

УДК 537.525

Т. Х. ГУСЕЙНОВ, М. Н. АГАЕВ, Э. А. РАСУЛОВ

Бакинский государственный Университет, Азербайджан

РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ДВОЙНОМ СЛОЕ
В ПЛАЗМЕ РТУТНОГО РАЗРЯДА

Исследован двойной слой в плазме ртутного разряда с помощью двух зондов. Измерения, проведенные при частотах от 300 МГц до 700 кГц, показали, что пространственное распределение амплитуды высокочастотного поля имеет максимум в анодной плазме, смещенный приблизительно на несколько см от двойных слоев. Амплитуда поля имеет максимум вблизи плазменной частоты. Пространственно коррелированные измерения показали, что эти высокочастотные колебания распространяются в сторону анода с постоянной фазовой скоростью, на 10-20% ниже скорости пучка электронов. Эти факты подтверждают механизм энергообмена электронов пучка и плазмы посредством возбуждения поля пучком, а затем передачи энергии волны плазменным электронам.

Ключевые слова: двойной слой, ртутная плазма, релаксация электронов в двойном слое.

TARLAN KHANBABA HUSEYNOV, NUKHBALA AGAYEV MUSTAFA, ELDAR AYDIN RASULOV

Baku State University, Azerbaijan

RELAXATION OF ELECTRONS IN THE DOUBLE LAYER MERCURY DISCHARGE PLASMA

Annotation. The double layer in mercury plasma discharge has been investigated by the help two probe. The measurements at frequency from 300 MHz to 700 kHz showed that spatial distribution of mercury of high-frequency field amplitude has a maximum in anode plasma, shifted approximately from a few centimeter of double layer. The amplitude of field shows a maximum near the plasma frequency. The spatial correlation measurements show that these high-frequency oscillations spread to the anode side with constant phase velocity, which 10-20% less than the velocity of electrons. These facts confirm the mechanism of energy change of electrons beam and plasma with the help of field beam excitation, and transition of field energy by plasma electrons.

Key words: double layer, mercury plasma, relaxation of electrons in double layer.

Введение

Проблеме двойных слоёв (ДС) посвящены эксперименты по измерению градиентов концентраций [1-5] и углового распределения частиц в различных слоях ионосферы и магнитосферы Земли, выполненные с помощью ракет. В этих экспериментах были обнаружены большие (до 60% на км) горизонтальные и вертикальные градиенты концентраций заряженных частиц и пики в угловом распределении, что могло быть связано с заметными разностями потенциалов. Оценки этих разностей потенциалов из измерений градиентов концентраций на высотах 250-380 км привели к значениям в несколько сот вольт.

Интерпретация получаемых в этих экспериментах больших разностей потенциалов с точки зрения моделирования процессов в магнитосфере Земли представляется несколько сомнительной, т. к. задавая потенциалы между сетками камеры мишени мы, тем самым, задаем значение падения потенциала в ДС. С этой точки зрения более корректным является постановка вопроса в работах [7,8], где задается источник тока, а разность потенциалов в ДС устанавливается в процессе формирования ДС. В работе [9-11] с использованием вспомогательного электрода измеряется разности потенциалов в ДС. В этих работах ДС имели разности потенциалов, порядка энергии электронов пучка и несколько превосходящие ее.

При наличии в плазме колебаний зондовые измерения должны проводиться так, чтобы можно было определить мгновенные формы вольтамперных характеристик (ВАХ) и их производных, а также значения потенциала в точке расположения зонда. Известно, что при определенном потенциале зонда U_n , наложенного извне величина зондового тока определяется разностью потенциалов зонда и мгновенного значения потенциала пространства $U_n - U_p$, концентрациями электронов и ионов, а также функцией распределения электронов по энергиям (или же T_e в случае максвелловского распределения). Изменения этих величин во времени приводят к искажению ВАХ и определенных по ним параметров плазмы. Однако в некоторых случаях можно измерить среднюю ВАХ методом следающего зонда и по ней вычислить средние значения параметров плазмы.

1. Экспериментальная установка

Схема измерений приведена на рис. 1. В плазму вводились два тонких цилиндрических зонда, один из которых был ориентирован вдоль, а другой – поперек пучка. Параллельный зонд воспринимал пучок только небольшой площадью торца, в то время как поперечный – всей полуцилиндрической боковой поверхностью. Общие площади зондов были равны, а токи из-за тепловых электронов практически одинаковы на обоих зондах.

Из зависимости различных токов зондов от потенциала можно получить оценку пучковой части распределения электронов. Усилители служили для одинакового линейного изменения потенциалов зондов во времени. Падения потенциалов на резисторах r_1 и r_2 , пропорциональные зондовым токам, подавались на

вход вычитающего модуля М-165, и далее с помощью дифференцирующей цепочки получалась первая производная разности сигналов. Этот сигнал подавался на Y – вход двухкоординатного самопишущего потенциометра, а на X – вход подавался линейно изменяющийся зондовый потенциал.

