

факторы, которые нарушают идеализированную постановку задачи в вакууме (наличие показателя преломления вещества $n \neq 1$, экранирующее влияние зарядов других частиц и т. д.), которые нарушат когерентный рост потока и обеспечат конечность его величины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Дубрович В. К. Сообщения САО, 1972, № 6, с. 27. [2] Брагинский В. Б. и др. ЖЭТФ, 1973, 65, № 5, с. 1729. [3] Денисов В. И., Логунов А. А. ЭЧАЯ, 1982, 13, № 4, с. 757. [4] Григорьев В. И. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1982, 23, № 3, с. 34. [5] Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций. М.: ИЛ, 1949. [6] Денисов В. И. Изв. вузов. Физика, 1978, № 1, с. 137.

Поступила в редакцию
31.10.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 4

УДК 533.932

ДИНАМИКА ПОПЕРЕЧНОГО КАТАФОРЕЗА В НЕ—ХЕ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ РАЗРЯДНОГО ТОКА

А. М. Девятов, В. М. Шибков, Л. В. Шибкова

(кафедра электроники)

Для оптимизации работы существующих газоразрядных устройств и целенаправленной разработки и конструирования новых приборов, использующих в качестве рабочего вещества смесь газов, необходимо всестороннее изучение физических процессов, протекающих в плазме разряда в этих смесях. Одной из особенностей такой плазмы является разделение компонент смеси в продольном и радиальном направлениях [1]. Это явление существенно снижает коэффициент полезного действия приборов, работающих на смесях газов. Следует отметить, что явление продольного разделения довольно подробно изучено [2—5], тогда как экспериментальных данных о радиальном разделении и особенно о динамике этого процесса в настоящее время практически нет.

В качестве объекта исследования была выбрана смесь инертных газов гелия и ксенона, которая характеризуется высокой степенью разделения компонент смеси (из-за большого различия потенциалов ионизации). Зависимость уровня радиального разделения компонент смеси в положительном столбе разряда постоянного тока подробно исследована нами в работе [6]. В настоящей работе изучается динамика установления распределения плотности примеси по сечению разрядной трубки. К поперечному градиенту концентрации атомов примеси могут приводить такие механизмы [7, 8], как «ионный ветер»; передача кинетической энергии, которую приобретают ионы в радиальном электрическом поле, атомам газа; термодиффузия. Однако оценки показывают, что в условиях эксперимента радиальное разделение за счет этих процессов пренебрежимо мало по сравнению с наблюдаемым. Если же рассчитать степень поперечного перераспределения компонент смеси в предположении, что механизмом разделения является радиальный катафорез, то согласование расчетной и измеренной величин [6] оказывается удовлетворительным.

Радиальный ход концентрации атомов ксенона в основном состоянии определялся по измеренным методом [6] поперечным распределениям интенсивностей линий гелия и ксенона в разрядной трубке диа-

метром 3 см, длиной 20 см. Разрядный ток менялся от 0,06 до 0,3 А; давление гелия — от 0,08 до 0,8 Тор; парциальное давление ксенона — от $3 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Тор. Для получения режима импульсной модуляции разрядного тока был собран модулятор по схеме с частичным разрядом накопительной емкости. Параметры схемы позволяли получать импульсы тока длительностью до 1 мс с крутизной переднего фронта $\sim 10^6$ А/с и заднего — $(3 \div 5) \cdot 10^5$ А/с. Изменения во времени радиальных профилей интенсивности регистрировались с помощью установки, блок-схема которой приведена в работе [9].

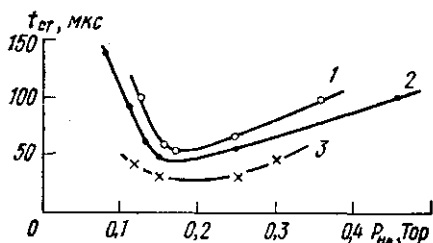


Рис. 1 Время установления стационарного уровня радиального катафореза при $P_{Xe} = 10^{-3}$ Тор в зависимости от давления гелия для трех значений разрядного тока i : 0,06(1), 0,15(2) и 0,3(3) А

