

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

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

Дата поступления в редакцию
25.06 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОМОЩИ ОДНОСЕТОЧНОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Обнаружено два режима извлечения ионов: пучковый и плазменный, переход между которыми происходит при некотором критическом потенциале плазмы в источнике.

На сегодняшний день ионные пучки широко используются как в фундаментальных научных исследованиях, так и в разнообразных технологических приложениях: накачка энергии в термоядерные реакторы, ионные пучки в ускорителях заряженных частиц, электрореактивные двигатели, ионные микрорознды, ионно-лучевая литография, имплантация, травление поверхностей твердых тел, осаждение тонких пленок, сварка в вакууме и т. д. [1—3]. Из всего многообразия ионных источников (ИИ) различных типов и параметров создаваемых ими ионных пучков в отдельную группу выделяются системы, используемые в технологии микроэлектроники. Это происходит в силу высоких требований к качеству продукции, сложности технологии и наличия ряда специфических требований, предъявляемых к параметрам ионных пучков [1, 2]. В таких системах, как правило, используются низкоэнергетичные ионные пучки (50—500 эВ) большого сечения (до 500 см²), которые распространяются на небольшие расстояния (10—20 см). Этим требованиям удовлетворяют плазменные ИИ, в которых генерация ионов происходит в объеме газового разряда, а их извлечение — с границы плазмы.

Для генерации ионов в известных конструкциях плазменных ИИ используются практически все типы газовых разрядов, однако безэлектродные электрические разряды, в частности ВЧ индукционный (ВЧИ) разряд низкого давления, являются наиболее перспективными для разработки на их базе широкоапертурных ИИ низкой энергии. Как показано в [2], преимущества использования ВЧИ-разряда как плазмобразующей ступени ИИ низких энергий обусловлены высокой плотностью плазмы (до 10¹² частиц/см³), минимальным разбросом энергии ионов ($\Delta\epsilon_i \leq 10$ эВ), относительно низким рабочим давлением (10⁻⁴—10⁻³ торр), высокой экономичностью (энергетическая «цена» иона $\eta \approx 30$ —80 эВ/ион), отсутствием узлов накачивания и поэтому большим ресурсом работы с химически активными газами, возможностью независимого управления энергией и плотностью заряженных частиц. К тому же, ВЧИ-разряд является хо-

рошо изученным типом разряда [3—7], что и обуславливает его широкое распространение в промышленных технологиях.

Для извлечения ионов из плазмы и формирования ионного пучка используется ионно-оптическая система (ИОС), которая является важной частью ИИ, определяющей основные параметры пучка ионов: плотность тока, энергию, угол расходимости. Как правило, ИОС представляет собой систему электродов-сеток, к которым приложены соответствующие потенциалы. Наибольшее распространение получили ИОС двух видов: двухэлектродная (для пучков с энергией выше 500 эВ) и трехэлектродная (для формирования низкоэнергетичных пучков), которые подробно изучены и описаны в [1]. К недостаткам таких ИОС можно отнести возможность межсеточных пробоев, высокие требования к точности изготовления и механической стабильности конструкции (что является сложной задачей, учитывая большие термические нагрузки на сетки в вакууме), а также необходимость прецизионной юстировки сеток.

Альтернативной ИОС является односеточная извлекающая система [8], которая позволяет существенно упростить конструкцию ИИ, уменьшить требования к точности и термической стабильности геометрии сетки, а также избежать процедуры юстировки сеток. Применение односеточных ИОС наиболее эффективно в диапазоне низких значений энергии (50—500 эВ) [2]. При высокой энергии сетка подвергается интенсивной бомбардировке ионами, поэтому верхний предел энергии пучка определяется преимущественно свойствами материала сетки (коэффициентом распыления, температурной стабильностью и т. д.).

