

Анализ возможности независимого регулирования различных параметров плазмы ВЧ несамостоятельного разряда с дополнительной ионизацией электронным пучком*

М.А. Богданова, Д.В. Лопаев, О.В. Прошина, Т.В. Рахимова, А.Т. Рахимов

В данной статье представлены результаты исследования нового типа плазмы ВЧ несамостоятельного разряда (ВЧНР) низкого давления с дополнительной ионизацией пучками высокоэнергетичных электронов. С помощью комплексного экспериментально-теоретического подхода было показано отличие параметров такой плазмы (плотность плазмы, температура электронов, функция распределения электронов и ионов по энергиям) от случая обычной ВЧ-плазмы, а также от случая чисто пучковой несамостоятельной плазмы. Проведенное исследование подтвердило, что плазма ВЧНР с ионизацией электронным пучком может использоваться для получения более низкой температуры электронов, чем в классической ВЧ-плазме, и, соответственно, для получения ионов более низких энергий. Параметрами плазмы ВЧНР можно управлять: плотностью плазмы – варьируя ВЧ-мощность на частоте, используемой для генерации разряда; энергетическими спектрами электронов и ионов – варьируя соотношение вкладов ВЧ-мощности, мощности ВЧ-смещения и мощности электронного пучка. Полученный результат является также перспективным для возможности прецизионной обработки поверхности плазмой с низкой энергией ионов (порядка нескольких электронвольт), используемой в технологиях атомного слоевого травления и осаждения в плазменных реакторах нового поколения.

Ключевые слова: ВЧ-плазма, электронный пучок, несамостоятельный разряд, параметры плазмы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-27001).

Введение

Плазма низкого давления, возбуждаемая электронным пучком, сама по себе является хорошим инструментом и активно используется для функционализации поверхности, а также в области атомно-слоевых технологий [1–9].

Плазма ВЧНР с дополнительной ионизацией пучками электронов позволяет создать поток низкоэнергетичных ионов с хорошо контролируемым энергетическим спектром и угловым распределением ионов, попадающих из плазмы на поверхность тренча.

Внешний источник ионизации – электронный пучок – позволяет обеспечить лучший контроль энергетического спектра ионов по сравнению с распространенной ВЧ-плазмой, поскольку такая несамостоятельная плазма позволяет достичь низкой температуры электронов и низкого потенциала плазмы. Это, в свою очередь, позволяет получить поток ионов с энергией в несколько электронвольт, соответствующей энергии связи для конкретных используемых материалов обрабатываемых образцов. Так, было показано, что использование ВЧ-плазмы несамостоятельного разряда (ВЧНР), поддерживаемой высокоэнергетичным пучком электронов, является одним из наиболее перспективных методов для предварительной функционализации тренчей с аспектным отношением порядка 10 [10]. Кроме того, энергия ионов может контролироваться дополнитель-



БОГДАНОВА
Мария Андреевна
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова



ЛОПАЕВ
Дмитрий Викторович
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова



ПРОШИНА
Ольга Вячеславовна
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова



РАХИМОВА
Татьяна Викторовна
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова



РАХИМОВ
Александр Турсунович
Профессор, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова

ным ВЧ-смещением, прикладываемым к электроду, на котором располагают обрабатываемый образец [11, 12]. В большинстве исследований в качестве источника пучка электронов используются модули с полым катодом, тогда как в данной работе был использован другой тип источника электронов – модуль открытого разряда. Была разработана конструкция реактора с тремя модулями открытого разряда, позволяющая получать однородное возбуждение холодной плазмы. Такая конструкция может быть использована в уже имеющихся камерах ВЧ-реакторов, используемых в технологии. Было проведено экспериментально-теоретическое исследование ВЧНР в одно- и двухчастотном ВЧ-режиме (81 МГц и 12 МГц) в чистом аргоне. С помощью hairpin СВЧ-зонда и зонда Ленгмюра были измерены плотность плазмы и функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Функция распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) была измерена на ВЧ смещенном электроде с помощью сеточного анализатора энергий ионов (RFEA). Для анализа экспериментальных данных была разработана и применена пространственно одномерная кинетическая численная модель ВЧНР на базе алгоритма метода частиц-в-ячейке с Монте-Карло-столкновениями (МЧЯ МКС). Помимо сравнения с результатами измерений, модель позволяет также получить потоки ионов и возбужденных атомов на управляемый ВЧ-электрод.

Впервые исследована возможность контролируемого изменения ФРЭЭ при приложении небольшой мощности на частоте 81 МГц. Также исследовано поведение ФРИЭ в зависимости от амплитуды приложенного ВЧ-смещения частоты 12 МГц.

Следует отметить, что исследованная плазма ВЧНР низкого давления, поддерживаемая электронным пучком, может обеспечить контроль не только ионного потока, но и потока активных радикалов на обрабатываемую поверхность при добавлении молекулярного газа.

Экспериментальная установка и используемые диагностики

Исследование было проведено с использованием экспериментального стенда двухчастотного (81 и 12 МГц) ВЧ емкостного (ДЧ ВЧЕ) разряда (рис. 1). Цилиндрическая камера ДЧ ВЧЕ-разряда диаметром 330 мм изготовлена из нержавеющей стали. Два алюминиевых электрода диаметром 120 мм, размещенные в верхней и нижней частях камеры, окружены толстыми кварцевыми кольцами с внешним диаметром 240 мм. Межэлектродный зазор ~40 мм. Разряд зажигается в чистом аргоне, который напускается в камеру через газовый душ в верхнем электроде (отверстия диаметром 200 мкм с шагом 8 мм). Давление газа в процессе исследования поддерживалось на уровне 100 мТорр.

