

УДК 537.525.99; 537.86; 621.396.67

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧАЕМОГО СИГНАЛА

© 2024 г. Н. Н. Богачев^{а,*}, И. Л. Богданкевич^а, С. Е. Андреев^а, Н. Г. Гусейн-заде^а, М. С. Усачёнок^б

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^б Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

* e-mail: bgniknik@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.

После доработки 29.01.2024 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Исследуется излучение сигнала плазменной несимметричной вибраторной антенны при двух способах ее возбуждения. Ранее было показано, что вторая и третья гармоника частоты входного сигнала в спектре излучения плазменной антенны на 10–20 дБ выше, чем для металлической антенны той же геометрии. Экспериментально и с помощью компьютерного моделирования исследуется влияние особенностей способа возбуждения плазменной несимметричной вибраторной антенны на спектральные характеристики излучаемого ею сигнала. Для двух способов возбуждения плазменной несимметричной вибраторной антенны – через электрод и через коаксиальный соединитель – показано отличие в величине составляющих на частоте излучаемого сигнала и кратных гармоник. Введение коаксиального соединителя в схему возбуждения плазменной антенны позволило улучшить согласование на частоте входного сигнала и снизить величину составляющих на второй и третьей гармониках. Для плазменной антенны с коаксиальным соединителем удалось добиться увеличения разницы между первой и второй гармониками почти на 6 дБ, а между первой и третьей – почти на 20 дБ по сравнению со схемой возбуждения через электрод.

Ключевые слова: антенна, сигнал, спектр, плазма, несимметричная вибраторная антенна, низкотемпературная плазма, применение, плазменная антенна

DOI: 10.31857/S0367292124030073, **EDN:** RFZGLI

1. ВВЕДЕНИЕ

Теоретические, численные и экспериментальные исследования плазменных антенн из газоразрядных трубок [1–8] показали, что их радиофизические характеристики сравнимы с аналогичными характеристиками металлических антенн. При этом плазменные антенны обладают рядом преимуществ, таких как электронное управление параметрами антенны, быстрое включение и выключение антенны (создание и распад плазмы), меньшая радиолокационная заметность в пассивном режиме. К недостаткам плазменных антенн можно отнести возникновение нелинейных искажений, которые проявляются в виде возникновения или усиления кратных гармоник входного сигнала [9–11]. В работе [11] было показано, что вторая и третья гармоника частоты входного сигнала в спектре излучения плазменной антенны выше на 10–20 дБ. Актуальной становится задача исследования нелинейных эффектов при излучении сигнала плазменной антенной и снижения нелинейных искажений.

Плазма в газоразрядной трубке антенны может создаваться как за счет внешнего источника, подключаемого к газоразрядной трубке, так и за счет источника излучаемого высокочастотного сигнала (генератора или связного передатчика). В данной работе исследуется плазменная несимметричная вибраторная антенна (ПНВА) из газоразрядной трубки с передающим устройством, используемым в качестве источника информационного сигнала и энергии для создания плазмы. Задачей исследования было изучить влияние способа возбуждения (подачи сигнала) на спектральные характеристики сигнала, излучаемого ПНВА.

2. ПЛАЗМЕННАЯ НЕСИММЕТРИЧНАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА

Плазменная несимметричная вибраторная антенна представляет собой аналог металлической несимметричной вибраторной антенны (МНВА) с круглым экраном (рис. 1), и состоит из штыря

(плеча вибратора) с длиной в четверть длины электромагнитной волны в вакууме $l = \lambda_0/4$ и четверть волнового проводящего диска. В плазменной антенне штырем является газоразрядная трубка. Создание плазмы в газоразрядной трубке ПНВА за счет энергии сигнала от связанного передатчика позволяет упростить схему подключения плазменной антенны и сделать ее аналогичной схеме подключения МНВА. Самым удобным способом питания ПНВА от связанного передатчика, как и в случае МНВА, является соединение с помощью коаксиального кабеля. При таком способе соединения плазменная газоразрядная трубка соединяется с центральным (внутренним) проводником коаксиального кабеля, а экран — с внешним проводником коаксиального кабеля. Использование для питания плазменной антенны стандартных коаксиальных кабелей с диаметром внутреннего проводника меньше, чем внутренний диаметр газоразрядной трубки допускает два способа соединения (рис. 1). В обоих случаях центральный проводник коаксиального кабеля от генератора соединяется с электродом газоразрядной трубки. Однако во втором случае (рис. 1б) центральный проводник коаксиального кабеля помимо электрода газоразрядной трубки подключен к торцу газоразрядной трубки с помощью коаксиального соединителя (элемент 6 на рис. 1б). Это позволяет большую часть электромагнитной энергии сигнала генератора передать вдоль газоразрядной трубки.