Как правило, минимальную рабочую энергию ИОС (E_{\min}) определяют как энергию, при которой толщина слоя пространственного заряда вблизи сетки становится равной радиусу ячейки сетки. При небольших значениях энергии пучка (<100 эВ) и плотности тока, характерной для современных технологических устройств (1—5 мА/см²), слой пространственного заряда становится очень тонким (<200 мкм), что приводит к необходимости использования сеток с ячейками очень маленьких размеров. При этом требования высокой прозрачности сетки и ее механической прочности (особенно для ИИ с пучком диаметром больше 100 мм) ограничивают минимально достижимый размер ячеек сетки. Таким образом, при вы-

боре параметров извлекающей сетки зачастую приходится прибегать к компромиссным решениям, удовлетворяющим комплексу противоречивых требований. Осознанному выбору этих параметров препятствует то, что в области значений энергии пучка, близких к E_{min} , закономерности формирования пучка ионов при помощи односеточной ИОС изучены недостаточно. Экспериментальное исследование этих закономерностей было целью данной работы.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке с ВЧИ-источником ионов с односеточной ИОС. Экспериментальная установка схематически изображена на рис. 1. Кварцевая газоразрядная камера 1 диаметром 40 мм и длиной 80 мм подсоединена к камере транспортировки пучка, из которой откачивается газ турбомолекулярным насосом 01АБ-1500. В выходном отверстии газоразрядной камеры установлена заземленная сетка 5 толщиной 0,18 мм. Диаметр ячеек сетки — 0,3 мм, прозрачность — 0,19, диаметр рабочей области — 20 мм. Ускоряющий потенциал (0—200 В) приложен к медному цилиндрическому электроду 3 с продольными разрезами, расположенному внутри газоразрядной камеры. ВЧ-напряжение (13,56 МГц) подводится к 4-витковому спиральному индуктору 2 от ВЧ-генератора мощностью до 200 Вт через согласующее устройство. Плотность тока ионов из плазмы ВЧИ-разряда измеряется непосредственно вблизи сетки на фланце источника плоским зондом 6. Мишень, собирающая ионный пучок, выполнена в виде односеточного энергоанализатора 9 диаметром 50 мм, расположенного на расстоянии 50 мм от сетки 5. Прозрачность сетки 8 энергоанализатора составляет 0,2. Для измерения потенциалов плазмы ВЧИ-разряда и ионно-пучковой плазмы в пространстве транспортировки используются накаливаемые эмиссионные зонды 4 и 7. Во всех экспериментах плотность тока насыщения плоского зонда составляла 4 мА/см², давление в объеме ВЧИ-источника — $5 \cdot 10^{-3}$ торр, в пространстве транспортировки пучка — $3 \cdot 10^{-4}$ торр (рабочий газ — аргон), потенциал сетки энергоанализатора — 50 В.

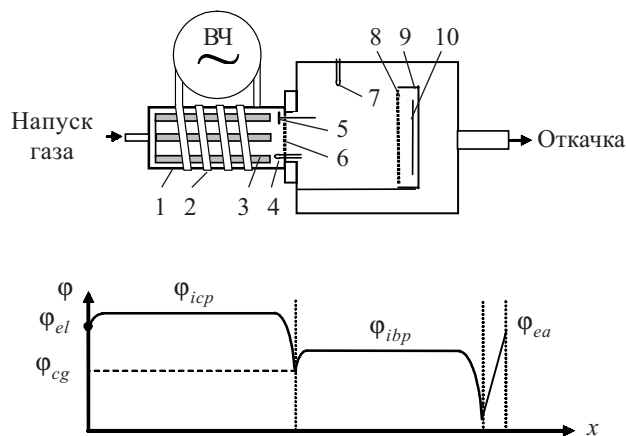


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и качественный вид распределения потенциалов вдоль оси системы

Экспериментальные результаты

На рис. 2 показана измеренная зависимость тока насыщения коллектора I_{coll} энергоанализатора от потенциала электрода 3 ϕ_{el} (см. рис. 1). Как следует из приведенного графика, его увеличение, начиная с небольшого значения (около 25 В), вызывает монотонный рост ионного тока. Это можно объяснить изменением прозрачности сетки для ионов при изменении их энергии: при большой энергии пучка ионы движутся практически перпендикулярно поверхности извлекающей сетки, прозрачность сетки для ионов близка к оптической; при малых значениях энергии ионы могут перехватываться сеткой из-за «провисания» потенциала в ячейке сетки и появления радиальных электрических полей [1]. Однако при потенциалах $\phi_{el} < 25$ В характер зависимости тока пучка от потенциала электрода имеет немонотонный характер, причины чего будут рассмотрены ниже.

