

УДК 537.533

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭМИССИОННОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ГРАВИРОВАНИЯ

И. С. Гайдукова, А. М. Филачёв

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

Представлены результаты оптимизации геометрии электродов термоэмиссионной системы для установки электронно-лучевого гравирования на базе компьютерного моделирования формирования электронных пучков в термоэмиссионных системах с учетом влияния пространственного заряда формируемого пучка и сброса термоэлектронов по скоростям.

Электронно-лучевые технологии занимают видное место в ряду современных высоких технологий. Электронно-лучевая сварка и микросварка, электронно-лучевое фрезерование и размерная обработка, электронная литография достаточно широко используются в машиностроении, приборостроении и микроэлектронике.

На базе современных компьютерных технологий управления электронно-лучевыми устройствами, а также обработки и переноса изображений в НИИ электронной и ионной оптики создана установка электронно-лучевого гравирования. Электронно-лучевое гравирование может быть эффективно использовано для изготовления микрохирургического инструмента, в производстве масок для нанесения специальных оптических покрытий, создания фазовых оптических структур.

Особо следует отметить положительный опыт промышленного внедрения данного метода для нанесения плоских и объемных художественных образов на изделия товаров народного потребления.

Электронно-оптическая система установки электронно-лучевого гравирования состоит из термоэмиссионной системы, формирующей электронный пучок, электромагнитной линзы (или системы линз) для формирования в плоскости обработки электронного пучка заданного диаметра, и отклоняющей системы,

перемещающей электронный пучок по заданной программе для нанесения введенного в компьютер изображения на поверхность обрабатываемого изделия.

На рис. 1 представлена блок-схема установки художественного электронно-лучевого гравирования с компьютерным управлением.

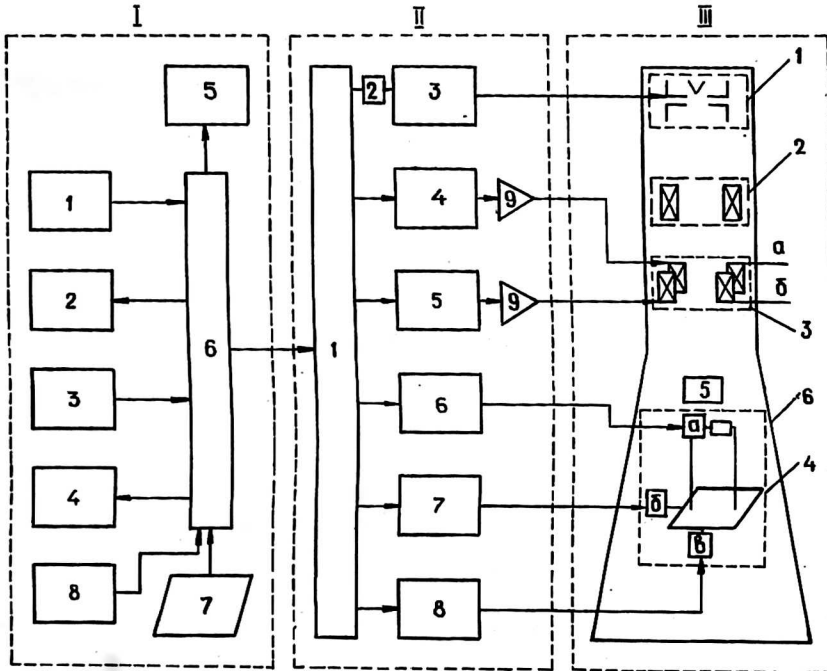


Рис. 1. Блок-схема установки художественного электронно-лучевого гравирования с компьютерным управлением:

I. ВВОД И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ:

- 1 — сканер (HP Seanjet 2);
- 2 — принтер (HP Laserjet 4);
- 3 — клавиатура + "Мышь";
- 4 — накопитель на магнитном диске;
- 5 — монитор SVGA;
- 6 — IBM PC AT 486;
- 7 — программное обеспечение;
- 8 — факс-модем;

