

V. P. Tarakanov

Institute for High Energy Density of Associated Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

Yu. V. Fedorov

Institute of UHF Semiconducting Electronics of RAS, Moscow, Russia

A numerical simulation of dynamics of beam instability development in a bounded volume of plasma at a low magnetic field and measurements of a velocity distribution function of electrons have been carried out. It is shown, that in area occupied by an electron beam highly non-equilibrium plasma with mean energy of electrons reaching hundreds of eV is formed due to accumulation of HF field. The acceleration of ions is a consequence of presence of a potential gradient between area with high level of microwave oscillations and peripheral area of plasma have been carried out. The effect of essential heating of electrons in paraxial area is detected. Results of physical and computer experiments have enabled to determine a mechanism of the effect under studies and to find a way of control of the flow energy and density. Possible application of the effect is a novel plasma processing reactor for treatment of materials used in electronics engineering. In particular, information is represented here on approbation of soft etching technology of AlGaAs barrier layer at semiconducting AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructure.

УДК 621.385.624:621.385.632

Низковольтное управление током пучка в электронно-оптических системах источников излучения О-типа миллиметрового диапазона

А. И. Тореев, Ю. Г. Гамаюнов, Е. В. Патрушева

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

Рассмотрены системы низковольтного управления током электронного пучка в источниках излучения миллиметрового диапазона. Показана перспективность системы с управляющим электродом с положительным потенциалом в номинальном режиме в электронно-оптических системах источников излучения О-типа коротковолнового участка этого диапазона. Изложен подход, проведены расчеты и представлены основные геометрические размеры двух вариантов электронных пушек с управляющим электродом, которые могут явиться основой для проектирования подобных систем.

Введение

Применение электронно-оптических систем (ЭОС) с низковольтным управлением электронным потоком в мощных источниках излучения О-типа позволяет существенно снизить энергозатраты, массу и габариты радиоэлектронной аппаратуры, а также повысить ее эксплуатационную надежность. При разработке ЭОС для приборов СВЧ-диапазона, как правило, предпочтение отдается системам с сеточным управлением электронным пучком, поскольку они обладают большей эффективностью. В таких системах удается обеспечить наименьшие величины управляющего напряжения, например, по сравнению с управлением по фокусирующему электроду. Разработаны и реа-

лизованы различные модификации ЭОС с сеточным управлением [1, 2]. По мере перехода к более коротким длинам волн ужесточаются требования, предъявляемые к катодно-сеточным узлам и электронным пушкам из-за необходимости преодоления противоречивых факторов, основными из которых являются:

обеспечение эффективной управляемости при сохранении максимально возможной прозрачности сетки;

сохранение достаточной жесткости и хорошего теплоотвода при уменьшении поперечных размеров перемычек сетки;

предотвращение межэлектродных замыканий из-за тепловых уходов при уменьшении зазоров между сетками и катодом.

В работе приведено рассмотрение систем низковольтного управления током электронного пучка в ЭОС приборов О-типа миллиметрового диапазона и показана перспективность системы с управляющим электродом, имеющим положительный потенциал в номинальном режиме.

Системы низковольтного управления в приборах миллиметрового диапазона

К настоящему времени созданы и успешно используются мощные лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны длинноволновой части миллиметрового диапазона с эффективной сеточной модуляцией электронного пучка. Например, в мощной импульсной ЛБВ 8-миллиметрового диапазона с выходной мощностью ~900 Вт используется пушка с ускоряющим напряжением $U_0 = 19$ кВ и током пучка $I_0 = 0,65$ А, в которой управление пучком осуществляется напряжением на сетке $U_g = -200 \div +120$ В, что составляет ~1,7 % от U_0 [3]. В мощном импульсном клистроне VKA 7852 [4] с выходной мощностью ~2,6 кВт в том же диапазоне управляющее напряжение составляет ~4,2 % от U_0 ($U_0 = 14,3$ кВ, $I_0 = 1,1$ А). Известны также попытки создания ЭОС с сеточным управлением пучка для приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона. В частности, в работе [5] приведены результаты разработки электронной пушки со "связанными сетками" для мощного клистронного усилителя с распределенным взаимодействием (КРВ) 3-миллиметрового диапазона. В пушке с параметрами пучка $U_0 = 21$ кВ, $I_0 = 0,6$ А сеточная модуляция пучка осуществлялась в интервале $U_g = -450 \div +450$ В (~4 % от U_0). Такая высокая эффективность управления была получена благодаря уникальной технологии изготовления катодно-сеточного узла, в которой вначале напыляется пиролитический графит на противоположные стороны сферической подложки из диэлектрического материала нитрид бора, после чего сеточная структура с перемычками изготовлялась лазерным фрезерованием. При таком способе достигается очень высокая точность взаимного положения тепловой и управляющей сеток, а также их устойчивость при тепловых нагрузках. Термоэмиссия сводилась к минимуму за счет покрытия сеток слоем нитрид бора толщиной ~1 мкм. Как показали испытания экспериментального макета ЭОС, токи термоэмиссии и утечки сеток были достаточно малыми. Ток перехвата перемычками за время испытаний ~1000 ч изменился до 0,3 % от величины общего тока. Однако при испытаниях проявился

