

УДК 533.9.082

А.Ю. Грабовский, А.С. Мустафаев**РЕЛАКСАЦИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ В РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ
ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ**

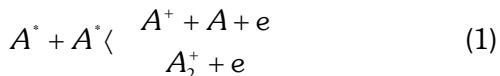
Рассмотрены условия, в которых возможно возникновение неустойчивостей в плазме послесвечения инертных газов. Выполненные эксперименты подтвердили правильность предположений.

Ключевые слова: функция распределения электронов, энергетическая релаксация, плазма послесвечения, пучковая неустойчивость.

Известно [1, 2], что система, состоящая из плазмы и проходящего через нее потока заряженных частиц, при определенных условиях становится неустойчивой. В [3–5] показано, что такая неустойчивость возникает в плазме даже при наличии слабой анизотропии функции распределения электронов по скоростям (ФРЭС). Традиционно в работах, посвященных изучению распределения электронов в распадающейся плазме инертных газов [6–8], процессы возникновения неустойчивостей и их влияние на вид функции распределения электронов не анализировалось.

В настоящей работе впервые рассмотрена возможность возникновения пучковой неустойчивости в распадающейся плазме послесвечения инертных газов, в которой в результате физико-химических процессов возникают быстрые электроны.

Рассмотрим плазму послесвечения инертных газов, в которой быстрые электроны возникают в результате реакций хемоионизации



и ударов второго рода между возбужденными атомами и электронами



Здесь A и A^* — атомы в основном и возбужденном состояниях; A^+ , A_2^+ — атомарные и молекулярные ионы; e (e) — быстрые (медленные) электроны. Энергии быстрых электронов, возникающих при физико-химических процессах в инертных газах, ε_1 (реакция (1)) и ε_2 (реакция (2)) приведены в таблице.

Газ	ε_1 , eV	ε_2 , eV
Гелий	14.4	19.8
Неон	11.0	16.7
Аргон	7.3	11.6
Криптон	6.0	10.0
Ксенон	4.3	8.4

Амбиполярное электрическое поле, существующее в плазме, определяется средней энергией электронов и слабо влияет на диффузию быстрых электронов. В этих условиях преимущественное движение быстрых электронов к границам плазменного объема формирует анизотропию функции распределения, несмотря на то, что сам «источник» быстрых электронов является изотропным. Степень анизотропии ФРЭС определяется давлением газа, размерами плазменного объема и концентрацией электронов. При достижении «критической» концентрации

электронов возникает плазменно-пучковая неустойчивость, которая приводит к энергетической релаксации ФРЭС и размыванию максимумов вблизи энергий ε_1 и ε_2 [9].

Проанализируем данные измерений функции распределения электронов в плазме послесвечения гелия. Эксперименты проводились в разрядной трубке диаметром 2.7 см при давлении газа 1 mm Hg [7]. Плазма создавалась импульсами тока с амплитудой от 0.1 до 1.0 A длительностью 10 μ s и частотой повторения 2 kHz. Функция распределения электронов по энергиям измерялась методом модуляции зондового тока с временным разрешением 10 μ s в момент времени 200 μ s после обрыва импульса тока. Одновременно регистрировались концентрации электронов n и метастабильных атомов гелия M в состоянии 2^3S_1 .

На рис. 1 представлены функции распределения электронов в плазме послесвечения гелия для различных значений концентрации электронов n . С ростом концентрации электронов уменьшается длина ленгмюровской волны λ и облегчается возможность

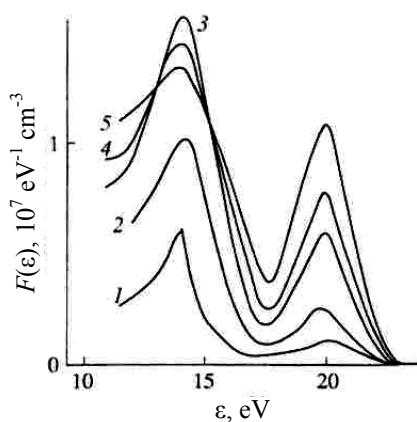


Рис. 1. Функция распределения электронов по энергиям $F(\varepsilon)$ в плазме послесвечения гелия: 1 — $n = 4.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; 2 — 10^{11} ; 3 — $2 \cdot 10^{11}$; 4 — $3 \cdot 10^{11}$; 5 — $4 \cdot 10^{11}$

возникновения плазменно-пучковой неустойчивости [2, 9]. Видно, что в энергетическом спектре действительно присутствуют группы быстрых электронов с энергиями $\varepsilon_1 = 14.4 \text{ eV}$ и $\varepsilon_2 = 19.8 \text{ eV}$. Дисперсия ФРЭС для группы электронов $\Delta\varepsilon_1$ заметно превышает $\Delta\varepsilon_2$. По-видимому, это связано с тем, что энергия ε_1 меньше ε_2 и соответственно меньше сечение возбуждения атомов гелия электронами этой группы. Это в свою очередь приводит к большей диффузационной длине $L_1 > L_2$ и соответственно большему времени жизни электронов этой группы.

