поверхностной волны плазменная частота должна превышать частоту электромагнитной волны более чем на порядок $\omega_p > 10 \cdot \omega_0$. При фиксированной плазменной частоте (плотности электронов) данное соотношение определяет верхнюю границу рабочего диапазона частот плазменной антенны. Таким образом, увеличение плотности электронов в плазменном столбе, служащим излучающим телом антенны, (увеличение ω_p) за счет перехода от применения разрядов низкого давления к разрядам пониженного и атмосферного давления может позволить повысить верхнюю границу рабочего диапазона частот плазменных антенн. Кроме того, применение разрядов атмосферного давления будет препятствовать возникновению нежелательного СВЧ разряда в рабочем

газе при увеличении уровня мощности передаваемого сигнала. В то же время работы [23,24] показали, что газоразрядная плазма пониженного и атмосферного давлений может выступать в качестве эффективного управляющего элемента скоростных устройств СВЧ, работающих с большими уровнями мощности.

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована возможность реализации плазменной антенны с использованием газоразрядной плазмы пониженного давления (около 70 Торр), определены основные характеристики реализованной антенны в зависимости от параметров плазмы и дана оценка перспективе применения подобных разрядов при пониженном и атмосферном давлении в составе антенных устройств.

1. Экспериментальная установка и методы исследования

Плазменный несимметричный вибратор представлял собой плазменный столб газоразрядной лампы ГШ-5. В СВЧ технике лампа ГШ-5 известна как газоразрядный генератор шума в сантиметровом диапазоне длин волн, представляющий собой запаянную кварцевую трубку наполненную неоном (Ne) при давлении около 70 Торр. СВЧ мощность подводилась к лампе с помощью коаксиального резонатора, соединенного с дисковым экраном (рис. 1). Диаметр экрана 10 см, диаметр центрального отверстия резонатора 20 мм, расстояние от экрана до анода лампы ГШ-5 12.5 см, внутренний диаметр кварцевой трубки лампы ГШ-5 3 мм. Расстояние от плоскости экрана до центральной жилы СВЧ разъема типа IV, служащего для подачи СВЧ сигнала, составляло 3.5 см. Питание лампы ГШ-5 осуществлялось источником постоянного напряжения $U = 0-600$ В, балластное сопротивление варьировалось от 1 до 15 кОм. Измерение S параметров выполнялось с помощью портативного векторного анализатора цепей N9918A (Keysight Technologies) в диапазоне частот 1–3 GHz. Уровень выходной мощности СВЧ излучения анализатора составлял –15 dBm. Предварительная калибровка анализатора выполнялась с использованием набора калибровочных мер НКММ-11 „Микран“. Приемная измерительная пирамидальная рупорная антенна П6-20 (эффективная площадь 125 см² на частоте 1.8 GHz, рабочий частотный диапазон 1.4–3 GHz) располагалась на расстоянии 1.5 м от плазменной антенны, что соответствует выполнению условий дальней зоны. Для снижения отражения волн от близкорасположенных объектов в помещении использовалось поглощающее покрытие ТОРА-9 с коэффициентом отражения –20 dB на частоте 3 GHz.

Оценки плотности электронов и частоты столкновений в плазме газоразрядной лампы ГШ-5 были выполнены в работе [25] и представлены на рис. 2. Частота столкновений электронов с нейтральными атомами составляет $4 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

