

01;10

Влияние электроннооптических факторов на коэффициент вывода пучка широкоапертурных ускорителей электронов

© М.А. Аброян, Ю.В. Зуев, С.Л. Косоголов, В.Я. Шведюк

Федеральное государственное унитарное предприятие
„Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова“
196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: glukhikh@niiefa.spb.su

(Поступило в Редакцию 6 ноября 2002 г.)

Представлена численно-аналитическая модель электронно-оптической системы широкоапертурного ускорителя. В рамках модели проводится анализ различных электронно-оптических факторов, влияющих на коэффициент вывода пучка. Для определения путей повышения коэффициента вывода рассчитаны пространственные и угловые характеристики пучка в различных его сечениях. Впервые детально исследовано влияние магнитного поля тока накала катодов.

Введение

Широкоапертурные ускорители электронов, имеющие площадь сечения пучка на выходе из ускорителя порядка $10^2 - 10^4 \text{ cm}^2$, находят большое применение в радиационно-технологических процессах, а также в качестве устройств ионизации газовых лазеров [1] и плазмохимических реакторов. Эффективность этих ускорителей определяется отношением выведенного тока к ускоренному, т.е. коэффициентом вывода пучка. Для улучшения характеристик ускоренного пучка и повышения коэффициента вывода была предложена планарная электронно-оптическая система (ЭОС) с дискретными протяженными катодами и сетками в виде стержней, параллельных катодам [2]. Такая система была применена, например, в устройстве ионизации технологического CO_2 лазера с несамостоятельным разрядом [3]. Настоящая работа содержит ряд рекомендаций по увеличению эффективности ЭОС широкоапертурных ускорителей электронов.

В оптических системах типа [2,3] формирование пучка большого сечения с однородным распределением плотности тока предполагает суперпозицию элементарных пучков, которые эмиттируются отдельными катодными нитями и, перемешиваясь, создают общий поток электронов с характерным разбросом по поперечным скоростям. На рис. 1 схематически показана такая ЭОС с указанием системы координат, а также расчетные траектории электронов от одного эмиттера. Образующие катод прямонакальные эмиттеры располагаются в одной плоскости, их включение обеспечивает встречное протекание тока накала в двух соседних эмиттерах. Катод работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом. Потенциал катода имеет отражающий экран (спредер). Регулировка тока осуществляется потенциалом первой (управляющей) сетки. Вторая сетка экранирует прикатодную область от сильного ускоряющего поля анода, в котором происходит основное ускорение

пучка. Сетки выполнены в виде стержней, параллельных нитям катода. Диаметр и шаг расстановки стержней экранирующей сетки выбирается с учетом электрической прочности. Анод ускорителя одновременно является устройством вывода пучка. Он состоит из опорной решетки с установленной на ней фольгой, сквозь которую и происходит вывод электронов из вакуумного объема ускорителя в среду с атмосферным или иным давлением.

Потери тока в отверстиях опорной решетки определяются ее конструкцией и угловой расходимостью пучка. Эффективный вывод электронов требует ортогонализации электронных траекторий относительно плоскости опорной решетки и фольги. Это требование находится в определенном противоречии с дискретным характером системы, необходимостью взаимного наложения элементарных пучков, желанием максимально использовать эмиссионную поверхность катода [3], т.е. задача минимизации потерь является многокритериальной и требует всестороннего анализа большого числа факторов с помощью моделей различного уровня.

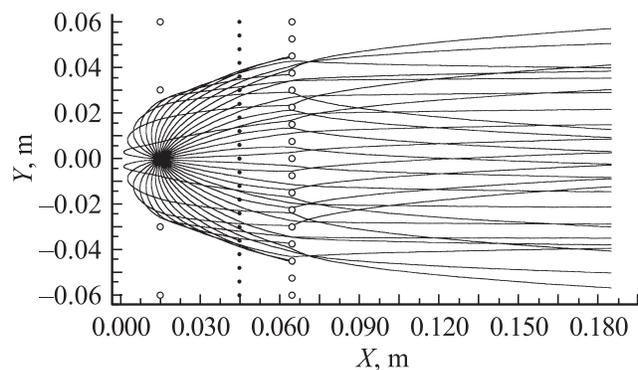


Рис. 1. Схема ЭОС и расчетные траектории от одной катодной нити (ось z перпендикулярна плоскости чертежа).

