

1. Борисов А. М., Маикова Е. С., Немов А. С. // Поверхность. 2003. № 4. С. 92.
2. Watanabe I., Okumara T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. P. L122.
3. Barklie R. C. // Diamond Relat. Mater. 2001. V. 10. P. 174.
4. Wagoner G. // Phys. Rev. 1960. V. 118. P. 647.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

## Study of carbon films, received with the help of a vacuum-arc ion source with the graphitic cathode

*L. D. Bogomolova, A. S. Nemov*

Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

*N. V. Borodulina, A. M. Borisov*

MATI — Russian State Technology University, Moscow, Russia

*D. A. Kozlov*

Moscow State Industrial University, Moscow, Russia

*D. I. Tsyganov*

Moscow Comitee for Science and Technology, Moscow, Russia

*A composition, structure and defects of electronic pattern of carbon films, received on unseparated implanter with a vacuum-arc ion source have been studied.*

УДК 621.385.6

## Комплекс программ расчета трехмерных электронно-оптических систем

*В. Д. Журавлева, С. О. Семенов*

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП "Алмаз"», г. Саратов, Россия

*Дано описание комплекса программ расчета трехмерных одно- и многолучевых электронно-оптических систем, состоящего из программ расчета электронных пушек, области фокусировки пучка, коллекторов и постпроцессора. Приведены примеры расчета узлов электровакуумных СВЧ-приборов.*

Электронные пучки широко применяются в различных областях науки и техники. Расчету характеристик пучков в различных устройствах посвящено огромное число работ, причем алгоритмы моделирования постоянно совершенствуются. В большинстве случаев реальные электронно-оптические системы представляют собой трехмерные конструкции, и разработке программ трехмерного моделирования всегда уделялось особое внимание [1—4]. В последние годы интерес к таким программам значительно вырос [5—10].

### Метод расчета

На основе алгоритма программы [4] был разработан комплекс программ расчета трехмерных одно- и многолучевых ЭОС, позволяющий, наряду с многоступенчатыми коллекторами, рассчитывать характеристики электронных пушек с термоэмиссией и фокусировку электронных пучков в пролетных каналах.

Во всех программах геометрия трехмерной области ЭОС в декартовой системе координат представляется [11] совокупностью произвольно расположенных в пространстве поверхностей второго порядка: плоскостей, цилиндров, конусов и сфер. Уравнение Пуассона в расчетной области аппроксимируется семиточечной конечно-разностной схемой [12]. Метод итераций используется для нахождения потенциалов в узлах прямоугольной сетки и для расчета поля пространственного заряда электронного пучка, в том числе с учетом поля вторичных электронов. Оценка погрешностей вычисления потенциала электрического поля и траекторий частиц проведена в работе [13].

Электронный пучок моделируется методом крупных частиц. Для уменьшения машинного шума при вычислении поля пространственного заряда используется модель "облако в ячейке" [14]. Частица имеет размер ячейки прямоугольной сетки, и распределение заряда по узлам проводится с помощью кубической интерполяции.

Для упрощения расчетов — сокращения времени и объема входных данных при наличии симметрии расчетной области — можно, наряду с граничным условием Неймана, использовать две зеркальные плоскости, от которых происходит упругое отражение частиц.

Эмиттеры являются частью названных поверхностей, и для их описания требуется задание лишь нескольких дополнительных параметров. Характеристики частиц в точках старта вычисляются с учетом начальных тепловых скоростей. Разбиение эмиттеров на элементарные участки происходит таким образом, чтобы площади этих участков были близкими по величине. Ток эмиттеров вычисляется по закону "3/2".

Использование для граничных условий аппроксимации Шортли—Уэллера позволило увеличить точность расчета потенциала вблизи криволинейных границ и, например, уменьшить примерно в 10 раз по сравнению с данными работ [13, 15] погрешность вычисления тока катода в тестовых задачах: цилиндрическом и сферическом диодах — до 0,36 и 0,69 %, соответственно.

