

Аберрации, связанные с выходом пучка из средней плоскости, существенно влияют на разрешение. При значениях z_u и z'_u , не равных нулю, уменьшение разрешения связано прежде всего с искривлением линий изображения в плоскости кроссовера.

Заключение

Наблюдаемое искривление невозможно описать только аберрациями второго порядка, связанными с аберрационными коэффициентами A_{33} , A_{34} и A_{44} .

Несимметричность искривления границ изображения, соответствующих отрицательным и положительным значениям q_{cr} , и их симметрия по отношению к знаку z_{cr} приводят к следующему выводу. Это искривление должно описываться аберрациями более высокого порядка, которые

обусловлены слагаемыми, содержащими z_0 и z'_0 в четных степенях, а q_0 и q'_0 — в нечетных.

При регистрации ионов с помощью позиционного детектора можно уменьшить влияние аберраций, связанных с искривлением линий изображения, т.е. получить примерно такое же разрешение, как и при $z_u = z'_u = 0$.

Литература

1. Baisanov O. A., Doskeev G. A., Spivak-Lavrov I. F. Calculation of Mass-Spectrometer with Sector Magnet, Electrostatic Prism and Transaxial Lens//7-th Int. Conf. on Charged Particle Optics, Trinity College, Cambridge, England. Abstracts 24—28 July 2006. P. 108, 109.
2. Ishihara M., Kammei Y., Matsuda H. A high-performance mass spectrometer for very small size//Nuc. Instr. & Meth. in Phys. Res. 1995. V. 363 A. P. 440—444.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Aberration of mass-spectrometer with sector magnetic field and electrostatic prism system

O. A. Baisanov

Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

G. A. Doskeev, I. F. Spivak-Lavrov

Aktobe State University after name K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

In the work are considered the aberration and limiting the mass resolution of the achromatic mass spectrometer with sector homogeneous magnetic field and with electrostatic system consisting from immersion three-electrode prism and transaxial lens.

УДК 537.533

Проектирование разрядной ячейки ионного источника с полым холодным катодом

А. Н. Козлов, И. С. Гайдукова, Д. Э. Гринфельд, А. М. Филачев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Найдена эффективная ионно-оптическая система ионного источника с холодным катодом для формирования ионного пучка диаметром до 150 мм с неоднородностью плотности ионного тока не более 5 % и энергией ионов от 1 до 3 кВ. Такие параметры пучка позволяют проводить травление полупроводниковых материалов без радиационных повреждений и недопустимых тепловых нагрузок при плотности ионного тока до 1 мА/см². Методом компьютерного моделирования определены параметры ионного пучка на выходе из разрядной ячейки, гарантирующие требуемую однородность плотности ионного тока при мультиплицировании разрядных ячеек, а также геометрические размеры электродов, обеспечивающие эти параметры.

Введение

Низкоэнергетический ионный источник с холодным катодом для применения в установке ионного травления, входящий в технологическую линию по производству изделий микрофотоэлектроники, обычно построен по принципу мультиплицирования разрядных ячеек (рис. 1) [1]. Источники этого типа имеют принципиальные преимущества перед широко используемыми ионными источниками сеточного типа [2]. Выбор типа катода, а именно катода с холодной эмиссией, определяется требованием повышения продолжительности его жизни при работе в среде нейтральных и, особенно, реактивных газов.

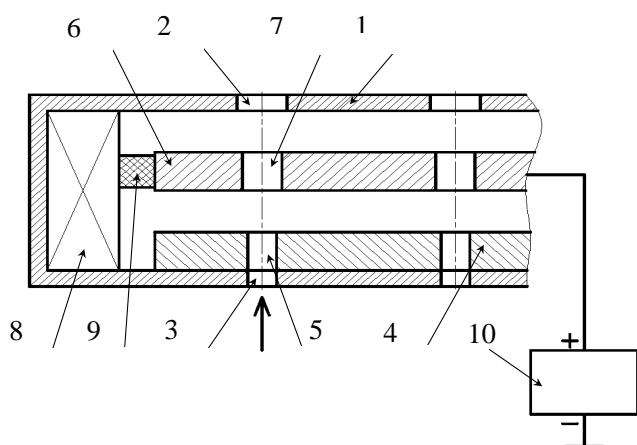


Рис. 1. Схема ионного источника:

