

эмиссию вместо кинетической электронной эмиссии и использующий корректор осевых aberrаций на комбинированном электромагнитном зеркале.

- FIB в случае коррекции одной только хроматической aberrации второго порядка позволит получать разрешение 1,6 нм при исследовании металлических нанобъектов, что существенно лучше (в 4—6 раз), чем разрешение существующих ионных и электронных микроскопов, использующих кинетическую вторичную электронную эмиссию. При полной коррекции всех aberrаций возможно было бы получить разрешение 0,6 нм.

- FIB позволит получать дополнительно новую информацию о структуре поверхностных слоев нанобъектов, в частности, о локальной структуре их энергетических уровней.

- Создание подобного FIB не является экстремальной инженерно-технической задачей и возможно в любой современной ионно-оптической лаборатории.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований ОИТВС РАН по направлению "Организация вычислений с использованием новых физических принципов".

Л и т е р а т у р а

1. Michael T. Postec, John S. Villarrubia, Andreas E. Vladar// JVST. B. 2005. V. 23(6). P. 2806—2810.
2. Stefano Cabrini, Robert J. Barsotti, Alessandro Carpentiero, Luca Businaro// Ibid. P. 3015—3022.
3. Szilgui M. Electron and ion optics: Plenum Press. — New York—London, 1989.
4. Ampere A. Tseng, Andrea Notargiacomo, Chen T. P.// Ibid. V. 23(3). P. 877—894.
5. Жуков В. А., Баграев Н. Т., Тумов А. И. и др.// Микроэлектроника, 2004. Т. 33. № 5. С. 325—338.
6. Петров Н. Н., Аброян И. А. Диагностика поверхности с помощью ионных пучков. — Л.: Наука, 1977.
7. Cazalilla M. A., Lorente N., Diez Muino R.// Phys. Rev. B. 1998. V. 58. № 20. P. 13991—14006.
8. Kalbitzer S., Knoblauch A.// JVST B. 1998. V.16(4). P. 2455—2461.
9. Knoblauch A., Miller Th., Klatt Ch., Kalbitzer S.// Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B. 1998. V. 139. P. 20—27.
10. Grivet P. Electron optics: Pergamon Press. — New York—London, 1965.
11. Жуков В. А., Завьялова А. В.// Микроэлектроника, 2006. Т. 35. № 6. С. 434—444.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Backgrounds for development of FIB on He⁺ ions with resolution of 1.6 nm for research of metal nanostructure

V. A. Zhukov

St.-Petersburg Institute for Informatics and Automation, Russian Academy of Sciences,
St.-Petersburg, Russia

A focused ion beam microscope (FIB) on slow He⁺ ions registering a potential secondary electron emission instead of kinetic secondary electron emission and using correction of axial aberrations with the help of the combined electromagnetic mirror is offered. It is shown that this FIB under condition of correction of only chromatic aberration of second order will allow to obtain the resolution of 1.6 nanometers at research of metallic nanoobjects. These values are approximately 4—6 time better than the resolution of existing FIB and SEM.

УДК 621.3.032.269.1+621.385.6

Расчет электронно-оптических систем ЛБВО с полевой эмиссией

А. И. Петросян, В. И. Роговин

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

Проведено моделирование пучков в электронно-оптических системах (ЭОС) ЛБВО с полевой эмиссией. Обнаружено, что уменьшение диаметра парциального автоэмиссионного катода (АЭК) уменьшает углы наклона электронных траекторий, вызванные возмущающим действием крупноячейистой управляющей сетки. Показано, что погружение пушки в

постоянное магнитное поле заметно уменьшает эти углы в том случае, если величина магнитного поля достигает нескольких тесла. Спроектирована ЭОС с АЭК для ЛБВ сантиметрового диапазона. Проведено моделирование ЭОС с лезвийным АЭК.

