

УДК 621.762:678.546

МИНИАТЮРНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ НЕЙТРАЛИЗАТОРОМ КЛАН-10М

© 2019 г. М. С. Михайленко^{1, *}, А. Е. Пестов^{1, **}, Н. И. Чхало¹, Л. А. Гончаров²

¹Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

²НТК “Платар”, 125993 Москва, Россия

*E-mail: mikhaylenko@ipmras.ru

**E-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 20.01.2018 г.

После доработки 20.01.2018 г.

Принята к публикации 20.01.2018 г.

Приведены результаты тестирования нового миниатюрного источника ускоренных ионов КЛАН-10М с плазменным нейтрализатором: изучены режимы работы источника, измерены зависимости диаметра ионного пучка и распределения ионного тока вдоль поверхности выходной апертуры от расстояния. При диаметре выходной апертуры 7 мм (плоская ионная оптика) плотность ионного тока составляет 10.4 мА/см², что при малой расходимости пучка (~15%) дает возможность проводить прецизионную коррекцию локальных ошибок формы поверхности оптических элементов. Изучена работа плазменного нейтрализатора, результирующий электронный ток которого, при данной конструкции, обеспечивает не полную компенсацию пространственного заряда в пучке (ток нейтрализатора в 10 раз меньше тока ионов).

Ключевые слова: источник типа Кауфман, плазменный нейтрализатор, ионное травление, ионная полировка, ионный источник.

DOI: 10.1134/S0207352819030144

ВВЕДЕНИЕ

Ионные источники широко применяются для решения ряда задач в области современных технологий (таких как нанoeлектроника, машиностроение и приборостроение), находят применение в лабораториях, например для изучения структуры или состава материала (метод ВИМС [1]) и в других приложениях [2, 3]. Преимуществами данной технологии являются высокая эффективность и относительно простое внедрение. Эффект распыления при облучении поверхности ионными пучками килоэлектронвольтных энергий успешно применяется для планаризации рельефа [4], содержащего как микроразмерные, так и атомно-размерные неоднородности. Однако сейчас для решения ряда задач космической астрономии, микро- и нанoeлектроники, оптики коротковолнового диапазона длин волн необходимо, чтобы гладкость поверхности достигала нано- и субнаноразмерного уровня. Кроме того, процессы ионного травления всегда сопровождаются образованием радиационных дефектов, которые подразделяются на дефекты смещения, связанные со смещением атомов в решетке материала и образованием вакансий (дефекты по Френкелю и по Шоттки), и ионизационные дефекты, обусловленные ионизацией атомов решетки [5]. По-

этому с целью минимизации повреждений в образцах, вызванных облучением, энергия бомбардирующих ионов должна быть снижена до приемлемого уровня (менее 1 кэВ), также необходим дополнительный источник электронов для нейтрализации объемного заряда ионного пучка при работе с диэлектрическими материалами.

В ИФМ РАН активно развиваются ионно-пучковые методы обработки, в первую очередь, оптических поверхностей: достигнуты результаты мирового уровня, обеспечивающие эффективную шероховатость σ_{eff} в диапазоне пространственных частот $q = 0.025\text{--}100 \text{ мкм}^{-1}$ на уровне 0.3 нм для ситалла, Zerodur [6] и до 0.14 нм для плавленого кварца [7]. Получены атомарно-гладкие поверхности аморфного кремния и углерода [8, 9], разработаны алгоритмы коррекции локальных ошибок формы и асферизации поверхности [10–12], которые позволяют изготавливать оптику дифракционного качества для ультрафиолетового, вакуумного и экстремального ультрафиолетового диапазона электромагнитного излучения [13, 14].

Для проведения прецизионной безмасочной коррекции локальных ошибок формы поверхности оптических элементов необходимо формирование миниатюрного ионного пучка с гауссовым распределением ионного тока [15]. Уменьшение

Таблица 1. Характеристики КЛАН-10М

Тип источника	Кауфман
Ионно-оптическая система (ИОС)	Плоская
Рабочие газы	Инертные
Расход газа, нсм ³ /мин	0.1–0.2
Рабочие давления, Па	$(1–5) \times 10^{-3}$
Выходная апертура, мм	Круг $\varnothing 7$
Максимальный ионный ток, мА	4
Энергия ионов, эВ	100–1500
Разброс энергий, эВ	± 3
Плотность ионного тока, мА/см ²	10.4
Охлаждение	Водяное
Напряжение разряда, В	35–70
Тип источника	Кауфман