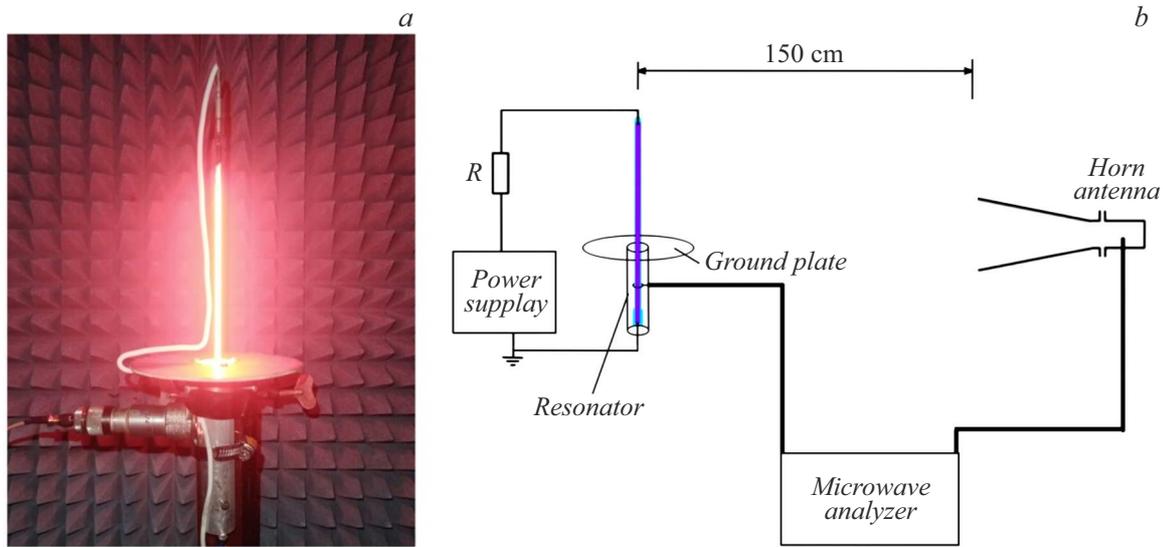


Рис. 1. *a* — фотография плазменной несимметричной вибраторной антенны, *b* — схема регистрации *S* параметров.

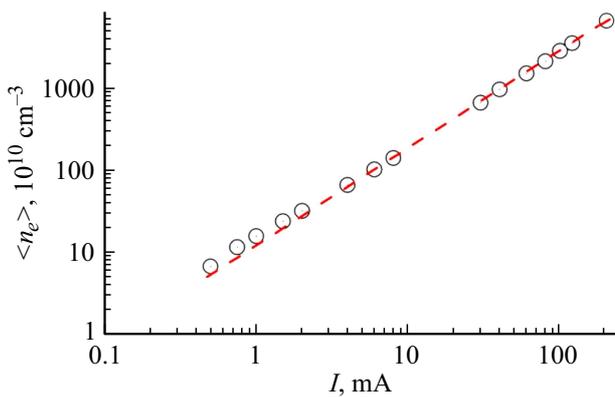


Рис. 2. Зависимость плотности электронов от разрядного тока в лампе ГШ-5 [25].

Измерение диаграмм направленности (*D*) плазменной антенны осуществлялось с помощью анализатора цепей N9918A и рупорной антенны П6-20. Приемная антенна П6-20 была неподвижна и направлена на центр экрана плазменной антенны. При этом изменение азимутального угла и угла места осуществлялось путем вращения плазменной антенны вокруг центра экрана. Если форма диаграммы направленности определена, то для определения коэффициента усиления (КУ) антенны достаточно измерить его значение в максимуме, так как КУ антенны (*G*) напрямую связан с ее диаграммой направленности и коэффициентом полезного действия (η):

$$G(\varphi, \theta) = \eta D(\varphi, \theta).$$

В настоящей работе для определения максимального КУ был применен метод трех антенн, в соответствии с которым выполнялась серия измерений передаваемой мощности от каждой антенны к остальным двум и

определялась ее связь с КУ антенн [26]:

$$G_1 G_2 = \frac{P_{12}}{P_0} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2,$$

$$G_1 G_3 = \frac{P_{13}}{P_0} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2,$$

$$G_2 G_3 = \frac{P_{23}}{P_0} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2,$$

где G_1, G_2, G_3 — реализуемые коэффициенты усиления каждой из трех антенн, P_{12}, P_{13}, P_{23} — мощности, принимаемые антеннами в трех измерениях, P_0 — уровень мощности сигнала подаваемого в тракт излучающей антенны, R — дистанция между антеннами, λ — длина волны СВЧ излучения.

Пусть $P'_{12} = P_{12}/P_0, P'_{13} = P_{13}/P_0, P'_{23} = P_{23}/P_0$ — нормированные значения уровня принимаемой мощности, тогда КУ исследуемой антенны (пусть это будет антенна 1):

$$G_1 = \sqrt{\frac{P'_{12} P'_{13}}{P'_{23}} \frac{4\pi R}{\lambda}}.$$

Как легко заметить, привлекательность данного метода состоит в том, что для всех трех антенн коэффициенты усиления могут быть неизвестны перед началом измерений. В условиях эксперимента были задействованы антенна П6-20 (КУ = 5.1 либо в относительных единицах 7.1 dBi), штыревой зонд (КУ = 1.6 либо в относительных единицах 2.0 dBi) и исследуемая плазменная антенна. Измерения КУ так же выполнялись для антенны геометрически идентичной плазменной, в которой плазменный столб был заменен медным стержнем.

