

Ю. Г. Юшков
А. С. Климов

ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ
И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ФОРВАКУУМЕ

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Ю. Г. Юшков, А. С. Климов

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ
И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ФОРВАКУУМЕ**

Учебное пособие

Томск
Издательство ТУСУРа
2023

УДК 621.384 : 537.533(075.8)
ББК 32.85я73
Ю963

Рецензенты:

Николаев А. Г., канд. техн. наук;
Савкин К. П., канд. техн. наук

Печатается по решению научно-методического совета ТУСУРа
(протокол № 5 от 01.06.2023 г.)

Юшков, Юрий Георгиевич

Ю963 Оборудование для электронно-лучевых и плазменных технологий в форвакууме : учеб. пособие / Ю. Г. Юшков, А. С. Климов. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроника, 2023. – 68 с.

ISBN 978-5-6050215-3-7

Рассмотрено оборудование для электронно-лучевых и плазменных технологий, диагностическое и вспомогательное оборудование для реализации процессов взаимодействия ускоренного электронного пучка с поверхностью диэлектрических мишеней, физические принципы работы пучкового и плазменного технологического оборудования.

Для аспирантов, а также студентов высших учебных заведений, специализирующихся в области физической электроники и ионно-плазменных и лучевых технологий, вакуумной и плазменной электроники, микро- и нанoeлектроники, физики твердого тела, материаловедения. Может быть полезно для специалистов и инженеров, чья работа связана с вопросами взаимодействия плазмы, электронных и ионных пучков с поверхностью, методами обработки материалов потоками заряженных частиц в различных областях науки и техники.

УДК 621.384 : 537.533(075.8)
ББК 32.85я73

ISBN 978-5-6050215-3-7

© Юшков Ю. Г., Климов А. С., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

Оглавление

Введение	4
1 ФОРВАКУУМНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ	5
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ	10
2.1 Экспериментальная установка для получения диэлектрических покрытий	10
2.2 Экспериментальная установка для исследования плазмы и процессов азотирования поверхностей металлов	14
2.3 Экспериментальная установка для сварки и спекания диэлектриков	17
2.4 Экспериментальная установка для генерации ленточного электронного пучка и плазменной обработки	21
3 ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ПЛАЗМЫ.....	27
3.1 Измерение параметров плазмы	27
3.2 Спектрометрические измерения параметров плазмы.....	34
3.3 Обращенный времяпролетный спектрометр	37
3.4 Масс-спектрометрия ионного состава плазмы на основе квадрупольного анализатора остаточной газовой атмосферы	45
3.5 Измерение плотности тока ленточного электронного пучка	51
3.6 Измерение диаметра и энергетического спектра электронного пучка	53
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	59
4.1 Метод лежащей капли.....	59
4.2 Спектроскопические методы анализа	61
4.3 Оборудование для диагностики параметров покрытий	62
Литература	66

Введение

Форвакуумные плазменные источники электронов обеспечивают возможность непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов. Это открывает новые принципиальные перспективы для ряда технологических применений: нанесения диэлектрических защитных и функциональных покрытий на различные поверхности, спарки и пайки диэлектриков, спекания керамических порошков и др. Реализацию таких возможностей стимулировало проведение целенаправленных и детальных исследований, результаты которых представлены в настоящем пособии. В свою очередь проведение этих исследований потребовало разработки нового экспериментального и диагностического оборудования, методик измерения, а также адаптации под конкретные задачи исследований существующего оборудования и методик. В данном пособии описаны экспериментальные установки, оснащенные форвакуумными плазменными источниками электронов, и диагностическое оборудование, предназначенное для комплексного исследования параметров пучковой плазмы в процессах электронно-лучевого взаимодействия с диэлектриками.

