

УДК 621.385.6

Исследование трехмерных эффектов в электронных пучках при возмущающем действии управляющих сеток

С. О. Семенов

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

С использованием строгой трехмерной модели расчета электронно-оптических систем исследован характер возмущений, вносимых в электронный пучок управляющими сетками. Показано, что наибольшие углы наклона приобретают частицы, точки старта которых находятся у середины перемычек ячеек. Исследована зависимость величины запирающего напряжения от формы ячейки сетки, проведено сравнение расчетных и измеренных характеристик электронной пушки ЛБВ с двумя сетками.

Электрорадиотехнические СВЧ-приборы, в частности ЛБВ, работающие в импульсном режиме, широко используются в современных радиоэлектронных системах. Эффективное управление электронным пучком в таких приборах обеспечивают, как правило, сеточные структуры, размещаемые в области электронной пушки. При этом они возмущают электронный пучок и значительно усложняют задачу создания электронно-оптических систем (ЭОС) с высокими характеристиками.

Возмущения, вносимые сетками в электронный пучок, носят трехмерный характер. Исследованию возмущающего действия сетки посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ [1, 2], разработаны и эффективно применяются методы моделирования действия сетки в двухмерном приближении, когда трехмерная сеточная структура по определенному правилу заменяется набором концентрических колец [3—5]. Известны программы расчета ЭОС в трехмерной постановке [6—8]; в последние годы появились сообщения о разработке новых программ и применении их для моделирования пушек с сетками [9—12], но подробные результаты исследований в литературе не приведены.

Цель настоящей работы — исследование возмущенного действия управляющих сеток на электронный поток с использованием модифицированной [13, 14] строгой трехмерной модели расчета ЭОС.

Расчет ячейки сетки

На первом этапе проводились расчеты характеристик плоского диода с одной (управляющей) и двумя (теневого и управляющей) сетками с квадратной ячейкой. Плоскости электродов параллельны плоскости xOy . Расстояние катод—анод по оси z было выбрано равным 10 мм, толщина теневой сетки 0,2 мм, управляющей 0,3 мм, размер ячейки 8×8 мм. На боковых поверхностях диода с размерами в поперечном сечении 12×12 мм задавалось условие периодичности потенциала. Расчеты проводились без учета теплового разброса на катоде.

Одинарная управляющая сетка была расположена на расстоянии 0,7 мм от катода, значение естественного

потенциала ее обращенной плоскости к катоду 0,0288 от потенциала анода U_a , плоскости, обращенной к аноду, — 0,0464 U_a . При положительном потенциале на сетке частицы вылетают со всего катода размером 6×6 мм, но частицы, точки старта которых расположены под перемычками сетки, оседают на них, поэтому в дальнейшем рассмотрении их учитывать не будем. Экранировка потенциала в углах ячейки сетки приводит к дополнительному, по сравнению с двухмерным случаем, увеличению неравномерности плотности тока катода в пределах ячейки сетки (рис. 1, а). При потенциале управляющей сетки больше естественного электронный пучок на выходе ячейки сетки будет расходиться, при потенциале меньше естественного — сходиться. Будем считать отрицательными углы наклона траекторий частиц к оси z при движении их к центру ячейки и положительными — при движении от центра. Наибольшие углы наклона на выходе из ячейки сетки имеют частицы, точки старта которых расположены по периметру ячейки, причем направление поперечных скоростей изменяется от направления по биссектрисе угла для частицы, чья точка старта расположена в углу ячейки до нормали к перемычке для частиц с точками старта, расположенными около середины перемычки (где эффект экранировки потенциала в углах ячейки уже не проявляется). Угол наклона траекторий частиц у середины перемычки имеет максимальное для всей ячейки значение (рис. 2, а). Причиной таких отличий является меньший градиент потенциала поперечного электростатического поля, действующего на частицу, вылетающую из угла ячейки. При значениях потенциала сетки в интервале 0,033—0,036 U_a направления поперечных скоростей, приобретаемых частицами, меняют знак, причем смена знака для различных частиц происходит при разных потенциалах из-за конечной толщины сетки.

Сравнение распределений частиц по углам наклона на выходе из квадратной и двухмерной (образованной параллельными бесконечными перемычками, — обычное представление сетки при двухмерном расчете) ячеек показало существенное их различие за счет наличия значительно большего числа частиц с большими углами наклона, хотя максимальная и минимальная величины углов одинаковые.