существенный недостаток разработанной электронной пушки: уровень токопрохождения ~98 % обеспечивался при высоком значении фокусирующего магнитного поля $B_0 \approx 1,1$ Тл (превышение рабочего поля над бриллюэновским магнитным полем составляло $n_0 \approx 2,6$), что свидетельствовало о необходимости подавления сильного возмущения пучка. В практическом плане использование таких больших уровней полей является существенным препятствием для реализации мощных компактных пакетированных приборов. Возможно это явилось одной из причин, почему в известных КРВ 3-миллиметрового диапазона [6, 7] реализовано низковольтное управление такой же эффективности, как при использовании обычного фокусирующего электрода. Например, в КРВ типа VKB 2469 с выходной импульсной мощностью ~1,6 кВт при анодном напряжении $U_0 = 16$ кВ и токе пучка $I_0 = 0,59$ А запирающее напряжение происходит при $U_g = -2,5$ кВ (~15,6 % от U_0), а в КРВ VKB 2475 с выходной импульсной мощностью ~1,2 кВт при анодном напряжении $U_0 = 17,1$ кВ и токе пучка $I_0 = 0,7$ А запирающее напряжение составляет $U_g = -3$ кВ (~17,5 % от U_0).

В качестве альтернативного и компромиссного решения между сеточным управлением и управлением по фокусирующему электроду в [8] была предложена система низковольтного управления пучком в виде электронной пушки с катодно-фокусирующим узлом (рис. 1), в котором управляющий электрод по виду подобен обычному фокусирующему электроду, но смещен вдоль оси к аноду пушки и имеет положительный потенциал, близкий по величине потенциалу соответствующей эквипотенциальной поверхности исходной диодной пушки. Электрод максимально приближен к границе сходящегося электронного пучка и поэтому может более эффективно воздействовать на пучок по сравнению с обычным фокусирующим электродом. В то же время техническое выполнение такой системы значительно проще, чем в сеточном варианте: исключаются трудности, связанные с токоперехватом, термоэмиссией сеток и т. д. Расчеты показали [9], что в ЭОС с электронной пушкой сферического типа с параметрами $U_0 = 19$ кВ, $I_0 = 0,5$ А номинальный режим обеспечивался при напряжении на управляющем электроде $U_c = +200$ В, а запирающее напряжение происходило при $U_c = -1,3$ кВ, что составило ~7 % от U_0 . В аналогичной пушке с обычным фокусирующим электродом (с нулевым потенциалом в номинальном режиме) потенциал запирающего электрода составил $U_c = -2,8$ кВ (~14,7 % от U_0). Тем самым эффективность в системе с управляющим электродом почти в 2 раза

выше, чем в системе с обычным фокусирующим электродом. Результаты расчета были подтверждены экспериментальными измерениями на макете ЭОС, а также измерениями характеристик пакетированного КРВ (рис. 2) с киловаттным уровнем импульсной выходной мощности [10] в средневолновой части миллиметрового диапазона.

