

Литература

1. Виноградов М.П., Гусев А.В., Милюков В.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 5. С. 37 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No.5).
2. Милюков В.К., Кравчук В.К. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 2. С. 73 (Moscow University Phys. Bull. 1996. No.2. P. 60).
3. Бичаев И., Руденко В.Н. Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения. М., 1989.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
5. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. М., 1972.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 3. М., 1976.
7. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. М., 1973.

Поступила в редакцию
11.04.97

УДК 537.52

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУРФАТРОНА И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Г. С. Солнцев, П. С. Булкин, М. В. Мокеев, Л. И. Цветкова

(кафедра физической электроники)

Физическую модель разряда в сурфатроне можно представить как плазменный столб, вдоль которого от СВЧ-генератора распространяется поверхностная электромагнитная волна. Часть энергии волны W_{pl} расходуется на поддержание плазмы с высокой концентрацией электронов, а остальная W_{vac} излучается в окружающее пространство. Рассматривается соотношение между W_{pl} и W_{vac} при различных условиях. Рассчитывается эффективность сурфатрона в качестве плазмотрона и плазменной антенны.

Сурфатроны — приборы, основу которых составляет электрический разряд, создаваемый СВЧ-полем. В настоящее время они применяются в основном как плазмотроны в качестве источников ионов, в газоразрядных лазерах, в плазмохимических установках, источниках спектров [1–3]. Несмотря на это, многие свойства их недостаточно изучены, например пространственное распределение СВЧ-энергии, влияние тепловых эффектов, нелокальная связь СВЧ-поля с характеристиками плазмы, работа в режиме стоячей волны и др.

Физическую модель разряда в сурфатроне можно представить как плазменный столб, вдоль которого от генератора СВЧ или ВЧ-энергии распространяется поверхностная электромагнитная волна (ПВ) [4, 5]. В большинстве работ рассматривают аксиально-симметричную волну с компонентами E_z , E_r , H_ϕ . Такая модель отражает процессы в сурфатроне наиболее простой конструкции, когда окружающее разряд пространство не ограничено. Наличие наружного металлического цилиндра, коаксиального с плазменным, устанавливаемого для экранирования СВЧ-поля, приводит к более сложной электродинамической модели сурфатрона. Такая модель соответствует металлическому волноводу, частично заполненному плазмой [6]. Расчет влияния радиуса экранирующего цилиндра на дисперсионную кривую в предположении, что волноводные моды поля не возникают, проведен в работе [7]. Для применимости простой модели достаточно, чтобы радиус внешнего экрана превышал в несколько раз радиус плазменного столба.

Часть энергии поверхностной волны расходуется на создание и поддержание плазмы с высокой, превыша-

ющей критическую для данной частоты, концентрацией электронов ($n > n_c$). Это условие обеспечивает распространение ПВ вдоль плазменного столба. Величина энергии W_{pl} , поглощаемой в плазме, определяется балансом числа электронов и их энергии. Она равна энергии, необходимой и достаточной для поддержания стационарного СВЧ-разряда в плазмотроне. Эта энергия ПВ трансформируется в тепловую, световую, химическую энергию.

Остальная часть энергии ПВ W_{vac} «вытесняется» из плазмы в окружающее разряд пространство вследствие скин-эффекта и излучается в радиальном направлении. Она легко может быть обнаружена, если внести в окружающее сурфатрон пространство неоновую лампочку или диэлектрик с высокими диэлектрическими потерями. Если перемещать в радиальном направлении зонд-детектор электромагнитного поля, то можно установить закон изменения напряженности поля. Этот эффект лежит в основе одного из известных методов измерения концентрации электронов в плазменном столбе [8].

Таким образом, сурфатрон можно рассматривать как плазменный прибор двойного назначения. Он представляет собой, во-первых, *плазмотрон* с высокой концентрацией зарядов, во-вторых, *плазменную антенну* с конечной проводимостью, излучающую энергию в окружающее пространство.