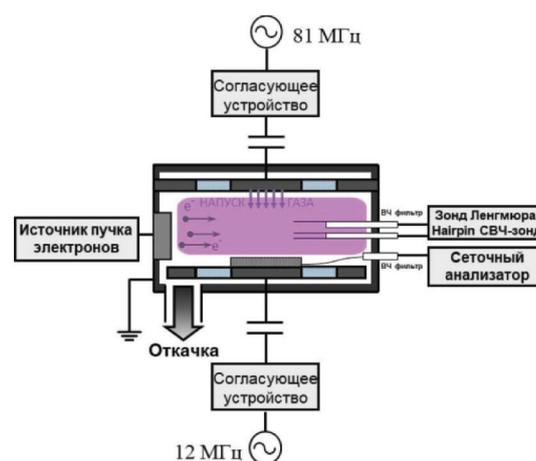


Рис. 1. Экспериментальная установка.

ВЧ-мощность на высокой частоте (81 МГц) подается на верхний электрод через согласующее устройство и блокирующую емкость. ВЧ-смещение более низкой частоты (12 МГц) подается таким же образом на нижний электрод. Так реализован двухчастотный режим работы реактора, в котором мощность на высокой частоте используется для управления плотностью плазмы, а ВЧ-смещение низкой частоты используется для управления распределением энергии ионов на поверхности нижнего электрода [13]. При этом параметры ВЧ-смещения – частота и амплитуда напряжения – в основном влияют на приэлектродный слой, в котором ионы набирают большую часть своей энергии, но не влияют на объем плазмы [14]. В данном исследовании амплитуда ВЧ-смещения варьировалась до 30 В, чтобы продемонстрировать возможность точной настройки ФРИЭ в управляемой электронным пучком ВЧ-плазме в расширенном диапазоне энергий ионов [15].

ДЧ ВЧЕ-разряд, используемый для целей данного исследования, был модернизирован путем использования трех модулей открытого разряда [16] с общим источником питания 1.5 кВ для получения пучка электронов. Каждый такой модуль состоит из отрицательно смещенного прямоугольного алюминиевого катода и заземленного сетчатого анода размером 14×120 мм², разделенных небольшим зазором ~1 мм. Пара катод-анод заключена

в заземленный металлический корпус, электрически изолированный от катода. Стоит отметить, что модули с заземленными анодами и корпусами некоторым образом становятся частью стенок камеры, которые, в свою очередь, играют роль электрода. По этой причине наличие этих модулей не влияет на баланс заряда в ВЧЕ-разряде.

Электронный пучок генерируется следующим образом. Ионы из плазмы в камере дрейфуют к модулю, проникают через сетку и затем ускоряются к катоду, вызывая вторичную эмиссию электронов с его поверхности. Вторичные электроны, в свою очередь, ускоряются в обратном направлении и практически без столкновений покидают модуль, формируя пучок высокоэнергетических электронов (энергия больше 1 кэВ), входящий в плазму через сетку. Этот пучок ионизирует газ за сеткой, производя много низкоэнергетических электронов и ионов, тем самым поддерживая плазму.

Модули электронных пучков были размещены по периметру камеры у стенок на равных расстояниях друг от друга (рис. 2). Использование трех модулей было обусловлено требованием однородности плазмы в межэлектродной области. Пространственные оптические измерения позволили определить длину деградации электронного пучка [17], которая при используемом давлении 100 мТорр значительно превышает расстояние от модуля открытого разряда до середины электрода, что позволило сделать вывод об однородности плазмы, созданной посредством нескольких модулей открытого разряда.

Для исследования плазменных характеристик ВЧ несамостоятельного разряда были использованы следующие приборы и методики плазменной диагностики. Для измерения плотности плазмы, функции распределения электронов по энергии, плавающего и плазменного потенциалов используется цилиндрический зонд Ленгмюра с ВЧ-компенсацией, изготовленный из вольфрамовой проволоки толщиной 90 мкм. Длина открытой части



Рис. 2. Вид на разрядную камеру сверху.

зонда составляет 10 мм. При измерении с помощью зонда Ленгмюра плотности плазмы известно, что измерение по ионной части зондовой вольт-амперной характеристики с использованием ОМЛ-теории может давать завышенное значение, а измерение плотности плазмы по электронному току может давать заниженное значение вследствие эффекта стока электронов на зонд. Поэтому для получения корректных значений плотности плазмы использовался hairpin СВЧ-зонд [18]. Hairpin-зонд представляет собой двухпроводную линию, изготовленную из вольфрамовой проволоки толщиной 200 мкм, длиной 5 см с расстоянием между проводниками 5 мм, замкнутую с одной стороны. Резонансная частота данного участка двухпроводной линии в вакууме составляет порядка 1 500 МГц. При включении газового разряда резонансная частота увеличивается вследствие изменения характерной диэлектрической проницаемости среды, которая может быть рассчитана с использованием измеренного сдвига. Далее из полученной диэлектрической проницаемости плазмы рассчитываются плазменная частота и плотность плазмы. Для корректного учета влияния обедненных электронами приэлектродных слоев около проводников hairpin-зонда берется температура электронов, измеренная с помощью зонда Ленгмюра.

Энергетический спектр ионов (функция распределения ионов по энергиям) измеряется с помощью ВЧ компенсированного сеточного анализатора. Сеточный анализатор представляет собой сборку из трех изолированных друг от друга никелевых сеток и ВеСu-коллектора. Приложение задерживающего для ионов напряжения между первой (входной со стороны плазмы) и второй (анализирующей) сетками позволяет провести измерение ФРИЭ. Напряжение между второй (анализирующей) и третьей (ускоряющей) сетками является ускоряющим для прошедших ионов и разгоняет их в направлении коллектора. Напряжение между третьей сеткой и коллектором является запирающим

для вторичных электронов, выбиваемых с коллектора ионами.