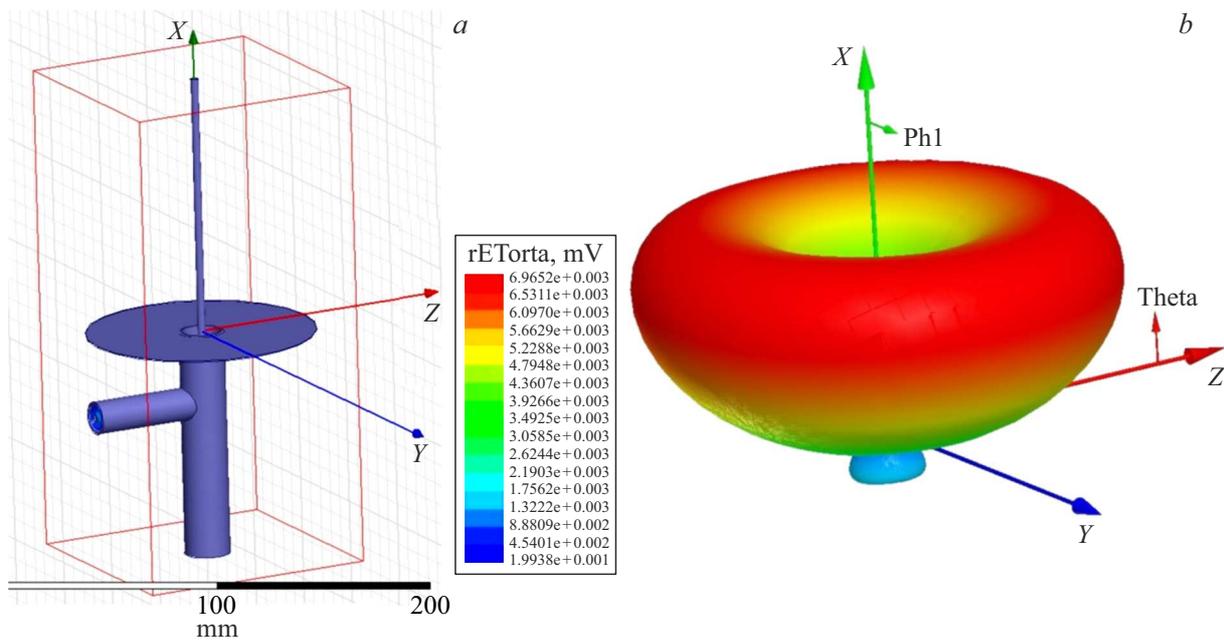


Рис. 3. Вид модели (а) и (b) пример результата расчета диаграммы направленности плазменной антенны.

2. Численная модель

Экспериментально полученные диаграммы направленности и КУ сопоставлялись с результатами моделирования, выполненного с помощью метода конечных элементов (МКЭ, FEM) в среде программы COMSOL Multiphysics [27]. В этой среде была построена трехмерная модель антенны и антенно-фидерного тракта, используемого в эксперименте. Диэлектрическая проницаемость ϵ_p и проводимость σ плазменного столба задавались в соответствии с (1) и (2), а его диаметр полагался равным внутреннему диаметру кварцевой трубки. Распределение плотности электронов в столбе считалось однородным по объему. Возбуждение антенны производилось ТЕМ модой коаксиального волновода. Антенну окружало пространство с открытыми граничными условиями, необходимыми для расчета дальнего поля антенны. Вид модели и пример результата расчета диаграммы направленности плазменной антенны представлены на рис. 3.

3. Результаты и обсуждение

Результаты измерения коэффициента S_{11} плазменной антенны и коэффициента S_{21} передачи сигнала от плазменной антенны к измерительной при различных разрядных токах в лампе ГШ-5 представлены на рис. 4. Коэффициент S_{11} плазменной антенны в исследуемом частотном диапазоне при отсутствии разрядного тока имеет значение около $-(3-6)$ dB. При зажигании разряда в спектре S_{11} появляются локальные минимумы, которые с увеличением разрядного тока меняют свою глубину

и смещаются в низкочастотную область (рис. 4, а). Например, при разрядном токе 1.75 mA ($n_e \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) коэффициент S_{11} имеет минимум на частоте около 1.8 GHz ($\omega_0 = 1.13 \cdot 10^{10} \text{ rad/s}$, $n_c = 4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ — „критическая“ плотность электронов) со значением ниже -20 dB. Дальнейшее увеличение разрядного тока до 200 mA и плотности электронов (плазменной частоты) до $n_e = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ($\omega_p = 476.9 \cdot 10^9 \text{ rad/s}$) в лампе ГШ-5 приводит к смещению минимума частотной характеристики S_{11} с 1.8 GHz в область 1.05 GHz, а из области выше 3 GHz в диапазон 2.1–2.4 GHz. Значение минимума коэффициента S_{11} в низкочастотной области спектра меняется от -12 до -25 dB при изменении разрядного тока от 14 до 200 mA. При этом на частотах более 2 GHz значение параметра S_{11} также уменьшается до $-(15-25)$ dB. Наличие резкого минимума коэффициента S_{11} и его положение в спектре при малых разрядных токах связано, видимо, с согласованием петли связи коаксиального резонатора антенны с плазменным столбом, так как они изменяются при изменении геометрии петли связи.