1 ФОРВАКУУМНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

3D-модель форвакуумного плазменного источника электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом, функционирующего в непрерывном режиме в диапазоне давлений 1–100 Па (форвакуумная область давлений), представлена на рисунке 1.1. При ускоряющем напряжении 20 кВ и токе разряда 1,5 А ток электронного пучка составляет 450 мА, а максимальная мощность пучка может достигать 9 кВт при диаметре 0,5–10 мм. Цилиндрический полый катод диаметром 42 мм и высотой 50 мм изготавливается из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и имеет водяное охлаждение. Электрическая изоляция катода и нержавеющей анода осуществляется вакуумно-плотным керамическим изолятором, выполненным из алюмооксидной керамики и рассчитанным на максимальное напряжение разрядного промежутка 2 кВ. Для стабилизации плазменной границы и предотвращения проникновения её в зазор ускоряющего промежутка используется эмиссионный электрод в виде перфорированной пластины из тантала толщиной 1 мм. Анод закрепляется на фланце экстрактора через высоковольтный керамический изолятор, спроектированный на полное ускоряющее напряжение 20 кВ.

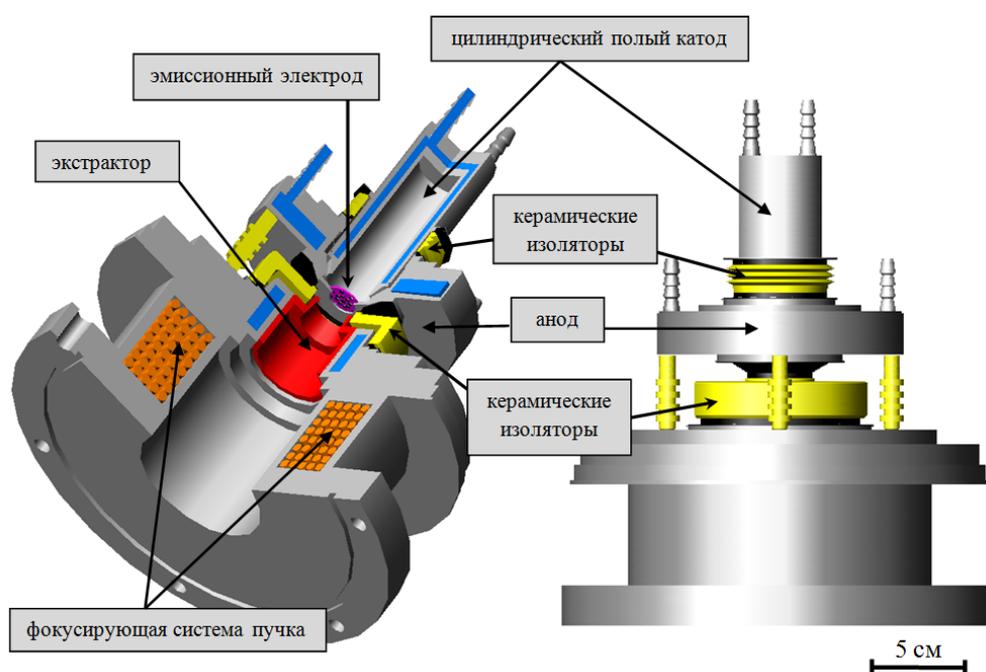


Рисунок 1.1 – Электродная схема электронного источника

Экстрактор (ускоряющий электрод) изготавливается из нержавеющей стали и имеет форму конуса с отверстием диаметром от 6 до 10 мм. Регулировка зазора ускоряющего промежутка осуществляется за счет резьбы на внешней цилиндрической стороне экстрактора.

Экстрактор находится под потенциалом «земли», а отрицательный полюс источника ускоряющего напряжения подключается к аноду. Экстрактор охлаждается потоком проточной воды для обеспечения его работы в непрерывном режиме. Для фокусировки электронного пучка применяется электромагнитная система с фокусирующей катушкой (рисунок 1.2). Полый сердечник катушки изготавливается из меди для обеспечения, с одной стороны, проникновения силовых линий поля в область фокусировки электронного пучка, с другой стороны, эффективного теплоотвода от провода катушки. Каркас катушки и внешний кожух выполнены из стали марки Ст3 для замыкания силовых линий магнитного поля с целью его увеличения в области фокусировки пучка. Максимальное значение магнитной индукции в центре фокусирующей системы составляет 20 мТл.