Основы расчета пространственного распределения СВЧ-энергии

Соотношение между поглощаемой в плазме энергией W_{pl} и излучаемой наружу W_{vac} зависит от concentra-

ции электронов n , радиуса плазменного столба R , частоты поля ω , рода газа и его давления. В работе [9] проведен расчет W_{pl} и W_{vac} при $\omega \gg \nu$, где ν — частота электрон-атомных столкновений, для ПВ, распространяющейся вдоль однородного по сечению плазменного цилиндра с радиусом R и концентрацией электронов \bar{n} , окруженного неограниченным пространством. Плотность энергии ПВ уменьшается по мере удаления на расстояние l от генератора. Поэтому определяем энергию на единицу длины цилиндра:

$$W_l = \int w(r) \cdot 2\pi r dr = W_{l,pl} + W_{l,vac},$$

$$\begin{cases} W_{l,pl} = \frac{E_0^2 R^2 I_0^2}{8k_1^2} \left[\frac{(2k_z^2 - \epsilon_{pl} k_1^2) I_1}{k_1 R I_0} - \epsilon_{pl} k^2 \left(1 - \frac{I_1^2}{I_0^2} \right) \right], \\ W_{l,vac} = \frac{E_0^2 R^2 I_0^2}{8\chi^2} \left[\frac{(k_z^2 + k^2) K_1}{\chi R K_0} + k^2 \left(1 - \frac{K_1^2}{K_0^2} \right) \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $w(r)$ — локальная плотность СВЧ-энергии, $I_{0,1} = I_{0,1}(k_1 R)$; $K_{0,1} = K_{0,1}(\chi R)$ — функции Бесселя и Макдональда; $\epsilon_{pl} = 1 - \bar{n}/n_c$ (n_c — критическая концентрация электронов); k_z — продольное волновое число, $k_1 = (k_z^2 - k^2 \epsilon_{pl})^{1/2}$; $k = \omega/c$; $\chi = (k_z^2 - k^2)^{1/2}$.

Формулы (1) применимы к любому плазменному столбу с концентрацией \bar{n} независимо от способа получения плазмы (метеоритный след, струя реактивного двигателя и т.д.). В случае СВЧ-разряда в сурфатроне, однако, предположение об однородности n по сечению разряда при низком давлении не является строгим из-за скин-эффекта. Строгое обоснование применимости расчета по формулам (1) требует анализа роли переноса электронами энергии, полученной от ПВ из области, где она максимальна (вблизи границы разряда), во внутренние области плазмы [10].

Оценки показывают, что в условиях наших экспериментов длина энергетической релаксации электронов λ_{Te} удовлетворяет соотношению $\lambda_{Te} > R > \delta$ (δ — толщина скин-слоя). Поэтому существует нелокальная связь между СВЧ-полем и концентрацией электронов, которая приводит к выравниванию n по сечению разряда ($n(r) = \bar{n}$). В работе использовались средние значения \bar{n} , полученные экспериментально фазометрическим методом.

2. Результаты экспериментов

Рассчитаем величины электромагнитной энергии, поглощаемой в плазме ($W_{l,pl}$) и излучаемой в окружающее пространство ($W_{l,vac}$) для сурфатрона при радиусе плазмы $R = 0,24$ см, частоте поля ~ 3 ГГц с наполнением Хе при давлении 0,7 Торр. Длина разряда составляет 60 см, входная мощность $W_{inc} = 140$ Вт [11]. Распределение $\bar{n}(z)$ показано на рис. 1. Разрядная трубка установлена внутри экрана из латунной сетки размерами $50 \times 40 \times 100$ см. Установка экрана на значительном расстоянии от трубки позволяет пренебречь искажениями поля, вызванными отраженным сигналом. Фазометрическим методом измеряется длина ПВ λ_z , затем

по дисперсионной кривой определяется \bar{n} . Изменение \bar{n} на расстоянии λ_z не превышало 10–15%.

