

ВЗРЫВОЭМИССИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ  
МЕТАЛЛ—ГОРЯЧАЯ ПЛАЗМАН. К. Бережецкая, В. А. Копьев, И. А. Коссий, И. И. Кутузов,<sup>1</sup> Б. М. Тимт<sup>2</sup>

Исследованы спектры излучения в видимой и ультрафиолетовой областях дуги, образующейся на контакте металл—горячая плазма. Делается вывод о том, что возникающая квазистационарная дуга обладает своеобразным ядром, расположенным в непосредственной близости к взрывоэмиссионному центру и представляющему собой плазму с кратностью ионизации не ниже 3 (в случае алюминиевого электрода) и концентрацией электронов  $n_e \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Спектр излучения ядра лежит в области вакуумного ультрафиолета. Периферийная разреженная ( $n_e \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) плазма, окружающая центральное ядро, обладает относительно низкой кратностью ионизации ( $\leq 2$ ) и относительно низкой температурой электронного компонента.

## Введение

Интерес к униполярным дугам [1], возросший в последние годы, связан не только с возможным влиянием их на состояние плазмы в замкнутых магнитных ловушках (токамаки, стеллараторы) [2, 3], но и со спецификой, позволяющей рассматривать эту разновидность дуг как самостоятельное, малоисследованное физическое явление. Так же как и в относительно подробно изученных вакуумных диодах [4, 5], в основе формирования униполярных дуг лежат процессы взрывной эмиссии с микроострий на поверхности электрода. Однако в отличие от вакуумных разрядов униполярные дуги возникают в своеобразных диодах, где роль катода играет введенный в горячую плазму электрод (либо соприкасающаяся с плазменным шнуром диафрагма или стенка камеры), а роль анода — сама горячая плазма. Это отличие может существенным образом повлиять на взрывоэмиссионные процессы и на характеристики плазмы микрофакела, возникающего в месте «взрыва».

Исследование униполярных дуг непосредственно в токамаках и стеллараторах чрезвычайно затруднено. Вместе с тем ряд весьма важных сведений о характеристиках дуг может быть получен в экспериментах с газоразрядными плазменными образованиями, относительно легко создаваемыми и доступными для изучения процессов на контакте горячая плазма—электрод. К числу такого рода газоразрядных систем относятся СВЧ факелы, возникающие у поверхности диэлектрических мишеней при воздействии на них в вакууме пучками мощного СВЧ излучения. Для импульсной кратковременно живущей ( $\tau \leq 100 \text{ мкс}$ ) плазмы СВЧ факела характерно наличие высокой температуры и концентрации электронного компонента. Как показано в [6], ввод в СВЧ факел металлического электрода приводит к появлению дуг на поверхности последнего, являющихся аналогом дуг униполярных: металлический электрод, вступающий в контакт с СВЧ факелом, становится источником нового плазменного образования — «микрофакела», являющегося результатом взрыва поверхностных микроострий. Чтобы избежать в дальнейшем терминологической путаницы («факел в факеле»), мы, сохранив за взрывной приповерхностной плазмой название

<sup>1</sup> ИПФАН, Горький.<sup>2</sup> Институт физики АН ЭССР.

«микрофакел», исходную горячую плазму СВЧ факела будем именовать «плазмой СВЧ разряда».

Исследование характеристик «микрофакелов» униполярных дуг и составляет основную цель настоящей работы. Задача эксперимента — определение структуры микрофакела, а именно пространственного распределения зарядового состояния, степени ионизации и излучательных свойств. Следует отметить, что сведения такого рода отсутствуют не только для униполярных дуг, но и для взрывоэмиссионных дуг, развивающихся в вакуумных диодах.