Применение катодов с полевой эмиссией в ЛБВ О-типа позволило бы обеспечить практически мгновенную готовность прибора к работе и ликвидировать потребность в источнике питания катода. Поэтому разработка ЛБВО с автоэлектронной эмиссией, а значит, и проектирование ЭОС таких ЛБВО является важной и актуальной задачей.

Источником электронных потоков в ЛБВО могут служить, например, матричные катоды типа Спиндта [1], состоящие из нескольких тысяч эмитирующих острий, каждое из которых размещено в середине ячейки управляющей сетки, что позволяет избежать возмущения электронных траекторий электростатической линзой ячейки сетки. Однако недостатками катодов типа Спиндта являются необходимость поддержания достаточно высокого вакуума на уровне 10^{-10} — 10^{-9} мм рт. ст., а также сложность и дороговизна технологии их изготовления. Более перспективным для применения в ЭОС ЛБВО являются матричные углеродные автоэмиссионные катоды (МУАЭК) [2], которые могут работать в вакууме 10^{-7} — 10^{-6} мм рт. ст., а технология их изготовления значительно проще и дешевле технологии изготовления катодов типа Спиндта. Однако и эта система имеет недостаток, заключающийся в том, что размещаются нескольких десятков эмитирующих острий в пределах одной ячейки крупноячейковой управляющей сетки (КУС), что приводит к эмиссии в основном с периферийных острий, близко расположенных к границам ячейки КУС. При этом траектории электронов, эмитированных периферийными остриями, сильно возмущаются электростатической линзой ячейки сетки, что вызывает появление поперечных скоростей электронов, сравнимых по величине с их продольными скоростями. Такие большие поперечные скорости электронов мешают фокусировке пучка магнитным полем (МП) и требуют увеличить величину МП и (или) диаметр пролетного канала. Исследование возможности уменьшения этих поперечных скоростей электронов в ЭОС с МУАЭК и КУС, а также численное проектирование ЭОС ЛБВО с полевой эмиссией и является целью данной работы.

По программе расчета электронных пучков в ЭОС приборов СВЧ О-типа с полевой эмиссией авторами проведено моделирование пучков в ЭОС ЛБВО с полевой эмиссией. Вначале был проведен расчет электронной пушки с семью парциальными АЭК диаметром 0,5 мм каждый, в которой один катод расположен на оси ЭОС, а шесть — на окружности вокруг центрального катода (рис. 1). Сетка имеет толщину $d_c = 0,03$ мм (см. рис. 1, а, б)

и $d_c = 0,05$ мм (см. рис. 1, в, г) и отстоит от катода на 0,03 мм. Потенциалы сетки и замедляющей системы равны 4500 В.