Аналитическая модель, связывающая расходимость пучка с параметрами ЭОС

Основные функциональные зависимости, связывающие угловую расходимость электронов с электрическими и геометрическими параметрами системы, можно получить, если характеризовать влияние каждой сетки фокусным расстоянием f эквивалентной тонкой линзы [4,5]

$$f = 2U_d / (E_2 - E_1),$$

где U_d — действующий потенциал в плоскости сетки, E_2, E_1 — напряженности электрических полей по обе ее стороны.

Максимальное изменение угла наклона траекторий α в зазоре между стержнями сетки

$$(\operatorname{tg} \alpha)_{\max} = (p - d) / 2f,$$

где p, d — шаг расстановки и диаметр стержней.

Очевидно, что влияние сетки на угловую расходимость снижается при выравнивании напряженности полей E_2 и E_1 , а также при уменьшении шага расстановки стержней p .

При исследуемых режимах и геометрии ЭОС ускорителя основной вклад в угловую расходимость (более 75%) вносит экранирующая сетка из-за большого скачка напряженности поля. Примерно 20% с учетом последующего ускорения дает катод. Оставшиеся менее 5% приходятся на управляющую сетку.

Приведенные аналитические зависимости дают общую информацию о влиянии отдельных факторов на угловую расходимость потока электронов, но не позволяют получить данные о пространственном распределении тока по сечению, необходимые при разработке широкоапертурного ускорителя. Достоверные количественные оценки, учитывающие потери тока на сетках, реальную геометрию опорной решетки, форму и свойства эмиссионных поверхностей, требуют детального траекторного анализа системы в целом.

Расчет электрического и магнитного полей

Если пренебречь эффектами нарушения трансляционной симметрии на краях, электрические и магнитные поля ЭОС можно рассматривать в планарном приближении.

Для того чтобы с минимальной погрешностью рассчитать сильно неоднородные поля вблизи проволок малого диаметра, электрическое поле в области, занимаемой пучком, моделировалось суперпозицией полей, создаваемых сетками из бесконечно тонких параллельных равноотстоящих нитей, помещенных в однородное поле

между спредером и анодом [4,5]

$$U(x, y) = A + Bx + \sum_{i=1}^{N_C} q_i \ln \left(2 \cosh \left(\frac{2\pi(x - x_i)}{p_i} \right) - 2 \cos \left(\frac{2\pi y}{p_i} \right) \right),$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} U. \quad (1)$$

Здесь p_i, x_i, q_i — шаг, пространственное положение и заряд i -й сетки. Количество сеток N_C и параметры A, B, x_i, q_i определялись из условия максимального подобия соответствующих эквипотенциалей профилю реальных металлических поверхностей.

Магнитное поле, индуцируемое током накала катода, рассчитывалось в квазистатическом приближении через векторный магнитный потенциал \mathbf{A} из условия

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad \operatorname{div} \mathbf{A} = 0.$$

В плоскопараллельных полях вектор \mathbf{A} имеет единственную составляющую $A_z(x, y)$, которая удовлетворяет уравнению Пуассона [6],

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_0 j_z(x, y), \quad (2)$$

где j_z — плотность тока накала.

Решение уравнения (2) с учетом трансляционной симметрии (эквидистантное расположение нитей катода и противоположное направление тока в соседних нитях) может быть получено аналогично решению задачи о бесконечно длинном заряженном стержне, находящемся между параллельными металлическими пластинами [5,7],

$$A_z(x, y) = A_0 \ln \left[\frac{\cosh \left(\frac{\pi(x-x_0)}{p} \right) + \cos \left(\frac{\pi y}{p} \right)}{\cosh \left(\frac{\pi(x-x_0)}{p} \right) - \cos \left(\frac{\pi y}{p} \right)} \right],$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (3)$$

Здесь p — расстояние между нитями катода, x_0 — положение центральной нити. Постоянная интегрирования A_0 находится из условия

$$\oint_l \mathbf{B} dl = \mu_0 I,$$

l — произвольный контур, охватывающий нить катода с током I .