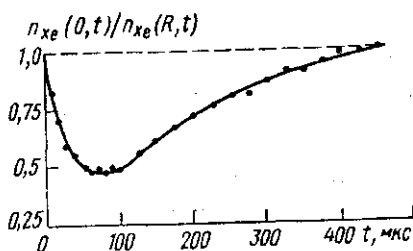


Рис. 2. Временной ход концентрации атомов ксенона в основном состоянии на оси разрядной трубки за время импульса разрядного тока ($t_{им} = 100$ мкс) и после его окончания: $P_{He} = 0,25$ Тор, $P_{Xe} = 10^{-3}$ Тор, $i = 0,15$ А

Полученная экспериментальная зависимость времени $t_{ст}$ радиального разделения смеси от давления гелия и разрядного тока приведена на рис. 1. Видно, что зависимость $t_{ст}$ от давления буферного газа имеет немонокотный характер, тогда как при всех исследованных давлениях гелия с ростом разрядного тока время $t_{ст}$ монотонно уменьшается.

В данной работе были проведены также измерения времени $t_{в}$ восстановления однородного по радиусу разрядной трубки распределения атомов ксенона после окончания импульса разрядного тока. С этой целью на разрядную трубку подавался второй импульс с задержкой от нуля до нескольких миллисекунд относительно заднего фронта первого импульса и проводились измерения радиального профиля концентрации атомов ксенона в основном состоянии в моменты времени, соответствующие начальным участкам второго импульса ($\Delta t = 3$ мкс). Длительность и амплитуда зондирующего импульса выбирались такими, что он, подогревая электронный газ, вызывал появление исследуемых спектральных линий и в то же время заметно не искажал распределение по радиусу тяжелых частиц. На рис. 2 приведены результаты измерения концентрации ксенона в центре разрядной трубки $n_{Xe}(0, t)$ в стадии послесвечения, из которых следует, что в условиях эксперимента время восстановления $t_{в} \sim 300$ мкс, что близко к времени, необходимому для выравнивания концентрации атомов ксенона по радиусу разрядной трубки за счет диффузии нейтральных атомов ксенона. При этих же условиях в импульсе разрядного тока (см. рис. 1, 2) время установления стационарного уровня разделения компонент смеси значительно меньше этой величины ($t_{ст} \sim 60$ мкс).

Рассмотрим, чем обусловлена динамика поперечного разделения смеси в импульсе. Время $t_{ст}$ определяется временем достижения рав-

новесия между потоком ионов легкоионизируемой компоненты к стенкам разрядной трубки и обратным потоком атомов этой компоненты от стенок в область разряда. С ростом давления основного газа диффузия атомов ксенона от стенок в область разряда затрудняется, и время, необходимое для возврата нейтральных атомов, а следовательно и $t_{ст}$, должно увеличиваться. Эксперимент, однако, показывает уменьшение $t_{ст}$ с ростом давления гелия. Для объяснения полученных зависимостей времени поперечного разделения смеси от параметров разряда было высказано следующее предположение. Известно [6], что с ростом парциального давления гелия и разрядного тока степень поперечного перераспределения увеличивается, т. е. увеличивается концентрация атомов примеси в пристеночных областях. А это приведет к тому, что по мере увеличения разделения смеси ионизация примесных атомов будет преимущественно происходить все ближе к стенкам разрядной трубки. Стационарный уровень катафореза в этом случае будет определяться равенством потока ионов примеси из областей, где наблюдается максимум в радиальном распределении ионов, и обратным потоком нейтральных атомов в эти же области, что приведет к уменьшению времени установления стационарного уровня разделения с ростом разрядного тока и парциального давления гелия.