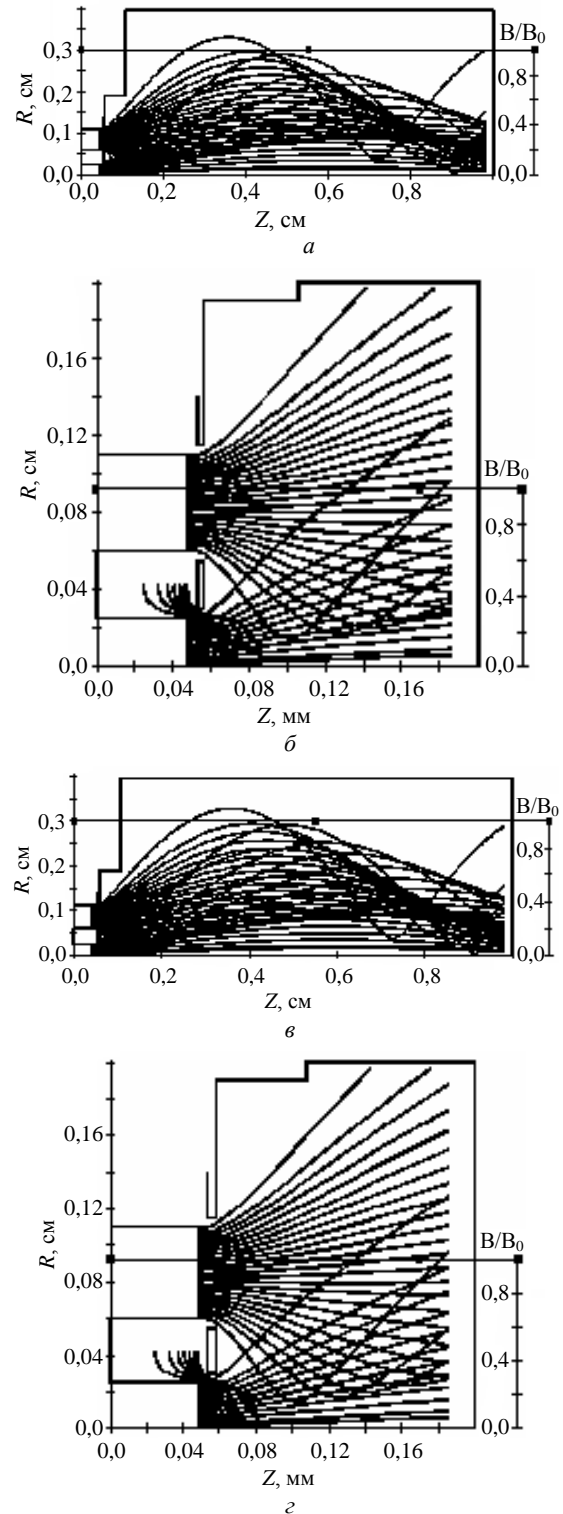


Рис. 1. Моделирование электронного пучка во всей пушке (а, в) с семью АЭК диаметром 0,5 мм каждый, погруженной в постоянное магнитное поле, и в прикатодной области (б, д) пушки

Пушка погружена в постоянное магнитное поле величиной 120 мТл. Расчет ведется в двухмерном приближении, причем ток пучка равен суммарному току эмиссии семи АЭК. Видно (см. рис. 1), что по мере приближения к оси симметрии парциального катода эквипотенциальные поверхности отдаляются от катода (что резко уменьшает плотность тока эмиссии с центральной части парциального катода) и становятся все более параллельными его поверхности (что весьма существенно уменьшает возмущение приосевых электронов этими эквипотенциальными поверхностями). Напротив, по мере удаления от оси симметрии парциального катода эквипотенциальные поверхности приближаются к краю этого катода и приобретают сильный наклон относительно электронных траекторий. Это приводит к сильному возмущению электронных траекторий, отдаленных от оси симметрии (угол наклона траектории крупной частицы, эмитированной с периферийной части катода, вблизи сетки равен 44°) и резкому увеличению тока эмиссии с периферийной части парциального катода. Так, ток последней (12-й) крупной частицы составляет 94,5 % от всего тока парциального катода, при этом суммарный ток семи парциальных катодов равен 41 мА ($d_c = 0,03$ мм) или 50 мА ($d_c = 0,05$ мм).

Таким образом, крупночастичная управляющая сетка обеспечивает нужную величину тока эмиссии с АЭК (50 мА), но вызывает появление больших углов наклона электронных траекторий. Отметим, что при толщине сетки $d_c = 0,03$ мм оседания электронов на сетку не происходит (см. рис. 1, б). Если же $d_c = 0,05$ мм, то крайняя траектория приближается к перемычке сетки (см. рис. 1, г). Учитывая, что электронный пучок разбит на цилиндрические коаксиальные слои и траектория каждой крупной частицы проходит через середину соответствующего цилиндрического слоя, можно сделать вывод, что при $d_c = 0,05$ мм небольшое количество электронов оседает на сетку. В то же время сетка толщиной 0,05 мм является более формоустойчивой по сравнению с сеткой толщиной 0,03 мм. Оседания электронов на сетку можно избежать, если уменьшить ширину перемычки сетки, при этом потребуется увеличить ее потенциал, чтобы сохранить прежнюю величину тока эмиссии АЭК. Так, уменьшая ширину перемычки сетки с 0,25 до 0,2 мм, можно избежать оседания электронов на перемычку сетки и уменьшить угол наклона траектории крупной частицы, эмитированной с периферийной части катода, с 44 до 39° . При этом увеличение потенциала сетки на 7 % позволяет сохранить прежнюю величину тока эмиссии катода.