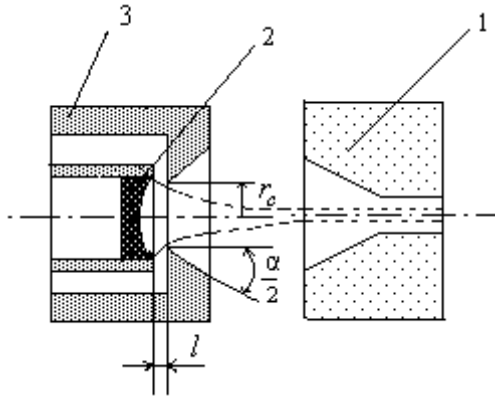


Рис. 1. Схематическое изображение пушки с управляющим электродом:
1 — анод; 2 — катод; 3 — управляющий электрод



Рис. 2. Общий вид мощного импульсного пакетированного КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона с низковольтным управлением током пучка по управляющему электроду ($V_0 = 18$ кВ; $I_0 = 0,5$ А, $U_c = (+200$ В) — (–1,1 кВ)

ЭОС с управляющим электродом для приборов коротковолнового участка миллиметрового диапазона

Полученные теоретические и экспериментальные результаты [9, 10] послужили основой для моделирования ЭОС с низковольтным управлением, предназначенных для приборов О-типа коротковолнового участка миллиметрового диапазона. За основу был взят предложенный в [9] подход, в соответствии с которым для заданных параметров ЭОС и магнитного фокусирующего поля на пер-

вом этапе рассчитывалась методом синтеза диодная электронная пушка с последующей корректировкой электродов расчетами методом анализа. Следует отметить, что при расчете таких ЭОС приходится учитывать не только технологические аспекты, но и факторы, которые ранее не принимались во внимание, например влияние на структуру пучка начальных тепловых скоростей электронов. Хотя средняя энергия теплового движения электронов составляет сотые-десятые доли электрон-вольта, а ускоряющие напряжения достигают десятков киловольт, наличие начальных тепловых скоростей электронов приводит к расплыванию пучка и перераспределению плотности тока по его сечению и тем в большей мере, чем меньше первеанс и чем больше его компрессия. Поэтому расчет электронных пушек на первом этапе проводился на радиус холодного электронного пучка, при котором радиус огибающей теплового пучка в пучностях был бы близок к минимальному радиусу при наличии тепловых скоростей электронов. Минимизация огибающей в пучностях обеспечивается соответствующим выбором уровня магнитного поля на катоде пушки [11] при заданных уровне фокусирующего поля и параметрах пучка. Расчеты проведены для двух вариантов ЭОС, предназначенных для мощных приборов, например, с уровнем выходной мощности ~1 кВт и приборов с меньшим уровнем выходной мощности, например ~0,1 кВт. Это определило и основные параметры пучка и фокусирующего магнитного поля. В первом варианте при ускоряющем напряжении $U_0 = 19$ кВ и первеансе $P_\mu \approx 0,2$, магнитном фокусирующем поле $B_0 \approx 0,67$ Тл, радиусе катода $r_k = 1,4$ мм, температуре катода $T = 1400$ К было получено: радиус кривизны катода $R_k \approx 3,92$ мм, радиус холодного пучка $r_0 \approx 0,114$ мм (холодная компрессия $S \sim 150$), радиус огибающей теплового пучка (по уровню 99 % токосодержания) $r_i \approx 0,16$ мм при оптимальном значении магнитного поля на катоде $B_k = 0,0029$ Тл. При диаметре пролетного канала 0,38 мм зазор между каналом и пучком составляет ~0,03 мм. Геометрия пушки и распределение магнитного поля в ней показаны на рис. 3, а.

Во втором варианте при ускоряющем напряжении $U_0 = 14$ кВ, первеансе $P_\mu \approx 0,12$, магнитном поле $B_0 \approx 0,45$ Тл, радиусе катода $r_k = 0,9$ мм, температуре катода $T = 1400$ К было получено: радиус кривизны катода $R_k \approx 3,36$ мм; радиус холодного пучка $r_0 \approx 0,114$ мм (холодная компрессия $S \sim 62$); радиус огибающей теплового пучка (по уровню 99 % токосодержания) $r_i \approx 0,16$ мм при оптимальном значении магнитного поля на катоде $B_k = 0,0049$ Тл. При диаметре пролетного канала 0,38 мм зазор

между каналом и пучком составляет $\sim 0,03$ мм. Геометрия пушки и распределение магнитного поля в ней показаны на рис. 3, б.

