

Многосеточные энергоанализаторы задерживающего потенциала для измерения функции распределения ионов по энергиям из плазмы высокочастотного емкостного разряда

А. А. Кобелев, Н. А. Андрианов, Е. М. Хилькевич, Т. В. Черноизюмская, А. С. Смирнов

Настоящая работа посвящена численному и экспериментальному исследованию влияния элементов конструкции энергоанализатора на разрешающую способность прибора при измерении функции распределения ионов по энергии, ускоренных в приэлектродном слое высокочастотного емкостного разряда. С помощью трехмерного численного моделирования движения заряженных частиц показано, что аппаратная функция прибора сильно зависит от взаимной ориентации ячеек сеток. Показано, что уширение энергетического спектра заряженных частиц в энергоанализаторе в большой мере зависит от величины провисания потенциала в ячейках анализирующей сетки. Приведены формулы для количественной оценки уширения энергетического спектра заряженных частиц для энергоанализаторов, в которых используются сетки с квадратными или шестиугольными ячейками.

Ключевые слова: многосеточный энергоанализатор задерживающего потенциала, высокочастотный емкостный разряд, источник электронов.

Введение

Планарные многосеточные энергоанализаторы задерживающего потенциала широко используются для диагностики потока заряженных частиц из газоразрядной плазмы на поверхность твердого тела [1–6] и, в частности, для измерения функции распределения ионов по энергии, ускоренных в приэлектродном слое высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда [3–6]. Энергия ионов, бомбардирующих поверхность твердого тела, является одним из ключевых параметров, который необходимо измерять и контролировать при разработке технологий плазмохимического осажде-

ния пленок [7–9] или травления различных материалов [10, 11, 12].

Метод измерения энергии заряженных частиц с помощью энергоанализатора задерживающего потенциала основан на использовании тормозящего электрического поля [13]. В процессе измерений на анализирующую сетку подается задерживающий потенциал, тормозящий заряженные частицы. Частицы с энергией выше, чем задерживающий потенциальный барьер, формируют ток коллектора. Для определения функции распределения частиц по энергиям (дифференциальный энергетический спектр) необходимо дифференцировать полученную зависимость тока коллектора от величины потенциального барьера (кривую задержки).

Построенный на данном принципе многосеточный энергоанализатор задерживающего потенциала, как правило, представляет собой коллектор и набор тонких параллельных металлических сеток, на каждую из которых подан соответствующий потенциал [1–4].

Конструкция энергоанализатора должна удовлетворять ряду условий, некоторые из которых могут противоречить друг другу. В частности, анализатор должен иметь достаточно малые размеры и расстояния между сетками по сравнению с длиной пробега анализируемых частиц, чтобы проводить измерения в газоразрядной камере, где отсутствует высокий вакуум. С другой стороны, с уменьшением зазора между сетками снижается

Кобелев Антон Андреевич¹, аспирант.
Андрианов Николай Александрович², старший инженер-технолог.
Хилькевич Евгений Михайлович³, научный сотрудник.
Черноизюмская Татьяна Владимировна¹, программист I кат.
Смирнов Александр Сергеевич¹, профессор, д.ф.-м.н.
¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.
E-mail: kobelev_anton@mail.ru
² АО «Светлана-Рост».
Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27.
³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.
Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

Статья поступила в редакцию 8 августа 2017 г.

© Кобелев А. А., Андрианов Н. А., Хилькевич Е. М., Черноизюмская Т. В., Смирнов А. С., 2017

разрешающая способность прибора [14, 15] и увеличивается вероятность пробоя.

В процессе измерений энергоанализатор должен обеспечивать хорошее разрешение по энергии. На точность измерения функции распределения существенно влияют следующие факторы. Во-первых, из-за конечного размера ячеек плоскость сетки не является эквипотенциальной – наблюдается «провисание» потенциала внутри ячейки (эффект электростатической линзы). При прохождении сетки частицей ее траектория искривляется, что приводит к изменению продольной и поперечной компонент скорости и, как следствие, к уширению энергетического спектра анализируемых частиц [2, 4, 14]. Во-вторых, из-за провисания потенциала в ячейках анализирующей сетки сквозь нее проходят частицы с энергией меньшей, чем задерживающий потенциал, что также приводит к уширению энергетического спектра. Уменьшение размеров ячеек сетки позволяет снизить провисание потенциала [14, 16], однако это приводит к уменьшению ее геометрической прозрачности и, как следствие, к снижению величины потока частиц на коллектор. В случае случайного расположения ячеек соседних сеток относительно друг друга, геометрическая прозрачность многосеточного анализатора может быть оценена как произведение геометрических прозрачностей каждой из сеток [17]. При этом уменьшение ячеек для всех сеток приведет к существенному падению величины тока коллектора и, соответственно, чувствительности прибора.

Для определения степени искажения в анализаторе энергетического спектра заряженных частиц используется понятие аппаратной функции. Аппаратной функцией энергоанализатора определяется как дифференциальный энергетический спектр моноэнергетических ионов с начальной энергией ε_0 , пролетевших через все сетки анализатора до коллектора. При этом в качестве меры уширения энергетического спектра в энергоанализаторе может быть использована величина $\Delta\varepsilon$ – ширина пика аппаратной функции на полувысоте, а разрешающая способность прибора определяется как $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$ [14].

Целью данной работы является численное и экспериментальное исследование влияния элементов конструкции на величину уширения энергетического спектра заряженных частиц в четырехсеточных энергоанализаторах для случаев измерения функции распределения ионов по энергиям, движущихся в слое ВЧЕ-разряда без столкновений с нейтральными частицами газа. Приведены зависимости уширения от величины напряжения, расстояния между сетками и размера ячеек анализирующей сетки. Показаны пути оптимизации характеристик прибора.

Численное моделирование

Процесс моделирования для каждого шага по потенциалу третьей сетки U_3 состоял из двух этапов. На первом этапе вычислялось распределение потенциала в объеме энергоанализатора с учетом трехмерной геометрии сеток при различном размере ячеек, толщине проволоки и взаимной ориентации сеток в пространстве (сдвиг и поворот относительно первой сетки). Для этого решалось уравнение Лапласа методом верхней последовательной релаксации [18]. На втором этапе рассчитывались траектории движения заряженных частиц в электрическом поле внутри анализатора без учета столкновений и влияния пространственного заряда. При попадании на проволоку сетки частицы удалялись из расчета. Эмиссия вторичных электронов с сеток и коллектора не учитывалась. Справедливость данного допущения обсуждается в разделе «Влияние эмиссии вторичных электронов с сеток энергоанализатора на форму кривой задержки». Считалось, что частицы с одинаковой энергией равномерно испускаются с поверхности эмиттера, расположенного перед первой сеткой анализатора, в направлении перпендикулярном плоскости сеток и коллектора. Это оправдано для случаев низких давлений порядка $1\div 10$ мТорр, когда длины свободного пробега ионов $\lambda_{ia} \gg L_{sh}$, где L_{sh} – толщина слоя ВЧЕ-разряда, т. е. ионы ускоряются в слое без столкновений с нейтральными частицами и приобретают среднюю энергию $\langle \varepsilon \rangle \approx q \langle U_{sh} \rangle$, где $\langle U_{sh} \rangle$ – среднее по ВЧ периоду падение напряжения в слое, составляющее от нескольких десятков до нескольких сотен вольт. При этом ионы падают перпендикулярно поверхности твердого тела, так как их скорости лежат в малом телесном угле $\Omega \sim T_i / \langle \varepsilon \rangle$, где T_i – температура ионов, равная температуре газа.