Рассмотрим фокусировку пучка в пушке (у которой $d_c = 0,05$ мм) и в пролетном канале перио-

дическим магнитным полем, изменяющимся по синусоидальному закону. Величину амплитудного значения продольной составляющей вектора магнитной индукции на оси симметрии ЭОС выберем равным 150 мТл, величину магнитного поля на катоде — 121 мТл, а период изменения магнитного поля — 14 мм. Результаты расчета формирования пучка в электронной пушке и фокусировки пучка в магнитной периодической фокусирующей системе (МПФС) представлены на рис. 2. Видно, что из-за больших углов наклона электронных траекторий электронный пучок увеличивает свой диаметр в пушке с 2,2 (на катоде) до 5,6 мм, прежде чем под действием магнитного поля диаметр пучка начинает уменьшаться. Расчет пучка в пушке ведется до плоскости, в которой начинается регулярная часть МПФС (в этой плоскости магнитное поле равно нулю).

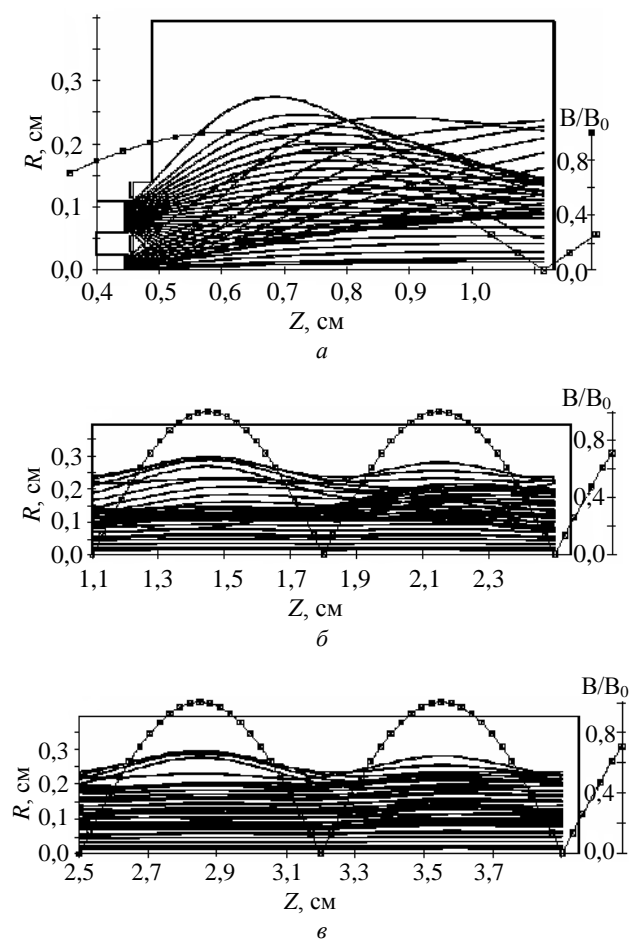


Рис. 2. Моделирование электронного пучка в пушке (а) с семью АЭК диаметром 0,5 мм каждый, погруженной в синусоидальное магнитное поле, и в пролетном канале (б, в)

Отметим, что под действием сетки электроны пучка (см. рис. 2, а) приобретают большие углы наклона в разные стороны, но разные по величине и направлению скорости. Это приводит к большой величине среднего диаметра пучка в МПФС, уменьшение которой, как будет показано ниже,

требует применения сильных магнитных полей. Из рис. 2, б, в видно, что пульсации границы пучка невелики, что свидетельствует о хорошем согласовании последнего с магнитным полем фокусирующей системы. При этом среднее значение диаметра пучка в МПФС равно $\sim 5,6$ мм, что обеспечивает прохождение последнего через пролетный канал с диаметром 7,9 мм. Данная МПФС ранее была использована для фокусировки пучка, эмитированного термокатодом, при этом среднее значение диаметра пучка в МПФС равнялось 1,1 мм, что позволяло обеспечить хорошее прохождение пучка через пролетный канал диаметром 2,4 мм.

