

Эволюция электронного потока при импульсном способе возбуждения магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом

*Г.И. Чурюмов, д-р физ.-мат. наук, проф.; Ю.Л. Старчевский
Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует проблема создания надёжных электронных источников с большим сроком службы. Для её решения используют различные подходы, связанные с улучшением компонентов существующих электронных пушек и разработкой новых конструкций. Известны эксперименты по получению электронных потоков в магнетронах и магнетронных пушках с холодными металлическими вторично-эмиссионными катодами на первом участке спада импульса анодного напряжения [1-6]. Этот метод генерации электронных потоков является одним из самым эффективным, поскольку он позволяет обойтись без специального источника первичных электронов. Такие электроны появляются в достаточном количестве в результате автоэлектронной эмиссии с микроострий на поверхности катода [7]. Магнетронные пушки, работающие по этому принципу, имеют высокую надёжность и большой срок службы (до 10000 часов). С их помощью можно формировать трубчатые электронные пучки с током до 100 А при напряжениях до 100 кВ. Особый интерес вызывают результаты экспериментов по быстрому формированию электронных пучков на спаде наносекундного импульса анодного напряжения [8, 9], в которых получены трубчатые электронные пучки с диаметром, примерно равным диаметру катода, и толщиной стенки 1-2 мм за время порядка 1,5 – 2 нс после начала спада.

Повысить эффективность работы электронных приборов и технологических процессов, в которых применяются электронные пучки, можно благодаря внедрению магнетронных пушек с холодным вторично-эмиссионным катодом. Однако физические процессы формирования электронного потока в таких пушках изучены недостаточно, и это является сдерживающим фактором.

Известно, что наиболее перспективным методом теоретического исследования коллективных процессов, играющих важную роль при генерации, формировании и транспортировке электронных потоков, проводят при помощи компьютерного моделирования на основе метода крупных частиц [10]. Такой подход позволяет получить информацию, которую при данном уровне технологии невозможно зарегистрировать реальными измерительными приборами.

Целью данной работы является изучение внутренней структуры электронного потока, который формируется в магнетронной пушке с холодным вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса анодного напряжения, при помощи компьютерного моделирования.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схематическое изображение магнетронной пушки показано на рис. 1. Пушка содержит внутренний катод 1, рефлектор 2, внешний анод 3, коллектор 4, соленоид 5 и модулятор 6, формирующий отрицательный импульс, форма которого приведена на рис. 1. Данный импульс имеет фронт нарастания напряжения (интервал $0 \leq t \leq t_1$), первый фронт спада (интервал $t_1 < t \leq t_2$), область “полочки” импульса (интервал $t_2 < t \leq t_3$) и область второго фронта спада (интервал $t_3 < t \leq t_4$).

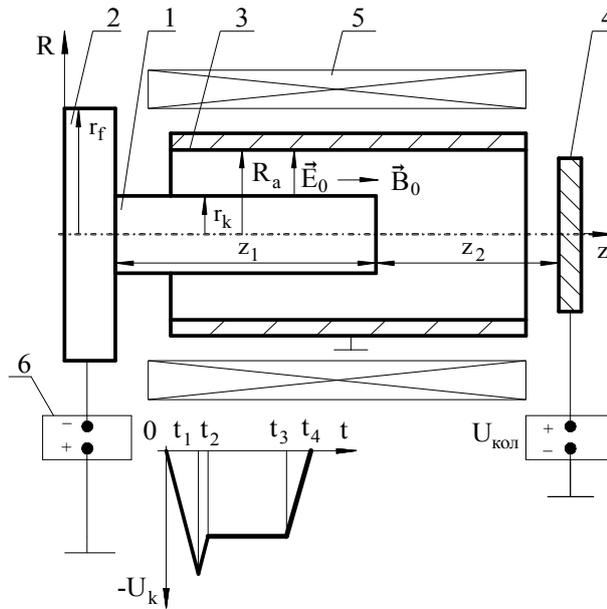


Рисунок 1 – Схематическое изображение магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом

В пространстве взаимодействия пушки присутствуют скрещенные радиальное электрическое \vec{E}_0 и продольное магнитное \vec{B}_0 поля, создаваемые модулятором 6 и соленоидом 5 соответственно. Исходные параметры магнетронной пушки для моделирования электронного облака выбирались согласно эксперименту, описанному в [9]. Индукция продольного магнитного поля B_0 задавалась равной 0,3 Тл. Амплитуда импульса напряжения составляла 7 кВ.