Эксперимент

Для проверки справедливости расчетов уширения энергетического спектра частиц в анализаторе были проведены экспериментальные измерения функции распределения электронов по энергиям из источника электронов с помощью четырехсеточного энергоанализатора (рис. 1). В источнике в качестве эмиттера использовалась вольфрамовая накальная нить (длина 7 мм). Между верхней пластиной с эмиттером и заземленным основанием источника подавалось напряжение $U_{acc} = -70$ В. Таким образом, на выходе из источника имеется поток термоэлектронов, ускоренных потенциалом U_{acc} . Падение напряжения на накальной нити устанавливалось равным 2 В. В зависимости от знака приложенного напряжения, элек-

троны могли приобретать энергию в интервале 68–70 эВ или 70–72 эВ, т. е. в зависимости от места эмиссии частиц с нити. Диафрагма – пластина с отверстием диаметра 1,5 мм (рис. 1) – предназначена для ограничения поперечного сечения электронного пучка. Отверстие диафрагмы было закрыто сеткой для снижения искривления траекторий движения электронов из-за провисания потенциала. Между диафрагмой и основанием источника подавалось напряжение $U_d = -35$ В. Расстояние между эмиттером и диафрагмой составляет 5,5 мм, между диафрагмой и основанием источника – 11,5 мм.

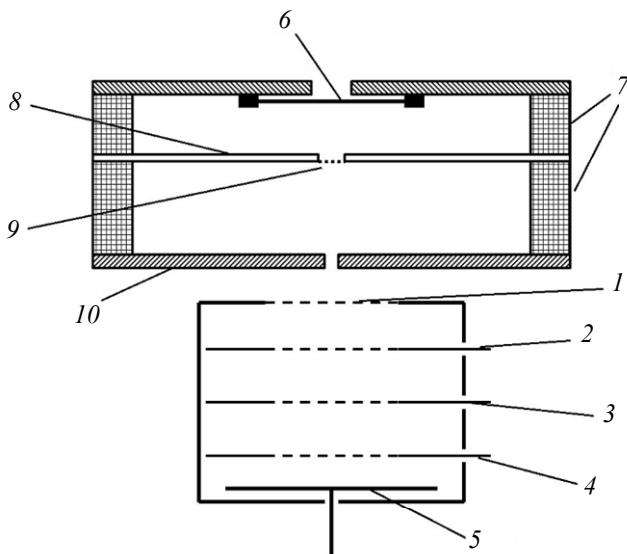


Рис. 1. Конструкция источника электронов и четырехсеточного энергоанализатора, использованных в эксперименте. Энергоанализатор: 1 – первая сетка анализатора (заземлена); 2 – вторая сетка анализатора; 3 – третья (анализирующая) сетка анализатора; 4 – четвертая сетка анализатора; 5 – коллектор. Источник: 6 – эмиттер (вольфрамовая нить); 7 – диэлектрические вставки между проводящими элементами источника электронов; 8 – проводящая пластина с отверстием (диафрагма); 9 – сетка; 10 – заземленная проводящая пластина (основание источника).

В процессе измерений электроны поступали в энергоанализатор через первую сетку (считая со стороны источника электронов), которая заземлена (см. рис. 1). Использование данной сетки позволяет снизить искажение траекторий движения электронов из-за провисания потенциала на входе в анализатор. При измерении функции распределения ионов по энергиям, ускоренных в слое ВЧЕ-разряда около заземленного электрода, на вторую сетку подается отрицательный потенциал $U_2 < 0$, по модулю превышающий амплитуду (симметричный ВЧЕ-разряд) или удвоенную амплитуду (несимметричный ВЧЕ-разряд) приложенного ВЧ-напряжения [5]. Это позволяет отсеять электроны,

в том числе быстрые, которые образовались в результате ион-электронной эмиссии с противоположного электрода и ускорились в приэлектродном слое [19], и снизить искажение результатов измерений. Для диагностики электронов на заземленном электроде потенциал второй сетки устанавливается $U_2 > 0$ и по модулю превышающий половину амплитудного значения приложенного ВЧ-напряжения.

В настоящем эксперименте с источником электронов потенциал U_2 варьировался в диапазоне $-60 \div 120$ В с целью определить влияние потенциала второй сетки на ширину на полувысоте измеренной функции распределения электронов по энергиям. При этом ионизация внутри источника и анализатора отсутствовала, и поток ионов на коллектор был равен нулю. При потенциале второй сетки $U_2 = -80$ В (случай полностью запертого потока электронов на коллектор) регистрировался малый электронный ток 0,4 нА, соответствующий порогу чувствительности измерительного усилителя тока. В эксперименте давление в камере составляло менее 10^{-4} Торр, длина свободного пробега электронов для неупругих потерь (ионизация) с энергиями $70 \div 190$ эВ составила порядка 10 м (сечение процесса $\sigma_i = 2,5 \times 10^{-20}$ м² выбрано для азота как основного компонента воздуха), что в 25 раз больше расстояния в 3,7 см между эмиттером источника и коллектором энергоанализатора. Таким образом, ионизация электронным ударом внутри источника и энергоанализатора отсутствовала. На третью (анализирующую) сетку подавался тормозящий электроны потенциал U_3 в диапазоне $0 \div -100$ В. Функции распределения электронов по энергиям определялись путем дифференцирования полученных зависимостей тока коллектора от величины задерживающего потенциала U_3 (кривых задержки). Четвертая сетка анализатора была предназначена для запираания потока вторичных электронов с коллектора. На неё подавался отрицательный потенциал -15 В [4, 14].

Для измерения функций распределения электронов из источника использовались два различных четырехсеточных энергоанализатора. В энергоанализаторе № 1 все сетки идентичны друг другу: толщина проволоки 42 мкм, ячейка представляет собой квадрат со стороной 126 мкм. Геометрическая прозрачность каждой сетки составляет 56,3 %. Расстояние между первой и второй сеткой равно 2 мм, второй и третьей (анализирующей) сеткой – 2,5 мм, третьей и четвертой сеткой – 1,5 мм. Коллектор имел нулевой потенциал и был подключен к измерительному усилителю тока.

Ячейки сеток ориентированы относительно друг друга случайным образом. В процессе измерений источник располагался на нижнем заземленном электроде внутри газоразрядной камеры. Энергоанализатор № 1 располагался в отдельной высоковакуумной камере, отделенной от разрядной камеры электродом. Поток электронов попадал в энергоанализатор через отверстие (диаметр 1–1,5 мм) в электроде.

