

УДК 533.95

АКТИВНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ВЧ-АНТЕННА, САМОСОГЛАСОВАННАЯ С ИСТОЧНИКОМ КОЛЕБАНИЙ

И. М. Минаев, А. А. Рухадзе, К. Ф. Сергейчев, А. Ю. Трефилов

Проведено экспериментальное исследование плазмы ВЧ-разряда в радиопрозрачной трубке с разреженным газом в качестве активной антенны, когда разрядная трубка занимает место металлического штыря в асимметричной вибраторной антенне. Показано, что эффективность преобразования такой плазменной антенны в радиоизлучение может быть близка к эффективности металлического вибратора. В отличие от активной проводимости металла проводимость плазмы с редкими столкновениями носит реактивный характер, что, однако, не мешает плазменной антенне работать подобно металлическому вибратору, если выполняется двойное неравенство $\omega_p \gg \omega \gg \nu$, когда плазменная частота больше частоты поля, а частота поля больше частоты столкновений электронов в газе. Показано соответствие характеристик электромагнитного поля плазменной антенны при высокой концентрации электронов плазмы характеристикам поля традиционной антенны, изготовленной из металла.

В [1 – 2] были рассмотрены условия работы проводниковых дипольных радиочастотных антенн в ионизированной среде. При передаче через антенну сигналов большой мощности, выше порога пробоя окружающей ее атмосферы, вокруг антенны образуется плазма, изменяющая ее свойства. В [1] было показано, что зажигание ВЧ-разряда вокруг короткого вибратора, помещенного в кварцевый баллон с разреженным воздухом, сопровождается увеличением эффективности излучения антенны и расширением

ее частотного диапазона в сторону более низких частот. Это, с одной стороны, связано с эффектом участия плазмы в согласовании антенны с подводющим трактом, а с другой, – с увеличением рабочей длины антенны за счет плазмы, заполняющей баллон. В [2] рассмотрена линейная теория работы тонких антенн (дипольного вибратора и кольцевой рамочной антенны), окруженных изотропной плазменной оболочкой с заданными параметрами. В этой работе показано, что вблизи резонанса между плазменной частотой и частотой излучаемой волны плазменная оболочка, окружающая проводник антенны, способна сильно влиять на входной импеданс антенны, на распределение тока в системе проводник-плазменная оболочка, наконец, – на диаграмму направленности антенны.

В цитированных работах рабочим телом антенн принципиально являются металлические проводники, тогда как плазма является лишь средством улучшения антенных характеристик. В действительности плазма сама, являясь проводником, способна выполнять функции антенны.

В [3] была реализована дипольная плазменная антенна, когда с помощью мощного ВЧ-источника создавалась плазма, поддерживаемая в длинной трубке поверхностной волной, а другая, более низкая радиочастота, излучалась через сформированный таким образом диполь. Такая двухчастотная схема представляется усложнением задачи, учитывая необходимость согласования связи плазменного столба с двумя генераторами. Авторы [3] стремились качественно воспроизвести в плазме “металлическую” проводимость, когда эффективная частота столкновений электронов в разряде была много больше плазменной частоты и частоты самого поля: $\nu \gg \omega_p, \omega$. По моему мнению это непродуктивно, так как получение плазмы при высоких давлениях газа связано с большими потерями энергии и низким КПД антенны.

Нами экспериментально была исследована плазма одноэлектродного факельного ВЧ-разряда в пространстве, ограниченном трубкой. Цель работы заключалась в том, чтобы показать возможность использования плазмы с низкой частотой столкновений электронов в качестве эффективной излучающей дипольной антенны от одного ВЧ-источника, используемого одновременно и как генератор плазмы, и как радиопередатчик. Важно было при этом оценить КПД излучения плазменной ВЧ-антенны, найти оптимальное давление газа и концентрацию плазмы, а также определить роль поверхностной волны в работе ВЧ-антенны.