Конструкция магнетронной пушки имела следующие геометрические размеры: радиус катода $r_k = 1\text{мм}$; радиус рефлектора $r_f = 4\text{мм}$; радиус анода $R_a = 3,5\text{мм}$, длина катода $z_1 = 10\text{мм}$; расстояние между срезом катода и коллектором $z_2 = 17\text{мм}$ и временными параметрами катодного импульса: $t_1 = 1\text{нс}$, $t_2 = 2\text{нс}$, $t_3 = 10\text{нс}$. Задача заключалась в исследовании физических процессов в рабочем пространстве магнетронной пушки и изучении эволюции электронного потока.

2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Моделирование проводится методом крупных частиц в квазистатическом приближении. Основу математической модели составляет система уравнений движения электронов и уравнения Пуассона, записанная для случая движения электронов в нестационарном электрическом поле:

$$\frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \eta \cdot (\vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{v}(t) \times \vec{B}_0), \quad (1)$$

где $\eta = \frac{|e|}{m} = 1,758796 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ – приведенный заряд электрона; $\vec{v}(t) = d\vec{r}(t)/dt$ – вектор скорости электронов; $\vec{E}(\vec{r}, t)$ – суммарная напряжённость электрического поля, включая поле пространственного заряда в точке, характеризуемой радиусом-вектором \vec{r} в текущий момент времени t .

Для каждого фиксированного момента времени t определяется суммарная напряжённость электрического поля $\vec{E}(\vec{r}, t)$:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\text{grad } U(\vec{r}, t), \quad (2)$$

а потенциал $U(\vec{r}, t)$, обусловленный пространственным зарядом $\rho(\vec{r}, t)$ и электродами, находится из решения уравнения Пуассона:

$$\Delta U(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t)}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Таким образом, самосогласованная система уравнений, включающая уравнение движения (1) и уравнение Пуассона (3), решается при следующих начальных ($t = 0$) и граничных условиях:

$$\vec{v} = \vec{v}_0, \vec{r} = \vec{r}_0, U_{\text{АНОДА}} = 0, U_{\text{КАТОДА}} = -U(t), U_{\text{ГРАНИЦЫ}} = 0, \quad (4)$$

где \vec{v}_0 – начальный вектор скорости частиц; \vec{r}_0 – начальный радиус-вектор частиц, находящихся в рабочем пространстве; $U(t)$ – функция, характеризующая зависимость потенциала катода от времени.

Для решения уравнения Пуассона (3) был использован конечно-разностный неявный итерационный метод с последовательной комбинацией решений в декартовой и цилиндрической системах координат в трёх измерениях. Это позволяет использовать решение уравнения (3) в декартовой системе координат как начальное приближение для его последующего решения в цилиндрической системе координат. Данный переход предполагает уточнение граничных условий и сглаживание распределения потенциала. Такой сложный алгоритм решения уравнения Пуассона связан с существенным различием сходимости его решений в декартовой и цилиндрической системах координат и обусловлен более высокой точностью и скоростью решения уравнения (3) в декартовой системе координат [11]. Уравнение движения (1) решается с применением векторного метода [12].

Предложенный алгоритм решения уравнений (1) – (4) был реализован на алгоритмическом языке Visual C++ для операционной системы WINDOWS в виде программы трехмерного моделирования нестационарных процессов 3D-BMS.03 (3-Dimensional - Bunch Modeling System). Данная программа позволяет найти распределение потенциала между электродами практически любой формы и рассчитать траектории частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях с учётом объёмного заряда в трёх измерениях [13].

3 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено трёхмерное математическое моделирование с учётом пространственного заряда магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом. Показано, что первичный автоэмиссионный ток должен превышать 3,5% от тока коллектора. Это согласуется с экспериментальными исследованиями в работе [9]. Рассмотрены различные точки эмиссии первичных электронов. Показано, что наиболее эффективно процесс накопления заряда происходит при эмиссии первичных электронов в краевом поле рефлектора, что согласуется известными экспериментальными данными. Электроны в этой области получают дополнительную энергию благодаря спаду напряжения на катоде и рефлекторе и получают продольную скорость. Заряд в этом случае не только накапливается, но и быстро распространяется по поверхности катода. Таким образом, формируется электронное облако в рабочем пространстве магнетронной пушки. По этой причине острейшую систему для формирования первичного электронного потока необходимо размещать возле рефлектора. Полученное распределение плотности пространственного заряда (рис. 2) в различные моменты времени показывает, что возле рефлектора плотность пространственного заряда минимальна и острейшая система не будет находиться под влиянием интенсивной электронной бомбардировки. Это даёт возможность обеспечить большой срок службы и высокую надёжность работы магнетронной пушки.