### Постановка эксперимента

Схема эксперимента, представленная на рис. 1, аналогична использованной в [6]. Мощный пучок СВЧ излучения ( $\lambda_f = 2.5$  см, полная мощность  $P \leq 400$  кВт,  $\tau_f \leq 100$  мкс) вводится в камеру, откачанную до глубокого вакуума ( $p \approx \approx 10^{-5}$  мм рт. ст.), создавая плазму у поверхности располагаемой в фокальной плоскости диэлектрической мишени (интенсивность СВЧ излучения в фокусе  $I_f \leq 2 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>). Неоднородная плазма СВЧ разряда на периферии бесстолкновительна, практически полностью ионизована. При концентрации электронов  $n_e \geq 10^{13}$  см<sup>-3</sup> обладает температурой  $T_e = 100 - 200$  эВ.

В горячую плотную плазму СВЧ разряда вводится цилиндрический электрод (диаметром 0.5 см) так, как показано на рис. 1. В том случае, когда электрод соединен с камерой через малое нагрузочное сопротивление  $R_n$ , на поверхности его регистрируются яркие локальные вспышки (как правило, одна в каждом импульсе), являю-

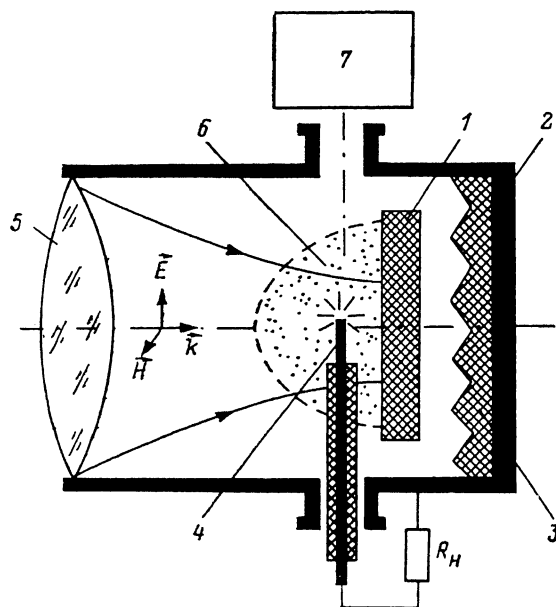


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — диэлектрическая (или металлодиэлектрическая) мишень; 2 — вакуумная камера; 3 — поглощающая СВЧ излучение нагрузка; 4 — взрывоэмиссионный электрод; 5 — линза, формирующая СВЧ пучок; 6 — плазменное образование (СВЧ корона); 7 — монохромотор МДР-3 или вакуумный спектрограф ТМС-1.

щимся местом развития взрывоэмиссионных процессов и формирования дуг между электродом и плазмой СВЧ разряда. Исследование мест эрозии показало, что характерные размеры их несколько десятков микрон, а внешне микрофотографии областей поражения напоминают характерные микрофотографии поверхности диафрагмы или стенок камеры в магнитных ловушках [2, 3].

Схема подключения электрода (рис. 1) «биполярна». В отличие от униполярного варианта здесь электронные токи преимущественно замыкаются не на саму эмиттирующую металлическую поверхность, а на стенку вакуумной камеры (второй электрод). Однако есть все основания предполагать, что характеристики микрофакела в биполярном случае аналогичны характеристикам микрофакела в униполярной дуге при развитой поверхности эмиттирующего электрода [8] (в этом смысле биполярный вариант более близок к моделируемым условиям замкнутых магнитных ловушек). Вместе с тем биполярное подключение обладает рядом очевидных преимуществ, к числу которых, в частности, относятся возможность плавно менять ток в дуге за счет изменения нагрузочного сопротивления  $R_n$  и, что очень важно, простая возможность измерения величин этих токов.

Как следует из экспериментов, описанных в [6, 7], биполярная дуга, возникающая на электроде, введенном в плазму СВЧ разряда, квазистационарна: в течение всей длительности СВЧ импульса остается неизменным местоположение «катодного пятна» и протекающие через пятно эмиссионные токи достигают некоторой стационарной величины, сохраняющейся вплоть до окончания СВЧ импульса.