Во втором энергоанализаторе первая сетка идентична сеткам энергоанализатора № 1. Остальные сетки были изготовлены из золота с использованием технологии плазмохимического травления. Ячейки сеток имеют форму правильного шестиугольника со стороной 27,5 мкм, толщина проволоки (металлизации) 10 мкм (см. рис. 2). Геометрическая прозрачность такой сетки составляет примерно 70 %.

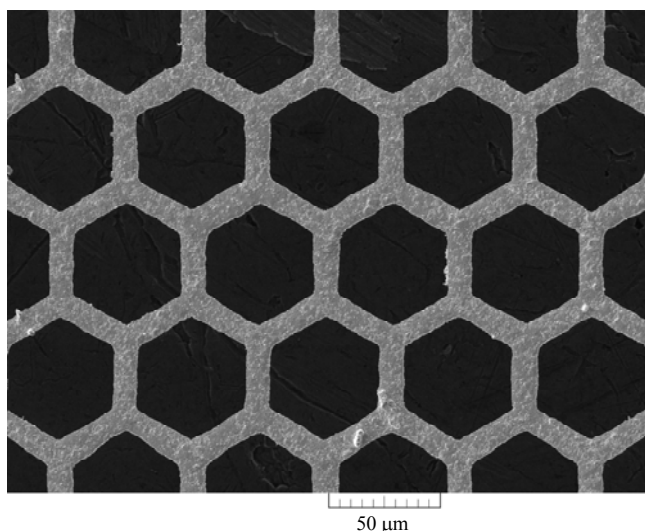


Рис. 2. Изображение сеток с шестиугольными ячейками в энергоанализаторе № 2, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Процесс изготовления данных сеток представлен несколькими технологическими этапами: фотолитография шестигранных ячеек на кремниевой подложке с последующим электронно-лучевым напылением металла и его гальваническим усилением; механическое уменьшение толщины пластины и резка на чипы (сетки) с последующим плазмохимическим вытравливанием кремния в среде SF_6/O_2 через металлическую маску сеток. При сборке энергоанализатора № 2 ячейки сеток были ориентированы относительно друг друга случайным образом. Расстояния между сетками составляли 600 мкм. В процессе измерений источник электронов размещался непосредственно

на корпусе энергоанализатора № 2, который, в свою очередь, располагался на нижнем заземленном электроде внутри газоразрядной камеры.

Результаты численного моделирования: влияние взаимной ориентации сеток энергоанализатора

Трехмерные численные расчеты проводились для четырехсеточного анализатора при различном расположении идентичных друг другу сеток с квадратными ячейками со стороной 130 мкм и толщиной проволоки 50 мкм. Апертура энергоанализатора составляла 0,2 см, что соответствует примерно 11 периодам сетки. На рис. 3 представлены вычисленные кривые задержки. Из рисунка видно, что максимальный ток коллектора формируется, когда проволоки и ячейки всех сеток находятся строго одна под другой, т. е. полностью совмещены. При таком расположении проволок сеток траектория частицы определяется только тем, в какую точку в ячейке первой сетки попала частица. Траектории частиц, прошедших сквозь разные ячейки первой сетки, но в точках с одинаковыми координатами относительно центров этих ячеек, оказываются одинаковыми. С этой точки зрения все ячейки такой сетки можно считать эквивалентными. Измеряемый ток является суммой одинаковых потоков заряженных частиц через все ячейки анализатора:

$$I_c(U_3) = \sum_{k=0}^N i_k(U_3) = N \times i_0(U_3), \quad (1)$$

где U_3 – напряжение на анализирующей (третьей) сетке; $I_c(U_3)$ – полный ток коллектора; $i_k(U_3)$ – вклад в полный ток коллектора частиц, прошедших сквозь ячейку с индексом k ; N – число ячеек энергоанализатора. В данном этом случае от апертуры анализатора зависит только величина тока кривой задержки, но не её форма.

Если ячейки идентичных сеток сдвинуты друг относительно друга на некоторое расстояние больше или порядка толщины проволоки в плоскости XU (параллельной плоскости сеток), но не повернуты, ситуация оказывается схожей, т. е. справедлива формула (1). Однако в данном случае величина тока через ячейку сильно зависит от взаимного расположения сеток из-за попадания частиц на поверхности проволок сеток, лежащих за первой сеткой, что может приводить к сильному искажению кривых задержки (рис. 3, кривая 4).

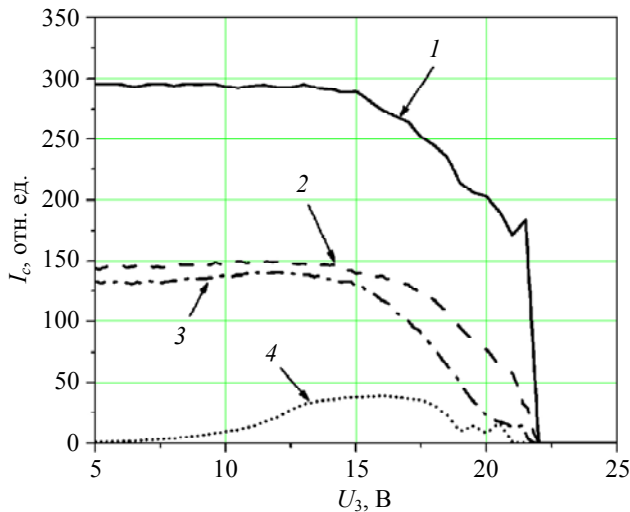


Рис. 3. Кривые задержки при различном взаимном расположении ячеек сеток: 1 – ячейки строго друг над другом (геометрическая прозрачность: 0,52); 2 и 3 – ячейки второй сетки повернуты относительно первой сетки на угол $\varphi = 25,7$ градусов, апертура составляет 11 (геометрическая прозрачность: 0,24) и 3 (геометрическая прозрачность: 0,23) периода первой сетки, соответственно; 4 – ячейки второй, третьей и четвертой сеток сдвинуты в плоскости XY (параллельной сеткам) относительно первой сетки на 30 и 100 мкм, 130 и 90 мкм, 20 и 40 мкм, соответственно (геометрическая прозрачность: 0,069).

