

К. ф.-м. н. С. В. ДУДИН, Д. В. РАФАЛЬСКИЙ,
к. ф.-м. н. А. В. ЗЫКОВ

Украина, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
E-mail: stanislav_dudin@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
21.12 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН
(НУ «Львовская политехника», г. Львов)

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ С ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Разработанный источник ионов позволяет управлять энергией и плотностью тока пучка. Полученные результаты можно использовать в технологиях производства производства опто- и микро-электронных приборов.

В настоящее время широкоапертурные источники ионов (**ИИ**) низкой энергии широко используются в различных технологиях, в частности для травления микро- и наноструктур при производстве оптоэлектронных устройств, магнитных головок, интегральных микросхем и в других микро- и нанотехнологиях [1, 2]. В последние годы высокочастотные источники ионов быстро вытеснили источники с накаливаемым катодом (источники Кауфмана) и источники с полым катодом, поскольку они практически не требуют обслуживания и значительно лучше совместимы с химически активными газами [3, 4]. На сегодняшний день для технологических применений разработаны и серийно выпускаются ВЧ ИИ с диаметром пучка до 500 мм [3—5], которые, как правило, работают в диапазоне энергий 50—1000 эВ. В отдельный класс можно выделить ВЧ ИИ для накачки энергии в термоядерные установки, которые характеризуются гораздо большим энерговыделением в пучок (достигнуты значения тока пучка до 90 А при значениях энергии ионов десятки килоэлектронвольт).

Во всех перечисленных ИИ в качестве плазмообразующей ступени применяется ВЧ-разряд индукционного типа, а для формирования пучка используется многосеточная (как правило, трехсеточная) ионно-оптическая система (**ИОС**). Такая система состоит из тонких перфорированных электродов (сеток), расположенных на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга, к которым приложены значительные, до десятков киловольт, потенциалы. Поскольку ИОС имеют достаточно большие поперечные размеры и подвергаются существенным термическим нагрузкам, изготовление, юстировка и поддержание геометрии сеток в процессе работы — весьма сложные задачи, а сама ионно-оптическая система является одним из наиболее дорогостоящих узлов ИИ. К тому же, применение трехсеточной ИОС требует приме-

нения дополнительного высоковольтного источника питания (даже при низкой энергии ионов) с необходимостью тщательной подстройки напряжения, а также появляются такие специфические проблемы как загрязнение изоляторов и межсеточные пробой.

От этих недостатков свободны односеточные ИИ, в которых ускорение ионов происходит в слое объемного заряда между плазмой и извлекающей сеткой. Применение таких источников целесообразно в технологиях ионно-химического травления с невысокой энергией ионов (до 300 эВ). Возможна работа с более высокими значениями энергии (500 эВ и выше), однако при этом происходит интенсивное распыление сетки, что снижает ее ресурс и приводит к загрязнению пучка металлическими ионами. Односеточный ИИ, описанный в [6], основан на разряде с накаливаемым катодом, что ограничивает ресурс при работе с химически активными газами. Кроме того, для ионно-лучевой обработки поверхностей при помощи такого ИИ необходима нейтрализация как объемного заряда пучка, так и тока ионов, особенно в случае обработки диэлектриков. Обычно для этой цели используется инжекция электронов в пространство транспортировки ионного пучка при помощи нейтрализатора, который представляет собой отдельное устройство, основанное либо на эффекте термоэлектронной эмиссии, либо на газовом разряде. Нейтрализатор требует использования дополнительных источников питания и зачастую имеет ограниченный срок эксплуатации.

В то же время известен высокочастотный источник ионов [7], обладающий уникальной способностью одновременно генерировать потоки положительных ионов и электронов [8]. Применение для питания ИОС высокочастотного напряжения позволяет не только избавиться от необходимости применения дополнительного нейтрализатора, но и повысить эффективность извлечения ионов, а также избежать образования микродуг на сетке, опасность возникновения которых всегда присутствует при использовании для ускорения ионов постоянного напряжения выше 100 В. Плазмообразующая ступень источника основана на ВЧ-разряде индукционного типа, причем, поскольку индукционный разряд взаимодействует с высокочастотным напряжением, прикладываемым к ИОС для ускорения ионов, можно говорить о самостоятельном типе газового разряда — комбинированном индукционно-емкостном ВЧ-разряде [9].

