

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Е. Зуев, Ю. Д. Копытин, Е. Т. Протасевич,
В. А. Хан, Образование долгоживущих плазмоидов при охлаждении ВЧ-разряда потоком водно-капельного аэрозоля,
Докл. АН СССР, 1987, том 296, номер 2, 337–340

<https://www.mathnet.ru/dan48069>

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

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

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

17 мая 2025 г., 12:22:11



1. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Лаптев В.В. и др. Препринт ФИАН, 1982, № 14; Квантовая электрон., 1983, т. 10, № 1, с. 140–144. 2. Жариков Е.В., Осико В.В., Прохоров А.М., Шербаков И.А. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1984, т. 48, № 7, с. 1330–1342. 3. Григорьев В.Н., Егоров Г.Н., Жариков Е.В. и др. Препринт ИОФАН, 1986, № 52. 4. Жариков Е.В., Лаптев В.В., Натаров С.Ю. и др. — Квантовая электрон., 1985, т. 12, № 11, с. 2198–2199.

УДК 537.535

Ф И З И К А

Академик В.Е. ЗУЕВ, Ю.Д. КОПЫТИН, Е.Т. ПРОТАСЕВИЧ, В.А. ХАН

ОБРАЗОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ПЛАЗМОИДОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЧ-РАЗРЯДА ПОТОКОМ ВОДНОКАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ

При использовании в качестве плазмогасящего состава частиц водного аэрозоля экспериментально обнаружен эффект образования из первичной плазмы ВЧ-разряда долгоживущего плазмоида. Для объяснения эффекта предложена модель квазинейтральной аэрозольной плазмы, принципиальная роль в образовании которой принадлежит процессам термического сжатия исходного объема плазмы и последующей переконденсации пересыщенных паров воды на ионах.

Экспериментальные исследования проводились на установке, которая включала: ВЧ-генератор (средняя мощность $P = 60$ кВт; рабочая частота $\omega = 37$ МГц, длительность импульсов $t_{\text{и}} = 10\text{--}60$ мс, частота следования $F = 5$ Гц); кварцевую камеру длиной 40 см и диаметром 7 см. Расстояние между кольцевыми электродами равнялось 2 см. В торце горизонтальной части камеры установлен штуцер для откачки воздуха из разрядного объема и распыления воднокапельного аэрозоля. Давление в камере регулировали от 10 Па до атмосферного с помощью механического наноса. Поток частиц водного аэрозоля (среднеквадратичный радиус $a_0 = 3\text{--}5$ мкм, концентрация $N_a = 10^2\text{--}10^5$ см $^{-3}$) поступал в зону разряда через буферный объем, что позволило регулировать расход аэрозоля и избежать разгерметизации рабочей камеры.

Газовая температура T измерялась с помощью интерферометра Фабри–Перо по уширению линии водорода H_{β} ($\lambda = 486,17$ нм). Температура электронов T_e оценивалась из отношения интенсивностей спектральных линий азота. Концентрация электронов определялась интерференционным методом (рабочие длины волн $\lambda = 8$ и 4 мм). Оптический спектр испускания плазмы ВЧ-разряда регистрировался спектрометром типа СТЭ-1 на фото пленку. Длительность послесвечения определялась с помощью фотоумножителя, сигнал с которого подавался на осциллограф. Более подробное изложение перечисленных методик, а также результаты предварительных измерений содержатся в [1–4]. Исходная газоразрядная плазма ВЧ-разряда имела следующие характеристики: концентрация электронов $N_e = (0,8\text{--}2,0) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, $T = (1,0\text{--}1,2) \cdot 10^3$ К, $T_e = 0,5$ эВ, давление $P = 10\text{--}20$ Па. Цвет разряда в разреженном воздухе белый, характерное время послесвечения $t \approx 40$ мкс. В результате инъекции в разрядный объем частиц воднокапельного аэрозоля разряд в процессе охлаждения стягивался к центру рабочей камеры, его свечение приобретало голубоватую окраску и резко уменьшалось по интенсивности. Время послесвечения возрастало до 10^{-3} с.

