

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ф. М. Гайсин, А. М. Миннигулов, Пространственное распределение концентрации электронов в тлеющем разряде в поперечном потоке воздуха, *ТВТ*, 1980, том 18, выпуск 5, 940–943

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.238.202.29

11 ноября 2024 г., 16:30:01



УДК 537.525

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Гайсин Ф. М., Миннигулов А. М.

Двойным электрическим зондом исследовано пространственное распределение концентрации электронов $n_e(x, y, z)$ в тлеющем разряде в поперечном потоке воздуха.

Необходимость создания большеобъемного устойчивого тлеющего разряда стимулировала исследования энергетических характеристик секционированных разрядных систем с поперечным, относительно вектора напряженности электрического поля, потоком газа [1]. В [2] исследованы вольт-амперные характеристики разряда и зависимости энерговклада jE от давления газа, скорости потока и геометрии разрядной камеры (РК). В работах [3–6] исследовались пространственные распределения электрического поля, транспортные и энергетические характеристики электронов, временные характеристики и вопросы устойчивости тлеющего разряда в поперечном потоке газа. Однако пространственное распределение n_e оставалось малоисследованным, имеется лишь несколько теоретических [7, 8] и экспериментальных работ [9, 10], в которых исследовались либо идеально секционированные разрядные камеры, либо разрядные камеры рельсового типа. В [11] показано, что распределение n_e вдоль потока в разрядных камерах с секционированной системой пластинчатых катодов имеет вид возрастающей синусоиды, период которой равен расстоянию между катодами. Предлагаемая работа продолжает исследования, начатые в [11], и посвящена исследованию пространственного (трехмерного) распределения концентрации электронов в тлеющем разряде в потоке воздуха.

Для измерения концентрации электронов широко применяются зондовые методы. В [12] предложена теория зонда, находящегося в тлеющем разряде в потоке газа повышенного давления (3–13 кПа), и выведены простые формулы для вычисления n_e по электронной ветви ВАХ цилиндрического и сферического зондов в условиях сильного внешнего электрического поля. Однако в данном случае в исследуемом разряде существует широкий спектр колебаний напряжения и тока разряда и нерегулярные неустойчивости в виде светящихся слоев, перемещающихся от анода к катоду [5, 6]. Это приводит к тому, что потенциал плазмы может резко меняться, а зонд сгорать. Замена зондов при исследовании пространственных распределений параметров плазмы недопустима. Поэтому измерения n_e проводились двойным плавающим зондом, позволяющим получить только ионную ветвь зондовой характеристики. Теория ионного тока на зонд, находящийся в плотной плазме, развивалась во многих работах, например [13–15]. Для выбора размеров зонда и формул для обработки экспериментальных результатов необходимо оценить отношение длины свободного пробега электронов λ_e , дебаевского радиуса экранирования λ_D

и радиуса зонда r_3 . В нашем случае при $n_e = 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$ величины $\lambda_e = 10^{-3} - 10^{-1} \text{ см}$ и $\lambda_d = (0,5 - 5) \cdot 10^{-2} \text{ см}$. Поэтому, согласно классификация [16], с учетом необходимой жесткости зонда можно реализовать только режим сплошной среды, т. е. $\lambda_e \ll r_3$ со столкновительным тонким $r_3 \gg \lambda_d \gg \lambda_e$ или толстым $\lambda_d \gg r_3 \gg \lambda_e$ слоем объемного заряда. Классификация [16] приведена для случая $|x_3| \cong 1$, где $x_3 = e\varphi_3/kT_e$ — нормированный потенциал зонда. В случае $|x_3| \gg 1$ критерием толстого слоя будет выражение $|x_3| (\lambda_d/r_3)^2 \gg 1$, даже если $\lambda_d \ll r_3$. Когда слой объемного заряда толстый и зонд имеет большой отрицательный потенциал, ионный ток определяется формулой [15]