Для определения параметров плазмы микрофакела, возникающего в результате взрывоэмиссионных явлений, нами выбрана неконтактная диагностика — исследование спектров излучения в видимой и ультрафиолетовой областях. Сняты обзорные спектры, а также определены относительные интенсивности линий, исследованы временной ход свечения и форма линий. Наблюдения велись перпендикулярно поверхности электрода, на которой возникал микрофакел. В большинстве экспериментов электроды выполнялись из алюминия.

### Результаты эксперимента

Определенные выводы относительно структуры микрофакела (взрывоэмиссионного центра) на электроде и его зарядового состава можно сделать как из анализа обзорного спектра излучения, так и из временного поведения интенсивности спектральных линий (плазма СВЧ разряда, в которую вводится электрод, практически не вносит вклада в регистрируемый спектр). Оказалось, что в свечении микрофакела можно обнаружить почти все линии иона Al III, лежащие в видимой и ближней ультрафиолетовой области (указанные в [8]), и лишь наиболее сильные линии иона Al II и атома Al I.

Осциллограммы, приведенные на рис. 2, позволяют сопоставить поведение во времени интенсивности излучения линий Al III (4529 Å), Al II (5593 Å) и Al I (3961 Å). Из осциллограмм следует, что временной ход интенсивности свечения линии Al III относительно хорошо коррелирует с формой импульса тока, протекающего через микрофакел (обрыв тока, например, приводит к резкому спаду и интенсивности свечения). Свечение же линий Al II и Al I медленно на-

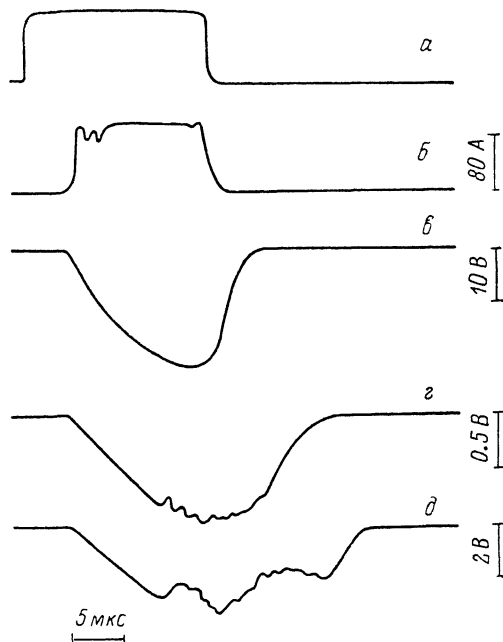


Рис. 2. Характерные осциллограммы.

а — огибающая сигнала с детектора СВЧ излучения, б — ток в цепи взрывоэмиссионного электрода, в — свечение Al III, г — свечение Al II, д — свечение Al I.

растает в течение токового импульса, достигая максимума после прекращения протекания тока через микрофакел.

При изменении нагрузочного сопротивления  $R_{\text{н}}$  снималась зависимость интенсивности тех же линий Al I и Al III от величины тока в электродной цепи. На рис. 3 приведены графики характерных зависимостей отношения интенсивности линии 4529 Å иона Al III к интенсивности атомной линии 3961 Å от величины тока для двух моментов времени. С ростом тока  $I_0$  происходит рост интенсивности обеих линий, но рост ионной линии происходит существенно быстрее. Это свидетельствует об увеличении в плазме микрофакела доли Al III по сравнению с долей нейтральных атомов.

Качественные выводы относительно ионного состава могут быть дополнены количественными данными о концентрации электронов  $n_e$ . Определение  $n_e$  в микрофакеле проводилось на основании измерений ширины спектральных линий для

трех ионизационных состояний атомов алюминия: Al III (4529.2 и 4512.5 Å), Al II (5593.2 Å) и Al I (3961.5 и 3092.7 Å). Вклад слабых линий Al III (4528.9 Å) и Al I (3092.9 Å) в изменение формы основных (сильных) линий пренебрежим. Штарковские константы для перечисленных выше линий взяты из [9, 10]. Полуширины линий излучения алюминия составили для иона Al III порядка 0.4 Å, для иона Al II порядка 0.2 Å и для атомарных линий 3961.5 и 3092.7 Å 0.15 и 0.3 Å соответственно. Эти полуширины, если приписать их штарковскому механизму, отвечают следующим концентрациям  $n_0$ : по линиям Al III  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, по Al II  $2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и по Al I  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> (предполагается однородность  $n_0$  в излучающем объеме микрофакала).

