

Представленные на рис. 1, 2 данные наглядно демонстрируют трудности получения и обработки информации в реальном ПТИ-эксперименте. Очевидно, что преобладающее число отсчетов в спектре Al приходится на пик характеристического излучения, соответствующего энергии 1,55 кэВ. Действительно, согласно теоретическим оценкам, ожидаемая интенсивность ПТИ составляет менее 0,1% интенсивности характеристического излучения. Поэтому область характеристического излучения на рис. 2 не представлена. Кроме того, уровень фона оказался достаточно высоким. В этой связи корректное вычитание фона стало возможным лишь на основе сопоставления полного числа электронов, проходящих через мишень, для каждого из измерений.

### Обсуждение результатов

Сравнение экспериментальных данных с теоретической кривой, представленной на рис. 2 и описывающей спектр интенсивности ПТИ на изолированном атоме [8], показывает, что они лишь качественно согласуются друг с другом (подчеркнем, что на рис. 2 представлены интенсивности излучений; для обычного ТИ эта величина описывается горизонтальной линией (!), но напомним, что вклад последнего в наблюдаемый поток излучения при выбранной в эксперименте геометрии оказывается несущественным). Учитывая трудные условия эксперимента с высоким уровнем фона, можно рассматривать полученные результаты как предварительные.

Тем не менее уже сейчас можно достаточно надежно отметить существенное различие между полу-

ченными в настоящей работе данными эксперимента с мишенями из сусального алюминия и результатами для алмазоподобного углерода [9]. Данные [9] указывают на сильное подавление ПТИ, в то время как в настоящей работе эффект подавления отсутствует. Это подтверждает исходное предположение, что пленка из сусального алюминия имеет структуру, близкую к аморфной. Вместе с тем различие в форме экспериментального спектра и теоретической кривой, по-видимому, указывает на присутствие в веществе мишени определенной доли поликристаллической фракции [8].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-17109).

### Литература

1. *Amus'ia M., Buimistrov V., Zon B. et al.* Polarization Bremsstrahlung of Particles and Atoms. N.Y., 1992.
2. *Korol A.V., Solov'ev A.V.* // J. Phys. B. 1997. **30**. P. 1105.
3. *Ter-Mikaelian M.* High Energy Electromagnetic Processes in Condensed Media. N.Y., 1972.
4. *Гарибян Г., Ши И.* // ЖЭТФ. 1971. **61**. С. 930.
5. *Барышевский В., Феранчук И.* // ЖЭТФ. 1971. **61**. С. 944.
6. *Ланко В., Насонов Н.* // ЖТФ. 1990. **60**. С. 160.
7. *Насонов Н., Сафронов А.* // ЖТФ. 1992. **62**. С. 1.
8. *Nasonov N.* // Abstract Int. Symp. RREPS-97. Tomsk, 1997.
9. *Blazhevich S., Chepurnov A., Grishin V. et al.* // Phys. Lett. 1996. **A 211**. P. 309.
10. *Amosov K., Kalinin B., Naumenko G. et al.* // Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1996. **63**. P. 145.

Поступила в редакцию  
24.06.98

## РАДИОФИЗИКА

УДК 537.523.74

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЕ ЕМКОСТНОГО ВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. Ф. Александров, В. П. Савинов, И. Ф. Сингаевский

(кафедра физической электроники)

С помощью энергоанализатора заряженных частиц проведено изучение электронного энергетического спектра плазмы емкостного ВЧ-разряда низкого давления в Хе и Не. Проанализированы механизмы формирования электронного энергетического спектра плазмы, включающие приэлектродные электронные пучки. Показано, что аномальный нагрев электронов ксеноновой плазмы обусловлен пучково-плазменной неустойчивостью. Обнаружено резкое уменьшение нагрева электронов плазмы с увеличением ВЧ-напряжения, что связано с проявлением эффекта Рамзауэра.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение электронного энергетического спектра (ЭЭС) приэлектродной плазмы емкостного ВЧ-разряда (ЕВЧР) низкого давления в инертных газах

(Хе, Не) и механизмов формирования ЭЭС, связанных с приэлектродными электронными пучками.