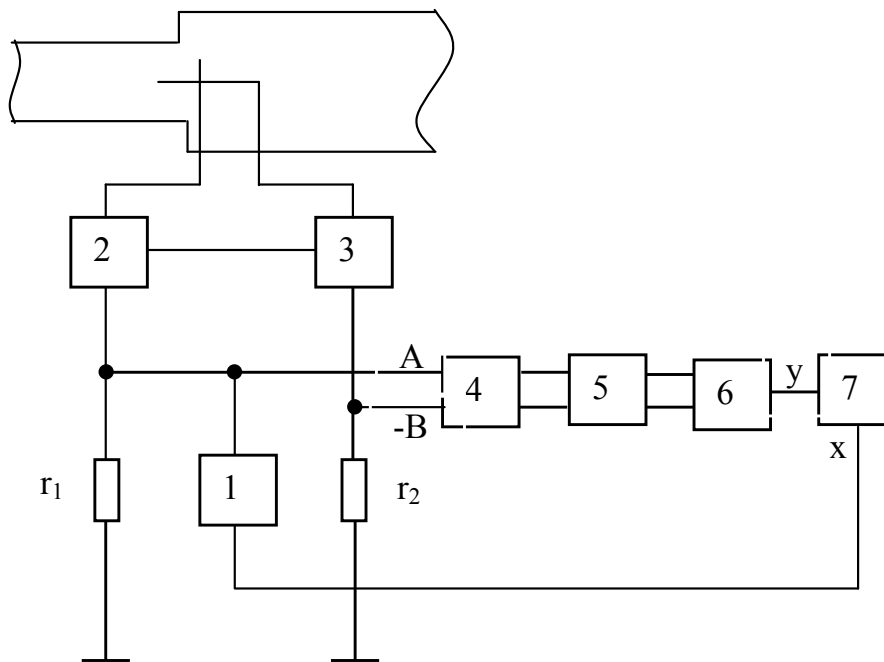


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки.

1 – источник линейно изменяющегося напряжения; 2, 3 – усилители; 4 – модуль М-165; 5 – дифференцирующая цепочка; 6 – фильтр; 7 – двухкоординатный самопишущий потенциометр

2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены первые производные разности токов поперечного и продольного зондов, измеренные в различных точках вдоль области взаимодействия пучок-плазма. Для исключения гистерезиса измерения проводились в обоих направлениях изменения потенциала зондов. Максимумы $d(\mathcal{I}_\perp - \mathcal{I}_\parallel)/dU$ на рис. 2 соответствуют пучку электронов. Кривые демонстрируют постепенное рассеяние пучка в плазме.

Следует отметить, что при измерении величины $d(\mathcal{I}_\perp - \mathcal{I}_\parallel)/dU$ описанным способом автоматически исключается погрешность, связанная с колебаниями потенциала пространства. Тот факт, что $d(\mathcal{I}_\perp - \mathcal{I}_\parallel)/dU$ не обращается в нуль при потенциалах, соответствующих энергиям тепловых электронов, можно объяснить наличием продольного магнитного поля.

Парные столкновения не могут объяснить наблюдаемого сильного энергообмена, получаемого из сравнения рис. 3, 2, так как длина свободного пробега электронов существенно превосходит длину анодной плазмы. Такую быструю релаксацию ускоренных в ДС электронов можно объяснить потерей энергии пучка на возбуждение колебаний. Действительно, при распространении электронного пучка относительно малой плотности в сравнительно плотной плазме с замагниченными электронами и незамагниченными ионами дисперсионное уравнение имеет вид [6]:

$$\frac{\omega_p^2}{\omega^2} + \beta \frac{\omega_p^2}{(\omega - ku)^2} = 1; \quad \beta = \frac{\omega_p^2}{\omega_p^2} = \frac{n_1}{n_p} \ll 1 \quad (1)$$

где ω_p и ω_1 – электронная ленгмюровская частота плазмы и пучка, k – волновое число, u – скорость частиц пучка, n_1, n_p – концентрация электронов пучка и плазмы. Из этого уравнения следует, что при условии

$$\omega_p^2 > k^2 u^2 \quad (2)$$

возникает неустойчивость. При этом возникают колебания с частотой

$$\omega = k_x u \left[1 + \left(\frac{n_1}{n_p} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3)$$