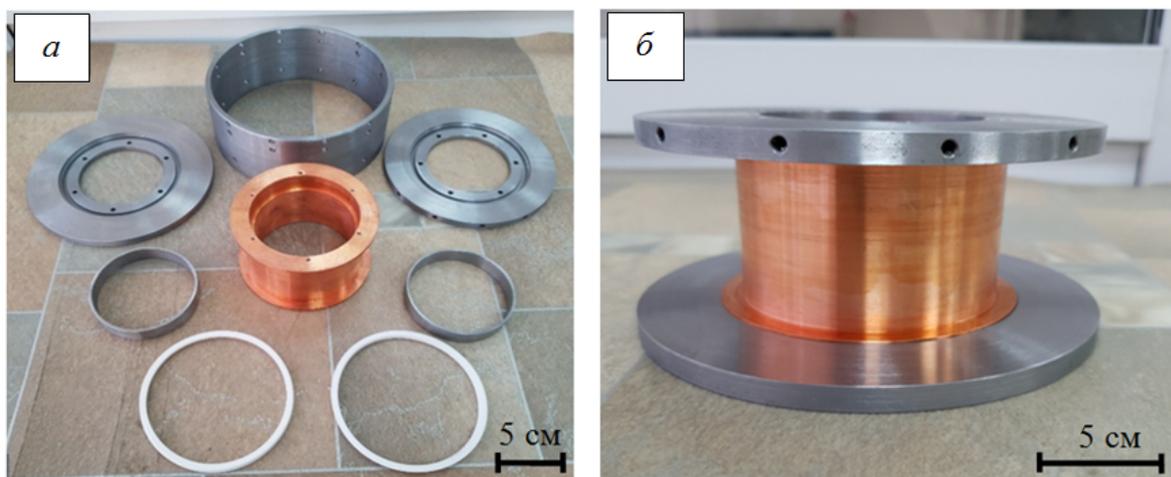


Рисунок 1.2 – Детали каркаса фокусирующей катушки (а) и каркас в сборе (б)

Для развертки электронного пучка используется магнитная система с параллельным сложением магнитных потоков от противоположно расположенных на общем кольцевом магнитопроводе отклоняющих катушек.

Наличие двух пар отклоняющих катушек обеспечивает сканирование пучка по двум координатам с отклонением на угол $\pm 30^\circ$ от оси. Магнитопровод системы выполнен из стали Ст3. На рисунке 1.3 представлен внешний вид деталей отклоняющей системы. Питание катушек обеспечивает стабилизированный источник.



Рисунок 1.3 – Внешний вид деталей отклоняющей электромагнитной системы

Конструкция форвакуумного плазменного источника электронов включает несколько узлов: разрядный промежуток, ускоряющий промежуток, фокусирующую систему, систему отклонения пучка (рисунок 1.4).

Система охлаждения электродов источника проточной водой позволяет поддерживать их температуру не более 60°C . Поскольку анод и катод источника находятся под высоким ускоряющим потенциалом относительно «земли», в конструкции электронного источника предусмотрена установка изолирующей «развязки» – водяного сопротивления, которое представляет собой силиконовую трубку с внутренним диаметром 6 мм длиной 6 м, размещенную в капролоновом цилиндре в виде спирали. Общая величина водяного сопротивления составляет 10 МОм, и при максимальном ускоряющем напряжении 20 кВ ток утечки составляет 2 мА. Тепловые потери на водяном сопротивлении достигают 40 Вт, что составляет менее 1 %

от мощности электронного пучка. Для защиты от высокого напряжения и рентгеновского излучения конструктивные узлы электронного источника и система водяного охлаждения располагаются внутри стального заземленного корпуса с толщиной стенок 2 мм.