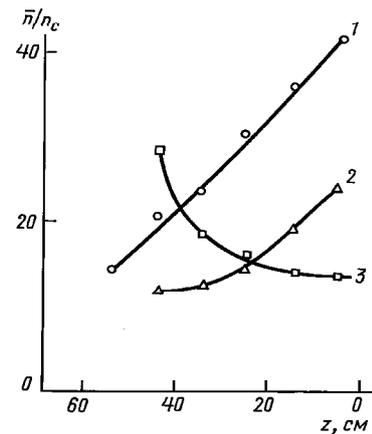


Рис. 1. Распределение концентрации электронов вдоль цилиндрической (1) и конической трубки (к генератору обращен узкий (2) и широкий (3) концы трубки)

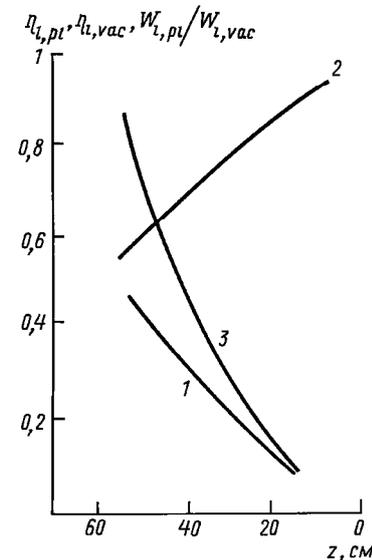


Рис. 2. Пространственное распределение СВЧ-энергии в плазме и вакууме вдоль цилиндрической трубки:

$$\begin{aligned} \eta_{i,pl} &= W_{i,pl}/(W_{i,pl} + W_{i,vac}) — 1, \\ \eta_{i,vac} &= W_{i,vac}/(W_{i,pl} + W_{i,vac}) — 2 \\ &\text{и } W_{i,pl}/W_{i,vac} — 3 \end{aligned}$$

На рис. 2 показано изменение $W_{i,pl}/W_{i,vac}$ вдоль разряда. Можно ввести понятие «локальной» (на единицу длины) эффективности η на разном расстоянии $z = l$ от возбудителя ПВ. Величина $\eta_{pl} = W_{i,pl}/(W_{i,pl} + W_{i,vac})$ определяет степень преобразования энергии ПВ в энергию плазмы, т.е. характеризует «локальную» эффективность сурфатрона как плазмотрона. Она возрастает с увеличением расстояния z от возбудителя ПВ. «Локальная» эффективность $\eta_{vac} = W_{i,vac}/(W_{i,pl} + W_{i,vac})$ сурфатрона как излучателя электромагнитной энергии в окружающее пространство, наоборот, максимальна в начале разряда и спадает к его концу.

Так как радиус трубки R постоянен по длине, то энергообмен ПВ с плазмой и окружающей средой зависит только от продольной концентрации электро-

нов $\bar{n}(z)$. В начале разряда \bar{n} максимальна и максимально «вытеснение» поля ПВ из плазменного столба. Поэтому «локальная» эффективность η_{pl} сурфатрона как плазмотрона мала по сравнению с эффективностью η_{vac} его как антенны. В конце разряда, наоборот, \bar{n} минимальна и значительная часть энергии ПВ поглощается в плазме. Величины η_{pl} и η_{vac} здесь приблизительно одинаковы и близки к 0,5.

Полученные во многих работах высокие значения эффективности сурфатрона объясняются тем, что в этих работах применялся экран круглого или прямоугольного сечения с размером, близким к диаметру плазмы. ПВ не может при этом распространяться в окружающее плазменный столб пространство, ее энергия локализована внутри экрана-волновода. ПВ трансформируется в волноводные моды или моды ПВ более высокого порядка, что приводит к более эффективному поглощению СВЧ-энергии в плазме.

Согласно (1) распределение энергии ПВ внутри плазменного столба и вне его зависит как от \bar{n} , так и от R . С целью выяснения условий энергообмена в сурфатроне при одновременном изменении $\bar{n}(z)$ и $R(z)$ проведены эксперименты с трубкой конической формы. Радиус трубки (длиной 50 см) изменялся от 0,25 до 0,5 см. Трубка могла быть установлена либо узким, либо широким концом около возбуждателя ПВ. Распределение концентрации $\bar{n}(z)$ и величин, характеризующих энергообмен ПВ в сурфатроне с конической трубкой, приведены на рис. 1, 3 и 4. Специфическое продольное распределение $\bar{n}(z)$ и $R(z)$ приводит к тому, что как $W_{l,pl}/W_{l,vac}$, так и η_{pl} максимальны в средней части сурфатрона и минимальны на ее концах. Наоборот, η_{vac} имеет минимум в середине трубки и максимум на концах.