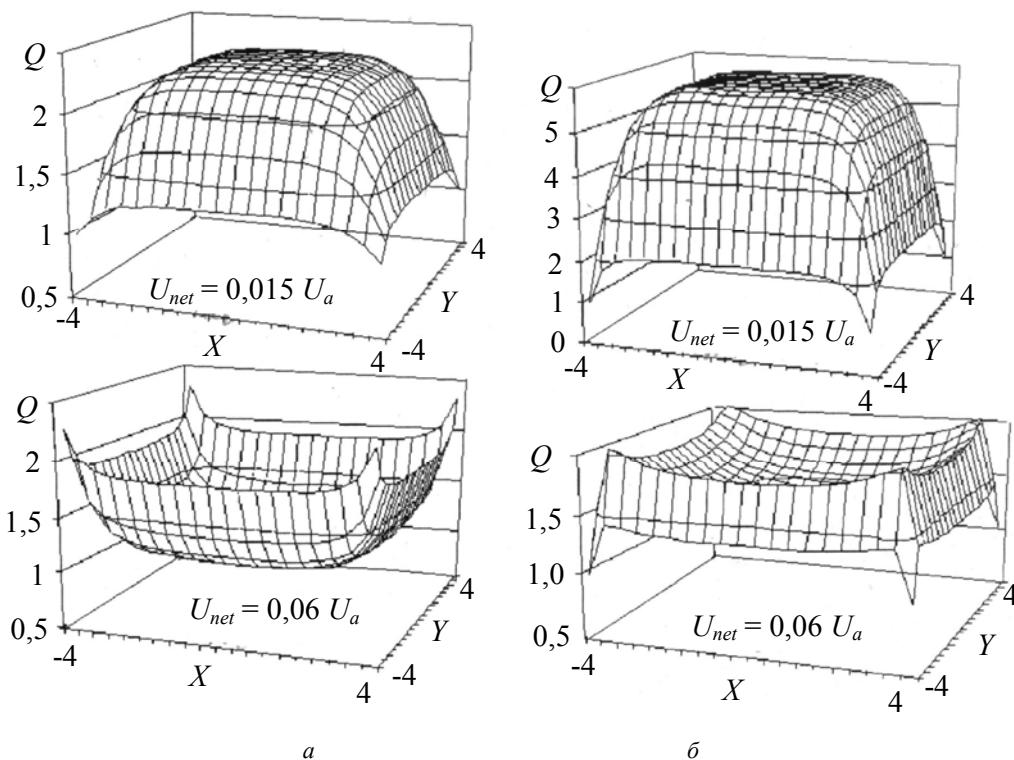


Рис. 1. Распределение плотности тока катода в пределах ячейки для одинарной (а) и двойной (б) сеток

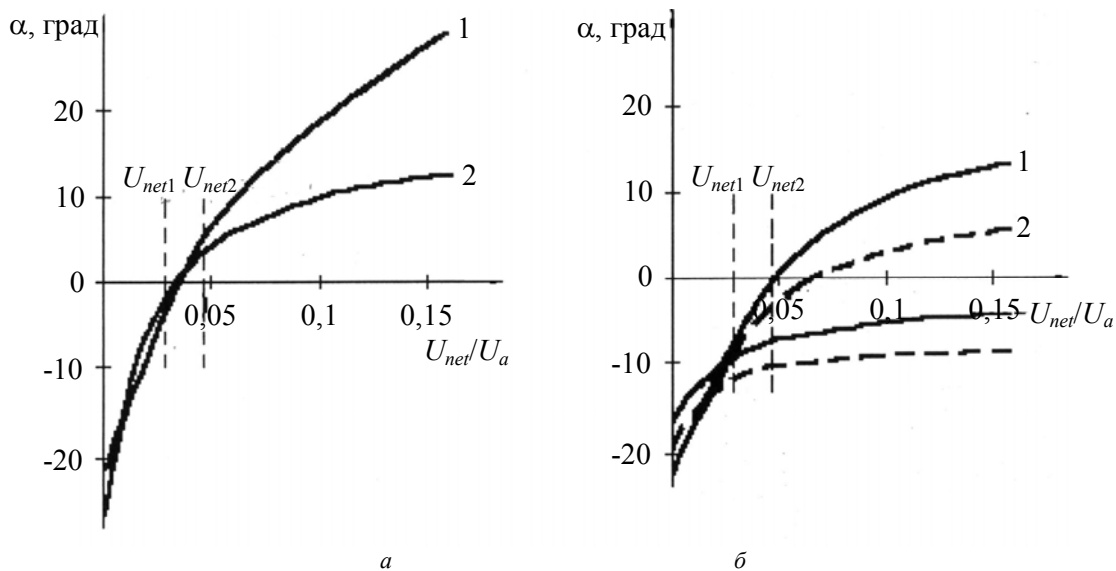


Рис. 2. Зависимость углов наклона траекторий частиц на выходе одинарной (а) и двойной (б) сеток: 1, 2 — на выходе управляющей сетки; 3, 4 — теневой сетки; 1, 3 — точка старта частицы расположена у середины перемычки; 2, 4 — точка старта — в углу ячейки, U_{net1} , U_{net2} — естественные значения потенциала для обращенных к катоду и аноду сторон управляющей сетки