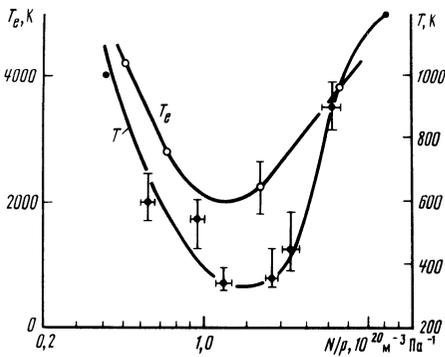


Рис. 1. Экспериментальные зависимости газовой (T) и электронной (T_e) температур плазмы от параметра влажности N/P

С повышением объемной мощности ВЧ-накачки до $10\text{--}20 \text{ Вт/см}^3$ был обнаружен особый режим разряда, при котором в месте контакта исходной плазмы с набегающим потоком аэрозоля возникал ярко-оранжевого цвета плазмоид с резко очерченной границей квазисферической формы и характерным диаметром $\sim 5 \text{ см}$. Время жизни плазмоида оценивалось по его

свечению сопоставлением с периодом следования ионизирующих ВЧ-импульсов ($1/F$) и оказалось аномально большим: $t_{\text{ж}} = (2 - 3) / F \approx (0,4 - 0,6) \text{ с}$. Плазмоид легко увлекался потоком воздуха, поступающим в камеру вместе с дисперсной фазой, перемещаясь к центру разрядной трубки со скоростью $0,5 - 1,0 \text{ м/с}$. Плазмоид может регулярно воспроизводиться в лабораторных условиях, когда средняя концентрация испарения молекул воды составляет $N = (1,75 - 3,00) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Указанные значения соответствуют положению минимума на кривой экспериментальной зависимости газовой и электронной температур плазмы от параметра влажности N/P , представленной на рис. 1. Резонансный характер отбора энергии в плазме служит предпосылкой для формирования переохлажденного плазмоида. В области минимума высокочастотный разряд приобретает газовую температуру $T = 300\text{--}350 \text{ К}$ и температуру электронов $T_e \approx 0,2 \text{ эВ}$. При добавлении в разряд молекул воды в эмиссионном спектре начинают преобладать спектральные линии продуктов ее разложения (линии водорода серии Бальмера и атомарного кислорода: $\lambda = 573,70; 543,683; 501,929; 457,70 \text{ нм}$ и др.), что свидетельствует об определяющем вкладе молекул H_2O в гашение разряда за счет неупругих столкновений с электронами и тяжелыми частицами плазмы.

С целью интерпретации результатов рассмотрим принципиальную возможность образования долгоживущей "холодной" плазмы на основе квазинейтрального ансамбля заряженных частиц аэрозоля. Подобного типа аэрозольная плазма является по существу предельным случаем широко распространенной в природе электрон-ионной плазмы с макрочастицами конденсированной дисперсной фазы (углеродное пламя, эрозионная приповерхностная плазма и т.п.). Модель аэрозольной плазмы предполагает, что все электрические заряды адсорбированы на макрочастицах веществ. Последние находятся в окружении нейтрального "холодного" газа, т.е. в условиях, когда пренебрежимо мала роль процессов термоэлектронной десорбции и термоионизации в газе.

В условиях нашего эксперимента возникновение аэрозольной плазмы можно рассматривать как результат быстрого охлаждения первичной плазмы водяным паром и последующей переконденсации паров на молекулярных ионах с образованием мелкодисперсного аэрозоля. Источником пара служат инжестируемые в первичную горячую плазму частицы грубодисперсного водного аэрозоля.