Если используется энергоанализатор с сетками, повернутыми друг относительно друга в плоскости сеток (т. е. с сохранением параллельности коллектора, эмиттера и сеток), то ячейки первой сетки перестают быть эквивалентными друг другу по отношению к траектории заряженных частиц. К примеру, поворот второй сетки относительно первой на угол φ соответствует уменьшению периода по оси X для второй сетки с L_x до $L_x \cos(\varphi)$. Таким образом, сдвиг ячеек второй сетки относительно ячеек первой сетки становится различным. Это приводит к тому, что траектории частиц, попадающих в соседние ячейки первой сетки в точках с одинаковой координатой по оси X относительно центра ячейки, оказываются разными. Структура сдвига ячеек второй сетки относительно первой будет повторяться через каждые $N = N' \cos(\varphi)$ целых периодов первой сетки, где N' – целое число периодов второй (повернутой) сетки. При этом величина $\cos(\varphi)$ определяется с точностью до значения, соответствующего толщине проволоки сеток. Как правило, толщина проволоки составляет десятки процентов (в случае энергоанализатора № 1 и № 2 – 25 %) от периода сетки, поэтому значение косинуса целесообразно взять с точностью до 0,1. Если $\cos(\varphi) = 0,9$, то сдвиг ячеек будет повторяться через каждые $N = 9$ ячеек первой сетки. Число $N = 9$ соответствует оценке максимального необходимого числа периодов первой сетки, усреднение по которым позволяет существенно

снизить влияние поворота сеток на форму кривой задержки. Таким образом, если энергоанализатор имеет достаточно большую апертуру, ток кривой задержки оказывается равным

$$I_c(U_3) = \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^N i_k(U_3) = M N \langle i(U_3) \rangle, \quad (2)$$

где $\langle i(U_3) \rangle$ – средний по всем ячейкам вклад в ток кривой задержки от одной ячейки; N и M – полное число периодов первой сетки по оси X и Y , соответственно.

На рис. 3 (кривая 2) представлена вычисленная кривая задержки для случая, когда вторая сетка повернута относительно первой на 25,7 градусов ($\cos(\varphi) = 0,9$), апертура энергоанализатора составляет 11 периодов первой сетки. В данном случае апертура достаточно большая и кривая задержки практически идентична по форме кривой задержки для случая идеального совмещения ячеек всех сеток. Если апертура анализатора мала и составляет 3 периода первой сетки, то при усреднении по ячейкам анализатора зависимость от взаимного расположения сеток не исчезает. Это приводит к искажению формы вычисленной кривой задержки: появляется провал по току коллектора в диапазоне $U_3 = 16-22$ В (рис. 3, кривая 3). Таким образом, для снижения искажения формы измеренной кривой задержки необходимо, чтобы апертура энергоанализатора составляла более 10 периодов сетки с наибольшим размером ячейки и толщиной проволоки. Данные рассуждения справедливы для случаев перпендикулярного падения частиц на поверхность электрода, что характерно для ионов и быстрых вторичных электронов из плазмы ВЧЕ-разряда, длина пробега которых превышает характерный размер слоя и зазора между электродами, соответственно. Во всех случаях значение коллекторного тока в режиме насыщения уменьшается примерно пропорционально суммарной прозрачности сеток анализатора (см. рис. 3).

Результаты численного моделирования: зависимость уширения энергетического спектра от расстояния между сетками, размера ячеек и значения потенциала на сетках

Для определения параметрической зависимости уширения энергетического спектра анализируемых частиц, $\Delta\epsilon$, было проведено трехмерное численное моделирование четырехсеточного энергоанализатора с одинаковыми сетками с квадратными ячейками. Сетки и их ячейки были случайным образом ориентированы друг относительно друга. В качестве меры уширения $\Delta\epsilon$ была выбра-

на ширина пика на полувысоте для рассчитанного энергетического спектра изначально моноэнергетических частиц. Практически все рассчитанные аппаратные функции хорошо аппроксимируются гауссовой функцией. В процессе расчета варьировались следующие параметры: энергия ионов в диапазоне $10 \div 35$ эВ; потенциал на второй сетке, $U_2 = -120 \div 120$ В; расстояние между второй и третьей сеткой, $L_{23} = 0,75 \div 1,6$ мм; расстояние между третьей и четвертой сеткой, $L_{34} = 0,75 \div 1,6$ мм; сторона квадратной ячейки третьей сетки, $d_3 = 50 \div 210$ мкм. Расчет для электронов проводился при энергии частиц 70 эВ.

Уширение энергетического спектра определяется провисанием потенциала в ячейках третьей сетки анализатора, которое в свою очередь зависит от размера ячеек и разницы электрического поля перед и после данной сетки. В двумерном случае, когда сетки представлены бесконечно длинными и тонкими спицами, величина провисания в ячейках третьей сетки определяется соотношением [16]:

$$\Delta\varepsilon = \Delta U = \kappa d_3 (E_{23} - E_{34}) = \kappa d_3 \left(\frac{U_3 - U_2}{L_{23}} - \frac{U_4 - U_3}{L_{34}} \right), \quad (3)$$

где ΔU – разность между значениями потенциала на анализирующей сетке и в центре ячейки сетки; U_3 – потенциал третьей (анализирующей) сетки; U_2 и U_4 – потенциал второй и четвертой сетки, соответственно; L_{23} и L_{34} – расстояния между соответствующими сетками; $E_{23} = (U_3 - U_2)/L_{23}$ и $E_{34} = (U_4 - U_3)/L_{34}$ – электрические поля перед и после третьей сетки, соответственно; d_3 – размер ячейки третьей сетки; κ – численный коэффициент, равный $1/4\pi$ для двумерной сетки [16]. Формула (3) применима при $d_3 \ll L_{23}, L_{34}$.

На рис. 4 представлены результаты численного расчета уширения $\Delta\varepsilon$ при различных параметрах энергоанализатора. Для наглядности в качестве аргумента использован параметр $U_0 = d_3(E_{23} - E_{34})$.

В численных расчетах энергия ионов варьировалась с 10 до 35 эВ. Следовательно, необходимый задерживающий потенциал анализирующей сетки также возрастает с 10 до 35 В, что приводит к росту уширения $\Delta\varepsilon$ с 1,43 до 2,13 эВ (см. рис. 4, красные полые квадраты). Если потенциал второй сетки U_2 меняется с -100 до -20 В, то $\Delta\varepsilon$ уменьшается с 2,41 до 0,98 эВ, (рис. 4, красные круги). При рассмотрении численного расчета движения электронов в энергоанализаторе ($U_3 < 0$) изменение потенциала U_2 с 60 до -60 В приводит к уменьшению уширения энергетического спектра $\Delta\varepsilon$ с 1,1 до 0,24 эВ (рис. 4, синие круги). Рассчитанная зависимость уширения от величины потенциала U_2

качественно согласуется с данными из работы [14].