- 1 — магнитопровод; 2 — отверстие в верхнем основании магнитопровода; 3 — отверстие в нижнем основании магнитопровода; 4 — катод; 5 — отверстие в катоде;
- 6 — анод; 7 — отверстие в аноде; 8 — соленоид;
- 9 — изолятор; 10 — источник питания

Исследование и разработка ионных источников относятся к одному из научных направлений, являющихся в значительной степени эмпирическими. Чаще всего теоретическое описание следует за разработкой и проведением экспериментальных исследований. В настоящее время, когда методы математического моделирования в электронной и ионной оптике широко применяются на стадии разработки приборов и устройств, имеется положительный опыт компьютерного моделирования области транспортировки ионного пучка [3], но нет достаточно адекватных компьютерных моделей области ионизации и формирования ионного пучка.

Постановка задачи

В данной работе предпринята попытка раздельного моделирования физических явлений, имеющих место в единичной разрядной ячейке

мультиплицированного ионного источника с холодным катодом, конструкция которого представлена на рис. 1.

С технологической точки зрения принципиально важным является требование высокой равномерности плотности ионного тока, неоднородность которого не должна превышать 5 % по всей плоскости мишени. Равномерность плотности ионного тока в поперечном сечении ионного пучка определяется углом расходимости пучка на выходе единичной разрядной ячейки, количеством мультиплицированных ячеек и положением обрабатываемой мишени относительно ионного источника.

В таблице представлены расчетные значения неоднородности тока в ионном пучке в зависимости от угла расходимости пучка единичной разрядной ячейки, расстояния до мишени и рабочего диаметра мишени для выбранной конструкции мультиплицированного ионного источника.

Расстояние до мишени H , мм	Неоднородность ионного тока по подложке, %, при разных углах расходимости пучка Θ_m , (град)		
	5	10	15
100	34,5	3,5	0,6
125	7,5	3,3	∅100 мм — 3,8 ∅150 мм — 5,2
150	7,0	3,12	∅100 мм — 0,1 ∅150 мм — 5,4

Для формирования пучка ионов диаметром 100 мм ионный источник должен иметь 37 гексагонально-расположенных разрядных ячеек, а для формирования пучка диаметром 200 мм — 139 ячеек. Из представленной таблицы видно, что требуемый уровень однородности плотности тока обеспечивается в том случае, если угол расходимости ионного пучка единичной разрядной ячейки равен порядка 10 град.

Далее определяются геометрические размеры элементов разрядной ячейки так, чтобы обеспечить как требуемый угол расходимости ионного пучка единичной ячейки, так и достаточно высокую величину разрядного тока.

Моделирование разрядной ячейки

Геометрию электродов разрядной ячейки определяли методом компьютерного моделирования в два этапа.

На первом этапе моделировался процесс формирования ионного пучка в разрядной ячейке (рис. 2). Угол расходимости ионного пучка на выходе

ячейки определяли по результатам расчета траекторий ионов между анодом и вторым катодом по программе MASIM 3D [4] с недавно разработанным модулем расчета магнитного поля [5].

Начальные скорости ионов полагали равными нулю, при этом энергия иона на выходе из разрядного промежутка определялась потенциалом электрического поля в точке ионизации нейтрального атома. Влияние магнитного поля на траектории ионов принималось во внимание, однако оно оказывалось весьма малым по сравнению с электростатической силой.

Результаты расчета показывают, что при диаметрах анодного отверстия 8 мм и выходного отверстия 10 мм угол расходимости ионного пучка имеет величину порядка 10 град., и таким образом может быть обеспечена заданная равномерность плотности ионного тока. При этом все ионы проходят через выходное отверстие, не распыляя материал электрода.