Таким образом, в МПФС среднее значение диаметра пучка, сформированного пушкой с МУАЭК, в разы превышает среднее значение диаметра лучевого пучка, сформированного пушкой с термокатодом.

Исследуем возможность уменьшения большого среднего значения диаметра пучка в магнитном поле фокусирующей системы. Рассмотрим фокусировку пучка в пушке и пролетном канале постоянным магнитным полем величиной 360 мТл и 1 Тл (рис. 3). Средний диаметр пучка в пролетном канале для указанных выше значений напряженности магнитного поля составляет примерно 3,6 и 2,3 мм, соответственно. Видно, что такой средний диаметр пучка в пролетном канале достигается при весьма больших, недостижимых на практике значениях напряженности магнитного поля. Отме-

тим, что расчет электронной пушки с разными значениями магнитного поля на катоде показал, что при увеличении напряженности магнитного поля с 120 мТл до 1 Тл расстояние между граничной траекторией пучка и перемычкой сетки на рис. 3 с графической точностью остается неизменным. При увеличении величины напряженности магнитного поля до 2 и 3 Тл это расстояние увеличивается в 1,5 и 2 раза, соответственно.

Таким образом, для значительного уменьшения оседания электронов на сетку требуется применять магнитное поле, величина напряженности которого на катоде превышает 1 Тл. Необходимость применения такого сильного магнитного поля объясняется тем, что при более слабых магнитных полях движение электронов в зазоре катод–сетка в основном определяется электрическим полем, напряженность которого в этом зазоре очень велика.

Расчет ЭОС с уменьшенным диаметром АЭК (с 0,5 до 0,12 мм) показал (рис. 4), что в этом случае максимальный угол наклона траекторий уменьшается с 44 до 25 град. В результате оседание электронов на управляющую сетку отсутствует, а средний диаметр пучка в пролетном канале значительно уменьшается. Это позволяет уменьшить диаметр пролетного канала с 7,9 (см. рис. 2) до 4,0 мм (см. рис. 4), что дает возможность использовать ЭОС с уменьшенным диаметром АЭК в ЛБВ сантиметрового диапазона. Однако уменьшение диаметра парциального катода примерно в

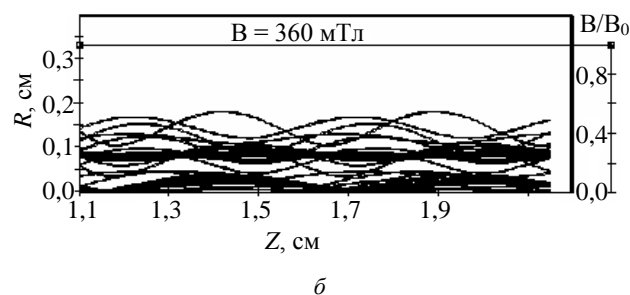
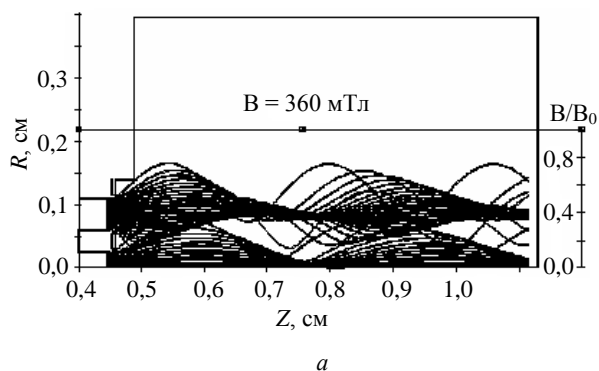
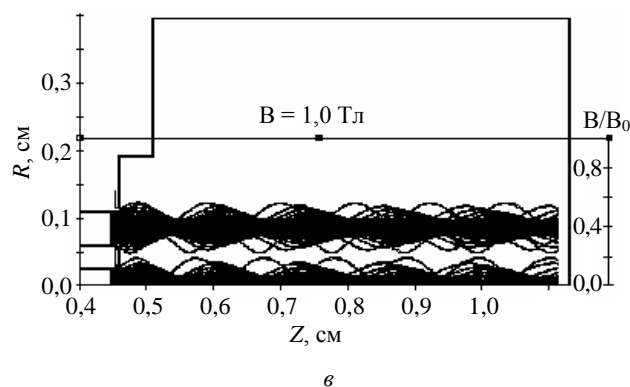


