

10;11;12

Управление распределением плотности тока по поверхности плазменного эмиттера большой площади

© В.Я. Мартенс, Е.Ф. Шевченко

Северо-Кавказский государственный технический университет,
Ставрополь
E-mail: vmartens@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 декабря 2010 г.

Предложен плазменный эмиттер большой площади, в котором возможно управление распределением плотности тока по поверхности эмиттера по двум координатам: радиусу и полярному углу. Управление осуществляется путем регулировки токов вспомогательного и основного разрядов угла наклона электродов составного анода и их потенциалов. Эмиттер прошел испытания на промышленной установке вакуумного напыления и был использован для ионной очистки подложек тонкопленочных микроплат.

В настоящее время вопросы совершенствования техники получения электронных и ионных пучков большого поперечного сечения не теряют актуальности в связи с ускоренным развитием микро- и нанотехнологий. Одним из основных параметров пучков большого сечения является распределение плотности тока по сечению пучка [1]. Во многих случаях для получения таких пучков используют плазменные эмиттеры большой площади в совокупности с простейшей плоскопараллельной ускоряющей системой, поэтому распределение плотности тока по сечению пучка определяется распределением плотности тока по поверхности эмиттера. В известных плазменных эмиттерах заряженных частиц большой площади, используемых для формирования пучков круглого сечения [1–4], управление распределением плотности тока по поверхности эмиттера осуществляется только по одной координате — по радиусу. В данной работе предложен плазменный эмиттер большой площади, в котором возможно управление распределением плотности тока по поверхности эмиттера по двум координатам. Поскольку эмиттер позволяет генерировать цилиндрический пучок заряженных частиц и

поперечное сечение пучка представляет собой круг, то для описания распределения плотности тока по поверхности эмиттера и по сечению пучка удобно использовать полярную систему координат с полюсом, расположенным в центре сечения. В предлагаемом эмиттере возможно управление распределением плотности тока по поверхности эмиттера по двум полярным координатам — и по радиусу, и по углу.

Эмиттер заряженных частиц (рис. 1) представляет собой двухступенчатую разрядную систему. В качестве вспомогательного разряда используется низковольтный отражательный разряд с полым катодом. Вспомогательный разряд возбуждается в разрядной камере, образованной полым катодом 1, анодом 2 и катодом-отражателем 3. Магнитное поле ~ 80 мТ в разрядной камере создается постоянным кольцевым магнитом 4. Эмитирующая плазма генерируется основным объемным разрядом, который инициируется и поддерживается заряженными частицами, инжектируемыми в него из плазмы вспомогательного разряда через отверстие диаметром 4 мм в катод-отражателе. Разрядная камера основного разряда образована катодом-отражателем 3, формирователем 5 (полый цилиндр с внутренним диаметром 300 мм и высотой 130 мм), эмиссионным электродом 6 (стальная сетка с ячейками 2×2 мм, диаметр проволоки 0.2 мм) и анодом 7. Возможность управления распределением плотности тока по поверхности эмиттера по двум координатам обеспечивается за счет конструктивных особенностей анода 7 основного разряда. Он представляет собой кольцо, состоящее из нескольких (в данном случае четырех) одинаковых электрически изолированных электродов, образованных в результате рассечения по образующим полого усеченного конуса, обращенного торцом меньшего диаметра (70 мм) в сторону отверстия в катод-отражателе. Электроды размещены на изоляторе с возможностью изменения их угла наклона к оси эмиттера от 60° до 90° . Электрическое питание изолированных электродов, образующих составной анод, может осуществляться либо от различных источников питания, либо от одного источника путем подключения электродов к источнику через переменные резисторы.

Распределение плотности тока по поверхности эмиттера зависит: 1) от соотношения между токами вспомогательного и основного разрядов, 2) от углов наклона электродов составного анода 7 к оси эмиттера, 3) от распределения тока основного разряда по электродам составного анода. При изменении соотношения между токами вспомогательного и основного разрядов изменяется соотношение между концентрациями