Таким образом, изменение R вдоль трубки позволяет управлять энергообменом ПВ в плазме и окружающем пространстве, т.е. характеристиками сурфатрона в качестве как плазмотрона, так и плазменной антенны. Качественно эти результаты согласуются с влиянием радиуса и проводимости материала на эффективность антенн, применяемых в антенной технике. Возможность использования плазменных антенн с разрядом постоянного тока и их диаграммы направленности описаны в работах [12, 13].

Для того чтобы связать «локальную» эффективность сурфатрона с его полной эффективностью, использована установка с калориметром. Она позволяла определять полную рассеиваемую в разряде мощность $Q = W_{pl}$ одновременно с подводимой мощностью W_{inc} . Калориметр состоял из стеклянной трубки диаметром 2,5 см, коаксиальной с разрядной трубкой диаметром 1 см, наполненной Хе при давлении 0,3 Торр. Энергия, выделяющаяся в плазме, поступала в калориметр, через который продувался поток воздуха. Разность температур на входе и выходе была измерена термопарой. При потоке воздуха 0,2 л/с время установления стационарной температуры составляло около 1000 с.

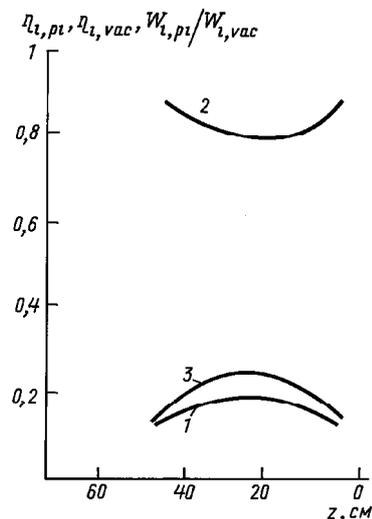


Рис. 3. Пространственное распределение СВЧ-энергии в плазме и вакууме вдоль конической трубки, узкий конец которой обращен к генератору: $\eta_{l,pl}$ (1), $\eta_{l,vac}$ (2), $W_{l,pl}/W_{l,vac}$ (3)

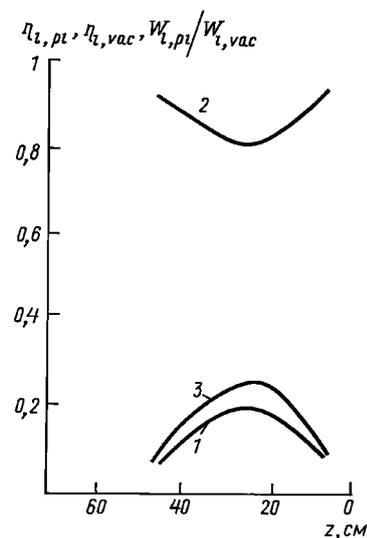


Рис. 4. Пространственное распределение СВЧ-энергии в плазме и вакууме вдоль конической трубки, широкий конец которой обращен к генератору: $\eta_{l,pl}$ (1), $\eta_{l,vac}$ (2), $W_{l,pl}/W_{l,vac}$ (3)

Концентрация электронов \bar{n} определялась в среднем сечении разряда (при $z = L/2$, где L — длина трубки) по радиальному распределению компоненты поля $E_r(r)$ снаружи разрядной трубки [8]. Калориметр с разрядной трубкой был окружен цилиндрическим металлическим экраном диаметром ~ 20 см, внутренняя поверхность которого была покрыта слоем материала, поглощающего СВЧ-излучение от трубки. На рис. 5 показана «локальная» эффективность плазменного столба η_{pl} в его середине при различных W_{inc} . Сплошная кривая 1 соответствует расчету по (1), а кружки обозначают результаты измерений Q/W_{inc} , т.е. полной эффективности сурфатрона. Измерения, проведенные при зачерненной поверхности трубки, позволили включить в Q не только тепловое излучение плазмы, но и световые потери энергии в разряде. Отличие экспериментальных значений

Q/W_{inc} от рассчитанных по (1) при высоких СВЧ-мощностях можно, по-видимому, объяснить отраженной от конца разряда ПВ, не учитываемой при расчетах.