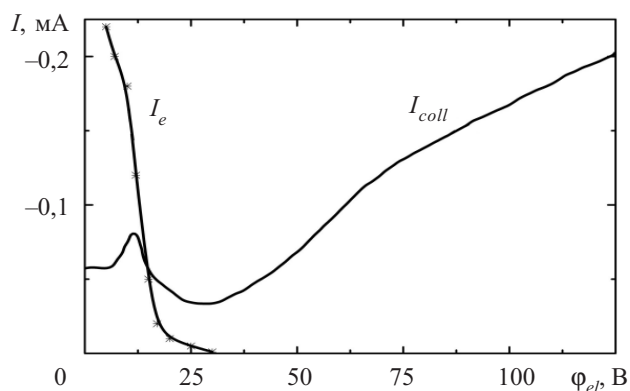


Рис. 2. Зависимость ионного тока насыщения I_{coll} (на коллектор энергоанализатора) и электронного тока I_e (на ненакаленный зонд 7) из ионно-пучковой плазмы от потенциала электрода 3 ϕ_{el}

Рассмотрим продольное распределение потенциала в системе, качественно показанное на рис. 1 [9]. Изменение потенциала электрода ϕ_{el} используется для управления потенциалом ϕ_{icp} , который и определяет энергию пучка. Потенциал в центре ячейки сетки ϕ_{cg} отличается от потенциала сетки и определяется параметрами пучка.

Можно выделить две области с практически постоянным потенциалом: плотная плазма индукционного разряда с потенциалом ϕ_{icp} и область ионно-пучковой плазмы (ϕ_{ibp}). Результаты измерений этих потенциалов при помощи накаливаемых зондов 4 и 7 в зависимости от потенциала электрода ϕ_{el} показаны на рис. 3. Как видно из графика, при значениях потенциала ϕ_{icp} , меньших некоторого критического значения ϕ_{cr} , потенциалы обеих плазм взаимосвязаны, в то время как при больших значениях потенциал ϕ_{ibp} выходит на насыщение с небольшим падением, а ϕ_{icp} продолжает линейно расти. Это означает, что только в случае $\phi_{icp} > \phi_{cr}$ существует ускоряющая разность потенциалов для ионов и формируется направленный пучок. В противном случае энергия ионов в пространстве транспортировки не превышает 10 эВ, а их основное ускорение происходит только непосредственно вблизи мишени. Таким образом, можно выделить

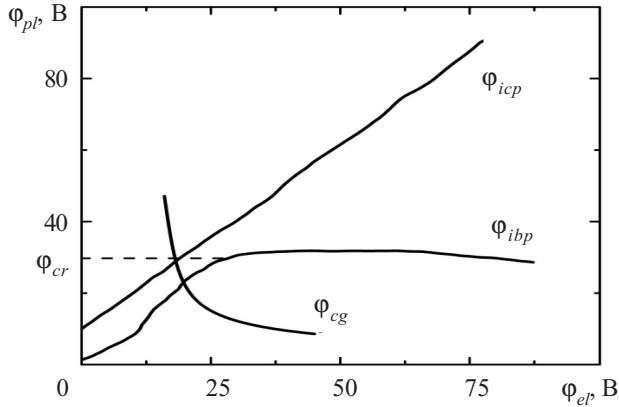


Рис. 3. Экспериментальные зависимости потенциалов плазмы ВЧИ-разряда ϕ_{icp} и ионно-пучковой плазмы ϕ_{ibp} от потенциала электрода ϕ_{el} и кривая потенциала ϕ_{cg} , рассчитанная по формуле (1)