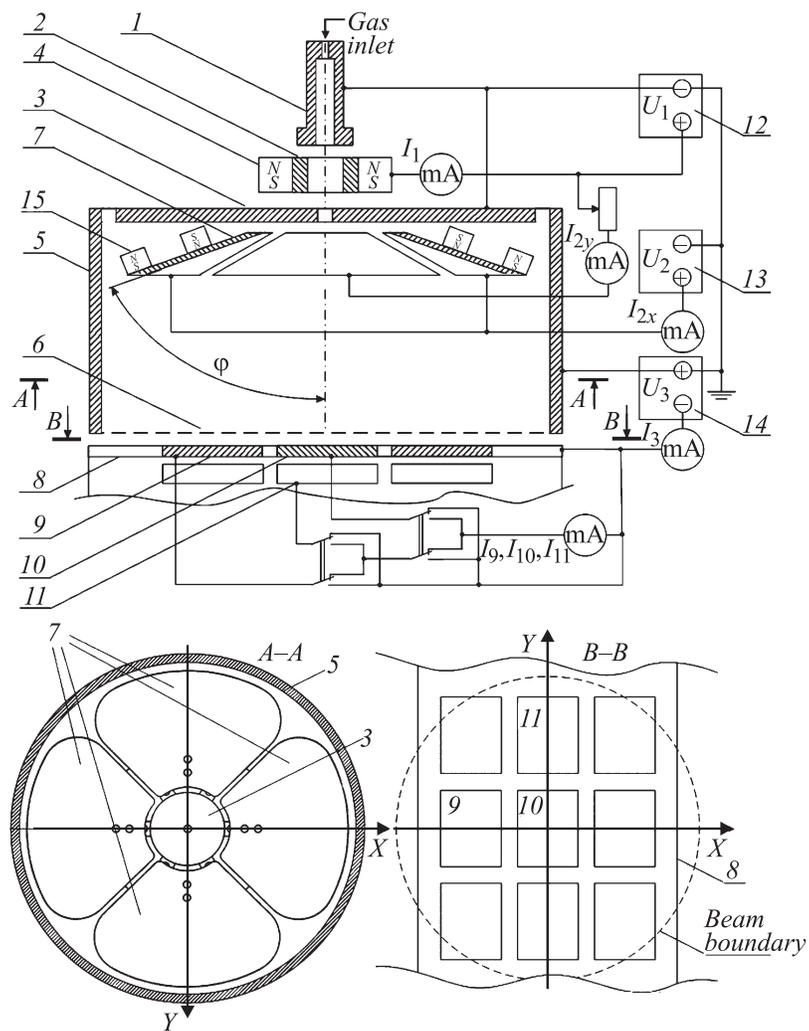


Рис. 1. Схема испытаний плазменного эмиттера заряженных частиц: 1 — полый катод, 2 — анод вспомогательного разряда, 3 — катод-отражатель, 4 — кольцевой магнит, 5 — формирователь, 6 — эмиссионный электрод, 7 — составной анод основного разряда, 8 — карусель-подложкодержатель, 9–11 — подложки-зонды, 12–14 — источники электропитания, 15 — магниты.

эмитирующей плазмы на оси, вдоль которой осуществляется инжекция заряженных частиц из вспомогательного разряда, и на периферии, где интенсивность ионизационных процессов определяется в основном током основного разряда. Изменяя углы наклона электродов составного анода к оси эмиттера, мы тем самым изменяем в радиальном направлении размеры области, в которой генерируется эмитирующая плазма. С учетом разлета заряженных частиц в осевом и радиальном направлениях это в свою очередь приведет к изменению радиального распределения плотности плазмы вблизи эмиссионного электрода. При равномерном распределении тока основного разряда по электродам составного анода и одинаковом угле наклона всех электродов составного анода к оси эмиттера можно управлять только радиальным распределением плотности тока по поверхности эмиттера за счет изменения первых двух указанных выше параметров. Это позволяет эффективно формировать пучки только с круглым сечением и симметричным относительно оси распределением плотности тока. Изменение распределения тока основного разряда по электродам составного анода позволяет осуществлять управление распределением плотности тока по поверхности эмиттера и по второй координате — по полярному углу. Плотность эмитирующей плазмы максимальна для полярного угла, соответствующего положению электрода, на который замыкается максимальная доля общего разрядного тока.

