

полученные данные о кинетике изменения тока АЭЭ в СВЧ полях и сравнение их с результатами, характерными для видеоимпульсов, дают основания утверждать, что в СВЧ режимах при определенных условиях поверхность автоэммитера самопроизвольно перестраивается. В пользу такого утверждения свидетельствует также эмиссионное изображение вольфрамового острия в СВЧ поле, приведенное в работе [3], на котором, по нашему мнению, заметна перестройка.

Максимальное значение среднего тока АЭЭ в СВЧ поле при СП росте составило в наших экспериментах 0.8 А (см. рисунок, з), пиковое значение ~ 8 А (если оценку производить аналогично тому, как это сделано в работе [6]), что превышает известные по литературным источникам данные. Расчет по формуле $j = I/4r_k^2$ дает для средней плотности тока $2.2 \cdot 10^8$ А/см², для пиковой плотности тока получается значение $\sim 2.2 \cdot 10^9$ А/см².

Отметим, что перед подачей каждого последующего импульса СВЧ мощности для очистки поверхности эмиттера осуществлялся его нагрев до высокой температуры. Это способствовало также хорошему воспроизведению осциллограмм.

Превышение определенного уровня вводимой в резонатор мощности приводило к возбуждению вторично-эмиссионного разряда, что находится в соответствии с результатами работы [6]. Автоэммитер при этом оставался неразрушенным.

Список литературы

- [1] *Duke W. P.* // IRE Trans. on Military Electronics. 1960. P. 38—45.
- [2] *Шарбонье, Барбур, Гаррет, Дайк.* // ТИИЭР. 1963. Т. 51. № 7. С. 989—1004.
- [3] *Ананьев Л. Л., Борисов Д. А., Кантонистов А. А., Фурсей Г. Н.* // Тез. докл. IV Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. Ч. I. Томск, 1982. С. 26—29.
- [4] *Ананьев Л. Л., Богатский М. М., Борисов Д. А. и др.* // ПТЭ. 1983. № 5. С. 165—168.
- [5] *Сокольская И. Л., Фурсей Г. Н.* // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1484—1494.
- [6] *Андрянов Ю. В., Баздырев В. Н., Борисов Д. А., Жуков В. М.* // РиЭ. 1986. Т. 31. № 6. С. 1193—1195.
- [7] *Андрянов Ю. В., Баздырев В. Н., Борисов Д. А., Жуков В. М.* // РиЭ. 1987. Т. 32. № 5. С. 1040—1047.
- [8] *Кротевич Д. Н., Птицын В. Э., Фурсей Г. Н.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 3. С. 625—627.
- [9] *Жуков В. М., Полежаев С. А.* // РиЭ. 1988. Т. 33. № 11. С. 2360—2365.
- [10] *Жуков В. М., Ахсенов М. С., Фурсей Г. Н.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 8. С. 1588—1593.

Поступило в Редакцию
28 мая 1990 г.

04

© 1991 г.

Журнал технической физики, т. 61, в. 9, 1991

ПОПЕРЕЧНЫЙ РАЗРЯД В СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

Л. П. Грачев, Н. Н. Грицов, Г. И. Мишин, А. А. Харламов, К. В. Ходатаев

Одним из способов получения колебательно-неравновесного газа для реализации, например, эндоэргических плазмохимических реакций является осуществление тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке [1]. С практической точки зрения важно вложить в разряд достаточно большую энергию, так как плазмохимические константы существенно зависят от колебательной температуры реагирующих молекул. Однако при повышенных энергозатратах разряд может переходить в контрагированное состояние. В целом процесс контрагирования недостаточно изучен, и, как указано в [1], для построения его полной количественной модели важно дальнейшее накопление экспериментальных данных. В на-

стоящей работе представлены результаты исследований разряда в сверхзвуковой струе воздуха в существенно неоднородном поле, описаны его характерные формы, оценен энергетический баланс тлеющей формы и проанализировано влияние присущих ей неустойчивостей.

В эксперименте воздух из атмосферы через сверхзвуковое сопло натекал в камеру, в которой откачкой поддерживалось постоянное давление. В образующейся затопленной струе зажигался поперечный разряд. Фиксировался внешний вид, напряжение U и ток I разряда, давление P_T и температура T_T торможения потока.

Сопло выполнялось из эпоксидной смолы и имело диаметр выходного отверстия 3.7 мм, а диаметр наружной поверхности 10 мм. Оно устанавливалось в центре камеры объемом 0.16 м³. В ней поддерживалось давление $P_A = 69$ Тор,



Рис. 1. Визуализация пространственной картины потока с помощью разряда.