два различных режима работы односеточной ИОС, которые далее будем называть пучковым и плазменным режимами. Если потенциалы ϕ_{icp} и ϕ_{ibp} меньше чем ϕ_{cr} , то, как будет показано ниже, плазма индукционного источника объединена с ионно-пучковой плазмой посредством «потенциального моста», позволяющего электронам дрейфовать между этими областями. Другими словами, в этом случае ИОС является скорее источником плазмы, чем ионов.

Чтобы проверить это утверждение, были проведены измерения электронного тока I_e из ионно-пучковой плазмы при различных значениях потенциала ϕ_{el} . Электронный ток измерялся при помощи ненакаленного зонда 7, на который подавался потенциал, равный заранее измеренному потенциалу ионно-пучковой плазмы (рис. 3)

Полученная кривая показана на рис. 2. Как видим, при потенциале электрода выше 25 В электронный ток практически отсутствует, в то время как при уменьшении потенциала наблюдается резкое увеличение электронного тока. Существование большого электронного тока (значительно превышающего ионный) в области транспортировки пучка может быть объяснено «перетеканием» электронов из плазмы ВЧИ-источника через «потенциальный мост» в ячейках ИОС. На рисунке хорошо видно, что рост электронного тока с уменьшением ϕ_{el} происходит одновременно с ростом ионного тока, что свидетельствует о различии механизмов формирования потока ионов в плазменном и пучковом режимах работы ИОС.

В связи с существованием двух режимов извлечения ионов возникает вопрос о влиянии режима извлечения на энергетический спектр ионов. Для определения этого влияния были измерены функции распределения ионов по энергии для различных значений потенциала ϕ_{el} (рис. 4), которые были получены дифференцированием ВАХ коллектора ЭА. Видно, что амплитуда энергетических пиков при различных значениях ϕ_{el} коррелирует с током пучка (рис. 2), а их характерная ширина практически не зависит от ϕ_{el} .

В заключение отметим, что формирование ионного пучка определяется не только параметрами ВЧИ-плазмы и ИОС, но и условиями в пространстве транс-

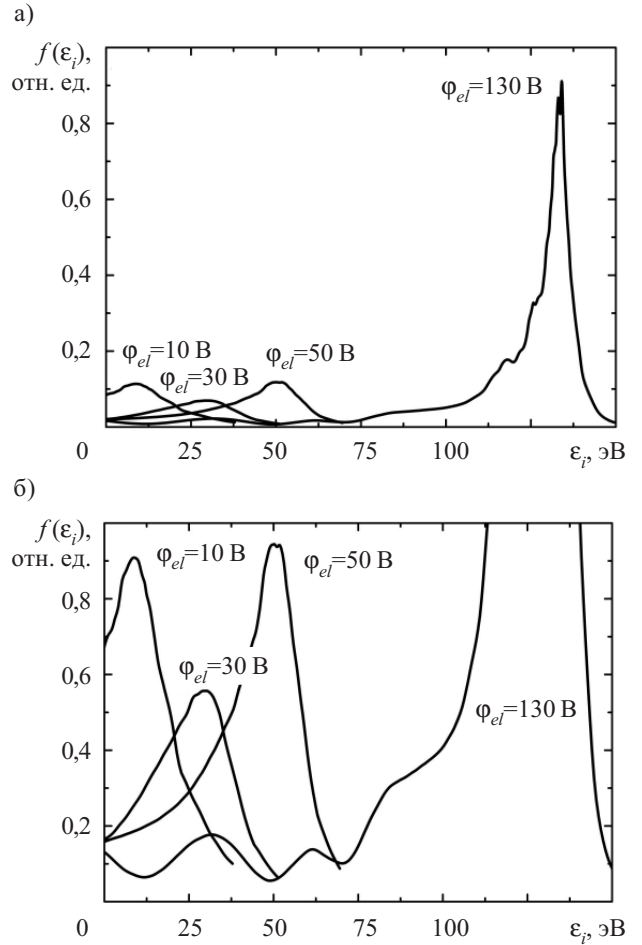


Рис. 4. Функции распределения ионов по энергии для разных значений потенциала электрода ϕ_{el} при плазменном (а) и пучковом (б) режимах работы ИОС