$$I_i = 2\pi l n_e b_i k (T_i + T_e) / \ln (\pi l / 4r_3 r_{сл}),$$

где $b_i = W_i/E$ — подвижность ионов, и радиус слоя определяется выражением

$$r_{сл} = 1 + 3650 \{ [n_e (T_i + T_e)]^{-1/2} |\varphi_3| / r_3 \}^{0,62}.$$

Из-за того, что искомое значение n_e входит в формулу для $r_{сл}$, расчет n_e ведется итерационным способом. Подвижность ионов b_i зависит от напряженности поля очень слабо [17]. Температура ионов T_i близка к поступательной температуре газа T_r . Вдоль потока T_r повышается на 80–150 К [18] относительно входной, которая была равна 290–298 К. В тлеющем разряде в потоке воздуха в диапазоне $E/N = (2-5) \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ электронная температура $T_e = (1,2-1,8) \cdot 10^4 \text{ К}$ и зависит от напряженности электрического поля почти прямо пропорционально. Получение T_e путем обработки зондовых характеристик методами [19] ведет к повышению значений T_e в 1,5–2,5 раза [16]. Поэтому авторы пользовались измерениями отношения E/N и определением средней температуры T_e и дрейфовой скорости W_e электронов в РК по [4].

Существенными недостатками зондовой методики измерения концентрации заряженных частиц являются неконтролируемое влияние взаимодействия ионов и молекул плазмы с поверхностью зонда, загрязнение зонда продуктами химических реакций, протекающих в плазме, эмиссия электронов с зонда и другие трудноучитываемые эффекты [16]. Поэтому для абсолютной калибровки измерений использованы интегральные условия, связывающие ток разряда через катоды РК и концентрацию электронов [20].

$$I_p = e \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} j_{ey}(x, z) dx dz,$$

$$j_{ey}(x, z) = -n_e(x, y, z) W_{ey}(x, z) - D_e \frac{\partial n_e(x, y, z)}{\partial y}.$$

В средней части разряда $\partial n_e / \partial y < 10^9 \text{ см}^{-4}$, поэтому диффузионным вкладом можно пренебречь.

Схема, геометрические размеры РК и привязка к ней декартовой системы координат (x, y, z) приведены в [3, 4]. Двойной цилиндрический зонд перемещается в РК трехкоординатным устройством и может при этом вращаться вокруг продольной оси при помощи сельсинной пары. Диапазон перемещения зонда вдоль потока составляет $\Delta x = 100$, а по осям y и z — 60 мм. Разность потенциалов между зондами измерялась цифровым вольтметром В7-16, а ионный ток на зонд микроамперметром типа М136 класса точности 1,0. Токи разряда I_p , протекающие через катоды РК, определялись микроамперметрами типа М1690А класса точности 1,0 дополненными внешними шунтами. Напряжение разряда U_p на катодах РК контролировалось статическими вольтметрами типа С50 класса точности 1,0. По оценке погрешность отдельного измерения n_e в средней части разряда ($y = 15 \pm 3 \text{ мм}$) составляет $\leq 20\%$. При приближении к аноду и катодам она возрастает. К недостаткам измерений относится их боль-

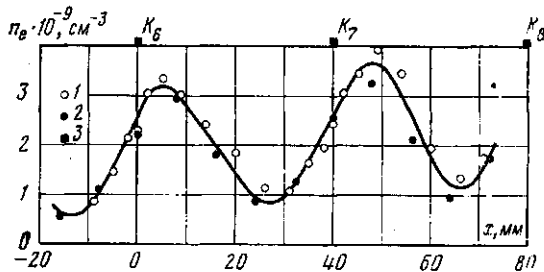


Рис. 1. Распределение концентрации электронов вдоль потока при расстоянии между электродами $\Delta y = a = 30$ мм, $p = 4$ кПа, $y = 15$ мм, $v = 40$ м·с⁻¹, $I_p = 1$ А: 1 — зондовые ($z = 0$); 2 — СВЧ (усредненные вдоль оси z)-измерения; 3 — показаны положения и номера катодов