Для более точного моделирования влияния мелкоструктурных элементов, например управляющих сеток, используется метод "лупы" — вводится вторая мелкоструктурная сетка. Предварительно для двух сеток рассчитываются граничные условия, определяются шаблоны сетки для околограничных узлов и т. д. На первой итерации по пространственному заряду решается уравнение Лапласа на крупной сетке и полученные значения потенциала пересчитываются во все узлы мелкой сетки, и далее итерационный процесс прово-

дится для мелкой сетки. На последующих итерациях пересчет потенциала проводится только для внешних узлов мелкой сетки, расположенных на ограничивающих область сетки плоскостях, так как пересчет потенциала для внутренних узлов мелкой сетки лишь увеличивает число итераций при решении системы линейных уравнений и время расчета.

В случае расчета электронных пушек для СВЧ-приборов с аксиально-симметричным пучком можно воспользоваться азимутальной симметрией сеток и рассчитывать лишь один сектор (рис. 1). В этом случае на радиальных поверхностях, ограничивающих сектор, для потенциала должно выполняться условие азимутальной периодичности, которому при отсутствии магнитного поля в области пушки соответствует задание на этих плоскостях граничного условия Неймана. При расчетах без магнитного поля для частиц, пересекающих ограничивающие сектор пушки плоскости, выполняется закон упругого отражения от этих плоскостей. Аксиально-симметричное магнитное поле с осью, совпадающей с осью катода, заставляет частицы вращаться в азимутальной плоскости. В этом случае при пересечении частицей радиальной ограничивающей плоскости осуществляется ее перенос в азимутальном направлении на угол между радиальными плоскостями — с соответствующим пересчетом координат частицы, компонент скорости и магнитного поля на катоде. Рассмотренный подход существенно упрощает задание входных данных и сокращает время расчета.

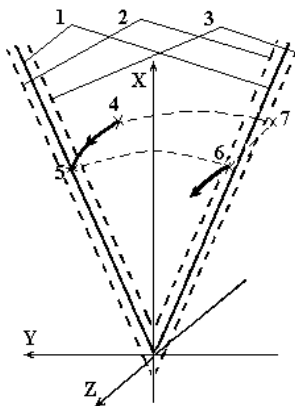


Рис. 1. Расчетный сектор электронной пушки:

- 1 — ограничивающие азимутальные плоскости; 2, 3 — плоскости с периодическим в азимутальном направлении значением потенциала; 4 — точка старта частицы с катода; 5 — точка пересечения частицей азимутальной плоскости; 6 — пересчитанное при наличии магнитного поля положение частицы; 7 — пересчитанное положение точки старта частицы с катода

Расчет фокусировки пучков в пролетных каналах проводится по строгой трехмерной модели. В случае, когда производной электрического поля в продольном направлении можно пренебречь, уравнения движения можно заменить уравнениями траекторий в прямоугольной системе координат:

$$x'' = \frac{1}{2V_z^2} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\eta_0}{V_z} \left\{ y'B_z - B_y \left[ (x')^2 + 1 \right] + xy'B_x \right\};$$

$$y'' = \frac{1}{2V_z^2} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\eta_0}{V_z} \left\{ x'B_z + B_x \left[ (y')^2 + 1 \right] + xy'B_y \right\};$$

$$\eta_0 = 29,65 \frac{B_0 R_0}{\sqrt{U_0}}, \quad V_z^2 \left[ 1 + (x')^2 + (y')^2 \right] + \Delta U = U_p,$$

где  $B_0, R_0, U_0$  — нормировочные параметры магнитного поля, длины и напряжения, соответственно;

$U_p$  — полная энергия частицы на входе в расчетную область;

$\Delta U$  — провисание потенциала.

