

Ю. Я. ВОЛКОЛУПОВ, канд. физ.-мат. наук, А. Н. ДОВБНЯ, д-р физ.-мат. наук,
В. В. ЗАКУТИН, канд. физ.-мат. наук, М. А. КРАСНОГОЛОВЕЦ, д-р физ.-мат. наук,
Ю. Л. СТАРЧЕВСКИЙ, Г. И. ЧУРЮМОВ, д-р физ.-мат. наук

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ С УЧЁТОМ ДВУМЕРНОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Введение

В настоящее время широко проводятся исследования вторично-эмиссионных процессов в скрещенных полях. Это явление используется в приборах СВЧ (магнетронах с вторично-эмиссионным холодным катодом, магнетронных пушках и т.д.) [1]. Для описания движения электрона в скрещенных полях применяются численные методы решения общего уравнения Лоренца. Суть этих методов подробно описана в [2] и [3]. Они основаны на формальном решении дифференциальных уравнений, описывающих физический процесс, и последующем обосновании результата с физической точки зрения. Нами разработан новый метод, позволяющий отслеживать численные характеристики движения электрона (рис.1). Его отличие от существующих методов заключается в более высокой точности и скорости проведения расчёта.

1. Методика проведения расчётов

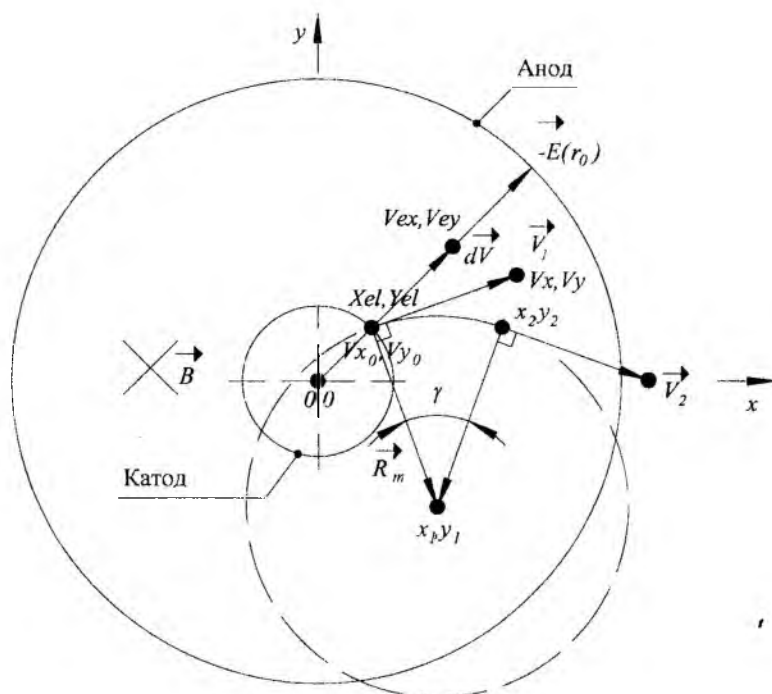
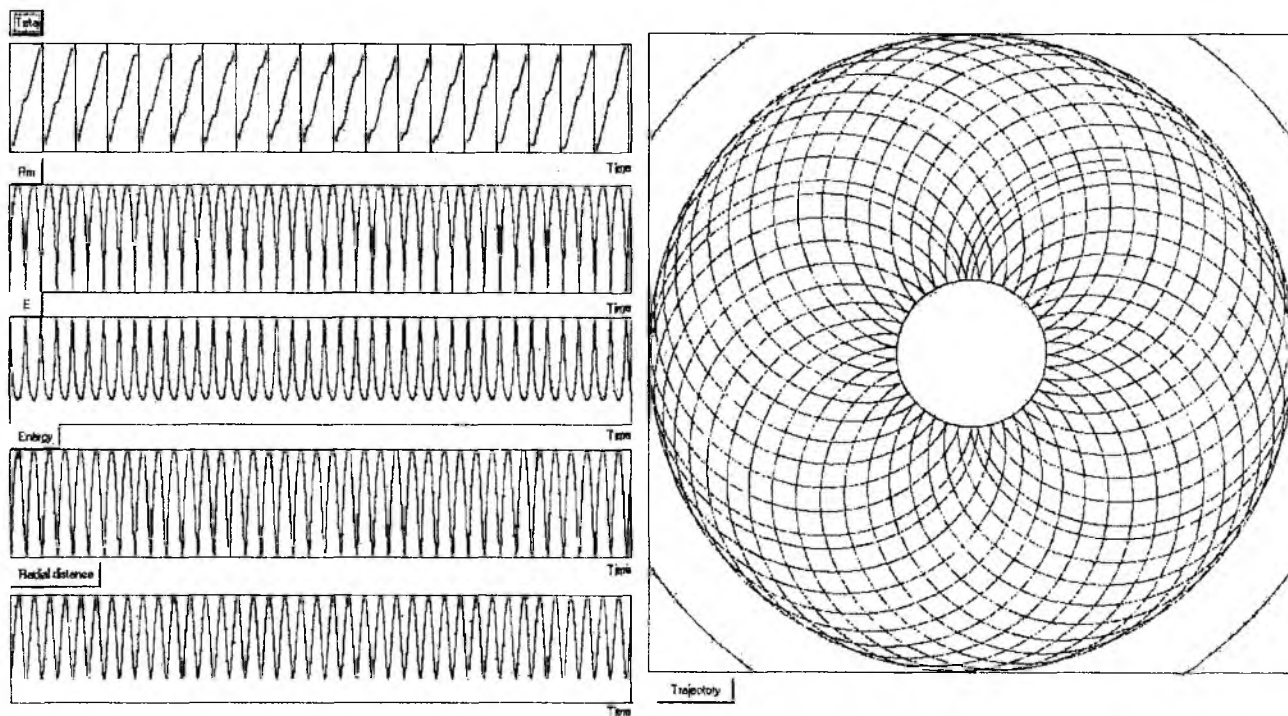