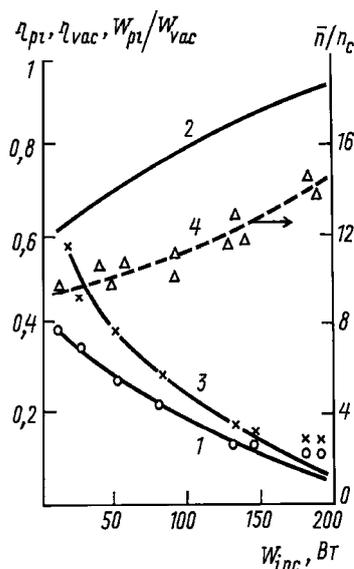


Рис. 5. Относительное изменение СВЧ-энергии и концентрации электронов при различных мощностях в фиксированном сечении $z = L/2$ цилиндрической трубки: 1 — $\eta_{pl} = W_{pl}/(W_{pl} + W_{vac})$: расчет (сплошная кривая) и эксперимент (точки); 2 — $\eta_{vac} = W_{vac}/(W_{pl} + W_{vac})$, расчет; 3 — W_{pl}/W_{vac} : расчет (сплошная кривая) и эксперимент (точки); 4 — \bar{n}/n_c (эксперимент)

Основные выводы

Физическая модель СВЧ-сурфатрона должна включать в себя не только энергию, поглощаемую в плазме, но и энергию, локализованную в окружающем пространстве. Сделан анализ модели с точки зрения влияния конструкции трубки сурфатрона и подводимой мощности W_{inc} на пространственное распределение энергии ПВ.

Определены условия максимальной «локальной» эффективности сурфатрона как плазмотрона, что важно

для его применений в плазмохимических установках [2, 3], в источниках ионов [1], газоразрядных лазерах и источниках света (особенно в импульсном режиме).

Определены также условия максимальной «локальной» эффективности сурфатрона как излучателя электромагнитной энергии в окружающее пространство (плазменной антенны). Внешняя относительно разряда область, в которой происходит распространение ПВ, играет роль реактивной нагрузки СВЧ-генератора, которая эквивалентна сопротивлению в анодной цепи, ограничивающему ток в разряде постоянного тока.

Таким образом, СВЧ-сурфатрон представляет собой прибор двойного назначения, каждое из которых может найти применение.

Литература

1. Hajlaoui Y., Pomathiod Z., Margot Y., Moisan M. // Rev. Sci. Instr. 1991. **62**, No.11. P. 2671.
2. Gamero A. // Invited Papers XXII ICPIG. 1995. P. 257.
3. Sauve G., Moisan M., Poraszczak Y. et al. // Microelectr. Eng. 1989. **9**. P. 471.
4. Ferreira C.M., Moisan M. // Phys. Scripta. 1988. **38**. P. 382.
5. Shivarova A., Zhelyazkov I. // Electromagnetic Surface Modes. / Ed. A.D. Boardman. Yohn Wiley & Sons Ltd. 1982. P. 465.
6. Пономарев В.И., Солнцев Г.С. // ЖТФ. 1966. **36**, № 8. С. 1376.
7. Benova E., Zhelyazkov I. // Phys. Scripta. 1991. **43**. P. 68.
8. Бобков С.Е., Булкин П.С., Солнцев Г.С., Цветкова Л.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1996. № 2. С. 37 (Moscow University Phys. Bull. 1996. No.2. P. 35).
9. Кондратенко А.Н. Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. М., 1985.
10. Kortchagen V. // Phys. Rev. 1994. **E49**, No.5. P. 4369.
11. Булкин П.С., Еришов А.П., Солнцев Г.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. № 1. С. 50 (Moscow University Phys. Bull. 1992. No.1. P. 50).
12. Левитский С.М., Бурькин Ю.И. // Радиотехн. и электроника. 1973. **18**, № 12. С. 2642.
13. Бурькин Ю.И., Левитский С.М., Мартыненко В.Г. // Там же. 1975. № 11. С. 2336.

Поступила в редакцию 11.04.97