Возможность управления распределением плотности тока по поверхности эмиттера по двум координатам существенно расширяет его технологические возможности. Например, для обработки деталей на движущихся держателях (карусели, конвейеры, поворотные столы и т.д.) и деталей с некруглой формой поверхности, включая топологические рисунки микроплат, требуются пучки с прямоугольным и некруглым поперечным сечением. В этих случаях для приведения в соответствие формы детали и формы эмиссионной поверхности часть эмиссионного электрода перекрывают непрозрачными пластинами. Потери заряженных частиц на этих непрозрачных участках эмиссионного электрода можно заметно снизить за счет управления параметрами эмитирующей плазмы по двум полярным координатам. Это позволяет сохранить достаточно высокую энергетическую эффективность при использовании одного и того же эмиттера для обработки объектов различной конфигурации. Кроме того, с помощью предлагаемого эмиттера возможно формирование пучков с несимметричным относительно оси

Управление распределением за счет регулировки токов I_1 и I_2

I_1, A	I_2, A	I_{10}/I_9
0.4	0.3	1.9
0.48	0.3	1.0
0.48	0.8	0.7

распределением плотности тока, что дает возможность при необходимости одновременно обрабатывать различные участки объекта разными дозами при несимметричном расположении этих участков относительно оси.

Испытания плазменного эмиттера проводились на установке вакуумного напыления УВН-75. Эмиттер испытывался в режиме эмиссии ионов, поэтому эмиссионный электрод, так же как и формирователь находились под потенциалом катодов разрядной камеры. Для независимого электрического питания электродов составного анода 7 два из них, расположенные вдоль оси y , подключались через переменный резистор к источнику питания 12 (рис.1), а два других электрода, расположенные вдоль оси x , — к отдельному источнику питания 13. Для измерения распределения плотности тока по поверхности эмиттера использовалась карусель-подложкодержатель 8. В посадочные места для подложек устанавливались медные пластины размерами 60×48 mm (рис. 1, сечение $B-B$). Пластины 9, 10, 11 исполняли роль зондов, поэтому они электрически изолировались от подложкодержателя. По соотношению ионных токов I_9, I_{10}, I_{11} на эти зонды можно было судить о характере распределения плотности тока по поверхности эмиттера. Ускоряющее для ионов напряжение $U_3 = 560$ V подавалось от источника электрического питания 14. В качестве рабочего газа использовался воздух, расход газа — $2.8 \text{ m}^3 \cdot \text{mPa/s}$. Давление в вакуумной камере в процессе всех испытаний составляло 20 mPa.

Результаты экспериментов по управлению распределением плотности тока по поверхности эмиттера за счет изменения соотношения между токами вспомогательного I_1 и основного I_2 разрядов при угле $\varphi = 60^\circ$ представлены в таблице. Ионные токи на пластины 9 и 10 составляли величину порядка нескольких mA. Как видно из этих результатов, возможно получение симметричных относительно оси распределений как с максимумом, так и с минимумом в центре эмиттера.

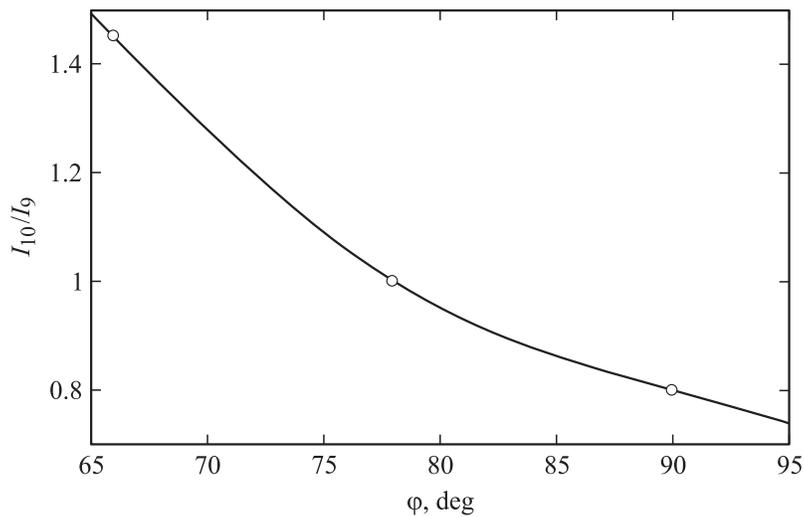


Рис. 2. Управление радиальным распределением плотности тока по поверхности эмиттера за счет изменения угла наклона электродов 7. Ток вспомогательного разряда $I_1 = 200$ мА, $I_{2x} = I_{2y} = 300$ мА ($I_2 = 600$ мА), I_9 — ток на боковой зонд 9, I_{10} — ток на центральный зонд 10.

При изменении угла наклона электродов 7 радиальное распределение плотности тока менялось (рис. 2) от распределения с максимумом ($I_{10}/I_9 > 1$ при $\varphi < 78^\circ$) до распределения с минимумом ($I_{10}/I_9 < 1$ при $\varphi > 78^\circ$) в центре эмиттера.