Исследовался ЕВЧР с использованием плоских электродов диаметром  $D = 3$  см и межэлектродным

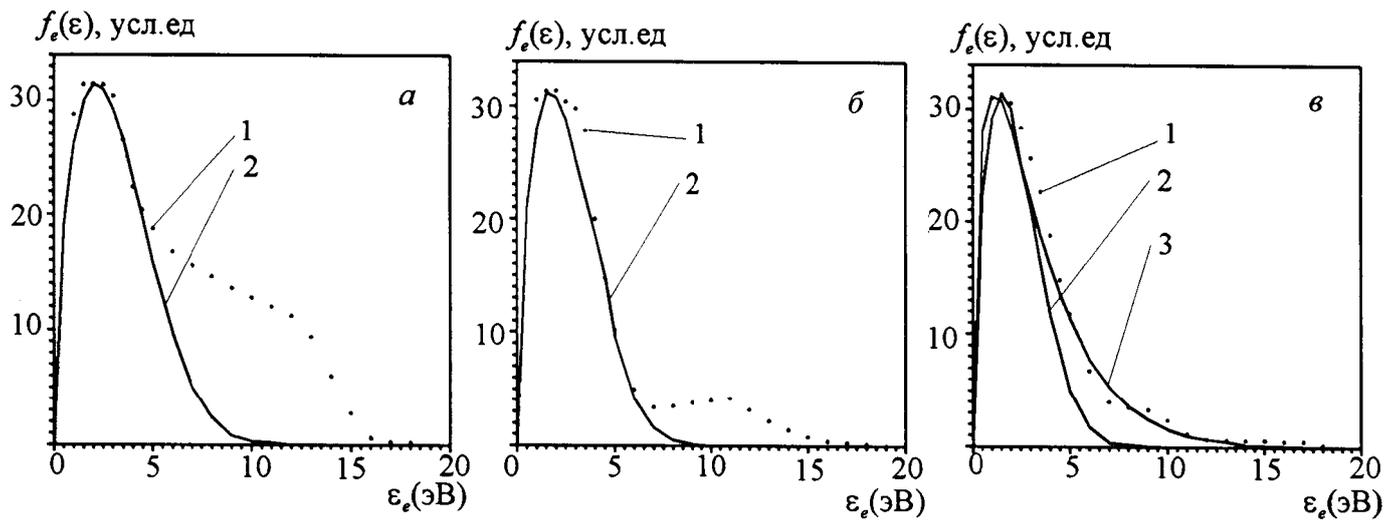


Рис. 1. Электронный энергетический спектр (Xe,  $p = 0,1$  Тор,  $f = 1$  МГц) при  $V_{\sim} = 600$  (а), 1000 (б) и 1200 В (в); экспериментальные данные настоящей работы (1), функции Дривестейна (2) и Максвелла с  $T_e = 2,2$  эВ (3)

расстоянием  $d = 6$  см. Один из электродов был заземлен. Давление рабочего газа  $p = 0,1$  Тор, частота ВЧ-поля  $f = 1$  МГц. Выбор относительно низкой частоты поля обусловлен тем, что исследования временного хода физических процессов проводились в течение одного периода ВЧ-поля, а также стремлением свести к минимуму нагрев электродов плазмы осциллирующим приэлектродным потенциальным барьером и существенно снизить уровень электромагнитных наводок в измерительной системе.

Объектом изучения служила плазма в приэлектродной области заземленного электрода, которая в ЕВЧР создавалась с помощью высокоэнергетичного электронного пучка, приходящего от активного электрода. При этом длина свободного пробега электронов пучка, вычисленная с учетом только столкновений пучковых электронов с нейтральными частицами, существенно превышала протяженность разрядного промежутка. Таким образом, заметный энерго вклад в разряд обеспечивался только при возбуждении пучково-плазменной неустойчивости, сопровождаемой генерацией вторичных СВЧ-полей [1] и резким сокращением длины энергетической релаксации пучка.

Обычно исследуется плазма центральных областей ЕВЧР, свойства которой близки к свойствам плазмы положительного столба тлеющего разряда постоянного тока.

Экспериментальное изучение приэлектродной плазмы, отличающейся более широким диапазоном изменения ее параметров, представляется весьма актуальным.