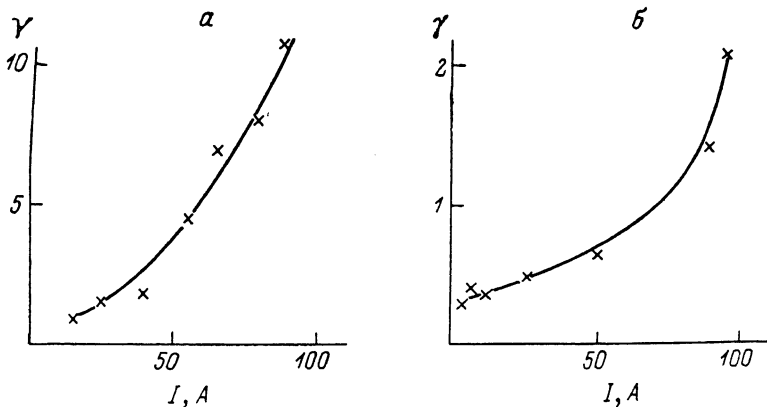


Рис. 3. Зависимость отношения интенсивности свечения линии Al III  $J_2$  к интенсивности свечения линии Al I  $J_0$  от величины тока в цепи взрывэмиссионного электрода.

$\gamma = J_2/J_0$ ; а —  $\tau = 1$  мкс от появления тока в цепи электрода, б — 10 мкс.

Для регистрации ионов Al более высоких кратностей наиболее подходящей является область вакуумного ультрафиолета. Исследование в этой области спектра проводилось с помощью вакуумного спектрографа ТМС-1, изготовленного в Институте физики АН ЭССР. На пленке УФ-4 был записан спектр свечения микрофакала, возникающего на электроде из Al. Схема эксперимента аналогична использованной в видимой области.

В интервале 1200—2000 Å было зарегистрировано свечение ряда линий, которые могут быть отождествлены со спектром Al IV. Вместе с тем линии спектра в вакуумном ультрафиолете не удалось приписать ни одной из линий алюминия с низкой кратностью ионизации (ниже 3) и ни одной из линий атомов, входящих в состав материала электрода или покрывающей его окисной пленки.

Уверенная регистрация линий Al IV, потенциал возбуждения которых составляет около 90 эВ, является аргументом в пользу предположения об относительно высокой температуре электронов в излучающей ультрафиолет области биполярной дуги.

### Обсуждение результатов эксперимента

Анализ временного поведения интенсивности свечения линий в видимой области спектра (рис. 2) позволяет высказать предположение о том, что плазма, являющаяся результатом микровзрыва, обладает достаточно высокой кратностью ионизации (большей или равной 2). Однократно же ионизованные и нейтральные атомы алюминия появляются либо в результате рекомбинации разлетающейся плазмы, либо испарения из относительно холодных границ «катодного пятна» (или капельной фракции продуктов эрозии). Об этом свидетельствует, в частности, запаздывание максимума интенсивности свечения линий Al I и Al II по отношению к максимуму для линий Al III и максимуму тока биполярной дуги.

Анализ всей совокупности экспериментальных результатов позволяет детализировать картину пространственной структуры биполярной (и, по-види-

тому, униполярной) дуги. Схема, отражающая эту структуру, приведена на рис. 4 и включает в себя следующие характерные области: участок *I* — конденсированная фаза, где происходит разогрев вещества электрода током, плотность которого резко возрастает при приближении к пятну; участок *II* — катодное пятно — место максимальной плотности тока; участок *III* — область плотной, относительно горячей плазмы микрофакела, являющейся результатом энерговыделения в катодном пятне и сопутствующего ему выброса вещества электрода в ионизованном состоянии; участок *IV* — область рекомбинирующей, относительно холодной плазмы микрофакела, плавно переходящая в горячую плазму СВЧ разряда (участок *V*), изначально контактировавшую с металлическим электродом.