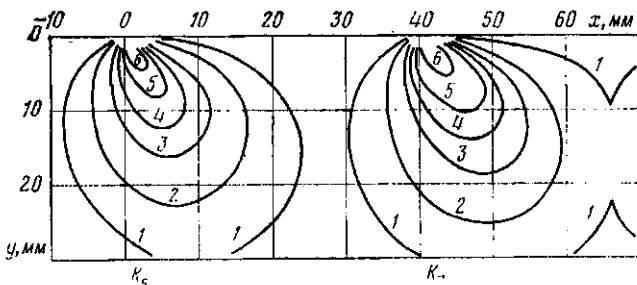


Рис. 2. Двумерное распределение концентрации электронов при $\Delta y = a = 30$ мм, $p = 4$ кПа, $y = 15$ мм, $v = 40$ м·с⁻¹, $I_p = 1$ А для середины катода ($z = 0$). На кривых приведены значения $n_e \cdot 10^{-9}$, см⁻³

шая длительность (за время измерений параметры разряда несколько меняются), что увеличивает погрешность измерений. Одновременно с зондовыми измерениями пространственное распределение n_e было исследовано СВЧ-методом «двух частот» [21] по затуханию электромагнитной волны, прошедшей через плазму. Для получения удовлетворительного пространственного разрешения была применена линия Лехера [22]. Методика СВЧ-измерений изложена в [23], а некоторые результаты приведены в [11].

Типичное распределение концентрации электронов вдоль потока приведено на рис. 1. Результаты зондовых и СВЧ-измерений хорошо согласуются между собой. Двумерное распределение $n_e(x, y)$ приведено на рис. 2. Видно, что разряд существенно неоднороден и смещен вниз по потоку. Это объясняется тем, что ионы увлекаются потоком, увлекая в свою очередь более быстрые и подвижные электроны. Но сильному сдвигу разряда препятствует влияние электрического поля и рекомбинация. Распределение $n_e(z)$ вдоль катода приведено на рис. 3. Пластинчатый катод даже в режиме аномального тлеющего разряда не обеспечивает равных условий формирования разряда вдоль катода. В момент зажигания разряда начинает светиться катодное пятно в области максимальных значений n_e , при $I_p \geq 40-80$ мА разряд покрывает весь катод (площадь его $0,18$ см²), а переход в дугу происходит при $I_p \geq 180-250$ мА. В исследованном диапазоне параметров зависимость n_e от тока разряда практически прямо пропорциональная, с ростом скорости потока n_e уменьшается, а при увеличении давления увеличивается (см. рис. 4).

Таким образом, двойным плавающим зондом исследовано пространственное распределение концентрации электронов в тлеющем разряде в поперечном потоке воздуха. Получены зависимости от давления и скорости потока воздуха и тока разряда. Результаты зондовых измерений хорошо

Рис. 3. Распределение концентрации электронов вдоль z при $\Delta y = a = 30$ мм, $p = 4$ кПа, $v = 40$ м с⁻¹, $I_p = 1$ А, $y = 15$ мм: 1 — $x = 9$ мм; 2 — 0; 3 — 5

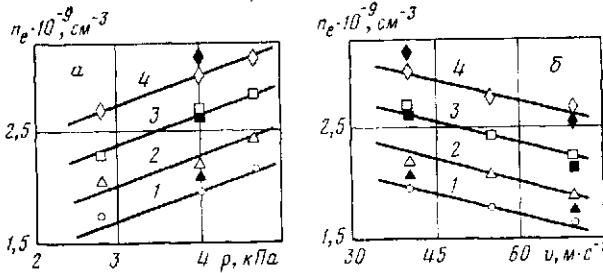
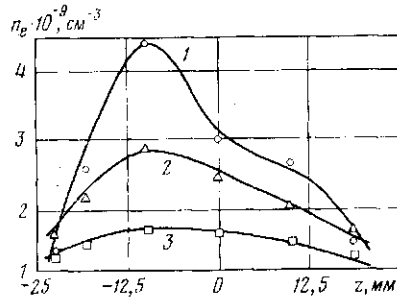