Рис. 1

Суть метода состоит в следующем: рассматривается двумерная задача описания движения электрона, за начало координат принимается центр катода – точка $(0, 0)$. Задача решается в декартовых координатах. Электрон, покидающий катод, имеет координаты $(X_{el}; Y_{el})$. Вектор начальной скорости электрона \vec{V}_1 имеет координаты $(V_x - V_{x0}; V_y - V_{y0})$. За время одного шага расчёта он перемещается по дуге γ в точку с координатами $(x_2; y_2)$. Для расчёта этого перемещения необходимо определить вектор магнитного радиуса \vec{R}_m , относительно которого будет происходить вращательное движение. Действие электрического поля рассматрива-

ется отдельно от магнитного с помощью вектора $d\vec{V}$ с координатами $(V_{ex}-V_{x0}; V_{ey}-V_{y0})$. В точке $(x_2; y_2)$ векторы $d\vec{V}$ и \vec{V}_1 складываются, и в результате получается новый вектор скорости электрона \vec{V}_2 . Результирующий вектор скорости позволяет определить новое значение вектора магнитного радиуса. Далее необходимо перейти к следующему шагу по времени и повторить расчёт.

Рассмотрим результаты расчёта по разработанной методике на примере движения электрона в стационарных скрещенных полях.



а

б

Рис. 2

Результаты расчёта представлены на рис. 2. На рис. 2 б изображена траектория движения, а на рис. 2 а сверху вниз – графики зависимостей от времени: угла поворота относительно оси y с учётом периода обращения, радиуса поворота в магнитном поле, напряжённости электрического поля, кинетической энергии электрона, радиального удаления от центра катода.