В работе [11] исследовался спектр излучения ПНВА с использованием соединения первого типа (рис. 1а) через электрод и проводилось сравнение

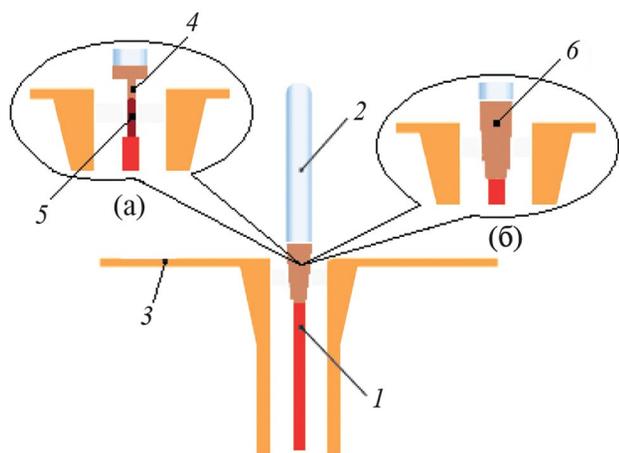


Рис. 1. Плазменная несимметричная вибраторная антенна с питанием от коаксиального кабеля: через электрод газоразрядной трубки (а), через коаксиальный соединитель (б): 1 — металлический экран, 2 — газоразрядная трубка, 3 — коаксиальный кабель, 4 — электрод газоразрядной трубки, 5 — соединительный провод, 6 — коаксиальный соединитель.

со спектром излучения аналогичной МНВА. Были обнаружены нелинейные искажения сигнала, излучаемого ПНВА, выраженные в усилении второй, третьей и четвертой гармоник входного сигнала на 10—30 дБ. Для исследования нелинейных искажений излучаемого сигнала было решено сравнить спектральные характеристики сигнала в случае его ввода через электрод с другим типом ввода — с использованием коаксиального соединителя (рис. 1б).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

3.1. Экспериментальная установка

Постановка эксперимента аналогична работе [11]. В экспериментальных исследованиях ПНВА использовалась стандартная промышленная люминесцентная лампа, где в качестве наполнителя (инертного газа) используется аргон и пары ртути. Парциальное давление аргона $p_{Ar} = 1-3$ Торр, концентрация нейтральных частиц аргона $n_{Ar} = (0.6-1.3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а паров ртути — $p_{Hg} = 10^{-3}$ Торр, концентрация нейтральных частиц в парах ртути $n_{Hg} = 0.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Размеры ПНВА (рабочей части газоразрядной трубки): длина $l_a = 17$ см и внешний диаметр лампы $d_{out} = 1.2$ см, внутренний диаметр лампы (максимальный диаметр плазмы) $d_{in} = 1$ см. Размеры МНВА: длина $l_a = 17$ см; диаметр $d_a = 1$ см.

Эксперименты проводили с помощью измерительного стенда в безэховой камере, схема которого представлена на рис. 2. Радиостанция Vertex VX-2100 выдает сигнал мощностью 45 Вт, работает в диапазоне 400—450 МГц, разность по уровню мощности на выходном разъеме между сигналом на несущей частотой и на ее второй гармонике составляет 90 дБ, между несущей и остальными гармониками — не менее 70 дБ.

Сигнал в виде немодулированного гармонического колебания с частотой 447 МГц от источника 1 — приемо-передатчика (портативной

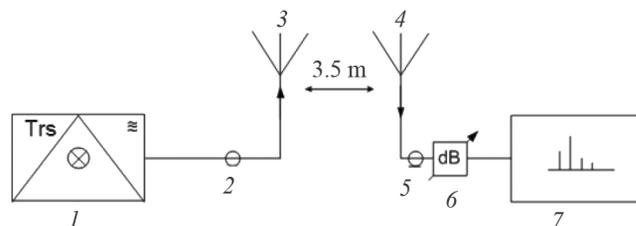


Рис. 2. Схема стенда для измерения спектра излучаемого сигнала: 1 — приемо-передатчик (портативная радиостанция) VX-2100, 2 и 5 — коаксиальные фидеры, 3 — излучающая антенна (ПНВА или МНВА), 4 — измерительная антенна, 6 — аттенюатор, 7 — анализатор спектра.

