

Исследование механизма ионного нагружения острийных эмиттеров автоэмиссионных структур

© Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, А.Н. Якунин

Федеральное государственное унитарное предприятие НИИ „Волга“, Саратов

E-mail: gorfinkl@san.ru

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

E-mail: ANYakunin@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2006 г.

На основе использования построенной математической модели электронно-оптических процессов обнаружено значительное уменьшение ионного тока на микроострийные эмиттеры планарно-торцевых автоэмиссионных структур (ПТАС). Показано, что механизм уменьшения ионного тока связан с влиянием структуры электрического поля в системе электродов „катод-гейт-анод“, обеспечивающей наклон эквипотенциалей в прикатодной области. Преимущество по теплонагружению ионным током ПТАС по сравнению с традиционными структурами на основе катодов Спиндта превышает 10^5 раз, что обеспечивает их высокую долговечность, подтвержденную экспериментально.

PACS: 79.90.+b

В хорошо известной работе 1993 г. Генри Грея [1] проведен подробный анализ преимуществ появившегося незадолго до этого нового типа плоских вакуумных катодолуминесцентных дисплеев, реализующих физический принцип полевой эмиссии электронов [2]. Была предсказана исключительная перспективность данного направления разработки плоских дисплеев. Сохраняя все принципиально важные достоинства традиционных дисплеев на электронно-лучевой трубке (использование катодолуминесценции как одного из наиболее эффективных способов преобразования электрической энергии в световую; широкий угол обзора; высокое пространственное разрешение; широкий динамический диапазон изменения тока; минимальная температурная

чувствительность; малое время отклика), дисплеи на основе матричных структур микроострий (катод Спиндта) [1] обеспечивали целый ряд дополнительных преимуществ (предельно малую толщину дисплея; снижение энергопотребления; простоту $X-Y$ адресации пикселей; многократное резервирование эмиттеров за счет субпиксельных размеров микроострий; изготовление с минимальным числом технологических операций).

Несмотря на комплекс положительных качеств, приведенный выше, неожиданным и наиболее серьезным препятствием для использования дисплеев на основе автоэмиссионных структур оказалась крайне низкая долговечность [3,4]. В этой связи отмечена крайняя критичность автоэмиссионных структур по отношению к уровню вакуума в приборах. Причиной наблюдаемого на практике и предсказанного ранее в [5] эффекта называлось то, что работа микровакуумного электронного прибора при высоких ускоряющих потенциалах неизбежно должна сопровождаться ионизацией молекул остаточной атмосферы потоком ускоренных электронов и образованием ионного потока, бомбардирующего катодный узел с эмиттерами. Данная проблема достаточно хорошо изучена применительно к традиционным высоковольтным электровакуумным приборам [6], в которых линейные размеры эмиттеров варьируются от единиц до сотен миллиметров. Известны технические решения [6], когда для устранения бомбардировки ионным потоком эмиттера в его центральной части выполняется специальный канал.

Субмикронные размеры эмиттеров микровакуумных приборов, с одной стороны, и межэлектродные расстояния, отличающиеся по величине на 4 порядка, с другой стороны, определенным образом требуют изменения подходов к решению проблемы нагружения эмиттеров потоком ионов. Исследование закономерностей формирования электронных и ионных потоков в автоэмиссионных структурах является в данном случае актуальным и позволяет получить информацию, имеющую принципиальное значение для выявления путей повышения качества как электронно-оптических систем, так и микровакуумных приборов в целом. Поэтому целью настоящей работы явились построение модели электронно-оптических процессов в автоэмиссионных структурах, разработка соответствующего программного обеспечения, численное моделирование физических процессов в автоэмиссионных структурах и их экспериментальное обследование.