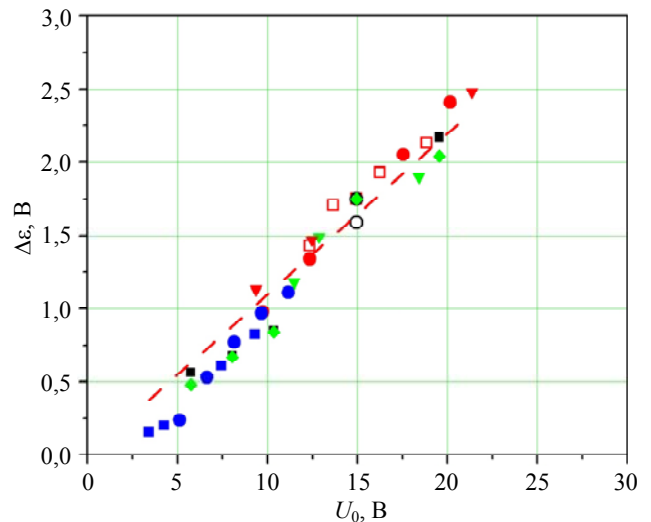


Рис. 4. Вычисленные зависимости уширения энергетического спектра заряженных частиц от параметра $U_0 = d_3(E_{23} - E_{34})$. Ионы: черные квадраты – размер ячеек сеток $50 \div 210$ мкм; зеленые ромбы – размер ячеек третьей (анализирующей) сетки $50 \div 170$ мкм; красные полые квадраты – энергия пучка $10 \div 35$ эВ; красные круги – потенциал второй сетки, $U_2 = -100 \div -20$ В; зеленые треугольники – расстояние между второй и третьей сеткой, $L_{23} = 0,75 \div 1,6$ мм; красные треугольники – расстояние между каждой парой сеток, $L_{12} = L_{23} = L_{34} = 0,7 \div 1,6$ мм; полые черные круги – толщина проволоки $= 50 \div 130$ мкм (размер ячейки фиксированный). Электроны с энергией 70 эВ: синие квадраты – размер ячеек сеток $84 \div 126$ мкм; синие круги – потенциал второй сетки, $U_2 = -60 \div 60$ В. Красная штриховая линия – линейная аппроксимация данных.

При увеличении расстояния L_{23} в два раза $\Delta\varepsilon$ уменьшается в 1,6 раза (рис. 4, зеленые треугольники). Увеличение продольного размера энергоанализатора, т. е. одновременное увеличение всех межсеточных расстояний L_{12}, L_{23}, L_{34} , также приводит к снижению $\Delta\varepsilon$. К примеру, для простоты считая $L_{12} = L_{23} = L_{34}$, двукратное увеличение продольного размера приводит к уменьшению $\Delta\varepsilon$ в два раза (рис. 4, красные треугольники), что качественно согласуется с результатами работ [15, 16]. С другой стороны, для обеспечения наименьшего искажения результатов измерений необходимо, чтобы частицы двигались внутри прибора без столкновений [17]. Таким образом, имеется ограничение сверху на продольные размеры энергоанализатора и, соответственно, на расстояния между сетками: $(L_{12} + L_{23} + L_{34}) \ll \lambda$, где λ – длина пробега заряженных частиц.

Уменьшение размера ячеек для всех сеток приводит к практически линейному уменьшению уширения $\Delta\varepsilon$, как показано на рис. 4 (черные квадраты). Примечательно, что снижение размера яче-

ек только у анализирующей сетки приводит к аналогичному уменьшению величины $\Delta\varepsilon$ (рис. 4, зеленые ромбы). Это означает, что провисание потенциала в ячейках анализирующей сетки вносит наибольший вклад в уширение энергетического спектра заряженных частиц в энергоанализаторе.

При фиксированном размере ячейки толщина проволоки слабо влияет на величину уширения энергетического спектра: увеличение толщины проволоки в 1,6 раза приводит к уменьшению $\Delta\varepsilon$ на 10 % (рис. 4, черные окружности). С другой стороны, необходимо уменьшать толщину проволок сеток для увеличения геометрической прозрачности сеток и, соответственно, чувствительности энергоанализатора.

Коэффициент k в аналитической формуле (3) для ячеек с квадратной формой был определен путем линейной аппроксимации результатов численных расчетов зависимости уширения $\Delta\varepsilon$ от параметра $U_0 = d_3(E_{23} - E_{34})$ (рис. 4, красная штриховая линия). Величина коэффициента k составляет 0,11. Для улучшения разрешающей способности энергоанализатора необходимо снижать значение параметра $kd_3(E_{23} - E_{34})$. На величины $E_{23} = (U_3 - U_2)/L_{23}$ и $E_{34} = (U_4 - U_3)/L_{34}$ накладываются ограничения, которые определяются условиями эксперимента. В частности, потенциалы U_2 и U_3 определяются максимальной энергией отсекаемых частиц и энергией анализируемых частиц, соответственно. Для запирания потока вторичных электронов с коллектора потенциал U_4 фиксируется равным $-25 \div -15$ В [14]. Расстояния между сетками определяются длиной пробега анализируемых частиц λ и могут быть увеличены до тех пор, пока $(L_{12} + L_{23} + L_{34}) \ll \lambda$. Поэтому, уменьшение размера ячеек третьей (анализирующей) сетки d_3 является оптимальным способом улучшения разрешающей способности многосеточного энергоанализатора.

Результаты эксперимента: зависимость уширения энергетического спектра электронов от потенциала второй сетки

Согласно результатам численного расчета движения электронов в анализаторе, уширение энергетического спектра электронов с начальной энергией 70 эВ внутри прибора может быть вычислено по формуле (3) с $k = 0,11$ (рис. 4). Следовательно, можно провести сравнение ширины на полувысоте расчетной функции распределения электронов по энергии с измеренной в эксперименте с источником электронов при различных значениях потенциала U_2 .

Результаты эксперимента с помощью энергоанализатора № 1 ($U_{acc} = -70$ В, $U_2 = 20$ В, $U_4 = -15$ В) показали, что ширина на полувысоте измеренной функции распределения, $\Delta\varepsilon_{total}$, составила 2,78 эВ при потенциале диафрагмы $U_d = -35$ В. С помощью операции обратной свертки измеренной функции распределения электронов по энергии с аппаратной функцией анализатора, которая была получена на основе трехмерного численного расчета для энергоанализатора № 1, было определено уширение в источнике $\Delta\varepsilon_s = 2,55$ эВ.

На рис. 5 (черные квадраты) представлена зависимость ширины $\Delta\varepsilon_{total}$ от потенциала U_2 , измеренная с помощью энергоанализатора № 1. Расчетное значение $\Delta\varepsilon_{total}$ (рис. 5, черная штриховая линия) определялось как $\Delta\varepsilon_{total} = (\Delta\varepsilon^2 + \Delta\varepsilon_s^2)^{1/2}$,

где $\Delta\varepsilon_s = 2,55$ эВ – оценка уширения в источнике электронов, $\Delta\varepsilon$ – уширение в энергоанализаторе № 1, вычисленное с помощью формулы (3) с соответствующим коэффициентом 0,11 для квадратных ячеек третьей (анализирующей) сетки с размером $d_3 = 126$ мкм. При этом предполагалось, что функция распределения электронов на выходе из источника и аппаратная функция анализатора являются функциями распределения Гаусса, а вычисленное $\Delta\varepsilon_{total}$ является их сверткой. Различие до 1,0 эВ в отдельных точках между расчетом и экспериментом может объясняться ошибкой при измерении уширения $\Delta\varepsilon_{total}$ и неточностью аппроксимации вычисленной аппаратной функции анализатора функцией распределения Гаусса.