размера пучка ускоренных ионов позволяет повысить точность процедуры коррекции за счет увеличения максимальной пространственной частоты, доступной для обработки [16]. До настоящего времени для процедуры коррекции формы применялся ионный источник с выходной апертурой $\varnothing 50$ мм, холодным катодом и фокусировкой ионного пучка за счет ионно-оптической системы (ИОС), состоящей из двух сколлимированных вогнутых сферических сеток [17]. Размер ионного пучка на поверхности обрабатываемой детали задавался за счет сменных водоохлаждаемых диафрагм и изменялся в пределах $\varnothing 1–15$ мм. Однако ионно-оптическая система обеспечивает сжатие ионного пучка до 20 мм в диаметре на полувысоте на расстоянии 70 мм от выходной апертуры.

Таким образом, источник позволяет получить максимальную плотность тока на уровне 4.5 мА/см² при токе ионного пучка 20 мА. Основными недостатками этого подхода являются следующие. Во-первых, плотность тока не велика и при использовании малоразмерной диафрагмы приводит к тому, что время обработки габаритных оптиче-

ских элементов оказывается чрезмерно большим. Во-вторых, в процессе работы источника происходит непрерывное распыление краев диафрагмы, продукты эрозии которой загрязняют поверхность. Вследствие чего, необходима регулярная чистка источника и замена диафрагм. Например, время непрерывной работы КЛАН-53М (НТК “Платар”) с использованием диафрагм составляет 50–100 ч, в то время как без них – порядка 1000 ч. В-третьих, эффективность использования источника очень низкая. Из 20 мА тока пучка зачастую используется 1/10–1/100 часть. Помимо уже отмеченного уменьшения ресурса работы источника, это приводит к дополнительному нагреву элементов конструкции и загрязнению других элементов установки. Все эти факторы отрицательно сказываются на производительности, а главное на точности обработки оптических деталей.

Поэтому одной из ключевых задач для совершенствования методов ионно-пучковой коррекции локальных ошибок является разработка ионных источников нового поколения, обладающих большей плотностью тока и меньшими размерами пучка. В данной работе описывается источник нового поколения, который в большей степени, чем предшественники, удовлетворяет требованиям. Приводятся результаты тестирования его основных характеристик.

ОПИСАНИЕ ИОННОГО ИСТОЧНИКА КЛАН-10М С ПЛАЗМЕННЫМ НЕЙТРАЛИЗАТОРОМ

В связи с необходимостью повышения плотности ионного тока для увеличения скорости травления и уменьшения загрязнения поверхности за счет распыления краев диафрагмы и продуктов эрозии нити накаливаемого нейтрализатора совместно с НТК “Платар” [18] был разработан ионный источник (ИИ) КЛАН-10М с плазменным нейтрализатором (ПН) КЛАН-10М. Это источник типа Кауфман с холодным катодом, характеристики которого представлены в табл. 1.

Источник ионов, фотография которого приведена на рис. 1, включает в себя следующие основные узлы: газоразрядная камера (ГРК), ИОС – плоская двухсеточная из титана, плазменный нейтрализатор, кожух и монтажный вакуумный фланец. Плазменный нейтрализатор установлен на монтажном фланце снаружи корпуса ионного источника, как показано на фотографии (рис. 1). Схема источника ионов с плазменным нейтрализатором приведена на рис. 2. Плазменный нейтрализатор включает в себя напуск газа, нить накала (1) и корпус-анод (3) с выходным отверстием. Внутри корпуса установлен тепловой экран (2). Использование теплового экрана позволяет обеспечить фиксированное расстояние в межэлектродном зазоре оптики, что увеличивает время работы источников за счет уменьшения боковой утечки в данном зазоре, а также исключает

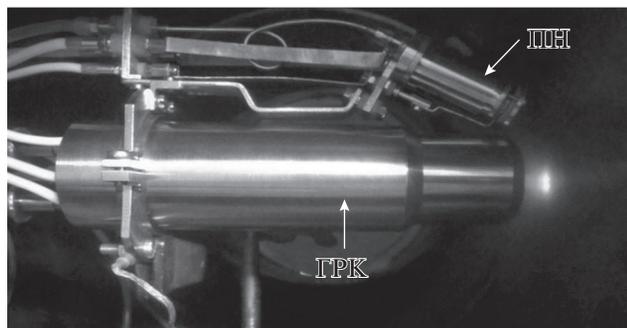


Рис. 1. Фотография источника ускоренных ионов КЛАН-10М.