Для проверки этого предположения измерялись радиальные распределения ионов ксенона в различные моменты времени по методу, предложенному в работе [10] и позволяющему определить относительные концентрации ионов в двухкомпонентной плазме. Результаты измерений при давлении гелия 0,25 Тор, давлении ксенона 10^{-3} Тор и разрядном токе 0,15 А представлены на рис. 3. Видно, что в начальные моменты времени радиальное распределение ионов ксенона колоколо-

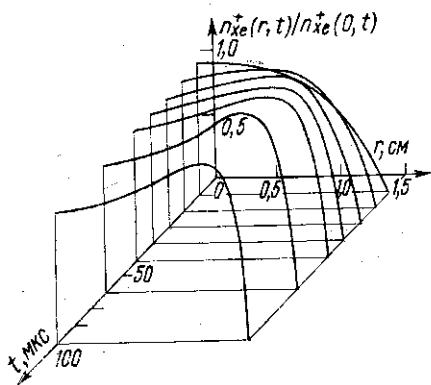


Рис. 3. Изменение во времени радиального распределения ионов ксенона при $P_{He}=0,25$ Тор, $P_{Xe}=10^{-3}$ Тор, $i=0,15$ А

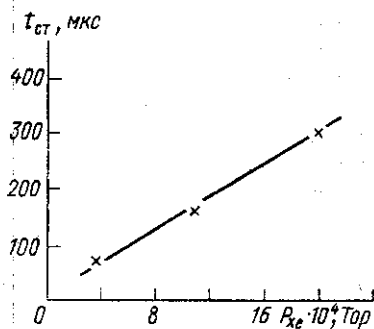
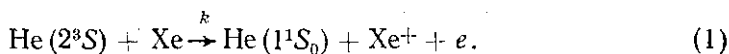


Рис. 4. Зависимость времени установления стационарного уровня концентрации атомов ксенона в основном состоянии на оси разрядной трубки от давления ксенона: $P_{He}=0,8$ Тор, $i=0,15$ А

образное, с течением времени оно уплощается, и область, где наблюдается максимум в распределении ионов примеси по радиусу, перемещается от оси разрядной трубки к ее стенкам, т. е. происходит уменьшение эффективной диффузионной длины разряда для атомов примеси, определяемой в этом случае расстоянием между максимумом в распре-

делении ионов примеси и стенкой разрядной трубки. Этот результат показывает, что уменьшение времени $t_{ст}$ с ростом давления гелия (см. рис. 1) обусловлено резким уменьшением эффективной диффузионной длины. При дальнейшем увеличении давления гелия спад времени установления стационарного уровня катафореза замедляется и при $P_{He} > 0,2$ Тор наблюдается рост $t_{ст}$. Это объясняется тем, что при таких давлениях гелия эффективная диффузионная длина разряда для атомов примеси практически не меняется, а диффузия и атомов, и ионов примеси затрудняется с ростом давления буферного газа.

Используемый в настоящей работе метод определения радиальной зависимости концентрации атомов примеси в основном состоянии имеет, в силу своей специфики, ограниченную область применения [6]. Для того чтобы расширить область параметров разряда, в которой можно корректно измерять пространственное распределение атомов примеси, был предложен метод [11], основанный на том, что эффективность девозбуждения метастабильных атомов гелия в состоянии 2^3S в разряде в смеси гелий — ксенон зависит от концентрации атомов ксенона в основном состоянии. Это связано с тем, что в исследуемой нами смеси эффективно протекает реакция ионизации Пеннинга:



Для постоянной времени релаксации τ_p метастабильного состояния 2^3S гелия в послесвечении можно записать выражение

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_z} + kn_{Xe}, \quad (2)$$

где n_{Xe} — концентрация атомов ксенона в основном состоянии; τ_z — постоянная времени тушения метастабильного состояния 2^3S гелия за счет столкновений с электронами и друг с другом и за счет диффузии к стенкам разрядной трубки; k — константа скорости реакции (1).

Измеряя время релаксации метастабильного состояния 2^3S гелия после импульсов разрядного тока различной длительности в различных точках по радиусу разрядной трубки, можно изучить динамику радиального распределения атомов ксенона в импульсе разрядного тока. Дело в том, что в процессе установления радиального катафореза атомы ксенона уходят из центра разрядной трубки, следовательно, уменьшается величина $n_{Xe}(0, t)$ и соответственно этому (см. (2)) увеличивается постоянная времени релаксации τ_p . После того как длительность импульса $t_{им}$ разрядного тока достигнет значения, равного времени $t_{ст}$ установления стационарного уровня поперечного перераспределения компонент смеси, дальнейшее увеличение $t_{им}$ не приводит к изменению эффективности тушения метастабильных атомов гелия в стадии послесвечения разряда. Следует отметить, что предложенный метод позволяет с достаточной степенью точности найти время поперечного разделения при больших давлениях гелия и ксенона, когда применение метода определения степени радиального разделения по интенсивностям спектральных линий все более затрудняется из-за влияния ступенчатых процессов возбуждения.

