

04;09

## ГЕНЕРАЦИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ТОКОВ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ ФАКЕЛА, ВОЗБУЖДАЕМОГО ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© А.М.Анпилов, Н.К.Бережецкая, В.А.Копьев,  
И.А.Косый, С.Н.Сатунин

Институт общей физики РАН,  
117942 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 27 декабря 1994 г.)

Исследовалась генерация квазистационарных токов преобразования и самозамкнутых внутрифакельных токов, вызывающих аксиальные магнитные поля в факеле, возбуждаемом линейно или циркулярно поляризованным микроволновым излучением. Показано, что величины токов и магнитных полей практически не зависят от характера поляризации.

Воздействие импульсного мощного микроволнового излучения на твердые диэлектрические (или металлодиэлектрические) мишени в вакууме приводит к образованию плазмы вблизи облучаемой поверхности [1]. По аналогии с лазерными экспериментами [2] это плазменное образование получило название микроволнового факела. Исследованию свойств микроволнового аналога лазерной плазмы посвящен цикл выполненных в ИОФАН работ [3,4]. Особый интерес в этих исследованиях представляет обнаружение ряда сильно нелинейных эффектов, являющихся следствием взаимодействия мощного микроволнового излучения с созданной им же плазмой. К числу последних относится генерация больших квазистационарных токов в цепи введенного в факел металлического электрода, соединенного со стенкой камеры [3], и спонтанных квазистационарных самозамкнутых токов (и соответствующих им магнитных полей) непосредственно в плазме микроволнового факела [4]. В основе как одного, так и другого явлений лежат процессы нелинейного взаимодействия микроволн с созданной ими приповерхностной плазмой с надкритической концентрацией ( $n_e \geq n_{cr} \equiv m\omega^2/4\pi e^2$ , где  $\omega$  — циклическая частота микроволнового излучения). Область нелинейного взаимодействия — так называемая “резонансная” область факела, в которой циклическая частота

микроволнового излучения сравнивается с собственной ленгмюровской частотой плазмы  $\omega_p$ . Энергия микроволн, поглощаемых с высокой эффективностью в плазменном резонансе, трансформируется в энергию электронного компонента, приводя к нагреву последнего и образованию “хвоста” надтепловых сверхэнергичных электронов [3,4]. По-видимому, именно резонансные процессы приводят к возникновению спонтанных замкнутых внутрифакельных токов, зарегистрированных в [5]. В случае же введенного извне в факел с надкритической концентрацией электрода за генерацию в его цепи квазистационарного тока ответственны также и нелинейные процессы, развивающиеся на границе электрод–плазма факела и известные в литературе как процессы “взрывной эмиссии” [6].

Экспериментальные исследования как квазистационарных токов в цепи электрод–факел–стенка камеры, так и самозамкнутых токов внутри факела пропозированы ранее в варианте, когда для возбуждения факела использовались пучки модного импульсного линейно поляризованного микроволнового излучения. Цель настоящей работы заключается в постановке экспериментов, аналогичных описанным в [3,5], но с циркулярно поляризованными микроволнами. Переход к циркулярной поляризации обусловлен двумя обстоятельствами, одно из которых связано с прикладными аспектами, а второе — с выяснением фундаментальных физических основ наблюдаемых явлений. Обращаясь к прикладным задачам, отметим, что генерация квазистационарного тока в цепи введенного в факел электрода может рассматриваться как новый высокоэффективный способ трансформации энергии микроволн в энергию постоянных токов промышленной частоты. Один из возможных вариантов использования такого трансформатора, заключающийся в энергетической запитке спутников с помощью генерируемых на Земле микроволновых пучков, описан в работе [7].

Явление преобразования микроволнового излучения в постоянный ток может представлять интерес и для такой задачи альтернативной энергетики, как создание солнечных космических электростанций (СКЭС). Микроволновый факел с введенным в него извне эмиттирующим (взрывная эмиссия) электродом можно рассматривать как один из возможных вариантов входящего в наземную часть системы преобразователя энергии электромагнитного излучения в промышленный ток.