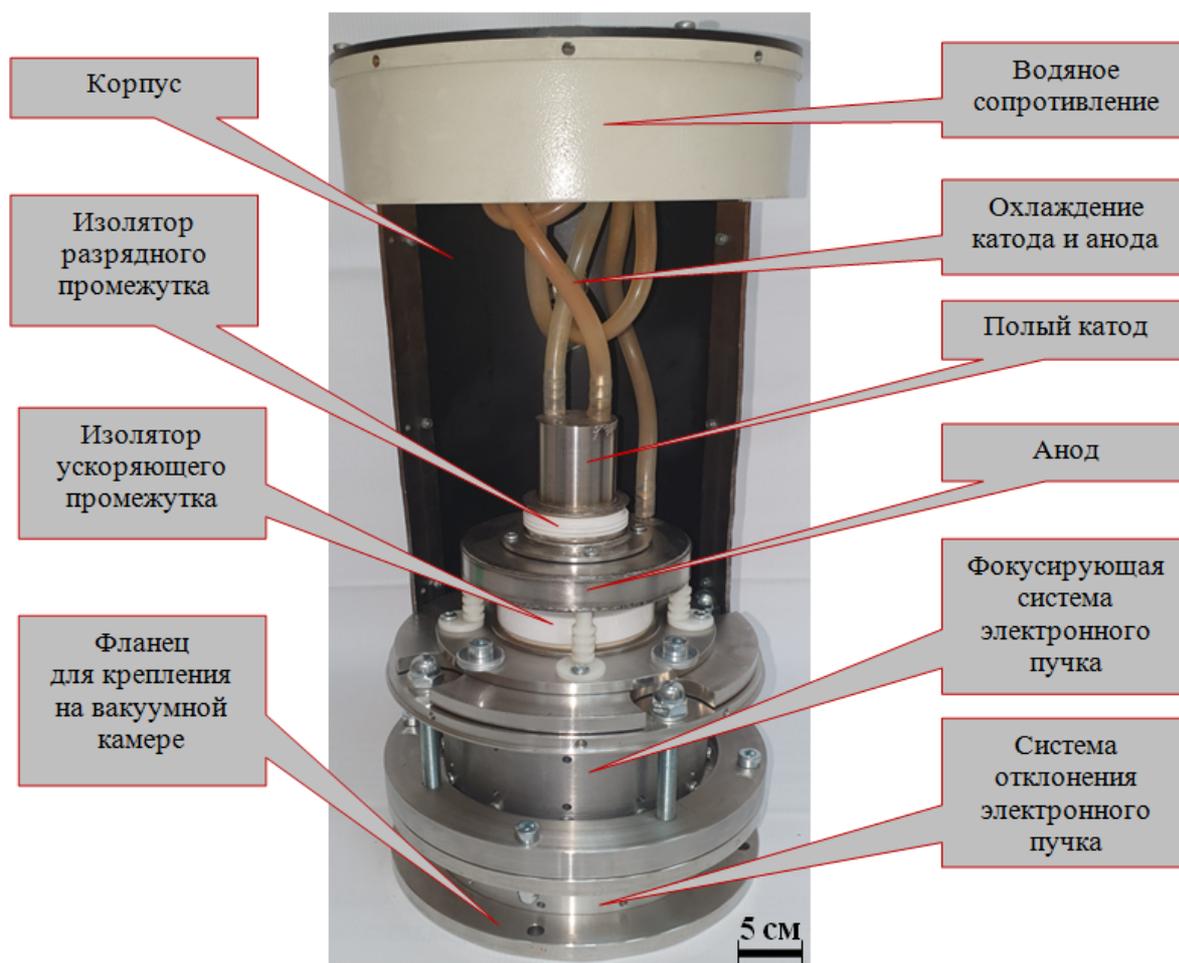


Рисунок 1.4 – Фотография форвакуумного плазменного источника электронов

На рисунке 1.5 представлены вольт-амперные характеристики источника с различными конфигурациями полого катода. Достигнутая максимальная мощность электронного пучка ограничивается только выходными параметрами используемого высоковольтного источника электропитания и может быть увеличена при использовании более мощных источников питания.

Достигнутые на данный момент рабочие параметры плазменного электронного источника представлены в таблице 1.1.

