

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Об измерении дебаевского радиуса
в неустойчивой газоразрядной плазме

Б.Н. Швилкин

Показано, что при низких концентрациях заряженных частиц в замагниченной плазме с дрейфовой неустойчивостью могут возникать условия, когда возмущения концентрации достигают значений невозмущенной концентрации. В этом случае флуктуации потенциала определяют температуру электронов, а длина волны дрейфовых колебаний становится порядка дебаевской длины.

PACS number: 52.20.-j, 52.25.Gj

Существенной характеристикой любой плазмы является дебаевский радиус. Он определяет минимальный размер области ионизации газа, начиная с которого газ можно условно считать квазинейтральной плазмой. Определяется дебаевский радиус из условия равенства тепловой кинетической энергии заряженных частиц и их потенциальной энергии взаимодействия при полном разделении зарядов в рассматриваемой области.

В неизотермической газоразрядной плазме дебаевский радиус

$$r_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_0} \right)^{1/2} = 6,9 \left(\frac{T_e}{n_0} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов, n_0 — концентрация заряженных частиц, e — заряд электрона. Формула (1) позволяет рассчитывать дебаевский радиус по измеренным на опыте температуре электронов и концентрации плазмы.

Возможно ли не расчетное, а прямое экспериментальное определение дебаевского радиуса? Оказывается, возможно — в неустойчивой плазме с потенциальными дрейфовыми волнами (см., например, [1, 2]).

В лабораторных условиях дрейфовые колебания создаются и изучаются в системах, имеющих форму сильно вытянутого цилиндра, длина которого на один-два порядка превышает диаметр. Магнитное поле образуется коаксиальными катушками и направлено параллельно оси системы. Типичная экспериментальная установка, используемая для изучения колебаний газоразрядной плазмы в магнитном поле, изображена на рис. 1.

Для анализа неустойчивой плазмы с потенциальными дрейфовыми колебаниями воспользуемся уравнением

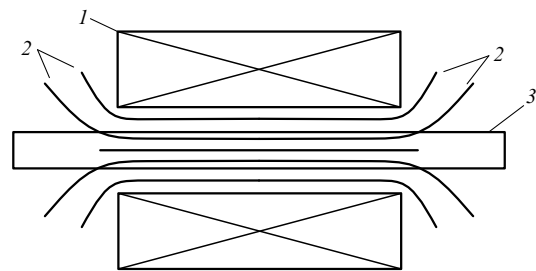


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — соленоид; 2 — силовые линии магнитного поля; 3 — разрядная трубка.

Пуассона

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{\epsilon_0} e \Delta n, \quad (2)$$

где φ — электрический потенциал. Уравнение (2) устанавливает следующую связь между флуктуациями плотности и потенциала в волне:

$$\varphi_1 = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{e \Delta n_1}{K^2}. \quad (3)$$

Здесь φ_1 — флуктуации потенциала, $K = 2\pi/\lambda$ — волновое число, а $\Delta n_1 = n_{1e} - n_{1i}$, где n_{1e} и n_{1i} — флуктуации плотностей электронов и ионов соответственно. Выражение (3) связывает величину флуктуаций потенциала φ_1 с возмущением заряда в волне Δn_1 . Измеряя значения φ_1 в неустойчивой плазме, можно рассчитывать флуктуации неквазинейтральности Δn_1 и электрического заряда $e \Delta n_1$ в волне. При этом длина волны легко определяется экспериментально [1, 2].

На рисунке 2 приведена измеренная на опыте зависимость φ_1 от концентрации плазмы n_0 , полученная с помощью электрического зонда, а на рис. 3 — зависимость Δn_1 от n_0 , рассчитанная по формуле (3). Обе величины как φ_1 , так и Δn_1 , как это видно из соответствующих рисунков, растут при уменьшении n_0 . Рост величины возмущений заряда в дрейфовых колебаниях

Б.Н. Швилкин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет 119899 Москва, Воробьевы горы, Россия Тел. (095) 939-29-08

Статья поступила 5 декабря 1997 г.

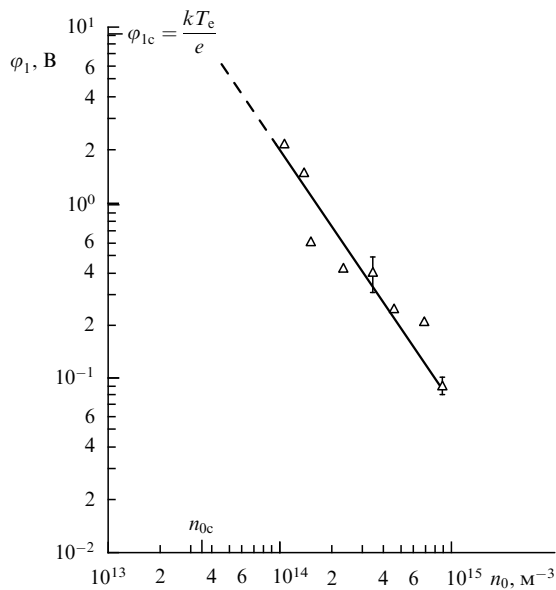


Рис. 2. Зависимость величины флуктуации потенциала φ_1 от концентрации плазмы n_0 .

