

$$t_1(s) = -\frac{\sigma}{\phi'_k} \sqrt{-\frac{m_0}{2e}} \sqrt{\varepsilon_s};$$

$$t_2(s) = T_1 x_k^2 + T_2 x_k \sqrt{\varepsilon_x} + T_3 \varepsilon_x + T_4 y_k^2 + T_5 y_k \times \sqrt{\varepsilon_y} + T_6 \varepsilon_y + T_7 \varepsilon_s,$$

где

$$T_1 = \kappa_T(s) B_1, \quad T_2 = \kappa_T(s) B_2, \quad T_3 = \kappa_T(s) B_3, \\ T_4 = \kappa_T(s) B_4, \quad T_5 = \kappa_T(s) B_5, \quad T_6 = \kappa_T(s) B_6,$$

$$T_7 = \kappa_T(s) \left[B_7 - \frac{2}{\phi'_k} \frac{\phi'_0}{k_\theta} \left(1 + \frac{e}{m_0 c^2} \frac{\sqrt{\Phi_{\theta 0}}}{k_\theta} \right) \right] - \frac{\kappa'_T(s) \sqrt{\Phi_{\theta 0}}}{\phi'_k k_\theta}.$$

Здесь

$$\kappa_T(s) = -\sigma \sqrt{-\frac{m_0}{2e}} \frac{k_\theta}{\sqrt{\Phi_{\theta 0}}}.$$

Отметим, что в последних выражениях абберационные коэффициенты T_1 и T_4 характеризуют (полевые) времяпролетные абберации положения второго порядка, T_2 и T_5 — времяпролетные хроматические абберации положения второго порядка, T_3 , T_6 и T_7 — времяпролетные сферохроматические абберации второго порядка.

Л и т е р а т у р а

1. Мамырин Б. А., Шмик Д. В. //ЖЭТФ, 1979. № 76. С. 1500.
2. Ильин В. П., Катешов В. А., Куликов Ю. В., Монастырский М. А. Численные методы оптимизации эмиссионных электронно-оптических систем. — Новосибирск: Наука, 1987.
3. Ибраев А. Т. Общие уравнения теории фокусировки в постоянных электрических и магнитных полях: Тезисы Восьмого Всероссийского семинара "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики". — М., 2007.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

The equations for research of the time-of-flight characteristics for movement of charged particles

A. T. Ibraev

Kazakhstan Academy of Information and Business, Almaty, Republic Kazakhstan

In the given work the general questions, connected with research as the time-of-flight characteristics, and the spatial characteristics of focusing the charged particles, are considered.

УДК 621.3.032.269.1+621.385.6

Метод и программа моделирования электронных пучков в электронно-оптических системах приборов СВЧ О-типа с полевой эмиссией

А. И. Петросян, В. И. Роговин

ФГУП «Научно-производственное предприятие "Алмаз"», г. Саратов, Россия

Представлены метод расчета и программа численного проектирования на ЭВМ электронно-оптических систем приборов СВЧ О-типа с полевой эмиссией. Программа позволяет рассчитывать ЭОС с матричными углеродными автоэмиссионными катодами, катодами типа Спиндта и лезвийными катодами. Правильность работы программы подтверждена в результате решения тестовой задачи, а также путем сопоставления данных расчета с результатами экспериментального исследования электронного пучка.

Представлены метод расчета и программа численного проектирования на ЭВМ электронно-оптических систем (ЭОС) приборов СВЧ О-типа с автоэлектронной эмиссией. Программа, развивающая подход, предложенный в работе [1], ориентирована на расчет ЭОС с матричными углеродными автоэмиссионными катодами с крупноячеистой управляющей сеткой, под каждой ячейкой которой размещено до нескольких десятков или даже сотен автоэмиссионных острий. Программа позволяет также рассчитывать ЭОС с катодами-остриями типа Спиндта [2] или лезвийными катодами [3, 4]. Для расчета напряженности поля применяется метод интегральных уравнений, позволяющий правильно рассчитать напряженность электростатического поля вблизи таких мелкоструктурных элементов, как острия высотой несколько микрон и радиусом кривизны вершины, равной 1 микрону и менее. Плотность тока считается в соответствии с законом Фаулера-Нордгейма, причем используются значения коэффициента усиления электрического поля и эффективной площади эмиссии катода (для подсчета тока пучка), рассчитанные на основе экспериментально снятых вольт-амперных характеристик электронных пушек с полевой эмиссией [1]. Имитация электронного пучка осуществляется методом крупных частиц. На выходе из пушки координаты и скорости крупных частиц и их токи записываются на жесткий диск ЭВМ. Используя эти величины в качестве начальных данных, можно по описанной выше программе численного проектирования пушек провести расчет фокусировки пучка в пространстве дрейфа. Фокусировка пучка осуществляется постоянным или переменным (в частности, синусоидальным) магнитным полем; предусмотрена возможность наличия магнитного поля на катоде и в пушке. Рассмотрим решение тестовой задачи для проверки правильности расчета электронных траекторий в магнитном поле. Известное параксиальное уравнение электронного пучка в эквипотенциальном пространстве и в постоянном магнитном поле в отсутствие пространственного заряда и магнитного поля на катоде имеет вид

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\eta B^2 r}{8U} = 0.$$

Нормируя поперечную и продольную координаты r и z , величину вектора магнитной индукции B и потенциал электростатического поля U величинами R_0 , B_0 и U_0 , соответственно, и проводя преобразования, получим:

$$\frac{d^2 R}{dZ^2} + \eta_m R = 0; \quad \eta_m = \frac{\eta B_0^2 R_0^2}{8U_0}. \quad (1)$$