Рисунок 2 – Распределение плотности заряда $\rho(z)$ по продольной координате для роста ($t = 1\text{нс}$), спада ($t = 1,5\text{нс}$) и стационарной части ($t = 3\text{нс}$) импульса напряжения между катодом и анодом

Электронный пучок существует за счёт самоподдерживающейся вторичной эмиссии. Его параметры со временем практически не изменяются, это можно видеть из рис. 3 (а, б), на которых показаны кривые накопления пространственного заряда и тока, обусловленного частицами, вылетающими на коллектор.

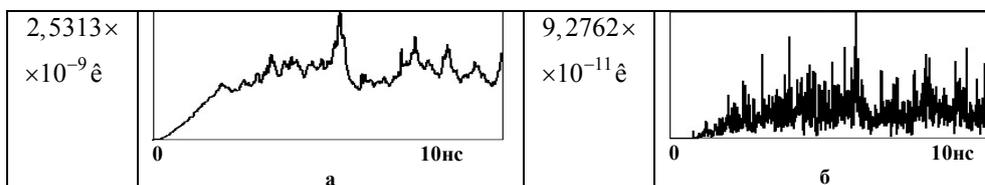


Рисунок 3 – Зависимость пространственного заряда в рабочем пространстве пушки (а) и заряда, попадающего на коллектор, (б) от времени

Ток коллектора отличается от экспериментального тока, приведенного в [9], не более чем на 8 % и равен 1.75 А. Данный результат сравнения протекания физических процессов в реальном и машинном экспериментах подтверждает адекватность построенной математической модели магнетронной пушки. Построены распределения частиц по энергиям бомбардировки катода для различных моментов времени (рис. 4). Показано, что наличие объёмных сил расталкивания приводит к появлению частиц с малыми энергиями, которые прилегают к катоду, и к росту числа частиц, которые бомбардируют катод с энергией, превышающей первый критический потенциал и соответствующей восходящей ветви кривой коэффициента вторичной эмиссии для выбранного материала катода (меди).

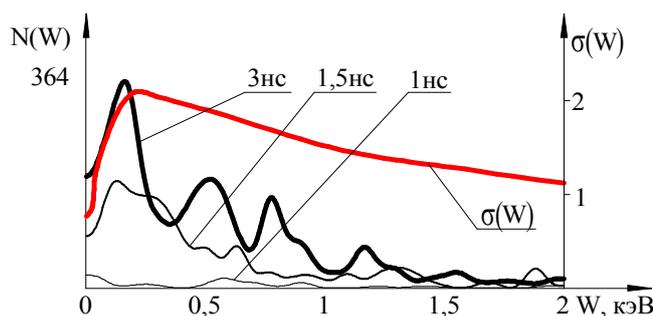


Рисунок 4 – Распределение электронов по энергиям бомбардировки для роста ($t = 1\text{нс}$), спада ($t = 1,5\text{нс}$) и стационарной части ($t = 3\text{нс}$) импульса напряжения между катодом и анодом

Распределение электронов по энергиям бомбардировки может быть использовано для выбора материала катода таким образом, чтобы максимум функции распределения электронов по энергиям бомбардировки катода соответствовал максимуму коэффициента вторичной эмиссии выбранного материала.

Рассмотрены дифференциальные характеристики электронного потока в различных сечениях магнетронной пушки (рис. 5–7). Начальная стадия запуска электронного пучка происходит при росте импульса анодного напряжения (рис. 5).

Условно электронная пушка разделена на три области: генерации А, формирования Б и транспортировки С. На продольном сечении видно, как распределяется продольный заряд по поверхности катода в области генерации А и формируется первичное электронное

облако. В области формирования Б присутствует краевое электрическое поле среза катода. Оно задаёт электронному потоку характерную геометрию. В данном случае электроны приближаются к оси симметрии системы из-за постепенного уменьшения радиальной составляющей электрического поля.

Продольная составляющая электрического поля в области Б ускоряет электроны. Это позволяет им перейти в область транспортировки С и достигнуть коллектора. В этой области электроны движутся по спиралевидным траекториям, поскольку они находятся под воздействием только постоянного магнитного поля и электрического поля пространственного заряда. При моделировании процесса генерации электронного потока в области А эмиссия начальных электронов производилась из четырёх точек. В области С хорошо видно, что пучок сохранил свою неоднородную структуру в виде четырёх электронных потоков. Процесс вторично-эмиссионного размножения наиболее интенсивно протекает вблизи электронных сгустков, которые в результате увеличиваются, и, таким образом, происходит банчировка.