Численная модель

Численная модель ВЧНР была разработана на базе одномерной кинетической модели для ВЧ емкостного разряда [19], [20], а также модели несамостоятельной плазмы, управляемой пучком электронов, разработанной ранее в теоретической работе [10]. Поскольку геометрия как ВЧ-разряда, так и ВЧНР-разряда с тремя пучковыми модулями является пространственно однородной, это позволяет использовать для анализа пространственно одномерную 1D численную модель. Движение электронов и ионов описывается на основе кинетического подхода метода частиц-в-ячейке с Монте-Карло-столкновениями (МЧЯ МКС), для нейтральных компонент (метастабильных атомов Ar^*) используется обычный диффузионный подход. Решаются уравнения Ньютона для всех заряженных квазичастиц, процессы столкновений учитываются с помощью Монте-Карло-алгоритма. Используется набор сечений столкновений электронов и ионов с атомами аргона, аналогичный представленному в [20]. Учитываются упругие соударения для электронов и ионов, возбуждение электронных состояний, ионизация электронным ударом и процесс резонансной перезарядки для ионов. Скорости образования и гибели Ar^* с участием электронов получаются из кинетической МЧЯ МКС-модели. Самосогласованное распределение электрического поля в межэлектродном зазоре получается из решения уравнения Пуассона.

Амплитуда ВЧ-напряжения на электродах в модели выбирается таким образом, чтобы рассчитанная вложенная в плазму удельная мощность p на 1 см^2 соответствовала экспериментально измеренным значениям полной мощности $P_{ВЧ}$: $p=0.7 \cdot P_{ВЧ}/S$, где $S=\pi R^2$ эффективная площадь плазмы. Радиус плазменной области $R \approx 11 \text{ см}$ соответствует радиусу окружности, вписанной между тремя модулями пучков электронов. Это предполагает, что плазма распространяется за ВЧ-электроды, заполняя всю площадь между тремя модулями пучковых электронов (см. также часть 2 «Экспериментальная установка и используемые диагностики»). Коэффициент 0.7 учитывает оценку доли полной мощности ВЧ-источника, вложенной в плазму. Прямое сравнение измеренной и рассчитанной плотности плазмы для одинаковых значений $P_{ВЧ}$ подтвердило адекватность данной оценки для удельной вложенной мощности p .

Что касается высокоэнергетичных пучковых электронов, основная идея заключалась в том, чтобы корректно учесть в численной модели их качественное влияние на основные параметры ВЧНР-плазмы (плотность плазмы и температура электронов). Здесь мы не стави-

ли целью детальное исследование пространственной структуры самого «открытого» разряда, включая положительную связь между обратным дрейфом ионов из области плазмы и током пучка электронов. Экспериментально измеренный ток пучка использовался как входной параметр в модели.

Пучок электронов распространяется параллельно ВЧ-электродам. Поскольку он не сфокусирован в продольном направлении, в модели предполагается, что пучковые электроны рассеиваются в зоне ВЧ-плазмы по всему межэлектродному зазору $h=4 \text{ см}$. Полная плотность тока пучка рассчитывалась как $j=J_{beam}/2Rh$, где J_{beam} – суммарный ток пучка от трех модулей. Эта формула подразумевает, что три пучковых модуля эффективно перекрывают всю 2D пространственную область ВЧ-плазмы, в результате чего эффективная плотность пучковых электронов примерно постоянна по всей этой области. Эта оценка адекватно подтверждается экспериментальными данными по длине деградации пучка электронов. В самой модели мы не рассматриваем деградацию энергии пучковых электронов, они учитываются только как дополнительный источник ионизации для вторичных электронов со скоростью $R_{beam}=\sigma_{ion}^e jN/e$, где σ_{ion}^e – сечение ионизации аргона пучковыми электронами с энергией ϵ , N – плотность атомов аргона. Пучок предполагается моноэнергетичным с энергией $\epsilon=1.5 \text{ кэВ}$. Начальное распределение вторичных электронов по энергиям предполагалось аналогичным используемому в [10].

Результаты

Было проведено исследование свойств и характеристик плазмы ВЧНР с ионизацией электронным пучком, таких как температура электронов, плотность плазмы, ФРЭЭ и ФРИЭ. Плазма такого типа представляет большой интерес для задач микроэлектроники, в частности для бездефектной функционализации нанопористых материалов с низкой диэлектрической проницае-

мостью [10]. Преимущество плазмы ВЧНР с дополнительной ионизацией электронным пучком заключается в том, что в ней возможно получение ионов очень низких энергий (порядка нескольких электронвольт) с сохранением возможности независимого управления параметрами плазмы. Полученные результаты представлены в виде сравнительного анализа данных измерений в трех типах плазмы: плазмы электронного пучка, ВЧ-плазмы и ВЧНР-плазмы с дополнительной ионизацией электронным пучком.

Результаты измерений плотности плазмы и температуры электронов, а также результаты моделирования представлены на рис. 3 в зависимости от ВЧ-мощности (81 МГц) в случае ВЧНР-плазмы с дополнительной ионизацией электронным пучком и ВЧ-плазмы. Без электронного пучка плотность ВЧ-плазмы (рис. 3а), как и ожидалось, растет с увеличением вложенной мощности на частоте 81 МГц, что показывают как экспериментальные измерения, так и результаты расчета МЧЯ МКС. Добавление к ВЧ-плазме электронного пучка приводит к резкому скачку плотности плазмы в 3-4 раза, при этом тренд плотности такой плазмы с ростом вложенной ВЧ-мощности сохраняется, что подтверждается и измерениями, и моделированием. Наименьшее значение температуры электронов (рис. 3б) было получено в плазме электронного

пучка, в ВЧ-плазме температура электронов была значительно выше. Включение электронного пучка заметно снижает температуру электронов.

На рис. 4 изображены ФРЭЭ, полученные для ВЧ-плазмы (мощность на частоте 81 МГц – 10 Вт), ВЧНР-плазмы с электронным пучком и плазмы электронного пучка. Для каждого случая приведены две ФРЭЭ: одна – измеренная зондом Ленгмюра, другая – рассчитанная с помощью МЧЯ МКС-модели.