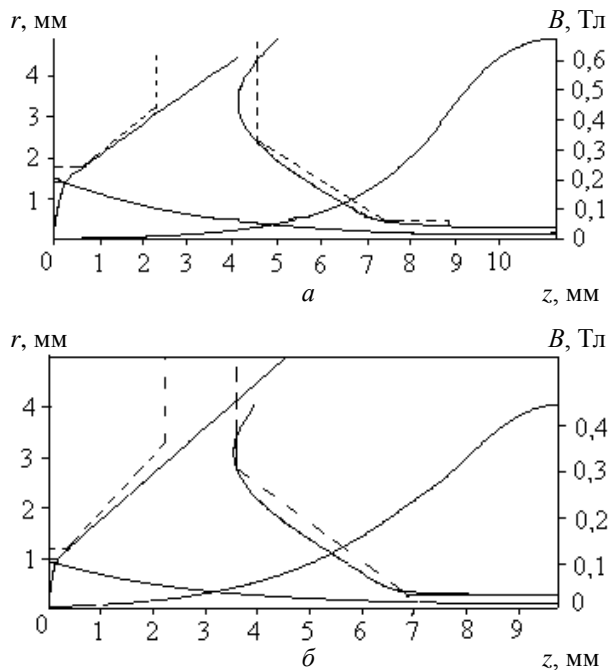


Рис. 3. Геометрия исходной электронной пушки и распределение магнитного поля:

a — $V_0 = 19$ кВ; $P_\mu \approx 0,2$; b — $V_0 = 14$ кВ; $P_\mu \approx 0,12$; ----- — скорректированная геометрия

Чтобы учесть конструктивно-технологические условия, конфигурация электродов пушек была несколько видоизменена (пунктирные линии на рис. 3, a и b) в сравнении с синтезом. Следует отметить, что почти одинаковые значения r , в первом и втором вариантах ЭОС связаны с противоположным влиянием компрессии S и первеанса P_μ пучка на его расплывание. На втором этапе выполнялся расчет пушки с низковольтным управлением с использованием программы анализа. Для каждого варианта проводился поиск положения управляющего электрода, величины положительного потенциала на этом электроде, его конфигурации, при которых параметры пучка остаются в основном такими же, как в исходных пушках. При расчете в режиме понижения потенциала на управляющем электроде учитывалось, что отдельные участки катода могли запирались. Критерием того, что данный участок катода уже не являлся активным и не должен учитываться в расчетах, было появление отрицательного градиента потенциала вблизи этого участка катода. Градиент потенциала всякий раз рассчитывался из распределения лапласовского потенциала при каждом заданном потенциале управляющего электрода. В соответствии с изложенным были проведены расчеты

указанных выше двух вариантов ЭОС. Расчеты показали, что при выборе угла $\alpha = 95^\circ$ раскрыва управляющего электрода, радиуса отверстия в нем $r_c = 1,34$ мм и расстояния катод–электрод $l = 0,34$ мм (см. рис. 1) в первом варианте электронной пушки обеспечивался требуемый первеанс пучка $P_\mu \approx 0,2$ при задании положительного потенциала на электроде $U_c = +260$ В. Полное запираение пучка достигалось при $U_c = -1,2$ кВ ($\sim 6,3$ % от U_0). Для сравнения в исходной ЭОС (радиус отверстия в фокусирующем электроде 1,75 мм, угол раскрыва $\sim 77^\circ$) потенциал запираения $U_c = -2,2$ кВ, что составляет 11,6 % от U_0 . Аналогичные результаты были получены и для второго варианта ЭОС: угол раскрыва управляющего электрода составил $\alpha = 107^\circ$; радиус отверстия в нем $r_c = 0,84$ мм; расстояние катод–управляющий электрод $l = 0,25$ мм. Требуемый первеанс $P_\mu \approx 0,12$ получался при напряжении $U_c = +190$ В. Зависимость токооседания и общего тока пучка от понижения потенциала на управляющем электроде представлены на рис. 4, из которого видно, что полное запираение происходит при $U_c = -500$ В, что составляет $\sim 3,6$ % от анодного напряжения. На этом же рисунке показаны подобные зависимости от понижения потенциала на обычном фокусирующем электроде (угол раскрыва $\alpha = 95^\circ$, радиус отверстия в нем $r_c = 1,17$ мм) исходной диодной пушки. Видно, что потенциал запираения равен $U_c = -1,2$ кВ, т. е. составляет 8,6 % от анодного напряжения. Заметим, что подобные зависимости характерны и для первого варианта пушки, поэтому они не приведены. Из представленных результатов видно, что как в ЭОС для мощных приборов с киловаттным уровнем, так и в приборах с меньшим уровнем выходной мощности в миллиметровом диапазоне эффективность низковольтного управления электронным пучком с помощью управляющего электрода существенно выше, чем при использовании обычного фокусирующего электрода. Дополнительным преимуществом системы низковольтного управления с управляющим электродом по сравнению с управлением по фокусирующему электроду является то, что в этом случае искажение структуры электрического поля в прикатодной области, вызванное технологическим зазором между катодом и фокусирующим электродом, меньше и, следовательно, меньше возмущение электронного пучка. Кроме того, наличие большего числа степеней свободы (расстояние катод–управляющий электрод, угол раскрыва, диаметр входного отверстия в электроде и величина напряжения на нем) позволяет влиять на конфигурацию пучка, добиваясь в рабочем режиме меньших его пульсаций в пролетном канале.