Спектр коэффициента S_{21} (рис. 4, б) демонстрирует отсутствие излучения при увеличении разрядного тока до 14 mA. При дальнейшем его увеличении уровень передаваемого сигнала растет, и заметное увеличение коэффициента S_{21} наблюдается при токах порядка 50 mA и более. При разрядном токе 200 mA максимум коэффициента передачи лежит в полосе частот от 1.7 до 2.4 GHz и составляет $-(50-45)$ dB. Отсутствие изменений в частотном диапазоне 1.0–1.3 GHz связано с ограниченностью рабочего спектрального диапазона приемной антенны. Следует также отметить особенности поведения спектров S_{11} и S_{21} в низкочастотной

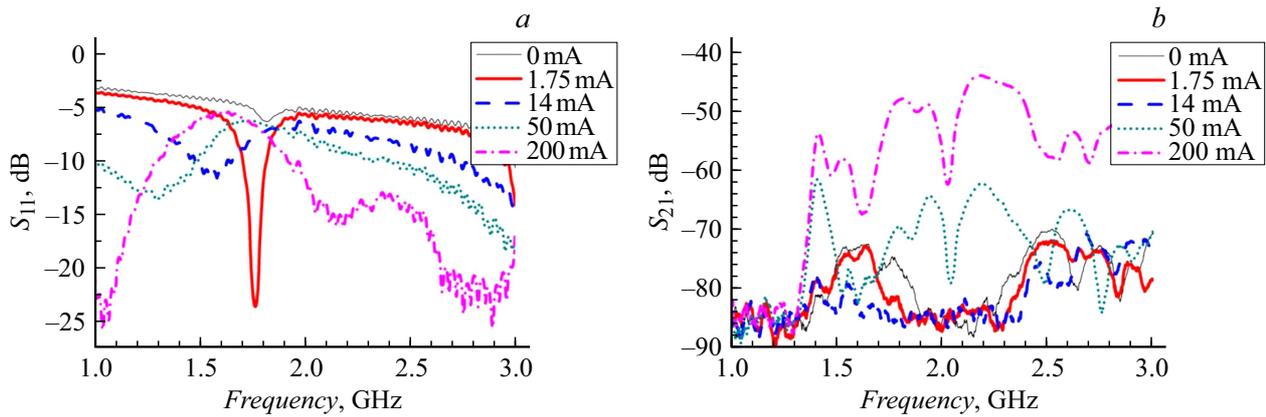


Рис. 4. S_{11} и S_{21} ($\theta = 45^\circ$) спектры несимметричной плазменной вибраторной антенны.

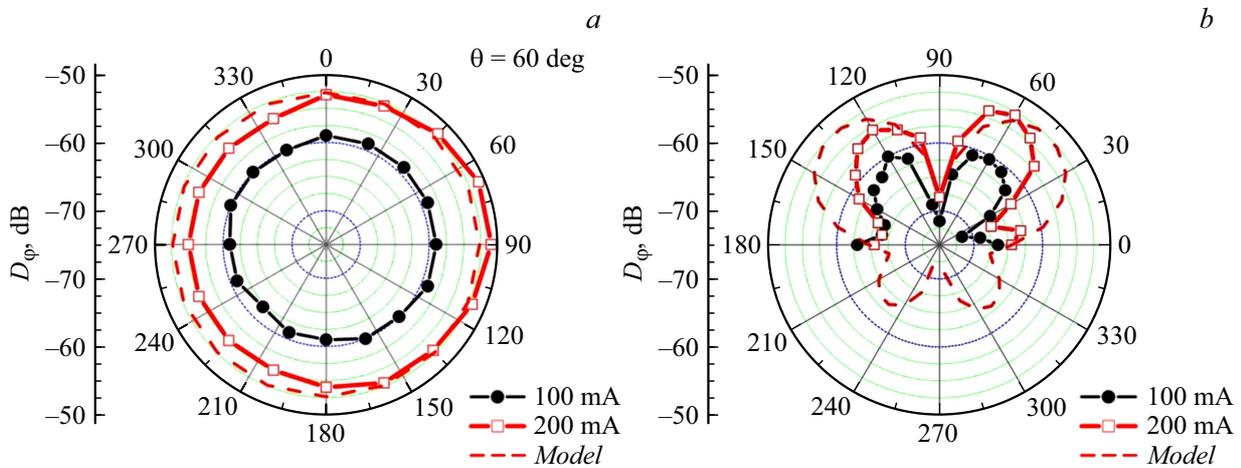


Рис. 5. Диаграммы направленности плазменной антенны в азимутальной (H) (а) и угломестной (E) (б) плоскостях.