В случае плазмы электронного пучка обе ФРЭЭ характеризуются наименьшей температурой «тела» функции ~0.2–0.4 эВ. В случае ВЧ-плазмы ФРЭЭ имеет максвелловскую форму, а температура «тела» функции значительно выше. Отличия между результатами измерений и расчета

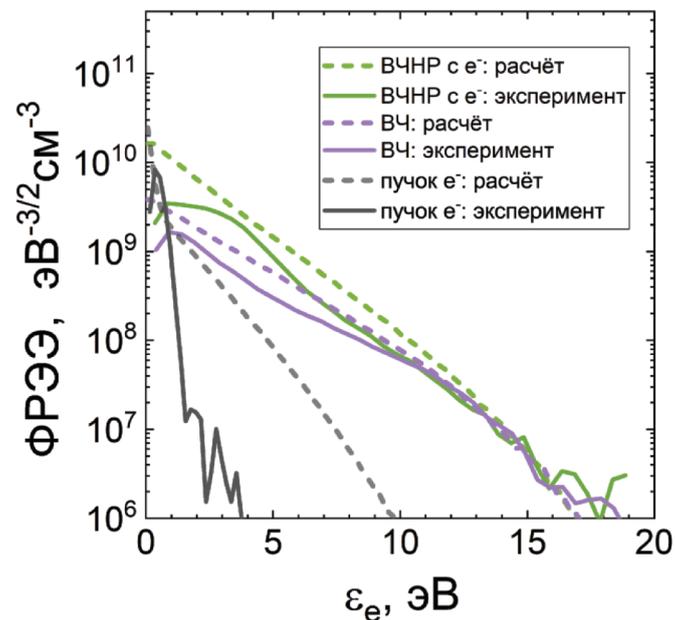


Рис. 4. ФРЭЭ, измеренные зондом Ленгмюра и рассчитанные с помощью МЧЯ МКС-модели, в трех видах плазмы: ВЧ-плазма (мощность на частоте 81 МГц – 10 Вт), ВЧНР-плазма с электронным пучком и плазма электронного пучка. Давление аргона – 100 мТорр.

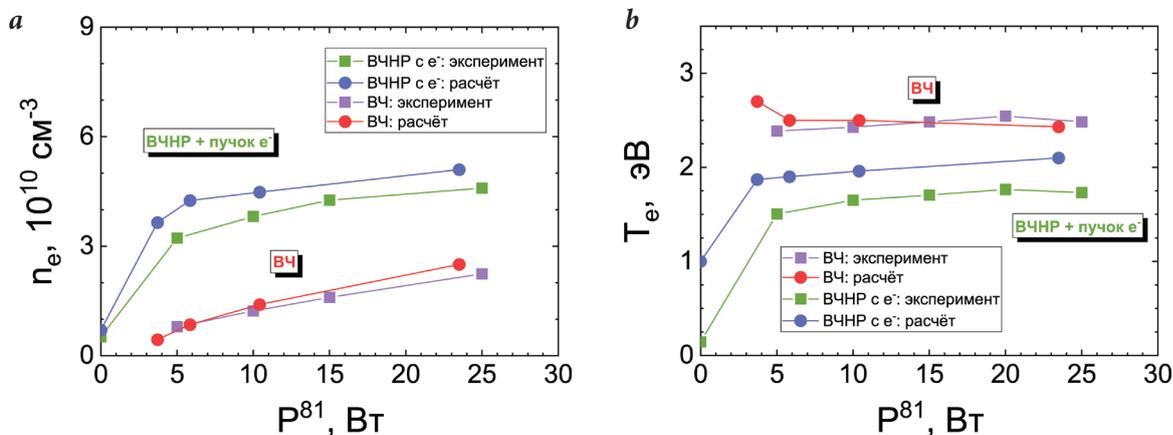


Рис. 3. Плотность плазмы n_e (а), измеренная *hairpin* СВЧ-зондом и рассчитанная с помощью МЧЯ МКС-модели, и температура электронов T_e (б) как функция ВЧ-мощности на частоте 81 МГц P_{81} (0–25 Вт). Результаты получены в случае ВЧ-плазмы и ВЧНР-плазмы с ионизацией электронным пучком. Случай ВЧ-мощности «0 Вт» соответствует плазме электронного пучка. Давление газа – 100 мТорр.

в низкоэнергетичной части функции могут быть объяснены эффектом стока электронов на зонд, а также неполной ВЧ-компенсацией зонда, что приводит к искажениям измерений в энергетической области 0–3 эВ.

В случае ВЧНР-плазмы с включенным электронным пучком ФРЭЭ также имеют форму, близкую к максвелловскому распределению, однако «тело» функций характеризуется меньшей температурой электронов, чем в случае ВЧ-плазмы без электронного пучка. Еще одна особенность измеренных ФРЭЭ в ВЧНР-плазме с электронным пучком и просто ВЧ-плазме заключается в том, что их форма является в некоторой степени двухтемпературной (бимаквелловской), причем в случае с пучком это проявляется более явно. Это может быть следствием того, что в случае с электронным пучком количество холодных электронов больше, чем в ВЧ-плазме.

На рис. 5 представлены ФРИЭ, измеренные сеточным анализатором энергии ионов, помещенным на электрод в плазму электронного пучка (рис. 5а), в ВЧНР-плазму с электронным пучком и ВЧ-плазму (рис. 5b и 5c).

В случае плазмы электронного пучка (рис. 5а) пик ФРИЭ находится на 6 эВ при плавающем электроде и на 2 эВ при заземленном. В ВЧ-плазме при мощности 10 Вт (рис. 5b) пик ФРИЭ в аналогичных условиях находится на 18 и 22 эВ соответственно. Включение электронного пучка приводит к сдвигу пика ФРИЭ в ВЧ-плазме на 4–6 В в сторону меньших энергий. В случае ВЧ-плазмы при ВЧ-мощности 25 Вт электронный пучок в соответствующих условиях сдвигает пик ФРИЭ на 2–4 В. Таким

образом, чем выше ВЧ-мощность, тем меньше наблюдаемый эффект уменьшения энергии ионов от использования электронного пучка. Подобное снижение влияния пучка на энергию ионов наблюдается и при увеличении амплитуды ВЧ-смещения (рис. 5b и 5c).