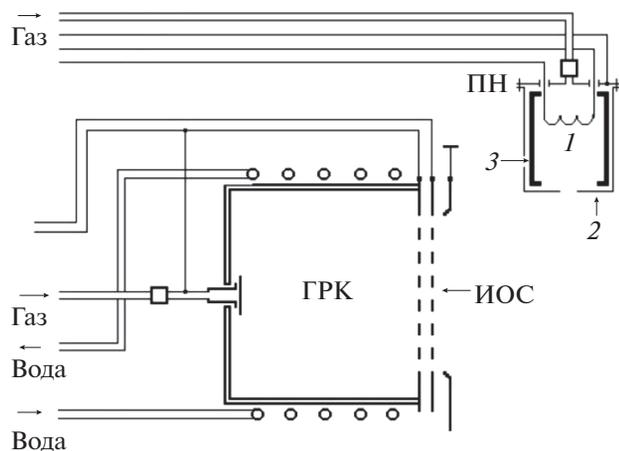


Рис. 2. Схема ИИ КЛАН-10М.

воздействие высоких температур и высокого напряжения на электроды ИОС, вследствие чего они не деформируются. Как результат, увеличивается срок эксплуатации источников ионов и повышается их производительность.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперименты проводились на стенде, подробно описанном в работе [19]. Схема эксперимента приведена на рис. 3 и включает в себя вакуумную камеру (1), внутри которой установлен предметный стол (2) с закрепленным на нем цилиндром Фарадея (3), ионный источник (4) закреплен на линейной моторизованной подвижке с шаговым двигателем, обеспечивающий перемещение источника вдоль оси пучка. На выходе источника установлена вращающаяся заслонка (5), перекрывающая ионный пучок, и одновременно являющаяся измерителем ионного тока при разгоне источника. Над источником установлен плазменный нейтрализатор. Источник ионов и нейтрализатор подключены к блокам управления и питания (6). Система откачки состоит из форвакуумного и турбомолекулярного насосов, которые обеспечивают предельное остаточное давление в рабочей камере 5×10^{-5} Па. Для измерения давления в камере использовались две вакуумные лампы (одна термоманометрического типа, другая магнетронная).

Настройка и измерение характеристик ионного пучка осуществлялись следующим образом. Первоначально определялось положение центра пучка. Для этого измерялось сечение пучка ионов вдоль апертуры источника, примеры которых в зависимости от расстояния от выходной апертуры приведены на рис. 4. Измерения проводились с помощью цилиндра Фарадея с входной апертурой 1 мм.

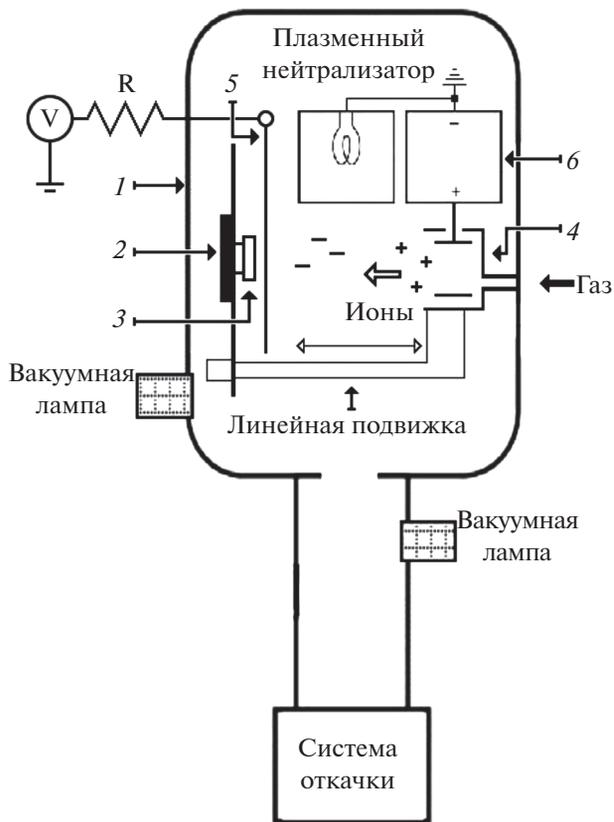


Рис. 3. Схема экспериментального стенда.