II. УСТРОЙСТВО СВЯЗИ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКОЙ:

- 1 — плата интерфейсная;
- 2 — модулятор;
- 3 — источник высокого напряжения;
- 4 — ЦАП 12р "X";
- 5 — ЦАП 12р "Y";
- 6 — блок управления шаговым двигателем "вращение";
- 7 — блок управления шаговым двигателем "X";
- 8 — блок управления шаговым двигателем "Y";
- 9 — УПТ;

III. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА:

- 1 — электронная пушка;
- 2 — фокусирующая система;
- 3 — отклоняющая система:
 - а — ось X;
 - б — ось Y;
- 4 — приводы движения:
 - а — шд "B";
 - б — шд "X";
 - в — шд "Y";
- 5 — приспособление для конденсации отходов;
- 6 — камера

Минимальный диаметр электронного пучка, необходимый для обеспечения требуемого разрешения при воспроизведении изображения, требуемое распределение плотности тока в пучке и энергия электронов определяют электронно-оптические и технические характеристики всех основных элементов и электронно-лучевой установки (ЭЛУ) в целом.

Наиболее критичным узлом ЭЛУ для воспроизведения художественных образов является термоэмиссионная система — электронная пушка. Такие характеристики электронного пучка, как его размер в плоскости наименьшего сечения (в кроссворе), угол расходимости пучка, распределение плотности тока в поперечном сечении пучка являются базовыми для построения электронно-

оптической схемы ЭЛУ и проектирования фокусирующей и отклоняющей систем.

Конструктивное решение электронной пушки определяет надежность и стабильность всей ЭЛУ и гарантирует высокое качество воспроизведения изображений.

Настоящая работа посвящена компьютерному моделированию и проектированию электронной пушки для установки электронно-лучевого гравирования. Компьютерное моделирование как инструмент позволяет значительно расширить спектр исследований.

Электронные пушки в зависимости от параметров формируемого электронного пучка могут существенно различаться и конфигурацией электродов, и конструктивными решениями. Типовая электронная пушка ЭЛУ технологического назначения, как правило, содержит следующие основные элементы (рис. 2):

катод 1 прямого или косвенного подогрева, являющийся источником электронов;

управляющий электрод 2 (электрод Венельта);

анод 3.

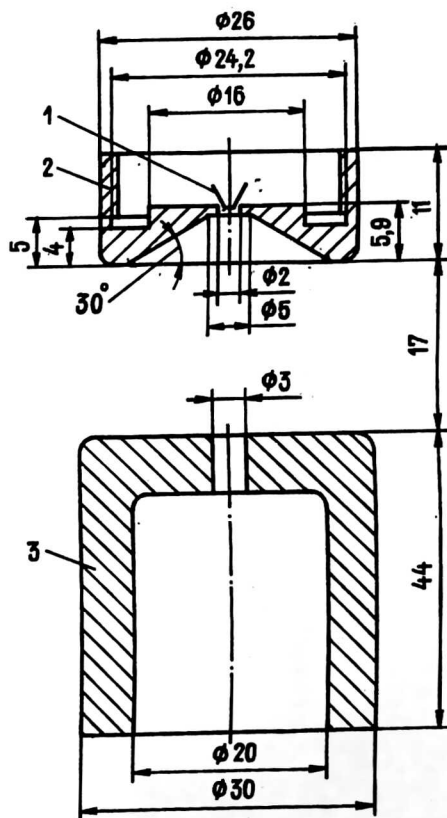


Рис. 2. Типовая конфигурация электродов электронной пушки технологического назначения

Разность потенциалов между катодом и анодом определяется ускоряющим напряжением ЭЛУ. Управляющий электрод находится под отрицательным потенциалом относительно катода, играет существенную роль в фокусировке электронного пучка и регулирует величину тока пучка вплоть до полного запираания пушки.

Задача проектирования электронной пушки состоит в определении геометрии электродов и потенциалов на них, обеспечивающих формирование электронного пучка с заданными параметрами.

Число электрических и геометрических параметров, определяющих электронно-оптические характеристики пушки, весьма велико, даже в случае трехэлектродной пушки с плоским катодом. Наиболее важными параметрами являются положение, форма и потенциал управляющего электрода, а также радиусы отверстий в управляющем электроде и аноде.