Очевидно, что перспективы использования в технике факельного метода преобразования во многом определяются тем, сколь существенно зависит эффективность описанного в [3,4] явления трансформации микроволновой мощности в мощность протекающего через факел тока эмиссии электрода от моды и от поляризации микроволнового излучения в пучке. При относительно слабой зависимости коэффициента преобразования от этих характеристик прикладная значимость предлагаемой системы преобразования значительно повышается (имеются в виду конкретные способы формирования микроволновых пучков и приема их на наземных или орбитальных объектах).

Обращаясь к фундаментальным аспектам, следует отметить, что физика генерации зарегистрированных в [5] спонтанных аксиальных квазистационарных магнитных полей, связанных с возбуждением самозамкнутых токов в изолированном микроволновом факеле, не нашла

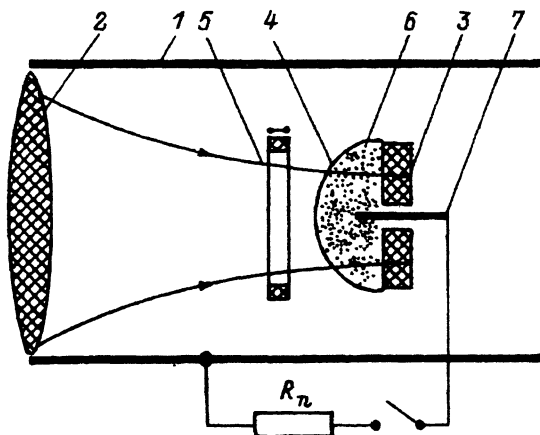


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — вакуумная камера; 2 — линза, фокусирующая СВЧ излучение; 3 — металлодиэлектрическая мишень; 4 — СВЧ пучок; 5 — подвижный кольцевой магнитный зонд; 6 — СВЧ факел; 7 — электрод.

вплоть до последнего времени адекватного теоретического описания. В качестве одной из возможностей объяснения наблюдавшегося в [5] явления привлекалась модель, развитая в [5,8] и основанная на предположении о частичной трансформации в области плазменного резонанса линейно поляризованного микроволнового излучения в поляризованное по кругу с увлечением электронного компонента факела в направлении вращения электрического поля волны. Именно для проверки выдвинутой в [5,8] гипотезы о природе азимутальных спонтанных токов и представляется целесообразным переход от линейно поляризованной волны к поляризованной циркулярно (если модель верна, то циркулярная поляризация должна заметным образом увеличить регистрируемые в эксперименте азимутальные токи, от направления вращения должно зависеть и направление аксиальных магнитных полей).

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Рупорно-линзовая антенна формирует сходящийся пучок микроволнового излучения в цилиндрической металлической камере. Параметры микроволнового излучения: длина волны  $\lambda = 2.5$  см, длительность импульса излучения  $\tau = 10$  мкс, пиковая мощность микроволнового импульса  $P_1 = 124$  кВт. Радиус пучка в фокусе  $r_f \approx \lambda \ll R$ , где  $R$  — радиус камеры. Распределение электрического поля в фокусе близко к гауссовому.

Камера откачивается до глубокого вакуума ( $p \leq 10^{-4}$  Тор). В фокусе пучка располагается металлодиэлектрическая мишень, частичная сублимация которой под действием микроволнового пучка и ионизация паров приводят к появлению плазменного факела у поверхности. В факел может быть введен соединенный с камерой электрод так, как это показано на рисунке. Измерения аксиальных магнитных полей проведены с помощью скомпенсированных магнитных зондов, описанных в [5].

В установке предусмотрена возможность изменения поляризации излучения от линейной к круговой, для чего в волноводный тракт вводилась вставка с эллиптическим сечением [9]. Измерения поляризационных характеристик осуществлялись с помощью датчика микровол-

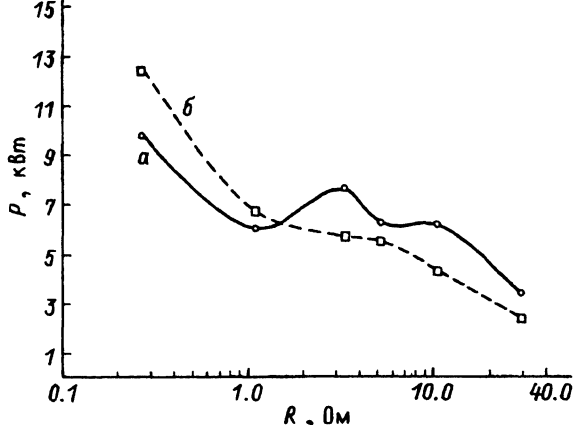


Рис. 2. Нагрузочные характеристики электрода.  
 а — линейная поляризация, б — круговая.