ЭЭС плазмы ЕВЧР исследовался с помощью 4-электродного энергоанализатора заряженных частиц с тормозящим электростатическим полем, размещавшегося позади заземленного электрода. Измерения проводились в квазистационарном режиме и

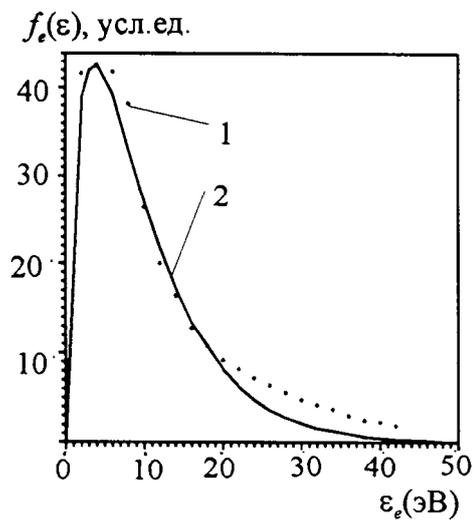


Рис. 2. Электронный энергетический спектр (Ne,  $p = 0,1$  Тор,  $f = 1,2$  МГц,  $V_{\sim} = 600$  В); экспериментальные данные настоящей работы (1) и функция Максвелла с  $T_e = 6,5$  эВ (2)

с разрешением во времени посредством осциллографирования сигналов энергоанализатора. Типичные квазистационарные ЭЭС плазмы ЕВЧР в Хе при различных амплитудах приложенного ВЧ-напряжения  $V_{\sim}$  представлены на рис. 1. Квазистационарный ЭЭС приэлектродной плазмы ЕВЧР в Не приведен на рис. 2.

Полученные ЭЭС демонстрируют избыток «горячих» электронов по сравнению с квазиравновесными энергетическими распределениями. Отметим, что сравнение экспериментальных ЭЭС с равновесными в данном случае является некорректным вследствие сильно нелокального характера механизмов формирования ЭЭС. Вместе с тем определенная близость полученных ЭЭС к квазиравновесным

Параметры физических условий в ЕВЧР в Хе ( $p = 0, 1$  Тор,  $f = 1$  МГц)

$V_{\sim}$ , В	$n_e \cdot 10^{-9}$ , см $^{-3}$	$T_{e1}$ , В	$T_{e\text{eff}}$ , В	$\omega_p \cdot 10^{-8}$ , с $^{-1}$	$\nu_e \cdot 10^{-8}$ , с $^{-1}$	$\kappa\nu_e \cdot 10^{-3}$ , с $^{-1}$	$\nu_{ee1} \cdot 10^{-3}$ , с $^{-1}$	$\delta_1 \cdot 10^{-8}$ , с $^{-1}$	$\delta_2 \cdot 10^{-8}$ , с $^{-1}$	$\delta_1/\nu_e$	$\delta_2/\nu_e$	$L_1/d$
600	1,5	—	4,3	22	13	10	4,9	0,93	1,8	0,07	0,14	2,7
800	2,5	—	3,9	28	11	9	9,5	1,4	2,2	0,13	0,2	2
1000	3,5	1,6	3,5	33	10,5	8,2	15	1,9	2,7	0,18	0,25	1,7
1200	9	2,2	3,0	54	7,2	5,9	35	4,7	4,3	0,65	0,6	0,7

Использованы обозначения:  $n_e$  — концентрация электронов,  $T_{e1}$  — температура группы «медленных» электронов;  $T_{e\text{eff}} = (2/3)\langle\varepsilon_e\rangle$ ,  $\langle\varepsilon_e\rangle$  — средняя энергия электронов, полученная из экспериментального ЭЭС;  $\omega_p$  — электронная плазменная частота;  $\nu_e$  — частота упругих столкновений электронов с атомами;  $\kappa\nu_e = (2m/M)\nu_e$  — характерная частота обмена энергией «медленных» электронов с атомами;  $m$ ,  $M$  — массы электрона и атома;  $\nu_{ee}$  — частота кулоновских  $e$ - $e$ -столкновений;  $\delta_1$  — инкремент столкновительно-диссипативной неустойчивости [1];  $\delta_2$  — инкремент бесстолкновительной неустойчивости [1];  $n_{eb}$  — плотность электронов пучка;  $L_1 = u_{eb}/\delta_1$  — характерная длина раскачки неустойчивости;  $u_{eb}$  — скорость электронов пучка;  $d$  — расстояние между электродами.

указывает на тенденцию к установлению соответствующих энергетических распределений. Для выяснения возможных механизмов формирования вышеупомянутых ЭЭС использованы наши данные о физических условиях в исследованном ЕВЧР в Хе (таблица).

