

04;09;12

Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объема газоразрядной плазмы

© В.А. Пахотин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2006 г.

Обнаружено увеличение более чем в 10^2 раз напряженности электрического поля передающей электрически короткой антенны ($l/\lambda \ll 10^{-3}$), помещенной в вакуумную трубку с непрерывным разрядом на постоянном токе. Исследовано влияние внешнего магнитного поля.

PACS: 52.40.Fd, 84.40.Ba

Важной задачей радиоэлектроники является исследование возможности создания эффективных малогабаритных излучающих антенн, особенно в области длин волн $\lambda \gg 10$ м. Проблема состоит в достижении необходимых токов в антенне, т.е. согласовании ее с комплексным сопротивлением генератора. Большой интерес представляют исследования по влиянию плазменных оболочек на параметры малогабаритных антенн. В работе [1] исследовались характеристики короткого электрического вибратора в ограниченном объеме распадающейся магнитоактивной плазмы, создаваемой в аргоне (Ar) импульсным безэлектродным методом и с применением постоянной вакуумной откачки. Было показано, что в этих условиях возможно заметное улучшение согласования антенны с генератором и значительное повышение (≥ 30 раз по полю) эффективности излучения по сравнению с излучением без плазмы. С точки зрения практического использования подобных антенн, и особенно их мобильных вариантов, более перспективны стационарные, а не импульсные, как в [1], разряды. Поэтому важно исследовать влияние на излучение антенны стационарного газового разряда при отсутствии постоянной вакуумной откачки. Кроме того, представляет интерес использование другого рабочего газа. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования ближнего поля плазменной

антенны, представляющей собой электрический вибратор, помещенный в отпаянную вакуумную трубку с непрерывным разрядом, создаваемым с помощью электродов в парах ртути (Hg). По сравнению с [1] длина вибратора l уменьшена в несколько раз.

Плазменная антенна схематично показана на рис. 1, *a* и состоит из вибратора 1 , впаянного в газоразрядную трубку 2 диаметром 80 мм, изготовленную из молибденового стекла, с впаянными в нее электродами 3 диаметром 25 мм. Расстояние между электродами равно 250 мм. Вибратор изготовлен из молибденовой проволоки толщиной 2 мм. Каждое плечо вибратора имеет длину 30 мм. Такой вибратор является электрически коротким на частотах $f < 1000$ МГц. Электромагниты 4 служат для создания постоянного магнитного поля и выполнены в форме плоских катушек, содержащих каждая по 1900 витков медного провода диаметром 1 мм. Средний диаметр каждой катушки составляет примерно 200 мм, а длина равна 50 мм. Катушки 4 расположены симметрично по отношению к вибратору 1 , причем расстояние между их геометрическими центрами составляет в среднем 300 мм. Давление паров ртути было равно 10^{-3} Торр, что соответствует комнатной температуре. Ионизатором служил оксидный термокатод, ток накала которого составлял 3.5–3.75 А. Термокатод был впаян вблизи одного из электродов 3 (катода). Для поддержания разряда использовался источник питания, позволяющий создавать постоянный ток до 0.4 А при напряжении до 400 В. С целью предотвращения паразитного влияния цепей питания плазмы и термокатада последние подключались через дроссели.

Переменное напряжение подводилось к вибратору от генераторов типов ГЗ-33, Г4-42. Прием сигнала, излучаемого антенной, осуществлялся с помощью антенны длиной 2 м, расположенной параллельно вибратору, на расстоянии 1 м от него. Антенна была подключена к приемнику, в качестве которого использовались анализаторы спектра типов С4-25, С4-46. В цепь вибратора был включен измеритель тока антенны. Измерения поля были проведены на частотах $f \leq 60$ МГц. При $f < 200$ кГц уровень полезного сигнала в отсутствие плазмы был на уровне шума. Для измерения электронной плазменной частоты использовались частоты до 600 МГц. Ток разряда I_d изменялся в пределах от нуля (отсутствие плазмы) до 400 мА. Суммарный ток в катушках I_c изменялся от нуля до 4 А, т.е. по 2 А в каждой катушке. Магнитное поле не было однородным, и его уровень определялся расчетным путем. Напряженность магнитного поля H пропорциональна I_c .