Пространственное и угловое распределение электронов в пучке

Траектории частиц находились интегрированием уравнений Ньютона–Лоренца в полях (1), (3). Так как релятивистский фактор массы $\gamma = (1 - (x^2 + y^2 + z^2)/c^2)^{-1/2}$

в процессе ускорения частиц достигает величины порядка 1.4, использовалась следующая форма этих уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m_0\gamma} (F_x - \frac{\dot{x}}{c} \Omega), & F_x = e(E_x - \dot{z}B_y), \\ \ddot{y} = \frac{1}{m_0\gamma} (F_y - \frac{\dot{y}}{c} \Omega), & F_y = e(E_y + \dot{z}B_x), \\ \ddot{z} = \frac{1}{m_0\gamma} (F_z - \frac{\dot{z}}{c} \Omega), & F_z = e(\dot{x}B_y - \dot{y}B_x), \end{cases}$$

$$\Omega = F_x \frac{\dot{x}}{c} + F_y \frac{\dot{y}}{c} + F_z \frac{\dot{z}}{c}. \quad (4)$$

Предполагалось, что в начальный момент времени все частицы равномерно расположены на поверхности катодной нити в сечении $z = 0$, но каждая частица в зависимости от напряженности электрического поля в точке старта E_j переносит определенную долю тока I_j/I_p , уносимого всеми N_p частицами с единицы длины нити dx ,

$$\frac{I_j}{I_p} = \frac{\exp(4.39\sqrt{E_j/T})}{\sum_{j=1}^{N_p} \exp(4.39\sqrt{E_j/T})}$$

T — температура катода, равная 1950 К; E_j в В/см [4].

Система динамических уравнений (4) интегрировалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Для контроля точности расчетов использовались интегралы движения

$$\begin{aligned} m_0\gamma c^2 &= m_0c^2 - e(U(x, y) - U(x_0, y_0)), \\ m_0\gamma \dot{z} &= -e(A_z(x, y) - A_z(x_0, y_0)), \end{aligned} \quad (5)$$

относительные отклонения от которых не превышали 0.1%. Здесь $U(x_0, y_0)$, $A_z(x_0, y_0)$ — электростатический и векторный потенциалы в точке старта, одинаковые для всех частиц одного эмиттера, так как $x_0^2 + y_0^2 = r_k^2$, а r_k — радиус поперечного сечения катодных нитей [6]. Поскольку время движения частиц от катода до анода существенно меньше периода изменения накального тока, эффекты, связанные с изменением магнитного поля во времени, не учитывались.

На рис. 2 представлена эволюция фазового портрета частиц, испускаемых одним эмиттером, т.е. элементарного пучка в плоскости $y - y'$ по мере прохождения частицами ЭОС. Хорошо заметны эффекты „нарезки“ пучка и фокусировки частиц стержнями сеток, расположенными в плоскости $x = 45$ и 65 мм. Влияние магнитного поля на вид фазовых характеристик в плоскости $y - y'$ незначительно. Аналогичные характеристики в плоскостях $y - z$ и $y - z'$ приведены на рис. 3. При нулевом магнитном поле направленное движение частиц вдоль катодных нитей отсутствует. В остальных случаях наблюдается снос частиц вдоль оси z , который коррелирует с величиной и направлением накального тока. Максимальный снос испытывают частицы, эмиттируемые с тыльной стороны катодной нити (рис. 6) и достигающие

Режимы работы ускорителя и коэффициент токопрохождения сеток

Потенциалы на электродах				Мгновенное значение тока накала			
				0 А		11 А	
U_k, V	U_{c1}, V	U_{c2}, V	U_a, kV	$K_{c1}, \%$	$K_{c2}, \%$	$K_{c1}, \%$	$K_{c2}, \%$
0	600	1500	160	94.88	74.68	94.44	78.20
0	600	1500	200	94.88	75.52	94.56	79.40
0	800	1500	200	94.52	78.80	94.24	72.68
0	800	3000	200	95.08	77.36	94.88	80.24

анода позже. Абсолютное значение z -составляющей скорости для всех частиц у опорной решетки практически одинаковое. Ее асимптотическое значение

$$|\dot{z}| \cong \frac{|A_z(x_0, y_0)|c^2}{U_a + m_0c^2/e}$$

может быть найдено из интегралов движения (5).

Данные о потерях пучка на сетках в зависимости от ускоряющего напряжения U_a потенциалов на управляющей и экранирующей сетке U_{c1} и U_{c2} сведены в таблицу. Коэффициенты токопрохождения сеток K_{c1} , K_{c2} рассчитывались через отношение тока частиц, прошедших сквозь сетку, к току частиц, испускаемых катодом.