Т а б л и ц а

| Магнитная индукция, Тл | Энергия вылета, эВ | Напряжение на катоде, В | Шаг по времени, с | Расчётное время движения электрона, с | Радиус анода, м | Радиус катода, м |
|------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------|------------------|
| 0,093 | 4 | 22500 | 10^{-13} | $2 \cdot 10^{-8}$ | 0,013 | 0,0025 |

Исходные параметры, описывающие электрон и пушку в начальный момент времени, занесены в таблицу.

Графики угла поворота (Theta) относительно вертикальной прямой с учётом периода обращения и радиального удаления (Radial distance) от центра катода позволяют задать уравнение траектории в полярных координатах. График радиуса поворота в магнитном поле характеризует вектор \vec{R}_m . График напряжённости электрического поля (E), в котором находится электрон, характеризует влияние электрической составляющей электромагнитного поля во времени.

Графики энергии (Energy) и радиального удаления показывают, что электрон в стационарном поле на определённой орбите обладает некоторой энергией, которая от времени не зависит. Из траектории, приведенной на рис. 2, видно двухпоточное состояние электронов, описанное в [4]. Также видно две области сгущения электронов возле катода и анода. Это говорит о том, что большую часть времени при движении электрон проводит возле электродов. Центральную часть межэлектродного промежутка электрон проходит достаточно быстро. Если не учитывать краевые эффекты и взаимное влияние электронов друг на друга, то при работе пушки на экране наблюдалось бы два максимума электронного тока на уровне электродов. Отметим, что со временем распределение пространственного заряда изменяется [1], [9]. Влиянием краевых эффектов в общем случае пренебрегать нельзя, поэтому описанное распределение экспериментально не подтверждается [7]. Бомбардировка катода электронами в стационарных полях происходит с энергией вылета. В целом результаты расчёта согласуются с известными [8]. Разработанную программу можно применять для анализа движения электронов в скрещенных полях без учёта пространственного заряда и краевых эффектов.

2. Движение электрона в нестационарных скрещенных полях

Исследуем движение электрона в нестационарном электрическом поле. Исходные параметры описаны в таблице, которая приведена выше.