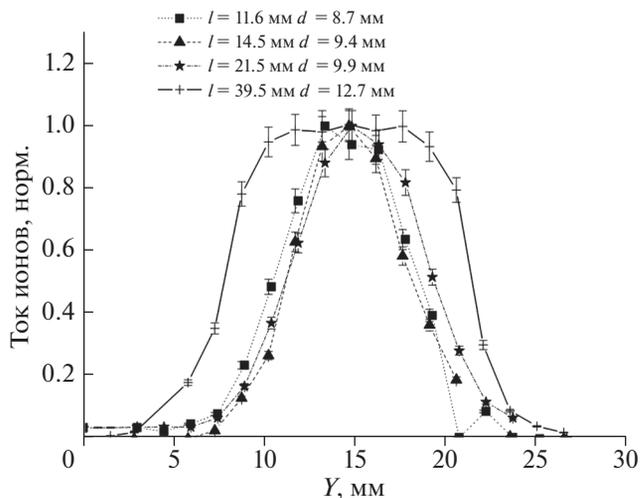


Рис. 4. Пространственное распределение тока пучка при различных расстояниях от источника. Параметры экспериментов: газ — Ar, $E_{\text{ион}} = 1000$ эВ, $I_{\text{ион}} = 2$ мА. Ось Y перпендикулярна оси пучка, l — расстояние от источника, d — значение диаметра пучка на полувысоте.

На расстояниях до 35 мм от источника до измерителя полуширина пучка остается практически неизменной (уширение на уровне 15%), что

