

01;09

”Нулевой” ток в приборах М-типа и самоподдерживающиеся электронные сгустки

© В.Б. Байбурин, А.А. Терентьев, А.В. Сысуев
С.Б. Пластун, В.П. Еремин

Саратовский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 5 декабря 1997 г.

Численное моделирование процессов одновременно во всем пространстве взаимодействия магнетронных приборов дает возможность наблюдать возникновение и поведение устойчивых уединенных электронных сгустков. Показано, что эти самоподдерживающиеся электронные сгустки могут являться причиной существования анодного тока в отсутствие ВЧ-взаимодействия.

Известно, что в магнетронах миллиметрового диапазона при небольших отклонениях ($\approx \pm 7\%$) анодного напряжения U_a от номинального рабочего значения U_n , которое обычно близко к критическому ($0.72 \div 0.83U_c$), происходит срыв колебаний, мощность падает практически до нуля, однако анодный ток сохраняет величину, близкую к номинальной. С существованием такого тока, обычно называемого ”нулевым”, связывают, в частности, низкий КПД магнетронов миллиметрового диапазона. Одной из причин нулевого тока может являться существование в магнетронных приборах устойчивых электронных сгустков, вращающихся вокруг катода. Связь между колебательными свойствами электронных структур и процессами в магнетронном диоде, в частности с током на анод в режиме отсечки, исследовались как теоретически, так и экспериментально во многих работах [1–5]. В совсем недавно опубликованной работе [5] в предположении существования уединенной электронной волны проведена аналитическая оценка ее характеристик: формы, размеров и т.д.; показана возможность протекания тока на анод.

В такой ситуации представляется целесообразным, используя возможности строгих численных моделей крупных частиц [6], хорошо зарекомендовавших себя при анализе динамических режимов магнетронных приборов (см., например, [6–7]), исследовать условия существования уединенных электронных волн в режимах, близких к критическим.

В настоящей работе на основе машинных экспериментов с использованием двумерной численной модели магнетрона [6] показан сценарий возникновения и существования самоподдерживающихся электронных густков и нулевого тока на анод в отсутствие взаимодействия с ВЧ-волной. Машинная программа позволяет рассчитывать на каждом временном шаге динамические параметры прибора и конфигурацию электронного облака во всем пространстве взаимодействия прибора.

Компьютерное моделирование проводилось при отклонениях U_a от U_n в пределах $\pm(7-10\%)$, а также для сравнения в номинальном режиме ($U_a = U_n$). При этом выявилась следующая картина процессов в приборе.

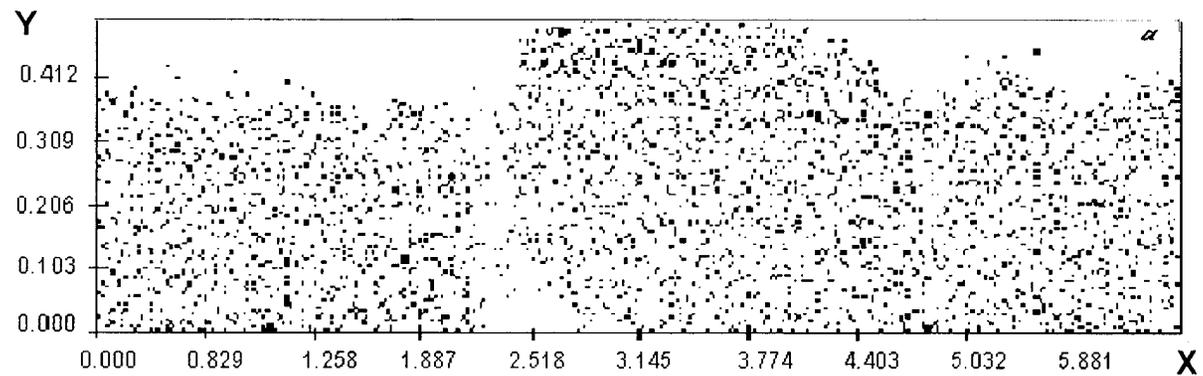
Вначале (в течение первых 10–20 ВЧ-периодов) наблюдается кратковременный рост ВЧ-амплитуды до уровня ≈ 0.1 номинального значения, происходит вытягивание электронов на анод и образование электронных спиц, аналогичных возникающим в рабочем режиме. По истечении следующих 30–40 ВЧ-периодов происходит срыв колебаний и разрушение электронных спиц. При этом выходная мощность спадает до нуля, а электронные спицы трансформируются в один или два самоподдерживающихся (без участия ВЧ-полей) электронных густка. При этом величина анодного тока равна току эмиссии и сохраняется, так же как и сами электронные густки, неограниченно долго, что наблюдается впервые в машинном эксперименте.