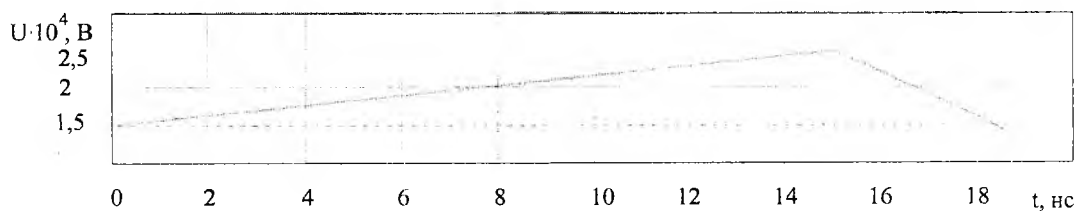


Рис. 3

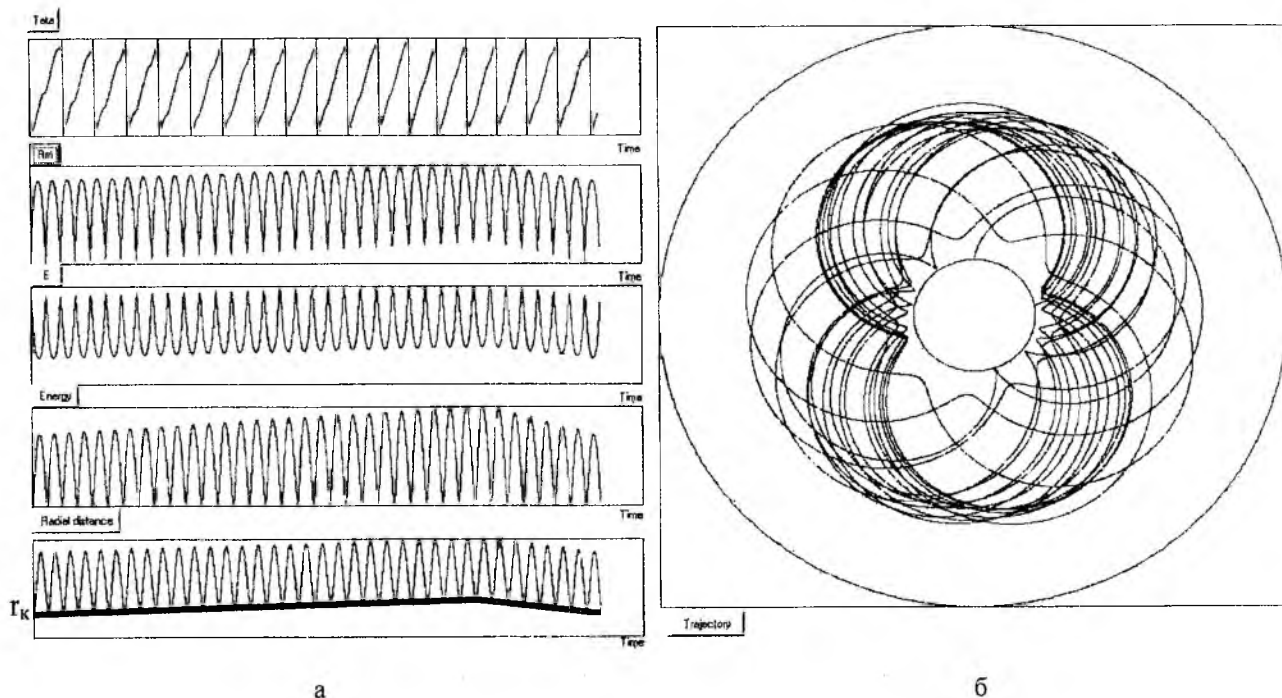


Рис. 4

На катод подавался треугольный импульс, изображённый на рис. 3. Рост напряжения начинается с 15 кВ, поскольку при меньших значениях эмиссия электронов незначительна [5]. Спад напряжения заканчивается ниже, чем 15 кВ, так как при этом напряжении согласно расчётам все электроны подлетают к катоду, и в течение одного циклотронного периода происходит бомбардировка.

Аналогичные рассмотренным выше зависимости, описывающие это движение, приведены на рис. 4.

График траектории во времени представляет собой «крутящуюся восьмёрку» по углу, которая видоизменяется в зависимости от изменения напряжения. С ростом напряжения угол поворота «восьмёрки» уменьшается. Она как бы замирает в пространстве. При спаде напряжения угол поворота увеличивается. Из графика радиального удаления видно, что с ростом напряжения электрон удаляется от катода и с уменьшением – приближается. При этом минимальное радиальное удаление электрона от катода (жирная линия на рис. 4 а) определяется координатами и энергией электрона, а также напряжением на катоде и скоростью его изменения. Если электрон вышел с поверхности катода при напряжении от 15 кВ, то вернуться на катод он сможет тогда, когда напряжение после роста опустится до 15 кВ. Области сгущения электронов, о которых говорилось выше, в нестационарных полях также имеют место. Различие заключается в том, что в стационарных полях электрон со временем распределялся в пространстве по углу равномерно, а в нестационарных полях распределение в пространстве со временем по углу происходит неравномерно (рис. 4). Более того, если предположить, что в межэлектродном промежутке летает один электрон, то численная модель чётко представляла на графике траектории движения электрона участки, в которые этот электрон никогда не попадёт, и в которые он попадает неоднократно с определённой периодичностью. Это справедливо как для стационарных, так и для нестационарных полей. На рис. 4 а прослеживается корреляция формы огибающих графиков радиального удаления электрона от центра катода, напряжённости электрического поля и магнитного радиуса с формой импульса напряжения. При увеличении длительности или амплитуды импульса это совпадение искажается. Вторые производные огибающих графиков становятся отрицательными. Это свидетельствует о том, что электрическое поле возле катода меняется быстрее.