Спад напряжения на катоде приводит к увеличению интенсивности электронной бомбардировки поверхности катода и перераспределению энергий в потоке (рис. 6).

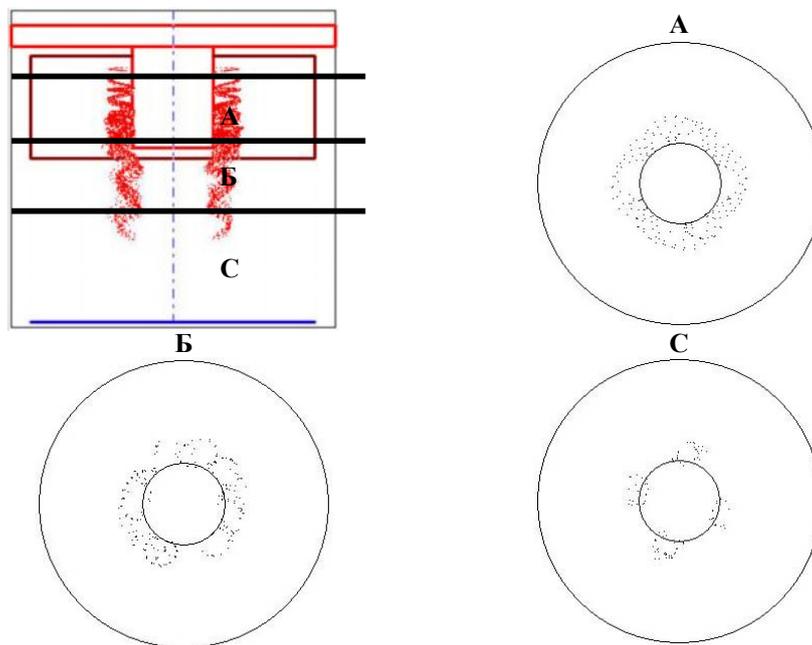
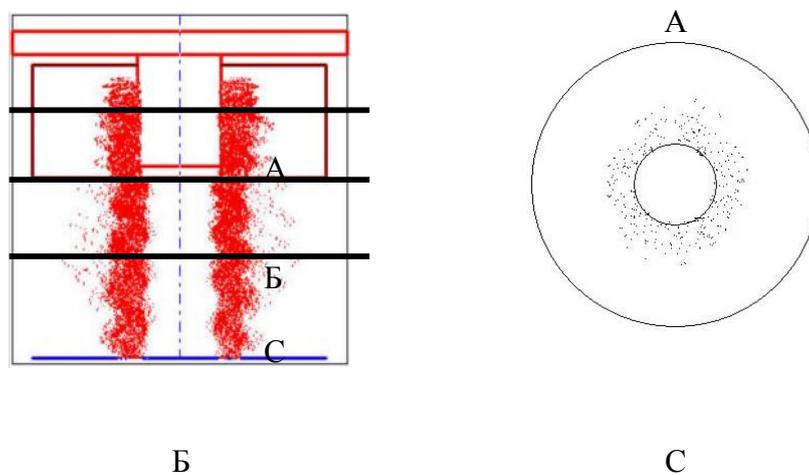


Рисунок 5 – Начальный этап формирования электронного пучка на фронте импульса анодного напряжения



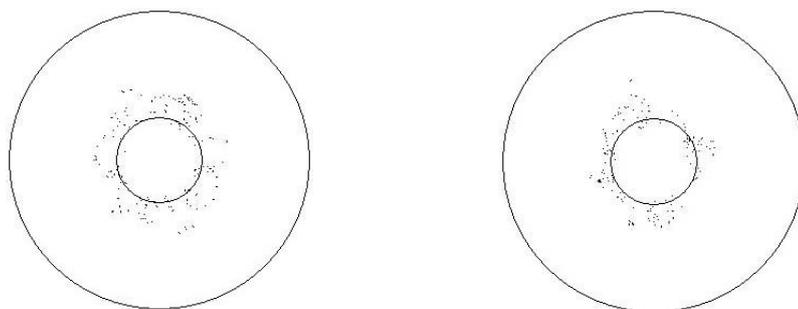
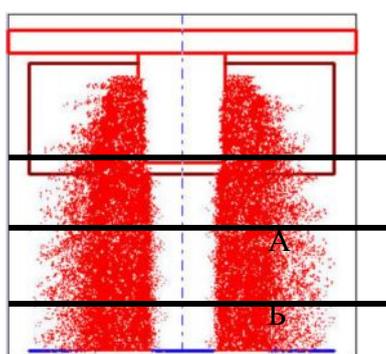


Рисунок 6 – Формирование электронного пучка на спаде импульса анодного напряжения

Наблюдается процесс интенсивного вторично-эмиссионного размножения, и электронный пучок становится более равномерным за счёт роста сил расталкивания между электронными сгустками и отдельными частицами. В результате в области генерации А формируется достаточно равномерная по азимуту электронная втулка. На этом этапе просматривается влияние поля пространственного заряда, приводящего к нарушению магнитной изоляции и смещению частиц на большие радиусы относительно оси симметрии коаксиальных электродов.