Фазовые портреты, полученные с учетом эмиссии всех нитей, и соответствующие распределения тока $I(y)$ по сечению элементарной ячейки ЭОС, равной шагу расстановки эмиттеров, приведены на рис. 4 и 5. Проекции траекторий частиц, эмиттируемых тремя соседними нитями в максимуме накального тока, даны на рис. 6.

Обсуждение результатов численного расчета пространственного и углового распределения электронов в пучке

Из результатов траекторного анализа следует, что ширина элементарного пучка вдоль оси y вблизи опорной решетки ($x = 185$ мм) составляет 120 мм и в четыре раза превышает расстояние между эмиттерами (рис. 2). Углы подлета частиц к решетке в плоскости $x - y$ достигают $4.5 - 5^\circ$. Они уменьшаются при увеличении потенциала U_{c2} из-за снижения скачка напряженности на экранирующей сетке (ср. рис. 4, *a* и 4, *b*). Прохождению частиц экранирующей сетки соответствует „излом“ траекторий на рис. 6.

Под действием магнитного поля электроны, испускаемые соседними эмиттерами, отклоняются вдоль нитей в противоположных направлениях (рис. 6). Максимальный снос частиц вдоль оси z может достигать 20 мм при угле подлета приблизительно в полградуса (рис. 3). Из-за взаимного перекрытия элементарных пучков размеры поперечного сечения пучка, выводимого из ускорителя, пульсируют с удвоенной частотой накального тока.