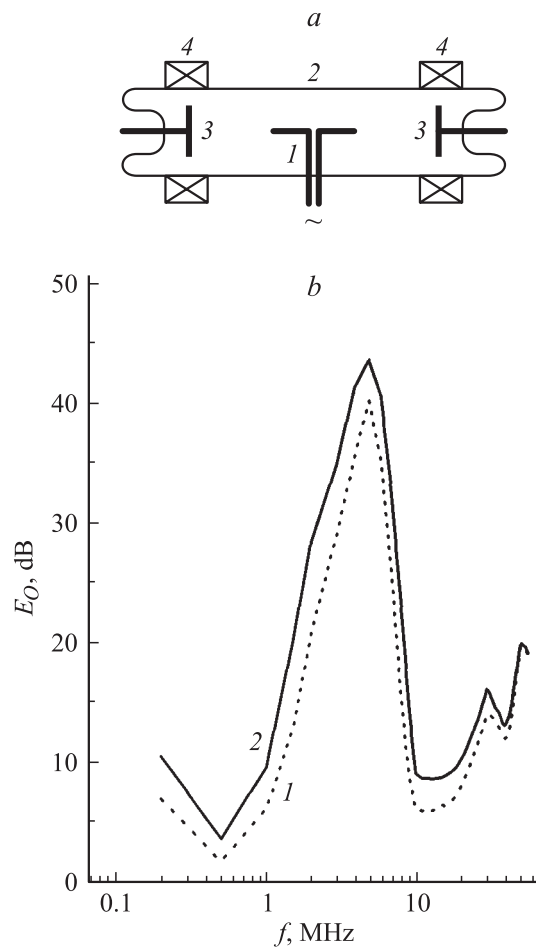


Рис. 1. Схема антенны (*a*) и зависимость относительной напряженности электрического поля E_0 от частоты f для $I_d = 100$ мА (кривая 1), $I_d = 300$ мА (кривая 2) (*b*).

Ток $I_c = 4$ А соответствует напряженности магнитного поля вблизи вибратора $H \approx 10^4$ А/м.

На рис. 1, *b* представлена зависимость отношения уровня поля антенны с плазмой к уровню поля без плазмы в отсутствие магнитного

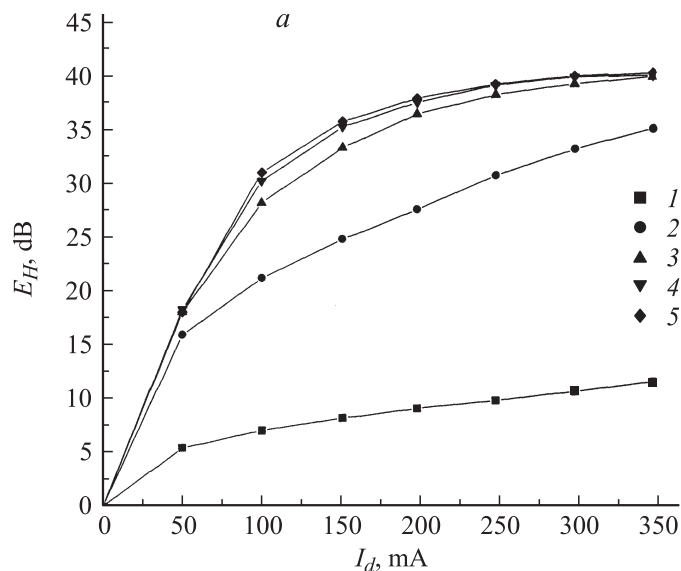


Рис. 2. Зависимость относительной напряженности электрического поля E_H от тока разряда I_d при различном токе в катушках I_c : 1 — 0 А, 2 — 1 А, 3 — 2 А, 4 — 3 А, 5 — 4 А (а) и зависимость тока антенны I_A от I_c при различном I_d : 1 — 100 мА, 2 — 350 мА (б).