Следует отметить также, что аналогичные электронные густки возникают и в режиме магнетронного диода (при расчетах ВЧ-поля полагались равными нулю).

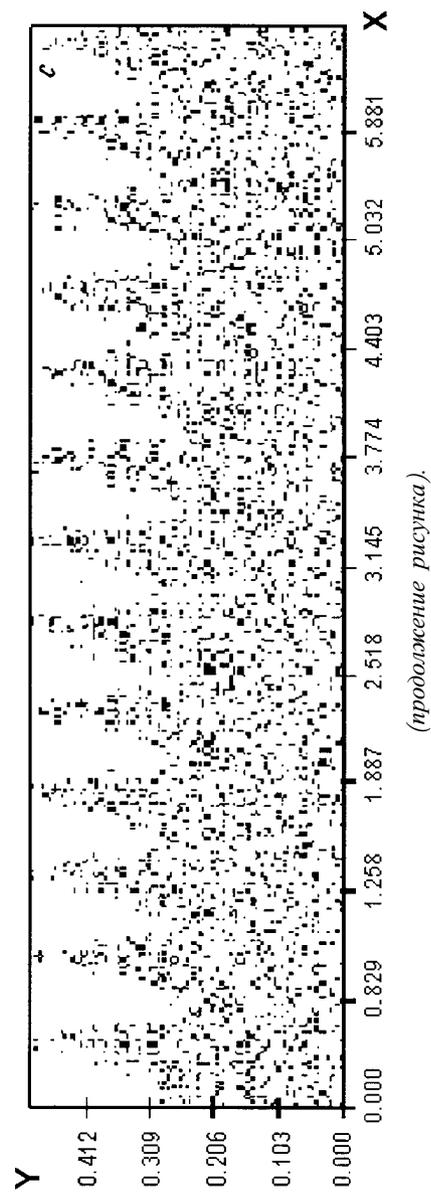
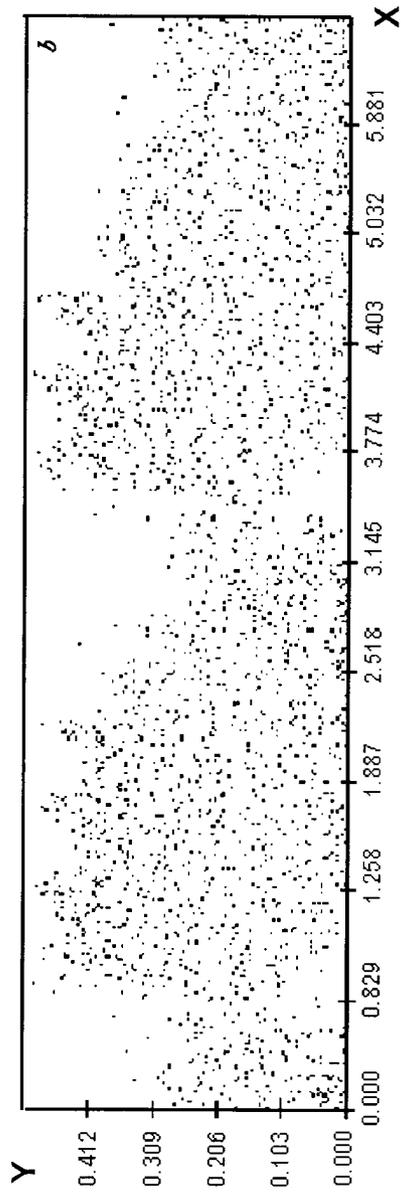
На рисунке, a, b приведены типичные конфигурации самоподдерживающихся электронных густков при различных U_a (a — выше номинального, b — ниже номинального). Для сравнения на рисунке, c показана конфигурация электронного облака в номинальном режиме. Для удобства цилиндрическая конфигурация показана в координатах $x = \varphi$ ($0 < \varphi < 2\pi$) и $y = \ln(r/r_c)$ ($0 < y < \ln(r_a/r_c)$), где r_c — радиус катода, r_a — радиус анода.