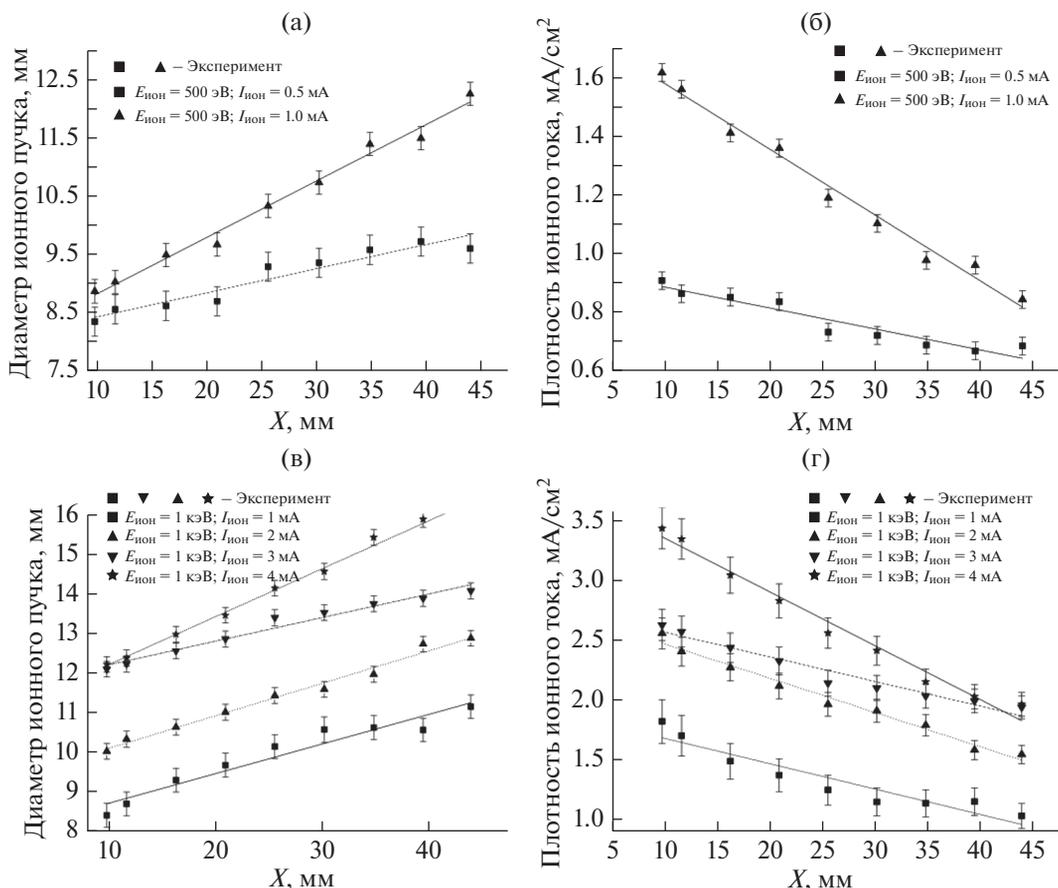


Рис. 5. Зависимости диаметра пучка на полувысоте (а), (в) и плотности ионного тока (б), (г) от расстояния между источником и измерителем. Параметры экспериментов: газ – Ar, $E_{\text{ион}} = 500\text{--}1000$ эВ, $I_{\text{ион}} = 0.5\text{--}4$ мА, $p = (1\text{--}8) \times 10^{-3}$ Па. Направление X лежит на оси пучка.

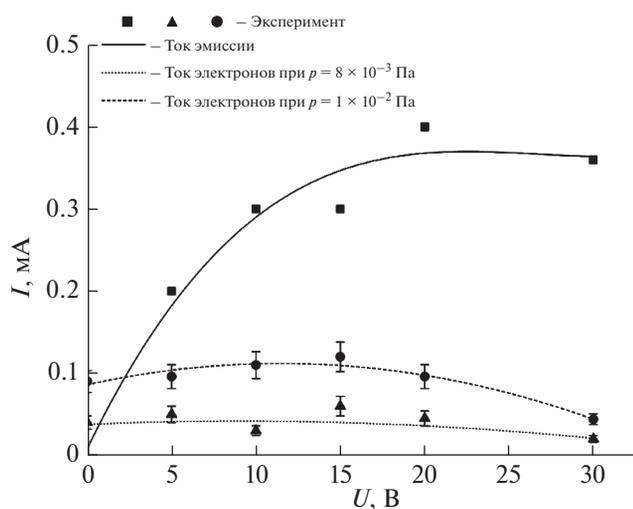


Рис. 6. Зависимости электронных токов от вытягивающего напряжения плазменного нейтрализатора. Приведенные давления соответствуют значениям в вакуумной камере. Параметры экспериментов: газ – Ar, ионный источник – выключен.

говорит о хорошо сколлимированных между собой сетках. Малая расходимость пучка ионов КЛАН-10М позволяет проводить безмасочную коррекцию формы поверхности сканированием по поверхности подложки [10]. На рис. 5 показаны зависимости размеров диаметра пучка на полувысоте (5а, в) и плотности ионного тока (5б, г) от расстояния между источником и цилиндром Фарадея при различных значениях ускоряющего напряжения и ионного тока.

Измерения проводились при различных режимах работы источника ионов. На рис. 5 приведены зависимости только для двух значений ускоряющих смещений ($U_{\text{уск}} = 500$ и 1000 В, при значениях ионного тока ($I_{\text{ион}} = 0.5, 1, 2, 3$ и 4 мА) соответственно. Из полученных зависимостей видно, что и диаметр, и плотность тока линейно меняются с расстоянием до источника. Используя полученные размеры можно рассчитать диапазон значений пространственной частоты q , доступный для обработки поверхностей, не прибегая к использованию специальных малоразмерных диафрагм. Полученная область лежит в пределах:

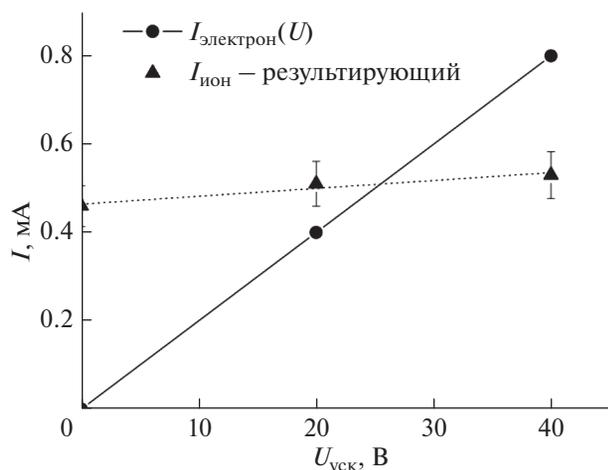


Рис. 7. Зависимости электронного тока и тока ионов (в области пересечения пучков) от вытягивающего напряжения плазменного нейтрализатора. Параметры экспериментов: газ — Ag, ионный источник — включен.