портировки пучка. На рис. 5 приведена зависимость прозрачности извлекающей сетки для ионов, нормированной на оптическую прозрачность, от потенциала ионно-пучковой плазмы, изменяемого при помощи подачи соответствующего потенциала на накаленный зонд 7, работающий в качестве катода-нейтрализатора [10]. Как видим, прозрачность ИОС для ионов монотонно падает с увеличением потенциала ионно-пучковой плазмы, что, по-видимому, происходит

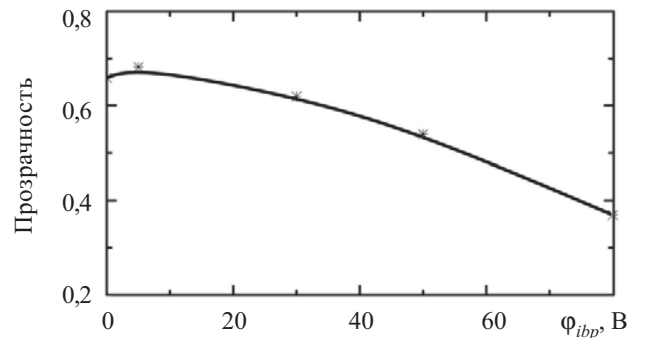


Рис. 5. Зависимость относительной прозрачности извлекающей сетки для ионов от потенциала ионно-пучковой плазмы ϕ_{ibp} . Потенциал электрода $\phi_{el}=130$ В

вследствие дефокусировки пучка и перехвата ионов на выходе из ИОС.

Обсуждение результатов

Как было показано выше, в зависимости от ускоряющего потенциала можно выделить два различных режима работы односеточной ИОС: пучковый и плазменный. Если потенциалы Φ_{icp} и Φ_{ibp} меньше некоторого критического потенциала Φ_{cr} , то плазма индукционного источника объединена с ионно-пучковой плазмой посредством «потенциального моста», позволяющего электронам дрейфовать между этими областями.

Существование «потенциального моста» может быть объяснено наличием положительного потенциала Φ_{cg} в центре ячейки сетки вследствие наличия положительного объемного заряда ионного пучка. Только в том случае, когда потенциал плазмы больше чем Φ_{cg} , существует потенциальный барьер для электронов плазмы и потенциалы Φ_{icp} и Φ_{ibp} не связаны между собой (см. рис. 3).

В качестве численной оценки Φ_{cg} в пучковом режиме может быть использовано решение уравнения Пуассона для случая длинного эквипотенциального цилиндра радиусом r с постоянной плотностью объемного заряда внутри него:

$$\Phi_{cg} = \pi r^2 j_i / \sqrt{\frac{2e\Phi_{icp}}{M_i}}, \quad (1)$$

где j_i — плотность тока ионов;
 e и M_i — заряд и масса иона, соответственно.

Кривая, соответствующая полученной зависимости, показана в сравнении с экспериментальными данными на рис. 3. Можно видеть, что точка пересечения кривых Φ_{cg} и Φ_{icp} может быть использована в качестве грубой оценки Φ_{cr} .

При потенциалах электрода Φ_{el} , соответствующих плазменному режиму работы ИОС, толщина присеточного слоя пространственного заряда меньше радиуса извлекающей ячейки R_h , и плазма проникает внутрь ячейки. В соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра [3]

$$j_i = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{1/2} \frac{\Phi_{icp}^{3/2}}{d_{sh}^2}, \quad (2)$$

где d_{sh} — толщина слоя пространственного заряда.