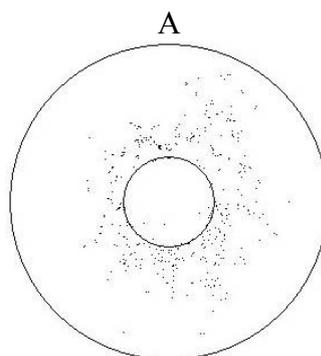
Спад напряжения приводит к разбросу электронов по продольным скоростям. Частицы, вылетевшие в область транспортировки с поверхности катода раньше, при большем потенциале катода обладают большей продольной скоростью. Частицы, вылетевшие с катода в конце спада импульса напряжения, имеют меньшую продольную скорость. В результате спада напряжения электронное облако прижимается к поверхности катода.

На стационарном участке импульса напряжения магнетронная пушка работает в режиме самоподдерживающейся эмиссии (рис. 7). Это возможно благодаря существованию плотных электронных сгустков, которые при своём движении вызывают флуктуации электрического поля вблизи поверхности катода. На некоторых участках потенциал пространственного заряда превышает потенциал катода и наступает режим ограничения токоотбора с поверхности катода. Если на каком-то участке плотность электронов невелика по сравнению с той, которая обеспечивает режим самоограничения, то там возможен процесс интенсивного вторично-эмиссионного размножения.



С

Б



С

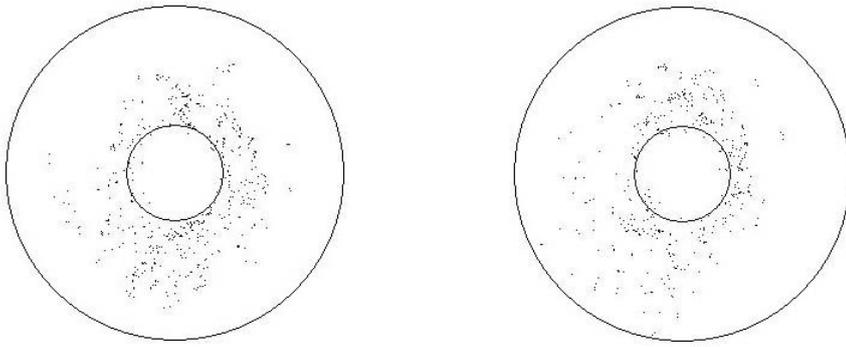


Рисунок 7 – Состояние электронного потока при выходе на стационарный участок импульса анодного напряжения

В стационарном режиме происходит окончательное формирование электронного потока, который представляет собой во всех сечениях набор неравномерных плотных электронных сгустков. Эти сгустки не разрушаются и не позволяют существенно изменять геометрические размеры электронного потока за счёт вариации магнитного поля. Транспортировка электронного потока протекает в магнитном поле, превышающем магнитное поле Бриллюэна для электронного пучка без пульсаций. В итоге частицы собираются около электронных сгустков, каждый из которых вращается с циклотронной частотой, и напоминает, в какой-то мере, поток Бриллюэна (внутри сгустка присутствуют незначительные пульсации). С увеличением магнитного поля \bar{B}_1 электронные сгустки сжимаются, но их распределение в пределах трубчатого электронного потока практически не меняется. Уменьшается плотность пространственного заряда между сгустками, которые сами становятся более плотными. Взаимодействие между ними ослабевает (рис. 8а). Это и объясняет слабое влияние магнитного поля на форму электронного потока. Когда плотность электронных сгустков приближается к бриллюэновской, происходит нарушение магнитной изоляции, которая определяет конфигурацию сгустков. При дальнейшем увеличении магнитного поля сгустки взрываются и частицы разлетаются по всему рабочему пространству пушки.

При ослаблении магнитного поля $\bar{B}_2 < \bar{B}_1$ плотность внутри электронного сгустка уменьшается. Электроны, находящиеся на периферии сгустков, сталкиваются и в результате возникают турбулентности, приводящие к разрушению существующих сгустков, образованию новых и увеличению разброса скоростей в потоке (рис. 8б).