Экспериментальная ВЧ-установка. На рис. 1 представлена схема установки. Колебания частотой 460 МГц (длина волны $\lambda = 65.2$ см) и регулируемой мощностью до 100 Вт от ВЧ-генератора (1) поступают по кабелю (2) в коаксиальный волновод-фидер

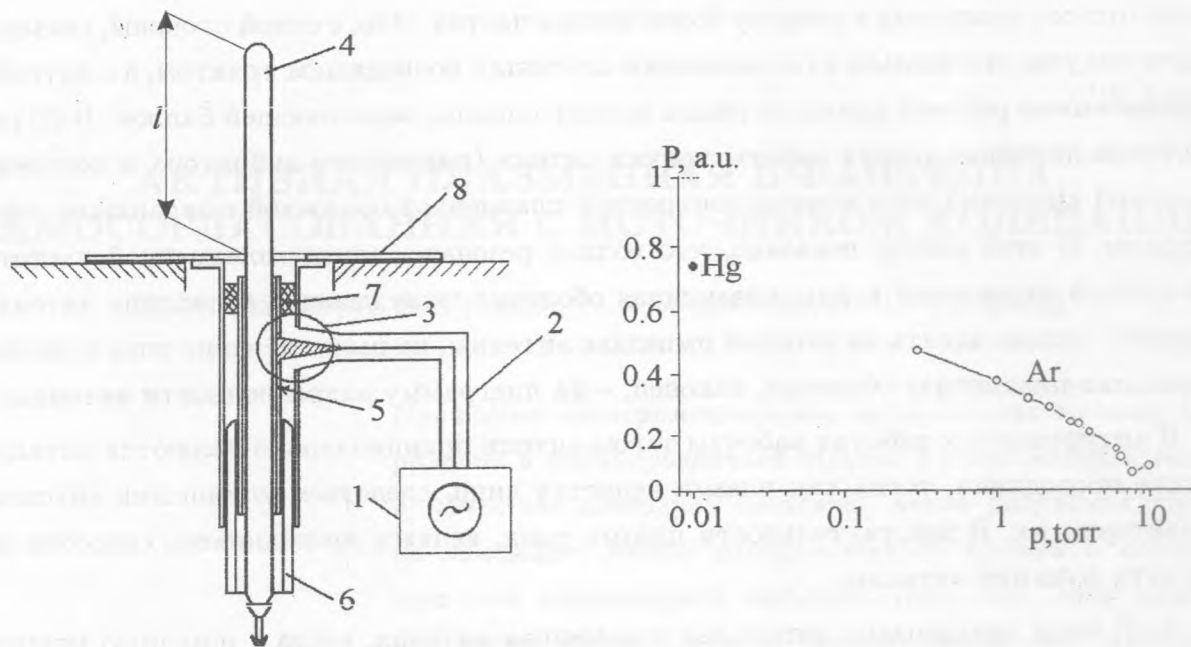


Рис. 1. Асимметричный плазменный вибратор. Схема установки. 1 – ВЧ-генератор, 2 – коаксиальный кабель, 3 – коаксиальный тройник, 4 – газоразрядная трубка, 5 – коаксиальный фидер, 6 – согласующий поршень, 7 – центрирующая шайба из фторопласта, 8 – диск в качестве экрана. Длина антенны l есть длина выступающей над диском 8 части трубки 4.

Рис. 2. Эффективность излучения плазменных вибраторов (o – аргон; • – пары ртути) в зависимости от давления газа. Мощность излучения плазменных вибраторов нормирована по уровню излучения металлического вибратора. ВЧ-мощность $P = 40$ Вт, длина вибратора $L = 16$ см.

(5) через тройник (3), один торец волновода открыт, а другой заглушен подвижным поршнем (6), который обеспечивает согласование системы генератор-антенна. Разряд зажигается в кварцевой трубке (4) с внутренним диаметром 1.9 см полной длиной 40 см. Тефлоновая шайба (7) удерживает свободный конец трубки внутреннего проводника коаксиального волновода (5). Такая конструкция фидера, питающего антенну, с внутренним проводником в виде полый трубки позволяет изменять рабочую длину плазменного вибратора путем погружения кварцевой разрядной трубки внутрь полый трубки на необходимую глубину. Открытый торец коаксиального фидера заканчивается алюминиевым диском (8), который является отражателем несимметричного вибратора. Длина той части трубки (4), которая выступает над диском (8), есть длина антенны l .