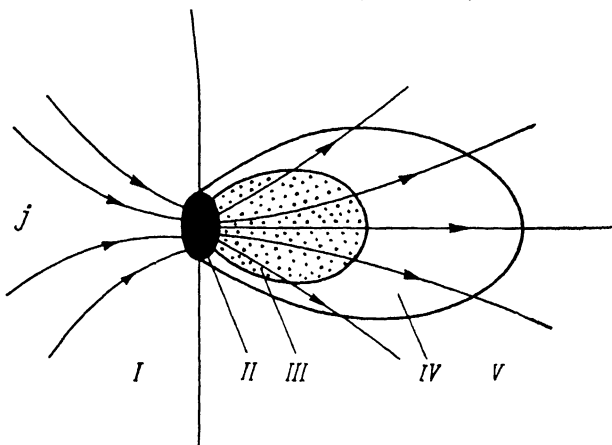


Рис. 4. Модель взрывоэмиссионной области.

Исходя из результатов эксперимента можно утверждать, что микрофакел обладает плотной и горячей «сердцевинкой» (или «ядром»), состоящей из практически полностью ионизованного вещества (участок *III*), и относительно холодной и разреженной периферией (участок *IV*). По мере продвижения в глубь микрофакела от «корки» до «ядра» растет кратность ионизации атомов вещества электрода, а спектр излучения смещается в ультрафиолетовую область (вплоть до вакуумного ультрафиолета (ВУФ)).

Укажем на основные аргументы в пользу приведенной выше картины. Прежде всего это полученная по уширению линий излучения верхняя граница значений электронной концентрации. В предположении об однородности излу-

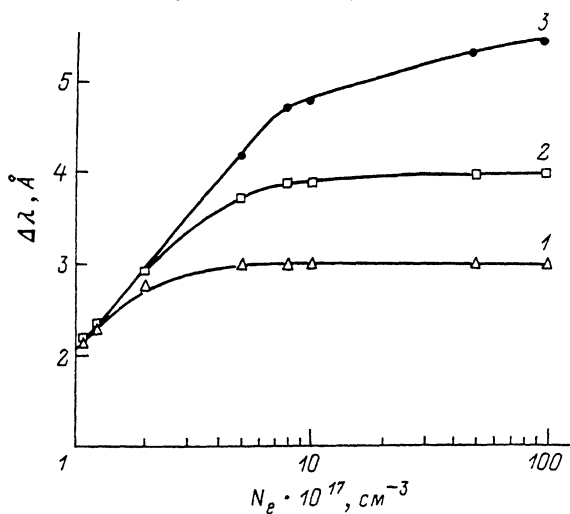


Рис. 5. Расчетная зависимость полуширины линии излучения иона Al III (4529 Å) от величины максимальной (при  $r=r_k$ ) концентрации плазмы в микрофакеле.

α: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3.

ющего объема, как уже отмечалось,  $n_e \leq 10^{16} - 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Однако реально микрофакел — неоднородный объект, и учет неоднородности может в принципе изменить величину оцененной по уширению линий концентрации. Примем в соответствии с [11, 12] закон пространственного изменения концентрации в виде  $n_e = c/r^\alpha$ , где  $1 \leq \alpha \leq 3$ , и рассчитаем форму линии излучения такого неоднородного плазменного объекта. На рис. 5 приведены расчетные кривые зависимости полуширины линии излучения иона Al III (4529 Å) от величины максимальной (при  $r=r_k$ , где  $r_k$  — радиус катодного пятна) концентрации плазмы для различных  $\alpha$  (при расчете в соответствии с [6] принималось  $r_k = 10$  мкм). Сопоставляя результаты расчетов с результатами экспериментов, можно сделать вывод о том, что либо нигде в области микрофакела нет концентрации плазмы, пр вы-

шающей  $10^{18}$  см $^{-3}$ , либо столь высокая концентрация существует, но в занятой ею области пространства практически отсутствуют нейтралы Al и ионы с кратностью ионизации, меньшей трех.