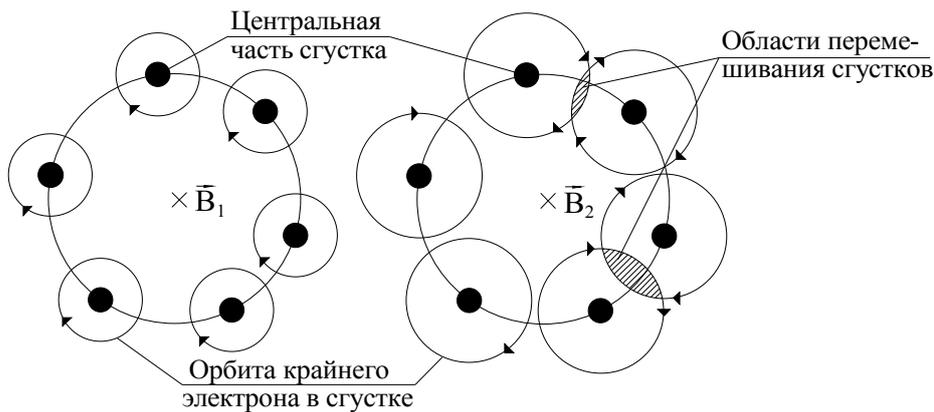
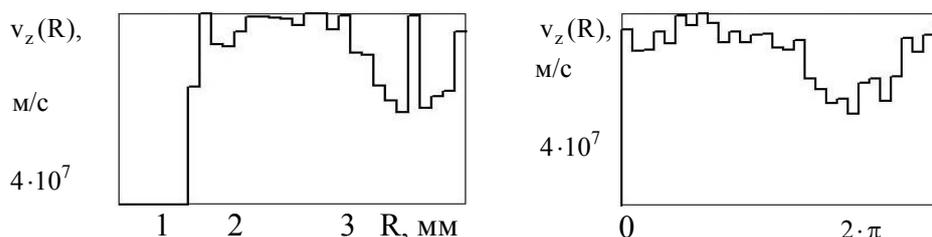


Рисунок 8 – Схематическое изображение сбанчиванного электронного потока в сильном (а) и слабом (б) магнитных полях

Особый интерес представляет распределение электронов по скоростям в сформированном пучке на выходе из пушки. Это является важным, поскольку позволяет определить область применения формируемого электронного потока. В СВЧ-приборах требуются пучки с минимальным разбросом скоростей для снижения уровня шума. В шумовых генераторах наблюдается противоположная ситуация. В некоторых технологических процессах нет жёстких требований к разбросу скоростей в электронном потоке. Для того чтобы вычислить, какой продольной скоростью обладают частицы на заданном радиальном удалении от оси пушки, пространство по радиусу и углу разбивается на 30 участков. В фиксированный момент времени вычисляется среднее значение продольных скоростей частиц на каждом участке. Результат можно увидеть на рис. 9.



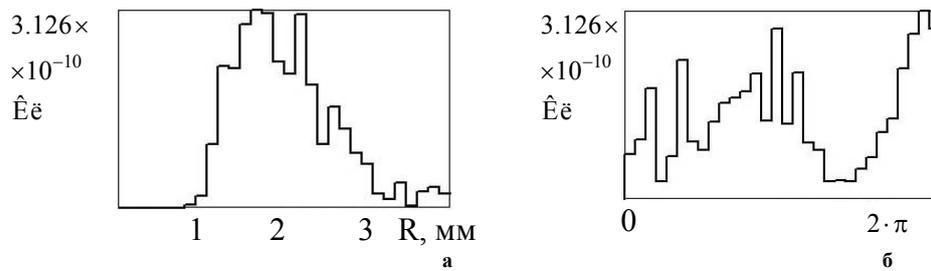


Рисунок 9 – Распределение заряда в потоке и продольной скорости частиц по радиусу (а) и углу (б)

Из рис. 9 видно, что толщина трубчатого электронного потока составляет около 2 мм, а радиус примерно равен радиусу катода, что совпадает с результатом реального эксперимента. Распределение частиц по продольным скоростям в сформированном пучке также неравномерное, но большая часть электронов движется с практически одинаковой скоростью. Разброс электронов по скоростям не превышает 1–2 кэВ, что согласуется с экспериментальной работой [14].

Наблюдаемому разбросу скоростей можно дать теоретическое объяснение без учёта объёмного заряда. Электроны, эмиттируемые с катода, обладают потенциальной энергией, соответствующей потенциалу катода. Их энергия расходуется на приобретение продольной и радиальной скоростей при движении в скрещенных электрическом и магнитном полях. Если частица приобретает большую продольную скорость, её радиальная скорость согласно закону сохранения энергии становится меньшей, и наоборот, если частица движется с большой радиальной скоростью, то её продольная скорость невелика.

