

К вопросу о распределении потенциала у витков сетки в плазменных ключевых элементах

© А.Н. Андронов, А.М. Марциновский, И.И. Столяров, В.К. Шигалев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 23 октября 2006 г.)

На основе анализа результатов, полученных в предыдущих работах, представлено наиболее вероятное распределение потенциала в сеточной ячейке и в окрестности сетки для плазменного ключевого элемента при прохождении через сетку разрядного тока. Сделан вывод о том, что критическим для переноса тока является поддержание существования квазинейтральной плазмы в „узком месте“ токопрохождения в условиях интенсивного отбора ионов на витки сетки, который необходим для формирования ленгмюровских слоев у витков.

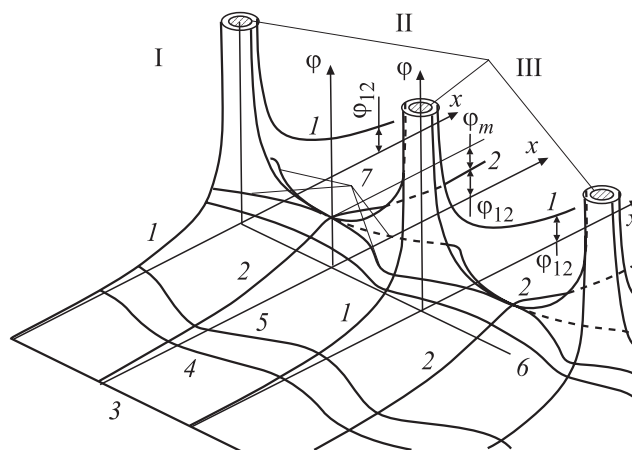
PACS: 52.77.-j

В работах [1,2] на основании анализа баланса тока в плоскости сетки плазменного ключевого элемента (ПК), рассчитанного по данным зондовых измерений, было показано, что в проводящем (открытом) состоянии ПК в токовом канале сеточной ячейки во всех режимах должен существовать потенциальный холм („горб“) высотой $\sim kT_e$ и более (k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов плазмы). Причина его существования связана со спецификой движения ионов вблизи сеточной ячейки — большая величина перепада потенциала в горбе обусловлена интенсивным уходом ионов из середины ячейки на сеточные витки.

В типичных режимах ПК этот потенциальный горб наряду с отрицательным перепадом потенциала $\phi_{12} < 0$ между катодной и анодной областями разряда ограничивает хаотический электронный ток, поступающий из катодной области в анодную.¹ За счет такого распределения потенциала обеспечивается эффективный подвод ионов и из катодной, и из анодной части разряда в „узкое место“ токопрохождения — центр сеточной ячейки.

Потенциальный горб простирается вплоть до середины межэлектродных промежутков сетка-катод и сетка-анод, поскольку в ПК их размеры меньше длины свободного пробега ионов.² Подъем потенциала от середины межэлектродного промежутка по направлению к сетке обусловлен отбором ионного тока на находящуюся под отрицательным потенциалом относительно катода и плазмы сетку и формированием ленгмюровских слоев у ее витков (проволочек). Поскольку ионный ток на сетку для реальных условий в ПК ненамного меньше ионного тока на катод и анод, вероятнее всего, сначала

потенциал возрастает одинаково по всей площади сетки (см. рисунок 1, 3), а на расстоянии порядка размера ячейки скорость нарастания начинает зависеть от поперечной координаты, т.е. от положения относительно центра ячейки. В направлении к центру сеточного витка нарастание должно быть наиболее близким к случаю, когда на месте сетки находился бы плоский электрод, а перепад потенциала от середины зазора до границы ленгмюровского слоя витка должен быть близок к $kT_e/2$. В направлении на центр ячейки нарастание потенциала должно быть несколько большим, из-за того



Возможное схематическое распределение потенциала у сетки плазменного ключевого элемента. I — область катода, II — область анода, III — область сетки. 1, 2 — продольный ход потенциала (по направлению переноса тока, перпендикулярно плоскости сетки): 1 — в направлении на виток сетки, 2 — по центру сеточной ячейки; 3–7 — эквипотенциалы в поперечном направлении (параллельно плоскости сетки): 3 — вдали от сетки, у середины промежутка катод-сетка; 4, 5 — фокусирующее распределение вблизи сетки; 6 — дефокусирующее распределение; 7 — распределение, соответствующее значению потенциала ϕ_m (седловинной точке).

¹ Под потенциалом (традиционно для термоэмиссионных преобразователей и плазменных ключей) понимается потенциальная энергия электронов, т.е. обычный потенциал с обратным знаком.

² По этой причине разрядные промежутки в ПК, как и в обычных „двухэлектродных“ кнуденовских дугах, целиком состоят из приэлектродных слоев, в которых преобладает направленное движение ионов. Хаотическое движение преобладает лишь в узкой области у середины межэлектродных промежутков.

что потенциальный горб достаточно высок ($> kT_e$). Это обстоятельство должно приводить к неравномерному распределению потенциала вдоль сетки, „выпуклому“ по отношению к ее плоскости (см. рисунок, кривые 4 и 5). Такое распределение потенциала будет не только формировать ионный пучок по направлению от центра катодной и анодной области к сетке (в рассматриваемых условиях всегда температура ионов $T_i \gg T_e$, и направленное движение ионов быстро становится определяющим) и обеспечивать „бомовскую“ скорость ионов на границе слоя, но и фокусировать ионы в ячейку. Именно такое распределение получалось в тех случаях, когда структуру потенциала у витков сетки можно было наблюдать или она рассчитывалась [3,4]. В то же время очевидно, что эквипотенциаль, соответствующая значению потенциала в максимуме φ_m (седловинная точка), должна иметь форму восьмерки (кривая 7 на рисунке). Это означает, что у самой ячейки (в области с размерами порядка ширины ленгмюровского слоя r_1) эквипотенциали должны быть вогнутыми (кривая 6) и дефокусировать ионный пучок, направляя ионы на витки сетки.