Наличие в уравнениях множителя  $V_z$  позволяет рассчитывать движение многоскоростного пучка и учесть влияние провисания потенциала на энергию частиц. Для расчета потенциала в поперечном сечении пролетного канала произвольной формы решается двухмерное уравнение Пуассона. Применение указанного подхода позволило при одинаковых параметрах задачи — числе частиц, числе шагов в продольном направлении и размерах сеток в поперечном сечении ка-

нала — уменьшить время расчета движения пучка в области дрейфа по сравнению со строгой трехмерной моделью в 19—55 раз.

Важное значение в алгоритмах "частица—сетка—частица", особенно при расчетах на большую длину или большое число шагов по времени, имеет устранение эффекта "самодействия" частиц [16], увеличивающего "шумность" схемы расчета и приводящего к "размыванию" пучка. Причиной этого эффекта является несоответствие схемы распределения заряда по узлам сетки и схемы вычисления напряженности электрического поля, действующего на частицу. Поэтому в трехмерной модели применяется 32-, а в двухмерной — 12-точечная схема вычисления напряженности электрического поля.

В программах расчета электронных пушек, области фокусировки пучка, коллекторов по строгим трехмерным моделям возможно моделирование влияния вторичной эмиссии на характеристики ЭОС. Из точки оседания первичной частицы на поверхность электрода вылетают две группы вторичных частиц. Центральная частица первой группы вылетает по нормали к поверхности, для центральной частицы второй группы выполняется закон упругого отражения относительно угла падения первичной частицы. Остальные частицы вылетают пространственным веером вокруг центральных. В программе расчета коллекторов таких групп три. Частицы первых двух групп вылетают веером вокруг центральных, вылетающих по нормали, частицы третьей — аналогично описанной. Скорости вылета и заряды вторичных частиц связаны с параметрами первичной частицы соответствующими коэффициентами.

Во всех программах предусмотрены различные способы задания магнитного поля — от осесимметричного до произвольного трехмерного с заданием компонент поля в узлах трехмерной сетки. В программах рас-

чета фокусировки пучка дополнительно можно задавать периодические, изменяющиеся по закону синуса и косинуса, поля с набором гармоник и учетом их радиального изменения.

Все программы поддерживают возможность записи и считывания файлов характеристик пучка для проведения сквозных расчетов ЭОС. Для расчета характеристик ЭОС в статическом режиме расчет обычно проводится от катода, и данные о пучке последовательно передаются по всем программам. В случае расчета коллектора на его входе необходимо задавать динамический пучок, полученный в результате расчета по трехмерным программам взаимодействия пучка с полем электродинамической системы [17]. Чтобы использовать существующую эффективную двухмерную программу расчета взаимодействия [18], был разработан алгоритм преобразования двухмерного пучка в трехмерный с использованием равномерного случайного распределения чисел в интервале (0,1), с помощью которого задается азимут частицы и происходит соответствующий пересчет всех ее характеристик. На рис. 2 приведены примеры расположения частиц в поперечном сечении пучка для различных реализаций и значений коэффициента увеличения числа частиц.

Постпроцессор позволяет с использованием программ графики [19] представить результаты расчетов ЭОС и обработки различных характеристик пучка в графическом виде, а также сформировать файл характеристик пучка для последующих расчетов с возможностью азимутальной и пространственной трансляции пучков.