Перечислим основные физико-химические процессы, которые обуславливают формирование из первичной дебаевской плазмы газового разряда "холодной" аэрозольной плазмы. Использование в качестве плазмогасящего состава потока частиц переохлажденного водного аэрозоля, истекающего из форсунки в разряженную ВЧ-плазму, приводит к нарастающему процессу снижения электронной T_e и газовой T температур плазмы за счет энергозатрат на испарение капель и последующих эндо-

термических столкновительных взаимодействий электронов и ионов с парами воды, приводящих к их колебательному возбуждению и диссоциации на молекулярные и ионные фрагменты типа H_2 , O_2 , H_2O_2 , OH , H_3O^+ и др. Охлаждение электронов до температур $T_e \lesssim 2 \cdot 10^3$ К приводит к образованию ионно-молекулярной плазмы в результате трехчастичных взаимодействий с участием O_2 , H_2O и продуктов разложения воды, главным итогом которых являются ионы аксония H_3O^+ и радикала OH^- . Согласно [6] при концентрациях $[O_2] \approx 10^{19}$ см⁻³ характерные времена процесса образования ионно-молекулярной плазмы оцениваются как 10^{-8} с. При $T \lesssim 10^3$ К в атмосфере насыщенных паров процесс формирования ионно-молекулярной плазмы сопровождается гидратацией ионов, существенно, в 2–10 раз, уменьшающей подвижность носителей зарядов.

Заключительная и наиболее важная стадия образования заряженных водных капель реализуется за счет изобарного сжатия объема плазмы по мере ее охлаждения. Сжатие плазмы приводит к состоянию глубокого пересыщения водяных паров, обеспечиваемому при избыточных парциальных давлениях паров по отношению к насыщенному – от $P_{\text{п}}/P_s = 3 - 4$ – эффективную переконденсацию воды на ионах и последующий рост капель до макроскопических размеров $a = 10^{-6} - 10^{-5}$ см, аналогично процессу, например, в камере Вильсона [5]. Как следует из экспериментальных данных, приведенных на рис. 1, газовая температура плазмы по сравнению с исходной падает примерно в 5 раз, что соответствует изобарному уменьшению объема, занимаемого плазмой, более чем на порядок величины. Характерные времена сжатия и роста капель должны быть малы во избежание рекомбинации зарядов. Минимальное время сжатия оценивается как $a_0/c_s = 10^{-8} - 10^{-7}$ с, где c_s – скорость звука и $a_0 = 10^{-4} - 0,3 \cdot 10^{-3}$ – начальный средний радиус капель в набегающем на плазму аэрозольном потоке, определяющий характерный размер микронеоднородностей концентрации паров. Оценки времени роста капель до радиуса $a = 10^{-6}$ см на ионах при $P_{\text{п}}/P_s = 2 - 4$ на основании [1] составляют $10^{-6} - 10^{-8}$ с. Характерное время рекомбинации t_p связано с подвижностью ионов (или кластеров) формулой Ланжевена [6]. Так, при $N_e = 10^{12}$ см⁻³ для случая молекулярных ионов получаем, что $t_p \approx 10^{-6}$ с.

Аэрозольную плазму можно характеризовать общепринятыми в физике низкотемпературной плазмы параметрами: радиусом Дебая–Гюккеля r_D и параметром межчастичного кулоновского взаимодействия γ_p [7].

При $\gamma_p^{1/2} \ll 1$ плазма является дебаевской (идеальной), а при $\gamma_p^{1/2} \gg 1$ – кулоновской (неидеальной). В условиях изобарного сжатия исходной идеально газовой плазмы в результате ее охлаждения парами воды концентрация носителей зарядов соответственно повышается, что может привести к существенному росту параметра неидеальности. Так, для $N_a = 10^{11}$ см⁻³ и $T = 300$ К получаем, что $\gamma_p \approx 1$. В то время как для исходной (не переохлажденной) плазмы с $T = 1,5 \cdot 10^3$ К и $N_a = 10^{11}$ см⁻³ получаем, что $\gamma_p \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$.

Рассмотрим специфику процессов рекомбинации зарядов в аэрозольной плазме. Наиболее важное отличие от газоразрядной плазмы заключается в том, что столкновение разноименно заряженных частиц приводит, как правило, к образованию электрически нейтральных капель электролита, т.е. не сопровождается высвобождением полной энергии рекомбинации ионов, как это происходит в газовой фазе. Ниже обращается внимание на возможность значительного возрастания времени жизни аэрозольной плазмы по сравнению с газоразрядной, причем как идеальной, так и неидеальной.