Эксперименты по управлению распределением плотности тока эмиссии по полярному углу показали (рис. 3), что при изменении распределения тока основного разряда по электродам 7 (изменялось отношение токов I_{2y}/I_{2x} , где I_{2x} — ток на электроды 7, расположенные вдоль оси x , а I_{2y} — ток на электроды 7, расположенные вдоль оси y) соответствующим образом изменялось отношение токов на боковые зонды 11 и 9 — I_{11}/I_9 .

Эффективность управления распределением плотности тока по поверхности в предлагаемом эмиттере может быть увеличена за счет установки на всех электродах 7 или на некоторых из них постоянных магнитов 15, создающих периферийное многополюсное магнитное поле

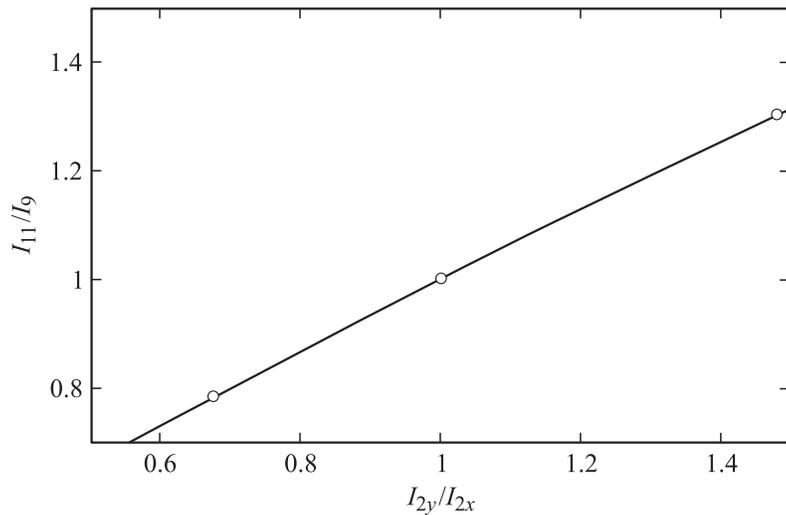


Рис. 3. Управление распределением плотности тока по полярному углу за счет изменения распределения тока основного разряда по электродам 7. Ток вспомогательного разряда $I_1 = 200$ мА, $\varphi = 78^\circ$, $I_{2x} + I_{2y} = 670$ мА. I_{11} — ток на боковой зонд 11, I_9 — ток на боковой зонд 9.

вблизи поверхности этих электродов. Известно [5], что такое поле за счет частичного отражения электронов от анода и увеличения времени жизни электронов в разряде повышает плотность газоразрядной плазмы. В предлагаемом эмиттере, как показали испытания, это приводит к росту плотности эмиттирующей плазмы для тех полярных углов, которые соответствуют положению электродов 7 с магнитами 15, и соответственно к росту плотности тока эмиссии в среднем на 10% для этих полярных углов. Кроме того, это приводит к увеличению в целом энергетической эффективности эмиттера.

Технологические возможности предлагаемого плазменного эмиттера заряженных частиц были продемонстрированы при финишной ионной очистке подложек микроплат из поликора размером 60×48 мм, которые устанавливались на карусели установки УВН-75 по 3 в ряд. Эта технологическая операция проводилась ионным пучком прямоугольного поперечного сечения размерами 220×60 мм. При этом на сетку 6

накладывалась стальная пластина с окном соответствующего размера. За счет управления распределением плотности тока по полярному углу и радиусу на этой площади была обеспечена равномерная эмиссия ионов (неравномерность не превышала $\pm 10\%$), а также существенно уменьшены потери ионов на непрозрачном участке эмиссионного электрода (стальной пластине). При этом электроды 7 устанавливались под углом $\varphi = 70^\circ$, ток вспомогательного разряда составлял 150 мА, токи на пары противоположных электродов 7 составляли 150 и 350 мА, ток эмиссии ионов — 50 мА. Как показали измерения, в результате использования в технологическом процессе ионной очистки адгезионная прочность функциональных тонкопленочных слоев микроплат повышалась в 2–2.5 раза.

Список литературы

- [1] Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983. С. 25–33.
- [3] Источник заряженных частиц с плазменным эмиттером. Екатеринбург: УИФ „Наука“, 1993. С. 52–56.
- [4] Никулин С.П., Чичигин Д.Ф., Третников П.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 9. С. 39–43.
- [5] Лимпехер, Мак-Кензи // Приборы для научных иссл. 1973. № 6. С. 56–63.