В случае двух сеток (теневой — под потенциалом катода, расположенной от катода на расстоянии 0,2 мм, и управляющей — на расстоянии 0,7 мм от катода) под действием нулевого потенциала теневой сетки частицы, точки старта которых находятся в углах ячейки, по сравнению с частицами, точки старта которых расположены около середины перемычки, за счет меньшей

продольной скорости имеют на выходе из теневой сетки больший угол наклона электронных траекторий (см. рис. 2. б) и большее поперечное смещение относительно точек старта, причем эта закономерность выполняется для потенциала управляющей сетки больше и меньше естественного (рис. 3). Находящаяся под поло-

жительным потенциалом управляющая сетка отклоняет электроны от центра ячейки, а величина отклонения, как в случае одинарной сетки, больше для середины ячеек.

Применение двух сеток увеличивает неравномерность распределения плотности тока катода по сравнению с одинарной сеткой (см. рис. 1, б).

При потенциале управляющей сетки меньше естественного ($U_{net} = 0,015U_a$) для одинарной сетки отношение максимальной плотности тока к минимальной составило 2,33; для двух сеток — 5,91, при потенциале больше естественного ($U_{net} = 0,06U_a$) — 2,89 и 2,03, и эти величины значительно больше, чем получаемые при двухмерном пред-

ставлении ячейки — 1,79 и 2,71, 1,86 и 1,36, соответственно.

Расчет величины запирающего напряжения показал его зависимость от формы ячейки. Рассматривалась ячейка прямоугольной формы, причем длина короткой стороны L_a оставалась постоянной. Величина запирающего напряжения возрастала до максимального значения при увеличении отношения сторон ячейки до $L_b/L_a = 4$ и далее не изменялась при любых L_b (рис. 4). Для ячейки в виде круга диаметром L_a (вписанного в квадрат) величина запирающего напряжения в зависимости от расстояния катод—сетка составила 0,805—0,84 от величины запирающего напряжения квадрата.

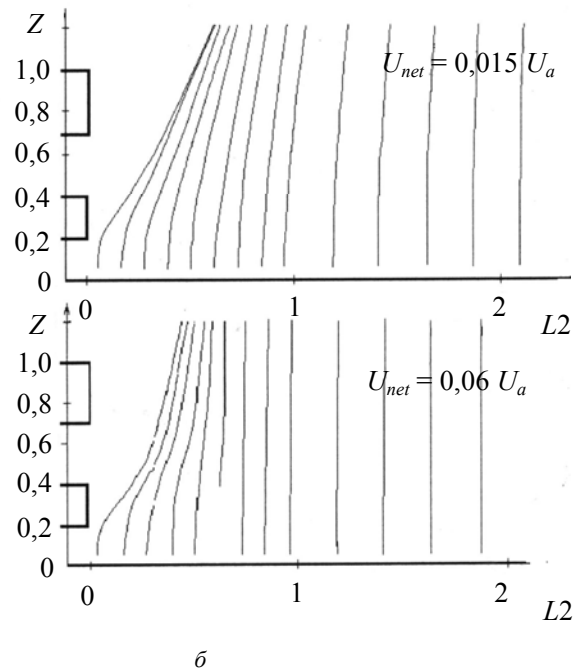
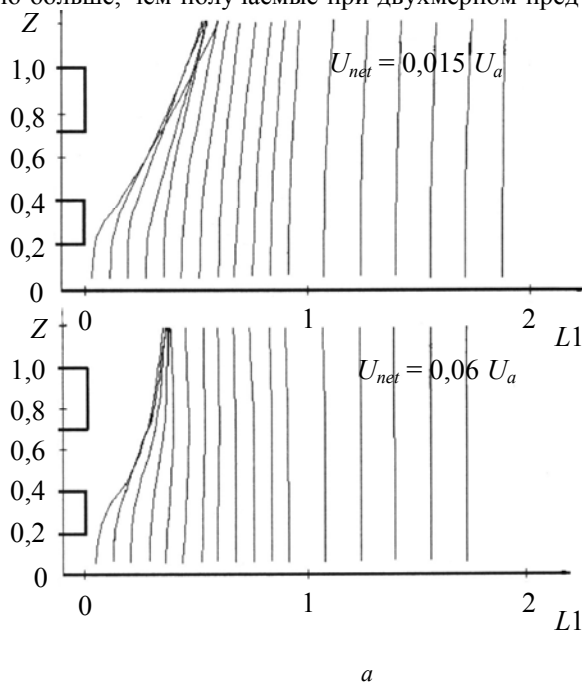