Для сравнительного анализа трансформации вида функции распределения с изменением концентрации электронов на рис. 2 в относительных единицах представлена экспериментальная зависимость характерного времени жизни быстрых электронов T , которое пропорционально отношению амплитуды максимумов на функциях распределения при энергиях 14.4 и 19.8 eV к соответствующим скоростям возникновения электронов этих групп. Для рассматриваемых условий (без учета возбуждения волн в плазме) это время не должно зависеть от n (штриховая линия). Константы скоростей соответствующих процессов и скорости возникновения быстрых электронов определены по измеренным значениям концентраций n и M [8].

Анализ экспериментальных данных показывает, что заметная трансформация вида распределения электронов в распадающейся гелиевой плазме происходит уже при $n \geq 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Этот результат хорошо согласуется с пороговым критерием возникновения плазменно-пучковой неустойчивости и последующей энергетической релаксацией ФРЭС, установленным экспериментально в плазме низковольтного пучкового разряда в

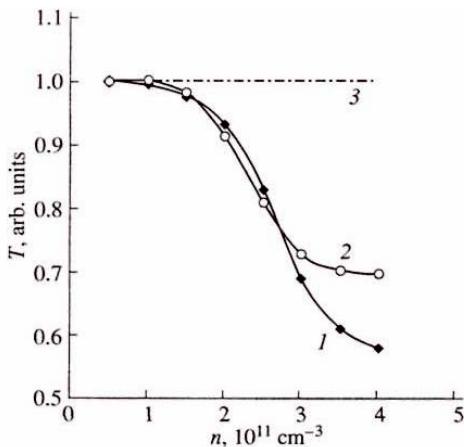


Рис. 2. Характерное время жизни быстрых электронов T (в относительных единицах.) в зависимости от n : 1 — для электронов с энергией $\varepsilon_1 = 14.4 \text{ eV}$, 2 — $\varepsilon_1 = 19.8 \text{ eV}$; 3 — расчет без учета возбуждения волн

инертных газах [9]. Отметим, что зарегистрированные изменения вида функции распределения электронов с ростом концентрации n существенно превосходят погрешности эксперимента, которые для относительных измерений не превышают 5 %.

Условие возникновения пучковой неустойчивости для распадающейся

плазмы послесвечения инертных газов удобно представить в виде

$$n \geq 1,7 \cdot 10^8 \varepsilon \sigma^2(\varepsilon) N_A^2, \quad (3)$$

где ε — энергия быстрых электронов в eV , n — концентрация тепловых электронов в cm^{-3} , N_A — концентрация нормальных атомов газа в cm^{-3} , $\sigma(\varepsilon)$ — сечение процесса упругого рассеяния электрона на атомах в cm^2 .

Подстановка соответствующих величин в выражение (3) приводит к наблюдаемому в эксперименте значению n , при котором начинается энергетическая релаксация функции распределения электронов в распадающейся плазме.

Таким образом, в результате проведенного анализа можно утверждать, что в плазме послесвечения инертных газов при определенных условиях возможно возникновение пучковой неустойчивости, изменяющей вид функции распределения электронов по энергиям и, как следствие, свойства плазмы. Это обстоятельство необходимо учитывать при использовании плазмы с быстрыми электронами для технологических целей.

Авторы признательны профессору И. Кагановичу за критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веденов А.А. Вопросы теории плазмы / А.А. Веденов; под ред. М.А. Леонтьевича. — М.: Атомиздат, 1963. Т. 3. — С. 203–244.
2. Иванов А.А. Физика сильнонеравновесной плазмы / А.А. Иванов. — М.: Атомиздат, 1977. — 352 с.
3. Mustafaev A.S., Mezentsev A.P. /A.S. Mustafaev, A.P. Mezentsev // J. Phys. D. — 1986. Vol. 19. N 5. P. — L69-L73.
4. Baksht E.G., Lapshin V.F., Mustafaev A.S. /E.G. Baksht, V.F. Lapshin, A.S. Mustafaev // J. Phys. D. — 1995. Vol. 28. N 5. — P. 689—693.
5. Baksht E.G., Lapshin V.E., Mustafaev A.S. /E.G. Baksht, V.F. Lapshin, A.S. Mustafaev // J. Phys. D. — 1995. Vol. 28. N 5. — P. 694—700.
6. Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Торонов О.Г. / В.И. Демидов, Н.Б. Колоколов, О.Г. Торонов // Физика плазмы. — 1986. Т. 12. № 6. — С. 702.
7. Demidov V.I., Kolokolov N.B. / V.L. Demidov, N.B. Kolokolov // Phys. Lett. A. — 1982. Vol. 89. — P. 397.
8. Колоколов Н.Б. Химия плазмы / Н.Б. Колоколов; под ред. Б.М. Смирнова. Вып. 12. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — С. 56—66.
9. Мустафаев А.С. / А.С. Мустафаев // ЖТФ. — 2001. Т. 71. Вып. 4. — С. 111—121. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Грабовский А.Ю. — аспирант, schwer@list.ru,
Мустафаев А.С. — доктор физико-математических наук, профессор, alexmustafaev@yandex.ru,
Санкт-Петербургский государственный горный университет.