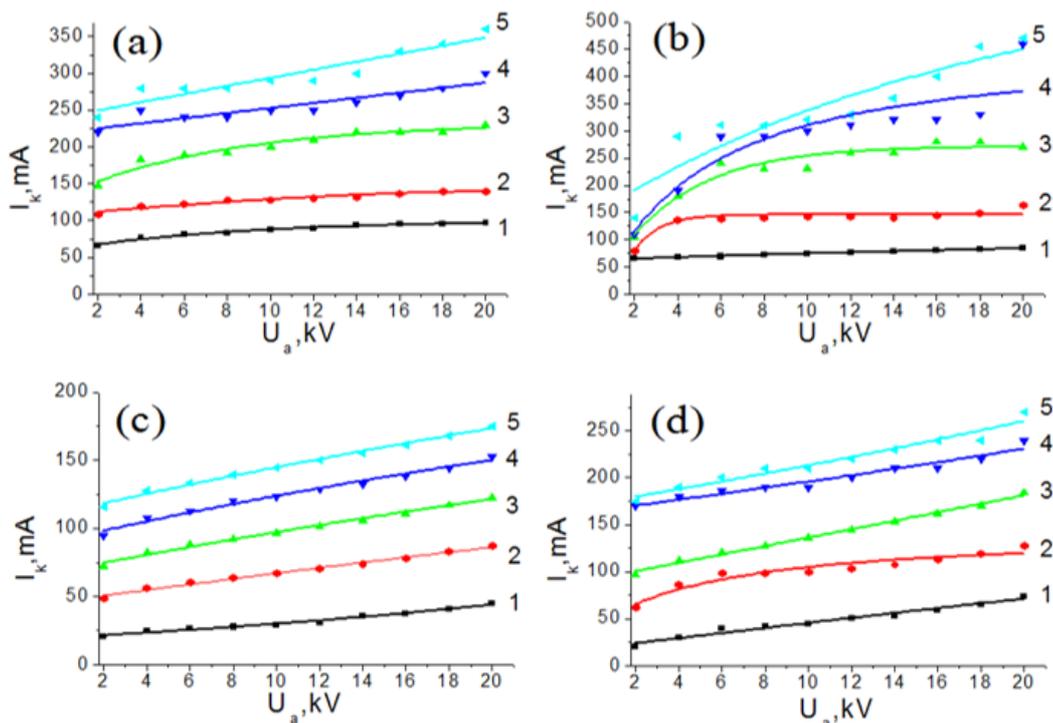


Рисунок 1.5 – Вольт-амперные характеристики форвакуумного плазменного источника электронов.
 Давление 30 Па; рабочий газ гелий; токи разряда:
 1 – 300 мА; 2 – 600 мА; 3 – 900 мА; 4 – 1,2 А; 5 – 1,5 А

Таблица 1.1 – Рабочие параметры электронного источника

Режим работы	Непрерывный
Ток разряда, А	До 1,5
Ускоряющее напряжение, кВ	До 20
Ток пучка, мА	До 460
Минимальный диаметр пучка на расстоянии 30 см от эмиссионного электрода, мм	5
Максимальная мощность пучка, кВт	9
Максимальная плотность мощности на мишени, кВт/см ²	50
Рабочий газ	Остаточная атмосфера, гелий, кислород, азот, аргон, криптон, ацетилен и др.
Давление рабочего газа, Па	1–100

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Формирование плотной пучковой плазмы при распространении электронного пучка в области среднего вакуума позволяет с помощью форвакуумных плазменных электронных источников осуществлять непосредственную обработку непроводящих высокотемпературных материалов, таких как керамика и стекла. В настоящем разделе представлены описания экспериментальных установок, предназначенных для осуществления операций обработки керамики – сварки, спекания, испарения и нанесения покрытий в форвакуумной области давлений.

2.1 Экспериментальная установка для получения диэлектрических покрытий

Экспериментальная установка, созданная для проведения исследований процессов электронно-лучевого испарения диэлектриков и нанесения покрытий, представлена на рисунке 2.1. Установка оснащена форвакуумным плазменным источником электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующим в непрерывном режиме. Источник электронов размещен в верхней части цилиндрической вакуумной камеры диаметром 35 см, длиной 40 см, объемом 40 л, изготовленной из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Охлаждение вакуумной камеры при работе электронного источника осуществляется потоком воды через каналы охлаждения, выполненные на боковых и торцевых стенках камеры. Процесс нанесения покрытий контролируется визуально через смотровое окно диаметром 90 мм, защищенное от рентгеновского излучения свинцовым стеклом толщиной 20 мм.