Оценки показали, что для плазмы первого типа можно указать диапазон оптимальных размеров капель $a = 10^{-6} - 10^{-5}$ см, в пределах которого броуновские соударения при $T = (2 - 3) \cdot 10^2$ К маловероятны. При сближении таких капель возникает хорошо известный в механизме кинематической коагуляции аэрозолей [5] эффект

взаимного искривления траекторий частиц огибающими их гидродинамическими потоками.

В условиях вязкого обтекания существует критическое значение числа Стокса stk^* , начиная с которого для всех $stk \leq stk^*$ коэффициент коагуляции $\varepsilon \approx 0$. Так, для капель с единичным электрическим зарядом и $T = 300$ К на основании [5] получаем следующие оценки: при $a = 10^{-7}$ см $stk \approx 0,3$, $stk^* \approx 10^2$, $\varepsilon \approx 0,66$. При $a \geq 10^{-6}$ см $stk \leq 10^{-1}$, $stk^* = 0,61$, $\varepsilon \approx 0$. Соответствующие оценки времени рекомбинации t_p дают, что при $N_a = 10^{12}$ см⁻³ для $a = 10^{-7}$ см $t_p \approx 0,045$ с. В то время как для $a \geq 10^{-6}$ см с учетом эффекта гидродинамического обтекания $\varepsilon \approx 0$ и $t_p \rightarrow \infty$. Последнее можно трактовать как возникновение стационарного состояния дебаевской аэрозольной плазмы, устойчивость которого будет зависеть от процессов следующего порядка малости, обусловленных полидисперсностью аэрозоля (нестабильностью слишком мелких капель с $a \lesssim 10^{-6}$ см), термодинамическим равновесием пар-жидкость, временем амбиполярной диффузии аэрозольного облака и др.

Во втором предельном случае – кулоновской (неидеальной) аэрозольной плазмы с $\gamma_p^{1/2} \gg 1$ – можно также указать на возможность существенного замедления рекомбинационных процессов из-за большой роли многочастичных кулоновских взаимодействий, а также поляризационных взаимодействий типа "заряд-нейтрал".

Из анализа задачи следует, что кулоновское поле элементарного заряда существенно экранируется как на больших расстояниях ($r \gg r_D$), так и в момент контакта двух капель ($r \leq 2a$). Первый эффект в случае $N_a^{-1/3} \gg r_D$ приводит к замедлению процесса сближения разноименно заряженных капель, так как их взаимодействие уменьшено в $\exp(r/r_D)$ раз. Второй эффект из-за значительной величины диэлектрической проницаемости конденсированной воды практически исключает влияние единичных зарядов на коэффициент захвата капель.

Интересно отметить, что облачко квазиравновесной "холодной" аэрозольной плазмы (в особенности неидеальной) размером $R_0 \gg r_D$ обладает явно выраженными свойствами поверхностного натяжения с эффективной толщиной приповерхностного слоя порядка радиуса Дебая-Гюккеля. Кроме того, электрофизические свойства изложенной модели плазмы имеют сходство с характеристиками растворов электролитов, что может представлять интерес как для объяснения природы шаровой молнии, так и в целом ряде научно-технических приложений, поскольку вместо воды в качестве плазмогасящих составов могут использоваться полярные молекулы других веществ с более высокими температурами фазовых переходов.

Институт физики атмосферы
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
3 VI 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.Е., Землянов А.А., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле. Новосибирск: Наука, 1984. 223 с.
2. Протасевич Е.Т., Капичка В., Бралец А. – ЖТФ, 1985, т. 55, вып. 4, с. 743–745.
3. Протасевич Е.Т., Секисов Ф.Г. – Изв. вузов. Физика. Деп. ВИНТИ, 1985, № 1294–85.
4. Лашук Н.А., Протасевич Е.Т., Толмачев В.И., Хан В.А. – ПМТФ, 1985, № 5, с. 3–5.
5. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 350 с.
6. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. М.: Наука, 1978. 416 с.
7. Фортгов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. Черноголовка, 1984. 263 с.