

0.4; 09

© 1993

ТОНКАЯ АНТЕННА С ПЛАЗМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Г.А. Марков, А.Л. Умнов, М.В. Лиходеев

В связи с проблемой повышения эффективности электрических вибраторов определенным интерес представляют возможности оперативного управления их входными и излучательными характеристиками с помощью плазменных образований, формируемых полем антенны [1-6]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния стационарной плазменной нагрузки, формируемой полем рабочего сигнала на конце тонкой антенны ($\alpha \ll l_0 \sim \lambda$; α , l_0 - радиус и длина вибратора, λ - длина волны в вакууме), на величину и распределение излучательного тока.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Исследовалась антенна, представлявшая собой несимметричный металлический вибратор ($l_0 = 180$ см), расположенный над металлическим щитом, конец вибратора ($l_1 = 40$ см) помещался в разрядный баллон ($L_G = 1.5$ м, $d = 20$ см), нужное давление в котором ($p = 1 \cdot 10^{-2}$ Тор) устанавливалось при помощи непрерывной откачки воздуха. Излучатель имел индуктивную связь с ВЧ генератором, сигнал которого создавал и поддерживал плазму вокруг конца антенны. О влиянии плазменной нагрузки на характеристики тонкой антенны можно было судить по распределению тока вдоль антенны. Токораспределение снималось с помощью датчика магнитного поля, представляющего собой одновитковую проволочную рамку ($r = 2$ мм). При измерениях датчик перемещался вдоль открытой части антенного провода на фиксированном расстоянии от его оси. Сигнал с датчика регистрировался на осциллографе. Параметры плазмы измерялись с помощью лентмюровского зонда. Влияние концевой нагрузки на антенный ток изучалось при неизменном выходном напряжении ВЧ генератора на трех фиксированных частотах (50, 180, 230 МГц) при различных давлениях в разрядном баллоне. При давлении $p \geq 5 \cdot 10^{-1}$ Тор плазменная неоднородность представляла собой яркосветящуюся пленку, окружавшую конец антенны. После снижения давления до $2 \cdot 10^{-1}$ Тор на конце антенны формировался плазменный шар, а при наличии на антенне второй пучности поля и $p \sim 5 \cdot 10^{-2}$ Тор в районе этой пучности появилось еще одно плазменное образование. При дальнейшей откачке воздуха ($p \sim 10^{-2}$ Тор) плазменные образования сливались в одно, и плазма заполняла весь разрядный баллон.

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений распределений тока вдоль антенны. На частоте 50 МГц (рис. 1) после зажигания разряда происходило увеличение значения амплитуды тока в

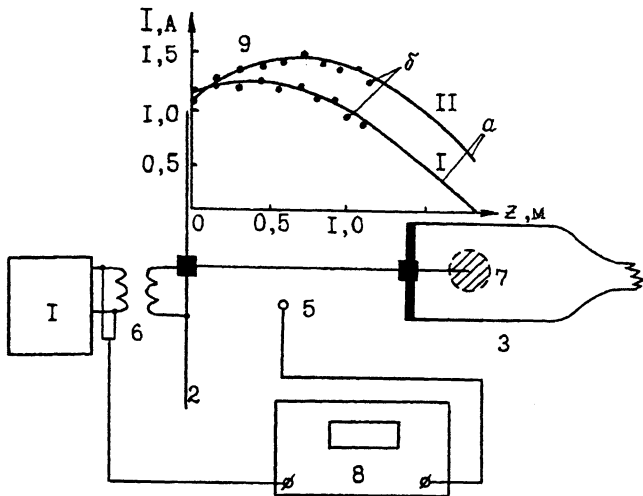


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - ВЧ генератор, 2 - металлический лист, 3 - разрядный баллон, 4 - антенна, 5 - датчик тока, 6 - емкостной делитель, 7 - плазменная неоднородность, 8 - осциллограф, 9 - распределение тока вдоль антенны при $f = 50$ МГц (I - без плазмы, II - с плазменной нагрузкой при давлении 0.3 Тор; а - теория, б - эксперимент).

пучности, обусловленное подстройкой резонансной частоты антенны под частоту возбуждающего сигнала. При этом координата пучности антенного тока смещалась к свободному концу антенны, что свидетельствовало о емкостном характере образовавшейся плазменной нагрузки. Для коротких вибраторов ($l_0 < \frac{\lambda}{2}$) изменение плазменной нагрузкой граничных условий на конце вибратора ведет к увеличению его действующей длины (рис. 1), что также, как и возрастание антенного тока, увеличивает излучаемую мощность. Как оказалось, для антенн, размеры которых сравнимы с длиной волны (что имело место, например, на частоте 230 МГц (рис. 2)), образование плазменной нагрузки могло обеспечивать работу антенны и в режиме, близком к режиму стоячей волны (кривая II), и в режиме бегущей волны (кривая III). При этом концевая плазменная нагрузка улучшала согласование антенны с источником сигнала, что могло вести к возрастанию амплитуды тока в пучности (кривая II) или к увеличению амплитуды волны тока, распространяющейся к концу антенны (кривая III). Направление смещения пучности тока в рассматриваемом случае указывает на индуктивный характер мнимой части импеданса нагрузки. Изменение КБВ антенного тока связано с наличием у импеданса нагрузки реальной части, обусловленной потерями в плазме. Эффекты автосогласования, наблюдавшиеся на частоте 180 МГц, были аналогичны описанному выше.