Данная работа была выполнена при поддержке Министерства промышленной политики Украины (НИОКР № г.р. 0107U010814)

Систематические исследования комбинированно-индукционно-емкостного ВЧ-разряда и формирования интенсивных низкоэнергетичных потоков ионов на протяжении многих лет проводятся в Харьковском национальном университете [10—16]. Результатом этих исследований явилась разработка целого ряда высокочастотных источников ионов с диаметром пучка от 20 до 250 мм [12—16]. В данной статье описан один из них, а именно — высокочастотный односеточный источник ионов низкой энергии с диаметром пучка 250 мм.

Экспериментальная установка

Устройство источника ионов иллюстрирует **рис. 1**. В основном объеме источника, цилиндрической газоразрядной камере с внутренним диаметром 250 мм и длиной 80 мм, расположен двухвитковый экранированный индуктор, обеспечивающий генерацию плазмы. К индуктору подведена ВЧ-мощность (13,56 МГц) в диапазоне до 1000 Вт через согласующее устройство. На выходе источника расположена заземленная металлическая сетка толщиной 0,12 мм с отверстиями диаметром 0,24 мм. Рабочая площадь сетки — 490 см², ее оптическая прозрачность — 0,4. При выполнении экспериментов плотность тока ионов в разряде определялась с помощью плоского зонда, расположенного на сетке, на который подавалось смещение –25 В. Постоянное либо ВЧ-напряжение (0—100 В) прикладывается между заземленной сеткой и электродом, ограничивающим разрядную камеру. ВЧ-смещение подключено через разделительный конден-

сатор, благодаря чему на электроде, площадь которого значительно больше площади сетки, возникает положительное напряжение автосмещения. В обоих случаях измеряемой величиной является постоянный потенциал электрода, который будет использоваться далее как главный параметр, определяющий энергию ионов и эмиссионные характеристики источника.

В настоящей работе все потенциалы были измерены относительно заземленной камеры транспортировки пучка. Мишень диаметром 300 мм, принимающая пучок ионов, располагалась на расстоянии 100 мм от выхода источника ионов и была оснащена односеточным энергоанализатором (ЭА) с тормозящим полем. Диаметр отверстий сетки ЭА составлял 0,1 мм, толщина сетки — 0,12 мм, ее прозрачность — 0,2. В качестве рабочего газа использовался аргон, его давление составляло $7,5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Для откачки системы использовался турбомолекулярный насос 01АБ-1500 со скоростью откачки 700 л/с и форвакуумный насос НВР-16Д. ВЧ-мощность, подводимая к индуктору, составляла 200 Вт.

Полностью металлическая конструкция с водяным охлаждением всех основных элементов позволяет работать с достаточно большим энергоскладом в источнике. В работе была экспериментально проверена возможность длительной непрерывной работы источника с подводимой ВЧ-мощностью до 2 кВт, однако тепловой режим источника в этих экспериментах позволяет прогнозировать безотказную непрерывную работу ИИ и при большем энергоскладе с соответствующим увеличением тока пучка.

Экспериментальные результаты

Основные характеристики источника показаны на **рис. 2**. Как видно из **рис. 2, а**, максимальная плотность тока ионов на входе ИОС, т. е. наибольшая эффективность ионизации в ВЧ индукционном разряде, достигается при давлении $(2—3) \cdot 10^{-3}$ Торр. С точки зрения транспортировки пучка к мишени такое давление является слишком высоким, поскольку длина свободного пробега ионов становится меньше расстояния от ИОС до мишени. С ростом давления падает не только ток мишени, но и, как показал энергоанализ, значительно снижается доля быстрых ионов. С другой стороны, при давлении газа ниже $5 \cdot 10^{-4}$ Торр индукционный разряд становится трудноиницируемым, а при еще более низком давлении он гаснет. Таким образом, предпочтительным является диапазон рабочего давления $(5—9) \cdot 10^{-4}$ Торр.

Плотность ионного тока из плазмы всегда практически прямо пропорциональна ВЧ-мощности, тогда как зависимость тока мишени от мощности может быть и нелинейной. Дело в том, что прозрачность сетки для ионов растет с ростом энергии ионов и падает при увеличении плотности тока. Нами были проведены исследования ионных и электронных эмиссионных характеристик большого количества сеток с различными размерами и геометрией ячеек, которые были изготовлены по различным технологиям (лазерная резка, электроэрозия, тканые сетки). Результаты этих исследований являются предметом отдельной публикации, здесь же отметим, что описанная в