Заключение

Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволяют сделать следующие выводы:

- плазма ВЧНР с ионизацией электронным пучком может использоваться для получения более низкой температуры электронов, чем в классической ВЧ-плазме, и, соответственно, для получения ионов более низких энергий;
- параметрами плазмы ВЧНР можно управлять: плотностью плазмы – варьируя ВЧ-мощность на частоте, используемой для генерации разряда (81 МГц в рассмотренном случае), ФРЭЭ и ФРИЭ – варьируя соотношение вкладов ВЧ-мощности, мощности ВЧ-смещения и мощности электронного пучка.

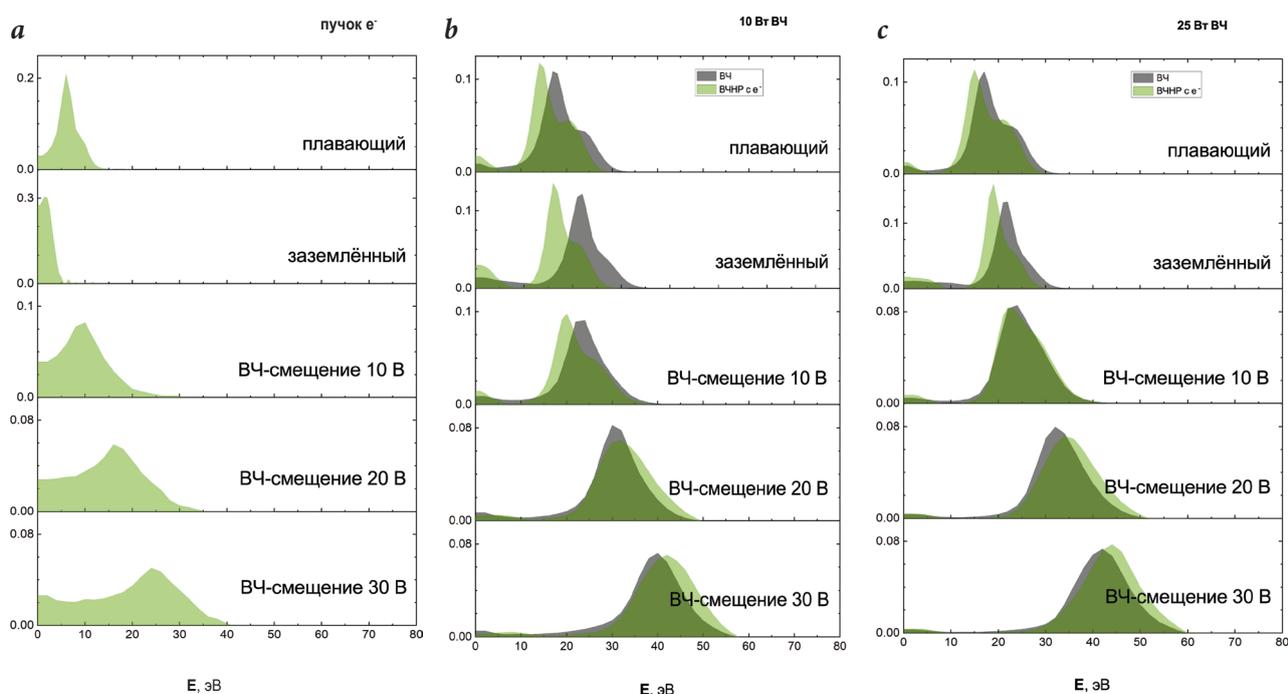


Рис. 5. ФРИЭ, измеренные сеточным анализатором энергии ионов в плазме электронного пучка (а) и в ВЧ-плазме при ВЧ-мощности 10 Вт (b) и 25 Вт (с). Показаны ФРИЭ, измеренные в ВЧ-плазме (серым цветом) (b) и в ВЧНР-плазме с электронным пучком (зеленым цветом) (с). Каждый подрисунк содержит 5 секций, которые соответствуют (сверху вниз) случаям плавающего, заземленного и ВЧ смещенного электродов (параметры ВЧ-смещения: амплитуда – 10, 20 и 30 В соответственно и частота – 12 МГц). Давление аргона – 100 мТорр.