нового излучения, располагавшегося на оси камеры в области фокуса. Датчики регистрируют электрическое поле микроволнового излучения, только определенным образом ориентированное относительно входного отверстия. При введенной эллиптической вставке сигнал с детектора (пропорциональный  $E^2$ ) менялся меньше чем на 30% при вращении измерительной головки вокруг собственной оси. Это означает достаточно хорошее приближение к поляризованной по кругу волне.

Возникновение квазистационарного тока в цепи введенного в факел электрода, свойство, ранее обнаруженное в экспериментах с линейно поляризованными микроволновыми пучками, проявилось и в настоящих исследованиях при круговой поляризации микроволнового излучения. На рис. 2 приведены характерные нагрузочные характеристики электрода, введенного в факел, как при линейной, так и при круговой поляризации микроволнового пучка. Вдоль оси ординат отложена величина мощности, диссипируемой на нагрузочном сопротивлении  $R_n$  в цепи электрода ( $P_e = I_e^2 R_n$ , где  $I_e$  — величина квазистационарного тока, циркулирующего в цепи электрод-плазма факела-стенка камеры-электрод), вдоль оси абсцисс — величина нагрузочного сопротивления. Коэффициент трансформации мощности микроволнового излучения в мощность, диссипируемую на нагрузочном сопротивлении при протекании квазистационарного тока, достигает 10% и практически не зависит от характера поляризации.

При выведенном из факела электроде (изолированный факел) проведены измерения спонтанных аксиальных магнитных полей, связанных с генерацией самозамкнутых токов внутри факела. На рис. 3 приведены характерные величины аксиального магнитного поля, измеренные кольцевым магнитным зондом в случае линейной и круговой поляризации. Как следует из рисунка, заметных различий в величинах и в распределении магнитного поля в зависимости от характера поляризации не наблюдается.

Проведены также измерения «плавающего» потенциала ленгмюровского зонда, введенного в изолированный факел, создаваемый либо линейно, либо по кругу поляризованной волной. Как было показано ранее [3], «плавающий» потенциал зонда близок к истинному плазменному