Рассмотрено изменение во времени энергий электронов, образовавшихся на спаде импульса напряжения при бомбардировке катода. При расчёте магнитное поле выбрано постоянным критическим для максимума напряжения 0,093 Тл.

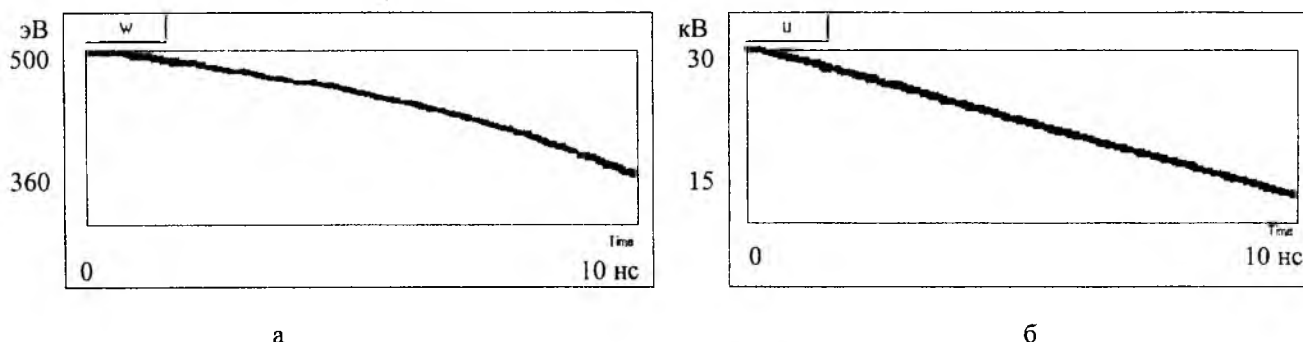


Рис. 5

Графики энергий электронов (W) при бомбардировке катода и напряжения на катоде (U) от времени представлены на рис. 5.

Принцип работы вторично-эмиссионных катодов магнетронной пушки заключается в использовании первичных электронов для выбивания вторичных. При этом максимум коэффициента вторичной эмиссии для многих материалов находится в области энергий 500 эВ [5]. Для поддержания коэффициента вторичной эмиссии на максимальном уровне желатель-

но поддерживать энергию бомбардировки катода постоянной. Это возможно, если импульс напряжения со временем будет спадать быстрее.

Электрон начинает своё движение в более сильном поле и заканчивает в более слабом. Это приводит к тому, что он набирает энергию. При этом траектории электронов, начавших движение на вершине импульса напряжения, значительно больше, чем у электронов, начавших своё движение в конце спада. Постоянное магнитное поле при уменьшении напряжения становится сильно закритическим. Межэлектродное пространство со временем используется менее эффективно. Электрон отлетает от катода на небольшое расстояние. Время прохождения траектории для всех электронов примерно одинаково и составляет $5.1 \cdot 10^{-10}$ с с точностью до 10^{-11} с.

Такая ситуация позволяет увеличивать время движения электрона при спаде импульса напряжения, ослабляя магнитное поле до критического. Траектории электронов, образовавшихся на спаде импульса напряжения и магнитного поля, со временем будут по длине больше, а не меньше траекторий предшествующих электронов. Их время движения также увеличится. При этом значительно повышается эффективность использования межэлектродного пространства.

Воздействие на электрон при его быстром движении, которое раньше обеспечивалось быстро меняющимся полем, теперь можно достигнуть слабо меняющимся полем при более низкой скорости движения электрона. Увеличение времени движения электронов позволяет использовать управляющие импульсы с большей длительностью спада. Эта проблема является актуальной, поскольку минимальная длительность определяется не только характеристиками генератора, но и искажениями, вносимыми передающими цепями [10]. При малых размерах пушки требуются импульсы с меньшей длительностью спада, которые технически не всегда удаётся получить. В частности, осуществить более быстрый спад импульса напряжения, показанного на рис. 5 для выравнивания графика энергий бомбардировки, с физической точки зрения целесообразно, а с технической – затруднительно. Предложенное решение данной проблемы представлено в следующем примере.

