

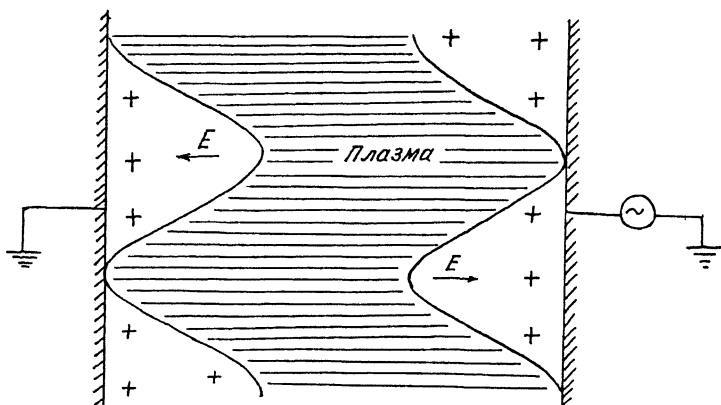
01;04
©1994

О ПРИНЦИПАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ

Ю. П. Райзер, М. Н. Шнейдер

1. Эффект стохастического нагрева электронов проявляется в ВЧЕ разрядах очень низкого давления. Он предсказан теоретически в [1] и наблюдался на опыте, например в [2]. Суть явления заключается в следующем. Вследствие колебаний электронов в ВЧ поле и безвозвратного ухода какого-то количества в электроды, вблизи обоих электродов образуются слои положительного пространственного заряда. Поле в каждом слое большую часть периода и на протяжении большей части его толщины нарастает по величине от плазмы к электроду и направлено в сторону электрода (см. рисунок). Поэтому электрон, залетевший в ходе теплового движения из плазмы в слой, выталкивается этим полем обратно в плазму, как бы испытывая упругое отражение от движущейся стенки — колеблющейся границы между плазмой и слоем. Пусть v_x — скорость влетающего электрона в лабораторной системе координат (ось x направим в сторону от плазмы к электроду), u_s — мгновенная скорость границы. В результате отражения электрон приобретает скорость $-v_x + 2u_s$, а новая кинетическая энергия больше прежней на $\Delta\epsilon = -2mu_s v'_x$, где $v'_x = v_x - u_s$ — скорость встречи электрона со "стенкой". Электрон энергию приобретает, если стенка движется ему навстречу ($v_x > 0 > u_s$) или его нагоняет ($u_s < v_x < 0$); электрон энергию теряет, если он нагоняет убегающую от него стенку ($v_x > u_s > 0$).

Обычно хаотические скорости электронов гораздо больше колебательных ($v_x \sim \bar{v} \gg u_s$), так что в среднем для двух электронов с противоположно направленными, но одинаковыми по величине скоростями v_x , электрон при отражении энергии приобретает, хотя и в небольшом количестве, $2mu_s^2$. Более точно результирующий эффект многих столкновений определяется еще и небольшим различием частот отражений в случаях, когда стенка движется навстречу электрону или убегает от него, а также от соотношения между амплитудными значениями колебательных скоростей электрона в плазме u и на границе со слоем u_s . Именно с последним



обстоятельством связано существование альтернативы. — нагрев или охлаждение, на что мы и хотели бы обратить внимание.

2. Элементарное рассуждение показывает, почему так может происходить. Отвлечемся пока от факта небольшого различия частот столкновений электрона с медленно убегающей или медленно движущейся навстречу стенкой. Тогда, в среднем по коллективу электронов, в столкновении со стенкой в данный момент времени электрон получает энергию $\overline{\Delta\epsilon} = -2mu_s(u - u_s)$, где $u \equiv \bar{v}_x$. При низких давлениях в "бесстолкновительной" плазме функция распределения электронов формируется в основной, срединной части плазмы. Поэтому средняя скорость электронов $u = \bar{v}_x$ совпадает со скоростью их направленного движения, т. е. со скоростью их колебаний в ВЧ поле в средней части разрядного промежутка.