поля E_0 от частоты f напряжения, подводимого к вибратору: 1 — ток разряда $I_d = 100$ мА, 2 — $I_d = 300$ мА. Наибольшее превышение наблюдается на частотах 2–8 МГц и достигает $E_0 = 150$ на частоте 4 МГц. Эксперименты с магнитоактивной плазмой показали, что влияние магнитного поля на ближнее поле плазменной антенны существенно на частотах, значительно меньших тех частот, при которых наблюдается наиболее сильное увеличение излучения антенны с изотропной плазмой. На рис. 2, а представлена зависимость относительного уровня поля антенны с магнитоактивной плазмой E_H на частоте 200 кГц от тока разряда I_d при изменении тока в электромагнитах I_c . С увеличением разрядного тока напряженность электрического поля увеличивается независимо от того, включено магнитное поле или нет. Нижняя кривая 1 соответствует случаю, когда $I_c = 0$, т.е. магнитное поле отсутствует. Включение магнитного поля приводит к резкому

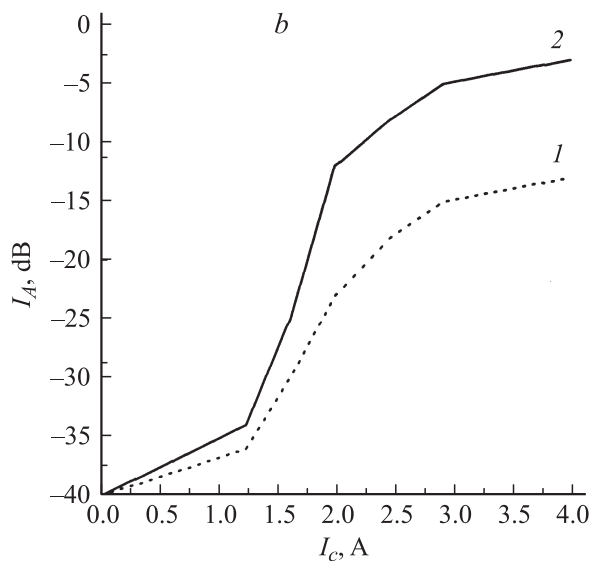


Рис. 2 (продолжение).

изменению хода кривой $E_H(I_c)$: E_H начинает возрастать значительно быстрее с увеличением тока разряда I_d . Наиболее резко E_H возрастает при изменении I_c от 0.5 до 2 А. Когда $I_d \geq 350$ мА и $I_c \geq 2$ А, E_H перестает изменяться. Наибольшее значение E_H составляет 40 дБ при включенном магнитном поле, т. е. оболочка в виде анизотропной плазмы увеличивает напряженность поля вибратора, короткого по сравнению с длиной волны, примерно в 100 раз на частоте 200 кГц.

Следует отметить, что при включении магнитного поля формы и размеры газового разряда изменяются: плазма слегка сжимается в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, причем наибольшему сжатию подвергаются участки плазмы, прилегающие к аноду и катоду, а наименьшему — вблизи вибратора. Плазма имеет форму, повторяющую структуру магнитного поля, создаваемого электромагнитами. При этом несколько увеличивается ток разряда. Однако это увеличение I_d не может объяснить увеличение E_H , наблюдающееся при включении магнитного поля, поскольку при $I_c = 0$ такое же изменение тока разряда приводит к незначительному возрастанию E_H .

Увеличение поля антенны с возрастанием магнитного поля можно объяснить тем, что при этом плазменная оболочка приобретает свойства согласующего сопротивления. Для подтверждения этого были проведены измерения тока в антенне от уровня магнитного поля. На рис. 2, *b* показана зависимость тока в вибраторе I_A от тока в электромагнитах I_c при токе разряда $I_d = 100$ и 350 мА. Видно, что при увеличении магнитного поля существенно возрастает ток, потребляемый вибратором.

Для оценки концентрации частиц в плазме измерялась электронная плазменная частота. Измерения проводились методом поглощения. Высокочастотный гармонический сигнал подавался на одно из плеч вибратора, а сигнал, прошедший через плазму, снимался с другого плеча вибратора. При этом постепенно увеличивался ток разряда до тех пор, пока не фиксировался минимум сигнала. В пределах изменения разрядного тока I_d от $130 \div 460$ мА зависимость электронной плазменной частоты $f_{pe}(I_d)$ была линейной в диапазоне частот $195 \div 600$ МГц. Этому соответствует концентрация заряженных частиц $n = 5 \cdot 10^{14} \div 4.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Вибратор не был гальванически изолирован от плазмы, в результате чего его геометрическая длина возрастала бы при зажигании плазмы приблизительно в 3–4 раза при условии высокой проводимости разряда. Известно, что напряженность электрического поля короткой антенны (любого типа) пропорциональна произведению тока в антенне на длину [2], поэтому даже четырехкратное увеличение длины антенны не позволяет объяснить наблюдаемое возрастание поля. Отсюда можно сделать вывод, что продольный размер вибратора в данном случае практически не имеет значения, он лишь выполняет роль петли связи генератора с плазменной оболочкой. На это прямо указывают результаты по измерению тока антенны (рис. 2, *b*). Увеличение I_A на 37 дБ является главной причиной возрастания напряженности поля на 40 дБ.