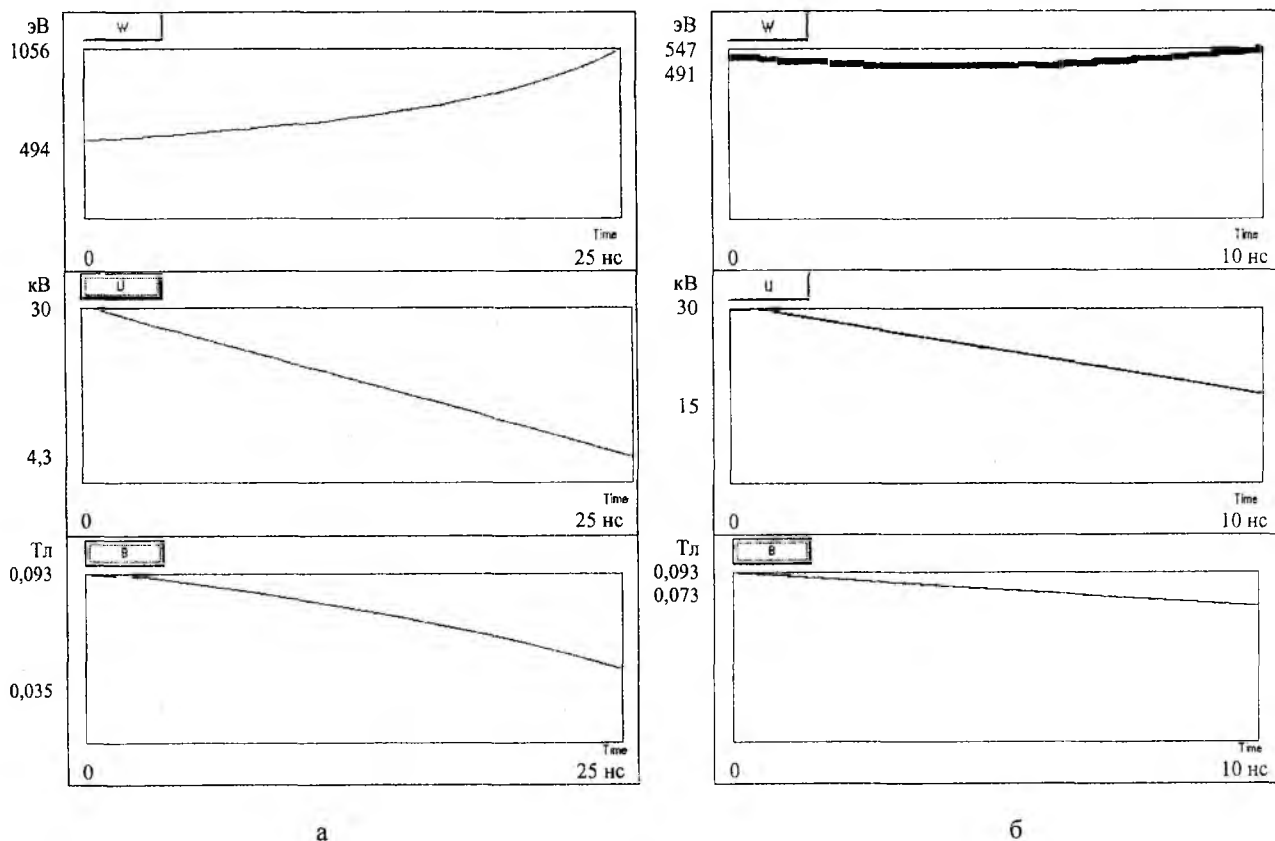


Рис. 6

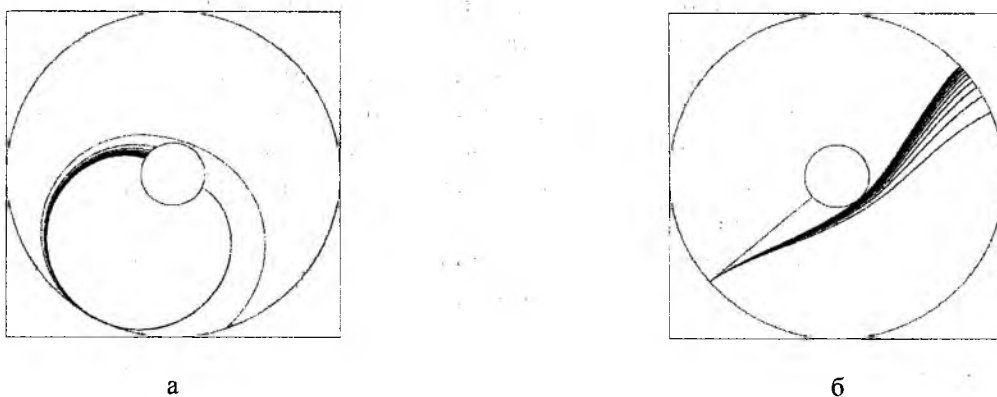


Рис. 7

Рассмотрим изменение во времени энергий электронов, образовавшихся на спаде импульса напряжения при бомбардировке катода (рис. 6 а). Магнитное поле на каждом шаге расчёта уменьшается до критического в соответствии с изменением напряжения. Магнитное поле уменьшалось от 0,093 Тл до 0,035 Тл пропорционально $U^{1/2}$. Графики энергий электронов (W) при бомбардировке катода и напряжения на катоде (U) от времени представлены на рис. 6. Изображение траекторий для пушки с внутренним катодом представлено на рис 7 а и для наглядности описания процесса построено следующим образом. Электроны вылетают последовательно из одной точки. Следующий электрон начинает своё движение сразу же, как только предыдущий ударится о катод. Для такой системы полей характерно, что два последовательных электрона движутся по практически одинаковым траекториям. Однако время движения у них отличается. Например, последний, 39-й, электрон находился в межэлектродном промежутке дольше первого более чем в 2 раза. За это время 39-й электрон успел набрать энергию бомбардировки, превышающую энергию бомбардировки первого электрона также более чем в 2 раза. В стационарном поле электрон в конце циклотронного периода приближается к катоду перпендикулярно поверхности, а в нестационарных полях этого не происходит. В связи с этим азимутальная составляющая скорости не гасится, что является положительным фактором