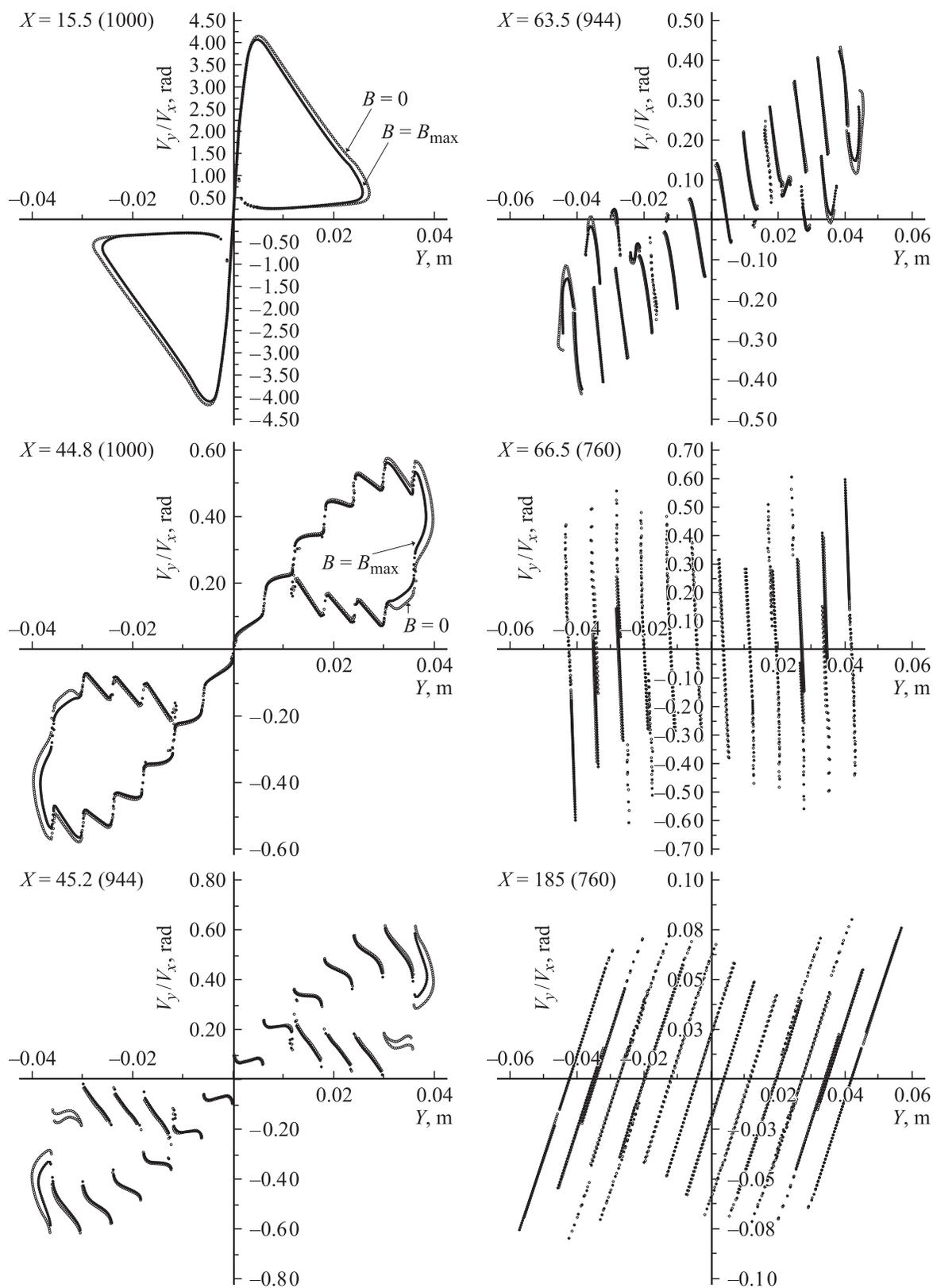


Рис. 2. Изменение фазового портрета частиц на плоскости $y-y'$ при нулевой и максимальной интенсивности магнитного поля. Портреты даны для частиц, эмиттируемых одной нитью катода в сечениях $X = \{15.5, 44.8, 45.2, 63.5, 66.5, 185 \text{ мм}\}$.