области около 1.3–1.5 GHz: при изменении разрядного тока от 50 до 200 mA наблюдается рост излучения антенны, хотя значение коэффициента S_{11} растет.

Таким образом, наблюдаемое отсутствие излучения плазменной антенны при снижении обратных потерь в отдельных частотных интервалах при малых разрядных токах и наоборот рост уровня передаваемого излучения при увеличении обратных потерь, говорят о важности одновременных измерений ее S_{11} и S_{21} параметров.

В соответствии с [17] для исследуемой плазменной антенны была выполнена оценка соотношения между плазменной частотой и частотой СВЧ сигнала, требуемого для работы антенны в линейном режиме. В условиях эксперимента частота столкновений электронов с нейтральными атомами превышает частоту СВЧ сигнала $\omega_0 < \nu$ во всем исследуемом частотном диапазоне. При токе 50 mA преодолевается минимальное пороговое значение плотности плазмы для перехода антенны в режим излучения — $\omega_p \geq 10\omega_0$. Для перехода антенны в линейный режим работы требуется, чтобы $\omega_p \geq 42\omega_0$ [17]. Указанное соотношение, например, для одной из характерных частот $f_0 = 1.8$ GHz, должно выполняться при

плотности электронов более $7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, что для лампы ГШ-5 соответствует разрядному току около 200 mA. Как будет показано далее, данный выход плазменной антенны на линейный режим работы соответствует выходу ее коэффициента усиления на постоянный уровень.

Характерные диаграммы направленности для реализованной антенны, полученные на частоте 1.8 GHz при различных разрядных токах, представлены на рис. 5.

Азимутальная диаграмма направленности имеет практически круговую форму. Незначительная асимметрия связана с неидеальностью размещения лампы ГШ-5. Увеличение разрядного тока приводит к увеличению сигнала без изменения формы диаграммы. При измерениях отсчет угла велся от плоскости экрана в сторону оси антенны. Максимум диаграммы направленности наблюдается под углом 60° к плоскости экрана, и ширина луча составила около 30° . Полученные данные хорошо согласуются с результатами моделирования радиочастотных свойств антенны, выполненного в среде программы COMSOL Multiphysics. Соответствующие диаграммы направленности, рассчитанные для плотности плазмы $n_e = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, нанесены на рис. 5 штриховыми

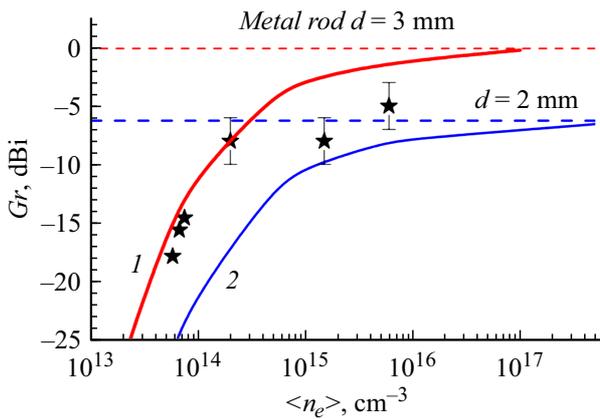


Рис. 6. Зависимость реализуемого коэффициента усиления плазменной несимметричной вибраторной антенны от плотности электронов. Диаметр плазменного столба: 1 — 3 мм, 2 — 2 мм. Штриховые линии — медные стержни.

кривыми. Максимум расчетной угломестной диаграммы направленности направлен под углом 40° к плоскости экрана, и ширина луча составляет около 50° . Моделирование показало, что наличие анодного провода не вносит заметных искажений в диаграмму направленности антенны при условии его размещения вдоль газоразрядной трубки.