Рис. 4. Зависимости концентрации электронов от давления (а) и скорости (б) потока при $a = 30$ мм, $x = 6,2$ мм, $y = 15$ мм, $z = 0$; а — $v = 40$ м с⁻¹, б — $p = 4$ кПа. Ток разряда: 1 — 0,4 А; 2 — 0,6; 3 — 0,8; 4 — 1,0. Темные точки соответствуют данным СВЧ-измерений, усредненным вдоль оси z

согласуются с данными СВЧ-экспериментов. Полученные результаты можно применить для улучшения характеристик разрядных камер конвективных молекулярных лазеров с поперечной прокачкой рабочего вещества.

Казанский авиационный институт им. А. Н. Туполева

Поступила в редакцию 17 VII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Демария. ТИИЭР, 61, 6, 54, 1973.
2. А. В. Артамонов и др. Квантовая электроника, 4, 184, 581, 1977.
3. Ю. М. Беляков, Р. И. Галеев и др. ТВТ, 17, 6, 1172, 1979.
4. Ф. М. Гайсин, Г. Ю. Даутов, А. М. Миннигулов. ТВТ, 18, 4, 1980.
5. З. М. Бедретдинов, Ф. М. Гайсин, Г. Ю. Даутов и др. ТВТ, 16, 2, 274, 1978.
6. Ю. М. Беляков, Г. Ю. Даутов, А. Я. Семичев и др. ТВТ, 17, 1, 5, 1979.
7. В. М. Гольдфарб, Р. И. Лягущенко, М. Б. Гендлер. ТВТ, 13, 3, 497, 1975.
8. Л. М. Дмитриев. ПМТФ, № 2, 18, 1977.
9. В. Ю. Баранов, А. А. Веденов, В. Г. Пизьев. ТВТ, 10, 6, 1156, 1972.
10. С. С. Воронцов, И. А. Иванченко, А. А. Шелепенко, Ю. А. Якоби. ЖТФ, 47, 2287, 1977.
11. Ф. М. Гайсин, И. Г. Гафаров и др. Тез. докл. II Всес. семинара по физ. процессам в газовых ОКГ. Ужгород, стр. 18, 1978.
12. А. С. Акишев, А. П. Напартович. ДАН СССР, 242, 812, 1978.
13. В. М. Захарова, Ю. М. Каган, К. С. Мустафин, В. И. Перель. ЖТФ, 30, 442, 1960.
14. К. Н. Ульянов ЖТФ, 40, 390, 1970.
15. R. E. Kiel. J. Appl. Phys., 40, 3668, 1969.
16. П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян. Электрические зонды в неподвижной и движущей плазме. «Мир», 1978.
17. И. Мак-Даниэль, Э. Мэзон. Подвижность и диффузия ионов в газах. «Мир», 1976.
18. Ф. М. Гайсин, Г. Ю. Даутов, А. Н. Никитин. Тез. докл. II Всес. семинара по физ. процессам в газовых ОКГ. Ужгород, стр. 84, 1978.
19. Л. Шотт. В сб. Методы исследования плазмы. «Мир», 1971.
20. А. В. Елецкий, Л. А. Палкина, Б. М. Смирнов. Явления переноса в слабоионизованной плазме. Атомиздат, 1975.
21. А. В. Чернетский, О. А. Зиновьев, О. В. Козлов. Аппаратура и методы плазменных исследований. Атомиздат, 1965.
22. W. Makos. Rev. Sci. Instr., 38, 352, 1967.
23. Ф. М. Гайсин, Г. Ю. Даутов, А. М. Миннигулов. Тез. докл. Всес. школы-конф. молодых ученых по физ. плазмы. Харьков, стр. 127, 1977.