В настоящее время эта проблема решается методом анализа, который включает в себя выбор исходного варианта геометрии электродов пушки, расчет распределения плотности тока в формируемом этой системой электронном пучке, анализ его параметров на соответствие требуемым, внесение изменений в исходную конфигурацию электродов и повторение цикла до получения удовлетворительных результатов. Использование возможностей современных компьютеров позволяет ставить вопрос о выработке эффективных критериев оптимальности и о разработке программного обеспечения для машинной оптимизации элементов термоэмиссионных систем.

Достоверность компьютерного моделирования определяется адекватностью заложенных в программу моделей физическим процессам, имеющим место при формировании электронных пучков в термоэмиссионных системах: разбросом термоэлектронов по скоростям и углам при выходе из катода; влиянием пространственного заряда на эмиссию электронов и условия формирования пучка.

В зависимости от величины тока доминирующими являются те или иные факторы. В слаботочных пушках при токах порядка микроампер определяющим фактором является разброс термоэлектронов по скоростям и углам вылета относительно поверхности катода, в сильноточных пушках определяющим условием фокусировки пучка является влияние объемного заряда самого электронного пучка.

В качестве параметра объемного заряда, меры интенсивности электронного пучка принято использовать характеристическую проводимость P , равную отношению тока пучка I к ускоряющему потенциалу в степени $3/2$, т. е. $P = I/U^{3/2}$, которая в литературе имеет название "первеанс". Известно [1], что в электронных пучках влияние объемного заряда становится заметным при значениях первеанса, больших $0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

Для электронно-лучевого гравирования используются электронные пучки диаметром $30\text{--}100 \text{ мкм}$, ток пучка не превышает 5 мА при ускоряющем напряжении $25\text{--}50 \text{ кВ}$. При этом можно утверждать, что в заанодном пространстве влияние пространственного заряда можно не учитывать, а в области формирования электронного пучка, вблизи поверхности катода, он играет существенную роль.

Исходя из вышеизложенного в качестве инструмента для компьютерного моделирования использован пакет прикладных программ (ППП) "Пушка" ("GUN").

Пакет прикладных программ "Пушка" и организованный на его базе программно-методический комплекс для автоматизации рабочего места по проектированию систем формирования электронных пучков на базе ЭВМ серии ЕС в СВМ разработаны на кафедре РЭАП Санкт-Петербургского электротехнического университета в тесном контакте и при поддержке Института электронной и ионной оптики [2].

Имеется положительный опыт использования этого программного продукта для расчета термоэмиссионных систем специализированного электронно-лучевого технологического оборудования: электронно-лучевого испарителя; установок

для электронно-лучевой сварки; установки для отжига полупроводниковых материалов.

Сопоставление результатов расчетов с реальными характеристиками электронных пучков в действующем оборудовании свидетельствует о достаточной степени адекватности заложенных в программу алгоритмов и достаточной степени точности используемых вычислительных методов решения задачи расчета распределения потенциала в электростатических электронно-оптических системах. Следует отметить, что эта часть программы представляет самостоятельный интерес и может быть использована как база для абберационного анализа электростатических фокусирующих систем.

К настоящему времени основные расчетные модули этого программного комплекса адаптированы к ПК IBM PC [3]. Возможности персональных компьютеров этого класса позволяют усовершенствовать как расчетные алгоритмы, так и сервисные модули программы.

ППП "Пушка" ориентирован на специалистов в области разработки электронно-оптического приборостроения, а не на профессиональных программистов, что является несомненным достоинством пакета и в значительной степени определяет его структуру и организацию. Ввод исходной информации и представление полученных результатов в наглядной форме в виде таблиц и графиков обеспечивается диалоговой системой. Для контроля правильности пользования программой предусмотрены диагностические сообщения, выдаваемые на экран в тех случаях, когда ошибки в задании данных могут привести к аварийному останову или к получению неверных результатов. Грамотное пользование программой и получение достоверных результатов возможно лишь при полном понимании заложенных в нее физических модулей и алгоритмов расчета.

Одним из основных блоков ППП "Пушка" является программа расчета распределения потенциала в аксиально-симметричных электронно-оптических системах со сложной конфигурацией контура электродов (отрезки прямых, дуги окружностей, гипербол). Задача Дирихле для уравнения Лапласа решается методом конечных разностей. Для повышения точности расчета при наличии разномасштабных электродов предусматривается выделение приосевой области, в которой расчет ведется с более мелким шагом.