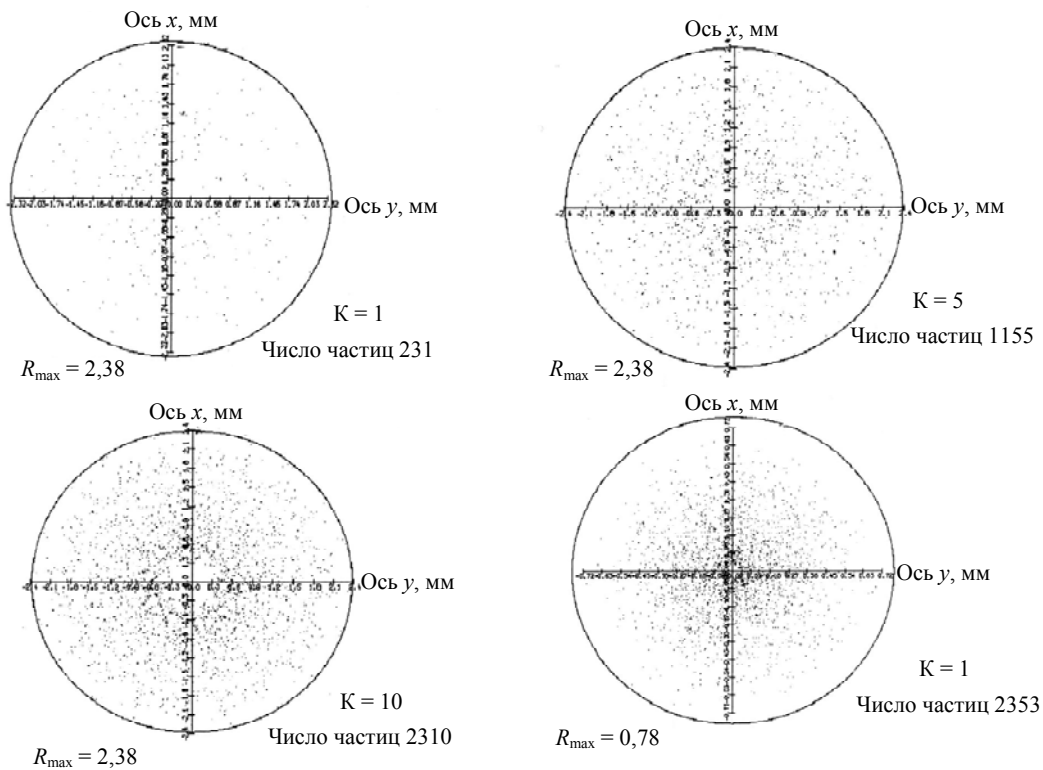


Рис. 2. Формирование трехмерного пучка в координатах X, Y, Z из двумерного (X, Z):  
K — коэффициент увеличения числа частиц

**Примеры расчета ЭВП СВЧ**

На рис. 3 представлены результаты расчета движения электронного пучка в электронной пушке и пролетном канале с фокусировкой МПФС, серийно выпускаемой ЛБВ, с микропервансом пучка 0,16 мкА/В<sup>3/2</sup>. Сравнение расчетного значения тока пучка с данными по 11 при-

борам показало, что отличие среднего измеренного значения тока от расчетного, определенное при среднем измеренном значении потенциала на сетке, составило 5,8 %, отличие величины запирающего напряжения — 6,4 %. Расчетная величина коэффициента токопрохождения пучка через пролетный канал 97 %.