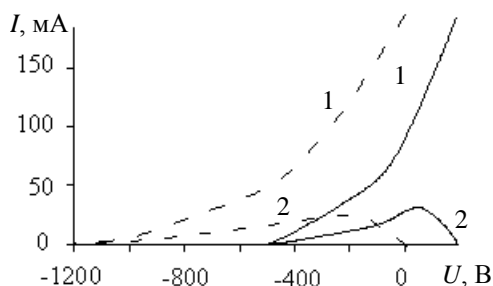


Рис. 4. Расчетные зависимости:

1 — общего тока; 2 — токооседания от управляющего напряжения U_c для пушек с параметрами $V_0 = 14$ кВ; $P_\mu \approx 0,12$; — — — зависимости для пушки с управляющим электродом; - - - - - для пушки с обычным фокусирующим электродом

Сопоставление полученных результатов для первого варианта ЭОС с результатами для ЭОС с теми же электрическими параметрами (U_0 , P_μ), но предназначенной для приборов О-типа средневолновой части миллиметрового диапазона [9], показывает, что у них различные компрессии исходных диодных пушек и потенциалы запираения U_c по обычному фокусирующему электроду (110 и $-2,8$ кВ; 150 и $-2,2$ кВ, соответственно), но параметры низковольтного управления по управляющему электроду мало изменяются (+200 В, $-1,3$ кВ и, соответственно, +260 В, $-1,2$ кВ). В то же время при изменении первеанса и ускоряющего напряжения пучка в представленных вариантах пушек для приборов одного и того же диапазона значительно изменяется не только компрессия исходной диодной пушки (от 150 до 64) и потенциал запираения пучка в ней по фокусирующему электроду (от $-2,2$ до $-1,2$ кВ), но также изменяется эффективность низковольтного управления по электроду с положительным потенциалом ($\sim 6,3$ % от U_0 в первом варианте и 3,6 % от U_0 — во втором варианте ЭОС). Это связано с тем, что в этих ЭОС различные значения первеансов пучка. Заметим, что при меньших значениях первеанса эффективность низковольтного управления по управляющему электроду приближается к эффективности сеточного управления.

Заключение

Применение сеточных систем для управления током пучка в ЭОС в источниках излучения миллиметрового диапазона сопряжено с большими трудностями, обусловленными их мелкоструктурностью. Система низковольтного управления пучком по управляющему электроду с положительным

потенциалом в рабочем режиме позволяет избежать конструктивно-технологических трудностей сеточных систем, а также значительно повысить эффективность управления по сравнению с управлением по фокусирующему электроду. Изложены основные этапы расчета ЭОС с низковольтным управлением по управляющему электроду для приборов О-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона, в котором используется сочетание метода синтеза ЭОС при учете влияния тепловых скоростей электронов и метода анализа ЭОС. Приведены результаты расчета двух вариантов ЭОС. Предложенная система управления током пучка и используемые методы расчета представляются перспективными при создании ЭОС для пакетированных приборов О-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-02-16517-а.