радиостанции) VX-2100 через коаксиальный фидер 2 поступал на исследуемую антенну 3 (ПНВА или МНВА), которая излучала его в пространство. Сигнал принимался измерительной логопериодической антенной 4, далее с нее через коаксиальный фидер 5 и высокочастотный аттенюатор 6 с коэффициентом подавления 20 дБ, поступал на анализатор спектра 7 Keysight PXA N9030B с диапазоном частот 3 Гц–26.5 ГГц.

3.2. Численная модель ПНВА

Для численного моделирования низкотемпературной плазмы часто используется модель на основе теории Друде, когда плазма описывается как среда с заданной диэлектрической проницаемостью. Однако моделирование плазмы на основе теории Друде дает неполное представление о режимах работы плазменной антенны, так как она не учитывает все нелинейные эффекты при взаимодействии частиц плазмы (электронов и ионов) с электромагнитной волной и влияние этого взаимодействия на излучаемый сигнал. Поэтому в данной работе для моделирования работы плазменной антенны использовался метод крупных частиц (“частица в ячейке”, PIC-метод).

Численное моделирование плазменной вибраторной антенны было выполнено в электромагнитном коде КАРАТ [12] и имело следующие параметры: длина $l = 17$ см, радиус $r = 0.5$ см, концентрация плазмы $n_e = 10^{10} - 10^{12}$ см $^{-3}$, несущая частота сигнала $f_0 = 447$ МГц ($\omega_0 = 2.7 \cdot 10^9$ с $^{-1}$). Две схемы PIC-моделей ПНВА представлены на рис. 3.

Из коаксиального кабеля 1 электромагнитная волна поступает на плазму в диэлектрической трубке 2, которая вместе с металлическим экраном 3 образует несимметричную вибраторную антенну. На границах счетной области размещен идеально согласованный поглощающий электромагнитное излучение слой (PML) [13]. На рис. 3а представлена модель с соединением первого типа (рис. 1а) — без переходника, а на рис. 3б — модель, использующая коаксиальный соединитель.

Начальное распределение плазмы в численных моделях задавалось равномерным по всей трубке. Электроны, долетающие до границы газоразрядной трубки, заряжали ее стеклянную стенку. Механизм дополнительной ионизации был выключен, так как в этом моделировании предполагалось, что за время наблюдения электронная концентрация плазмы из-за вылета электронов на стенки трубки меняется незначительно. Ионы аргона за время моделирования не успевали долететь до стенки газоразрядной трубки, поэтому так и остается непонятным стенки заряжались за счет поглощения электронов или оставались нейтральными за счет рекомбинации электронов и ионов на стенках.

Излучаемый плазменной антенной сигнал фиксировался в точке $z = 8$ см, $r = 5.8$ см и точка $z = 10$ см, $r = 5.8$ см. Наблюдение спектров излучаемого сигнала в моделировании на расстояниях меньше длины волны компромиссное решение для сохранения приемлемого счётного времени и устойчивости используемой модели.