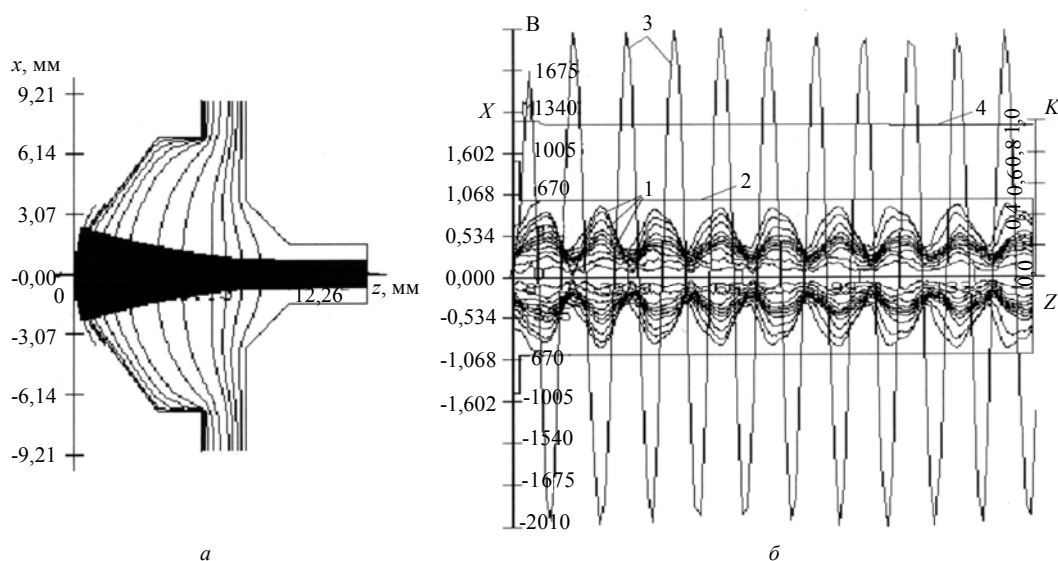


Рис. 3. Результаты расчета движения электронного пучка:  
траектории частиц в электронном пучке (а) и относительные уровни тока пучка (б) (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 0,99) — 1 в пролетном канале; 2 — пролетный канал; 3 — распределение продольной составляющей магнитного поля; 4 — зависимость коэффициента токопрохождения пучка по длине пролетного канала

Электронная пушка имеет теньевую и управляющую сетки, состоящие из центрального кольца и четырех радиально расположенных перемычек. На рис. 4 приведены результаты обработки пучка в области пушки при  $Z = 10$  (на входе в анодное отверстие). В поперечном сечении пучка строится сетка-анализатор, в ячейках которой вычисляются средние углы наклона по различным направлениям, среднеквад-

ратичные значения отклонений от средних углов и т.д. Электронный пучок сходится, поэтому все средние радиальные углы наклона отрицательные, траектории частиц имеют углы наклона в радиальном направлении от  $-6,6$  до  $+2,66^\circ$ , в азимутальном —  $\pm 5,5^\circ$ . На рис. 4 распределения плотности тока в поперечном сечении пучка видны следы четырех радиальных перемычек сеток.