Рис. 3. Траектории частиц в области теневой и управляющей сеток:

а — точки старта частиц расположены на нормали к середине перемычки; L1 — расстояние от перемычки;
 б — точки старта частиц расположены на биссектрисе угла; L2 — расстояние от угла

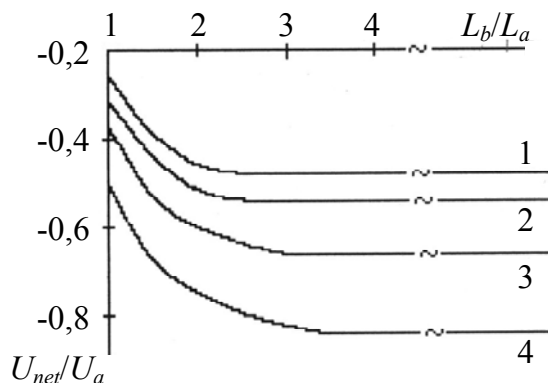


Рис. 4. Зависимости величины запирающего напряжения прямоугольной ячейки от отношения сторон прямоугольника:

1 — расстояние катод—сетка 2,8 мм;
 2 — 2,1 мм; 3 — 1,4 мм; 4 — 0,7 мм

Расчет характеристик сеток с радиальными и кольцевыми перемычками

При анализе характеристик плоских триодов с управляющими сетками, образованными радиальными и кольцевыми перемычками (рис. 5), размеры ячеек выбирались таким образом, чтобы во все ячейки был

вписан круг одного диаметра. Геометрическая прозрачность сеток при разной ширине перемычек составила 0,861 и 0,866, соответственно. При подаче на сетки потенциала, равного естественному, для обращенной к катоду стороны сетки ток катода в двух случаях был одинаков, но при значениях потенциала больше естественного из-за зависимости величины провисания потенциала от фор-

мы ячейки сетки с радиальными и кольцевыми перемычками обеспечивала большой ток катода, а при потенциале меньше естественного — соответственно, меньший ток. Из-за азимутальной симметрии сеток распределение частиц по азимутальным углам наклона для двух сеток сим-
 вденном примере (потенциале сетки меньше естественного) создают верхние кольцевые перемычки ячеек, положительные углы — нижние кольцевые перемычки ячеек, и распределение не сильно отличается от симметричного. В случае сетки с радиальными перемычками за счет верхней кольцевой перемычки создаются отрицательные углы наклона частиц на выходе сетки. Основная часть частиц на выходе сетки с радиальными

перемычками при потенциале ниже естественного имеет небольшие положительные углы наклона.

Для сеток рассмотренной конфигурации величина запирающего напряжения для сетки с радиальными перемычками в 1,5 раза больше, чем для сетки с радиальными и кольцевыми перемычками.

Расчет характеристик электронной пушки ЛБВ

В качестве объекта исследования была выбрана электронно-оптическая система серийно выпускаемой ФГУП «НПО "Алмаз"» ЛБВ с микро-