Рис. 3. Моделирование электронного пучка в пушке с семью АЭК диаметром 0,5 мм каждый, погруженной в постоянное магнитное поле величиной 360 мТл (а) и 1 Тл (в), и в пролетном канале (б)



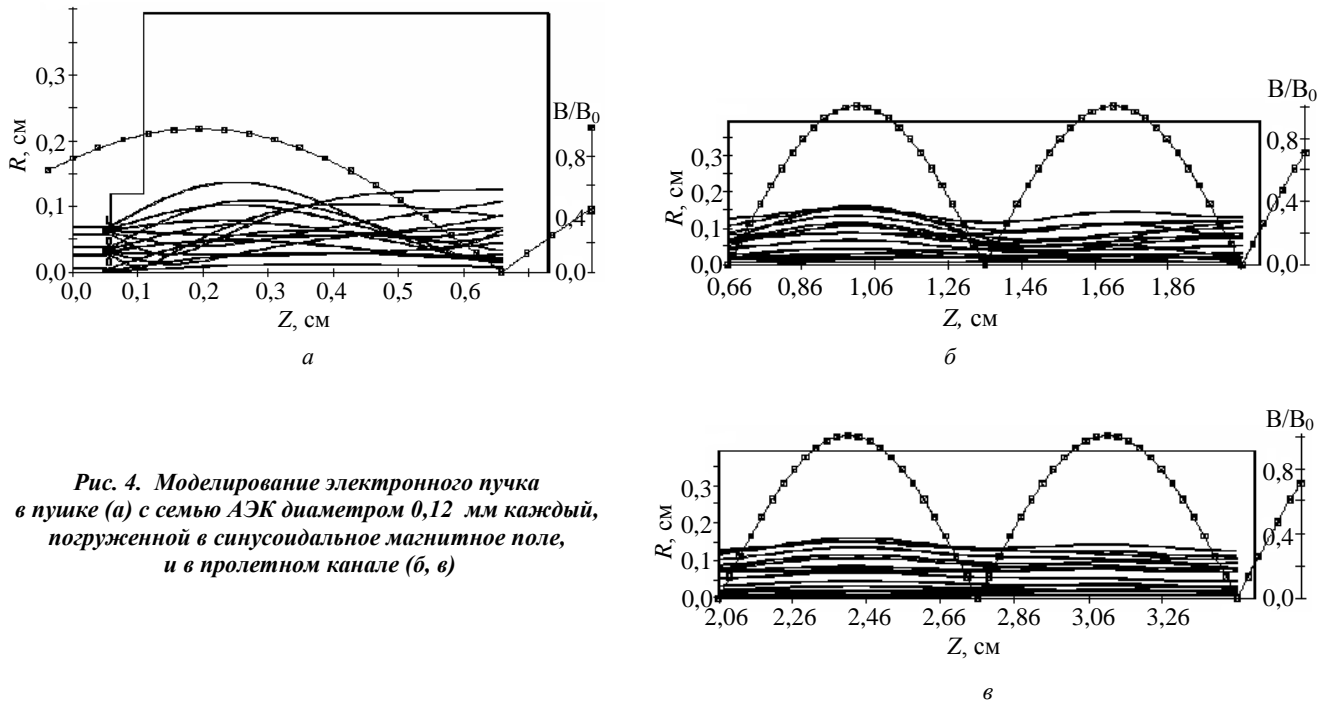


Рис. 4. Моделирование электронного пучка в пушке (а) с семью АЭК диаметром 0,12 мм каждый, погруженной в синусоидальное магнитное поле, и в пролетном канале (б, в)