Реализуемый коэффициент усиления плазменной антенны был определен в направлении максимума угломестной диаграммы направленности под углом $\theta = 60^\circ$ методом трех антенн. Полученные значения отмечены звездочками на рис. 6. Увеличение плотности электронов приводит к росту КУ, и при плотностях более $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ он выходит на постоянный уровень $-(8-5) \text{ dBi}$. Экспериментально полученные данные сопоставлялись с результатами моделирования, выполненного в среде программы COMSOL Multiphysics (сплошные кривые — зависимости КУ плазменной антенны от плотности электронов в плазменном столбе и штриховые линии — КУ подобной антенны с медным стержнем в качестве излучающего тела). Расчетные значения КУ антенны с медными стержнями диаметром 3 и 2 мм соответствуют экспериментальным данным.

Экспериментально полученное постоянное значение КУ плазменной антенны несколько ниже расчетных значений (кривая 1, рис. 6) и не достигает предельного значения КУ $= -0.1 \text{ dBi}$, соответствующего геометрически идентичной антенне с медным стержнем диаметром 3 мм. Оно близко значению КУ антенны с медным стержнем диаметром 2 мм (-6.5 dBi) и расчетным значениям КУ плазменной антенны с диаметром плазменного столба 2 мм (кривая 2, рис. 6) при плотностях электронов более 10^{16} cm^{-3} . Видимо, наблюдаемое различие в экспериментальных и расчетных значениях КУ плазменной антенны со стороны больших плотностей электронов обусловлено контракцией разряда при больших токах, что эквивалентно уменьшению эффективного радиуса плазменного столба. В соответствии с рабо-

той [28] для характеристик лампы ГШ-5 (70 Torr, внутренний радиус 1.5 мм) контракция разряда начинается при токах более 100 мА, и радиус плазменного столба уменьшается примерно в два раза. Однако специальным образом явление контракции разряда в неоне в рамках настоящей работы не рассматривалось.

Созданная модель плазменной антенны позволила оценить возможность применения разрядов атмосферного давления в качестве плазменной вибраторной антенны с точки зрения требуемых параметров плазмы. В задании параметров модели переход от пониженного давления (70 Torr, $\nu = 4 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$, диаметр плазменного столба 3 мм) к атмосферному выражается в изменении частоты столкновений электронов с нейтральными частицами на порядок величины, т.е. ν задавалась равной $4 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$, при этом $\nu > \omega$ в исследуемом частотном диапазоне и $\nu > \omega_p$ для плотности электронов до $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Соответствующая зависимость максимального реализуемого КУ плазменной антенны от плотности электронов представлена кривой 2 на рис. 7. КУ плазменной антенны будет приближаться к значениям КУ геометрически идентичной металлической антенны (штриховая линия) при плотностях электронов более 10^{16} cm^{-3} , что примерно на порядок превышает требуемую плотность электронов ($n_e > 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) в разрядах пониженного давления (кривая 1).

Для оценки влияния частоты столкновений электронов на КУ плазменной антенны также были выполнены расчеты при частотах столкновений $2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ (кривая 3) и $6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ (кривая 4). Например, для формирования КУ плазменной антенны выше -3 dBi при заданных частотах столкновений плотность электронов должна превышать $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и $1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, соответственно, т.е. для получения желаемого КУ плазменной антенны плотность электронов должна изменяться пропорционально изменению частоты столкновений, что объясняется необходимостью обеспечения одинаковой

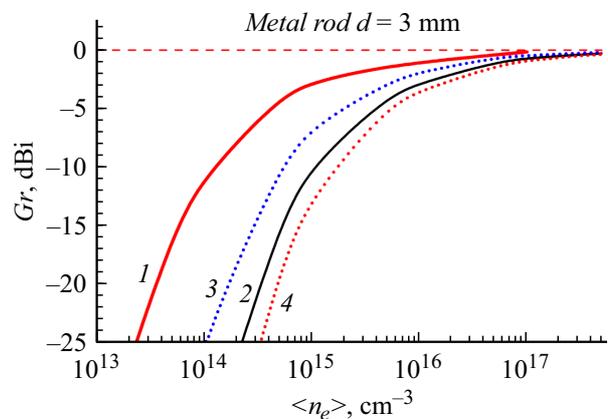


Рис. 7. Зависимость реализуемого коэффициента усиления плазменной несимметричной вибраторной антенны от плотности электронов. Частота столкновений электронов: 1 — $4 \cdot 10^{10}$, 2 — $4 \cdot 10^{11}$, 3 — $2 \cdot 10^{11}$, 4 — $6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$. Штриховая линия — медный стержень.

