

В заключение авторы приносят благодарность Б.Г. Лившицу за проявленный интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А н а г о н и А. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. N 3. P. 2455-2465.
- [2] С а х а е в К.С., Ш и л и н В.М. В кн.: Физика магнитных материалов. Иркутск, 1984 С. 133-136.
- [3] К р ю к о в И.И., М а н а к о в Н.А., С а д к о в В.Б. // ФММ, 1985. Т. 59. № 3. С. 455-462.
- [4] К р ю к о в И.И., М а н а к о в Н.А., С а д к о в В.Б., Ш е л к о в н и к о в В.Н. В кн.: Физика магнитных материалов. Калинин, 1986 С. 36-40.
- [5] К р ю к о в И.И., С а д к о в В.Б., С а х а е в К.С. В кн.: Тез. докл. 1X Всес. конф. по постоянным магнитам. М.: Информэлектро, 1988. С. 12.

Поступило в Редакцию
18 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 6
04; 10

26 марта 1989 г.

ИЗОТРОПИЗАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО И МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

В.Ф. Л а п ш и н, А.П. М е з е н ц е в,
А.С. М у с т а ф а е в

В результате зондовых исследований процессов релаксации интенсивного моноэнергетического пучка электронов (МЭПЭ) впервые экспериментально обнаружено предсказанное теоретически [1] явление изотропизации МЭПЭ в бесстолкновительной плазме. Исследования проводились в аксиально-симметричной плазме низковольтного разряда в гелии при относительно малых давлениях, когда транспортная длина пробега быстрых электронов на нейтральных атомах l_0 больше или порядка межэлектродного расстояния. Разряд создавался между плоским катодом и анодом, диаметр которых превышал расстояние между ними. Аксиальная симметрия поддерживалась боковой проводящей цилиндрической поверхностью, находящейся под потенциалом катода. В условиях исследуемого разряда МЭПЭ формировался при ускорении электронов, эмиттируемых термокатодом, в прикатодном люнгомюрсовском слое. Энергия электронов пучка \mathcal{E}_0 была порядка 30 эВ, а тепловых электронов плазмы - порядка 1 эВ. Во всех случаях концентрация быстрых электронов была меньше

или порядка концентрации медленных ($n_s \approx n_M$), и выполнялся критерий интенсивного пучка, задаваемый отношением дебаевского радиуса пучка к его характерному размеру [2] $r_d < L$. Исследование динамики релаксации МЭПЭ проводилось зондовым методом [3, 4], который позволил отдельно изучать процессы релаксации направления импульса и энергии электронов. Метод основан на измерении плоским односторонним зондом, при различных ориентациях его в плазме, величины второй производной зондового тока по потенциалу зонда $I''_{\mathcal{U}}$. Связь функции распределения электронов по скоростям (ФРЭС) с величиной $I''_{\mathcal{U}}$ задается формулой

$$I''_{\mathcal{U}} = \frac{2\pi e^3 S}{m^2} \left[f(e\mathcal{U}, \alpha) - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{e\mathcal{U}}^{\infty} d\varepsilon \frac{\partial}{\partial(e\mathcal{U})} \cdot f(\varepsilon, \theta_m) \right], \quad (1)$$

где $\cos \theta_m = \sqrt{\frac{e\mathcal{U}}{\varepsilon}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{e\mathcal{U}}{\varepsilon}} \cos \varphi \sin \alpha$; θ - угол между вектором скорости электронов и осью разряда; ε , e и m - энергия, заряд и масса электрона; α - угол между нормалью к непроводящей поверхности зонда и осью разряда; \mathcal{U} - задерживающий потенциал зонда относительно плазмы; S - площадь токопринимающей поверхности зонда.

Как нетрудно видеть из (1), при изотропной ФРЭС величина $I''_{\mathcal{U}}$ не зависит от ориентации плоского зонда в плазме. В случае сильноанизотропной ФРЭС у величины $I''_{\mathcal{U}}$ появляются отрицательные значения. На рис. 1 показана трансформация $I''_{\mathcal{U}}$ ($\alpha=0$) согласно (1) с изменением степени анизотропии модельной ФРЭС. Здесь в качестве модельной выбрана ФРЭС, описывающая пучок быстрых электронов в максвелловской плазме:

$$f(\varepsilon, \theta) = n_M \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{3/2} \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon}{T}\right) + \gamma_1 \exp\left\{-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\beta_2}\right)^2 + \frac{\cos \theta - 1}{\beta}\right\} \right], \quad (2)$$

где характеристики пучка быстрых электронов определяют параметры: β - степень анизотропии, ε_0 - среднюю энергию, β_2 - характерную полуширину в пространстве энергий и γ_1 - концентрацию.

