

но-компенсационный алгоритм обнаружения детерминированного сигнала, структурная схема которого приведена на рис. 2, позволяет рассчитать отношение сигнал/шум на выходе гауссовского приемника (15), и для этой ситуации

$$(S/N)_{0,T|Y_m < 0} = \frac{(E_0 \hat{\tau})^2}{N_2 e^2 \Delta_m} \Psi(\Delta_m T, P_m),$$

где $\Delta_m = (\gamma_m^2 + \Omega^2)^{1/2}$; $P_m = \Delta_m^{-1} [\gamma_m + (D_0/N_2)]$.

Предполагая, что начальное состояние системы точно известно, $D_0 = 0$, и $\Delta_m T \gg 1$, имеем

$$(S/N)_{0,T|Y_m < 0} \cong \frac{(E_0 \hat{\tau})^2}{N_2 e^2 (\Delta_m - |\gamma_m|)}.$$

5. Оценочно-корреляционно-компенсационный алгоритм обнаружения можно использовать и при коррелированных ланжевенских источниках шумов ЭМП $e_1(t)$ и $q_2(t)$, когда $M_1[e_1(t)q_2(\tau)] = N_{12}\delta(t-\tau)$, путем введения соответствующих изменений коэффициентов системы уравнений Калмана [9].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. М., 1981.
- [2] Воронцов Ю. И. Теория и методы макроскопических измерений. М., 1989.
- [3] Бичак И., Руденко В. Н. Гравитационные волны в ОТО и проблема их обнаружения. М., 1989.
- [4] Айнбиндер И. М. Шумы радиоприемников. М., 1974.
- [5] Гусев А. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. 35, № 1. С. 52.
- [6] Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М., 1978.
- [7] Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М., 1992.
- [8] Айнбиндер И. М. Входные каскады радиоприемников. М., 1972.
- [9] Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М., 1977. Т. 1.
- [10] Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., 1976.
- [11] Гершензон И. М., Эткин Е. С. Системы на параметрических диодах. М., 1964.

Поступила в редакцию
08.02.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 1

УДК 533.92

О ПРИРОДЕ КЕРНА В КАПИЛЛЯРНОМ ЭРОЗИОННОМ РАЗРЯДЕ, ИСТЕКАЮЩЕМ В АТМОСФЕРУ

А. П. Ершов, И. Б. Тимофеев, В. М. Шибков, С. Н. Чувашев

(кафедра физической электроники)

Предложено объяснение существования высокой (превышающей равновесную в модели ЛТР) концентрации электронов в приосевой области эрозионной плазменной струи капиллярного типа, инжектируемой импульсным плазмотроном в атмосферу. В его основе лежит предположение о наличии дисперсных частиц углерода, термoeлектронная эмиссия с поверхности которых обеспечивает наблюдаемые значения λ_e . Проведены эксперименты, свидетельствующие в пользу предложенного механизма.

В работах [1, 2] описаны конструкция импульсного капиллярного плазмотрона с испаряющейся стенкой и ряд необычных свойств создаваемых им плазменных струй (энергоемких плазменных образований (ЭПО), по терминологии авторов). В выбранном диапазоне длительностей импульса тока (~ 10 мс) и величины энергии, запасаемой в накопителе ($W \simeq 100$ Дж), в атмосфере на выходе разрядного канала (диаметром ~ 1 мм) возникает светящаяся цилиндрическое образование с четко очерченными границами (рис. 1). При этом скорость движения головной части ЭПО составляет

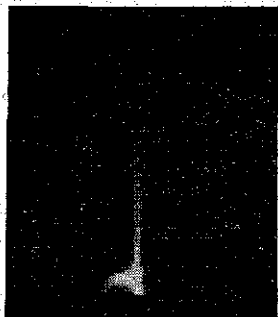


Рис. 1. Фотография струи в собственном свете: $W=50$ Дж, $t \simeq 4$ мс, время экспозиции одного кадра 32 мкс

