

Авторы выражают благодарность Г. П. Фоменко и В. П. Ильину за полезное обсуждение результатов данной работы.

Поступила 10 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Енальский В. А., Осипов В. В. О моделировании на ЭЦВМ ускорительного процесса в сильноточном ионном линейном ускорителе.— ПМТФ, 1967, № 5.
2. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск: Наука, 1974.
3. Захаров А. В., Самарский А. А., Свешников А. Г. Применение метода больших частиц к расчету движения заряженного пучка в электромагнитном поле с учетом пространственного заряда пучка.— В кн.: Вычислительные методы и программирование. Т. 16. М.: изд. Моск. ун-та, 1974.
4. Диденко А. Н., Жерлицын А. Г. и др. Экспериментальное исследование генерирования гигаватных СВЧ-импульсов наносекундной длительности.— Физика плазмы, 1976, т. 2, № 3.
5. Головин Г. Т. Один итерационный метод интегрирования стационарных систем уравнений электродинамики, связанных с учетом объемного заряда.— В кн.: Вычислительные методы и программирование. Т. 31. М.: изд. Моск. ун-та, 1979.

УДК 621.385.6

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА НА ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ РАЗРЯД В НЕМ

В. Д. Шемелин

(Новосибирск)

Нарастающее от оси магнитное высокочастотное (ВЧ) поле объемного резонатора может достигь величин, влияющих на свойства вторично-электронного ВЧ-разряда (мультипактора). При этом могут возникнуть условия, при которых частицы, участвующие в разряде, смещаются в радиальном направлении как к оси, так и от оси резонатора.

Явление можно рассматривать как разновидность Z-пинча, с той особенностью, что электрическое и магнитное поля сдвинуты по фазе на 90° .

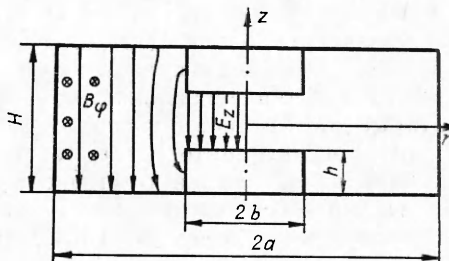
Рассмотрим вторично-электронный ВЧ-разряд [1, 2] в тороидальном резонаторе с видом колебаний E_{010} . Выражения для электрического и магнитного полей запишем в виде

$$(1) \quad E_z = \alpha E_0 \sin \omega t;$$

$$(2) \quad B_\varphi = \gamma B_0 \cos \omega t,$$

где ω — частота колебаний; αE_0 и γB_0 — амплитуды полей, α и γ задают зависимость от радиуса. В частности, для цилиндрического резонатора, когда $h = 0$ (см. фигуру), α и γ выражаются через функции Бесселя.

Будем считать, что за время перелета между стенками радиальное смещение мало, так что α и γ мало меняются за один перелет. Ограничим рассмотрение областью, где отсутствует радиальное электрическое поле; как правило, в таких облас-



тях и развивается мультипактор. Остальные приближения те же, что и в обычной теории мультипактора [1].

Уравнение движения в скрещенных полях (1), (2) имеет вид

$$(3) \quad e(E_z + \dot{r}B_\varphi) = m\ddot{z}, \quad e\dot{z}B_\varphi = -m\ddot{r},$$

где e и m — заряд и масса электрона, точка означает дифференцирование по времени.

Решением системы (3) будет [3]

$$(4) \quad z = \frac{i}{\omega} \int y(\theta) d\theta + C_3;$$

$$(5) \quad r = \frac{1}{\omega} \int x(\theta) d\theta + D_3,$$

где

$$y = y_0 + C_1 y_1 + C_2 y_2; \quad x = x_0 + D_1 x_1 + D_2 x_2;$$

$$x_1 = y_1 = -\sin(q \sin \theta); \quad x_2 = y_2 = \cos(q \sin \theta);$$

$$x_0 = p \left(x_1 \int x_2 \sin \theta d\theta - x_2 \int x_1 \sin \theta d\theta \right);$$

$$y_0 = \frac{p}{q} \left(y_2 \int \frac{y_1}{\cos^2 \theta} d\theta - y_1 \int \frac{y_2}{\cos^2 \theta} d\theta \right);$$

$$p = \frac{e}{m} \frac{\omega E_0}{\omega}; \quad q = \frac{e}{m} \frac{\gamma B_0}{\omega} = \frac{\gamma \omega}{\omega} c; \quad \theta = \omega t.$$

Обычно магнитное поле невелико и $q \ll 1$. Можно показать, что уравнение (4) в этом случае переходит в обычное уравнение теории мультипактора [1], а из уравнения (5) получаем выражение для смещения за один перелет

$$\Delta r = -(pq/\omega) \Phi_n(\theta_1),$$

где $\Phi_n = \frac{3}{2} \pi (2n - 1) \sin \theta_1 \cos \theta_1 + 6 \cos^2 \theta_1 - \frac{(2n - 1)^2 \pi^2}{4}$; n — порядок мультипактора; θ_1 — равновесный угол разряда, отношение скорости падения электронов на стенку к начальной скорости вторичных электронов принято равным трем.