от 2.6×10^{-5} до 1.2×10^{-3} мкм⁻¹. Из чего следует возможность применения данного источника для работы как с достаточно большими, так и с миниатюрными поверхностями практически любой формы.

Изучение работы нейтрализатора проводилось с помощью того же цилиндра Фарадея (только с входной апертурой большей диаметра пучка электронов на выходе плазменного нейтрализатора). Измерялся электронный ток, выдаваемый нейтрализатором в месте пересечения пучков электронов и положительно заряженных ионов при различных параметрах. Измерения проводились для двух случаев: 1) источник ионов выключен; 2) источник ионов включен.

Результаты испытаний плазменного нейтрализатора при выключенном источнике ионов приведены на рис. 6, где верхняя кривая показывает зависимость тока эмиссии от вытягивающего напряжения (задаваемого на блоке смещения), а нижние — измеренные значения. Из рисунка видно, что максимальный электронный ток, эмитированный нейтрализатором в области пересечения пучков ионного источника и плазменного нейтрализатора составил 0.12 мА, что на порядок меньше необходимого.

На рис. 7 показаны измеренные значения результирующего ионного тока и изменение тока эмиссии плазменного нейтрализатора в зависимости от вытягивающего напряжения (также задаваемое на блоке смещения плазменного нейтрализатора). Можно заметить, что ток эмиссии плазменного нейтрализатора вырос вдвое, однако заметного влияния на пространственный заряд пучка ускоренных ионов не происходит. По-видимому, это связано с малостью пространственного заряда пучка ионов, электрическое по-

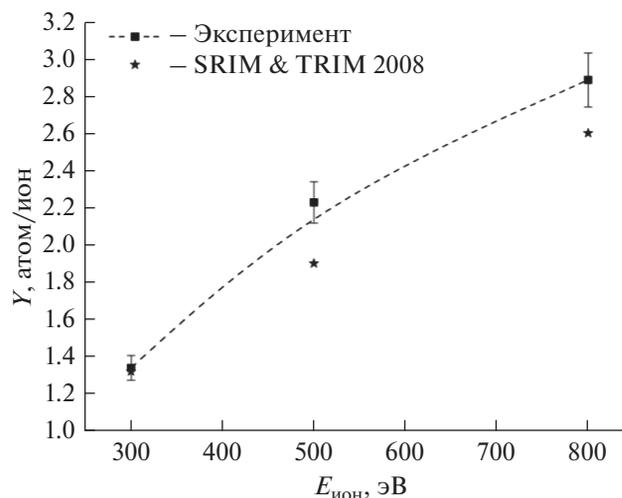


Рис. 8. Зависимости значений коэффициентов ионного распыления Y для пленки Ni от ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$. Экспериментально полученные значения (верхняя кривая) и результаты моделирования в SRIM&TRIM 2008 [18] — точки ниже кривой. Параметры экспериментов: газ — Ag; $\Theta_{\text{падения}} = 90^\circ$;

ле которого дополнительно “вытягивает” электроны, вышедшие из плазменного нейтрализатора. Вследствие чего большая часть электронов из пучка рассеивается (в результате кулоновского отталкивания) и лишь частично доходит до пучка ионов. Таким образом, для ионно-пучковой обработки диэлектрических материалов необходимо заменить плазменный нейтрализатор на стандартный накальный термокотод — источник электронов.

В настоящее время источник применяется для изучения эффектов распыления токопроводящих материалов. На рис. 8 приведен пример измеренной с помощью этого источника зависимости коэффициента распыления пленки Ni от энергии ионов $E_{\text{ион}}$, также для сравнения приведены результаты моделирования в SRIM&TRIM 2008 [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный миниатюрный источник ускоренных ионов КЛАН-10М обеспечивает максимальный ток ионного пучка на уровне 4 мА, что при диаметре выходной апертуры 7 мм (плоская ИОС) соответствует плотности ионного тока 10.4 мА/см², которая более чем вдвое превышает плотность ионного тока, имеющегося фокусирующего ионного источника [17]. При этом общий ток пучка и, соответственно, распыления элементов и тепловые нагрузки на элементы конструкции упали в четыре раза.

Измерения зависимостей диаметра пучка от расстояния показали, что диапазон значений пространственных частот q , доступный для обработки, лежит в пределах: от 2.6×10^{-5} до 1.2×10^{-3} мкм⁻¹. Это делает данный источник универсальным по отношению к размеру и форме поверхности обрабатываемого образца.