Вакуумная камера откачивается до предельного остаточного давления газа 0,5 Па двухступенчатым пластинчато-роторным насосом марки ВОР Edwards E2M80 (Германия) со скоростью 20 л/с, после чего в вакуумную камеру через регулируемый игольчатый натекаль Beswick NVL-10-2 (США) напускается рабочий газ до давления 1000 Па, далее напуск газа закрывается и камера вновь

откачивается до предельного давления. Последовательность напуска газа и откачки осуществляется несколько раз. После чего в камеру напускается рабочий газ до необходимого давления в несколько паскалей и установка готова к работе. В качестве рабочих газов используются гелий, аргон, азот и кислород высокой чистоты. В ряде экспериментов в камеру может напускаться атмосферный воздух. Давление в рабочей камере контролируется с помощью термопарного вакуумметра ВИТ-2. Процесс откачки вакуумной камеры до предельного давления составляет менее десяти минут. Для подключения вспомогательных устройств и проведения измерений вакуумная камера имеет электрические вакуумно-плотные вводы на боковой стенке. Герметизация вакуумных соединений камеры производится при помощи разъемных соединений с применением уплотнений из высокотемпературной вакуумной резины.

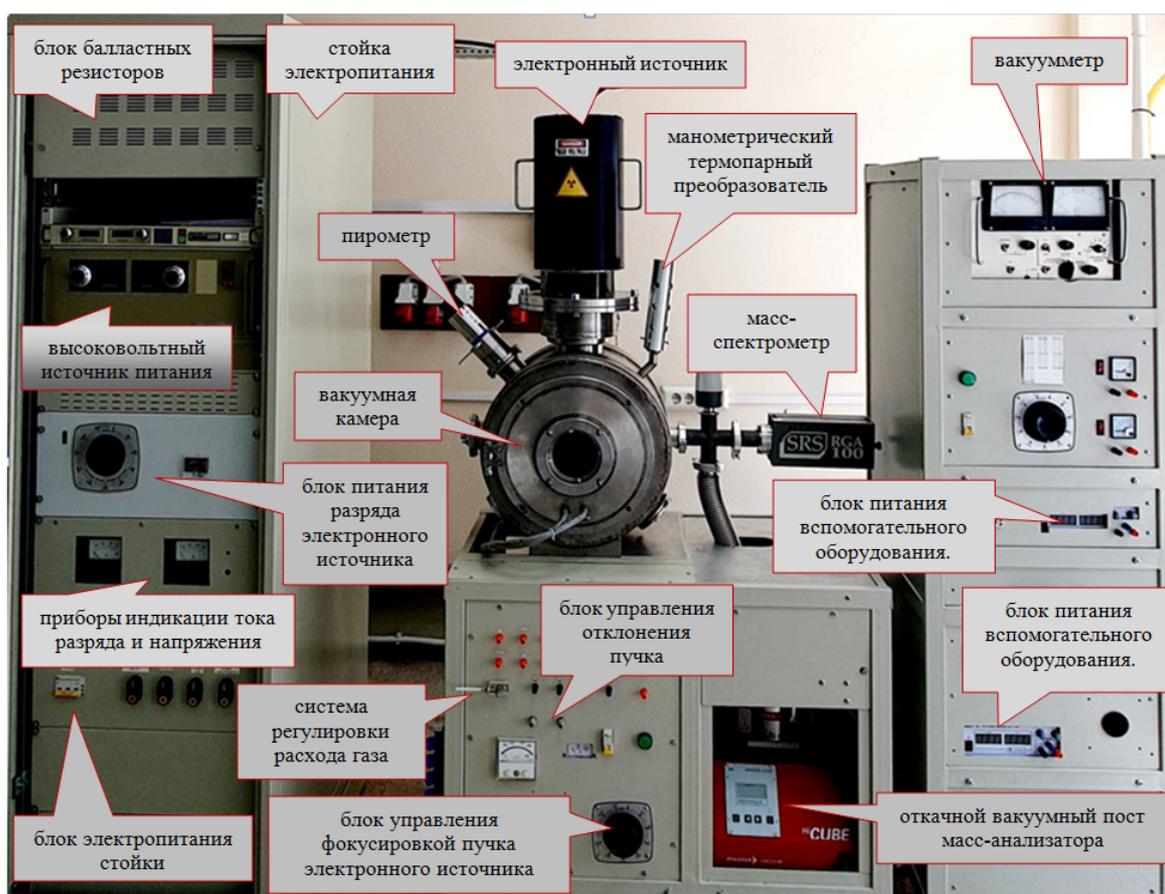


Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка для получения диэлектрических покрытий

Система электропитания источника электронов (рисунок 2.2) размещается в отдельной стойке. Она включает источник питания ускоряющего напряжения на основе промышленного стабилизированного высоковольтного источника Spellman SR-6 (США) с