В математическом плане поставленная задача моделирования электронно-оптических процессов в автоэмиссионных структурах сводится к следующему:

— к последовательному решению в расчетной области уравнения Лапласа с граничными условиями первого рода [7], соответствующими заданным потенциалам катода, анода и управляющего электрода–„гейта“, для определения распределения поля электростатического потенциала и его напряженности;

— определению плотности распределения автоэмиссионного тока по поверхности эмиттера в соответствии с законом Фаулера–Нордгейма [8] и генерации макрочастиц автоэлектронов (расчет заряда и задание начальных условий по координатам и скоростям) [2];

— интегрированию уравнений движения макрочастиц автоэлектронов в найденном электрическом поле;

— построению модели генерации макрочастиц ионов на основе соотношения, связывающего длину свободного пробега электронов в среде с остаточной атмосферой с температурой и давлением паров остаточной атмосферы, а также функцией вероятности столкновений электронов с молекулами газов остаточной атмосферы [9];

— интегрированию уравнений движения макрочастиц ионов в найденном электрическом поле и расчету плотности токооседания и мощности теплонегрузки электродов автоэмиссионной структуры;

— для структур, в которых наблюдается эффект вторичной эмиссии [10] — построению модели генерации вторично-эмиссионных электронов и интегрированию уравнений их движения.

Разработан комплекс программ [11], реализующий алгоритмы конечно-элементного решения [12] приведенных выше задач. Топологические особенности автоэмиссионных структур, обусловленные разномасштабностью функциональных элементов, корректно учтены путем применения технологии построения адаптивных конечно-элементных моделей [13], использующих векторный критерий адаптации [14] симплек-элементов — вторую производную по направлению искомой полевой функции.

Приведенные на рис. 1 результаты анализа электронно-оптических процессов в автоэмиссионной структуре на основе катодов Спиндта получены при следующих геометрических параметрах: сферический радиус кривизны острия катода $0.025 \mu\text{m}$; высота катода вдоль оси OY — $1.0 \mu\text{m}$; диаметр основания катода вдоль оси OR — $1.0 \mu\text{m}$;

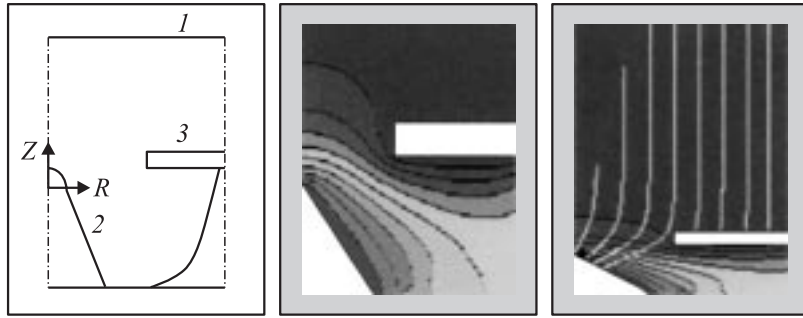


Рис. 1. Топология расчетной области (слева), эквипотенциали распределения электрического поля (в центре) и траектории макрочастиц электронного и ионного потоков (справа) в автоэмиссионной структуре на основе острижных катодов Спиндта: темная кривая соответствует траектории макрочастицы электронного потока, светлые — траекториям макрочастиц ионного потока. 1 — анод, 2 — эмиттер, 3 — гейт.

расстояние „управляющий гейт-электрод–анод“ — $200\ \mu\text{m}$; толщина гейт-электрода — $0.3\ \mu\text{m}$; диаметр отверстия гейт-электрода — $1.3\ \mu\text{m}$; потенциал катода — $0\ \text{V}$; потенциал гейт-электрода — $+120\ \text{V}$; потенциал анода — $+600\ \text{V}$; диаметр расчетной области — $2\ \mu\text{m}$.

Характер эквипотенциалей на рис. 1 свидетельствует о существовании расфокусирующей для электронного потока линзы в апертуре гейт-электрода. Для ионного потока такое распределение электрического поля, наоборот, является фокусирующим. Локальное сгущение эквипотенциалей вблизи основания катода является следствием влияния распределенного диэлектрического материала в зазоре „катод–управляющий электрод“. Но величина напряженности электрического поля в этой зоне существенно ниже, чем в зоне вблизи острия катода. Сгущение эквипотенциалей у острия катода приводит к эмиссии лишь с незначительной части острия, поток автоэмиссионных электронов в прикатодной области является узко направленным. Найдено, что сформированная структура электрического поля приводит к уменьшению первоначального углового разброса более чем в 4 раза.