~ 50 м/с, а полная длина ЭПО достигает 400 мм. В отличие от обычных газовых струй ЭПО не обнаруживает явных следов расходимости при распространении в газе. Внутри ЭПО с поперечником 6—10 мм располагается яркая приосевая область диаметром $d \leq 2$ мм, названная авторами [1, 2] керном. Оболочку можно, частично или полностью удалить, пропуская ЭПО через диафрагму. В тонких ($\leq 0,2$ мм) пластинках из тантала, молибдена и других металлов ЭПО пробивает отверстия, приблизительно соответствующие диаметру керна. Интересно, что ЭПО обнаруживает способность и к автономному существованию, причём в течение аномально долгого по сравнению с идеальной плазмой времени (~ 3 мс). Эти, а также другие фак-

ты позволили авторам [1, 2] сделать вывод о необычности свойств исследуемого образования, неприменимости классических подходов к его описанию и трактовать ЭПО как возможный аналог шаровой молнии.

Исследования ЭПО, проведенные в [3] спектроскопическими, а также зондовым и СВЧ методами, действительно показали наличие узкой приосевой области — керна — с очень высокой концентрацией электронов (превышающей 10^{17} см $^{-3}$ на малых расстояниях от сопла), окруженной оболочкой, концентрация электронов в которой на два порядка меньше приосевой. Характерно, что при этом температура плазмы, составляющая 6000—6500 К, оказалась практически однородной в области, заметно превышающей радиус керна. Причины столь сильного несоответствия радиальных профилей $n_e(r)$ и $T(r)$ в [3], однако, не анализировались.

В настоящей работе предложен механизм, объясняющий существование аномально высокой концентрации электронов в приосевой области, и проведены эксперименты, свидетельствующие в его пользу.

Проанализируем результаты измерений [3] радиальных профилей $n_e(r)$ и $T(r)$. Для плазмы атмосферного давления с высокой плотностью заряженных частиц естественно применить модель локального термодинамического равновесия (ЛТР). Если определяющим компонентом плазмы считать углерод — основной элемент электрода (рис. 2), — то оценка по формуле Саха на основе измеренных значений $T(r)$ дает значения n_e приблизительно на два порядка ниже экспериментально измеренных. Среди других возможных компонент плазмы: молекул типа C_nH_m , возникающих при испарении и диссоциации паров полиметилметакрилата (материал, из которого выполнены стенки разрядной камеры), Si (материал второго электрода), подмешиваемого воздуха — наименьшим потенциалом ионизации обла-

дает медь. Однако даже для чисто «медной» плазмы расчетные значения n_e существенно меньше экспериментальных. Таким образом, объяснить наблюдаемые значения n_e в приосевой области в рамках «классической» плазмы, содержащей компоненты только в газовой фазе, невозможно.

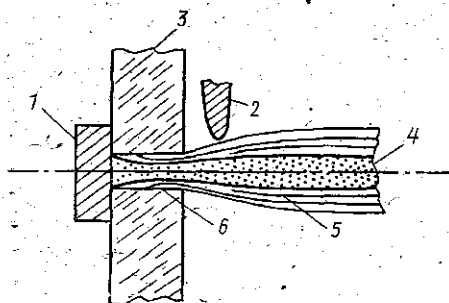


Рис. 2. Схема течения электроэрозионной плазмы в канале разряда: 1, 2 — электроды, 3 — диэлектрик (полиметилметакрилат), 4 — плазма продуктов эрозии электрода (керна), 5 — плазма паров диэлектрика, 6 — сопло

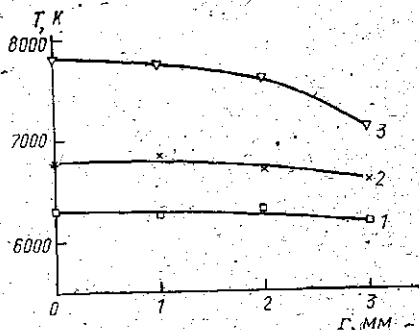


Рис. 3. Результаты измерений радиальных профилей температуры плазмы для различных материалов электрода: 1 — графит, 2 — медь, 3 — ВДПМ