регулируемым независимо выходным напряжением до 20 кВ и током до 300 мА, блок балластных резисторов цепи ускоряющего напряжения с общим сопротивлением 10 кОм и рассеиваемой мощностью 1,6 кВт, а также блок электропитания разряда. Ток и напряжение разрядного блока контролируются до 1 А и до 1,5 кВ, соответственно, измерительными приборами, установленными на передней панели стойки. Функционирование вспомогательных устройств (манипуляторов, системы линейного перемещения и вращения образцов, подачи потенциалов и т.д.) обеспечивается источниками постоянного напряжения.

В процессе нанесения диэлектрических покрытий проводится мониторинг масс-зарядового состава плазмы, который осуществляется при помощи масс-спектрометра, созданного на базе квадрупольного анализатора остаточной газовой атмосферы RGA-100 (США). Откачка масс-спектрометра для корректной работы квадрупольного тракта и системы регистрации токов до давления 10^{-4} Па обеспечивается безмасляным вакуумным постом Pfeiffer Vacuum серии HiCube 80 Eco (Германия) со скоростью 65 л/с. Температура образцов контролируется высокотемпературным пирометром марки Raytek серии Marathon MM (США). Диагностическое оборудование соединяется с объемом камеры через вакуумные разъемы стандарта KF. Для удобства визуального контроля процесса нанесения покрытий и одновременного управления размером и положением электронного пучка на испаряемой мишени кнопки и тумблеры систем управления процессами фокусировки и отклонения электронного пучка располагаются на передней панели стойки вакуумной камеры в непосредственной близости к смотровому окну.