Литература

1. T. Faraz, K. Arts, S. Karwal, H.C.M. Knoop, W.M.M. Kessels
Plasma Sources Sci. Technol., 2019, **28**(2), 24002.
DOI: 10.1088/1361-6595/aaf2c7.
2. S.G. Walton, D.R. Boris, S.C. Hernandez, E.H. Lock, Tz.B. Petrova,
G.M. Petrov, R.F. Fernsler
ECS J. Solid State Sci. Technol., 2015, **4**(6), N5033.
DOI: 10.1149/2.0071506jss.
3. R.A. Meger, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, M. Lampe,
D. Leonhardt, W.M. Manheimer, D.P. Murphy, S.G. Walton
Phys. Plasmas, 2001, **8**(5), 2558. DOI: 10.1063/1.1345506.
4. D. Leonhardt, C. Muratore, S. G. Walton
IEEE Trans. Plasma Sci., 2005, **33**(2), 783.
DOI: 10.1109/TPS.2005.844609.
5. D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov, S.G. Walton
J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film., 2016, **35**(1), 01A104.
DOI: 10.1116/1.4971416.
6. S.G. Walton, S.C. Hernández, D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov
J. Phys. D: Appl. Phys., 2017, **50**(35), 354001.
DOI: 10.1088/1361-6463/AA7D12.
7. D.R. Boris, S.G. Walton
J. Vac. Sci. Technol. A, 2018, **36**(6), 060601. DOI: 10.1116/1.5053615.
8. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks
Plasma Sources Sci. Technol., 2015, **25**(1), 015001.
DOI: 10.1088/0963-0252/25/1/015001.
9. D.B. Zolotukhin, M.I. Lomaev, E.M. Oks, A.V. Tyunkov,
Y.G. Yushkov
Plasma Sources Sci. Technol., 2019, **28**(3), 035018.
DOI: 10.1088/1361-6595/ab0942.
10. A.P. Palov, O.V. Proshina, T.V. Rakhimova, A.T. Rakhimov,
E.N. Voronina
Plasma Process. Polym., 2021, **18**(7), 2100007.
DOI: 10.1002/ppap.202100007.
11. K.D. Schatz, D.N. Ruzic
Plasma Sources Sci. Technol., 1993, **2**(2), 100.
DOI: 10.1088/0963-0252/2/2/005.
12. M.J. Kushner, W.Z. Collison, D.N. Ruzic
J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film., 1996, **14**(4), 2094.
DOI: 10.1116/1.580086.
13. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg
Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, USA, NJ,
Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 757 pp.
14. C. Charles, A.W. Degeling, T.E. Sheridan, J.H. Harris,
M.A. Lieberman, R.W. Boswell
Phys. Plasmas, 2000, **7**(12), 5232.
DOI: 10.1063/1.1322557.
15. M. Bogdanova, D. Lopaev, T. Rakhimova, D. Voloshin, A. Zotovich,
S. Zyryanov
Plasma Sources Sci. Technol., 2021, **30**(7), 075020.
DOI: 10.1088/1361-6595/abf71b.
16. A.S. Kovalev, Y.A. Mankelevich, E.A. Muratov, A.T. Rakhimov,
N.V. Suetin
J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film., 1992, **10**(4), 1086.
DOI: 10.1116/1.578206.
17. A.I. Zotovich, D.V. Lopaev, M.A. Bogdanova, S.M. Zyryanov,
A.T. Rakhimov
J. Phys. D: Appl. Phys., 2022, **55**(31), 315201.
DOI: 10.1088/1361-6463/ac6712.
18. R.B. Piejak, J. Al-Kuzee, N.S.J. Braithwaite
Plasma Sources Sci. Technol., 2005, **14**(4), 734.
DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/012.
19. T.V. Rakhimova, O.V. Braginsky, V.V. Ivanov, A.S. Kovalev,
D.V. Lopaev, Yu.A. Mankelevich, M.A. Olevanov, O.V. Proshina,
A.T. Rakhimov, A.N. Vasilieva, D.G. Voloshin
IEEE Trans. Plasma Sci., 2007, **35**(5), 1229.
DOI: 10.1109/TPS.2007.905201.
20. O.V. Proshina, T.V. Rakhimova, A.S. Kovalev,
A. Vasilieva, A. Zotovich, S.M. Zyryanov,
A.T. Rakhimov
Plasma Sources Sci. Technol., 2020, **29**(1), 015015.
DOI: 10.1088/1361-6595/ab5adb.

English

Analysis of the Possibility of Independent Control of Various Plasma Parameters of an RF Non-Self-Sustained Plasma Discharge with Additional Ionization by an Electron Beam*

Maria A. Bogdanova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University
1-2 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
bogdanova.masha91@gmail.com

Dmitry V. Lopaev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University
1-2 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
d.lopaev@gmail.com

Olga V. Proshina

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University
1-2 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
oproshina@mics.msu.ru

Tatyana V. Rakhimova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University
1-2 Leninskie Gory, GSP-1,
Moscow, 119991, Russia
trakhimova@mics.msu.ru

Alexander T. Rakhimov

Professor,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University
1-2 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow,
119991, Russia
arakhimov@mics.msu.ru

Abstract

This paper presents the study results of an RF non-self-sustained plasma discharge with additional ionization by electron beams. Using a complex experimental-theoretical approach it was shown that the parameters of such plasma differ from those of a conventional RF plasma as well as pure electron beam plasma. The study has confirmed that RF plasma with electron beam ionization can be used to obtain a lower electron temperature than in classical RF plasma and, accordingly, to obtain lower energy ions. RF non-self-sustained discharge plasma parameters can be controlled: plasma density – by varying the RF power at the discharge generation frequency; energy spectra of electrons and ions – by varying the contribution ratio of the RF power, the RF-bias power, and the electron beam power. The result obtained is also promising for the possibility of precision surface treatment with low ion energy plasma used in atomic layer etching and deposition technologies.

Keywords: RF plasma, electron beam, non-self-sustained discharge, plasma parameters.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-29-27001).*

Images & Tables

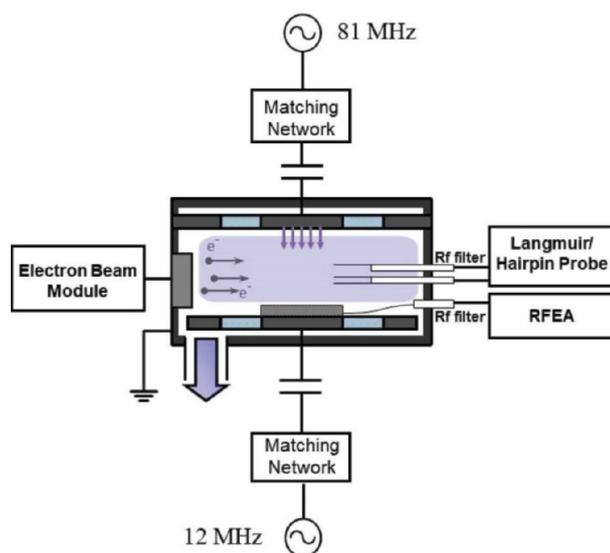


Fig. 1. Experimental setup.