Хорошо видно, что для анизотропной ФРЭС существует интервал энергий, где значения $I''_{\mathcal{U}}$ отрицательны. Процесс изотропизации исходной ФРЭС сопровождается исчезновением отрицательной части величины $I''_{\mathcal{U}}$ и уменьшением ее амплитудных значений при неизменной величине средней энергии пучка.

Обратимся теперь к рис. 2, а, б, на которых приведены характерные результаты измерений $I''_{\mathcal{U}}$ вдоль оси разряда Z для двух значений разрядного тока I_p . При измерениях токопринимающая поверхность плоского зонда была обращена к катоду ($\alpha=0$, сплошные кривые) и аноду ($\alpha=\pi$, пунктирные кривые). При достаточно малых токах (рис. 2, а) величина $I''_{\mathcal{U}}$ ($\alpha=0$) обладает

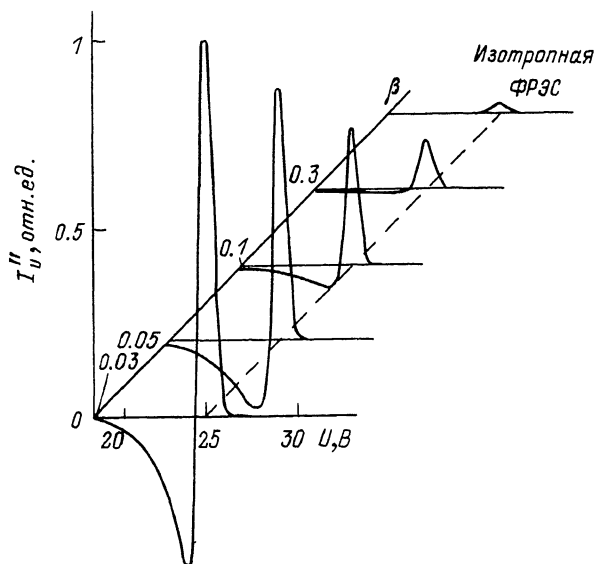


Рис. 1. Энергетическая зависимость I''_{U} (eU , $\alpha = 0$) для модельной ФРЭС при $\mathcal{E}_0 = 25$ эВ, $T = 1$ эВ, $\mathcal{J}_2 = 0.5$ эВ для различных степеней анизотропии.

значительными по амплитуде отрицательными значениями, и ее вид слабо меняется на протяжении газоразрядного промежутка. Это свидетельствует о наличии сильной анизотропии ФРЭС плазмы и об отсутствии релаксации МЭПЭ в разряде. С увеличением разрядного тока при некотором значении $I_{\text{пор}}$ пороговым образом включаются механизмы релаксации МЭПЭ (для режима, соответствующего рис. 2 $I_{\text{пор}} \approx 0.25$ А). При этом по мере удаления от катода (рис. 2, б, $0 < z < 2.5$ мм) отрицательные значения I''_{U} уменьшаются по абсолютной величине вплоть до полного исчезновения, а средняя энергия пучка меняется незначительно. Сравнение с расчетом (рис. 1) указывает на то, что в эксперименте наблюдается процесс релаксации направления импульса (изотропизация) МЭПЭ. Дополнительным и наглядным подтверждением этому служит появление группы изотропных быстрых электронов (с энергией, близкой к энергии пучка), регистрируемых зондом, обращенным к аноду даже в прикатодной области (рис. 2, б, $\alpha = \pi$). В случае отсутствия изотропизации зонд, обращенный к аноду (рис. 2, а, $\alpha = \pi$), не регистрирует группу быстрых электронов. При последующем удалении зонда от катода наблюдается энергетическая релаксация слабоанизотропной ФРЭС, при этом кривые I''_{U} практически не зависят от ориентации зонда и трансформируются к платообразному виду.