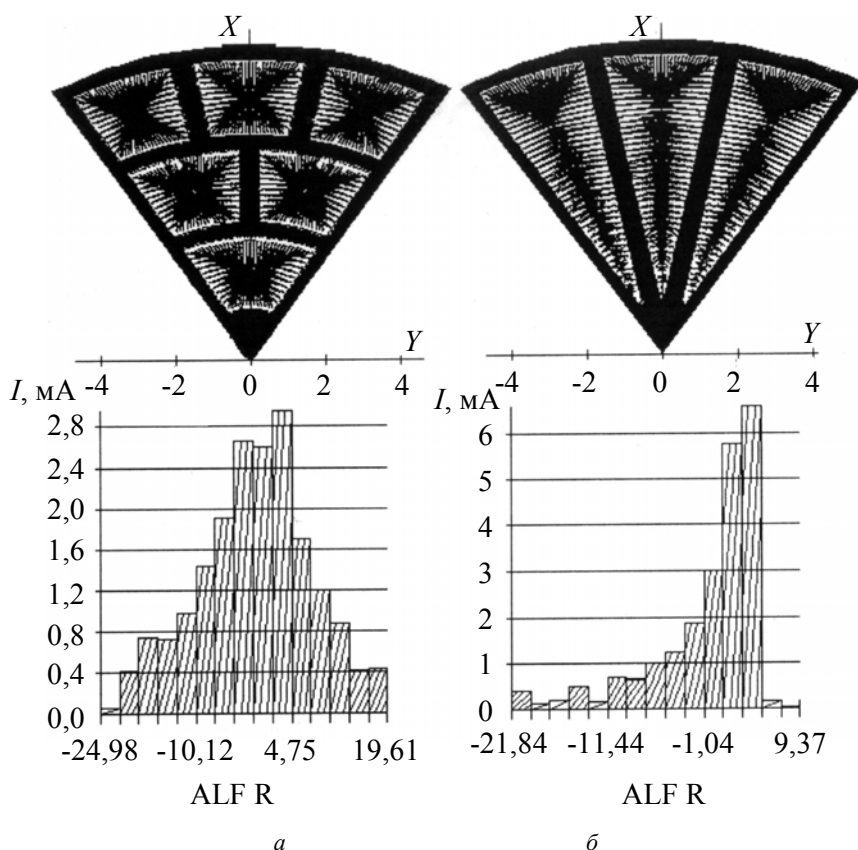


Рис. 5. Конфигурация одинарных сеток с радиально-кольцевыми (а) и радиальными (б) перемычками, проекции траекторий частиц на плоскости сеток при потенциале сеток меньше естественного и распределения частиц по радиальным углам наклона на выходе сеток

метрично относительно нуля, и максимальные углы наклона одинаковые, хотя форма распределения имеет отличия. Распределения частиц по радиальным углам наклона отличаются существенно. Для сетки с радиально-кольцевыми перемычками отрицательные углы наклона в первеансом пучка $1,43 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Конфигурация теневой и управляющей сеток одинакова и представлена на рис. 6, а. Рассчитывался сектор пушки с углом между ограничивающими азимутальными плоскостями 90° . При минимальном размере поперечного сечения перемычек теневой и управляющей сеток $0,1 \text{ мм}$ шаг мелкой сетки, расположенной у катода, выбирался равным $0,03 \text{ мм}$. Расчеты проводились с учетом тепловых скоростей электронов на катоде. В номиналь-

ном режиме работы прибора при потенциале управляющей сетки $0,018 U_a$ из-за наличия анодного отверстия средняя часть сетки находится ближе к катоду, чем указанная эквипотенциальная поверхность (см. рис. 6, в), поэтому центральное отверстие сетки и следующий ряд ячеек действуют на электронный поток с катода как расфокусирующие линзы. Сравнение расчетного значения тока пучка с данными по 18 приборам показало, что отличие среднего измеренного значения тока от расчетного, определенного при среднем измеренном значении потенциала на сетке, составило $2,23 \%$.

Далее проводился расчет траекторий частиц в электронной пушке с магнитным полем и использованием постпроцессора на выходе анода пушки для вариантов

без и с магнитным полем путем азимутальной трансляции и был сформирован круглый пучок для последующего расчета ЭОС. На рис. 6, *з* приведены результаты расчета расплывания пучка в области дрейфа за анодом пушки без магнитного поля и фокусировки пучка постоянным магнитным полем в области пролетного канала. Поскольку электронный пучок в поперечном сечении имеет форму, близкую к кругу, для анализа его поведения за анодом пушки, пренебрегая небольшими азимутальными вариациями размера и плотности тока, целесообразно использовать линии уровня тока. Без магнитного поля линии уровня тока имеют

электростатический кроссовер на различных расстояниях от катода, что указывает на неламинарность пучка. Расчетный интервал распределений траекторий частиц по углам наклона в кроссовере составил $\pm 7,56^\circ$ в азимутальном и $-8,27 + 4,19^\circ$ в радиальном направлениях. Сравнение распределений траекторий частиц по углам наклона на выходе анода пушки с учетом и без учета начальных тепловых скоростей на катоде показало в последнем случае уменьшение интервала углов наклона в азимутальном направлении на 18,5 и в радиальном — на 17,3 %.