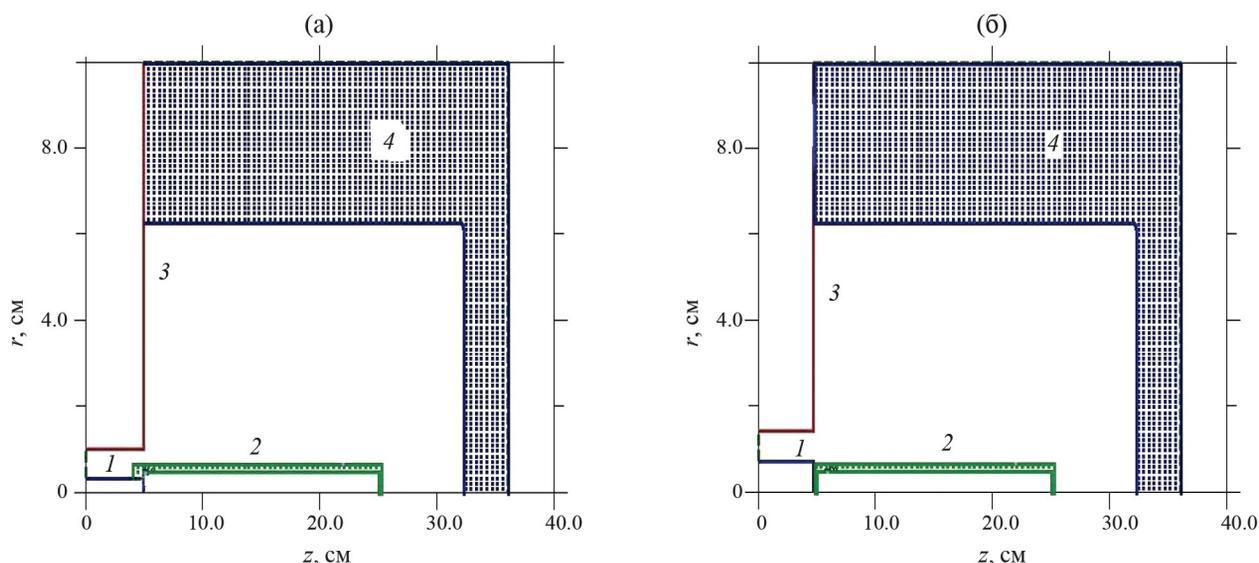


Рис. 3. Схемы численных моделей плазменной вибраторной антенны: соединение через электроды (а), соединение через коаксиальный соединитель (б): 1 — коаксиальный кабель, 2 — диэлектрическая трубка с PIC плазмой, 3 — металлический экран, 4 — универсальный поглощающий слой PML.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты экспериментальных измерений

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных измерений спектров излучения немодулированного гармонического колебания для антенн: МНВА (рис. 4а), ПНВА, соединенной только через центральный электрод (рис. 4б), и ПНВА, соединенной через коаксиальный переходник, через который большая часть электромагнитной энергии передается вдоль газоразрядной трубки (рис. 4в).

На рис. 4а видно, что в спектре излучаемого МНВА сигнала, наряду с основной частотой f_0 , есть составляющие на частотах второй $2f_0$ и третьей $3f_0$ гармоник. Этот факт, связан с тем, что используемый в наших экспериментах приемопередатчик Vertex VX-2100 выдает неидеальный моногармонический сигнал, а сигнал с паразитными кратными гармониками несущей частоты.

На рис. 4б видно, что в спектре излучения ПНВА с вводом сигнала через электрод заметно усиление составляющих на частоте кратных гармоник: второй $2f_0$, третьей $3f_0$ и четвертой $4f_0$ (как и в работе [11]), по сравнению с сигналом от МНВА. Уровень мощности в спектре ПНВА на частоте основной гармоники почти на 12 дБ меньше (из-за особенностей ввода и потерь на ионизацию газа), чем в спектре МНВА, а для остальных гармоник на 10–30 дБ больше, чем в спектре МНВА.

В работе [11] было сделано предположение, что усиление нелинейных эффектов в излучаемом сигнале ПНВА связано с особенностью способа возбуждения плазменной антенны (рис. 1а) для проверки этого предположения нами и был проведен эксперимент по схеме на рис. 1б, при которой большая часть энергии передаваемого сигнала вводится вдоль диэлектрической трубки. Спектр излучения ПНВА

при таком способе ввода гармонического внешнего сигнала представлен на рис. 4в.

Из графика видно, что при новом способе ввода излучения наблюдается рост мощности на основной частоте и действительно наблюдается некоторое снижение нелинейных искажений. Спектральная плотность мощности на третьей гармонике снизилась почти на 15 дБ, хотя спектральная плотность мощности на частоте второй гармоники уменьшилась незначительно, а на частоте четвертой гармоники спектральная плотность мощности даже немного выросла. В табл. 1 приведены сравнительные данные по спектральной плотности мощности излучения на гармониках сигнала ПНВА с разными способами возбуждения ПНВА и МНВА.