Пусть $R_0 = 1$ см; $B_0 = B = 1$ Тл; $U_0 = 6000$ В. С учетом этих значений $\eta_m = 366,428$. Решением уравнения (1) является выражение вида

$$R = A \sin(2\pi Z / L + \varphi_0). \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получим следующее значение для периода L :

$$L = 2\pi / \sqrt{\eta_m}.$$

Таким образом, $L = 0,328$ см. На рис. 1 приведены рассчитанные на ЭВМ траектории электронного пучка в эквипотенциальном пространстве и в постоянном магнитном поле в отсутствие пространственного заряда и магнитного поля на катоде. Из рис. 1 видно, что разные траектории имеют разную величину периода пульсаций. Поскольку аналитически период пульсаций определяется из параксиального уравнения траектории, в котором углы наклона траектории должны быть возможно меньшими, постольку для сравнения нужно выбрать траекторию, ближайшую к оси симметрии пушки. Как видно из рис. 1, половина периода пульсации этой траектории равна 0,161 см, т. е. длина периода равна 0,322 см, что всего на 1,8 % меньше, чем значение длины периода, найденное аналитически. Таким образом, можно сделать вывод, что решение тестовой задачи подтверждает правильность расчета электронных траекторий в магнитном поле. С целью проверки правильности расчета пушки с автоэмиссионным катодом был проведен также расчет пушки (рис. 2), измеренной экспериментально [5]. По данным эксперимента, угол расширения пучка в пространстве дрейфа составляет 30° , а токопрохождение пучка через управляющую сетку равно 60 %. Расчетные значения этих величин равны 29° и 54 %, соответственно. Видно, что результаты расчета и эксперимента неплохо соответствуют друг другу. Сопоставление результатов расчета и данных экспериментального исследования пучка [5], эмитированного автоэмиссионным катодом, показало также их хорошее соответствие друг другу и по величине тока катода.

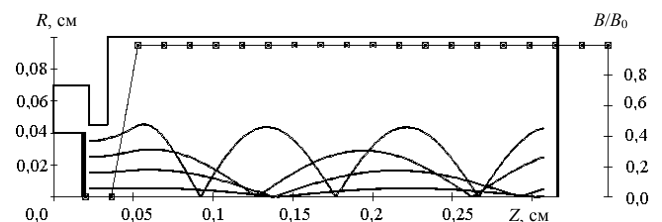


Рис. 1. Расчет тестовой задачи для проверки правильности счета электронных траекторий в магнитном поле

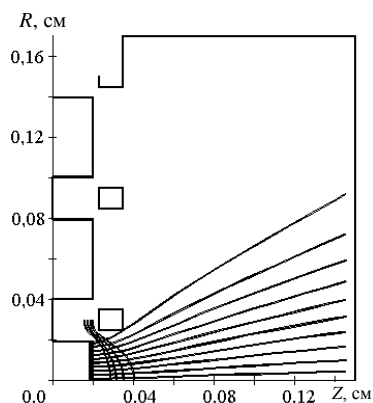


Рис. 2. Расчет траекторий крупных частиц и эквипотенциальных поверхностей ($U_{eq} = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$ от U_{an}) в обследованной экспериментально электронной пушке с полевой эмиссией

Таким образом, решение тестовой задачи, а также сопоставление данных расчета с результатами экспериментального исследования электронного пучка подтверждают правильность расчетов, проводимых на ЭВМ по данной программе. Опи-

санная программа применена для расчета разных вариантов ЭОС лампы бегущей волны О-типа [6].

Л и т е р а т у р а

1. Grigoriev Y. A., Petrosyan A. I., Penzyakov V. V., Pimenov V. G., Rogovin V. I., Shesterkin V. I., Kudryashov V. P., Semyonov V. C. // Technical Digest of IVMC-96. — St-Petersburg. P. 522—525.
2. Spindt G. A. A Thin-Film Field-Emission Cathode//J. of Applied Phys. 1968. V. 39. № 6. P. 3504, 3505.
3. Petrosyan A. I., Morev S. P., Rogovin V. I. // Technical Digest of 12-th IVMC-99, Darmstadt, Germany. P. 213—216
4. Grigoriev Yu. A., Petrosyan A. I., Pimenov V. G., Rehen G. A., Rogovin V. I., Shesterkin V. I. // Technical Digest of 11-th IVMC-98, Korea.
5. Бушуев Н. А., Григорьев Ю. А., Гаврюшова Н. Д. и др. Диодная многолучевая автоэмиссионная электронная пушка// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: Матер. науч.-техн. конф. — Саратов: СГТУ, 2006. С. 116—120.
6. Петросян А. И., Роговин В. И. Расчет электронно-оптических систем ЛБВО с полевой эмиссией// Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86—91.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

The method and the code of electron beam simulation in electron-optical systems of microwave tubes with field emission

A. I. Petrosyan, V. I. Rogovin

The Federal State Unitary Enterprise «Scientific-Industrial Enterprise "Almaz"», Saratov, Russia

The method and the code for computer-aided design of electron-optical systems for microwave tubes with field emission are presented. The code lets to simulate the electron-optical systems with matrix carbon field emission cathodes, with Spindt's cathodes and blade cathodes. The code correctness is confirmed by solving the test problem as well, as by comparing the results of computer-aided simulating and experimental analyzing of an electron beam.

* * *