Экспериментально и на основании теоретических расчетов [15] установлено, что конструкция малощумящей пушки должна обладать следующей особенностью: конфигурация электрического поля должна быть подобрана таким образом, чтобы основная часть эмиссии отбиралась с края катода и при этом, благодаря большой плотности краевого тока вблизи катода, образовывалась протяжённая низкопотенциальная область, потенциал которой был бы соизмерим с эквивалентным потенциалом, обусловленным разбросом скоростей электронов в потоке. Эти требования были выработаны из расчёта, что в электронном приборе устанавливается термоэлектронный катод.

Обеспечить низкопотенциальную область в магнетронной пушке, изучаемой в данной работе, затруднительно, поскольку на катод подаётся потенциал 7 кВ, поэтому согласно [15] пучок должен быть турбулентным.

Основная причина шумов заключается в разбросе поперечных скоростей электронов [16]. Экспериментальные исследования, проведенные в [16], показывают, что магнетронная пушка с малыми шумами должна быть с конусным катодом. Таким образом, турбулентности, наблюдаемые в пучке при экспериментах и моделировании, также обусловлены цилиндрической геометрией пушки. С другой стороны, цилиндрическая магнетронная пушка с холодным вторично-эмиссионным катодом надёжно работает за счёт разброса скоростей в прикатодной области и колебаний пространственного заряда, который является дополнительным источником шума.

Генерация электронного пучка с большой плотностью тока и малой временной задержкой конструктивно обеспечена за счёт нарушений всех требований, которые предъявляются к малошумящим пушкам. Теоретический разброс продольных скоростей должен находиться в пределах от нуля до максимального значения, однако в экспериментальных работах нулевых скоростей не наблюдается, диапазон разброса существенно уже. Это явление можно объяснить влиянием поля пространственного заряда. Если поток электронов движется с различными скоростями, то быстрые электроны догоняют медленные и образуются плотные электронные сгустки, которые ускоряют медленные электроны за счёт торможения быстрых. Такой энергетический обмен приводит к выравниванию продольных скоростей большинства электронов в потоке. Это явление наблюдалось как в проведенных численных расчётах, так и в экспериментах.

Тем не менее полностью устранить разброс скоростей указанным методом не удаётся, поэтому для применения исследуемой пушки в электронных сверхвысокочастотных приборах после вывода пучка из рабочего пространства магнетронной пушки необходимо использовать устройства подавления шумов. Данная пушка может успешно применяться в различных технологических процессах, которые не предъявляют жёстких требований к разбросу скоростей электронов в пучке.

Численный подход в отличие от результатов траекторного анализа, полученных для случая кинематического приближения, позволил увидеть физическую картину протекающих процессов, объясняя эффект размножения электронов. На стационарной части импульса напряжения наблюдается интенсивный

вылет частиц на катод, что позволяет поддерживать постоянную плотность объемного заряда как в области пушки, так и вне её пространства.

Полученные результаты моделирования можно использовать для совершенствования конструкции магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом. Участки катода возле рефлектора можно выполнять из специально разработанных материалов и сплавов с большим коэффициентом вторичной эмиссии и малым значением первого критического потенциала [17]. Поскольку интенсивность электронной бомбардировки этих участков незначительна, такие катоды будут иметь большой срок службы, что позволит обеспечить надёжный запуск вторично-эмиссионного размножения и генерации электронного потока.

ВЫВОДЫ

1 Разработана численная трехмерная нестационарная математическая модель магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом. Проведено детальное комплексное исследование механизма генерации, формирования и транспортировки электронного потока в магнетронной пушке с холодным вторично-эмиссионным катодом при импульсном способе инициирования эмиссии. Впервые получены пространственные и временные распределения дифференциальных параметров электронного потока (координат и скоростей частиц), а также интегральных параметров (тока коллектора, объёмной плотности пространственного заряда, распределения частиц по энергиям бомбардировки катода) в магнетронной пушке с холодным вторично-эмиссионным катодом.

2 Исследованы физические процессы, протекающие на фронте и спаде импульса анодного напряжения с учетом поля пространственного заряда. Предположение, что на фронте импульса анодного напряжения преобладают автоэлектронные процессы, позволило получить для выбранного электрического режима работы в пространстве магнетронной пушки начальный ток порядка нескольких десятков миллиампер. На спаде импульса анодного напряжения траектории движения электронов, образующих начальный ток, изменяются таким образом, что процесс вторично-эмиссионного размножения при формировании электронного облака становится определяющим. Установлено, что преобладание этого процесса связано со смещением энергии бомбардировки частиц, вылетающих на катод, в область, для которой коэффициент вторичной эмиссии становится больше единицы.