четыре раза требует увеличения числа парциальных катодов для сохранения суммарного тока пучка. Поэтому число парциальных катодов с диаметром 0,12 мм увеличено с 7 (1+6) до 19 (1+6+12), а потенциал управляющей сетки возрос на 8 %, что обеспечивает требуемый ток пучка (50 мА). Отметим также, что уменьшение диаметра парциального катода с 0,5 до 0,12 мм позволило снизить неравномерность распределения тока по поверхности этого катода. Так, ток крупной частицы на периферии парциального катода составит 84 % от всего тока пучка, в то время как для катода диаметром 0,5 мм эта величина равна 94,5 %.

Перспективным является и применение ЭОС с лезвийными АЭК [3, 4]. На рис. 5 представлены

результаты расчета такой ЭОС с управляющей сеткой, у которой коаксиальные кольцевые переключки имеют толщину и ширину 0,05 мм, расстояние между соседними кольцевыми переключками составляет 0,1 мм, а кольцевые лезвия АЭК расположены в середине между этими переключками. Благодаря такому расположению лезвий АЭК управляющая сетка не возмущает электронные траектории, т. е. поперечные скорости электронов равны нулю. Это позволяет в пролетном канале диаметром 2,4 мм обеспечить достаточно малое (не более 0,6) заполнение канала пучком, используя магнитную периодическую фокусирующую систему с малой величиной (54 мТл) амплитудного значения магнитного поля.

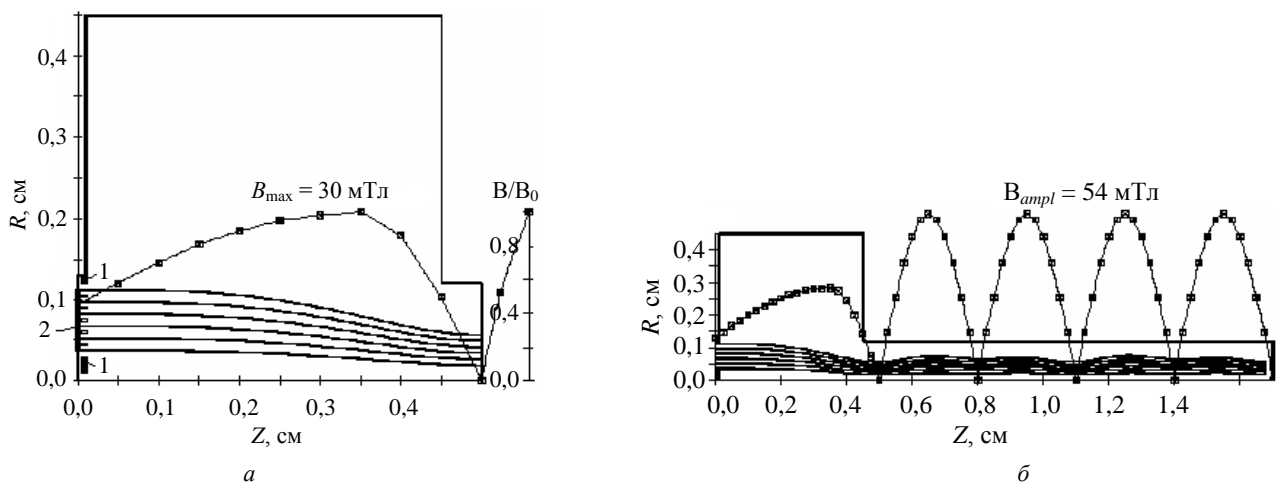


Рис. 5. Моделирование электронного пучка:
а — в отдельно взятой пушке с лезвийным АЭК; б — в пушке и пролетном канале;
1 — управляющая сетка; 2 — автоэмиссионный лезвийный катод

Выводы

1. Крупноячеистая управляющая сетка (КУС) обеспечивает нужную величину тока эмиссии с АЭК, но вызывает появление больших углов наклона электронных траекторий.