происходит до тех пор, пока Δn_1 не становится равной n_0 . Равенство $n_0 = \Delta n_1$ (см. рис. 3) имеет место при некоторой критической концентрации $n_{0c} = n_0$. При этом при $\Delta n_1 = \Delta n_{1c}$ достигается максимально возможное возмущение зарядов в колебаниях.

Величина флуктуаций потенциала при $n_0 = n_{0c}$

$$\varphi_{1c} = \frac{kT_e}{e}. \quad (4)$$

Значение $\varphi_1 = \varphi_{1c}$ — это максимальная величина флуктуаций потенциала, определяемая температурой электронов. Измеряя φ_{1c} при $n_{0c} = \Delta n_{1c}$, мы измеряем температуру электронов T_e . Определенная таким образом температура T_e в пределах ошибки измерений совпадает с найденной с помощью других методик: лентгеновских зондов (см., например, [3]) и СВЧ-диагностики [4].

Заметим, что соблюдение условия (4) в случае дрейфово-диссипативной неустойчивости не является неожиданным результатом, поскольку электроны в дрейфовых колебаниях распределяются по закону Больцмана:

$$\frac{e\varphi_{1c}}{kT_e} = \frac{\Delta n_{1c}}{n_{0c}}. \quad (5)$$

Именно благодаря такому распределению электронов возможно существование дрейфовых колебаний с частотами, много меньшими, чем частота столкновений электронов с нейтральными атомами. Средняя макроскопическая скорость электронов при этом равна нулю, а вместе с ней обращается в нуль и сила трения [5].

On Debye radius measurement in an unstable gas discharge plasma

B.N. Shvilkin

Physics Department, M V Lomonosov Moscow State University
Vorob'evy Gory, 119899 Moscow, Russia. Tel. (7-095) 939-29 08

It is shown that at low concentrations of charged particles conditions can be realized in a magnetized unstable-to-drift plasma for which concentration perturbations are comparable to the concentration itself. The electron temperature is then determined by potential fluctuations, and the drift oscillation wavelength is of the order of the Debye length.

PACS numbers: 52.20.-j, 52.25.Gj
Bibliography — 5 references

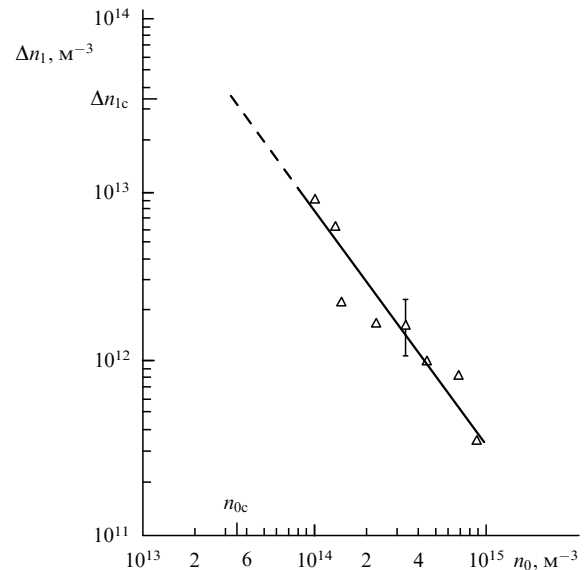


Рис. 3. Зависимость величины возмущений концентрации заряженных частиц Δn_1 от концентрации плазмы n_0 .

При $n_0 = n_{0c}$ при выполнении условия $\Delta n_{1c} = n_{0c}$ достигается полное разделение заряда в колебаниях на длине волны. Подстановка (4) в (3) дает выражение для длины колебаний

$$\lambda = 2\pi \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_{0c}} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

которое имеет смысл дебаевского радиуса, но превышает рассчитанное из (1) значение r_D в 2π раз.

Таким образом, измеренные на опыте флуктуации потенциала в замагниченной плазме с дрейфовой неустойчивостью позволяют определять величину неквазинейтральности колебаний и флуктуации электрического заряда в волне. При низких концентрациях заряженных частиц, когда возмущения концентрации достигают значения невозмущенной концентрации, флуктуации потенциала позволяют напрямую определять температуру электронов. Длина волны дрейфовых колебаний в этом случае становится порядка дебаевской длины, так что дебаевский радиус измеряется с помощью прямого эксперимента.

Список литературы

1. Bondarenko V E, Shvilkin B N *J. Phys. D* **28** 1064 (1995)
2. Bondarenko V E, Shvilkin B N *J. Phys. D* **29** 638 (1996)
3. Chung P M, Talbot L, Touryan K J *Electric Probes in Stationary and Flowing Plasmas* (Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1975)
4. Сковорода А А, Швилкин Б Н *ЖЭТФ* **75** 898 (1978)
5. Тимофеев А В, Швилкин Б Н *УФН* **118** 273 (1976)

Received 5 December 1997