В ряде практических случаев полученные величины диаметра и плотности тока ионного пучка позволяют отказаться от использования дополнительных охлаждаемых диафрагм, что помимо уменьшения загрязнения поверхности продуктами эрозии, упростит конструкцию и уменьшит размеры источника и позволит увеличить время непрерывного использования более чем на порядок.

Выяснилось, что плазменный нейтрализатор не применим при таких размерах пучка. Так как большая часть электронов успевает рассеяться, прежде чем они подхватятся вытягивающим полем пространственного заряда пучка ионов, величина которого оказалась недостаточной. Поэтому планируется заменить его на стандартный накальный, который будет установлен на выходе источника. С целью минимизации частиц, летящих с нити-накала и загрязняющих обрабатываемую деталь, эмиттер будет отжигаться при закрытой заслонке и при температуре больше рабочей.

В заключение следует отметить, что проведенные исследования показали, что конструкция источника обладает высоким модернизационным потенциалом. В частности, мы полагаем, что, установка фокусирующей ИОС существенно повысит плотность ионного тока в области перетяжки и увеличит максимальную пространственную частоту, доступную для обработки поверхностей до значений превышающих 1.2×10^{-3} мкм⁻¹.

БАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-07660, № 17-02-00640) и ЦКП “Физика и технологии микро- и наноструктур” при ИФМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yunin P.A., Drozdov Y.N., Drozdov M.N. // Surface and Interface Analysis. 2015. V. 47. Iss. 7. P. 771. doi 10.1002/sia.5773
2. Lee S.C., Neumann A., Jiang Y.-B. et al. // Nanotechnology. 2016. V. 27. № 37. P. 23.
3. Liu M., Li T., Wang Y. // J. Vac. Sci. Technol. B. Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 2017. V. 35. № 3. P. 031801.
4. Зорина М.В., Зуев С.Ю., Михайленко М.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 16. С. 34.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. // Физика твердого тела. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 1993. С. 115.
6. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 7. С. 9.
7. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. № 17. P. 20094. doi 10.1364/OE.22.020094
8. Sidorov D.S., Chkhalo N.I., Mikhailenko M.S. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 2016. V. 387. P. 73.
9. Chkhalo N.I., Mikhailenko M.S., Mil'kov A.V. et al. // Surf. Coat. Technol. 2017. V. 311. P. 351. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfc Coat>.
10. Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V. et al. // Precision Engineering. 2017. V. 48. P. 338.
11. Зорина М.В., Нефедов И.М., Пестов А.Е. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 8. С. 9.
12. Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhailenko M.S. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 6. P. 1249.
13. Барышева М.М., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 7. С. 727.
14. Brychikhin M.N., Chkhalo N.I., Eikhorn Ya.O. et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. № 16. P. 4430.
15. Liao W. et al. // Appl. Opt. 2014. V. 53. № 19. P. 4266.
16. Svechnikov M.V. et al. // Opt. Express. 2015. V. 23. № 11. P. 14677.
17. Забродин И.Г., Закалов Б.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 9. С. 109.
18. <http://www.platar.ru>.
19. Chkhalo N.I., Klunokov E.B., Pestov A.E. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. № 1–2. P. 62.
20. <http://www.srim.org>.

Miniature Source of Ions with Plasma Neutralizer KLAN-10M

M. S. Mikhaylenko, A. E. Pestov, N. I. Chkhalo, L. A. Goncharov

The paper presents the results of testing a new miniature source of accelerated ions KLAN-10M with a plasma neutralizer: regimes work of source have been studied. In addition, the dependences of the diameter of the ion beam and the distribution of the ion current along the surface of the output aperture on the distance are measured. With a diameter of the output aperture of 7 mm (plane ion optics) the ion current density is $j_{\text{ion}} = 10.4$ mA/cm². A small beam divergence ($\Delta\varnothing \approx 15\%$) makes it possible to carry out a precise correction of local errors of the shape of the surface of optical elements of short-wave wavelength ($\lambda \sim 2\text{--}30$ nm). Also, the work of the plasma neutralizer have been studied. With this design, the resulting electron current does not provide complete compensation of the space charge in the beam (the electron current is 10 times smaller than the ion current).

Keywords: Kaufman type source, plasma neutralizer, ion etching, ion polishing, ion source.