Колебания электронов в середине плазмы и на ее краях (на границах со слоями), в общем синфазны, так как осциллирующая составляющая поля в плазме на протяжении всей плазменной области имеет одинаковое направление. Поэтому дважды усредненное (по коллективу электронов и за период) приобретение энергии электроном из расчета на одно столкновение с границей — "стенкой" есть

$$\langle \overline{\Delta\epsilon} \rangle = -2m \langle u_s(u - u_s) \rangle \approx -2m \langle u_s^2 \rangle (\beta - 1), \quad (1)$$

где угловые скобки $\langle \rangle$ означают усреднение за период. Здесь принято во внимание, что отношение $\beta = u/u_s$ слабее зависит от времени, чем сами осциллирующие величины u .

u_s . Поэтому β приближенно считается величиной постоянной. Она характеризуется отношением плотностей электронов в средней части плазменной области n и в области колеблющейся границы плазмы со слоем n_s . В самом деле, ток проводимости в плазме обычно больше тока смещения и, следовательно, в силу закона сохранения полного тока $en_i = en_s u_s$. Поскольку мгновенная плотность электронов на границе плазмы со слоем совпадает с практически стационарной плотностью ионов в месте положения границы в данный момент времени, по порядку величины $\beta \approx n_s/n$ определяется отношением плотностей ионов в слоях и в средней части плазмы.

Если, как это чаще всего бывает в ВЧЕ разрядах, плотность ионов в приэлектродных слоях меньше плотности плазмы в середине промежутка ($\beta < 1$, $\langle \overline{\Delta \epsilon} \rangle > 0$), происходит стохастический нагрев электронов. В рамках часто применяемой модели, в которой плотность ионов n_+ считается постоянной по всему промежутку, $n_+(x) = \text{const} = n_s = n$, $\beta = 1$, т. е. стохастический нагрев отсутствует [3]. Но в случаях, когда плотность ионов в слоях больше, чем плотность плазмы, должно происходить стохастическое охлаждение плазменных электронов: $\beta > 1$, $\langle \overline{\Delta \epsilon} \rangle < 0$.

Более строгое рассмотрение [3,4] с привлечением функции распределения по скоростям $f(v_x, t)$ и учетом фактической скорости потока электронов на движущуюся "стенку" дает $\langle \overline{\Delta \epsilon} \rangle$ вдвое большее (1). Нагрев электронного газа в 1 с на 1 см² площади границы равен при этом

$$P = \langle \overline{\Delta \epsilon} \rangle \Gamma = 4m \langle u(u_s - u) \rangle \Gamma, \quad \Gamma = n\bar{v}/4, \quad (2)$$

где Γ — плотность одностороннего теплового потока электронов.

3. Итак, эффекта стохастического охлаждения следует ожидать в случаях, когда плотность ионов в приэлектродных слоях больше, чем в середине плазмы. Такая ситуация действительно имеет место в ВЧЕ разрядах γ -типа. К сожалению, в хорошо изученных γ -разрядах среднего давления эффект полностью скрадывается гораздо более сильным обычным нагревом электронов вследствие столкновений с атомами (то же относится и к стохастическому нагреву, который удается наблюдать только в "бесстолкновительном" случае [2]). Разряд γ -типа при низких давлениях изучен хуже. По-видимому, сигналом о возможном эффекте должна служить пониженная температура электронов, хотя в γ -разряде есть и другая причина существования аномально низкой температуры электронов плазмы (плазма в этом случае представляет собою плазму не положительно-

го столба, а "отрицательного свечения" или начала темного фарадеева пространства [5]). Ионизацию при этом обеспечивают энергичные электроны, рожденные в результате вторичной эмиссии с электродов и ускорения в приэлектродных слоях. Как заметил Л.Д. Цендив, в принципе нужная для эффекта ситуация может обнаружиться также и в разряде в электроотрицательном газе. Вопрос требует специального целенаправленного экспериментального исследования. Экспериментальное подтверждение или опровержение высказанных здесь соображений представило бы интерес для физики ВЧЕ разрядов, а возможно и для ВЧ плазменной технологии.

Список литературы

- [1] Годяк В.А. // ЖТФ. 1971. Т. 41. С. 1364.
- [2] Попов О.А., Годяк В.А. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. P. 53.
- [3] Lieberman M.A. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1988. V. 16. P. 638.
- [4] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высоочастотные емкостные разряды. М. CRC press (на англ.). 1994.
- [5] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1476.

Институт проблем
механики
Москва

Поступило в Редакцию
3 октября 1994 г.