Поскольку указанные процессы происходят на расстояниях меньших длины свободного пробега электронов, объяснить их можно

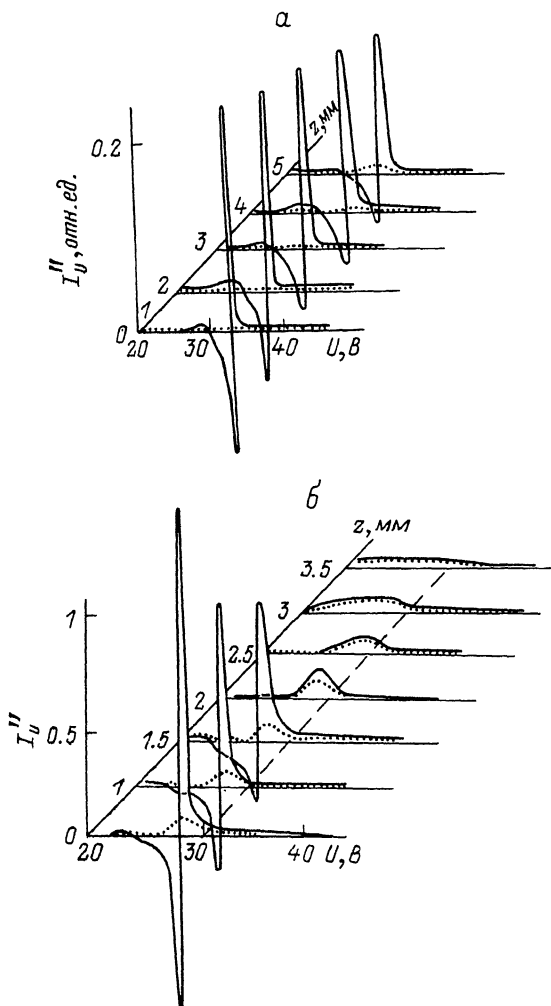


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $I_u'' (eU)$ для низковольтного разряда в гелии. $P_{He} = 0.5$ Тор; длина и радиус разрядного промежутка $L = 0.6$ см, $R = 0.5$ см; $l_0 = 10$ мм; а) $I_p = 0.1$ А, $n_S = 9 \cdot 10^9$ см $^{-3}$, $n_M = 4.6 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$; б) $I_p = 0.5$ А, $n_S = 6 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, $n_M = 2.8 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$.

только взаимодействием электронов пучка с колебаниями плазмы. Оценим объемную плотность энергии колебаний W , необходимую для изотропизации МЭПЭ на наблюдаемой длине $l_{эфф}$, и величину эффективного сечения $\sigma_{эфф}$ электрон-плазмонного „взаимодействия“. При этом будем считать, что взаимодействие электронов с волнами сходно с квазиупругими соударениями частиц, и все

плазмоны обладают одинаковой энергией $\hbar\omega_0$. Для этого воспользуемся формулой, связывающей эффективную частоту соударений $\nu_{эфф} = \nu_0 / l_{эфф}$ и плотность энергии W при изотропно распределенных колебаниях [1]:

$$\nu_{эфф} = \frac{\pi}{4} \omega_0 \frac{v_{ф}}{v_0} \frac{W}{n_m m v_0^2}, \quad \text{где } \omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi n m e^2}{m}}, \quad v_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{m}},$$

$v_{ф}$ — фазовая скорость волн. Полагая $v_{ф} \sim v_0$ имеем $W \sim 1.2 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ (для сравнения $n_m \varepsilon_T \approx 0.5 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$ и $n_0 \varepsilon_0 \approx 2.4 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3}$) и $\sigma_{эфф} = \frac{\hbar\omega_0}{W l_{эфф}} \sim 1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$.

В заключение выделим основные результаты исследований.

1. Экспериментально обнаружено явление изотропизации интенсивного МЭПЭ при взаимодействии с колебаниями плазмы.

2. Показано, что процесс релаксации интенсивного МЭПЭ в бесстолкновительной плазме разряда происходит в два этапа: изотропизация МЭПЭ при незначительных потерях энергии; релаксация по энергии слабоизотропного МЭПЭ к состоянию с платообразной ФРЭС.

3. Получена оценка величины эффективного сечения электрон-плазмонного квазиупругого „соударения“.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Цытович В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. М.: Наука, 1967.
- [2] Незлин М.В. Динамика пучков в плазме. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- [3] Mustafaev A.S. and Mezentsev A.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1986. V. 19. P. L69
- [4] Mezentsev A.P., Mustafaev A.S., Lapshin V.F. and Fedorov V.L. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1987. V. 20. P. L 723.

Ленинградский
горный институт
им. Г.В. Плеханова

Поступило в Редакцию
10 января 1989 г.