проводимости в плазменном столбе. Действительно, как следует из (2), при $\nu > \omega$ проводимость $\sigma \approx \frac{e^2 n_e}{m_e} \cdot \frac{1}{\nu}$. Таким образом, для построения плазменных антенн основополагающей характеристикой плазмы является ее проводимость. В данном случае проводимость плазменного столба должна быть более 1000 S/m. Плотности электронов порядка 10^{16} cm^{-3} при атмосферном давлении могут быть получены в импульсных разрядах [23].

Заключение

В работе исследовалась плазменная несимметричная вибраторная антенна, излучающим телом которой являлся положительный столб тлеющего разряда в неоне при пониженном давлении. Экспериментально определены максимальный коэффициент усиления антенны, ее азимутальная и угломестная диаграмма направленности. Найдены зависимости характеристик антенны от величины плотности электронов в плазменном столбе газоразрядной лампы. Полученные результаты сопоставлены с результатами моделирования, выполненного в среде программы COMSOL Multiphysics.

Показано, что плазменная антенна, обладает круговой азимутальной диаграммой направленности с одним главным лепестком, направленным под углом 60° к экрану с шириной около 30° по углу места. Показано, что при плотности электронов более 10^{14} cm^{-3} максимальный КУ плазменной антенны составляет более -6 dBi , что близко к КУ геометрически подобной металлической антенны с диаметром металлического стержня меньшим, чем внутренний диаметр трубки газоразрядной лампы. Данное различие, вероятно, обусловлено явлением контракции разряда в неоне, что следует учитывать при конструировании плазменных антенн, использующих разряды атмосферного и пониженного давлений.

Экспериментально исследовано влияние плотности электронов в плазменном столбе на S параметры плазменной антенны. Отмечена важность одновременных измерений ее S_{11} и S_{21} параметров. Показано, что выполнение условий выхода плазменной антенны на линейный режим работы при увеличении плотности электронов в плазменном столбе соответствует выходу ее коэффициента усиления на постоянный (максимальный) уровень.

Сравнительный анализ результатов моделирования КУ для антенн, реализованных с использованием разрядов при разном давлении, показал, что главным критерием обеспечения КУ близкого к значению антенны с металлическим излучающим телом является создание в плазменном объеме проводимости более 1000 S/m.

Полученные результаты важны для развития быстродействующих адаптивных систем радиоэлектроники.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта БРФФИ № T21PM-120 и гранта РЦНИ проект № 20-58-04019 Бел_мол_a.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Liu, Y. Shen, L. Fan, Y. Tian, Y. Ai, B. Tian, Zh. Liu, F.-Y. Wang. *Sensors*, **22** (24), 9930 (2022). DOI: 10.3390/s22249930
- [2] E.C. Strinati, G.C. Alexandropoulos, H. Wymeersch, B. Denis, V. Sciancalepore, R. D'Errico, A. Clemente, D.-Th. Phan-Huy, E. De Carvalho, P. Popovski. *IEEE Commun. Magazine*, **59** (10), 99 (2021). DOI: 10.1109/MCOM.001.2100070
- [3] R.L. Haupt, M. Lanagan. *IEEE Antennas Propagation Magazine*, **55** (1), 49 (2013). DOI: 10.1109/MAP.2013.6474484
- [4] J. Costantine, Y. Tawk, S.E. Barbin, C.G. Christodoulou. *Proceed. IEEE*, **103** (3), 424 (2015). DOI: 10.1109/JPROC.2015.2396000
- [5] G.G. Borg, J.H. Harris, N.M. Martin, D. Thorncraft, R. Milliken, D.G. Miljak, B. Kwan, T. Ng, J. Kircher. *Phys. Plasmas*, **7** (5), 2198 (2000). DOI: 10.1063/1.874041
- [6] R. Kumar, D. Bora. *J. Appl. Phys.*, **109** (6), 063303 (2011). DOI: 10.1063/1.3564937
- [7] I. Alexeff, T. Anderson, E. Farshi, N. Karnam, N.R. Pulasani. *Phys. Plasmas*, **15** (5), 057104 (2008). DOI: 10.1063/1.2919157
- [8] Н.Н. Богачев, Н.Г. Гусейн-заде, В.И. Неведов. *Физика плазмы*, **45** (4), 365 (2019). DOI: 10.1134/S0367292135030020 [N.N. Bogachev, N.G. Gusein-zade, V.I. Nefedov. *Plasma Phys. Reports*, **45** (4), 372 (2019). DOI: 10.1134/s1063780x19030024]
- [9] V.V. Ovsyanikov, I.A. Reznichenko, A.L. Ol'shevs'kiy, V.M. Popel', K.V. Rodin, Y.D. Romanenko. *Proc. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals* (IEEE, 2008), p. 77–79. DOI: 10.1109/UWBUS.2008.4669363
- [10] L. Zheng, L. Cao, Z. Zhang. *Proc. of the 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory* (IEEE, 2008), p. 222–224. DOI: 10.1109/ISAPE.2008.4735182
- [11] I. Alexeff, T. Anderson, S. Parameswaran, E.P. Pradeep, J. Hulloi, P. Hulloi. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **34** (2), 166 (2006). DOI: 10.1109/TPS.2006.872180
- [12] J. Li, A.M. Astafiev, A.A. Kudryavtsev, Ch. Yuan, J. Yao, Zh. Zhou, X. Wang. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **48** (2), 364 (2020). DOI: 10.1109/TPS.2019.2957093
- [13] S. Bonde, V. Ghiye, A. Dhande. *Proc. 2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies* (IEEE, 2014), p. 16–19. DOI: 10.1109/CSNT.2014.12
- [14] H.M. Zali, M.T. Ali, N.A. Halili, H. Ja'afar, I. Pasya. *Proc. 2012 International Symposium on Telecommunication Technologies* (IEEE, 2012), p. 52–55. DOI: 10.1109/ISTT.2012.6481564