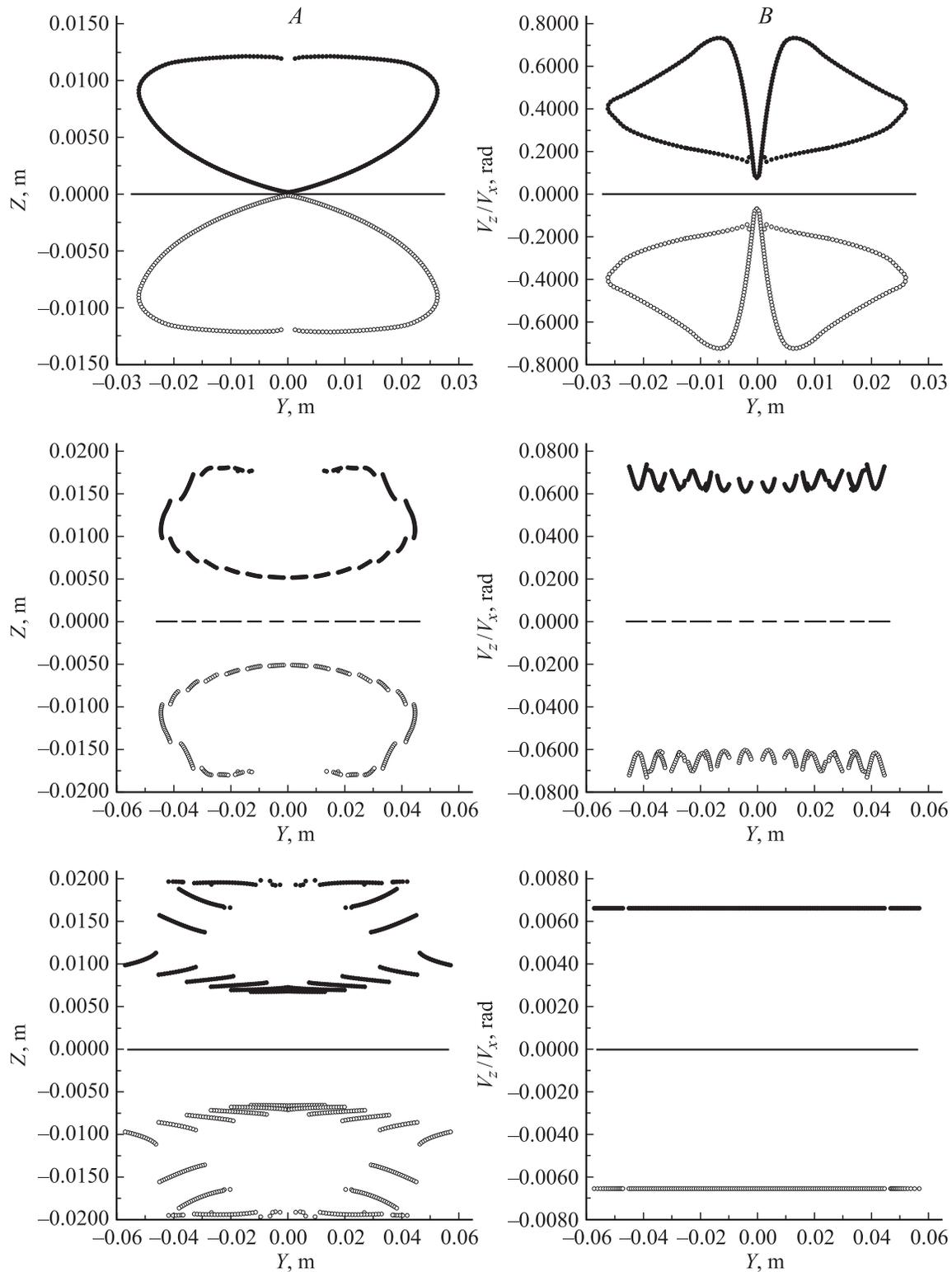


Рис. 3. Пространственные и фазовые портреты частиц от одной нити катода при нулевой (центральная группа точек) и максимальной интенсивности магнитного поля (верхняя и нижняя группы в зависимости от направления тока в нити). Портреты даны для сечений $X = \{15.5, 63.5, 185 \text{ mm}\}$. (A) — плоскость $y-z$; (B) — плоскость $y-z'$.

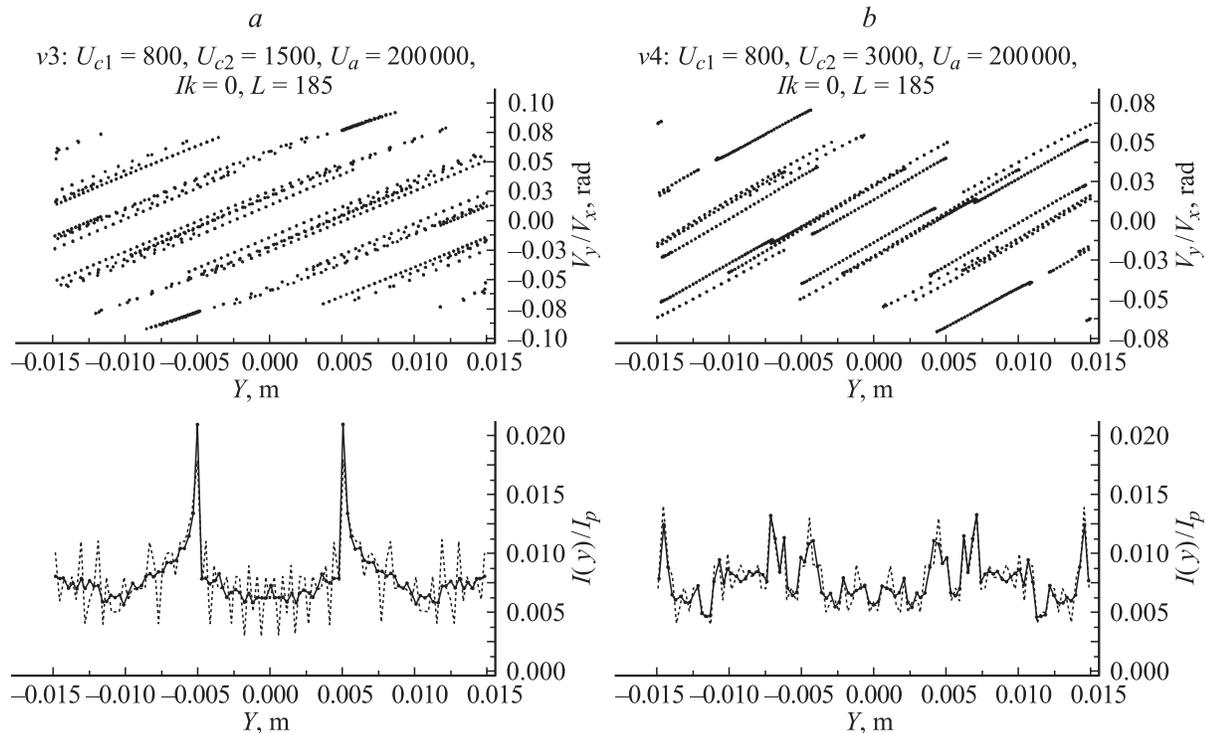


Рис. 4. Фазовые и пространственные распределения частиц у опорной решетки в пределах элементарной ячейки (катод в точке $Y = 0$) при нулевой интенсивности магнитного поля и различных потенциалах экранирующей сетки.