Для оценки уширения $\Delta\varepsilon$ в энергоанализаторах с шестиугольными ячейками формула (3) может быть использована в виде соотношения из работы [20]:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon = \Delta U &= \frac{r_3}{\pi} (E_{23} - E_{34}) = \\ &= \frac{r_3}{\pi} \left(\frac{U_3 - U_2}{L_{23}} - \frac{U_4 - U_3}{L_{34}} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где r_3 – радиус вписанной окружности третьей сетки. В данном случае численный коэффициент k равен $(\pi)^{-1}$. Формула (4) соответствует аналитическому решению уравнения Пуассона для тонкой металлической пластины с одиночным круглым отверстием [21]. На рис. 5 (синие круги) представлена зависимость уширения $\Delta\varepsilon_{total}$ от потенциала U_2 , измеренная с помощью энергоанализатора № 2 с шестиугольными ячейками. Расчетное значение $\Delta\varepsilon_{total}$ (рис. 5, синяя пунктирная линия) определялось как $\Delta\varepsilon_{total} = (\Delta\varepsilon^2 + \Delta\varepsilon_s^2)^{1/2}$, где $\Delta\varepsilon_s = 2,55$ эВ – оценка уширения в источнике, $\Delta\varepsilon$ – уширение в

энергоанализаторе № 2, вычисленное по формуле (4). Расчетные значения $\Delta\varepsilon_{total}$ согласуются с результатами эксперимента в пределах погрешности измерения $\approx 0,4$ эВ. Таким образом, формула (3) с коэффициентом $\kappa = 0,11$ и формула (4) с $\kappa = (\pi)^{-1}$

подходят для количественной оценки уширения энергетического спектра заряженных частиц в энергоанализаторе, в котором используются сетки с квадратными и шестиугольными ячейками, соответственно.

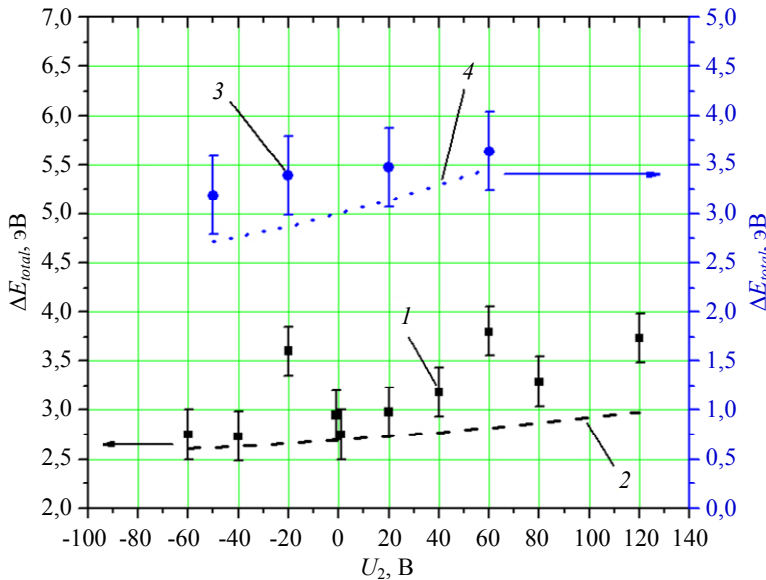


Рис. 5. Зависимость ширины энергетического спектра электронов от величины потенциала на второй сетке U_2 . Для энергоанализатора № 1: 1 – экспериментальные точки, 2 – расчет с коэффициентом $\kappa = 0,11$ для квадратных ячеек. Для энергоанализатора № 2: 3 – экспериментальные точки, 4 – расчет с коэффициентом $\kappa = (\pi)^{-1}$ для шестиугольных ячеек.

Влияние эмиссии вторичных электронов с сеток энергоанализатора на форму кривой задержки

В ВЧЕ-разрядах энергия ионов, как правило, не достигает кэВ-диапазона и вторичная ион-электронная эмиссия происходит за счет механизма потенциального вырывания. При этом коэффициент вторичной эмиссии $\approx 0,1$ и слабо зависит от энергии ионов [22]. Максимальная начальная энергия вторичных электронов $\varepsilon_{max} = e(I_i - 2\varphi)$, где I_i – потенциал ионизации нейтральной частицы, φ – работа выхода, и ε_{max} не превышает величину $15 \div 25$ эВ для металлов.

При измерении функции распределения по энергиям для ионов из плазмы ВЧЕ-разряда на вторую сетку подается отрицательный потенциал $U_2 < 0$, по модулю равный удвоенному амплитудному значению приложенного ВЧ-напряжения, которое составляет сотни вольт. Таким образом, вторичные электроны, стартующие с первой сетки, отражаются от второй сетки из-за малой энергии и не достигают коллектора. Вторичные электроны с третьей сетки ($U_3 > 0$) возвращаются обратно на сетку и также не достигают коллектора. Вторичные электроны со второй и четвертой сеток прилетают на коллектор с энергиями $\sim (e|U_2 - U_4| + \varepsilon_{max})$ и $(e|U_4| + \varepsilon_{max})$ соответственно, однако из-за малого коэффициента вторичной эмиссии не дают существенный вклад в ток коллектора [5] и не приводят

к изменению уширения энергетического спектра $\Delta\varepsilon$ для ионов.

В настоящем эксперименте электроны на входе в анализатор имели энергию ≈ 70 эВ, потенциал второй сетки варьировался от -60 до 120 В. Для электронов с энергией в диапазоне $70 \div 190$ эВ коэффициент вторичной электронной эмиссии с золотых сеток энергоанализатора № 2 лежит в диапазоне $0,8 \div 1,6$ в зависимости от угла падения первичного пучка к поверхности [23]. При потенциале второй сетки $U_2 > 0$ вторичные электроны с данной сетки возвращаются обратно и не вносят вклад в ток коллектора. Это означает, что форма кривой задержки не зависит от $U_2 > 0$ для значений $0 < U_3 < -60$ В, что наблюдалось в эксперименте при $U_2 = 20$ и 60 В (рис. 6. черные (кривая 1) и красные квадраты (кривая 2)).

Если потенциал второй сетки U_2 отрицательный, то вторичные электроны с сетки долетают до коллектора. Это приводит к увеличению тока коллектора при $U_3 > U_2$ (рис. 6, синие квадраты (кривая 3)) и спаду тока при $U_3 < U_2$. В дифференциальном энергетическом спектре это выглядит как дополнительный пик вблизи значения $e|U_2|$. Следовательно, вторичные электроны со второй сетки будут влиять на уширение энергетического спектра $\Delta\varepsilon$ для электронов из источника при $U_2 \approx U_3$. В экспериментах мы ограничились $U_2 \geq -50$ В, чтобы исключить данный фактор.