Следующий этап решения задачи самосогласованного поля предусматривает расчет токоотбора с катода. С этой целью эмитирующая поверхность (величина которой определяется в процессе расчета или задается в исходных данных) разбивается на отдельные кольцевые участки. Плотность тока на каждом участке определяется напряженностью электрического поля на этом участке в предположении плоскопараллельного поля вблизи поверхности катода. Полученное таким образом распределение плотности тока вдоль эмитирующей поверхности позволяет определить полный ток, снимаемый с катода.

В режиме ограничения тока пространственным зарядом вблизи эмитирующей поверхности образуется минимум потенциала, глубина которого и его удаление от поверхности катода изменяются в радиальном направлении вдоль катода. При этом точки, соответствующие минимуму потенциала, принимаются в качестве граничных значений при решении задачи о распределении потенциала с учетом пространственного заряда. За счет влияния пространственного заряда изменяются напряженность поля вблизи поверхности катода, а следовательно, и токоотбор с катода.

Этапы решения задачи самосогласованного поля повторяются до тех пор, пока с достаточной степенью точности не стабилизируется расчетное значение тока катода.

Полученное распределение потенциала используется для расчета "фазовым методом" распределения плотности объемного заряда в узлах конечно-разностной сетки. Значения плотности объемного заряда подставляются в соответствующие конечно-разностные формулы для решения уравнения Пуассона, и расчет повторяется. Образующийся таким образом итерационный процесс продолжится до получения самосогласованного поля.

Наконец, осуществляется обработка полученных результатов, вычисление необходимых характеристик электронного пучка, таких как огибающая и распределение плотности тока в поперечном сечении пучка. Полученные результаты в виде таблиц и графиков выводятся на экран монитора и твердый носитель. Одновременно результаты записываются в банк данных на винчестер. Адекватность результатов моделирования и физического эксперимента в значительной степени определяется правильным выделением расчетной области и граничных условий для моделируемой термоэмиссионной системы, а также целесообразным разбиением расчетной области на подобласти и выбором шага сетки, учитывающим соотношение размера катода относительно других элементов формирующей системы.

Для решения поставленной задачи было произведено компьютерное моделирование ряда термоэмиссионных систем различной геометрии, среди них как используемые в электронно-лучевом оборудовании технологического назначения, так и гипотетические конфигурации. Результаты этого моделирования позволили предложить геометрию электронной пушки в наибольшей степени соответствующей требованиям воспроизведения художественных образов с высоким разрешением.

На рис. 3 представлена расчетная схема термоэмиссионной системы с ускоряющим напряжением (потенциалом анода) 60 кВ.

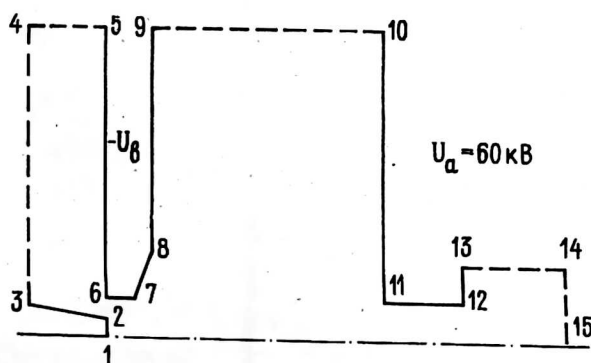


Рис. 3. Расчетная схема термоэмиссионной системы с ускоряющим напряжением 60 кВ

- На схеме: R_k — радиус эмитирующей поверхности катода;
 R_b — радиус отверстия в управляющем электроде;
 R_A — радиус анода;
 Z — расстояние катод — управляющий электрод;
 Z_k — положение плоскости катода на расчетной схеме;
 Z_A — положение плоскости анода;
 Z_b — положение плоскости вентеля (управляющего электрода).

Материал катода — тантал. Рабочая температура катода 2130 К. Плотность тока эмиссии с катода в режиме насыщения 4 А/см².

На схеме: $R_k = 0,15$ см; $R_b = 0,3$ см; $R_A = 0,3$ см; $Z_k = 0,6$ см; $Z_b = 0,6$ см; $Z_A = 2,76$ см; $\Delta Z = 0$.