Литература

1. Григорьев Ю. А., Правдин Б. С., Шестеркин В. И. Электронно-оптические системы с сеточным управлением: Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ Электроника, 1987. Вып. 7(1264). С. 71.
2. Ессин А. Д., Курицын В. М., Шаталин И. А. и др. Мощные ЛБВ с низковольтным управлением электронным потоком. Ч. 1. Импульсные ЛБВ: Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ Электроника, 1976. Вып. 6(375). — 66 с.
3. Military Microwave's 90 Conference Proceedings. P. 335—339.
4. Сигнал-новости зарубежной техники БОНТИ-НПП "Исток" 6(179), 1992.
5. Grant T. J., Garcia R., Miram G. V. Smith Bonded grid electron gun for 95 GHz extended interaction amplifier (ETA)/Int. Electron Devices Meet., Washington, D. C., 1983. Technical Digest, New York. 1983. P. 141—143.
6. Каталог фирмы Varian Canada "Extended Interaction Klystron Selection Guide", 1986.
7. CPI Canada and the millimeter wave klystron (information site) Website: <http://www.cpii.com/cmp/2001>.
8. Тореев А. И., Гамаюнов Ю. Г., Патрушева Е. В. и др. Электронная пушка сферического типа: Пат. 2066497 RU С1 6 НО1 J 23/06//Б.И. 1996. № 25.
9. Гамаюнов Ю. Г., Тореев А. И., Патрушева Е. В. Электронная пушка с низковольтным управлением//Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 1999. Вып. 1 (473). С. 9—12.
10. Гамаюнов Ю. Г., Тореев А. И., Федоров В. К. и др. Клыстрон с распределенным взаимодействием миллиметрового диапазона. <http://www.sgu.ru/technopark/klystron.php>
11. Gamayunov Y. G., Toreev A. I., Patrusheva E. V. The forming peculiarities of intensive electron beams of the millimeter wave radiation sources//Abstracts of 2006 IEEE Int. Vacuum Electr. Conf with 2006 IEEE Int. Vacuum Electr. Sources, April 25—27, 2006, Monterey, California, USA. P. 167, 168.

Статья поступила в редакцию 25 июля 2007 г.

Low voltage beam current control in electron-optical systems of the millimeter wave O-type radiation sources

A. I. Toreev, Yu. G. Gamayunov, E. V. Patrusheva
Saratov State University, Saratov, Russia

Systems of low-voltage electron-beam current control for millimeter wave radiation sources are considered. Perspectives of the systems with control electrode with positive potential in the working regime of the electron-optical systems for short-wave part millimeter-wave O-type radiation sources is shown. An approach is stated, numerical calculations are executed and main dimensions of two versions of electron guns with control electrode are presented, which will be able to serve as a basis for projection of the similar systems.

УДК 537.533

Общие уравнения теории фокусировки в постоянных электрических и магнитных полях

А. Т. Ибраев

Казахстанская академия информации и бизнеса, г. Алматы, Республика Казахстан

Предложена общая теория фокусировки заряженных частиц в постоянных электрических и магнитных полях, которая полностью учитывает особенности фокусировки в электронных зеркалах и эмиссионных системах.

Проблемам разработки эффективных подходов для создания общей и универсальной теории фокусировки заряженных частиц в постоянных электрических и магнитных полях посвящено немало научных работ, например [1—3]. Отметим, что существует также множество других монографий и научных статей, посвященных разным аспектам развития общей теории фокусировки. При этом работа [1], как известно, является одной из основополагающих, которая во многом способствовала активному развитию теории и практики электронного приборостроения. Многие авторы в дальнейшем отмечали, что предложенная в работе [1] общая теория посвящена исследованию одиночных линз и иммерсионных систем, так как принятое в этой теории предположение о малости наклона траекторий заряженных частиц на всех участках этой траектории противоречит особенностям в прикатодной области эмиссионных систем (катодных линз) и отражающей области электронных зеркал [2—5].

В работе предложена общая теория фокусировки заряженных частиц в постоянных электрических и магнитных полях, развитая в аналогичной с работой [1] последовательности, но в полной мере учитывающая особенности фокусировки потока заряженных частиц в электронных зеркалах и эмиссионных системах (катодных линзах).

Для комплексного исследования характера движения заряженных частиц в постоянных электрических и магнитных полях рассмотрим движение произвольной частицы потока относительно движения частицы, траектория которой выбирается в качестве основной траектории пучка заряженных частиц. Движение частицы по основной траектории удовлетворяет определенным конкретно заданным начальным условиям. Начальные условия движения произвольной частицы задаем в общем виде с использованием общепринятых обозначений величин начальных параметров движения.