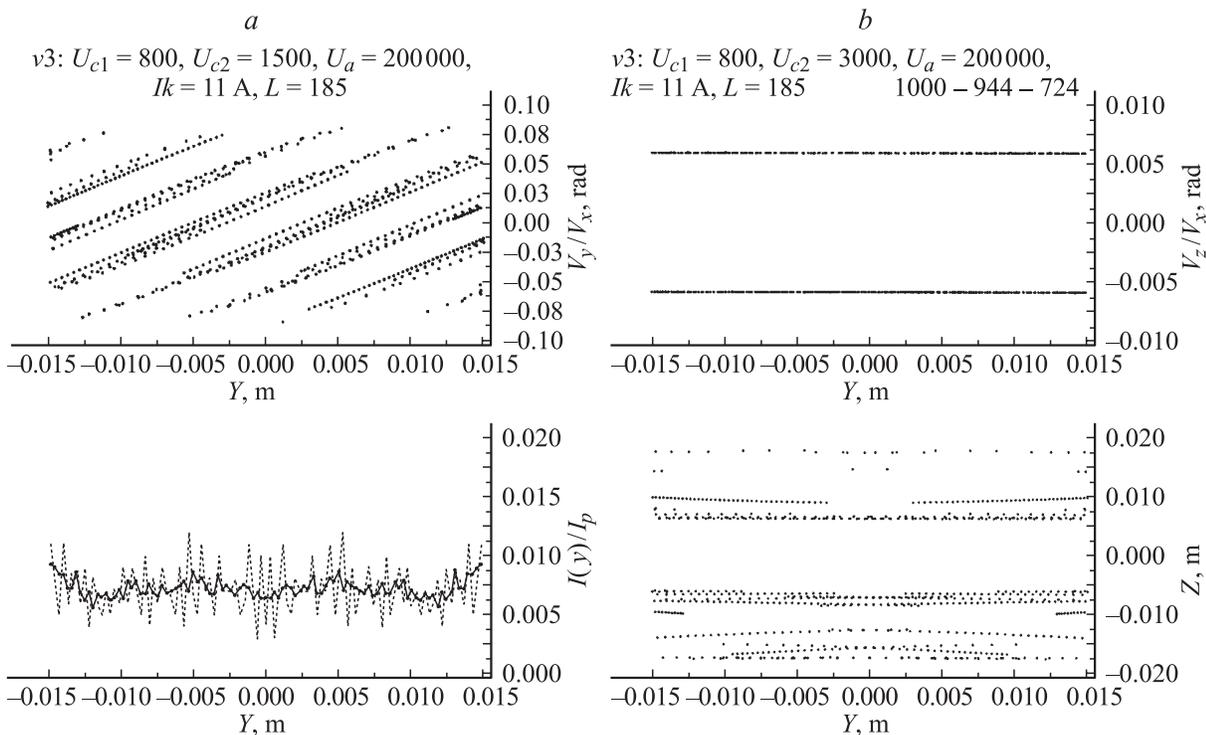


Рис. 5. То же, что на рис. 4, при максимальной интенсивности магнитного поля.

С мгновенным значением магнитного поля оказывается связанным пространственное распределение тока по сечению. Геометрия рассмотренной ЭОС неизбежно приводит к образованию каустик-перехлеста траекторий

с уплотнением частиц на периферии элементарного пучка (рис. 1). Результирующее распределение плотности наиболее однородно в тех случаях, когда края элементарных пучков перехватываются второй сеткой (рис. 5).