Такая конфигурация потенциала, по-видимому, является оптимальной с точки зрения „организации“ движения ионов. Она обеспечивает и их эффективный подвод в „узкое место“ токопрохождения, и необходимое распределение их потока в ячейку между витками и анодной областью, которая в режимах с $T_{e1} > T_{e2}$ и $n_1 \gg n_2$ (индекс 1 относится к катодной области, 2 — к анодной) обеспечивается ионами в основном за счет их поступления из катодной области, и необходимое ускорение при подходе к границам ленгмюровских слоев.

Следует заметить, что положение максимума φ_m не должно, вообще говоря, совпадать с плоскостью сетки. Результаты расчета хода потенциала в ячейке „толстой“ сетки [5] (когда диаметр токового канала много меньше его длины) показывают, что максимум смещен в сторону той области, где концентрация плазмы меньше, а перепад потенциала φ_{12} между катодной и анодной областями получается такого знака, что ускоряет ионы из области с большой концентрацией в область с меньшей. В результате большая часть токового канала снабжается ионами из той области, где концентрация плазмы больше. Поэтому можно предполагать, что в упомянутом, наиболее типичном для „тонкой“ сетки, случае $n_1 \gg n_2$ с относительно большим отрицательным перепадом потенциала $\varphi_{12} < 0$ (ускоряющим ионы из катодной области в анодную) точка максимума сдвинута в анодную область. В таком случае основная часть токового канала будет снабжаться ионами из катодной области, а при $n_1 < n_2$ и $\varphi_{12} > 0$ — наоборот, из анодной. Таким образом, и знак скачка потенциала φ_{12} , и положение максимума φ_m в общем случае будут обеспечивать наиболее эффективный подвод ионов из той области, где их больше.

Приведенная картина вероятного распределения потенциала у витков сетки еще раз подтверждает высказанные в [2] соображения о том, что при прохождении тока через любую сеточную ячейку (в общем случае — через любое „узкое место“ в плазме) возникает такое немонотонное распределение потенциала, которое в первую очередь обеспечивает подвод ионов к „узкому месту“. В этом заключается принципиальное отличие роли виртуального катода в электровакуумных приборах от потенциального горба в плазме. В первом случае виртуальный катод просто ограничивает избыточный электронный ток в „узком месте“, во втором — потенциальный горб (немонотонное распределение потенциала в окрестностях „узкого места“) обеспечивает поддержание в нем квазинейтральности за счет дополнительного ускорения туда ионов. Поскольку неравенство $kT_e \gg kT_i$ (T_i — температура ионов) выполняется в плазме низковольтных дуг с большим запасом, потенциальный рельеф, эффективно подтягивающий ионы к центру сеточной ячейки, намного слабее влияет на движение электронов. А так как плотность хаотического электронного тока плазмы обычно много больше плотности направленного тока в разряде (анодного тока), потенциальный горб не ограничивает переносимый ток в очень широком диапазоне уменьшения сечения токового канала — практически до тех пор, пока хотя бы в небольшом сечении „узкого места“, свободного от приэлектродных слоев витков, сохраняется квазинейтральная плазма.³ Токопрохождение поддерживается за счет поддержания существования квазинейтральной плазмы в узких местах.

С этой точки зрения следует сделать вывод, что и само „узкое место“ в ячейках сетки в плазме возникает не столько в результате уменьшения ленгмюровскими слоями витков суммарного сечения канала токопереноса, сколько за счет отбора ионного тока на витки, необходимого для формирования этих слоев. Поэтому при введении в плазму сетки при плавающем потенциале главным возмущающим фактором для разрядной плазмы является отбираемый на сетку ионный ток, а не сравнительно небольшое уменьшение сечения переноса электронного тока в ее плоскости. Именно по этой причине возмущение при введении в разрядный промежуток даже тонкой сетки с высокой прозрачностью и относительно небольшой площадью поверхности витков оказывается столь большим, вызывая кардинальную перестройку всего разряда с образованием двух сильно различающихся по своим параметрам „плазм“ и значительное (на 0.5–1 V, примерно в два раза [6,7]) увеличение минимального анодного напряжения, необходимого для поддержания разряда.

³ Во многих случаях при увеличении отрицательного напряжения на сетке и приближении (за счет уменьшения сечения токового канала) плотности направленного тока в канале к плотности хаотического тока плазмы наблюдаются процессы, характерные для явления самопроизвольного обрыва тока в разряде [6,7].

Список литературы

- [1] *Andronov A.N., Martsinovsky A.M., Shigalev V.K., Stolyarov I.I., Voronin S.A.* // Space Technology and Application International Forum (STAIF-99). Termionic Technology and Application-II. Albuquerque, 1999.
- [2] *Андронов А.Н., Воронин С.А., Марциновский А.М., Столяров И.И., Шигалев В.К.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 3. С. 36–41.
- [3] *Fetz H.* // Ann. der Physik. // 1940. Bd 37. S. 1–40.
- [4] *Aston G., Wilbur P.G.* // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 4. P. 2614–2626.
- [5] *Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 9. С. 70; 1996. Т. 66. С. 56–69.
- [6] *Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М., Новиков А.Б., Сербин В.И., Циркель Б.И., Юрьев В.Г.* // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 2. С. 274, 285.
- [7] *Бакиш Ф.Г., Каплан В.Б., Костин А.А., Марциновский А.М., Расулов Ф.Н., Свешикова Н.Н., Сербин В.И., Юрьев В.Г.* // ЖТФ. 1978. Т. 48. С. 2273–2285.