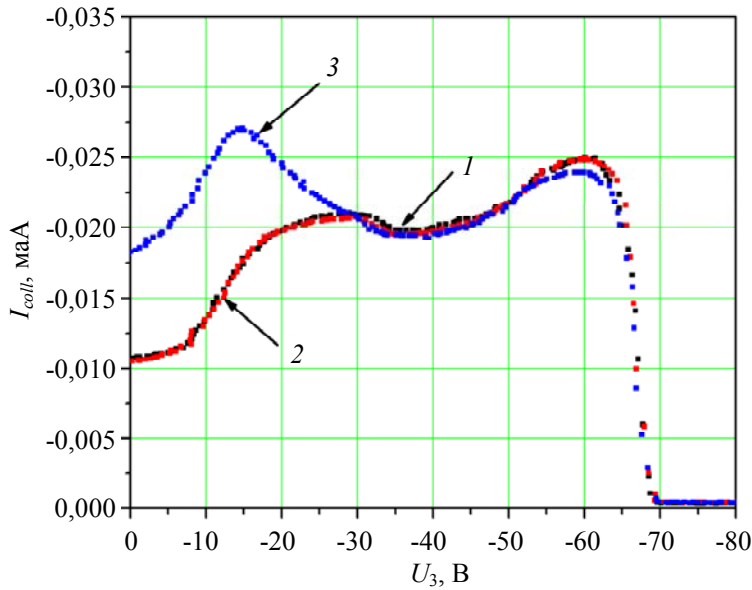


Рис. 6. Кривая задержки, измеренная с помощью энергоанализатора № 2 при различных значениях потенциала второй сетки: 1 – потенциал $U_2 = 60$ В; 2 – потенциал $U_2 = 20$ В; 3 – потенциал $U_2 = -20$ В.

Вторичные электроны с третьей сетки дают вклад в ток коллектора, при $|U_3| > |U_4 - \phi|$, что в случае энергоанализатора № 2 приводит к двукратному росту тока коллектора (с учетом эмиссии с четвертой сетки) во всем диапазоне $-70 \text{ В} < U_3 < -10 \text{ В}$ (рис. 6). Предположим, что доля падающих под скользящими углами электронов определяется отношением площади шестигранной ячейки ($1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2$) к площади внутренней поверхности ($8,25 \times 10^{-10} \text{ м}^2$) $k = 2,38$ и коэффициент вторичной эмиссии $\sigma = 1,6$. Тогда ток электронов за счет вторичной эмиссии с третьей и четвертой сеток увеличивается в $(k + \sigma)^2 / (k + 1)^2 \approx 1,4$ раза. На рис. 7 представлены результаты численного моделирования энергоанализатора № 2 с учетом и без учета вторичной эмиссии с сеток анализатора

(рис. 7, кривые 1 и 2, соответственно). Для наглядности вычисленные кривые задержки нормированы на единицу. Потенциал второй сетки равен 20 В в обоих случаях. Из рис. 7 видно, что учет вторичной эмиссии приводит к увеличению тока коллектора без значительного искажения наклона кривой задержки в области значений U_3 близких к ускоряющему напряжению $U_{acc} = -70$ В и, как следствие, уширения $\Delta\epsilon$ дифференциального энергетического спектра электронов. Вышеизложенные рассуждения позволяют утверждать, что неучет эмиссии вторичных электронов с сеток энергоанализатора в численных расчетах уширения $\Delta\epsilon$ для ионов и электронов является разумным допущением.

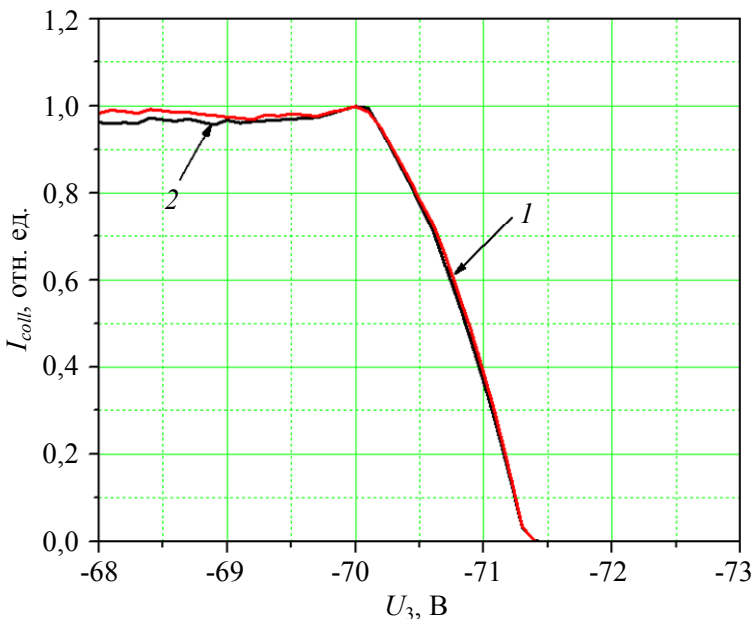


Рис. 7. Результаты численного расчета кривой задержки для значений задерживающего потенциала U_3 близких к $U_{acc} = -70$ В: кривые 1 и 2 – расчеты с учетом и без учета эмиссии вторичных электронов с сеток, соответственно. Обе кривые нормированы на единицу.

Заключение

Численные расчеты движения моноэнергетических ионов в энергоанализаторе показали, что наименьшее искажение кривой задержки достигается при полном совмещении ячеек одинаковых сеток или при случайной ориентации (поворот и сдвиг) ячеек сеток друг относительно друга. С точки зрения сборки прибора, второй вариант является более предпочтительным, так как на практике достаточно сложно добиться идеального совмещения ячеек сеток, а сдвиги на расстояния порядка размера проволоки приводят к сильному искажению формы кривой задержки. При этом показано, что для варианта со случайной ориентацией ячеек сеток апертура энергоанализатора должна составлять более 10 периодов сетки с наибольшим размером ячеек.