Частотная зависимость излучения антенны в плазме определяется степенью анизотропии и изотермичности плазмы. Как показывают оценки, для используемых разрядных токов ионные плазменные частоты лежат в области $f_{pi} = (0.5 \div 1)$ МГц. В токонесущих газоразрядных трубках температура электронов T_e значительно превышает температуру ионов T_i и может достигать нескольких эВ [3]. В этих условиях в изотропной неизотермической плазме возбуждаются ионные

плазменные волны [4]. Частота этих волн превышает f_{pi} на величину, зависящую от тепловой скорости ионов и волнового вектора, а также от частот столкновений частиц. С увеличением частоты фазовая скорость волны приближается к тепловой скорости ионов. При этом возрастает бесстолкновительное затухание волны. Это может быть качественным объяснением уменьшения поля на частотах, превышающих 4 MHz (рис. 1, *b*). В условиях ограниченной плазмы плазменные волны порождают электрические токи [5] и соответственно электрическое поле вне плазмы. Физический механизм согласования генератора с коротким вибратором можно объяснить энергетическим балансом потерь энергии в генераторе и плазме, при этом в изотропной плазме энергия расходуется на возбуждение ионных мод, столкновения и излучение.

Анизотропная плазма, окружающая вибратор, является как бы дополнительной емкостной нагрузкой, величина которой сильно зависит от показателя преломления N . Известно, что N наиболее велик на низких частотах вблизи нижнегибридной частоты Ω_{lh} [4]. В этой области энергия колебаний ограничивается электронными и ионными столкновениями. При используемых режимах ртутная плазма характеризуется $\Omega_{lh} = (100 \div 500)$ kHz. Настоящие эксперименты подтверждают наличие нижнегибридного резонанса на частоте 200 kHz. Об этом говорит скачок эффективности излучения при изменении тока в электромагнитах от 0 к 2 А (рис. 2, *a*). Резонансные свойства ограниченной анизотропной плазменной оболочки могут также проявиться при довольно значительных величинах эффективной диэлектрической проницаемости, когда укорочение длины волны в плазме станет столь велико, что плазменная оболочка приобретет свойства просветляющего слоя. Условием геометрического резонанса является существенное укорочение волны, при котором $N \geq 10^3$. В случае поперечного распространения волн в частотном окне прозрачности (между ионной циклотронной и нижнегибридной частотами) объемные резонансы могут, в принципе, иметь место, однако корректные расчеты можно будет сделать после построения теории низкочастотной антенны в плазменном открытом резонаторе. Для частот ~ 1 GHz уже имеются достаточно мощные аналитические методы анализа пучковых антенн в резонаторах [6], однако передающие высокочастотные антенны и так достаточно эффективны.

Проведенные эксперименты показывают, что согласующие свойства ограниченной плазменной оболочки сохраняются в режиме непрерывного разряда на постоянном токе как при наличии магнитного поля, так

и без него и при использовании газа со значительно большей атомной массой (Hg вместо Ag). В частности, имеет место существенное усиление поля антенны в области ионно-плазменной частоты изотропной неизотермической плазмы, что позволяет существенно упростить конструкцию антенны в этом диапазоне частот. По-видимому перспективность подобных антенн будет определяться потерями, вносимыми плазменной оболочкой, что требует дополнительных исследований.

Автор выражает благодарность Кафедре электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского электротехнического университета за помощь в изготовлении антенны.

Список литературы

- [1] *Костров В.А., Пахотин В.А., Смирнов А.И., Стародубцев М.В., Шайкин А.А.* // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 460.
- [2] *Щелкунов С., Фриис Г.* Антенны. Теория и практика. М.: Сов. радио, 1955. 603 с.
- [3] *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [4] *Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А.* Волны в магнитоактивной плазме. М.: Наука, 1975. 208 с.
- [5] *Чен Ф.* Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987. 398 с.
- [6] *Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С.* Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 544 с.