4.2. Результаты численного моделирования

В этом разделе приведены результаты, полученные в численном моделировании работы плазменной антенны при использовании РС-метода (см. раздел 3.2). Функционирование плазменной антенны связано с распространением поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) на границе плазма–вакуум.

В работах [7, 14] исследовалась связь условия распространения поверхностной электромагнитной волны на плазменном цилиндре конечного радиуса с режимами работы плазменной антенны. Были определены параметры плазмы (в первую очередь концентрация), соответствующие безызлучательному и излучательному (нелинейному и линейному) режимам работы плазменной антенны.

Безызлучательный режим — такой режим, в котором вся энергия электромагнитной волны, подаваемая на антенну, не излучается антенной в дальнюю зону. Показано, что в линейном, определенном по решению дисперсионного уравнения, режиме характеристики плазменной антенны практически

Таблица 1. Спектральная плотность мощности излучаемого сигнала

Спектральная плотность мощности и её разность для гармоник излучаемого сигнала	Спектральная плотность мощности сигнала МНВА (рис. 3а), дБм	Спектральная плотность мощности сигнала ПНВА с вводом через электрод (рис. 3б), дБм	Спектральная плотность мощности сигнала ПНВА с вводом через плавный переходник (рис. 3в), дБм
$P(f_0)$	-1.62	-13.33	-6.54
$P(2f_0)$	-95.74	-58.85	-59.22
$P(3f_0)$	-87.45	-71.89	-85.30
$P(4f_0)$	<-100.00	-81.42	-74.82
$P(f_0) - P(2f_0)$	94.12	45.53	51.68
$P(f_0) - P(3f_0)$	85.83	58.56	78.76
$P(f_0) - P(4f_0)$	>98.38	69.09	68.28