Разрядная трубка откачивается форвакуумным насосом до давления $5 \cdot 10^{-3}$ торр, после чего в нее через редуктор впускается рабочий газ, в качестве которого взят аргон. Необходимое давление в системе $5 \cdot 10^{-2} - 5$ торр регулируется через баланс натекания и откачки. Минимальная мощность, необходимая для зажигания разряда в аргоне в рабочем диапазоне давлений, равна 20 Вт по измерениям на выходе генератора. В качестве разрядной трубки нами также использовалась отпаянная трубка с парами ртути. В трубках устанавливалось давление насыщенного пара ртути для температуры стенок трубки несколько выше комнатной, оно составляло $p \sim 10^{-2}$ торр.

Азимутальная составляющая H_φ магнитного поля волны, излучаемой ВЧ плазменной антенной в свободное пространство, регистрировалась в дальней зоне антенны на расстоянии $R \approx 3.5$ м датчиком, представляющим собой индуктивную антенну из 2-х витков диаметром 75 мм, нагруженную на квадратичный детектор. Распределение радиальной и продольной электрических компонент поля антенны E_r , E_z по радиусу и ее длине измерялось емкостным зондом, представляющим собой очищенный от изоляции и экрана (длиной 6 мм) конец центрального проводника коаксиального кабеля, нагруженного на детектор. Отсчет координаты велся с точностью ± 0.05 см.

Антенна перемещалась координатным устройством параллельно или перпендикулярно антенне в экваториальной плоскости.

При измерениях были приняты меры по борьбе с отраженным сигналом, влиянием генератора на измерительную линию и детектор.

Эксперимент. При давлении $p \sim 0.1$ торр и частоте ВЧ-поля 460 МГц одноэлектродный факельный разряд в трубке ведет себя как диффузный [4]. Плазма занимает все пространство разрядной трубки и имеет свойства положительного столба.

Были проведены относительные измерения амплитуды магнитного поля H_φ^2 вблизи экваториальной плоскости на расстоянии 3.5 м в зависимости от давления аргона p и определена область давлений для эффективной работы антенны при подводимой к разряду ВЧ-мощности 40 Вт и при длине антенны $l \approx 16$ см. Эта зависимость от давления в логарифмическом масштабе представлена на рис. 2. Там же нанесена точка для пара ртути при комнатной температуре. Если принять эффективность преобразования ВЧ-колебаний в излучение металлической антенной за единицу, то наибольший сигнал детектора получен в парах ртути при давлении $p \approx 0.01$ торр, соответствующая этому случаю эффективность антенны составила 0.75. С ростом давления аргона эффективность антенны постепенно снижалась. При давлении аргона $p \approx 0.3$ торр эффективность плазменной антенны составила 0.5, а при $p \approx 8$ торр – уже только

0.2. В действительности, ниже будет показано, что при определенных условиях можно достигнуть более высокой эффективности антенны.

Последующие измерения проводились при давлении аргона 0.15 торр и в парах ртути при давлении $p \approx 0.01 \text{ торр}$ и мощности источника ВЧ-колебаний $P = 40 \text{ Вт}$. Сравнивалась эффективность излучения плазменной антенны в сравнении с металлической при изменении их длины.