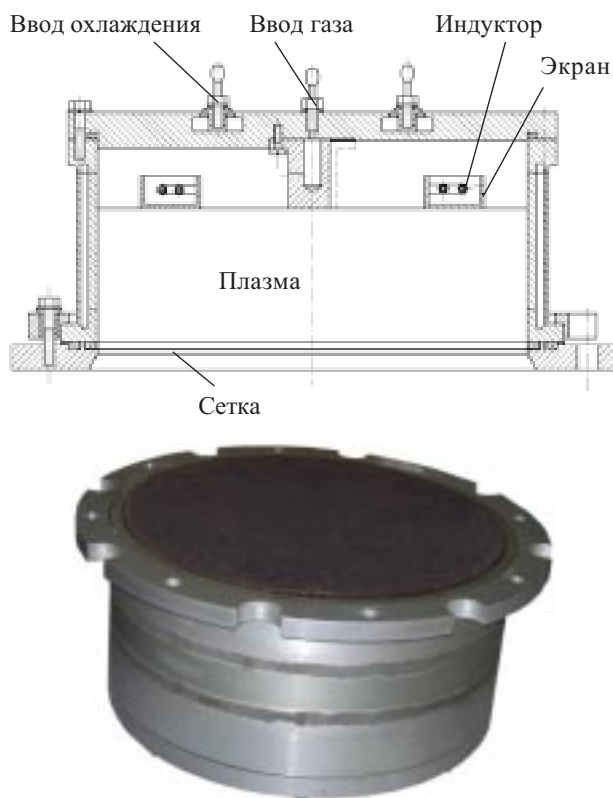


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного ИИ с односеточной ИОС и его фото

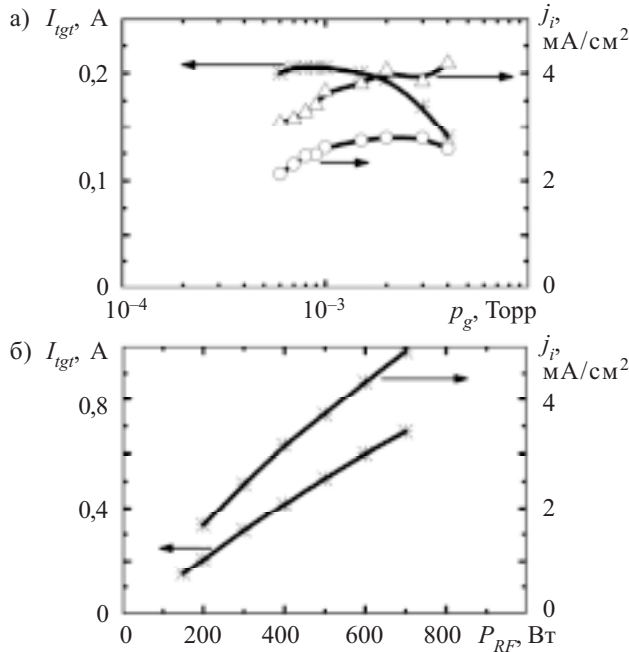


Рис. 2. Зависимость ионного тока мишени I_{igt} (потенциал мишени -25 В) и плотности тока ионов j_i в индукционном разряде для случая ВЧ-смещения на электрод (Δ) и без смещения ($\circ$) от давления (а) и от ВЧ-мощности P_{RF} , вводимой в индукционный разряд (б). Ускоряющее напряжение 50 В

настоящей работе сетка позволяет получать токи пучка до 1 А даже при невысоких (до 100 В) ускоряющих напряжениях (см. рис. 2, б).

Как уже было отмечено, односеточный источник ионов с ВЧ-питанием ИОС способен одновременно эмиттировать потоки как ионов, так и электронов, что позволяет исключить из системы нейтрализатор даже при обработке диэлектрических мишеней. Для получения количественной информации об извлекаемых токах ионов и электронов были измерены ВАХ мишени (рис. 3). Из рисунка видно, что в случае использования постоянного ускоряющего напряжения (кривая 1) мишень при любых потенциалах собирает только ионы, в то время как при использовании ВЧ-

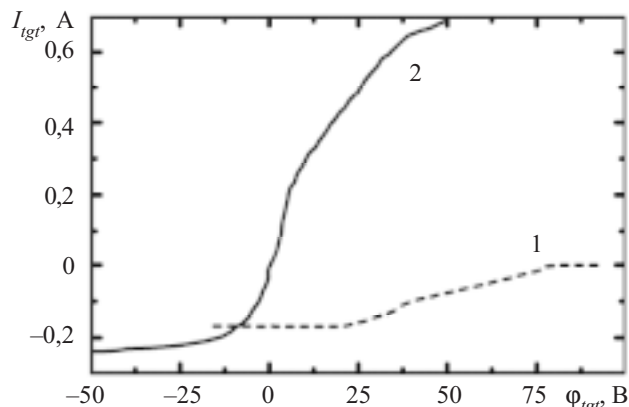


Рис. 3. ВАХ мишени для случая постоянного потенциала на электроде (1) и ВЧ-смещения на электроде (2)