- [15] R. Kumar, D. Bora. *Plasma Sci. Technol.*, **12** (5), 592 (2010). DOI:10.1088/1009-0630/12/5/17
- [16] N.N. Bogachev, I.L. Bogdankevich, N.G. Gusein-zade, K.F. Sergeev. *Acta Polytechnica*, **55** (1), 34 (2015). DOI: 10.14311/AP.2015.55.0034
- [17] Н.Н. Богачев, И.Л. Богданкевич, Н.Г. Гусейн-заде, А.А. Рухадзе. *Физика плазмы*, **41** (10), 860 (2015). DOI: 10.7868/S0367292115100030.
[N.N. Bogachev, I.L. Bogdankevich, N.G. Gusein-zade, A.A. Rukhadze. *Plasma Phys. Reports*, **41** (10), 792 (2015). DOI: 10.1134/S1063780X15100037]
- [18] T. Naito, Sh. Yamaura, K. Yamamoto, T. Tanaka, H. Chiba, H. Ogino, K. Takahagi, Sh. Kitagawa, D. Taniguchi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54** (1), 016001 (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.016001
- [19] T. Naito, S. Yamaura, Y. Fukuma, O. Sakai. *Phys. Plasmas*, **23** (9), 093504 (2016). DOI: 10.1063/1.4962225
- [20] L.V. Simonchik, M.S. Usachonak. *Proc. 41th EPS Conference on Plasma Physics* (Berlin, Germany, 2014), p. 2.126.
- [21] В.Е. Голант. *Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы* (Наука, М., 1968)
- [22] M. Chung, W.-Sh. Chen, B.-R. Huang, Ch.-Ch. Chang, K.-Y. Ku, Y.-H. Yu, T.-W. Suen. *Proc. TENCON 2007–2007 IEEE Region 10 Conference* (IEEE, 2007). DOI: 10.1109/TENCON.2007.4429002
- [23] V.S. Babitski, Th. Callegari, L.V. Simonchik, J. Sokoloff, M.S. Usachonak. *J. Appl. Phys.*, **122** (8), 083302 (2017). DOI: 10.1063/1.4999988
- [24] V.S. Babitski, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, P.V. Molchanov, L.V. Simonchik, M.S. Usachonak, R.F. Zuyevski. *J. Appl. Phys.*, **122** (8), 083104 (2017). DOI: 10.1063/1.5000239
- [25] М.С. Усачёнок, Ю.С. Акишев, А.В. Казак, А.В. Петряков, Л.В. Симончик, В.В. Шкурко. *ЖТФ*, **93** (3), 350 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57530.279-23 [M.S. Usachonak, Yu.S. Akishev, A.V. Kazak, A.V. Petryakov, L.V. Simonchik, V.V. Shkurko. *Tech. Phys.*, **68** (3), 325 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57530.279-23]
- [26] М.Ю. Пономарев, О.Ю. Платонов, В.В. Шубников. *Вестник Концерна ПВО „Алмаз-Антей“*, **3**, 43 (2015). DOI: 10.38013/2542-0542-2015-3-43-47
- [27] M. Tabatabaian. *COMSOL5 for Engineers* (Mercury Learning and Information, 2015)
- [28] Y. Golubovskii, A. Siasko, S. Valin. *AIP Conf. Proc.* **2179** (1), 020024 (2019). DOI: 10.1063/1.5135497