2. Уменьшение этих углов наклона вблизи поверхности такой сетки магнитным полем на катоде возможно, если величина этого поля составляет несколько единиц тесла, но достичь таких больших значений магнитного поля на практике нельзя.

3. Уменьшение ширины перемычек КУС позволяет несколько уменьшить углы наклона электронных траекторий и исключить или уменьшить оседание электронов пучка на КУС.

4. Уменьшение диаметра АЭК позволяет существенно уменьшить углы наклона электронных траекторий и создать ЭОС для ЛБВ сантиметрового диапазона.

5. Применение лезвийного АЭК, у которого лезвия расположены посередине между кольцевыми перемычками управляющей сетки, позволяет резко снизить углы наклона электронных траекторий (в идеале до нуля) и в несколько раз уменьшить величину фокусирующего магнитного поля.

Литература

1. Spindt G. A. // J. Appl. Phys. 1968.V. 39. № 6. P. 3504—3505.
2. Пат. 1738013 РФ от 12.02.1993 г./ Григорьев Ю. А., Васильковский С. В., Шестеркин В. И., Ярцева З. А.
3. Petrosyan A. I., Morev S. P., Rogovin V. I. // Technical Digest of 12-th IVMC-99, Darmstadt, Germany. P. 213—216.
5. Король В. Н., Григорьев Ю. А. // Электроника и вакуумная техника: Приборы и устройства. Технология. Материалы: Матер. науч. техн. конф. молод. спец. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2004. С. 62—67.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

The simulation of TWTO electron-optical systems with field emission

A. I. Petrosyan, V. I. Rogovin

The Federal State Unitary Enterprise «Scientific-Industrial Enterprise “Almaz”», Saratov, Russia

The simulation of electron beams in TWTO electron-optical systems (EOS) with field emission is carried out. It is founded, that decreasing of partial field-emission cathode diameter diminishes the electron trajectories angles, caused by the disturbing effect of control grid with large meshes. It is shown, that the immersion of gun into straight magnetic field appreciably diminishes these angles in case, when the magnetic field value reaches several Tesla. The computer-aided design of EOS with field emission for I,J — band TWT is fulfilled. The simulation of EOS with blade field-emission cathode is realized.

УДК 637.534.7

Исследование ионно-оптических характеристик диэлектрических капилляров

A. С. Камышан, Ф. Ф. Комаров, А. Е. Лагутин

Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, г. Минск, Беларусь

Измерены угловые распределения протонов с энергией 240 кэВ, прошедших через стеклянные (боросиликатные) капилляры диаметром 0,1 и 0,5 мм, длиной 30, 65, 178 мм в диапазоне тока пучка протонов от $8,5 \cdot 10^{-13}$ до $5 \cdot 10^{-11}$ А при углах влета протонов относительно оси капилляра от $-0,20$ до $+0,20^\circ$. Форма угловых распределений протонов, прошедших через стеклянный капилляр длиной 65 мм, определена в значительной мере однократным рассеянием заряженных частиц внутренней поверхностью капилляра. Выявлено, что увеличение длины капилляра до 178 мм приводит к изменению формы угловых распределений, поскольку при этих размерах начинает сказываться влияние заряда внутренней поверхности капилляра.

Пучки заряженных частиц принадлежат к числу наиболее часто встречающихся объектов в современной науке и технике. Система транспортиров-

ки пучка представляет собой комбинацию линз и дрейфовых промежутков. Аберрации электронных и ионных оптических систем являются фундамен-