Измерения временного хода концентрации атомов ксенона в основном состоянии проводились предложенным методом в центре разрядной трубки радиусом 1,5 см при давлении гелия 0,8 Тор и трех значениях давления ксенона: 3,5; 10 и $20 \cdot 10^{-4}$ Тор. На рис. 4 представлена зависимость времени выхода концентрации атомов ксенона на

стационарный уровень от P_{Xe} . Из приведенных результатов видно, что время установления стационарного уровня катафореза увеличивается с ростом парциального давления ксенона от ~ 75 мкс при $P_{Xe} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Тор до ~ 300 мкс при $P_{Xe} = 2 \cdot 10^{-3}$ Тор. Такую зависимость времени разделения смеси от давления ксенона можно объяснить тем, что с увеличением парциального давления ксенона уменьшается степень его поперечного перераспределения. Это приводит к тому, что эффект уменьшения диффузионной длины будет играть все меньшую роль. Кроме того, при достаточно большом процентном содержании ксенона в смеси диффузия атомов ксенона будет определяться не только столкновениями с атомами гелия, но и соударениями атомов ксенона друг с другом, т. е. коэффициент диффузии атомов ксенона будет уменьшаться (коэффициент диффузии атомов ксенона в гелии $\sim 400 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ [12], тогда как в ксеноне — $43 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ [13]).

В настоящее время нам не известны работы, в которых задача о динамике поперечного разделения решается аналитически. Для того чтобы получить количественные оценки времени выхода поперечного разделения смеси на стационарный уровень, составлялась разностная задача по нестационарному уравнению диффузии для атомов ксенона в основном состоянии. Эта разностная задача решалась на ЭВМ методом итераций. Рассчитанное таким способом время выхода радиального катафореза на стационарный уровень ($P_{He} = 0,45$ Тор, $P_{Xe} = 10^{-3}$ Тор) имеет величину ~ 130 мкс, что в пределах ошибки совпадает с экспериментально измеренным $t_{\text{ст}} \approx 100$ мкс (см. кривую 2 рис. 1).

Таким образом, в работе исследована динамика радиального катафореза в смеси гелий — ксенон. Найдено, что время установления стационарного уровня радиального разделения компонент смеси в несколько раз меньше времени восстановления однородного по радиусу распределения атомов примеси после окончания импульса тока. Обнаружено явление уменьшения эффективной диффузионной длины разряда для атомов примеси, которое существенно влияет на время установления стационарного уровня радиального катафореза. Предложен и применен метод определения временной зависимости радиального разделения компонент в пеннинговских смесях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. 1. М.—Л.: Гостехиздат, 1952, с. 450—459 [2] Пекар Ю. А. ЖТФ, 1967, 37, № 6, с. 1112. [3] Sanctogum C. Physica, 1976, 85, В+С, N 1, p. 209. [4] Sanctogum C., Bonte L., Jacques L. Physica, 1981, 104, С, p. 457. [5] Sanctogum C. Physica, 1976, 83, В+С, N 3, p. 367. [6] Волкова Л. М. и др. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1982, 23, № 3, с. 8. [7] Бабарицкий А. И., Жужунашвили А. И., Курко О. В. Физика плазмы, 1979, 5, № 5, с. 1145. [8] Курко О. В. Физика плазмы, 1978, 4, № 5, с. 1070. [9] Волкова Л. М. и др. Физика плазмы, 1981, 7, № 2, с. 296. [10] Вавилин Е. И., Вагнер С. Д., Платонов Ф. С. Ученые записки Новгород. гос. пед. ин-та. Вопросы физики. Новгород, 1966, 9, с. 56. [11] Devyatov A. M., Shibkova L. V. In: Proc. XV ICPiG, contrib. papers. Part 1. Minsk, 1981, p. 57. [12] Hogervorst W. Physica, 1971, 51, p. 59. [13] Гиршфельдер Дж., Картисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961, с. 929.

Поступила в редакцию
02.11.83