для вторичной эмиссии. На рис. 7 а показана траектория, полученная для электрона, который постоянно находился в критическом магнитном поле, не вернулся на катод, зато уверенно попал на анод. Это явление описывает один из механизмов появления анодного тока при закритических магнитных полях. Другой, более важный вывод говорит о том, что возможно обеспечить набор энергии электроном, достаточной для вторично-эмиссионного размножения, при напряжениях порядка нескольких киловольт. При других размерах электродов «промахнувшийся» мимо катода электрон не сразу попадает на анод, а может ещё некоторое время двигаться вокруг катода, то приближаясь к нему, то отдаляясь. Если электромагнитное поле зафиксировать, то этот электрон будет там летать постоянно, создавая провисание потенциала.

Энергия бомбардировки электронов со временем возрастает (рис. 6 а, график W). Для обеспечения вторичной эмиссии на катоде желательно, чтобы эта энергия со временем не менялась. Для этого можно менять магнитное поле пропорционально напряжению в диапазоне от 0,093 Тл до 0,073 Тл. Графики энергий электронов (W) при бомбардировке катода и напряжения на катоде (U) от времени представлены на рис. 6 б. Магнитное поле в этом режиме работы всё время закритическое, но со временем оно то отдаляется, то приближается к критическому. Траектории электронов соответственно то уменьшаются, то увеличиваются, и таким образом меняется эффективность использования пространства, заполненного электромагнитным полем.