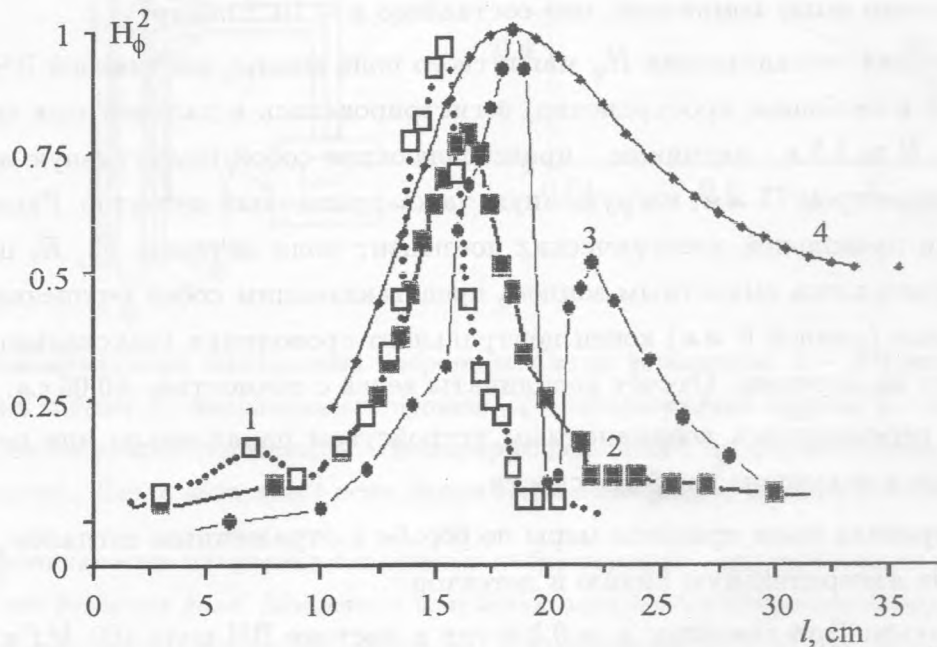


Рис. 3. Изменение относительной мощности излучения вибраторов в зависимости от их длины. ВЧ-мощность. 1 – аргон, давление $p = 0.15 \text{ торр}$; 2 – пары ртути, давление $p = 0.01 \text{ торр}$; 3 – металлический вибратор; 4 – расчет для металлического вибратора.

С увеличением длины металлической антенны измеренное магнитной антенной значение H_ϕ^2 поля, излучаемого антенной, сначала растет, проходит через максимум, затем резко падает, снова растет и проходит через второй максимум (рис. 3). Двугорбая зависимость $H_\phi^2(l)$ объясняется изменением импеданса системы фидер-вибратор при изменении длины вибратора. Первый максимум излучения несимметричного металлического вибратора приходится на $l \approx 18.5 \text{ см}$ (резонанс), что несколько отличается от четверти длины волны в вакууме, $\lambda/4 = 16.3 \text{ см}$. Провал в излучении вибратора (антирезонанс) приходится на $l \approx 20 \text{ см}$. Для ртутной или аргоновой плазмы эффективная длина ближе к $\lambda/4$, так $l_{Hg} \approx 16.5 \text{ см}$, $l_{Ar} \approx 15.5 \text{ см}$. Вторым горбом в распределении плазменной ан-

тенны отсутствует, что указывает на различие в характере согласования плазменной и металлической антенн с генератором через фидер.

По данным рис. 3 можно оценить эффективность излучения четвертьволнового несимметричного плазменного вибратора относительно металлического вибратора при оптимальных размерах. В случае ртутной плазмы эффективность излучения достигает 78.5%, а в случае аргоновой плазмы – 96%. Эффективности плазменных антенн и металлического эталона оказались близкими. Для сравнения приведена расчетная зависимость интенсивности излучения металлического диполя при изменении его длины (кривая 4). В расчете не учитывалось влияние согласования антенны с генератором. Спад расчетной зависимости при переходе длины вибратора за $l = \lambda/4$ связан с перестройкой диаграммы направленности излучения [5].

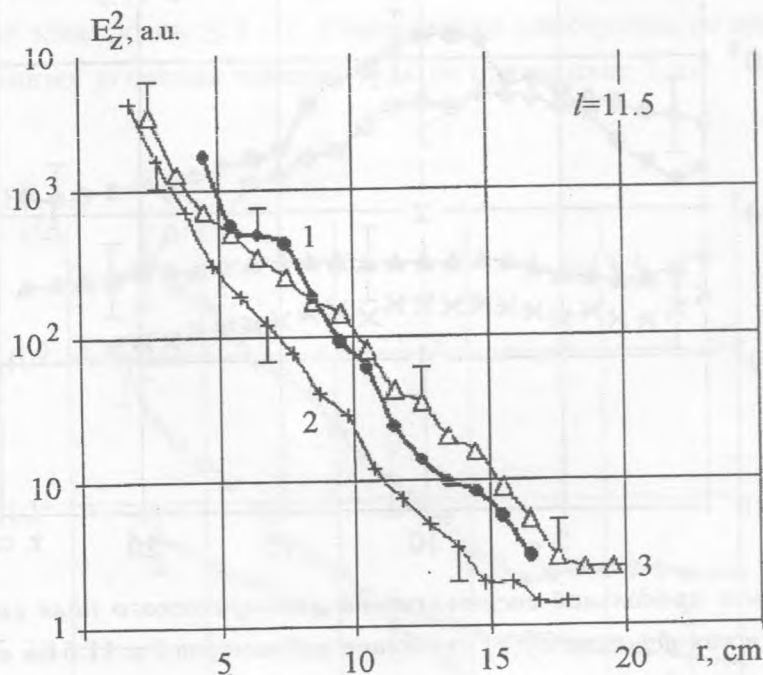


Рис. 4. Распределение продольной составляющей электрического поля вибраторов по радиусу как функция $E_z^2(r)$ при длине вибраторов $l = 11.5$ см для продольной координаты $z = 11.5$ см. 3 – металлический вибратор; 2 – аргон, давление $p = 0.13$ торр, $P = 35$ Вт; 1 – аргон, давление $p = 0.15$ торр, $P = 60$ Вт.