Анализ работы тонкой антенны с плазменной нагрузкой на конце (при условии $a \ll l_0$, $a \ll \lambda$; $l_n, b_n \ll \lambda$, где l_n, b_n - ха-

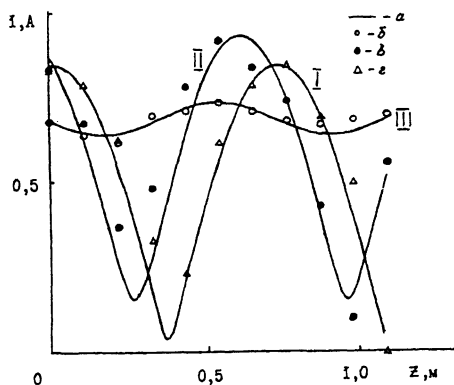


Рис. 2. Токораспределение в антенне на частоте 230 МГц: без нагрузки при атмосферном давлении (I); с плазменной нагрузкой при $p=0.2$ Тор (II) и $p=0.7$ Тор (III). а – теория, б, в, г – эксперимент.

характерные продольный и поперечный размеры плазменной неоднородности) можно провести, опираясь на модель нагруженной длинной линии, в рамках метода эквивалентных схем [4]. При этом параметры схемы замещения следующие: l – длина отрезка линии, равная длине плеча вибратора, $Z_B = 60 \left(\ln \left(\frac{\lambda}{\pi a} \right) - 0.58 \right)$ – ее волновое сопротивление, $h = \beta - \alpha$ – постоянная распространения, где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\alpha = \frac{R_1}{Z_B}$, R_1 – погонное сопротивление провода линии, рассчитанное из условия равенства потерь на излучение омическим потерям в линии. Токораспределение в эквивалентной длинной линии с комплексной нагрузкой Z_H на конце описывается формулой:

$$|I| = |I_0| \left| 1 - \frac{\frac{Z_H}{Z_B} - 1}{\frac{Z_H}{Z_B} + 1} \exp(2ih(l-z)) \right|. \quad (1)$$

Для оценки импеданса плазменной нагрузки ($b_{\text{пл}} < l_{\text{пл}} \ll \lambda$, $n_e - n_0$ – средняя концентрация плазмы) воспользуемся формулой: $Z_H = \frac{1}{I_a \alpha} \int_0^{l_{\text{пл}}} E(r) dr$,

где I_a – амплитуда тока в проводе, окруженном плазмой, a – радиус провода, r – расстояние от оси, $E(r)$ – радиальная компонента электрического поля. При этом $\varepsilon \varepsilon_0 E = \frac{I_a}{2\pi i \omega l_{\text{пл}} r}$, где

$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_m)}$. Отсюда имеем:

$$Z_H = - \frac{i}{2\pi\varepsilon_0\omega l_H} \left(\frac{\ln\left(\frac{b_H}{a}\right)}{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_m)}} + \ln\left(\frac{l_H}{b_H}\right) \right), \quad (2)$$

где ω_p - плазменная частота, ν_m - частота столкновений электронов с молекулами. На рис. 2 представлены распределения тока в антенне, рассчитанные по формуле (1); при этом средняя концентрация плазмы бралась близкой к измеренной локально, но так, чтобы обеспечить наилучшее совпадение рассчитанной формы тока с полученной экспериментально. Например, при $f = 230$ МГц, $l_H = 10$ см, $b_H = 5$ см, $p = 0.4$ Тор, $a = 0.1$ см, $n_e = 2 \cdot 10^9$ см⁻³ оценка по формуле (2) дает $Im(Z_H) \ll Re(Z_H) \approx 400$ Ом $\approx Z_B$, при этом устанавливается режим, близкий к режиму бегущей волны, что наблюдалось и экспериментально (рис. 2, кривая Ш).

Таким образом, в антенне с плазменной нагрузкой на конце выбором условий разряда может быть осуществлено управление распределением излучающего тока, а следовательно, ее входным импедансом и излучательной мощностью.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К и м А.В., М а р к о в Г.А., С м и р н о в А.И., У м н о в А.Л. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. С. 34-35.
- [2] A l t s h u l e r S. US Patent. N 4. 1986. 633. 263.
- [3] М а р к о в Г.А., У м н о в А.Л., Л и х о д е е в М.В. Сб. докл. Междунар. науч. техн. конф. „Актуальные проблемы фундаментальных наук“ СССР. Москва, 1991. С. 46-49.
- [4] М а р к о в Г.Т., С а з о н о в Д.М. // Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 С.
- [5] М а р к о в Г.А., У м н о в А.Л., Л и х о д е е в М.В. Науч. конф. по радиофизике. Нижний Новгород, 1992. Матер. конф. С. 15-16.
- [6] M e s s i a e n A.M., V a n d e n p l a s P.E. // Electron. Letters. 1967. V. 3. N 1. P. 26-27.
- [7] M e s s i a e n A.M., V a n d e n p l a s P.E. // Electron. Letters. 1968. V. 4. N 2. P. 29-31.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию
30 ноября 1993 г.