Существование самоподдерживающихся электронных густков вызвано действием полей пространственного заряда. Поскольку величины анодных напряжений магнетронов мм-диапазона в рассмотренных режимах близки к критическим ($U_a \approx 0.7-0.9U_c$), то даже в случае срыва колебаний добавка радиальной силы пространственного заряда (который вблизи анода по знаку складывается с постоянным анодным

Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 12



Конфигурация электронного облака в пространстве взаимодействия магнетрона мм-диапазона: $a - U_a > U_n$, $b - U_a < U_n$, $c - U_a = U_n$.



(продолжение рисунка).

электрическим полем) достаточна для прямого прохождения электронов на анод и поддержки электронного сгустка.

Как показали расчеты, расположение области возникновения самоподдерживающихся электронных сгустков по длине прибора носит случайный характер и определяется мгновенной конфигурацией и величиной заряда в данном месте, обеспечивающими достаточную для прохождения тока на анод величину радиального поля пространственного заряда.

Следует отметить, что по мере увеличения анодного напряжения и приближения его к критическому значению имеет место расширение области, занимаемой электронными сгустками, до тех пор, пока прямое токопрохождение не займет всю азимутальную длину прибора.

С понижением анодного напряжения число электронных сгустков увеличивается, а затем электронное облако превращается в сравнительно однородное образование.

С целью выяснения общности полученного эффекта было проведено моделирование процессов в магнетронах сантиметрового диапазона при анодных напряжениях, близких к критическим. Оказалось, что и в них наблюдаются сгустки, протекает анодный ток, сравнимый с номинальным, а выходная мощность отсутствует.

Вместе с тем, если моделировать работу магнетронов см-диапазона при значениях анодного напряжения, превышающих рабочие, но далеких от критических значений ($\sim 0.4-0.5U_c$), то в этом случае образование электронных сгустков не происходит, а ток на анод и генерация отсутствуют.

Из изложенного следует, что в приборах *M*-типа, работающих при анодных напряжениях, близких к критическому ($\geq 0.75U_c$), могут возникать самоподдерживающиеся электронные сгустки (без участия ВЧ полей), обуславливающие наличие нулевого тока в мм-приборах.

Следует отметить, что описанный эффект мог быть обнаружен только в рамках многопериодной модели [6], т. е. при рассмотрении всего пространства взаимодействия одновременно.

Полученные результаты представляются весьма важными с практической точки зрения, поскольку открывают возможность уменьшения нулевого тока в приборах *M*-типа мм-диапазона за счет разрушения самоподдерживающихся электронных сгустков конструкторскими решениями, аналогичными, например, методам, используемым для подавления электронных спиц в пространстве дрейфа магнетронных усилителей [8].

Список литературы

- [1] *Бербасов В.А., Кузнецов М.И., Степанов С.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 9. С. 1423–1430.
- [2] *Бербасов В.А., Кузнецов М.И., Нечаев В.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. № 2. С. 290–298.
- [3] *Осипчук Ю.М.* // Электронные СВЧ-приборы со скрещенными полями. Т. 1 / Под ред. М.М. Федорова. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. С. 237–270.
- [4] *Петров А.Ю., Усыченко В.Г.* // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 8. С. 1481–1485.
- [5] *Усыченко В.Г.* // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 10. С. 1243–1250.
- [6] *Байбурин В.Б., Терентьев А.А., Пластун С.Б.* // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 2. С. 236–240.
- [7] *Терентьев А.А., Ильин Е.М., Байбурин В.Б.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29. № 10. С. 72–79.
- [8] *Пат № 3733509 (США).* Кл. 315–3.6. Заявл. 15.07.69. Оpubл. 15.05.73.