На рис. 6 приведена зависимость толщины слоя пространственного заряда d_{sh} от потенциала электрода Φ_{el} , полученная с использованием выражения (2). Видно, что толщина слоя d_{sh} меньше радиуса извлекающей ячейки R_h при потенциалах электрода менее 10 В. При таком же потенциале электрода наблюдается изменение характера зависимости ионного тока от Φ_{el} (рис. 2) — при уменьшении Φ_{el} ниже 10 В наблюдается снижение ионного тока, тогда как электронный ток монотонно растет. Возможно, это объясняется тем, что при наличии плазмы в центральной области ячеек ИОС ускорение ионов происходит преимущественно в радиальном направлении, что и приводит к их поглощению сеткой.

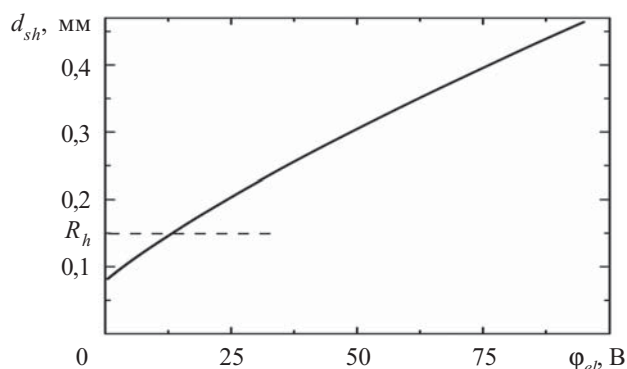


Рис. 6. Зависимость толщины слоя пространственного заряда d_{sh} от потенциала электрода Φ_{el} , полученная из формулы 2, в сравнении с радиусом извлекающей ячейки R_h

Таким образом, экспериментально изучены закономерности формирования пучка ионов низкой энергии при помощи односеточной ионно-оптической системы.

Показано, что такой источник ионов может служить также источником электронов. Полученные закономерности позволяют целенаправленно управлять соотношением потоков ионов и электронов, направленных на обрабатываемую поверхность. Это позволяет оптимизировать процесс травления тонких пленок как по значению тока пробоя, так и по зарядовому состоянию, что особенно важно при формировании подзатворных диэлектриков в МОП-транзисторах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ian G. Brown. The Physics and Technology of Ion Sources: Second, Revised and Extended Edition.— Wiley-VCH, Verlag, KGaA, Weinheim 2004.
2. 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 ФТИРАН.— 1999.— Т. 15.— С. 33—59.
3. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing.— Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
4. Denysenko I., Dudin S., Zikov A. et al. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources // Physics of Plasmas.— 2002.— Vol. 9, N 11.— P. 4767—4775.
5. Рафальский Д. В., Положий К. И. Влияние скин-эффекта на импеданс ВЧ индукционного разряда // Вестник Харьковского нац. универ. Серия физическая «Ядра, частицы, поля».— 2007.— Вып. 1(33), № 763.— С. 69—74.
6. Dudin S. V., Zikov A. V., Dahov A. N., Farenik V. I. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics (12).— 2006.— N 6.— P. 189—191.
7. Gapon A. V., Dahov A. N., Dudin S. V. et al. 2d fluid model for interactive development of ICP technological tools // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics (12).— 2006.— N 6.— P. 186—188.
8. Пат. 570549 РФ. Высокочастотный источник ионов / А. М. Будянский, А. В. Зыков, В. И. Фареник.— 27.06 1993; Пат. 2426 Украины.— 15.02 1994.
9. Dudin S. V., Zikov A. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Rev. Sci. Instrum.— 1994.— Vol. 65, N 4, Part II.— P. 1451—1453.
10. Дудин С. В. Исследование ионно-пучковой плазмы, создаваемой широким потоком ионов низкой энергии / Дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Харьков, ФТФ ХГУ.— 1994.