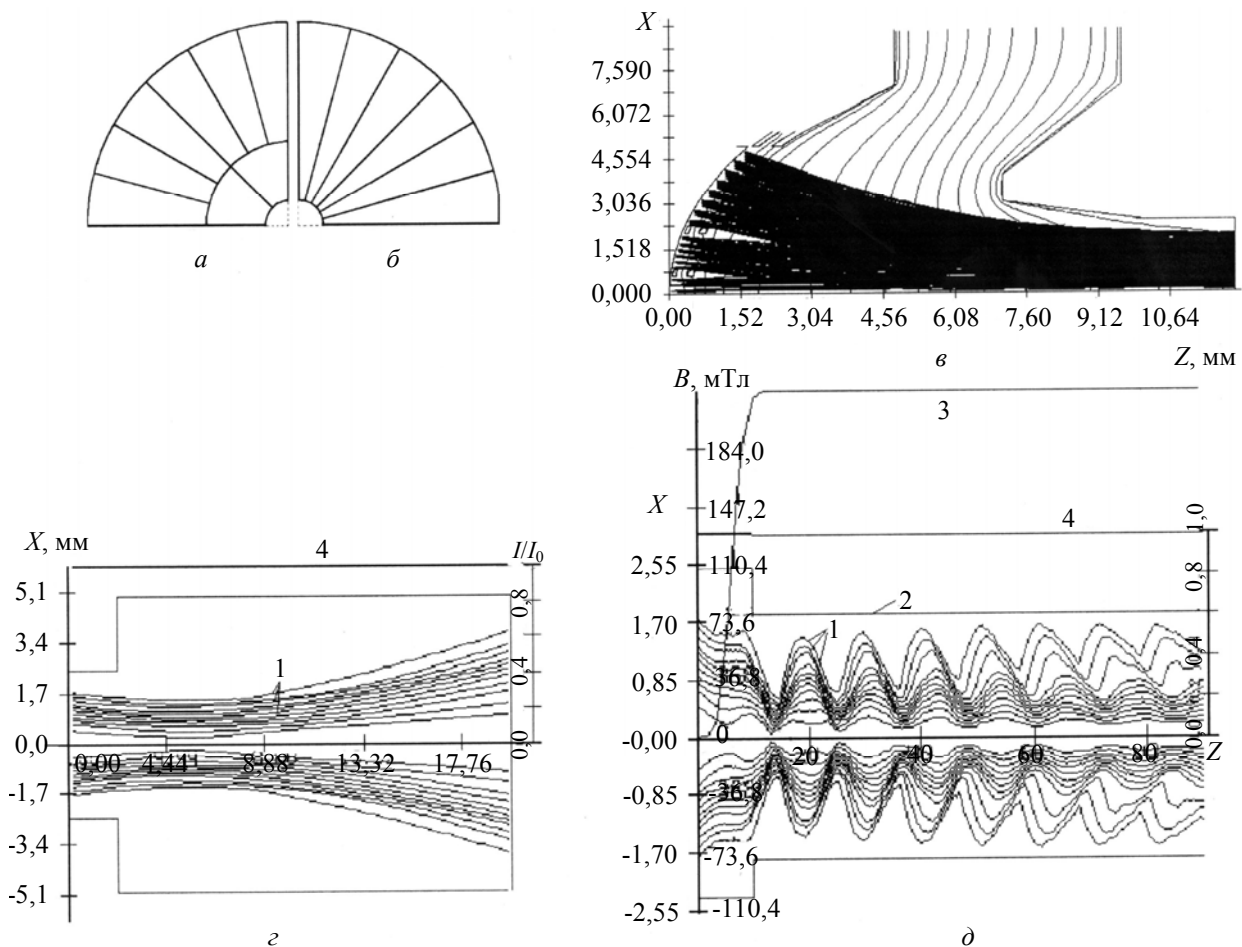


Рис. 6. Конфигурация сеток с радиально-кольцевыми (*а*) и радиальными (*б*) перемычками, конфигурация электронной пушки ЛБВ, эквипотенциалы и траектории частиц (*в*); поведение уровней тока пучка при расплывании пучка в области дрейфа (*з*) и в пролетном канале при фокусировке постоянным магнитным полем (*д*):

- 1 — уровни тока относительно общего тока пучка — 0,99; 0,95; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1;
 2 — пролетный канал; 3 — распределение продольной составляющей магнитного поля на оси пролетного канала;
 4 — зависимость коэффициента токопрохождения пучка от длины

Расчетное значение величины пульсаций пучка в постоянном магнитном поле (см. рис. 6, *д*) составляет в среднем по длине 22 %.