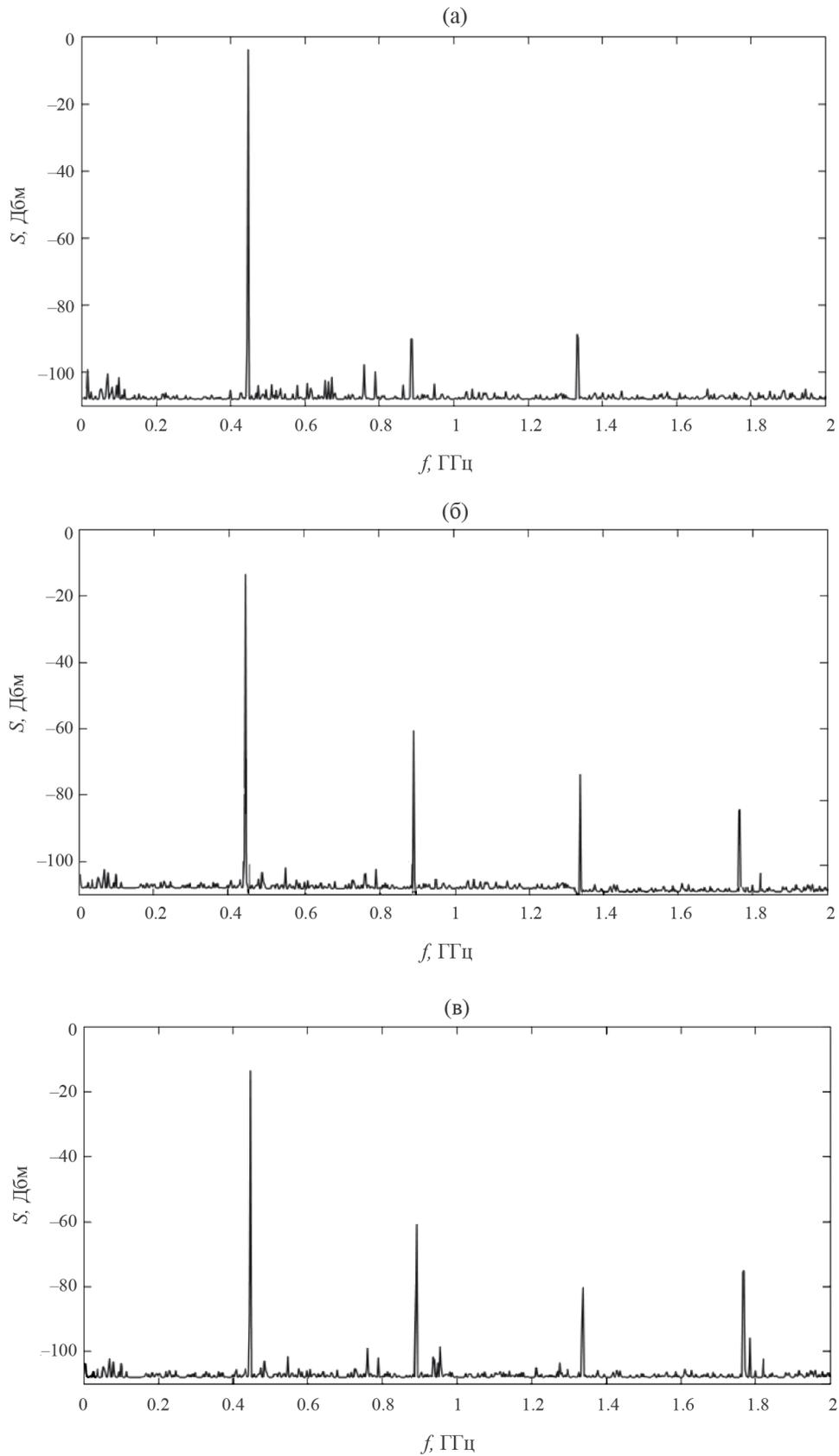


Рис. 4. Экспериментально измеренные спектры излучаемого немодулированного гармонического колебания (с учетом коэффициента ослабления аттенюатора): МНВА (а), ПНВА соединение через центральный электрод газоразрядной трубки (б), ПНВА, соединенная через коаксиальный переходник [9] (в).

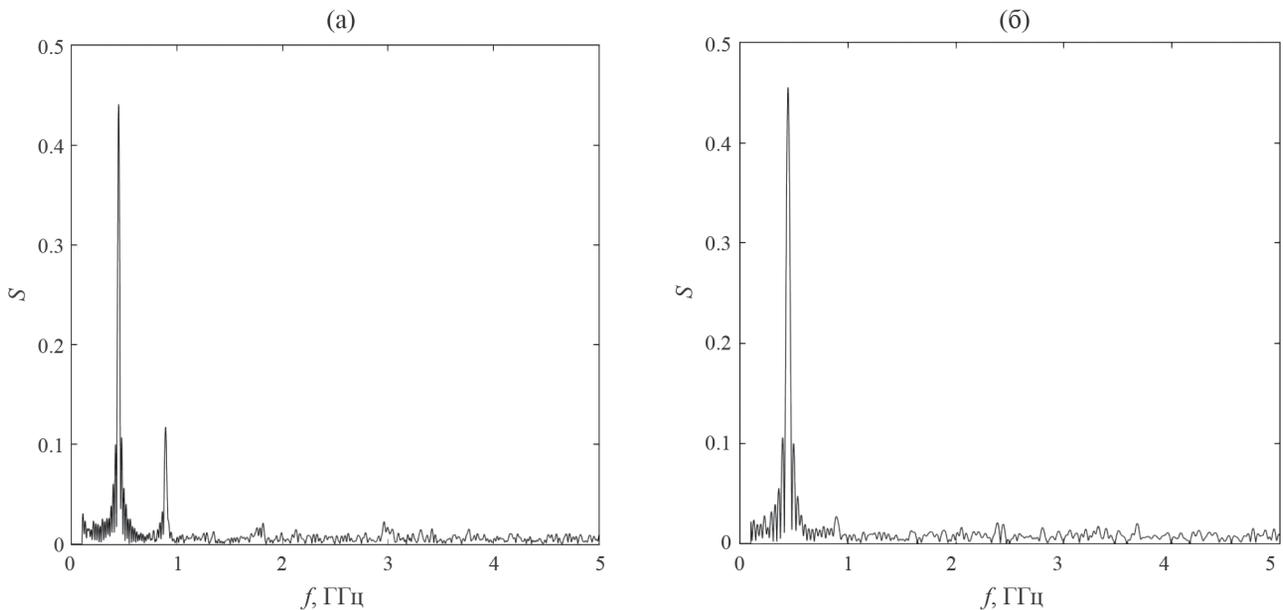


Рис. 5. Спектры излучения ПНВА (результаты моделирования) в относительных единицах для двух случаев возбуждения ПНВА: через центральный электрод (а), коаксиальный переходник (б).

