

Самоорганизация электронных потоков, взаимодействующих с поверхностью, в системах со скрещенными полями

А.В. Агафонов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия,

В.П. Тараканов, В.М. Федоров

Научное объединение ИВТАН, Москва, Россия

Введение

С целью исследования проблемы нарушения магнитной изоляции в вакуумных коаксиальных диодах с плотными электронными потоками, используемых в мощных устройствах СВЧ-электроники и для формирования пучков, разработана численная модель нестационарной неоднородной эмиссии вторичных электронов в скрещенных полях. Обсуждаются проблемы динамики пучка в скрещенных полях в условиях развития неоднородной нестационарной самоподдерживающейся вторичной эмиссии, возникающей при обратной бомбардировке катода слаботочным первичным пучком электронов. Приведены результаты численного моделирования самоорганизации модулированных по азимуту электронных потоков при условии сохранения полной мощности и полного импульса системы как для режима самоподдерживающейся вторичной эмиссии, так и для случая эмиссии только первичного пучка с различным током, когда вторичная эмиссия отсутствует. Показано, что развитие неустойчивости и возникновение тока утечки поперек магнитного поля, превышающего критическое поле магнитной изоляции, обусловлено существованием обратной связи на эмиттирующей поверхности, при которой вращающийся и модулированный в азимутальном направлении поток обеспечивает правильную фазировку тока вторичной эмиссии знакопеременным на поверхности катода радиальным электрическим полем, либо фазировку тока первичных электронов меняющимся во времени радиальным полем в случае отсутствия вторичной эмиссии. При отсутствии вторичной эмиссии сильная азимутальная неустойчивость в потоке первичных электронов возникает только, если ток пучка меньше предельного по пространственному заряду, т.е. когда катод работает в режиме насыщения. Азимутальная неустойчивость в чисто первичном потоке не возникает вообще, если ток первичного пучка ограничен пространственным зарядом. Приведены результаты расчетов для 2-D геометрии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 00-02-16182.

Самоорганизация электронных потоков в условиях самоподдерживающейся вторичной эмиссии

Предварительные результаты приведены в работах [1–3]. Численное моделирование процессов проводилось по коду КАРАТ [4] для магнетронных диодов с параметрами, близкими к экспериментальным [5] при учете влияния внешней цепи, в которую был включен источник напряжения $V_0(t)$, подсоединенный к МД через RLC-цепочку. Выход вторичных электронов с катода рассчитывался с учетом его зависимости от энергии бомбардирующих частиц и угла падения их на катод.

Основные параметры МД, использованные в расчетах: радиус анода $r_A = 0,53$ см, радиус катода $r_K = 0,33$ см; внешнее магнитное поле $B_0 = 2,5$ кГс ($B_0/B_{cr} \simeq 1,15$, $\omega_{ec}/2\pi = 7$ ГГц, период циклотронного вращения 0,14 нс); скорость нарастания напряжения до максимального

значения $V_{0m} = 12$ кВ варьировалась от 2 до 10 нс; максимальный ток эмиссии первичных электронов $I_{em} = 3$ А. Для данного напряжения и геометрии предельный ток Чайльда-Ленгмюра в диоде без магнитного поля составляет $I_{CL} \simeq 200$ А (здесь и далее токи и заряды соответствуют значениям на 1 см длины в аксиальном направлении).

Электротехнические параметры: $\tau_{L/R} = 0,25$ нс, $\tau_{RC} = 0,24$ нс, где C — емкость МД. Скорость дрейфа электронов в скрещенных полях $\bar{v}_{e\theta} = cE_0/B_0 = 2,4 \times 10^9$ см/с, если оценивать электрическое поле как V_{AK}/d_{AK} .

В процессе формирования плотного электронного потока в осесимметричном МД при условии симметричной эмиссии первичного пучка возникает слабая азимутальная неустойчивость, развивающаяся из-за присутствия неизбежных флуктуаций поля в накапливаемом электронном потоке. Слабая азимутальная неустойчивость, вызываемая этими флуктуациями, усиливается за счет неоднородной вторичной эмиссии и возникновения положительной обратной связи на эмиттирующей поверхности. При условии сохранения полной энергии и полного момента импульса часть электронов под действием возникающего азимутального поля теряют энергию и смещаются в сторону больших радиусов, а часть приобретают, и возвращаются на катод с некоторым избытком энергии, достаточным для преодоления порогового характера вторичной эмиссии. Поскольку приходящие на катод электроны распределены по азимуту неоднородно, вторичная эмиссия электронов возникает пятнами и с большой плотностью тока. Это ведет к резкой неоднородности вторичной эмиссии и быстрому и эффективному росту числа вторичных электронов внутри МД. Ток вторичной эмиссии превосходит ток первичного пучка на несколько порядков величины и именно он оказывает определяющее влияние на характеристики МД, переводя его в режим самоподдерживающейся вторичной эмиссии, в котором первичный пучок становится излишним. После некоторого переходного процесса, в течение которого МД работает как “пылесос”, втягивая в межэлектродное пространство все большее количество вторичных электронов до тех пор, пока их заряд не достигнет предельного, формируется регулярная структура электронного потока в виде нескольких сгустков. Данная структура может сохраняться на протяжении длительного времени и вращается примерно с постоянной угловой скоростью, близкой к скорости дрейфа.