На рис. 4 представлена зависимость тока пучка и максимальной плотности тока оси от заглубления катода (ΔZ) и потенциала на управляющем электроде. Взаиморасположение катода и венельта определяет формирование фокусирующего и вытягивающего поля в прикатодной области. На этот результат следует обратить внимание в аспекте стабильности параметров электронного пучка при нагревании катодного узла пушки в процессе работы установки. Конструктивное решение катодного узла должно минимизировать изменение заглубления катода относительно венельта при нагревании.

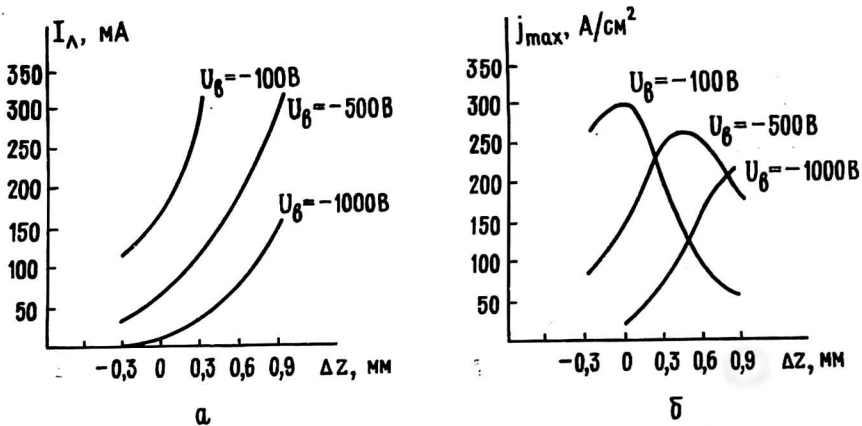


Рис. 4. Зависимость тока пучка (а) и максимальной плотности тока (б) от положения катода и потенциала на управляющем электроде для системы, соответствующей рис. 3

Величина и плотность тока, формируемого этой системой электронного пучка, значительно превышают требуемые значения. Пушки с такими параметрами используются в установках для электронно-лучевой сварки.

В трехэлектродной пушке, геометрия электродов которой представлена схематически на рис. 5, были рассчитаны электронно-оптические характеристики формируемого пучка для двух значений ускоряющего потенциала (50 и 30 кВ). Потенциал управляющего электрода изменялся от нуля до потенциала запираения.

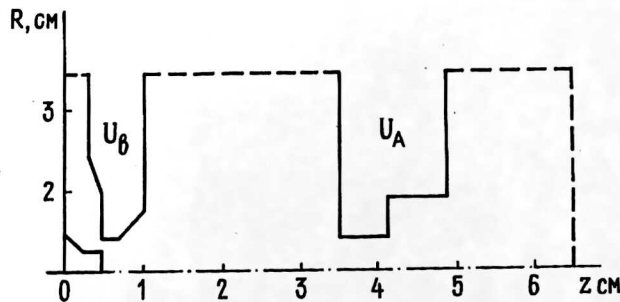


Рис. 5. Расчетная схема термоэмиссионной системы с предельным ускоряющим напряжением 50 кВ

На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики этой системы для двух значений заглубления катода. Электронно-оптические параметры системы соответствуют технологии электронно-лучевого гравирования при ускоряющем потенциале 30 кВ.