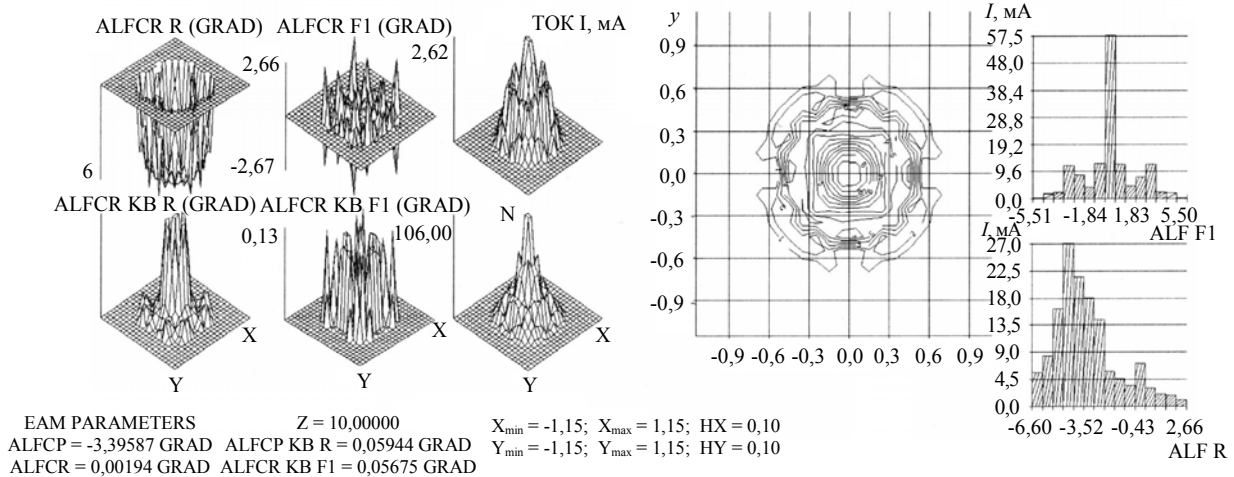


Рис. 4. Результаты обработки характеристик пучка в электронной пушке при  $Z=10$

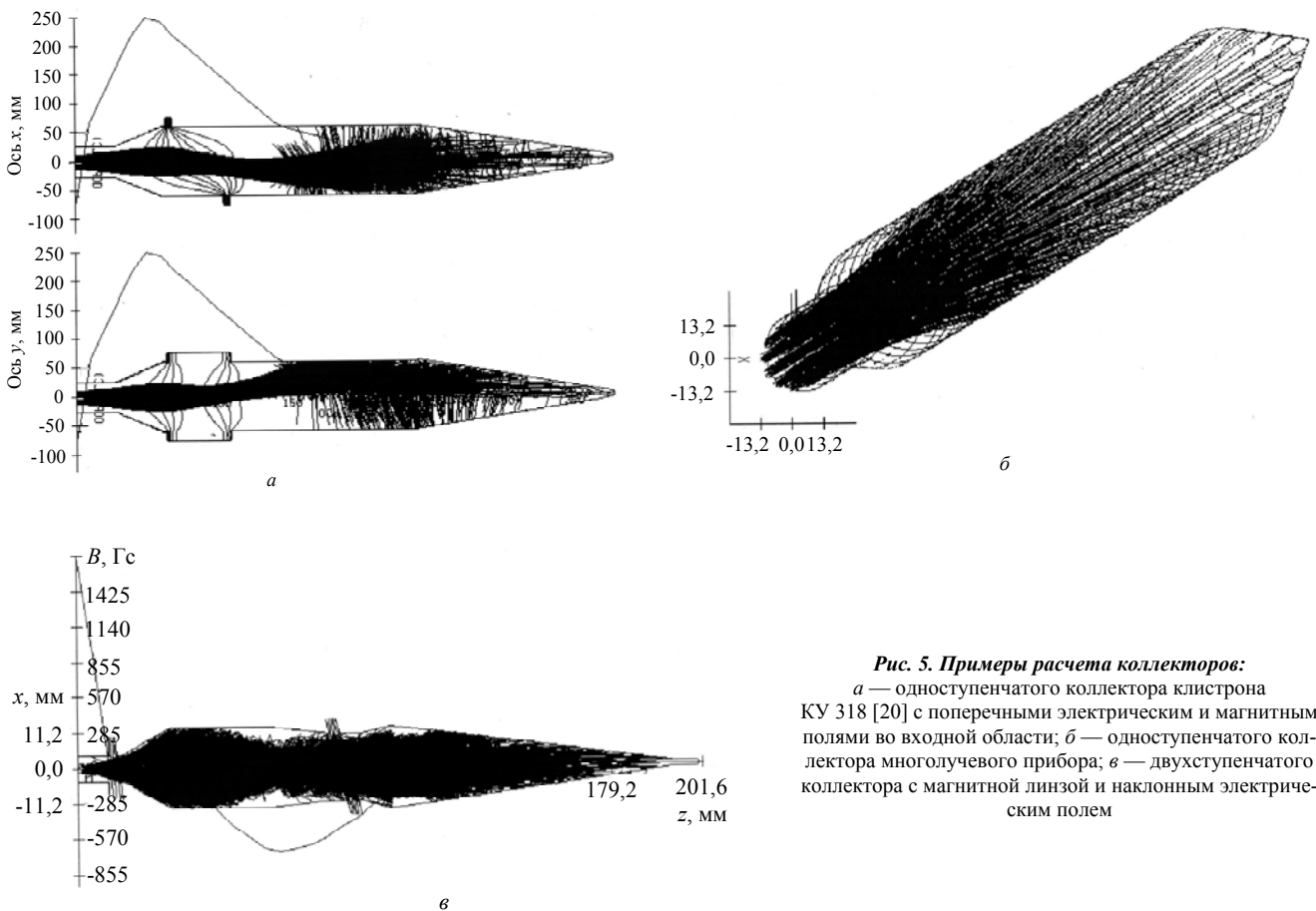


Рис. 5. Примеры расчета коллекторов:  
 а — одноступенчатого коллектора клистрона КУ 318 [20] с поперечными электрическим и магнитным полями во входной области; б — одноступенчатого коллектора многолучевого прибора; в — двухступенчатого коллектора с магнитной линзой и наклонным электрическим полем

На рис. 5 приведены примеры расчета коллекторов с трехмерными электрическими и магнитными полями.