Из рис. 6 можно сделать вывод, что если со временем напряжение уменьшать медленнее, то график энергии бомбардировки также выравнивается и можно применить импульс напряжения большей длительности, что актуально с технической точки зрения. Расчёты показали,

что таким образом удаётся удлинить импульс на несколько наносекунд. Наиболее эффективный способ увеличения длительности управляющего импульса – это увеличение габаритных размеров пушки.

Недостатком описанных выше методов является то, что вследствие неучтённых факторов возможно резкое увеличение анодного тока, наблюдаемого при различных экспериментах. Альтернативным решением этой проблемы может стать конструкция пушки с внутренним анодом и внешним катодом. Рассмотрим достоинства такого устройства по сравнению с вышеописанным. Во-первых, больше эмиттирующая поверхность при тех же габаритных размерах. Во-вторых, анод пушки можно сделать на столько малым, на сколько позволяют технические возможности. Это приведёт к существенному уменьшению анодного тока в любых режимах работы.

Построенная математическая модель применима для конструкции обеих пушек. На рис. 7 б изображены траектории электронов в магнетронной пушке с внутренним анодом при подаче на него импульса напряжения, изображённого на рис. 6. Магнитное поле постоянно изменялось до критического значения на каждом шаге расчёта. Существенное различие между пушками заключается в характере движения электрона в нестационарных скрещенных полях. Как видно из рис. 7 а, магнетронная пушка с внутренним катодом в данной системе полей имеет тенденцию срыва вторично-эмиссионного процесса и образования анодного тока. Это происходит из-за постепенного увеличения угла бомбардировки и, в конечном счёте, пролёта электрона по касательной к катоду. Из рис. 7 б видно, что этого не происходит. Со временем электронные траектории отдаляются от анода и, таким образом, исключается такой механизм образования анодного тока.

Выводы

Разработан векторный метод определения траектории движения заряженных частиц в пространстве взаимодействия магнетронной пушки. Расчёты, проведенные программой, согласуются с тестовыми задачами. Рассмотрена зависимость энергии бомбардировки электронов от одновременного изменения электрического и магнитного поля. В нестационарном поле электрон может набирать энергию, которая зависит от соотношения скоростей роста и спада импульса напряжения. Предложен механизм образования анодного тока в закритических магнитных полях при росте и спаде напряжения на катоде.

Список литературы: 1. Л.А. Вайштейн, В.А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М: Советское радио, 1973. 400 с. 2. Д. Мак-Кракен, У. Дорн. Численные методы и программирование на фортране. М: МИР, 1977. 579 с. 3. Д. Поттер. Вычислительные методы в физике: Пер. с англ. Г.В. Переверзева / Под ред. Ю.Н. Днестровского. М: Мир, 1975. 392 с. 4. И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. Т. 2. М: Высш. школа, 1972. С. 264. 5. Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. Эмиссионная электроника. М: Наука, 1966. 564 с. 6. Довбня А.Н., Жигло В.Ф., Закутин В.В., Ромасько В.П. Экспериментальное исследование магнетронной пушки с холодным катодом // ВАНТ. ЯФИ. 1997. Т. 28, №1. С. 53 – 58. 7. Yuriy M. Saveliev, Wilson Sibbett and David M.Parkers. Characterisation of Electron Beams Produced by Crossed-Field Secondary Emission Diodes. Appl.-Phys. Vol. 40 (2001) pp 940 – 943. 8. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Механика. Электродинамика. М: Наука, 1969. 271 с. 9. А.В. Agafonov, V.M. Fedorov, V.P. Tarakanov. Self-Sustaining Emission in Magnetron Guns, Beam Modulation and Feedbacks Вопросы атомной науки и техники. 1999. №4 Сер. Ядерно-физические исследования (35), с. 11 – 13. 10. Ю.Я. Волколупов, А.Н. Довбня и др //ЖТФ, 2001, Т. 71, Вып. 9.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 19.11.2002