Переход от слабой к сильной азимутальной неустойчивости, сопровождающийся возникновением тока утечки на анод поперек магнитного поля, превышающего критическое поле магнитной изоляции, и возникновение регулярной самоподдерживающейся структуры потока обусловлены обратной связью на эмиттирующей поверхности. Механизм обратной связи объясняется знакопеременностью радиального электрического поля, вращающегося с частотой, примерно равной частоте дрейфа в скрещенных полях, на поверхности катода. Электроны, падающие на поверхность катода, вызывают вспышки вторичной эмиссии. Часть вторичных электронов, попавших в ускоряющую фазу радиального электрического поля, захватывается модулированным электронным потоком и остается в промежутке в течение многих оборотов вокруг катода, поддерживая его азимутальную и временную структуры. Другая часть электронов, выходящих с поверхности в фазах, когда поле замедляющее, возвращаются обратно на катод в течение времени, меньшего периода циклотронных колебаний. При этом в установившемся режиме число электронов возвращающихся на катод и захватываемых в ускоряющем промежутке, примерно равны.

Режим самоподдерживающейся вторичной эмиссии в МД характеризуется стремлением среднего значения радиальной составляющей электрического поля на катоде к нулю. Однако на данном азимуте поверхности катода поле осциллирует с частотой, равной произведению средней частоты обращения частиц на число сформировавшихся сгустков, а амплитуда осцилляций на поверхности катода меняется в диапазоне от -10 до 30–40 кВ/см при выбранных выше параметрах. Отметим, что сильная азимутальная неустойчивость существует только, если ток первичного пучка мал по сравнению с током вторичной эмиссии.

На рис. 1 слева показана устойчивая структура электронного потока внутри МД с вторичной эмиссией.

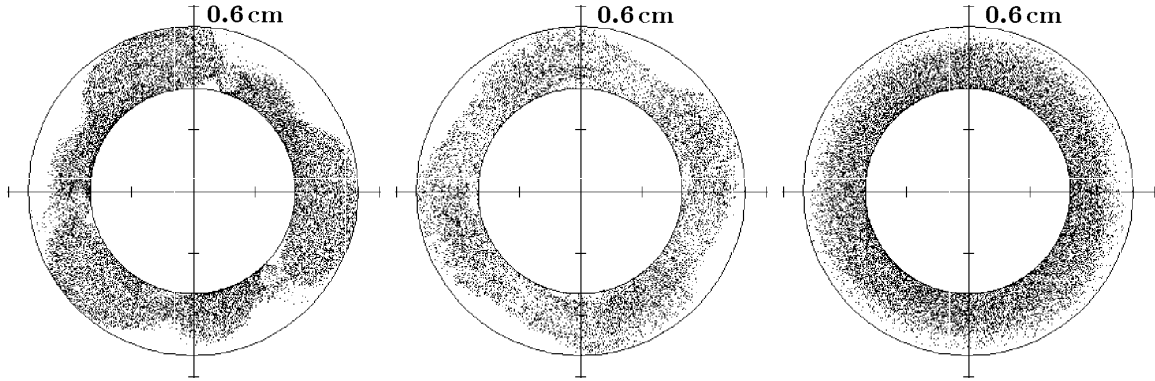


Рис. 1: Самоподдерживающиеся структуры потоков в режиме вторичной эмиссии (слева), в режиме насыщения катода с первичным пучком (средний рисунок) и в режиме ограничения тока пространственным зарядом первичного пучка (справа).