Первое предположение кажется маловероятным по следующим соображениям. Если принять  $n_e \ll 10^{18}$  см $^{-3}$ , то плотность эмиссионного тока

$$j_a \ll e \cdot n_e v_{Te} \ll 10^7 \frac{A}{\text{см}^2} \quad (1)$$

( $v_{Te}$  — тепловая скорость электронов).

Считая, что измеренная величина  $n_e$  максимальна и относится к области, прилегающей к катодному пятну, получаем, что мощность энерговыделения в катодном пятне

$$q = \frac{j_a^2}{\sigma_s} \ll 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}, \quad (2)$$

что существенно меньше мощности, необходимой для сублимации вещества электрода ( $q_s \simeq 10^8$  Вт/см $^2$ ) ( $\sigma_s$  — удельная проводимость вещества электрода).

Из (1) и (2) очевидно, что для поддержания квазистационарного состояния катодного пятна, характерного для описываемого эксперимента, необходимо, чтобы концентрация электронов в микрофакеле была  $n_e \geq 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ . При этом, так как наблюдаемое нами в видимой области излучение Al III, Al II и Al I не имеет уширений, соответствующих столь высокой концентрации, предполога существование плотного ядра, мы с необходимостью должны предположить и смещение спектра излучения, исходящего из внутренних участков микрофакела, из видимой области в область ВУФ, и увеличение кратности ионизации алюминия вблизи катодного пятна.

Обзорный спектр, полученный с помощью вакуумного спектрографа ТМС-1, свидетельствует о том, что микрофакел действительно «светит» в области вакуумного ультрафиолета, и зарегистрированные линии идентифицируются, как излучение ионов Al IV. Можно предположить, что источником этого излучения служит именно ядро микрофакела (участок III на рис. 4).

Таким образом, мы приходим к предположению, что квазистационарный плазменный факел, возникающий при микровзрыве на контакте алюминиевого электрода с горячей плазмой, обладает своеобразным ядром, представляющим собой практически полностью ионизованную плазму с кратностью ионизации не ниже 3, концентрацией электронов  $n_e \geq 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ . Ядро «невидимо» и проявляет себя в области вакуумного ультрафиолета.

По мере расширения в окружающее пространство с сопутствующими этому расширению процессами рекомбинации падает концентрация электронов и снижается кратность ионизации.

### Список литературы

- [1] Robson A. E., Thoneman P. C. // Proc. Phys. Soc. 1959. Vol. 73. Pt 3. N 471. P. 508.
- [2] McCracken G. M., Goodall D. H. J. // Nucl. Fusion. 1978. Vol. 18. P. 537.
- [3] Войцены В. С., Волков Е. Д., Грибанов Ю. А. и др. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 3. С. 415.
- [4] Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А. и др. // УФН. 1975. Т. 115. № 1. С. 104—120.
- [5] Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [6] Аадохин В. Н., Батанов Г. М., Бережецкая Н. К. и др. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 1. С. 182—188. Препринт ФИАН. № 189. М., 1981. 15 с.
- [7] Анпилов А. М., Бережецкая Н. К., Грицинин С. И. и др. // Генерация нелинейных волн и квазистационарных токов в плазме. М.: Наука, 1988. Т. 16. С. 16—45.
- [8] Стриганов А. Р., Одинцова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
- [9] Гримм Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1975. 451 с.
- [10] Dimitrijevic M. S., Konjevic N. // JQSRT. 1980. Vol. 24. P. 451—459.
- [11] Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. // УФН. 1983. Т. 139. № 2. С. 265—287.
- [12] Juttner B. // IEEE. 1987. Vol. PS-15. N 5. P. 474—479.