При $n \geq 2$ значение $\Phi_n < 0$, поэтому частицы, участвующие в разряде, будут дрейфовать от центра. При $n = 1$ знак смещения зависит от равновесного угла разряда: $\Phi_1 > 0$ для $\theta_1 > -30^\circ$, $\Phi_1 < 0$ для $\theta_1 < -30^\circ$.

Проведенные эксперименты [4] показали, что ток электронов разряда вблизи цилиндрической стенки резонатора появляется раньше, чем достигается необходимое для существования разряда напряжение в данной области, в то время как оптимальное напряжение для разряда существует на меньшем радиусе. Плотность тока на два порядка превосходит ту, которая достигается в центральной части зазора. Измеренная энергия, с которой электроны падают на стенки, составляет менее 20 эВ, т. е. слишком низка для поддержания самостоятельного разряда. Напряжения, которые достигались в эксперименте, соответствуют не менее чем третьему порядку мультипактора в большом зазоре. Эти факты подтверждают существование радиального смещения электронов в резонансном ВЧ-разряде, вызванного собственным магнитным полем резонатора.

Автор благодарен И. К. Седярову за полезное обсуждение.

Поступила 26 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Hatch A., Williams B. Multipacting modes of high-frequency gaseous discharge.— Phys. Rev., 1958, vol. 112, p. 681.
2. Сливков И. Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.
3. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971.
4. Седяров И. К., Шемелин В. Д. Резонансный высокочастотный разряд в тороидальном резонаторе. Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1973.

УДК 537.525

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШНУРОВАНИЯ ТОКА
НА ЭЛЕКТРОДАХ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

Г. Г. Гладуш, А. А. Самохин
(Москва)

Известно, что вследствие отсутствия генерации заряженных частиц газоразрядной плазмы на холодных электродах вблизи последних образуются слои со свойствами, существенно отличающимися от свойств столба [1]. На эти слои приходится значительное напряжение, которое в некотором диапазоне тока падает с ростом плотности тока. Энгель и Штенбек, вычислившие прикатодную вольт-амперную характеристику, постулировали, что участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на этой характеристике неустойчив. Имевшее место в эксперименте сжатие разряда на катоде связывалось с развитием этой неустойчивости. Данное явление в литературе носит название закона нормальной плотности тока — с увеличением тока эмиттирующая область на катоде расширяется, так что плотность тока остается постоянной и равной нормальной плотности тока.

Неоднородное горение разряда наблюдается также и на аноде, хотя явление здесь протекает несколько по-иному и менее изучено [2]. В работах [3] аналитически и численно показано, что прианодная вольт-амперная характеристика (ВАХ) так же, как и прикатодная, имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Явление шнурования тока на электродах интересно с физической точки зрения, так же важно и в практических приложениях тлеющего разряда — газоразрядные приборы, мощные газовые лазеры и т. д. В последнем случае шнурование тока на электродах может быть причиной шнурования тока и в объеме, которое ограничивает мощность устройств. Для борьбы с этим явлением применяют различные технические средства, например секционируют электроды и т. д. [4].

Теория шнурования тока, обязанного наличию участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ, создана, например, для полупроводников с S -образной характеристикой. Важная особенность рассматриваемой здесь задачи состоит в том, что с уменьшением тока растет не только приэлектродное падение, но растет также и толщина приэлектродного слоя. Последнее обстоятельство делает задачу принципиально двумерной, что существенно усложняет ее решение.

Данная работа посвящена численному исследованию принципиальной возможности шнурования тока на катоде благодаря учету ионизации, рекомбинации и дрейфа заряженных частиц по полю. Это избавляет от необходимости придерживаться конкретной экспериментальной ситуации и, в частности, позволяет рассматривать двумерную задачу в плоской геометрии, что упрощает расчеты. Длительность же счета по времени будет зависеть от того, в какой мере проявятся интересующие нас эффекты.

Постановка задачи. В настоящей работе численным интегрированием нестационарной двумерной системы уравнений, описывающей движение электронов и ионов в самосогласованном электрическом слое с учетом