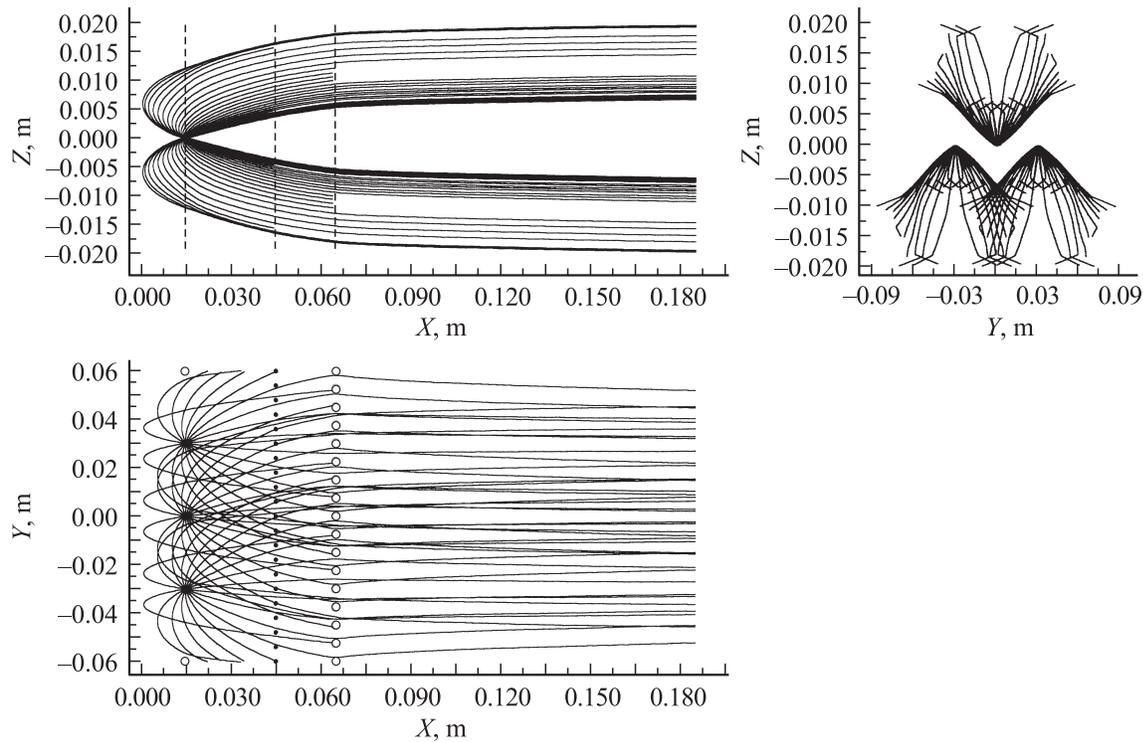


Рис. 6. Проекция траекторий частиц при максимальной интенсивности магнитного поля.

Если этого не происходит, эффективность ускорителя выше (см. таблицу), но распределение плотности будет содержать аномальные уплотнения (рис. 4, *a*), образованные периферийными частицами, прошедшими в непосредственной близости от стержней сетки и имеющими вследствие этого наибольшую угловую расходимость.

Заключение

Предложенный в работе численно-аналитический метод исследования характеристик пучка широкоапертурного ускорителя электронов позволяет получить пространственные и угловые распределения частиц в любом сечении ЭОС и оценить влияние электронно-оптических факторов на выходные параметры ускорителя.

Потери при выводе пучка из ускорителя определяются в основном геометрической прозрачностью опорной решетки и потерями, связанными с угловой расходимостью частиц. Так как поперечные скорости электронов вдоль оси y на порядок больше поперечных скоростей вдоль оси z , опорная решетка должна иметь щелевую перфорацию в направлении оси y . В этом случае суммарные потери пучка на стенках опорной решетки могут быть снижены до 1.5–3.0%. В конструкции опорной решетки необходимо учитывать не только уширение элементарных пучков вдоль оси y , но и их снос вдоль оси z . Определенную роль здесь играет правильный выбор отношения поперечных размеров решетки и апертуры сеток.

Для оптимизации влияния магнитного поля тока накала необходима синхронизация момента включения импульса ускоряющего напряжения с фазой синусоиды питания накала.

Некоторого снижения углового разброса вдоль оси y можно добиться за счет уменьшения шага стержней управляющей сетки или катода. Влияние экранирующей сетки минимизировать сложнее. Ее геометрия определяет электрическую прочность ускоряющего зазора ускорителя, а потенциал сетки не может быть существенно увеличен для снижения скачка напряженности из-за роста тепловых потерь, обусловленных токоперехватом.

Список литературы

- [1] Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Аброян М.А., Трубников Г.И. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 2. С. 129–134.
- [3] Аброян М.А., Богданов В.В., Бодакин Л.В. и др. // Тез. и докл. 9-го Совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 1998.
- [4] Клейнер Э.Ю. Основы теории электронных ламп. Вып. III. М., 1974. 368 с.
- [5] Страшкевич А.М. Электронная оптика электростатических систем. М.: Энергия, 1966. 328 с.
- [6] Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- [7] Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 728 с.