которое равнялось статическому давлению в струе. Сопло на расстояниях от своего выхода, не меньших, чем 13 мм, формировало ламинарную струю диаметром 2.8 мм с относительной скоростью $M=2.2$, абсолютной скоростью 530 м/с, $P_T=420$ Тор, $T_T=300$ К и плотностью молекул $n=5 \cdot 10^{18}$ 1/см³, что соответствует давлению неподвижного воздуха при нормальной температуре $P^*=150$ Тор. При этом в камере устанавливалась плотность молекул $n_A=2.3 \times 10^{18}$ 1/см³.

На расстоянии около 3 мм от сопла перпендикулярно оси струи располагались электроды из алюминиевого провода диаметром d до 2.1 мм. Зазор между ними h устанавливался симметрично относительно оси потока. Один электрод через ограничительное сопротивление $R_{огр}$ подключался к положительному полюсу источника напряжения E_0 . Другой через $R_3=200$ Ом (для измерения I) подключался к «земле» источника. Монтажная емкость, параллельная электродам, $C=80$ пФ.

Измерения давления производились трубкой Пито внутренним диаметром 1.5 мм, а наружным 2 мм. Температура T_T измерялась термопарой типа хромель—алюмель с диаметром проводников 0.5 мм. На нее одевалась стеклянная конусная трубка, запаянная с острого конца, длиной 30 мм, толщиной стенки 0.5 мм и максимальным диаметром 3 мм. Термопара устанавливалась на расстояниях не менее 10 мм от электродов.

Эксперимент показал, что при $h > 1.5$ мм разряд не проникал в поток. Это и естественно, так как $n > n_A$. На рис. 1 приведена фотография такого разряда. На ней снизу светящийся катод. От края анода отходит столб плазмы, охватывающий струю. Это явление может быть использовано для оценки поперечного размера струи, ее однородности вдоль потока и т. п.

Разряд горел в потоке при $h \leq 1.5$ мм. Его удавалось зажечь внутри потока и при больших h , если посреди межэлектродного расстояния, перпендику-

лярно электродом, помещалась пластина из стеклопластика толщиной 0.4 мм с продольной потоку прорезью поперечного размера не больше 2 мм.

Поток в первом приближении не приводил к изменению пробойных условий. Напряжение пробоя $U_{\text{п}}$ определялось кривой Пашена [2] для соответствующего значения параметра hr^* .

Разряд в потоке существовал в искровой и тлеющей формах. Искровой разряд имел вид тонкого канала, замыкающего электроды, однородного по длине, слегка выгнутого по потоку и привязанного к дальним по потоку краям электродов. Анализ осциллограмм показал, что процесс носил импульсный характер. При достижении U величины $U_{\text{п}}$ разрядный промежуток пробивался, I возрастал, а U падало до напряжения погасания $U_{\text{г}}$. Разряд гас, I падал до нуля, а U начинало экспоненциально возрастать с постоянной $R_{\text{орг}} \cdot C$ до $U_{\text{п}}$, и т. д. Для примера возьмем $h=1.1$ мм, $d=2.1$ мм, $R_{\text{орг}}=150$ кОм и $E_0=1.6$ кВ. В этом случае $U_{\text{п}}$ было от 1.4 до 1.5 кВ, $U_{\text{г}}$ — от 0.3 до 0.6 кВ, длительность импульса I не превышала 0.2 мкс, а амплитуда I была от 50 до 150 мА. Большому $U_{\text{п}}$ соответствовал больший I и меньшее $U_{\text{г}}$.

Разряд искровой формы существовал в диапазоне E_0 , лежащем сразу за $U_{\text{п}}$. Его ширина зависела от согласования разрядного промежутка с источником. Так, для приведенного примера искровой разряд реализовывался при E_0 от 1.5 кВ до 1.65 кВ. При

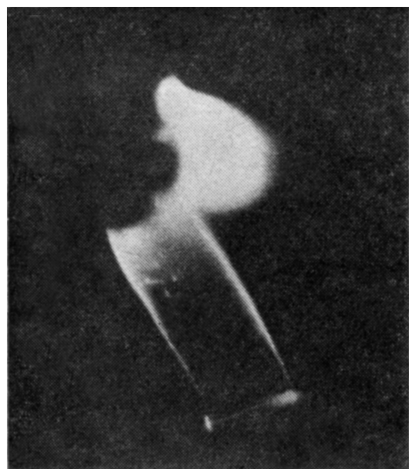


Рис. 2. Внешний вид тлеющего разряда в потоке воздуха при отсутствии внешнего освещения элементов установки.

$E_0=8$ кВ, $I=42$ мА, $U=1$ кВ, $d_{\text{эп}}=2.1$ мм.