Как видно из приведенных энергетических спектров (рис. 1), при пониженных ВЧ-напряжениях ( $V_{\sim} < 1$  кВ) распределение «медленных» электронов близко к распределению Дрювестейна. В этих условиях ЭЭС демонстрирует аномальное обогащение плазмы «горячими» электронами и наличие двух групп электронов — «медленных» и «быстрых».

Изучение ЭЭС плазмы ЕВЧР в Хе показывает, что при увеличении ВЧ-напряжения резко уменьшается количество «горячих» электронов, происходит плавный переход двухгрупповой функции распределения электронов по энергиям с дрювестейновским распределением «медленных» электронов к одностороннему квазимаксвелловскому распределению. Последнее отмечалось ранее в работе [2] при изучении ЕВЧР в Не и Аг и объяснялось относительно частыми кулоновскими столкновениями электронов, которые при  $V_{\sim} > 1$  кВ имели место и в наших экспериментальных условиях для разряда в Хе (см. таблицу).

В работе [2] обогащение плазмы ЕВЧР «горячими» электронами объяснялось стохастическим механизмом нагрева электронов плазмы осциллирующим приэлектродным потенциальным барьером, обеспечивавшим удельный энерговклад в плазму  $W \sim V_{\sim}^2 f^2$ , т.е. резко возраставший с ростом ВЧ-напряжения и частоты поля.

В нашей работе на основании анализа характеристик физических условий в ЕВЧР, приведенных в таблице, предполагалось, что в отличие от работы [2] в исследованных условиях основным механизмом обогащения ЭЭС «горячими» электронами является пучково-плазменная столкновительно-диссипа-

тивная неустойчивость с инкрементом [1]

$$\delta_1 = \omega_p \left( \frac{n_{eb} \omega_p}{n_e \nu_e} \right)^{1/2}.$$

Согласно данным таблицы, бесстолкновительная неустойчивость с инкрементом

$$\delta_2 = \omega_p \left( \frac{n_{eb}}{2n_e} \right)^{1/3}$$

в этих условиях практически не возбуждается вследствие выполнения условия  $\delta_2/\nu_e < 1$ .

С увеличением  $V_{\sim}$  значения величин  $\delta_1/\nu_e$ ,  $\delta_2/\nu_e$  также возрастают. Это свидетельствует о тенденции перехода режима возбуждения пучково-плазменных неустойчивостей в бесстолкновительный и должно привести к значительному уменьшению нагрева электронов плазмы СВЧ-полями неустойчивостей, возбуждаемых пучками, что и наблюдалось экспериментально (см. рис. 1).

Возрастание величин  $\delta_1/\nu_e$  с ростом  $V_{\sim}$  объясняется, в частности, уменьшением частоты упругих столкновений электронов с атомами  $\nu_e$ , что обусловлено эффектом Рамзауэра, ярко выраженным в Хе [3].

Экспериментальные данные относительно ЭЭС плазмы ЕВЧР в Не (рис. 2) показывают, что в этих условиях нагрев электронов плазмы был мал. Оценки на основании данных, аналогичных приведенным в таблице, для разряда в Не показали, что  $\delta_1 \sim \delta_2 \sim \nu_e$ . Отсюда следует, что в случае исследованного ЕВЧР в Хе пучково-плазменные неустойчивости были очень слабо выражены.

Вышеупомянутая зависимость ЭЭС плазмы ЕВЧР в Хе от  $V_{\sim}$  с учетом низкого значения частоты поля указывает на то, что в отличие от работы [2] основным механизмом нагрева электронов у нас не мог быть стохастический. Наблюдавшийся аномальный

нагрев электронов плазмы ЕВЧР в Хе (рис. 1,а), вероятнее всего, обусловлен СВЧ-полями пучково-плазменных неустойчивостей.

Согласно сказанному выше исследованный ЕВЧР в Хе можно рассматривать как новую разновидность ЕВЧР низкого давления — емкостной ВЧ-разряд со вторичным СВЧ-пробоем. По-видимому, с помощью оптимального подбора параметров ЕВЧР можно осуществить данный тип разряда и в других газах.

#### Литература

1. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М., 1988.
2. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. 1. P. 36.
3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М., 1961.

Поступила в редакцию  
22.07.98