На основе численного расчета и результатов эксперимента продемонстрировано, что уширение энергетического спектра ионов в энергоанализаторе определяется провисанием потенциала в ячейках третьей (анализирующей) сетки. Для снижения эффекта провисания потенциала и улучшения разрешающей способности энергоанализатора необходимо уменьшать размер ячейки третьей сетки и величину электрического поля между второй и третьей сетками анализатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по Соглашению № 14.582.21.0010 от 14.10.2015 в рамках ФЦПР 2014-2020, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58215X0013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионов Н. И. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 5. С. 769.
2. Simpson J. A. // Rev. Sci. Instrum. 1961. Vol. 32. No. 12. P. 1283.
3. Ingram S. G., Braithwaite N. St. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. Vol. 21 No. 10. P. 1496.
4. Bohm C., Perrin J. // Rev. Sci. Instrum. 1993. Vol. 64. No. 1. P. 31.
5. Смирнов А. С., Уставщиков А. Ю., Фролов К. С. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 8. С. 38.
6. Gahan D., Dolinaj B., Hopkins M. B. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. No. 3. P. 33502.
7. Roca i Cabarrocas P., Morin P., Chu V., Conde J. P., Liu J. Z., Park H. R., Wagner S. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. No. 5. P. 2942.
8. Абрамов А. С., Виноградов А. Я., Косарев А. И., Смирнов А. С., Орлов К. Е., Шутов М. В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 2. С. 52.
9. Hamers E. A. G., Fontcuberta i Morral A., Niikura C., Brenot R., Roca i Cabarrocas P. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. No. 6. P. 3674.
10. Pelhos K., Donnelly V. M., Kornblit A., Green M. L., Van Dover R. B., Manchanda L., Hu Y., Morris M., Bower E. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. Vol. 19. No. 4. P. 1361.
11. Sungauer E., Pargon E., Mellhaoui X., Ramos R., Cunge G., Vallier L., Joubert O., Lill T. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2007. Vol. 25. No. 5. P. 1640.
12. Pearton S. J., Abernathy C. R., Ren F., Lothian J. R., Wisk P. W., Katz A. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. Vol. 11. No. 4. P. 1772.
13. Tonks L., Mott-Smith H. M., Langmuir I. // Phys. Rev. 1926. Vol. 28. No. 104. P. 104.
14. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
15. Sakai Y., Katsumata I. // Jpn. J. Appl. Phys. 1985. Vol. 24. No. 3. P. 337.
16. Тютиков А. М., Шаниро Ю. А. // ЖТФ. 1963. Т. 33. Вып. 10. С. 1265.
17. Baloniak T., Reuter R., Flötgen C., Keudell A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. No. 5. P. 55203.
18. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. — М.: Мир, 1980.
19. Смирнов А. С., Уставщиков А. Ю., Фролов К. С. // ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 17. С. 56.
20. Landheer K., Kobelev A. A., Smirnov A. S., Bosman J., Deelen S., Rossewij M., De Waal A. C., Poullos I., Benschop A. F., Schropp R. E. I., Rath J. K. // Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88. No. 6. P. 066108-1.
21. Кельман В. М., Явор С. Я. Электронная оптика. Изд. 3-е, перераб. и доп. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1968.
22. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. — М.: Наука, 1966.
23. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.

Multi-grid retarding field energy analyzer for gas discharge diagnostics

A. A. Kobelev¹, N. A. Andrianov², E. M. Khilkevitch³, T. V. Chernozymuskaya¹,
and A. S. Smirnov¹

¹ Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia
E-mail: kobelev_anton@mail.ru

² Svetlana-Rost, JSC
27 Engels av., Saint-Petersburg, 194156, Russia

³ Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Politekhnicheskaya str., Saint-Petersburg, 194021, Russia

Received August 7, 2017

Consideration is given to numerical and experimental studies of the effect of energy analyzer design elements on the resolving power of the device for measurements of energy distribution function of ions from capacitively coupled rf discharge. It has been demonstrated using three-dimensional numerical simulations of charged particles movement inside the energy analyzer that the instrument function of the device strongly depends on the mutual orientation of the grids cells. It has been shown that the broadening of charged particles energy spectrum in energy analyzer mostly depends on the magnitude of the potential sagging inside cells of the analyzing grid. Formulas for quantitative estimate of the broadening of charged particles energy spectrum for retarding field energy analyzers using meshes with square or hexagonal cells are given.

Keywords: multi-grid retarding field energy analyzer, capacitive coupled RF gas discharge, electron source.

REFERENCES

1. N. I. Ionov, *Sov. Tech. Phys.* **34** (5), 769 (1964).
2. J. A. Simpson, *Rev. Sci. Instrum.* **32** (12), 1283 (1961).
3. S. G. Ingram and N. St. J. Braithwaite, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** (10), 1496 (1988).
4. C. Bohm and J. Perrin, *Rev. Sci. Instrum.* **64** (1), 31 (1993).
5. A. S. Smirnov, A. Yu. Ustavshchikov, and K. S. Frolov, *Tech. Phys.* **65** (8), 38 (1995).
6. D. Gahan, B. Dolinaj, and M. B. Hopkins, *Rev. Sci. Instrum.* **79** (3), 33502 (2008).
7. P. Roca i Cabarrocas, P. Morin, V. Chu, J. P. Conde, J. Z. Liu, H. R. Park, and S. Wagner, *J. Appl. Phys.* **69** (5), 2942 (1991).
8. A. S. Abramov, A. Ya. Vinogradov, A. I. Kosarev, A. S. Smirnov, K. E. Orlov, and M. V. Shutov, *Tech. Phys.* **68** (2), 52 (1998).
9. E. A. G. Hamers, A. Fontcuberta i Morral, C. Niikura, R. Brenot, and P. Roca i Cabarrocas, *J. Appl. Phys.* **88** (6), 3674 (2000).
10. K. Pelhos, V. M. Donnelly, A. Kornblit, M. L. Green, R. B. Van Dover, L. Manchanda, Y. Hu, M. Morris, and E. Bowler, *J. Vac. Sci. Technol. A* **19** (4), 1361 (2001).
11. E. Sungauer, E. Pargon, X. Mellhaoui, R. Ramos, G. Cunge, L. Vallier, O. Joubert, and T. Lill, *J. Vac. Sci. Technol. B* **25** (5), 1640 (2007).
12. S. J. Pearton, C. R. Abernathy, F. Ren, J. R. Lothian, P. W. Wisk, and A. Katz, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** (4), 1772 (1993).
13. L. Tonks, H. M. Mott-Smith, and I. Langmuir, *Phys. Rev.* **28** (104), 104 (1926).
14. O. V. Kozlov, *Electric Probe in Plasmas* (Atomizdat, Moscow, 1969) [in Russian].
15. Y. Sakai, and I. Katsumata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **24** (3), 337 (1985).
16. A. M. Tyutikov and Yu. A. Shapiro, *Sov. Tech. Phys.* **33** (10), 1265 (1963).
17. T. Baloniak, R. Reuter, C. Flötgen, and A. Keudell, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (5), 55203 (2010).
18. P. J. Roache *Computational Fluid Dynamics* (Hermosa Publishers, Albuquerque, 1976; Mir, Moscow, 1980).
19. A. S. Smirnov, A. Yu. Ustavshchikov, and K. S. Frolov, *Tech. Phys.* **21** (17), 56 (1995).
20. K. Landheer, A. A. Kobelev, A. S. Smirnov, J. Bosman, S. Deelen, M. Rossewijn, A. C. De Waal, I. Poullos, A. F. Benschop, R. E. I. Schropp, and J. K. Rath, *Rev. Sci. Instrum.* **88** (6), 066108-1 (2017).
21. V. M. Kelman and S. Ya. Yavor, *Electron Optics* (Nauka, Leningrad, 1968) [in Russian].
22. L. N. Dobretsov and M. V. Gomoyunova, *Emission Electronics* (I.P.S.T, 1971; Nauka, Moscow, 1966).
23. I. M. Bronstein I. M. and B. S. Fraiman. *Secondary Electrons Emission* (Nauka, Moscow, 1969) [in Russian].