включении параллельно электродам конденсатора емкостью 680 пФ он горел во всем экспериментальном диапазоне E_0 до 8 кВ. И наоборот, разряд этой формы вообще не реализовывался, если сразу у «горячего» электрода последовательно включался резистор сопротивлением 110 кОм или индуктивность величиной 25 мГн.

При больших энерговкладах, как правило, зажигался разряд с внешними признаками тлеющего разряда. Его фотография для условий рассмотренного выше примера и $E_0=8$ кВ дана на рис. 2. На ней направление потока слева направо. Нижний электрод — катод. Видно, что разряд имел ярко светящееся анодное пятно, выгнутую по потоку основную область, темное пространство между ней и поверхностью катода и катодное пятно.

Оценки показали, что I имел нормальную катодную плотность — $3 \cdot 10^{-2} \times P_{\frac{1}{2}}^2$ А/см². Тор². Размер пятна на аноде был около 0.2 мм и не зависел от I . Плотность I на аноде достигала $3 \cdot 10^2$ А/см², что приводило к его эрозии. Характерные особенности анодной области были идентичны особенностями анодной области обычного дугового разряда [2]. Размер основной области разряда, поперечный потоку и току, был равен d , а продольный потоку рос с ростом I . Внутри разряда возникали выгнутые по потоку каналы, замыкающие электроды. Длина последовательно возникающих каналов могла отличаться в 1.5—2 раза. В месте их касания катода появлялись яркие точки, которые видны на фотографии.

На рис. 3 даны осциллограммы U и I тлеющего разряда для приведенного выше примера и $E_0=6$ кВ. Верхняя кривая — зависимость от времени U , средняя — I , линии под ними — нулевые уровни. Масштаб времени t 5 мкс/большое деление. Естественно предположить, что волнистые горизонтальные участки $U(t)$ характеризуют «рафинированный» тлеющий разряд, а выбросы I и падения U связаны с появлением каналов. Среднее $U=1$ кВ, а $I=30$ мА. Ток имеет 10 % флуктуации с периодом около 2 мкс. Длительность выбросов I около

0.4 мкс, а их амплитуда от 75 до 125 мА. Время между выбросами I случайным образом колебалось. В среднем оно было равно 20 мкс.

Анализ осциллограмм показал, что разряд этой формы имел характерные свойства тлеющего разряда в потоке, отмеченные в [1]. В основной области он был несамостоятельным и стратифицированным. В нем развивалась ионизационно-перегревная неустойчивость. При этом средняя степень ионизации в основной области была около 10^{-7} , а параметр $E/n \approx 70 td$, где E — средняя напряженность поля. Поперечный размер замыкающих каналов был около 0.05 мм, а степень ионизации в них 10^{-5} .

При изменении I от 20 до 300 мА и выравнивании E_0 или $R_{\text{отр}}$ U падало от 1 кВ до 800 В. С ростом I средняя частота появления каналов уменьшалась на

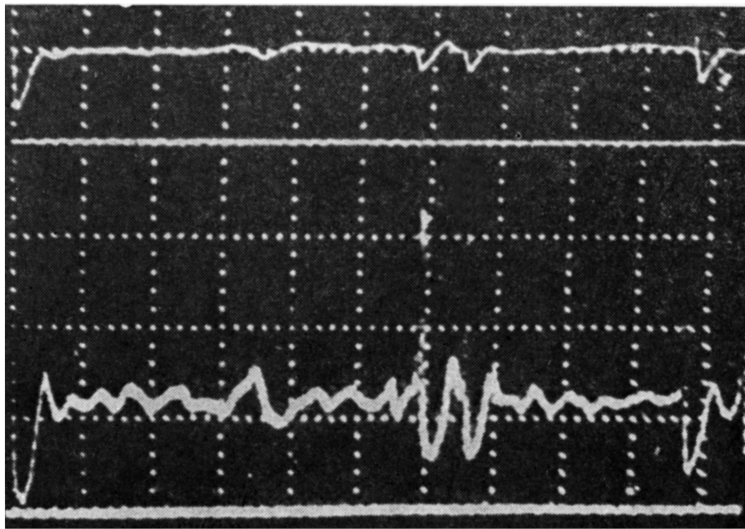


Рис. 3. Осциллограммы изменения напряжения на электродах $U(t)$ и тока разряда $I(t)$ в потоке воздуха для тлеющего разряда.

$K_U = 1$ кВ/дел, $K_I = 25$ А/дел, $K_t = 5$ мкс/дел, $E_0 = 6$ кВ.

20 %, отслеживая падение U , т. е. их вклад в средний энергобаланс разряда во всем диапазоне был пренебрежимо мал.