Наибольший интерес представляет анализ траекторий ионов, их характер в прикатодной области и вдали от плоскости гейта различен. Практически во всей расчетной области траектории ионов прямолиней-

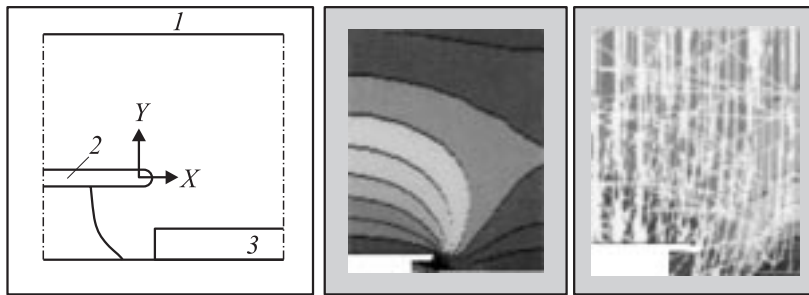


Рис. 2. Топология расчетной области (слева), эквипотенциали распределения электрического поля (в центре) и траектории макрочастиц электронного и ионного потоков (справа) в ПТАС на основе лезвийных катодов: темные кривые соответствуют траектории макрочастиц электронного потока, светлые — траекториям макрочастиц ионного потока. 1 — анод, 2 — эмиттер, 3 — гейт.

ны и направлены от анода к плоскости гейта. Но вблизи катода и „гейта“ наблюдается искривление траекторий в сторону острия. Этот эффект характерен для ионов с малой кинетической энергией, скорость которых не достаточна для преодоления потенциального барьера гейт-электрода. Тем не менее в итоге на эмиттирующую часть острия приходится 73% общей мощности ионного тока; на прилегающую к ней верхнюю часть конуса (по радиусу до $0.16 \mu\text{m}$) оседает еще 24%, остальные 3% приблизительно равномерно распределяются по поверхности гейт-электрода. Отношение максимальной удельной нагрузки на острие к максимальной удельной нагрузке на гейт при этом достигает 10^5 .

В качестве альтернативной в [15] предложена ПТАС, изготовление которой более технологично по сравнению со структурой на основе катодов Спиндта. Исследуемая ПТАС имеет цилиндрический радиус острия лезвийного эмиттера $0.025 \mu\text{m}$, расстояние между поверхностями катодного и анодного электродов — $200 \mu\text{m}$, период следования соседних катодов составляет $20 \mu\text{m}$, ширина катодных и гейт-электродов — $10 \mu\text{m}$.

Особенностью распределения электрического поля, как следует из анализа рис. 2, является существование между гейтом и анодом локально распределенного минимума потенциала типа „овраг“. Его наличие приводит к заметному усложнению траекторий движения ионов, которое проявляется в виде значительного числа траекторий,

К сравнению параметров автоэмиссионных структур двух типов

№ п/п	Наименование параметра	Катод Спиндта	ПТАС	Отношение параметров ПТАС к параметрам катода Спиндта	Обратное отношение
1	Площадь элементарного эмитирующего сегмента острия (пятно с угловым сегментом 40°), μm^2	$2.3 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
2	Эмитирующая площадь на один пиксель, μm^2	1.2	791.7	690	$1.5 \cdot 10^{-3}$
3	Плотность тока эмиссии, требуемая для обеспечения одинакового интегрального тока пиксела, а.е.	690.0	1.0	$1.5 \cdot 10^{-3}$	690.0
4	Удельная мощность теплонагружения эмиттера ионным током при эмиссии единичной плотности тока, а.е.	$1.2 \cdot 10^{-12}$	$5.0 \cdot 10^{-15}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	240.0
5	Удельная мощность теплонагружения эмиттера ионным током при эмиссии одинакового тока, а.е.	$8.3 \cdot 10^{-10}$	$5.0 \cdot 10^{-15}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^5$
6	Удельная мощность теплонагружения эмиттера ионным током при эмиссии одинакового тока (случай 20° эмитирующего сегмента), а.е.	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$1.0 \cdot 10^{-14}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^5$