Вторая задача в конструировании разрядной ячейки, которая была решена авторами компьютерным моделированием, состояла в определении оптимальной конфигурации электродов в области ионизации. Расчет электрического и магнитного полей (рис. 3) показал, что в разрядном промежутке формируется электростатическая потенциальная ловушка, ограничивающая движение электронов в продольном направлении, в то время как уходу частиц в поперечном направлении на анод препятствует магнитное поле. Поскольку количество эмитированных холодным катодом электронов невелико, то получение требуемого разрядного тока требует многократного прохождения электрона через объем разрядной ячейки. Для этого необходимо создание такой конфигурации электрического и магнитного полей, чтобы электроны совершали как можно большее число колебаний, отражаясь от электростатических "пробок" до момента падения на анод.

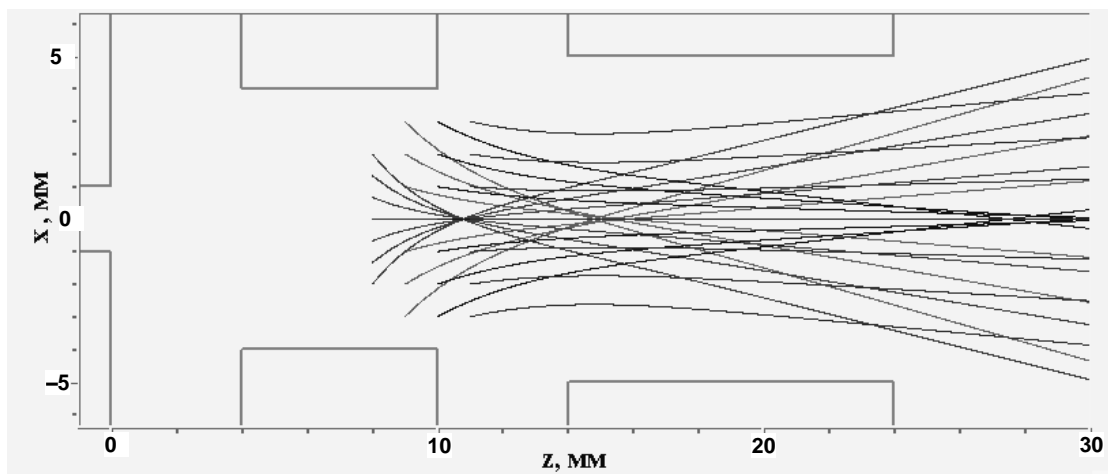


Рис. 2. Траектории ионов, вытягиваемых из плазмы одной разрядной ячейки

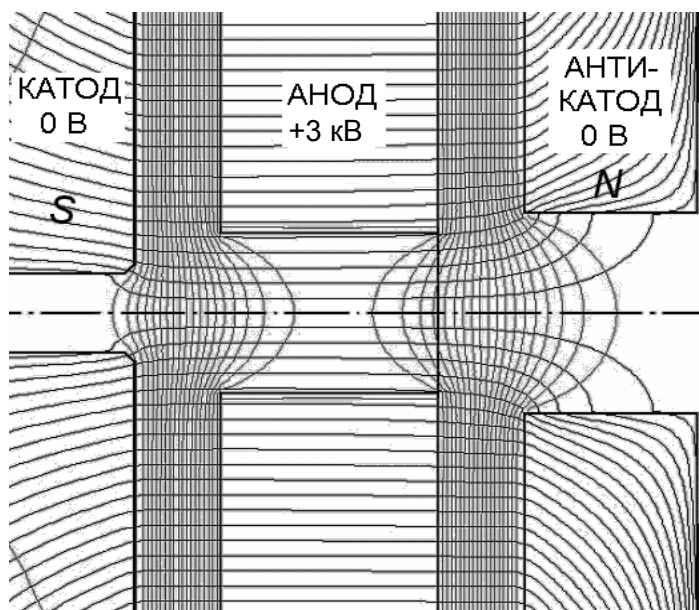


Рис. 3. Силовые линии магнитного поля и эквипотенциали электростатического поля в разрядной ячейке ионного источника

Геометрические параметры электродов разрядной ячейки (диаметр канала, толщина анодного электрода, расстояние катод—анод) определялись путем компьютерного моделирования электрического и магнитного полей и траекторий движения электронов в этих полях таким образом, чтобы обеспечить необходимый объем зоны ионизации и циклический характер движения электронов в ней.