Измерения $T_{\text{т}}$ и $P_{\text{т}}$ показали, что при экспериментальных энерговкладах до $0.3 \text{ эВ/молекулу} = 1.5 \text{ Дж/см}^3 \cdot \text{атм} = 10^8 \text{ Дж/г}$ каждый 1 Вт, вложенный в разряд, повышал температуру потока на 0.8° , что обеспечивалось всего 30 % подводимой к разряду энергии. Так, при максимальном энерговкладе $T_{\text{т}}$ возрастала на 195 К, а $P_{\text{т}}$ падало в 2.3 раза. В соответствии с теорией [2] при указанном выше E/n остальные 70 % энергии шли на возбуждение колебательной степени свободы молекул азота. Отметим, что после включения разряда температура термодпары повышалась с максимальной скоростью 0.11 град/с на каждый 1 Вт подводимой к разряду мощности.

Таким образом, при анализе процесса перехода тлеющего разряда в контрагированное состояние необходимо учитывать внешние условия его согласования с источником. В эксперименте в существенно неоднородном поле удалось вложить в воздух до 10^8 Дж/г , причем 70 % энергии шло на повышение колебательной температуры молекул азота и, что особенно важно, относительное влияние ионизационно-перегревной неустойчивости уменьшалось с ростом энерговклада. Стратификация разряда приводила лишь к модуляции I . В эксперименте не проявились физические причины, могущие ограничить энерговклад в разряд. Основная техническая сложность, которую нужно учитывать при построении плазмохимических реакторов, заключается в обеспечении требуемого времени работы электродов.

- [1] Велизов Е. П., Голубев В. С., Пашкин С. В. // УФН. 1982. Т. 137. № 1. С. 117.
 [2] Райзер Ю. И. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

Физико-технический институт
 им. А. Ф. Иоффе АН СССР
 Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
 10 апреля 1990 г.

04

Журнал технической физики, т. 61, в. 9, 1991

© 1991 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЭП С ЦЕЗИЙ-НАТРИЕВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Б. И. Ермилов, А. Г. Каландаришвили, В. К. Михеев

В последнее время для повышения эффективности работы термоэмиссионного преобразователя энергии (ТЭП) применяют различные активные добавки к основному рабочему телу (РТ), цезию. Проводятся исследования ТЭП с цезий-бариевым, цезий-рубидиевым, цезий-висмутным и другими наполнениями. При проведении этих экспериментов необходимо обеспечить широкий диапазон изменения стехиометрического состава наполнения, а также иметь возможность автономного регулирования парциальных давлений компонентов РТ. Однако существующие методы подачи и управления величиной активной добавки в ТЭП обладают рядом недостатков, что создает определенные трудности при их реализации [1].

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования ТЭП с цезий-натриевым наполнением. В качестве источника паров РТ использовалась двухкомпонентная регулируемая тепловая труба (РТТ). Основным теплоносителем в трубе являлся натрий, а регулирующим — цезий. С целью обеспечения устойчивой работы РТТ в режиме разделения компонентов подача цезия производилась из системы цезий—графит. Режим разделения компонентов позволил сформировать в источнике широкую переходную зону, стехиометрический состав пара в которой плавно менялся от чистого натрия до чистого цезия [2]. Управление стехиометрическим составом паров РТ на выходе данного источника производилось путем перемещения переходной зоны относительно пароотводящего патрубка, а величина давления паров смеси задавалась температурой слоистого соединения [3]. В данном источнике использовался термический метод управления давлением и стехиометрическим составом пара РТ, что позволяет значительно упростить стабилизацию и регулирование выходных электрических параметров ТЭП по сравнению с источниками, применяющими барометрический метод управления.

Эксперименты проводились на установке, аналогичной описанной в [4]. В работе использовался модельный цилиндрический ТЭП с коаксиальным расположением электродов. В процессе исследований производилось снятие вольт-амперных характеристик (ВАХ) динамическим методом, осциллографированием. Одновременно фиксировался температурный профиль источника с точностью ± 2 К. Двухкомпонентный источник РТ длиной 300 мм и диаметром парового канала 12 мм располагался вертикально с испарителем внизу, а контейнером со слоистым соединением сверху. Пароотводящий патрубок располагался в 180 мм от конца трубы в зоне испарения и имел проходное сечение 13 мм².

На рис. 1 приведены огибающие ВАХ ТЭП при температуре эмиттера 1700 К и температуре коллектора 800 К. Видно, как изменение величины тепловой мощности, подводимой к зоне испарения источника, приводит к изменению огибающих ВАХ, что может быть объяснено изменением стехиометрического состава паров РТ. Следует отметить, что при использовании источника на основе