Разумным представляется следующее рассуждение. Как известно, эрозия графитовых электродов часто сопровождается формированием конденсированной дисперсной фазы. Действительно, при размещении подложки на небольших расстояниях от сопла на ее поверхности в электронном микроскопе наблюдаются частицы с размерами ~ 10 мкм. Скорость испарения графита при характерных температурах $T \approx 6000$ К составляет около $10 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, т. е. частицы размером 3—10 мкм не успевают испариться за время полета, даже находясь в тепловом равновесии с горячим потоком. Концентрация электронов в системе «слабоионизованный газ — дисперсная конденсированная фаза» определяется, как правило, термоэлектронной эмиссией и вычисляется по формуле [4]

$$n_e \approx n_{eR} = 2 \left[\frac{mkT}{2\pi h^2} \right]^{3/2} \exp \left\{ -\frac{e\phi}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где m и e — масса и заряд электрона, ϕ — работа выхода, n_{eR} — ричардсоновская концентрация. Расчет для графита ($\phi = 4,7 \text{ эВ}$) при $T = 6000$ К показывает, что n_e в керне практически совпадает с ричардсоновской концентрацией. Таким образом, можно предположить, что в керне находится плазма с конденсированной дисперсной фазой. При этом периферийная область струи — оболочка — формируется парами диэлектрической боковой стенки.

Для проверки сделанного предположения были поставлены эксперименты, преследующие цель — минимизировать наличие дисперсной фазы в струе путем замены графита на другой материал. При этом менялся материал обоих электродов (1, 2 на рис. 2). Для каждого из материалов электрода проводились измерения радиальных профилей $n_e(r)$ и $T(r)$.

Концентрация электронов определялась по штарковскому уширению линии водорода H_α [5]. Отметим, что величина штарковского уширения, регистрируемая в эксперименте, составляла 10—30 Å, т. е.

была существенно больше уширения за счет всех других возможных факторов. Температура плазмы измерялась по линиям меди с $\lambda=5105,5$; $5153,2$ и $5218,2$ Å, а также по молекулярным спектрам для секвенций диана с $\Delta\nu=0$ и $\Delta\nu=-1$. При этом данные о температуре, полученные различными методами, совпадали в пределах ошибок измерения.

Результаты измерений для трех различных материалов — углерода, меди и сплава вольфрама с медью (марки ВДПМ) — показаны на рис. 3, 4. Все представленные результаты получены на расстоянии $z=10$ мм от сопла плазматрона при энергии в накопителе $W=100$ Дж и длительности импульса тока ~ 6 мс. Рисунок 3 иллюстрирует зависимость радиального профиля температуры плазмы от материала электродов. На рис. 4, а, б представлены измеренные профили $n_e(r)$, рассчитанные по формуле Саха по результатам измерений $T(r)$ (см. рис. 3): верхний (по Cu) и нижний (по C) пределы изменения радиального профиля концентрации электронов, а также (рис. 4, а) — профиль $n_e(r)$, рассчитанный по формуле (1).

Видно, что результаты измерений с графитовым электродом практически совпадают с результатами [3]. Замена графита на медь приводила к слабому падению n_e на оси струи и росту температуры. Рассчитанные значения n_e , однако, оставались заметно ниже измеренных. Визуальный осмотр медного электрода показал сильную эрозию поверхности в области сопла. Можно полагать, что в струе присутствуют микроскопические частицы меди, которые опять-таки в силу термоэлектронной эмиссии с их поверхности

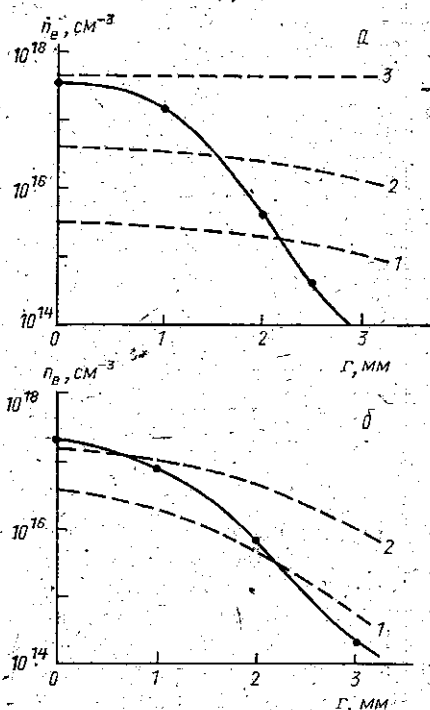


Рис. 4. Радиальные профили концентрации электронов в струе для двух различных материалов электрода (а — углерод, б — ВДПМ): сплошная линия — эксперимент, штриховая — расчет (1 — для чистого углерода, 2 — для чистой меди, 3 — по формуле (1))

являются причиной наблюдаемого превышения экспериментальных значений n_e над расчетными.