3 Рассмотрены процессы накопления заряда в нестационарных условиях. Определены продольные и радиальные распределения заряда в различные моменты времени формирования электронного пучка. Показана эволюция распределения частиц по энергиям бомбардировки катода со временем.

4 Получены распределения заряда в потоке по радиусу и углу. Показано распределение частиц в сформированном пучке по продольной скорости. Распределение заряда хорошо согласуется с экспериментальной работой [9]. Большинство частиц движется с одинаковой скоростью. Разброс не превышает $\pm 10\%$. Пространственный заряд уменьшает разброс скоростей в потоке.

5 Проведено сравнение теоретического значения тока коллектора, полученного с помощью трехмерной математической модели, с его экспериментальным значением, приведенным в работе [9]. Показано, что для рассматриваемой магнетронной пушки расхождение между данными значениями тока коллектора не превышает 8%.

SUMMARY

The problem are the investigation of physical processes in work space of magnetron gun and study evolution of electron beam. For solve this problem the three-dimensional transient mathematics model of magnetron gun was created. Thank for this model the process of generation electron beam simulated and taken distribution of charge density in gun work space, particle distribution of cathode bombardment energies, coordinates and velocities. The electron beam evolution in time is shown.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко В.Д., Черенщиков С.А. Исследование запуска магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса напряжения // Известия высших учебных заведений. - 1984. – Т. XXVII, N 2. – С. 250-256.
2. Черенщиков С.А. О запуске магнетрона с холодным катодом на спаде импульса напряжения // Электроника СВЧ. - 1973. - № 6. - С. 20-28.
3. White R.A. Cold cathode operation of a hot cathode magnetron // IEEE Tr. On ED. - 1963. p. 59.

4. White R.A. More information on the cold cathode operation of a hot cathode magnetron // IEEE Tr. On ED. - 1963. p. 96.
5. Ломакин В.М., Панченко Л.В. О самовозбуждении импульсного магнетрона при малых значениях начальной эмиссии катода. (Холодное самовозбуждение) // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1970. - №2. - С. 33-42 с.
6. Yuriy M. Saveliev, Wilson Sibbett, David M. Parkers. Characterisation of Electron Beams Produced by Crossed-Field Secondary Emission Diodes // J. Appl. Phys. - 2001. - Vol. 40, N. 2B. - pp. 940-943
7. Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Коваленко Т.А., Семенец Т.А. К вопросу о генерации электронных пучков в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами // Вестник ХНУ. Сер. Ядра, частицы, поля. - 2003. - Т. 601, №2. - С. 91-96.
8. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Красноголовец М.А., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным металлическим катодом // Журнал технической физики. - 2002. - Т. 73, № 10. - С. 124-127.
9. Ромасько В.П. Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным металлическим катодом // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71, № 9. - С.134-136.
10. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. - М.: Мир, 1987. - 638 с.
11. Чурюмов Г.И., Старчевский Ю.Л., Лебедев О.Г., Новиков Н.И. Сравнение численного решения уравнения Пуассона в декартовой и цилиндрической системах координат // Радиотехника и информатика. - 2004. - №3. - С. 28-33.
12. Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В., Красноголовец М.А., Старчевский Ю.Л., Чурюмов Г.И. Векторный метод решения уравнения движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях (кинематическое приближение) // Радиотехника. - 2003. - №131. - С. 88-94.
13. Чурюмов Г.И., Старчевский Ю.Л., Лебедев О.Г., Исаева Е.Б. Динамика и формирование электронного облака в магнетронной пушке с холодным вторично-эмиссионным катодом // Радиотехника и информатика. - 2004. - №2. - С. 25-30.
14. Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. Энергетический спектр пучка магнетронной пушки с холодным вторично-эмиссионным катодом // Вестник ХНУ. Сер. Ядра, частицы, поля. - 2001. - Т. 522, №2. - С. 70-74.
15. Савельев В.С., Ширина В.А. Электронные пушки для малошумящих ЛБВ // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1970. - №13. - 44 с.
16. Сисодиа М.Л., Ганди О.П. Исследование шумов в электронных пушках со скрещенными полями // Переводы иностранной литературы. Сер. Электроника СВЧ. - 1970. - С. 35.
17. Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. Сплавы для эмиттеров вторичных электронов. - М.: Центральный институт информации, 1957. - 38 с.

Поступила в редколлегию 10 декабря 2004г.