На рис. 7 приведены результаты обработки характеристик пучка с помощью постпроцессора в области пушки. На пути электронного пуска при различных значениях продольной координаты z помещалась сетка с квадратными ячейками размером $0,05 \times 0,05$ мм, параллельная плоскости XU , подсчитывался ток частиц, попадающих в каждую ячейку, и выделялись характе-

ристики пучка, в том числе линии, равной плотности тока в поперечном сечении пучка, показанные на рис. 7. В сечениях при $z = 0,75$ и $1,0$ мм в распределении частиц ясно видна структура сеток пушки, причем следует отметить, что из-за близости к катоду в сетку-анализатор попадают не все частицы. Далее происходит заплывание сначала внутренней кольцевой и радиальной перемычек. При $z = 5$ мм пучок становится сплошным при азимутальной периодично-

сти границы пучка, причем эти изменения радиуса уменьшаются в области анода пушки.

Из-за существенных отличий в форме и размере ячеек сетки в рассмотренной конструкции пушки при подаче на управляющую сетку отрицательного потенциала первой запирается средняя часть катода, далее —

центральная часть и последней — внешняя часть катода (рис. 8). Полное запираение катода происходит при потенциале управляющей сетки $-0,024 U_a$, причем отличие расчетного значения от измеряемого не превышает 6,7 %.