При уменьшении мощности генератора было обращено внимание на уменьшение оптимальной длины плазменного вибратора, что было отнесено на счет сокращения длины поверхностной волны на плазменной антенне с уменьшением концентрации плазмы.

Уменьшение концентрации электронов плазмы в разряде было заметно по уменьшению интенсивности его свечения. При ВЧ-мощности $P = 35 \text{ Вт}$ для антенны с оптимальной длиной $l_{Ar} = 11.5 \text{ см}$ были проведены измерения распределения электрической компоненты поля по радиусу $E_z^2(r)$ снаружи плазменного диполя, выполненные емкостной антенной в поперечной плоскости, проходящей через конец диполя, рис. 4 (кривая 2). Для сравнения приведены распределения $E_z^2(r)$ для той же длины антенн: плазменной антенны (аргон) при мощности 60 Вт (кривая 1) и металлической – при мощности 20 Вт (кривая 3). Характер всех трех распределений оказался подобным и отличался лишь коэффициентом пропорциональности ВЧ-мощности, подводимой к разряду.

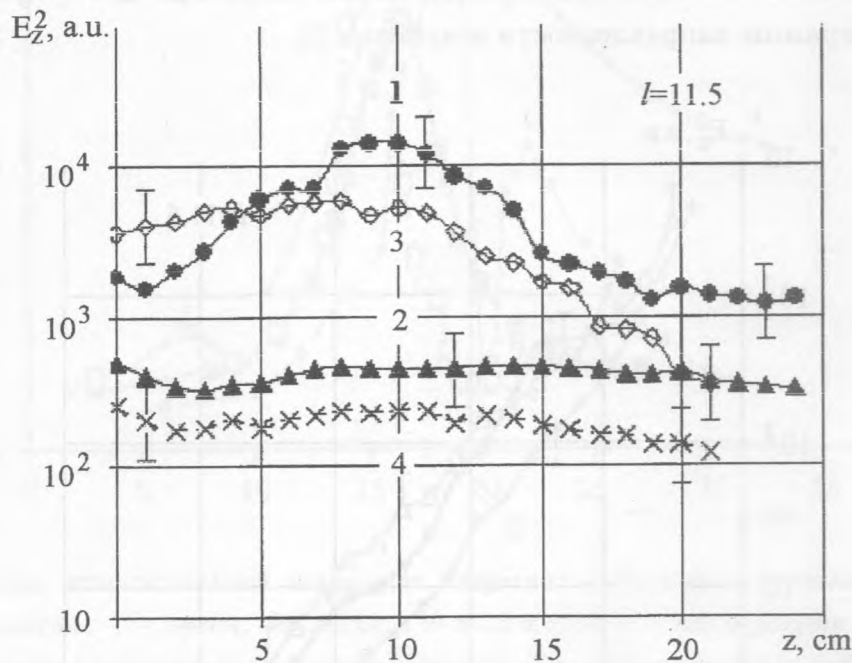


Рис. 5. Распределение продольной составляющей электрического поля вибраторов в продольном направлении как функция $E_z^2(z)$ при длине вибраторов $l = 11.5 \text{ см}$ для двух значений радиальной координаты. 3 – металлический вибратор, $r = 2 \text{ см}$, 4 – тот же вибратор, $r = 10 \text{ см}$; 1 – плазменный вибратор (аргон), $r = 2 \text{ см}$, 2 – тот же вибратор, $r = 10 \text{ см}$.