питания ИОС ток мишени имеет обе полярности (кривая 2), что означает присутствие как ионов, так и электронов. В случае ВЧ-смещения ионная ветвь ВАХ имеет хорошее насыщение, а плавающий потенциал мишени близок к нулю, в то время как при постоянном смещении плавающий потенциал мишени близок к ускоряющему напряжению. Если потенциал мишени становится больше плавающего, ток мишени меняет знак, что означает собирание электронов. При достаточно высоких потенциалах мишени (в случае ВЧ-смещения электрода) все электроны, эмитированные источником, достигают мишени, и ее ток стремится к насыщению.

Возможность одновременного извлечения положительных ионов и электронов из плазмы с использованием односеточной системы иллюстрируют результаты измерения функции распределения по энергии (ФРЭ) ионов и электронов. На рис. 4 показаны измеренные энергетические спектры для случаев постоянного и ВЧ-напряжения питания ИОС (кривые 1 и 2 соответственно). В обоих случаях ускоряющий потенциал электрода был равен 120 В. ФРЭ были получены путем дифференцирования вольт-амперных характеристик коллектора при потенциале сетки ЭА, равном 0 В, причем в результате ионный спектр располагается правее нуля потенциала, а электронный — левее. Необходимо отметить, что поскольку используемый ЭА не оснащен дополнительной сеткой для подавления ион-электронной эмиссии с коллектора ЭА, на полученных ФРЭ присутствует еще один пик, соответствующий электронам, эмитированным с поверхности коллектора. Положение этого пика определяется потенциалом сетки ЭА, поэтому при потенциале сетки, равном 0 В, он близок к главному электронному пику и трудноотличим от него. Наши измерения с разными потенциалами сетки ЭА позволили разделить эти пики и определить величину тока вторичных электронов, который никогда не превышал 10% от ионного тока коллектора, поэтому присутствие тока ион-электронной эмиссии не повлияло на полученные результаты.

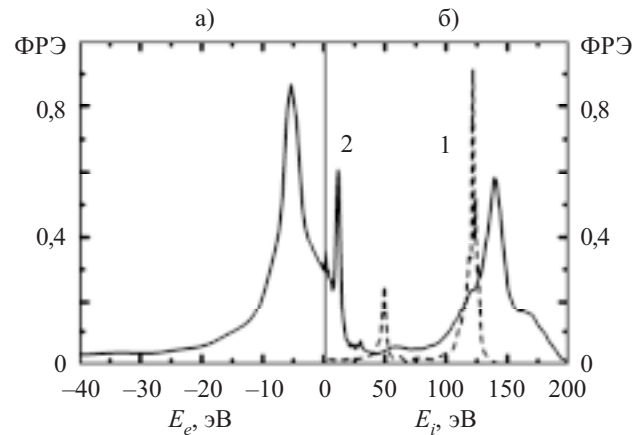


Рис. 4. Функции распределения по энергии (ФРЭ) электронов E_e (а) и энергии ионов E_i (б): 1 — при постоянном напряжении на электрод; 2 — при ВЧ-напряжении на электроде

При ВЧ-питании ИОС на ФРЭ присутствует комбинированный ионно-электронный спектр с острым пиком электронов около нуля и широким пиком пучка ионов вблизи энергии, приблизительно соответствующей ускоряющему потенциалу, что характерно для ускорения ионов в ВЧ-слое, когда время пролета слоя ионом сравнимо с периодом ВЧ-поля [17]. В случае постоянного смещения наблюдается острый ионный пик пучка. Кроме того, в ионной части полученных спектров присутствует еще один пик — вблизи 10 В для ВЧ-напряжения на электроде и вблизи 50 В при постоянном напряжении на электроде. Эти пики соответствуют медленным ионам ионно-пучковой плазмы, возникающей в пространстве транспортировки пучка; их положение определяется потенциалом ионно-пучковой плазмы [18].

Существование большого электронного тока в случае ВЧ-смещения электрода может быть объяснено следующим образом. Известно, что потенциал плазмы, контактирующей с ВЧ-электродом, осциллирует, периодически приближаясь к нулю. В эти моменты электроны из плазмы могут свободно проходить через отверстия сетки.