Анализ результатов расчета траекторий в электростатическом поле разрядного промежутка показал, что наиболее критичной величиной является толщина анода: если она велика, то электроны, покинувшие катод, быстро садятся на анод, и ионизация газа мала. В противном случае малая ширина анода снижает объем области ионизации. Анод может быть выполнен монолитным или состоять из двух диафрагм, находящихся под одним положительным потенциалом. На основании проведенных расчетов были определены конструктивные размеры единичной разрядной ячейки.

Далее рассмотрим конструкцию полого катода. Возьмем случай, когда полый катод выполнен из

магнитного материала и одновременно служит полюсом магнитной системы. На рис. 4 и 5 представлены траектории движения вторичных электронов и распределение индукции магнитного поля вдоль оси разрядной ячейки для этого случая. Результаты расчетов показывают, что эмитированные плоской поверхностью катода электроны подходят довольно близко к аноду, но все же захватываются ловушкой и совершают несколько колебаний в продольном направлении. Однако электроны, эмитированные с поверхности полости катода, удерживаются гораздо хуже и в ходе колебательного движения уходят из разрядного промежутка, попадая в выходной пучок ионов. Этот эффект объясняется ослаблением магнитного поля в области полости катода и, соответственно, меньшей "замагниченностью" электронов, стартовавших со стенки углубления. Заряд ионного пучка в этом случае скомпенсирован, что принципиально важно при обработке диэлектрических материалов.

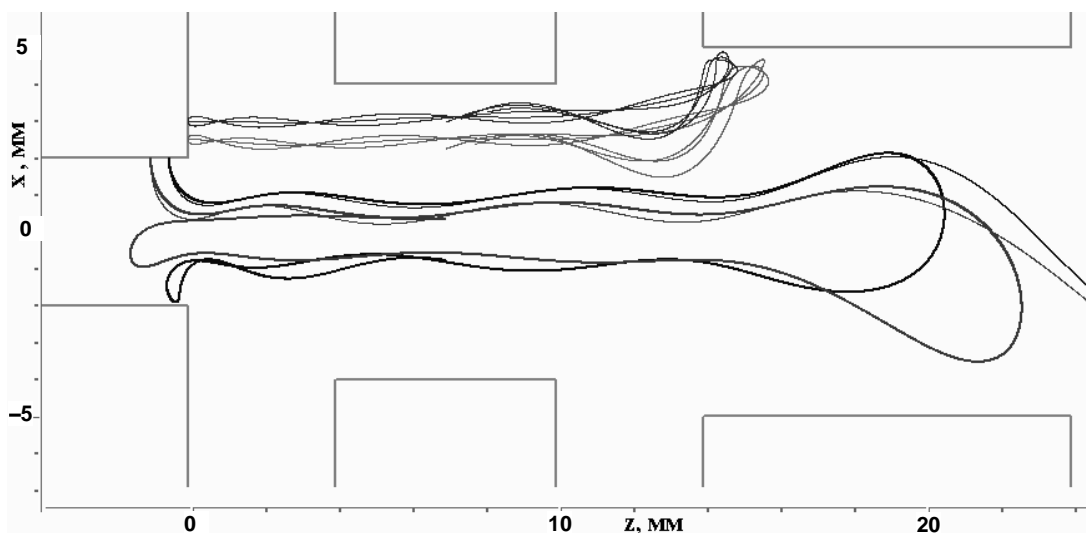


Рис. 4. Движение электронов в разрядном промежутке без магнитного поля в области полого катода. Полый катод с углублением 30 мм выполнен из магнитного материала. Возбуждение соленоида $J = 3000 \text{ А} \times \text{виток}$

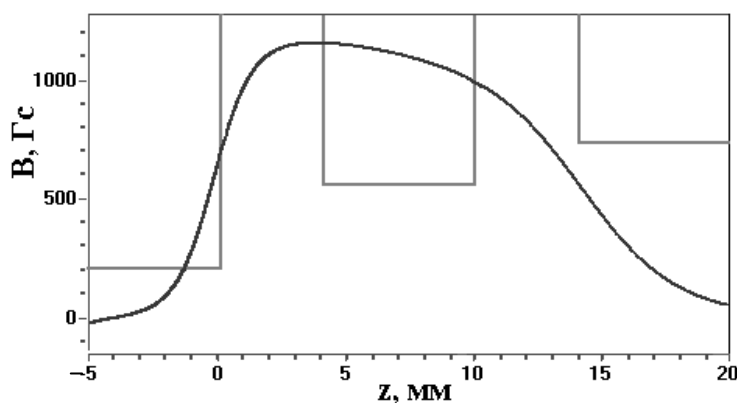


Рис. 5. Распределение напряженности магнитного поля вдоль оси разрядной ячейки для полого катода, выполненного из магнитного материала