Измерения распределения продольной электрической компоненты поля по оси диполя $E_z^2(z)$ для разряда в аргоне на разных расстояниях от его оси представлены на рис. 5. Длина плазменного диполя выбрана по-прежнему равной 11.5 см . При ВЧ-мощности, вводимой в разряд, 15 Вт , выбранная длина антенны является оптимальной по преобразованию в радиоизлучение. Видно, что распределение напряженности поля вблизи

антенны испытывает подъем вблизи конца диполя и затем экспоненциально затухает (кривая 1). В пограничной зоне $r = r_{zp} = \lambda/2\pi \approx 10$ см, за которой следует дальняя зона антенны, квадратичное значение поля E_z^2 у экрана возрастает в отличие от поведения поля в ближней (кривая 2). Аналогичные измерения выполнены для металлического диполя той же длины (соответственно кривые 3, 4). Обращает на себя внимание то, что у металлического диполя распределение $E_z^2(z)$ при $r \approx 10$ см испытывает менее резкий спад.

Обсуждение результатов. Эффективность преобразования в излучение плазменной антенны, формируемой в парах ртути при давлении $p \approx 0.01$ торр или в аргоне при давлении $p = 0.15$ торр, оказывается одного порядка (см. рис. 2, 3), что связано с большим на порядок сечением упругих столкновений и трехкратно большим сечением ионизирующих столкновений электронов с атомами ртути по сравнению с аргонем при температуре электронов ≤ 1 эВ. Температура электронов не измерялась, однако в разрядах при данных условиях температура не превышает 1 эВ.

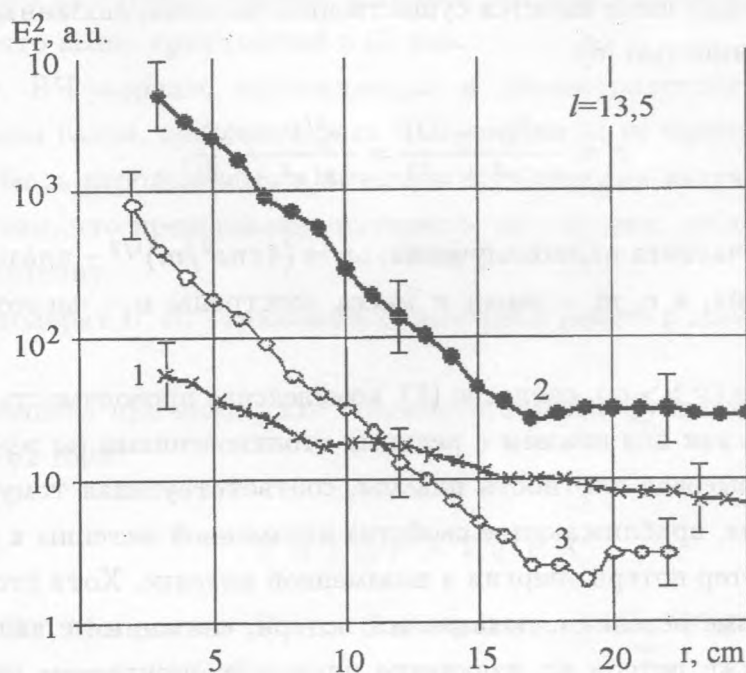


Рис. 6. Распределение радиальной составляющей электрического поля вибраторов по радиусу как функция $E_r^2(r)$ при длине вибраторов $l = 13.5$ см для продольной координаты $z = 13.5$ см. 1 – металлический вибратор, $P = 40$ Вт; 2 – плазменный вибратор (аргон) $p = 0.15$ торр, $P = 17$ Вт; 3 – плазменный вибратор (аргон) $p = 0.13$ торр, $P = 90$ Вт.

Эффективность плазменных антенн приближается к эффективности металлической антенны, однако оптимальные длины этих антенн, определенные по максимуму сигнала приемной антенны в экваториальной области несколько отличаются: для металла эта длина на 10% превышает четверть длины волны $\lambda/4$, а для плазменных антенн она оказывается на 5–7% короче.

Пространственное распределение составляющих электрического поля вблизи антенны качественно соответствует полю металлического диполя.

Как было показано, эффективность преобразования ВЧ-колебаний в радиоизлучение плазменной антенной в пределах ошибок измерений близка к эффективности преобразования металлической антенны, особенно при высоких концентрациях электронов плазмы.

Отсутствие антирезонанса и второго максимума излучения при изменении длины плазменной антенны свидетельствует о различиях в характере согласования антенн и генератора.