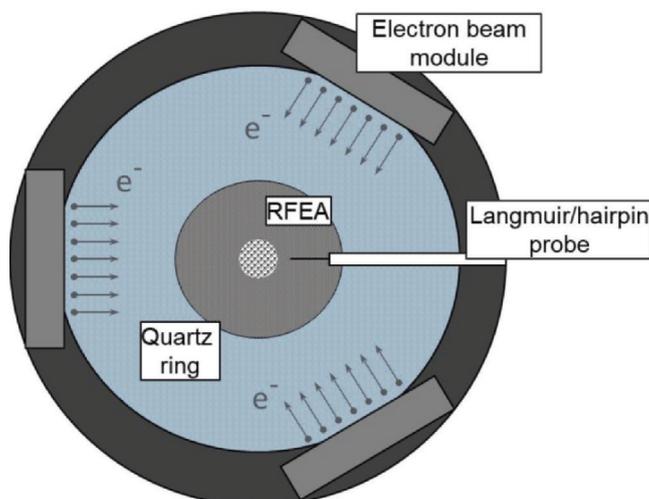


Fig. 2. Top view of the discharge chamber.

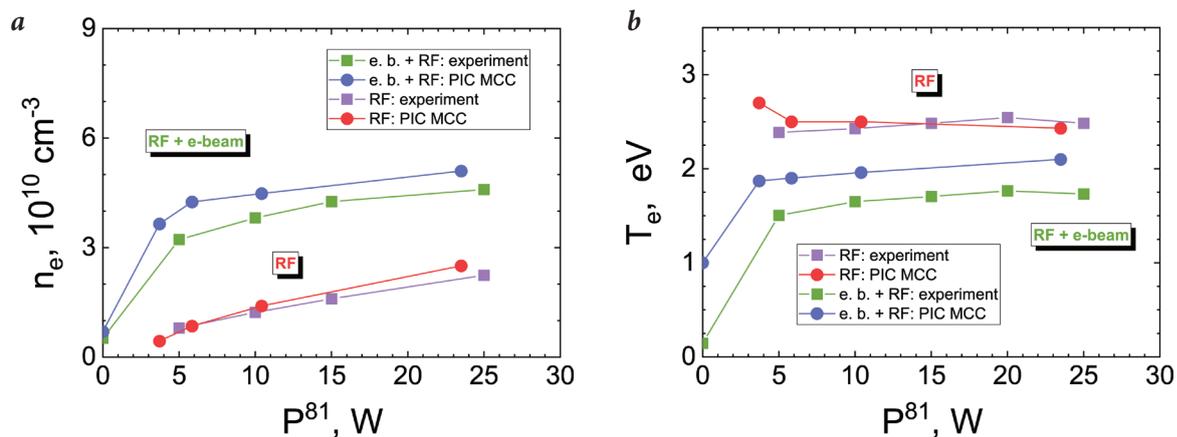


Fig. 3. Plasma density n_e (a), measured by the hairpin-probe and calculated using the PIC MCC model, and electron temperature T_e (b) as a function of RF power at a frequency of 81 MHz P_{81} (0–25 W). The results are obtained in the case of RF plasma and RF plasma with additional ionization by an electron beam. The case of “0 W” RF power corresponds to the electron beam plasma. Gas pressure is 100 mTorr.

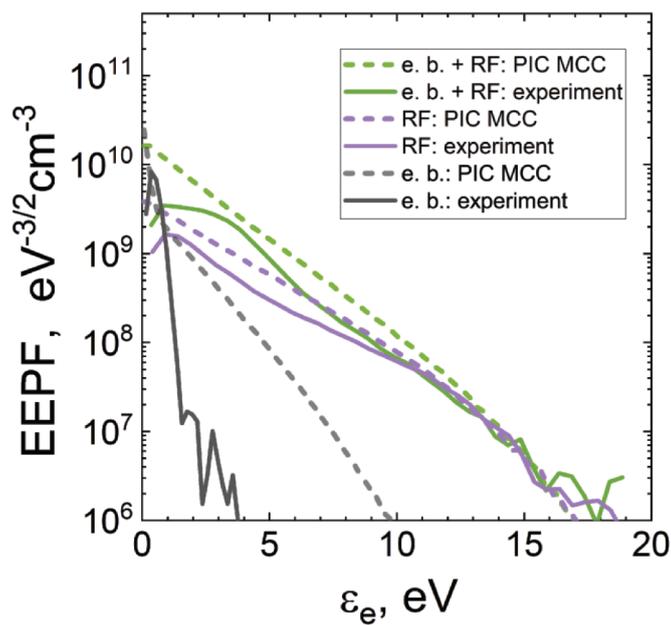


Fig. 4. The EPPFs measured by the Langmuir probe and calculated using the PIC MCC model in 3 types of plasma: RF plasma (RF power at a frequency of 81 MHz – 10 W), RF plasma with additional ionization by an electron beam and electron beam plasma. Ar pressure is 100 mTorr.