не отличаются от характеристик аналогичной металлической антенны.

В данной работе рассмотрен только линейный режим работы ПНВА по дисперсионной характеристике [7]. Концентрация плазмы выбиралась в соответствии с данными из работ [7, 10]. Для анализа результатов были выбраны амплитудные спектры для двух описанных выше способов (рис. 1а, б) возбуждения плазменной антенны в линейном режиме работы ПНВА.

Как уже указывалось выше, в спектре сигнала возбуждения присутствовали гармоники основной частоты сравнительно малой амплитуды. Эти гармоники проявляются и в спектре излучения МНВА (рис. 4а). В спектре ПНВА (рис. 4б, в) также присутствуют эти кратные гармоники, и с увеличенной амплитудой

Как уже указывалось выше, источник входного сигнала был немонотонический и в спектре входного сигнала наблюдались паразитные частоты (кратные основной частоте) сравнительно малой амплитуды. Это паразитные частоты проявляются и в спектре излучения МНВА (рис. 4а). В спектре ПНВА (рис. 4б, в) также присутствуют эти кратные гармоники с увеличенной амплитудой по сравнению с МНВА. В моделировании использовался монотонический внешний сигнал. Тем не менее в спектрах на рис. 5 наблюдаются кратные гармоники (лучше разрешена и заметна вторая гармоника). Структура спектра зависит от способа возбуждения ПНВА.

На рис. 5 показаны спектры излучения плазменной антенны для разных способов возбуждения ПНВА. Как можно видеть, связь работы плазменной антенны с распространением ПЭВ очередной раз подтвердилась.

При втором способе ввода излучения через коаксиальный переходник, и в котором большая часть электромагнитной энергии передается вдоль газоразрядной трубки мощность, излучаемая плазменной антенной на основной частоте выше, чем при другом способе, также меньше и нелинейные искажения.

На рис. 6 представлены нормированные гистограммы спектров для различных способов

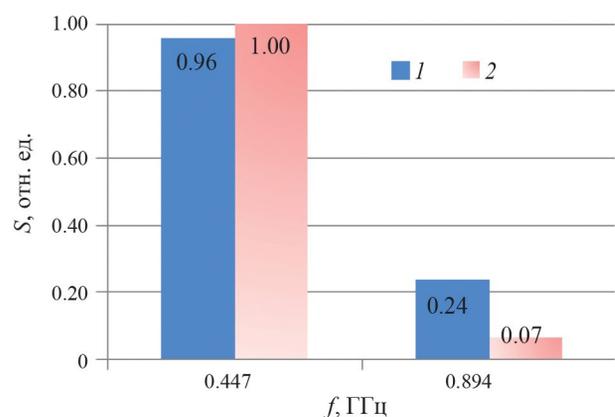


Рис. 6. Нормированные гистограммы спектров (моделирование) для двух случаев возбуждения ПНВА: 1 — через центральный электрод, 2 — коаксиальный переходник.

возбуждения антенны. Гистограммы хорошо показывают соотношение амплитуд отдельных гармоник в спектре излучения и хорошо подтверждают результаты экспериментов. Заметна незначительная разница на основной гармонике и большая разница для второй гармоники при различных способах возбуждения ПНВА.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что в моделировании использовался чистый моногармонический внешний сигнал, пик спектральной плотности на второй гармонике в несколько раз больше для способа возбуждения через центральный электрод (рис. 5а). Электродинамика плазмы допускает возникновение нелинейных искажений при взаимодействии электромагнитной волны с электронами плазмы. Появление кратных гармоник в эксперименте с ПНВА и моделировании можно рассматривать как нелинейную реакцию среды (индукцию или ток) на внешнее электромагнитное поле. Слабую нелинейность можно учесть введением более высоких степеней значения поле в материальном уравнении отклика среды [15].

В плазме рассматриваемой антенны в условиях распространения ПЭВ возможно возникновение как второй, так и третьей гармоники внешней электромагнитной волны. Различие в спектральных характеристиках сигнала для двух конструкций возбуждения плазменной антенны можно объяснить локальным усилением поля в плазме на острие электрода (при вводе сигнала только через электрод газоразрядной трубки). Этот эффект приводит к усилению колебаний электронов внутри плазмы, т.е. увеличению нелинейных искажений. При использовании коаксиального переходника для подачи электромагнитной волны на плазменную антенну удалось добиться существенного снижения нелинейных искажений сигнала, излучаемого плазменной антенной.