Необходимо отметить, что соотношением между токами ионов и электронов на мишень можно управлять в широком диапазоне путем изменения потенциала мишени. Из рис. 3 видно, что изменение потенциала на ± 10 В приводит к изменению степени компенсации ионного пучка от некомпенсированного до сильно перекомпенсированного. Это может быть использовано в различных технологиях: травлении подзатворных диэлектриков полевых транзисторов, производстве нанoeлектронных устройств и многих других. Наши измерения с различными потенциалами сетки ЭА показали, что при положительном смещении мишени электроны достигают мишени в виде направленного пучка с управляемой энергией. Вследствие направленности как электронного, так и ионного потоков, описанный источник ионов может составить конкуренцию источникам нейтральных пучков в таких приложениях, как монослойное травление (ALET) [19] и исключение зависимости скорости травления от соотношения ширины и глубины протравливаемого отверстия (ARDE) [20].

Таким образом исследования характеристик разработанного высокочастотного источника ионов с односеточной ИОС показали, что количество эмитируемых электронов достаточно для полной токовой компенсации пучка ионов. Предложенный метод управления соотношением токов ионов и электронов, эмитируемых источником, позволяет изменять это соотношение в очень широких пределах. Использование ВЧ индукционного разряда в источнике позволяет достичь высокой плотности тока ($1\text{--}10\text{ мА/см}^2$) в диапазоне низких значений энергии ионов ($20\text{--}500\text{ эВ}$) с возможностью независимого управления энергией и плотностью тока ионов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Brown Ian G. The Physics and technology of ion sources.— Wiley-VCH, 2004.
2. Roth J. Reece. Industrial plasma engineering. Vol. 2: Applications to nonthermal plasma processing.— CRC Press, 2001.
3. Kanarov V., Hayes A. V., Yevtukhov R. et al. Thirty-five centimeter diameter radio frequency ion-beam source // Rev. Sci. Instrum.— 1998.— Vol. 69, N 2, Part I.— P. 874—876.
4. Hayes A. V., Kanarov V., Vidinsky B. Fifty centimeter ion beam source // Rev. Sci. Instrum.— 1996.— Vol. 67, N 4.— P. 1638—1641.
5. <http://www.oxford-instruments.com>
6. Pat. 4259145 USA. Ion source for reactive ion etching / J. M. E. Harper, H. R. Kaufman.— 31.03 1981.
7. Пат. 1570549 РФ. Высокочастотный источник ионов / А. М. Будянский, А. В. Зыков, В. И. Фареник.— 27.06 1993.; Пат. 2426 Украины от 15.02 1994.
8. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. On the simultaneous extraction of positive ions and electrons from single-grid ICP source // Europhysics Letters.— 2009.— Vol. 88, N 5.— P. 55002.
9. Положий К. И. Формирование потоков заряженных частиц в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде / Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Харьков, ФТФ ХНУ им. В. Н. Каразина.— 2000.
10. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе ВЧ-индукционно-емкостного разряда // Письма в ЖТФ.— 1996.— Т. 22, № 19.— С. 54—59.
11. Дудин С. В., Зыков А. В., Положий К. И., Фареник В. И. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 22.— С. 33—39.
12. Будянский А. М., Зыков А. В., Фареник В. И. ВЧ индукционный источник низкоэнергетичных ионов // Матер. Межотраслевого науч.-технич. семинара «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике».— Харьков.— 1991.— С. 26—27.
13. Маишев Ю. П., Фареник В. И., Будянский А. М. и др. Исследование высокочастотного индукционного разряда низкого давления для создания широкоапертурных источников ионов с высокой однородностью тока пучка // Труды ФТИ РАН.— 1999.— Т. 15.— С. 33—59.
14. Пат. 42072 України на корисну модель. Енергоєфективне джерело іонів / С. В. Дудін, О. В. Зиков, Д. В. Рафальський.— 25.05 2009.
15. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. Two modes of ion extraction in single-grid ion source // The Third Central European Symposium on Plasma Chemistry.— Kyiv, Ukraine.— 2009.— Book of Abstracts.— P. 172—173.
16. Dudin S. V., Rafalskyi D. V. Influence of ion-beam plasma on the ion extraction efficiency in single-grid ion source // Proceed. of the V international confer. «Electronics and applied physics».— Kyiv, Ukraine.— 2009.— P. 122—123.
17. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing.— New York, Wiley, 2004.
18. Дудин С. В., Рафальский Д. В. Закономерности формирования пучка ионов низкой энергии при помощи односеточной ионно-оптической системы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— № 6.— С. 42—45.
19. Athavale D., Economou D. J. Molecular dynamics simulation of atomic layer etching of silicon // J. Vac. Sci. Technol. A.— 1995.— N 13.— P. 966—971.
20. Economou D. J. Fast neutral beams for materials processing. // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2008.— N 41.— P. 024001—024012.