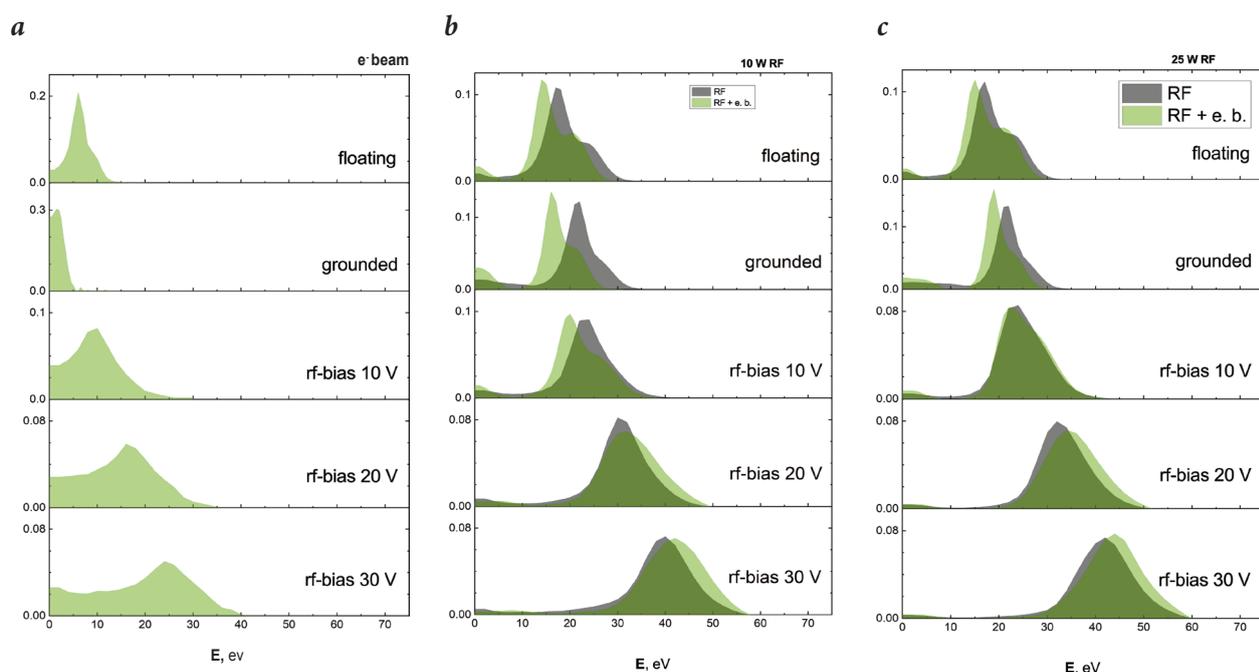


Fig. 5. IEDs measured by the retarded field energy analyzer (RFEA) in electron beam plasma (a) and in RF plasma at an RF power of 10 W (b) and 25 W (c). Figures b and c show the IEDs, measured in RF plasma (grey color) and RF plasma with an electron beam (green color). Each figure contains 5 sections, which correspond (from top to bottom) to the cases of floating, grounded and RF biased electrode (RF bias parameters are: the voltage amplitude – 10, 20 and 30 V, correspondingly, and the frequency is 12 MHz). Ar pressure is 100 mTorr.

References

1. T. Faraz, K. Arts, S. Karwal, H.C.M. Knoops, W.M.M. Kessels *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2019, **28**(2), 24002. DOI: 10.1088/1361-6595/aaf2c7.
2. S.G. Walton, D.R. Boris, S.C. Hernandez, E.H. Lock, Tz.B. Petrova, G.M. Petrov, R.F. Fernsler *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2015, **4**(6), N5033. DOI: 10.1149/2.0071506jss.
3. R.A. Meger, D.D. Blackwell, R.F. Fernsler, M. Lampe, D. Leonhardt, W.M. Manheimer, D.P. Murphy, S.G. Walton *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(5), 2558. DOI: 10.1063/1.1345506.
4. D. Leonhardt, C. Muratore, S. G. Walton *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2005, **33**(2), 783. DOI: 10.1109/TPS.2005.8446609.
5. D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov, S.G. Walton *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, 2016, **35**(1), 01A104. DOI: 10.1116/1.4971416.
6. S.G. Walton, S.C. Hernández, D.R. Boris, T.B. Petrova, G.M. Petrov *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, **50**(35), 354001. DOI: 10.1088/1361-6463/AA7D12.
7. D.R. Boris, S.G. Walton *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2018, **36**(6), 060601. DOI: 10.1116/1.5053615.
8. D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2015, **25**(1), 015001. DOI: 10.1088/0963-0252/25/1/015001.
9. D.B. Zolotukhin, M.I. Lomaev, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Y.G. Yushkov *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2019, **28**(3), 035018. DOI: 10.1088/1361-6595/ab0942.
10. A.P. Palov, O.V. Proshina, T.V. Rakhimova, A.T. Rakhimov, E.N. Voronina *Plasma Process. Polym.*, 2021, **18**(7), 2100007. DOI: 10.1002/ppap.202100007.
11. K.D. Schatz, D.N. Ruzic *Plasma Sources Sci. Technol.*, 1993, **2**(2), 100. DOI: 10.1088/0963-0252/2/2/005.
12. M.J. Kushner, W.Z. Collison, D.N. Ruzic *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, 1996, **14**(4), 2094. DOI: 10.1116/1.580086.
13. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, USA, NJ, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 757 pp.
14. C. Charles, A.W. Degeling, T.E. Sheridan, J.H. Harris, M.A. Lieberman, R.W. Boswell *Phys. Plasmas*, 2000, **7**(12), 5232. DOI: 10.1063/1.1322557.
15. M. Bogdanova, D. Lopaev, T. Rakhimova, D. Voloshin, A. Zotovich, S. Zyryanov *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2021, **30**(7), 075020. DOI: 10.1088/1361-6595/abf71b.
16. A.S. Kovalev, Y.A. Mankelevich, E.A. Muratov, A.T. Rakhimov, N.V. Suetin *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, 1992, **10**(4), 1086. DOI: 10.1116/1.578206.
17. A.I. Zotovich, D.V. Lopaev, M.A. Bogdanova, S.M. Zyryanov, A.T. Rakhimov *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, **55**(31), 315201. DOI: 10.1088/1361-6463/ac6712.
18. R.B. Piejak, J. Al-Kuzee, N.S.J. Braithwaite *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2005, **14**(4), 734. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/012.
19. T.V. Rakhimova, O.V. Braginsky, V.V. Ivanov, A.S. Kovalev, D.V. Lopaev, Yu.A. Mankelevich, M.A. Olevanov, O.V. Proshina, A.T. Rakhimov, A.N. Vasilieva, D.G. Voloshin *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2007, **35**(5), 1229. DOI: 10.1109/TPS.2007.905201.
20. O.V. Proshina, T.V. Rakhimova, A.S. Kovalev, A. Vasilieva, A. Zotovich, S.M. Zyryanov, A.T. Rakhimov *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2020, **29**(1), 015015. DOI: 10.1088/1361-6595/ab5adb.