Отметим, что при замене медного электрода на электрод из традиционных тугоплавких металлов (нержавеющая сталь, молибден) эрозия оставалась сильной. Минимальная эрозия была получена только на сплаве вольфрама с медью. В этом случае слабое падение n_e в керне сопровождалось заметным повышением температуры плазмы. Как следствие расчетные значения n_e в приосевой области для плазмы Cu оказались близки к экспериментально измеренным (см. рис. 4, б).

Полученный результат, несомненно, свидетельствует в пользу предложенного механизма возникновения керна. Наличие дисперсной фазы позволяет объяснить не только существование «аномально» высоких n_e , но и другие факты: устойчивость керна (конденсированные частицы почти не диффундируют за пролетное время, так как скорость броуновского движения значительно меньше скорости молекулярной диффузии), возможность срезания его оболочки без разру-

шения ЭПО. Длительное свечение автономного ЭПО также становится легко объяснимым, поскольку излучение струи будет определяться свечением дисперсных частиц. При размерах частиц порядка 1—10 мкм время их радиационного остывания будет составлять единицы миллисекунд, т. е. соответствовать по порядку величины экспериментально наблюдаемому. Несомненно также, что на поздних стадиях возможно окисление углерода подмешиваемым кислородом воздуха, приводящее к энерговыделению в плазме и увеличению тем самым времени ее жизни.

Работы выполнены в рамках направления «Современные проблемы физики низкотемпературной газоразрядной плазмы» программы «Университеты России».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Авраменко Р. Ф., Бахтин Б. И., Николаева В. И. и др. // ЖТФ. 1990. 60. № 12. С. 57.
- [2] Avramenko R. F., Gridin A. Yu., Klimov A. I., Nikolaeva V. I. // International Committee on Ball Lightning (ICBL). Netherlands, Article Series N 1993/2.
- [3] Ершов А. П., Имад И. Х., Сысоев Н. Н. и др. // Тр. Ц. Всесоюз. симп. по радиационной плазмодинамике. М., 1991. Ч. 2. С. 86.
- [4] Недоспасов А. В. // УФН. 1968. 94. С. 439.
- [5] Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М., 1978.

Поступила в редакцию
28.02.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 1

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.21:539.211

АНОМАЛИИ ВУДА В ТЕПЛОМ ИЗЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК

А. А. Карабутов, И. А. Кудинов, В. Т. Платоенко, М. А. Согоян
(кафедра общей физики и волновых процессов)

Экспериментально исследуется тепловое излучение металлических дифракционных решеток. Найдены пики спектрального коэффициента излучения, обусловленные проявлением аномалий Вуда.

Взаимодействие электромагнитного излучения с периодическими поверхностями имеет ряд особенностей. Наблюдаются так называемые аномалии Вуда, связанные с резонансным возбуждением поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Резонансное возбуждение ПЭВ изменяет протекание физических процессов на периодической поверхности: наблюдается резонансное возрастание поглощения и подавление зеркального отражения; усиление локального поля приводит к увеличению сечения нелинейных процессов, ускорению фотохимических реакций, трансформации пространственных характеристик зеркально отраженного пучка и т. д. [1, 2]. Наши предыдущие работы [3—6] были посвящены экспериментальным исследованиям аномалий поглощения и отражения ИК-излучения периодическими металлическими поверхностями в условиях резонансного возбуждения ПЭВ. В результате исследований были зарегистрированы узкие (до 12°) и эффективные (до 93%) пики поглощения излучения дифракционными решетками, выявлено влияние углового и частотного спектров излу-