Ситуация меняется, если функции катода и магнитопровода разделены. На рис. 6 показаны траектории электронов, которые эмитированы полым катодом, выполненным из немагнитного материала. Удержание электронов, стартующих со стенки углубления, значительно лучше, поскольку магнитное поле проникает в полость катода, как показано на рис. 7.

Компьютерное моделирование проводилось с помощью программного обеспечения, разработанного в НПО "Орион" [4, 5], которое включает в себя модули расчета электрических и магнитных полей с учетом влияния насыщения материала магнитопровода, пространственного заряда пучка,

и модуль расчета траекторий заряженных частиц и распределения плотности тока в пучках.

Заключение

По результатам моделирования процессов формирования электронных и ионных пучков в разрядной ячейке мультиплицированного ионного источника, разработана конструкция ионного источника, формирующего квазипараллельный пучок ионов с заданными геометрическими и энергетическими параметрами. Вид ионного источника со стороны вакуумной камеры представлен на рис. 8.

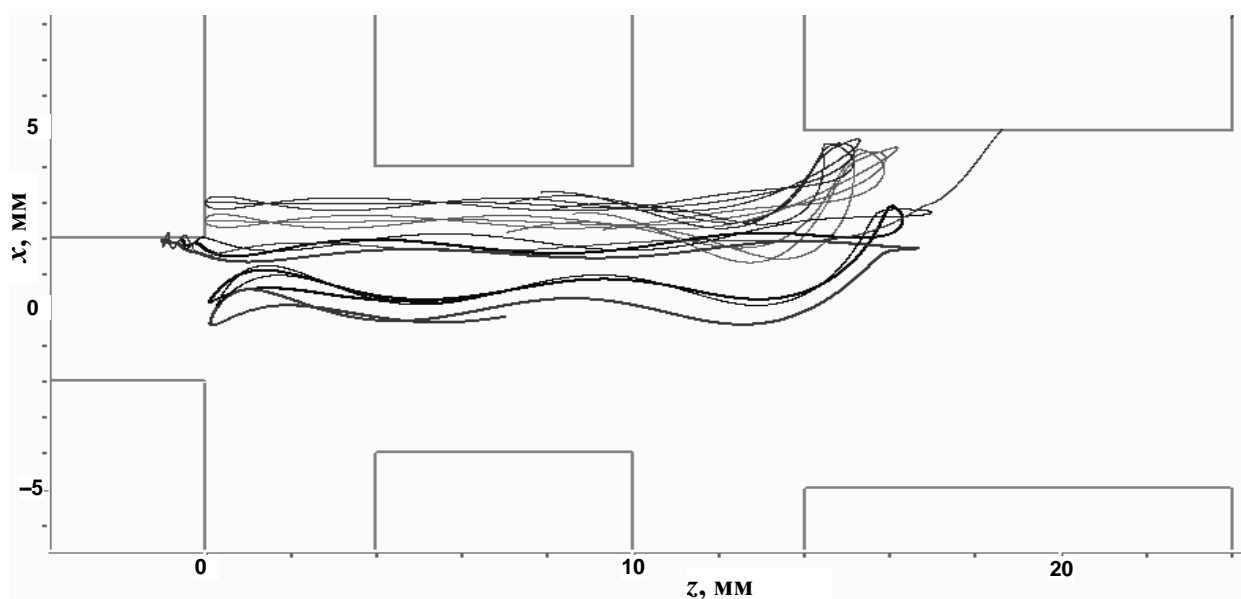


Рис. 6. Движение электронов в разрядном промежутке при наличии магнитного поля в области полого катода. Немагнитный полый катод. $J = 3000 \text{ А} \times \text{виток}$