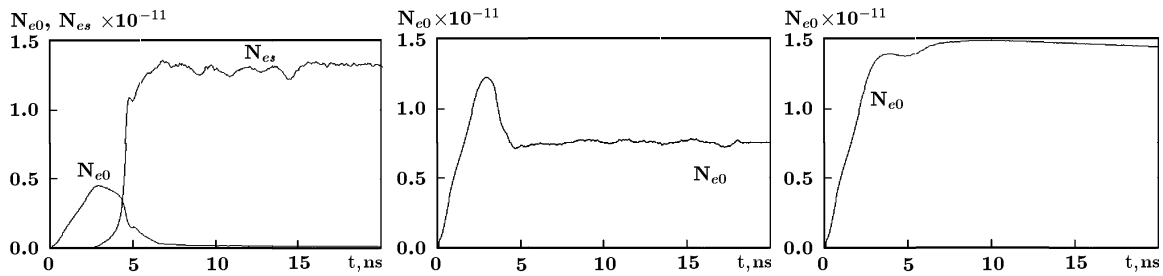


Рис. 2: Динамика накопления частиц внутри диода для отмеченных выше случаев.

На рис. 2 (слева) приведена динамика накопления первичных N_{e0} и вторичных электронов N_{es} внутри МД. Развертка во времени радиального электрического поля на поверхности катода показана слева на рис. 3.

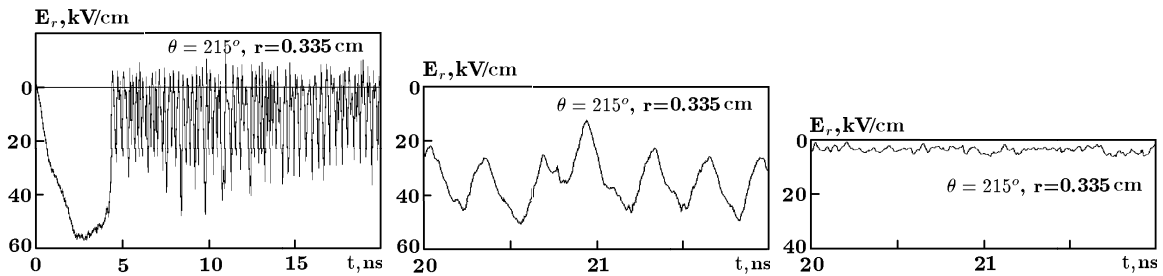


Рис. 3: Поведение радиального электрического поля на поверхности катода для отмеченных выше случаев.

Динамика чисто первичного пучка и смешанных пучков первичных и вторичных электронов с близкими токами

Исследование неустойчивости чисто первичного пучка при условии, что вторичная эмиссия отсутствует, с токами до предельного по пространственному заряду показывает, что в

последнем случае азимутальная неустойчивость не развивается вообще. Глубокая азимутальная модуляция потока и возникновение токов утечки на анод существуют только тогда, когда катод работает в режиме насыщения (нормальная составляющая электрического поля на катоде не равна нулю). Подобное поведение обусловлено тем же механизмом обратной связи на поверхности, и отличие состоит лишь в том, что радиальное электрическое поле на катоде не меняет знак, однако осциллирует с большой амплитудой. В середине рис. 1 показана регулярная структура чисто первичного пучка электронов N_0 в МД, работающем в режиме насыщения. Динамика накопления первичного пучка и поведение радиального электрического поля во времени на катоде показаны в середине рис. 2 и 3.

В случае, если ток первичного пучка сравним с током вторичной эмиссии, поведение электронного потока в МД в поздние времена аналогично случаю пучка с током, ограниченным пространственным зарядом (зависимости, показанные справа на рис. 1–3). Эмиттируемый однородно по азимуту первичный пучок сглаживает неоднородный характер вторичной эмиссии, и ток вторичной эмиссии уменьшается со временем, а радиальное электрическое поле на поверхности катода стремится к нулю. Азимутальная структура потока при этом исчезает. Но она появляется вновь, если уменьшить ток первичного пучка примерно на порядок величины.

3-мерные расчеты

Приведенные выше результаты получены для 2-мерной $r - \theta$ -геометрии. Результаты расчетов в 3-мерной геометрии подтвердили правильность основных физических механизмов и заключений, следующих из результатов 2-мерных расчетов.

Заключение

Показано определяющее влияние механизма обратной связи на эмиттирующей поверхности на процесс самоорганизации и возникновение регулярных структур электронных потоков в скрещенных полях.

Список литературы

- [1] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada. 1997, v. 2, 1299 – 1301.
- [2] Агафонов А.В. – Труды 2-го семинара памяти В.П.Саранцева. Дубна, ОИЯИ, 1998. D9-98-153, 105 – 109.
- [3] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of the 12th Intern. Conference on High-Power Particle Beams. Israel, Haifa, 1998.
- [4] Kotetashwily P.V., Rybak P.V., Tarakanov P.V. Institute of General Physics, Moscow. – Preprint N 44, 1991.
- [5] Jepsen R.L. and Muller M.V. J. Appl. Phys. 1951, v. 22, 1196 - 1207.