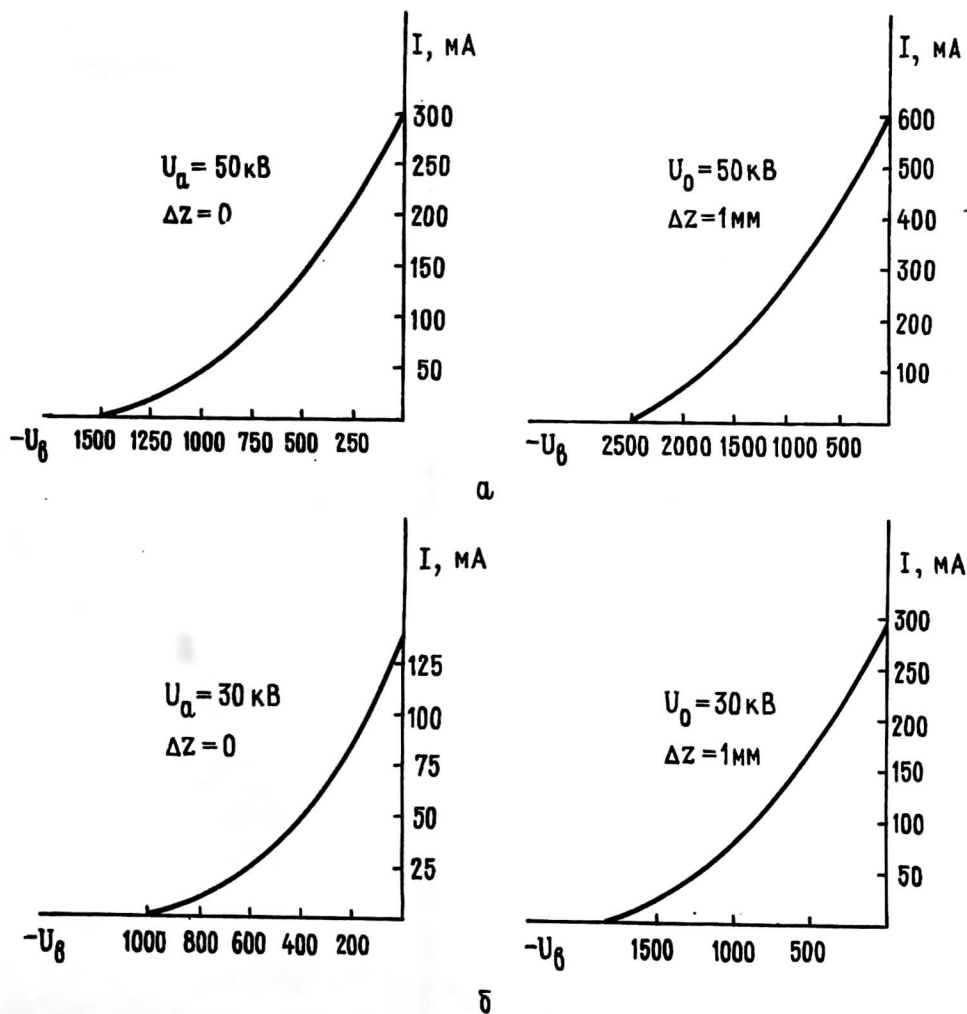


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики электронной пушки, соответствующей рис. 5 для предельного ускоряющего напряжения 50 кВ (а) и ускоряющего напряжения 30 кВ (б) двух значений положения катода

Приведем зависимость всех основных параметров электронного пучка трех-электродной пушки, расчетная схема которой представлена на рис. 7.

На рис. 8 представлены вольт-амперная характеристика (а), зависимость максимальной плотности тока от потенциала управляющего электрода (б), радиус (в) и положение крассовера (г). Здесь: $Z_{кр}$ — положение крассовера относительно плоскости катода; $R_{кр}$ — радиус крассовера; j_{max} — максимальное значение плотности тока в пучке; I_k — полный ток пучка. На схеме: $R_k = 0,05 \text{ см}$; $R_B = 0,25 \text{ см}$; $Z_B = 0,3 \text{ см}$; $R_B = 0,15 \text{ см}$; $R_A = 0,25 \text{ см}$; $Z_A = 1,6 \text{ см}$. Максимальное значение плотности тока на оси соответствует току пучка порядка 10 мА. Ради-

ус кроссовера при токе пучка 10 мА и ниже, согласно расчетам, равен 60 мкм. Таким образом, для получения в плоскости обработки электронного пучка диаметром 30—100 мкм фокусирующая система должна обеспечивать уменьшение от 1^\times до 4^\times . Положение кроссовера при регулировании тока пушки изменяется в пределах 5 мм.