направленных вдоль оси X . В первую очередь, это касается ионов с малой энергией, генерируемых в окрестности области „катод–гейт“. Ионы, зарождающиеся в области ближе к аноду, имеют близкие к прямолинейным классические траектории движения, которые наблюдались и в предыдущем случае для ионов с высокой энергией.

Из-за существенной асимметрии электрического поля в области „гейт–эмиттер–анод“ линза с выраженным фокусом отсутствует. Ионы приблизительно равномерно оседают на всю поверхность катодной пластины и в зазоре „гейт–катод“. Можно отметить лишь повышенный уровень ионной бомбардировки центральной части катодного электрода, но данная часть электрода имеет надежный теплоотвод по всей площади на подложку, что обеспечивает устойчивость ПТАС по отношению к отрицательному влиянию фактора ионной бомбардировки на работоспособность и долговечность прибора.

Сравнение автоэмиссионных структур обоих типов будет корректным в том случае, если ток автоэмиссии будет одинаковым. Исходя из этого, можно провести следующую оценку, результаты которой приведены в таблице. Таким образом, по сравнению со структурами на основе катодов Спиндта в ПТАС реализован механизм радикального (более чем в 10^5 раз) снижения удельной мощности теплонагружения автоэммиттеров ионным потоком за счет изменения структуры электрического поля в зоне формирования электронного потока, устраняющего эффект ионной фокусировки на эмиттере.

Экспериментальное сравнение временной зависимости токов эмиссии в катодолюминесцентных дисплеях на автоэмиссионных катодах Спиндта и ПТАС показало существенное различие в значениях эмиссионного тока. Спад тока в дисплеях с катодами Спиндта происходил быстрее по сравнению с дисплеями на катодах ПТАС более чем в 100 раз. Разработанный образец графического дисплея на ПТАС сохранял хорошую эмиссионную способность в течение 5000 ч.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17490).

Список литературы

- [1] *Gray H.F.* // Information Display. 1993. № 3. P. 9–14.
- [2] *Шимони К.* // Физическая электроника. М.: Энергия, 1977. 608 с.
- [3] *Беляев В.* // Электронные компоненты. 2002. № 1. С. 23–28.

- [4] *Шешин Е.П.* // Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд-во МФТИ, 2001. 288 с.
- [5] *Brodie I.* // IEEE Trans. Electron Dev. 1989. V. 36(11). P. 2641–2645.
- [6] *Алямовский И.В.* // Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 456 с.
- [7] *Михлин С.Г.* // Линейные уравнения в частных производных. М.: Высш. школа, 1977. 431 с.
- [8] *Fowler R.H., Nordheim L.W.* // Proc. Roy. Soc. 1928. A119. P. 173.
- [9] *Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В.* // Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ „Колледж“, 1996. 238 с.
- [10] *Бронштейн Л.С., Фрайман Б.С.* // Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1979. 407 с.
- [11] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Проблемы точной механики и управления. Саратов: ИПТМУ РАН, 2004. С. 135–142.
- [12] *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
- [13] *Якунин А.Н.* // Машинное проектирование в прикладной электродинамике и электронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ „Колледж“, 2001. С. 46–51.
- [14] *Якунин А.Н., Цой А.Н.* // Информационные технологии в науке, производстве и социальной сфере. Саратов: Научная книга, 2005. С. 83–88.
- [15] *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П.* // Патент на изобретение RU № 2162662 C1 7Н01 J 1/62, 29/18 с приор. от 23.02.1999 г.