В работе как экспериментально, так и численно было рассмотрено влияние способа возбуждения плазменной антенны на излучаемый ею сигнал. Было показано, что особенности способа возбуждения плазменной несимметричной вибраторной антенны влияют на уровень амплитуды кратных гармоник основной частоты внешнего электромагнитного поля. При использовании коаксиального переходника для подачи электромагнитной волны на плазменную антенну, когда большая часть энергии внешней волны распространяется вдоль газоразрядной трубки, удается добиться существенного снижения нелинейных искажений излучаемого плазменной антенной сигнала.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РЦНИ, проект № 20-5804019 Бел_мол_а и гранта БРФФИ № T21PM-120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borg G. G., Harris J. H., Miljak D. G., Martin N. M.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 3272. <https://doi.org/10.1063/1.874041>
2. *Rayner J. P., Whichello A. P., Cheetham A. D.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 269. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.826019>
3. *Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S., Pradeep E. P., Pulasani N. R., Karnam N.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. P. 166. <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.872180>
4. *Liang C., Xu Y., Wang Z.* // Chin. Phys. Lett. 2008. V. 25. P. 3712.
5. *Chen Z., Zhu A., LV J.* // WSEAS Trans. Commun. 2013. V. 12. P. 63.
6. *Гусейн-заде Н.Г., Минаев И.М., Рухадзе А.А., Рухадзе К.З.* // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2011. № 3. С. 42.
7. *Bogachev N. N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Sergeychev K. F.* // Acta Polytechnica. 2015. V. 55. P. 30. <https://doi.org/10.14311/AP.2015.55.0034>
8. *Ковалев А.С., Вожаков В.А., Кленов Н.В., Аджемов С.С., Терешонок М.В.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 211. <https://doi.org/10.7868/S0367292118020075>
9. *Беляев Б.А., Лексиков А.А., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. С. 88.
10. *Bogachev N. N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 661. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/661/1/012054>
11. *Bogachev N. N., Gusein-zade N. G., Nefedov V. I.* // Plasma Phys. Reports. 2019. V. 45. P. 372. <https://doi.org/10.1134/S1063780X19030024>
12. *Tarakanov V. P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992.
13. *Berenger J. P.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44. P. 110. <https://doi.org/10.1109/8.477535>
14. *Богачев Н.Н., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г., Рухадзе А.А.* // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 365. <https://doi.org/10.7868/S0367292115100030>
15. *Горбунов Л.М.* Введение в электродинамику плазмы. М.: Изд-во Ун-та дружбы народов, 1990. 127 с.

Effect of the Method of Excitation of the Plasma Antenna on the Spectral Characteristics of the Radiated Signal

© 2024 N. N. Bogachev^{a,*}, I. L. Bogdankevich^a, S. E. Andreev^a, N. G. Gusein-zade^a,
M. S. Usachenok^b

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

^b Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus

* e-mail: bgniknik@yandex.ru

The radiation of signal by the plasma asymmetrical vibrator antenna is studied for two methods of its excitation. Earlier, it was shown that the 2nd and 3rd harmonics of the input signal frequency in the radiation spectrum of the plasma antenna are 10–20 dB stronger than those of a metal antenna with the same geometry. In this work, we study experimentally and by computer simulations the effect of the method of excitation of the plasma asymmetrical vibrator antenna on the spectral characteristics of the signal that it radiates. For the two excitation methods of the antenna, through an electrode and through a coaxial coupler, it was shown that the strength of the signal components at the frequency of the radiated signal and its multiple harmonics is different. The introduction of the coaxial coupler in the antenna excitation scheme allowed us to improve the coupling at the input signal frequency and decrease its components at the 2nd and 3rd harmonics. For the plasma antenna with the coaxial coupler, the difference between the 1st and 2nd harmonics was increased by almost 6 dB, and between the 1st and the 3rd ones by almost 20 dB compared to the antenna excitation scheme through the electrode.

Keywords: antenna, signal, spectrum