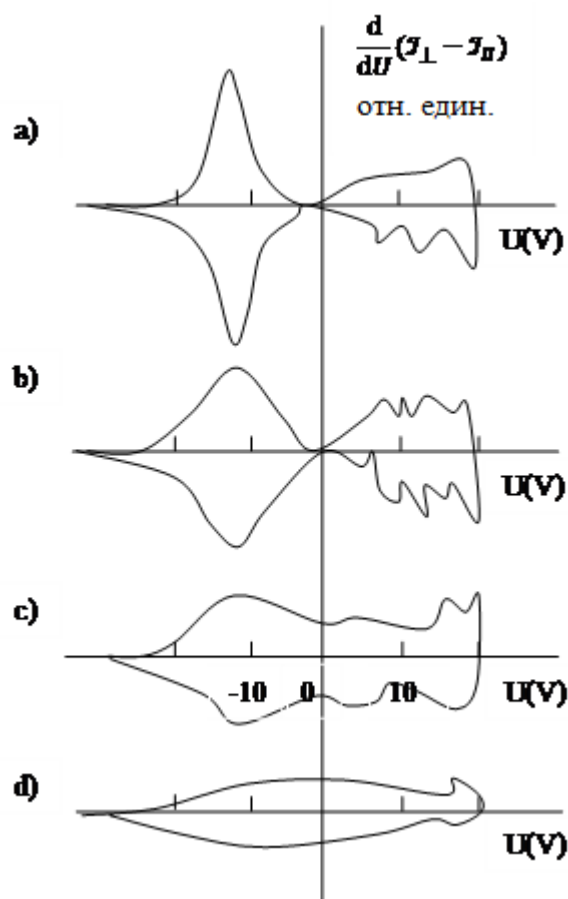


Рис. 2. Первые производные разности токов поперечного и продольного зондов, измеренные в плазме на расстояниях: а – 0,5, б – 2, в – 6, д – 12 см от начала области взаимодействия пучок-плазма.

Максимальный инкремент этих колебаний

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}}{2^{4/3}} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{1/3} \frac{\kappa_2}{\kappa} \omega_p. \quad (4)$$

Из выражения (2) следует, что неустойчивость имеет место при любой плотности пучка. В этом случае плотность пучка влияет только на инкремент и частоту колебаний.

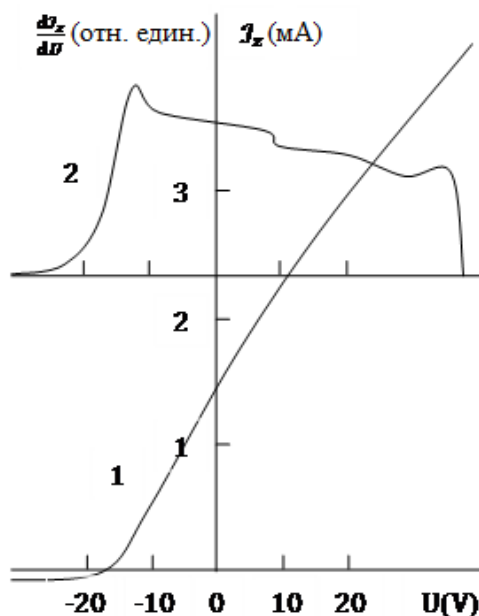


Рис. 3. Вольтамперная характеристика зонда (1) и ее первая производная (2), измеренная в катодной плазме на расстоянии 5 см от ДС. Уровень – 5,05 В, число измерительных строб в направлении роста потенциала $5,5 \cdot 10^4$ в 1 с.

Определенные из рис. 3 концентрации $n_{\text{и}1}$ и $n_{\text{и}2}$ имеют значения $6,1 \cdot 10^{15}$ и $2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Подстановка этих

значений в (3) с использованием $\mathbf{E}_z = \omega_p / u$ дает частоту колебаний $3,5 \cdot 10^8$ Гц, что несущественно отличается от $\omega_p / 2\pi$.

Заклучение

При поперечном изменении положительного столба образуется двойной слой. В области ДС электроны ускоряются и образуют пучок. После прохождения электронов через ДС, на анодной стороне на расстоянии нескольких сантиметров от ДС пучок быстро рассеивается. Это указывает на интенсивный энергообмен между электронами пучка и плазмы. Быструю релаксацию ускоренных в ДС электронов можно объяснить потерей энергии пучка на возбуждение колебаний.

Неустойчивость имеет место при любой плотности пучка. В нашем случае плотность пучка влияет только на инкремент и частоту колебаний.