Важно отметить, что, несмотря на неявные отличия в работе плазменной и металлической антенн, между ними имеется существенная разница, связанная с комплексной электронной проводимостью [6]:

$$\sigma = \frac{n e^2 (\nu - i\omega)}{m(\nu^2 + \omega^2)} = \frac{\omega_p^2 (\nu - i\omega)}{4\pi(\nu^2 + \omega^2)}. \quad (1)$$

Здесь: ω – круговая частота радиоизлучения; $\omega_p = (4\pi n e^2 / m)^{1/2}$ – плазменная частота, где n – концентрация, а e , m – заряд и масса электрона; ν – частота электронных столкновений.

В случае металла ($\nu \gg \omega$), согласно (1), комплексная проводимость – действительная величина, тогда как для плазмы с редкими столкновениями ($\omega \gg \nu$) – она чисто мнимая. При этом высокая плотность плазмы, соответствующая тому, что $\omega_p \gg \omega$, обеспечивает условия, приближающие свойства плазменной антенны к металлической. Меняется сам характер потерь энергии в плазменной антенне. Хотя столкновительные потери в такой плазме невелики, появляются потери, связанные с явлениями переноса на стенку, а также потери на излучение плазмы в оптическом диапазоне. Опыт показывает, что, к счастью, эти потери не столь велики.

Общим между распространением волн по границам металлических проводников и плазмы является то, что эти волны носят характер медленных, поверхностных волн: они известны как волны Зоммерфельда на проводниках [7] и поверхностные волны

Трайвелписа на плазме [8]. В силу малой глубины проникновения поля волн в металл, замедление по сравнению со скоростью света на проводниках практически не заметно – оно проявляется лишь в пятом знаке. Тем не менее, это приводит к заметной концентрации потока энергии волн вблизи проводника. Глубина скина плазменных поверхностных волн при концентрациях электронов, достижимых в лаборатории, оказывается соизмеримой с поперечными размерами плазмы, поэтому эффект замедления и соответствующего укорочения волн более заметен. Замедление волн может оказывать определенное влияние на работу плазменных антенн, однако увеличение концентрации плазмы, когда $\omega_p^2 \gg \omega^2$, асимптотически приближает скорость поверхностных волн к скорости света и делает плазменную антенну подобной металлической. При малой ВЧ-мощности плотность плазмы понижается и может достигнуть предельного уровня $n = 2n_c$, где $n_c = m\omega^2/4\pi e^2 = 2.6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ – критическая концентрация, ниже которой поверхностная волна перестает возбуждаться. Если принять, что оптимальная длина плазменной антенны близка к четверти длины медленной поверхностной волны $l_{Ar} = \lambda_s/4$, то из дисперсионной зависимости для поверхностной волны [6], можем найти концентрацию электронов плазмы антенны, которая в данном примере составляет $1.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что выше критической в 60 раз.

Заключение. ВЧ-разряды, возбуждаемые в диэлектрических трубках, наполненных разреженным газом, при умеренных ВЧ-мощностях не более нескольких десятков *Ватт*, могут быть использованы в качестве эффективных излучателей активных вибраторных антенн, что представляет интерес в тех случаях, когда необходимо быстро “выключать” антенну.

Авторы благодарят В. П. Тараканова за интерес к работе и помощь в интерпретации результатов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 03-02-16993.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ким А. В., Марков Г. А., Смирнов А. И., Умнов А. Л. Письма в ЖТФ, **15**, вып. 5, 34 (1989).
- [2] Панфилов А. И. Физика плазмы, **17**, вып. 1, 36 (1991).
- [3] Vog G. G., Harris J. H., Martin N. M., et al. Physics of Plasmas, **7**, 2198 (2000).
- [4] Кацов Н. А. Электроника. М., ГИТТЛ, 1956.

- [5] А х и е з е р А. И., А х и е з е р И. А. Электromагнетизм и электромагнитные волны. М., Высшая школа, 1985.
- [6] А л е к с а н д р о в А. Ф., Б о г д а н к е в и ч Л. С., Р у х а д з е А. А. Основы электродинамики плазмы. М., Высшая школа, 1978.
- [7] С е м е н о в Н. А. Техническая электродинамика. М., Связь, 1973.
- [8] К р о л л Н., Т р а й в е л п и с А. Основы физики плазмы. М., Мир, 1975.

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 6 октября 2005 г.