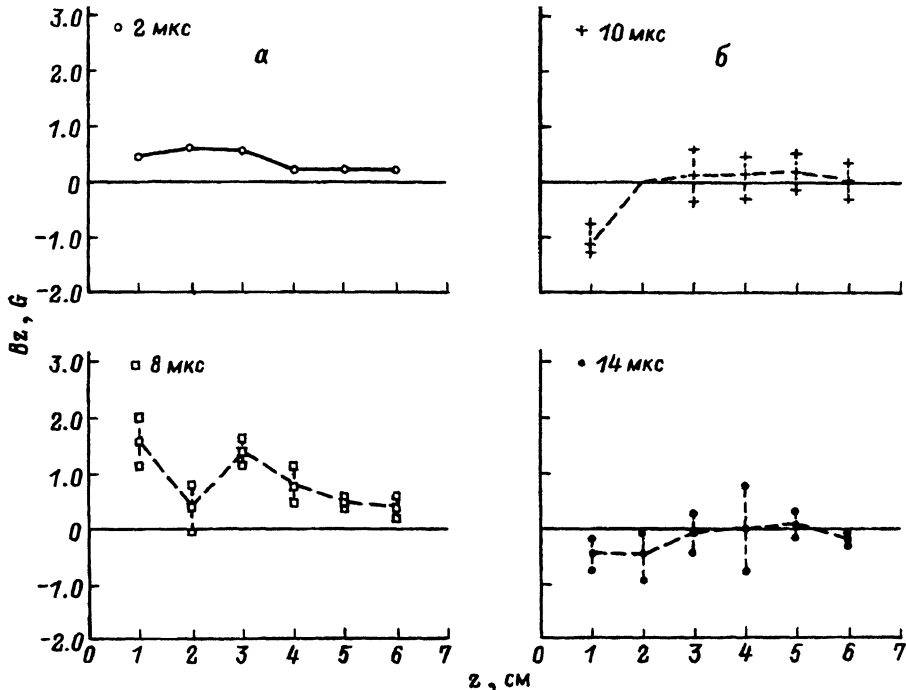


Рис. 3. Распределение аксиальных магнитных полей в СВЧ факеле.  
 а — линейная поляризация, б — круговая.

потенциалу. И величина, и поведение во времени потенциала факела слабо зависят от поляризационных характеристик микроволнового излучения.

Основные выводы из проведенных экспериментов заключаются в следующем.

1. Установлена практическая независимость от поляризационных характеристик микроволнового излучения величины квазистационарных токов как в цепи взрывоэмиссионным способом эмитирующего электрода, так и самозамкнутых токов внутри изолированного факела. От вида поляризации практически не зависит и величина плазменного потенциала, близкая, как показано в [3], к средней энергии надтеплового сверхэнергичного “хвоста” электронного компонента.

Полученные результаты можно интерпретировать как независимость от поляризации микроволнового пучка свойств генерируемой у облучаемой поверхности плазмы и, что особенно интересно, характера нелинейных процессов, развивающихся в области “резонанса” (возбуждение сильной ленгмювской турбулентности, самопрокидывание ленгмювских колебаний, турбулентный нагрев электронов и возникновение турбулентного сопротивления, ускорение электронов и т.д.).

2. Неизменность внутриплазменных азимутальных квазистационарных токов при переходе от линейной к циркулярной поляризации микроволнового пучка противоречит выдвинутой в [5,8] гипотезе о вращении электрического вектора электромагнитной волны, приобретаемого в резонансе, как об определяющем факторе формирования самозамкнутых токовых структур. Таким образом, вопрос о природе такого рода внутрифакельных токов остается по-прежнему открытым.

3. Отсутствие при смене характера поляризации видимых изменений в эффективности трансформации мощности микроволнового пучка в мощность, рассеиваемую квазистационарными токами в цепи погруженного в факел взрывоэмиссионным образом эмитирующего электрода, существенно повышает перспективы приложения факельного микроволнового преобразования к таким техническим проблемам, как энергетическая запитка спутников или создание солнечных космических электростанций. Действительно, нечувствительность к поляризационным характеристикам микроволнового пучка является очевидным преимуществом факельного преобразования по отношению к известным способам преобразования [10], требующим, как правило, однододовости принимаемого излучения и его определенной поляризации. Имея в виду также отсутствие верхнего предела на уровень преобразуемой мощности, можно утверждать, что факельный преобразователь является одним из наиболее перспективных в СВЧ энергетике будущего.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 93-02-16914).

#### Список литературы

- [1] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Косый И.А. // Тр. ИОФАН. Т. 16. Генерация нелинейных волн и квазистационарных токов в плазме. М.: Наука, 1988. С. 3-10.
- [2] Аскарьян Г.А. // Там же. С. 11-15.
- [3] Анпилов А.М., Бережецкая Н.К., Грицинин С.И. и др. // Там же. С. 16-45.
- [4] Батанов Г.М., Иванов В.А. // Там же. С. 46-79.
- [5] Анпилов А.М., Бережецкая Н.К., Копьев В.А. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 12.
- [6] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск, 1982. 256 с.
- [7] Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Еськов Ю.М., Косый И.А. // Прикладная физика. 1994. № 2. С. 10-21.
- [8] Соколов И.В. // УФН. 1991. Т. 161. № 10. С. 175.
- [9] Саусворт. Принципы и применение волноводной передачи. М.: Сов. радио, 1955.
- [10] Ванке В.А., Лопузин В.М., Савин В.А. // УФН. 1977. Т. 123. № 4. С. 633-655.