#### Л и т е р а т у р а

1. Блейвас И. М., Невский П. В., Руденко Б. В. и др.// Методы расчета электронно-оптических систем. — М.: Наука, 1977. С. 25.
2. Блейвас И. М., Ильин В. П., Урев М. В., Юдин А. Н.// Методы расчета электронно-оптических систем: Тез. докл. научн.-техн. конф. — Ташкент: Изд-во "Фан", 1988. С. 4.
3. Рыбачек В. П.//В сб. "Вакуумная и газоразрядная электроника". — Рязань, 1984. С. 102.
4. Журавлева В. Д., Роговин В. И., Семенов С. О.// Методы расчета ЭОС: Тез. докл. X всесоюзного семинара. — Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1990. С. 105.
5. Голенцкий И. И., Духина Н. Г., Будзинский Ю. А. и др.// ВЧ-техника и телеком. технологии (КрыМиКо 2001): Матер. 11-й междунар. конф. — Севастополь. Украина, 2001. С. 216.
6. Coco S., Emma F., Laudani A. et al.// IEE Trans. on ED, Jan. 2001. V. 48. № 1. P. 24.
7. Greenfield D. E., Monastyrskii M. A.// Proc. of SPIE, 2001. V. 5025. P. 1.
8. Petillo J., Eppley K., Panagos D. et al.// Proc. Third IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2002). Monterey. CA. USA, 2002. P. 156.
9. Ives L., Bui T., Datta D. et al.// Ibid. P. 118.
10. Savvin V., Bugaev S., Kazarjan G. et al.// Ibid. P. 358.
11. Корнеев В. Н.// Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. Вып. 5. С. 84.
12. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. — Новосибирск: Наука, СО. 1974.
13. Журавлева В. Д., Роговин В. И., Семенов С. О.// Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1998. С. 187.
14. Морз Р. Вычислительные методы в физике плазмы. — М.: Мир, 1974.
15. Semenov S. O., Zhuravleva V. D., Rogovin V. I.// Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2003). Seoul. Korea. 2003. P. 381.
16. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. — М.: Атомиздат, 1979.
17. Begum R., Chesnut M., Legarra J. et al.// Proc. Fifth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2004). Monterey. CA. USA. 2004. P. 130.
18. Ильина Е. М., Морев С. П., Роговин В. И. и др.// РЭ, 1999. Т. 44. № 10. С. 1271.
19. Баяковский Ю. М., Галактионов В. А., Михайлова Т. Н. Графор. Графическое расширение фортрана. — М.: Наука, 1985.
20. Кацман Ю. А. Приборы СВЧ. — М.: Высшая школа, 1983. С. 167.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

## Complex of codes for 3D electron-optic systems calculation

V. D. Zhuravleva, S. O. Semenov

Federal State Unitary Enterprise «NPP "Almaz"», Saratov, Russia

*This paper describes complex of codes for single and multiple-beam 3D electron-optic system modeling that consist of following elements: electron gun code, transporting and focusing system code, multistage depressed collector code and post-processor. The simulation results of microwave devices element are presented.*

УДК 537.533

## Определение параметров подповерхностных структур образца с помощью энергетического спектра вторичных электронов

С. С. Борисов, Е. А. Грачев, А. Блошенко, Т. Мисютин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

С. И. Зайцев

Институт проблем технологий микроэлектроники РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия

*С помощью разработанной программы моделирования методом Монте-Карло в приближении дискретных потерь проводится анализ энергетических спектров (ЭС) вторичных электронов (ВЭ). Показана возможность определения толщин и глубин залегания подповерхностных структур по ЭС ВЭ.*