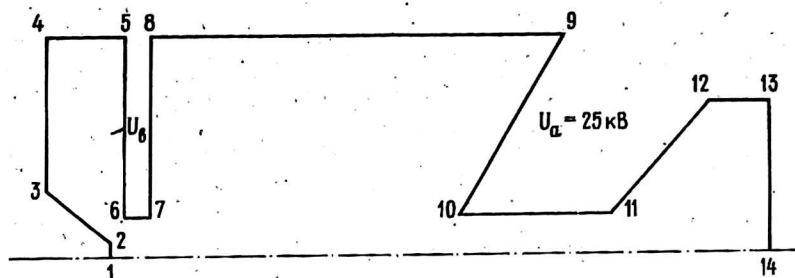


Рис. 7. Геометрия электродов электронной пушки, разработанной для установки электронно-лучевого гравирования

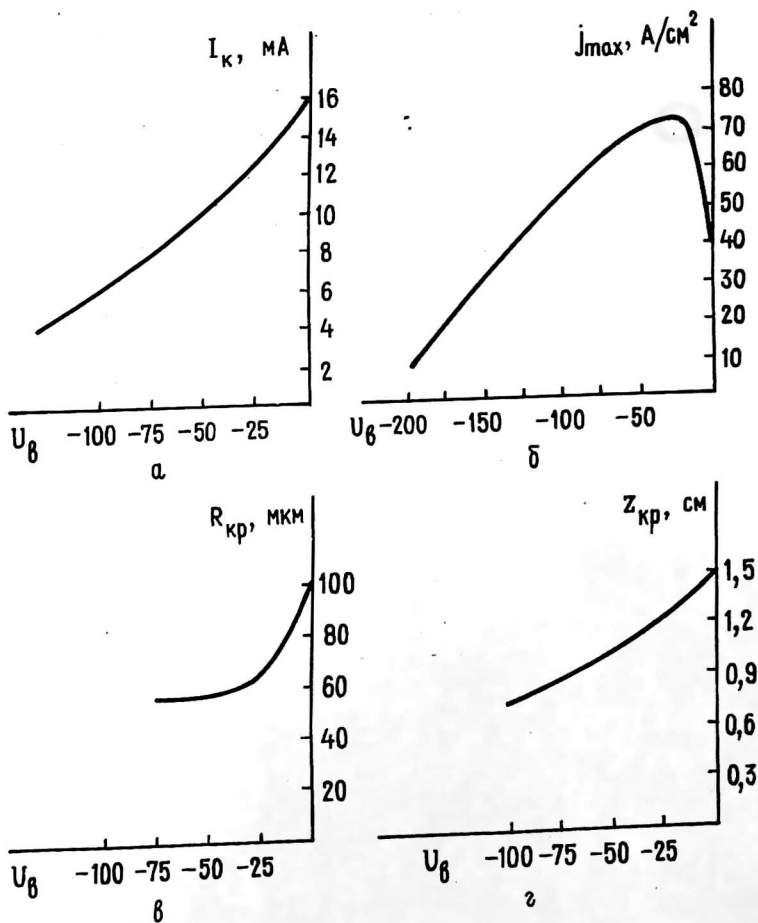


Рис. 8. Электронно-оптические характеристики термоэмиссионной системы установки для электронно-лучевого гравирования

Представленная на рис. 7 геометрия электродов в наибольшей степени соответствует термоэмиссионной системе установки для электронно-лучевого гравирования.

Следует отметить, что физическое моделирование термоэмиссионных систем требует значительно больше времени и материальных затрат.

Л и т е р а т у р а

1. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — Л.: Энергия, 1972.

2. Создание программно-методического комплекса для автоматизированного рабочего места по проектированию систем формирования электронного пучка на базе ЭВМ серии ЕС в системе виртуальных машин//Препринт. — С.-Петербург/Электротехнический ун-т., 1994.

3. Sabchevski S., Mladenov G., Titov A., Barbarich I., Vereschagin D. Models and software for computer simulation of technological electron-optical systems//Fourth international conference on electron beam technologies. — Varna, 1994. P. 40.

COMPUTER MODELING AND DEVELOPMENT OF THE THERMOEMISSION SYSTEM FOR AN ELECTRON BEAM ENGRAVING UNIT

I. S. Gaidukova, A. M. Filachev

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

Results of electrodes geometry optimization in a thermoemission system intended for the electron beam engraving unit are presented, based on computer-aided modeling of electron beam formation with taking into account space charge effects in the formed beam and spread of thermoelectrons in velocities.