Литература

1. Block L. Acceleration of crucial particles by electric double Layer / L. Block // *Earth's Magnetospheric Processes* / ed. B. M. McCormac. – New York : Springer, 1972. – P. 258–267.
2. Block L. A double layer review / L. Block // *Astrophysics. Space Sci.* – 1978. – Vol. 55. – P. 59-83.
3. Calvert W. Steep Horizontal Electron- Dens: to Gradients in the Topside P-Layer / W. Calvert // *Journal. Geophysical. Res.* – 1966. – Vol. 71. – P. 3665-3675.
4. Hogg E. L. Electron dentition of 8-100 electron Cu-3 deoected from Agouti II laugh latitudes ion gens / E. L. Hogg // *Canadian Jour. Phys.* – 1967. – Vol. 45. – P. 27-35.
5. Experimental and Numerical studies on potential distributions in a plasma / N. Singh, R. Kist, H. Thiemann, L. P. Block // *Plasma Physics.* – 1980. – Vol. 22. – P. 695-707.
6. Незлин М. В. Неустойчивость пучков заряженных частиц в плазме / М. В. Незлин // *УФН.* – 1970. – Т. 102. – № 1. – С. 105-139.
7. Незлин М. В. О двойных слоях с виртуальным катодом в неустойчивостях системы пучок-плазма / М. В. Незлин // *Физика плазмы.* – 1981. – Т. 7. – № 5. – С. 1048-1054.
8. Torven S. Proportion of a fluctuating double Layer in a magnetized plasma column / S. Torven, L. Lindberg // *Journal. Phys.* – 1980. – Vol. 15. – P. 2285-2300.
9. Schweigert I. V. Active control of electron energy distribution function in dc discharge using an auxiliary electrode / I. V. Schweigert, V. I. Demidov, I. D. Kaganovich / *ESCAPIG XXI Portugal.* – 2012. – No. 6. – 2 p.
10. Schweigert I. V., Kaganovich I.D., Demidov V.I. Active electron energy distribution function control in direct current discharge using an auxiliary electrode / I. V. Schweigert, I. D. Kaganovich, V. I. Demidov // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – No. 10. – p. 101606. DOI: 10.1063/1.4823465.
11. Modeling a short dc discharge with thermionic cathode and auxiliary anode / E. Bogdanov, V. I. Demidov, I. D. Kaganovich, M. E. Koepeke, A. A. Kudryavtsev // *Phys. Plasmas.* – 2013. – Vol. 20. – No. 10. – P. 101605. DOI: 10.1063/1.4823464.

References

1. Block L. Acceleration of crucial particles by electric double Layer. *Earth's Magnetospheric Processes*, ed. B. M. McCormac. New York: Springer, 1972, pp. 258–267.
2. Block L. A double layer review. *Astrophysics. Space Sci.*, 1978, Vol. 55, pp. 59-83.
3. Calvert W. Steep Horizontal Electron- Dens: to Gradients in the Topside P-Layer. *Journal. Geophysical. Res.*, 1966, Vol. 71, pp. 3665-3675.
4. Hogg E. L. Electron dentition of 8-100 electron Cu-3 deoected from Agouti II laugh latitudes ion gens. *Canadian Jour. Phys.*, 1967, Vol. 45, pp. 27-35.
5. Singh N., Kist R., Thiemann H., Block L. P. Experimental and Numerical studies on potential distributions in a plasma. *Plasma Physics.*, 1980, Vol. 22, pp. 695-707.
6. Nezlin M. V. Neustojchivost' puchkov zaryazhennyh chastic v plazme. *UFN*, 1970, Vol. 102, No. 1, pp. 105-139.
7. Nezlin M. V. O dvojnnyh sloyah s virtual'nym katodom v neustojchivostyah sistemy puchok-plazma. *Fizika plazmy*, 1981, Vol. 7, No. 5, pp. 1048-1054.
8. Torven S., Lindberg L. Proportion of a fluctuating double Layer in a magnetized plasma column. *Journal. Phys.*, 1980, Vol. 15, pp. 2285-2300.
9. Schweigert I. V., Demidov V. I., Kaganovich I. D. Active control of electron energy distribution function in dc discharge using an auxiliary electrode. *ESCAPIG XXI*, Viana do Castelo, Portugal, July 10-14, 2012, No. 6, 2 p.
10. ESCAPIG XXI, Viana do Castelo, Portugal, July 10-14 2012.
11. Schweigert I. V., Kaganovich I.D., Demidov V.I. Active electron energy distribution function in direct current discharge using an auxiliary electrode. *Phys. Plasmas.*, 2013, Vol. 20, No. 10, pp. 101606. DOI: 10.1063/1.4823465.
12. Bogdanov E., Demidov V. I., Kaganovich I. D., Koepeke M. E., Kudryavtsev A. A. Modeling a short dc discharge with thermionic cathode and auxiliary anode. *Phys. Plasmas.*, 2013, Vol. 20, No. 10, pp. 101605. DOI: 10.1063/1.4823464.

Рецензія/Peer review : 16.11.2015 p.

Надрукована/Printed : 12.12.2015 p.