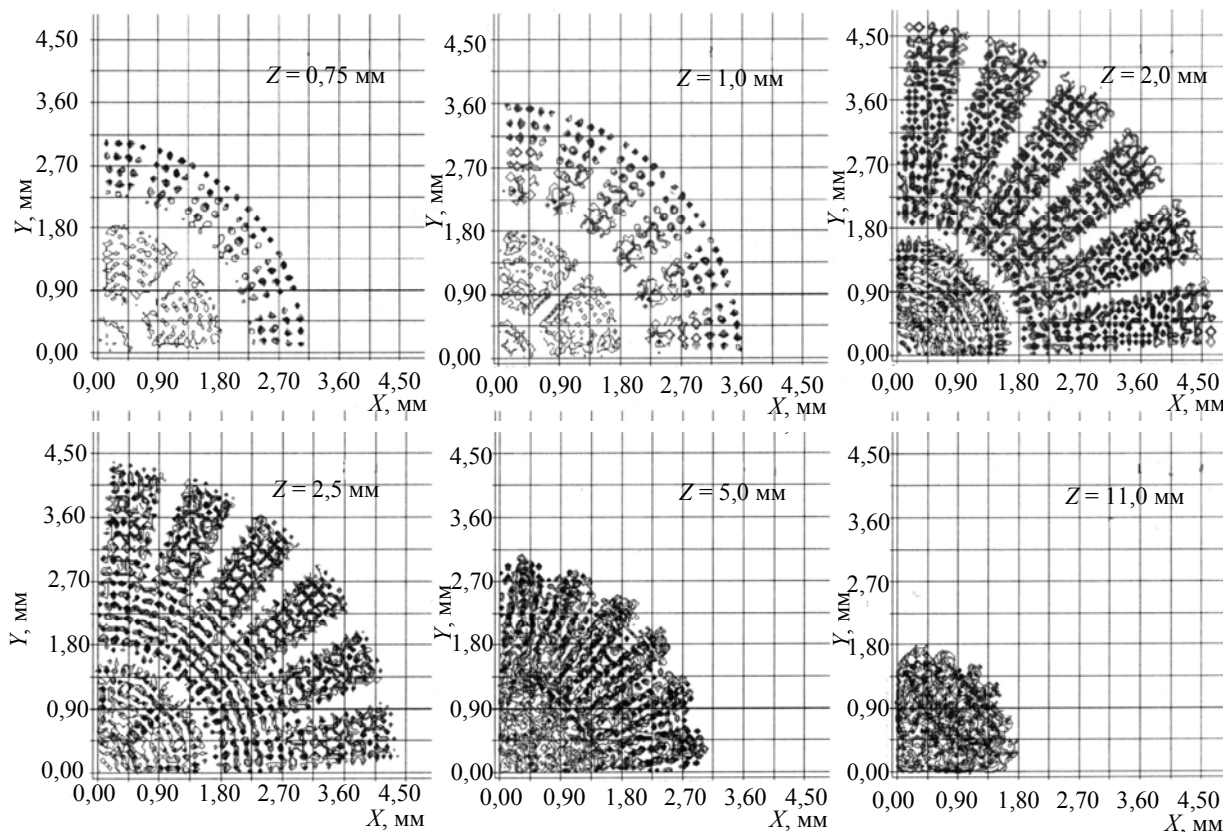


Рис. 7. Поперечное сечение пучка в области пушки

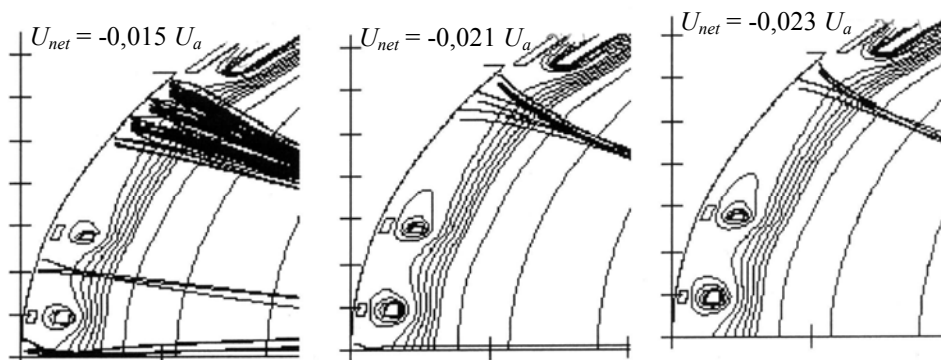


Рис. 8. Траектории частиц в эквипотенциали в прикатодной области пушки

Аналогичные расчеты были проведены для пушки с сетками измененной конфигурации (см. рис. 6, б) с теми же размерами перемычек и положением сеток. Расчетное значение тока было больше на 8 %, чем для сетки с радиально-кольцевыми перемычками. Величина запирающего напряжения, определяемая в рассмотренной конструкции пушки конфигурацией ячеек сетки на краю катода, практически не изменилась. Некоторые отличия в распределении частиц по азимутальным и радиальным углам наклона и плотности тока в поперечном сечении для двух конфигураций сеток при

близких значениях максимальных углов наклона не привели к значительным отличиям размеров пучков в электростатическом кроссовере и его положении, а также формы пучков при фокусировке магнитным полем.

Проведенные расчеты показали, что учет трехмерной структуры сеток приводит к отличиям по сравнению с двухмерным моделированием в распределении плотности тока и частиц по углам наклона в ячейках сетки, зависимости запирающего напряжения от формы ячейки.

Литература

1. Ессин А. Д., Курицын В. М., Шаталин И. А. и др. Мощные ЛБВ с низковольтным управлением электронным потоком//Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. — М.: ЦНИИ "Электроника". 1976. Вып. 6 (375).
2. Григорьев Ю. А., Правдин Б. С., Шестеркин В. И. Электронно-оптические системы с сеточным управлением// Там же. 1987. Вып. 7(1264).
3. Петросян А. И. Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 1998. С. 213.
4. True R.//IEEE Trans. on ED. 1987. V. ED-34. № 2. P. 473.
5. Голеницкий И. И., Сапрынская Л. А., Местечкин Я. И. и др.//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 8. С. 36.
6. Блейвас И. М., Невский П. В., Руденко Б. В. и др. Методы расчета электронно-оптических систем. — М.: Наука, 1977. С. 25.
7. 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.
8. Рыбачек В. П.//В сб. "Вакуумная и газоразрядная электроника". — Рязань, 1984. С. 102.
9. Голеницкий И. И., Духина Н. Г., Будзинский Ю. А. и др.//ВЧ-техника и телеком. технологии (КрымМиКо 2001): Матер. 11-й междунар. конф. — Севастополь. Украина, 2001. С. 216.
10. Petillo J., Eppley K., Panagos D. et al.//Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2002). Monterey. CA. USA, 2002. P. 156.
11. Рыбачек В. П., Федяев В. К. Методы расчета ЭОС: Тез. докл. X всесоюзного семинара. — Львов: Изд-во Львов. ун-та. 1990. С. 134.
12. Petillo J., Eppley K., Panagos D. et al.//Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2003). Seoul. Korea. 2003. P. 10.
13. Журавлева В. Д., Rogovin V. I., Семенов С. О. Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. — Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 1998. С. 187.
14. Semenov S. O., Zhuravleva V. D., Rogovin V. I.//Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electr. Conf. (IVEC 2003). Seoul. Korea. 2003. P. 381.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

A study of 3D effects in electron beams under disturbing action of electron gun control grids

S. O. Semenov

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

Using three-dimensional codes for computer aided design of electron-optical systems the current control grid disturbing effects in electron beams are studied. It is shown, that maximum angles have trajectory of particles, which start points settle near the middle of the grid cell wire. The dependence of cut-off potential value on grid cell shape and comparison of calculated and measured characteristics for TWT electron gun with two grids are presented.