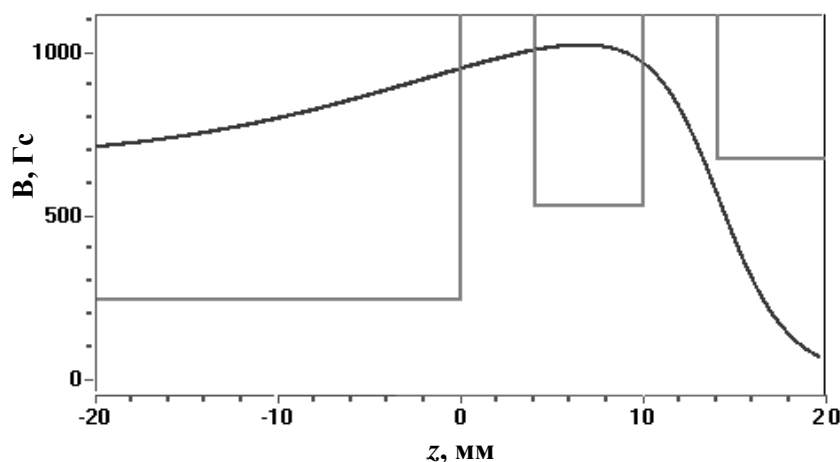


Рис. 7. Распределение напряженности магнитного поля вдоль оси разрядной ячейки для полого катода, выполненного из немагнитного материала



Рис. 8. Вид ионного источника со стороны вакуумной камеры

Ионный источник для установки ионно-лучевого травления полупроводниковых материалов обеспечивает следующие параметры ионного пучка:

диаметр ионного пучка в рабочей зоне, мм,	
не менее	150
плотность ионного тока, мА/см ²	0,1—1,0
ускоряющее напряжение ионного источника, кВ.....	1—3
неоднородность плотности ионного тока	
в рабочей зоне, %, не более.....	±5

Указанные параметры ионного пучка были подтверждены экспериментально. Измеренная неоднородность плотности тока по сечению пучка оказалась даже несколько ниже расчетной. Разработанный ионный источник применен в установке ионно-лучевого травления технологической линии по производству изделий микрофотоэлектроники на основе КРТ.

Л и т е р а т у р а

1. Козлов А. Н., Зайцев А. И., Даниловский А. Е., Филачев А. М. Особенности выбора ионных источников с холодным катодом для точной ионно-лучевой обработки полупроводниковых структур//Прикладная физика. 2006. № 3. С. 45—48.
2. Гончаров Л. А., Григорьян В. Г. Источники ионов для операций ионно-лучевой технологии//Там же. 2007. № 5. С. 67—70.
3. Физика и технология источников ионов: Пер. с англ./Под ред. Я. Брауна. — М.: Мир, 1998. С. 496.
4. Monastyrskiy M. A., Greenfield D. E., Tarasov V. A., MASIM 3D package for precise CPO calculations based on perturbation technique//Software Demonstrations Abstract Book, ‘CPO-7’ International Conference, Cambridge, UK, 2006. P. 23.
5. Грифельд Д. Э., Шуленок А. П. Гибридный метод расчета магнитных систем с насыщаемыми материалами//Междунар. конф. 8-й всероссийский семинар "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики": Тез. докл. — М. Май, 2007.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Design of the hollow cold cathode discharge cell for the ion source

A. N. Kozlov, I. S. Gaidoukova, D. E. Greenfield, A. M. Filachev
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The paper is devoted to some aspects of the cold-cathode ion sources design for generating wide low-energy and homogeneous ion beams, with the current density not-homogeneity over the beam cross-section not exceeding 5 % and the current value required for the needs of the technological process. The electron-optical properties of such ion sources are analyzed. Parameters of the ion beam generated by a single cell are optimized to achieve higher current homogeneity. The optimal electrode dimensions — the channel diameter, the anode width, and cathode-anode separation — were determined by means of computer simulation of electric and magnetic field and calculating the charged particle trajectories with the aim to increase volume of the ionization region with the oscillatory electron motion and guarantee required ion energy distribution.

* * *