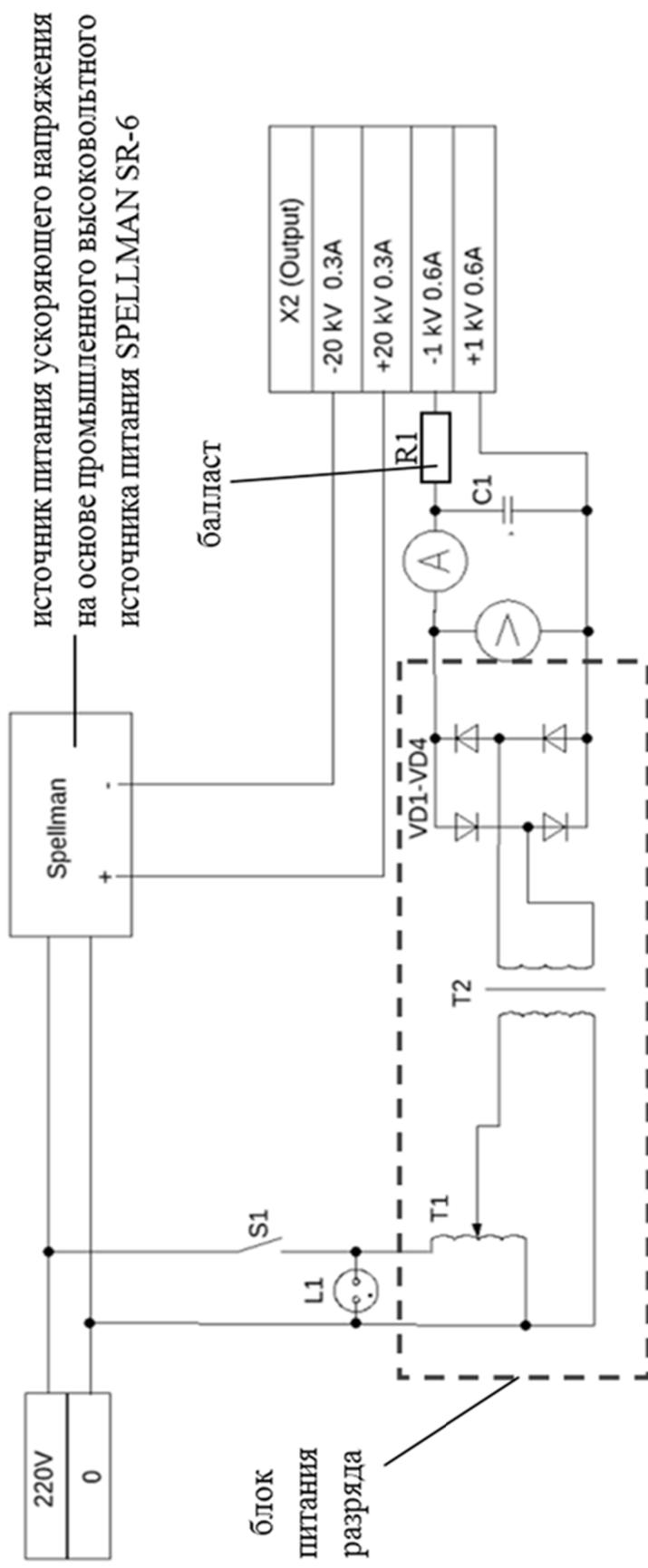


Рисунок 2.2 – Схема электропитания форвакуумного источника электронов

2.2 Экспериментальная установка для исследования плазмы и процессов азотирования поверхностей металлов

Созданная для проведения исследований пучковой плазмы и процессов электронно-лучевого азотирования поверхностей металлов экспериментальная установка представлена на рисунке 2.3.

Основное отличие этой установки от предыдущей состоит в использовании для откачки вакуумной камеры турбомолекулярного насоса nEXT300D (Германия) с более высокой скоростью откачки, равной 300 л/с. Это обеспечивает предельное давление остаточного газа в камере до $5 \cdot 10^{-3}$ Па, а в совокупности с форвакуумным спиральным насосом VOC Edwards XDS10 (Германия) со скоростью откачки 3,5 л/с дает возможность получать в вакуумной камере более чистый «безмасляный» вакуум. Такой вакуум необходим для исследования процессов азотирования и масс-зарядового состава пучковой плазмы. Вакуумная камера объемом 20 л изготовлена из нержавеющей стали. Размеры вакуумной камеры: диаметр – 30 см, длина – 30 см, толщина стенок – 0,5 см. Конструктивным отличием этой вакуумной камеры является размещение на ней пяти разъемов KF-40 и двух разъемов KF-25, что обеспечивает возможность подключения диагностического и вспомогательного оборудования. Напуск рабочего газа в вакуумную камеру осуществляется натекателем Edwards LV10K (Германия). Измерение масс-зарядового состава ионов плазмы также проводится масс-спектрометрами на основе стандартных квадрупольных анализаторов остаточной атмосферы RGA-300 и RGA-100, модернизированных для исследования параметров плазмы. В случае необходимости имеется возможность использовать анализаторы RGA в их штатном режиме для измерения состава остаточной атмосферы в вакуумной камере. Температура поверхности испаряемых мишеней контролируется оптическим пирометром Raytek. Для контроля температуры поверхности в широких пределах применяются два пирометра: один с диапазоном измерения температуры от 0 до 500 °С (образцы), другой – от 500 до 3000 °С (мишень).

Принципиальная схема откачки вакуумной камеры приведена на рисунке 2.4. В этой экспериментальной установке используется тот же электронный источник и система его питания, что и в предыдущей.

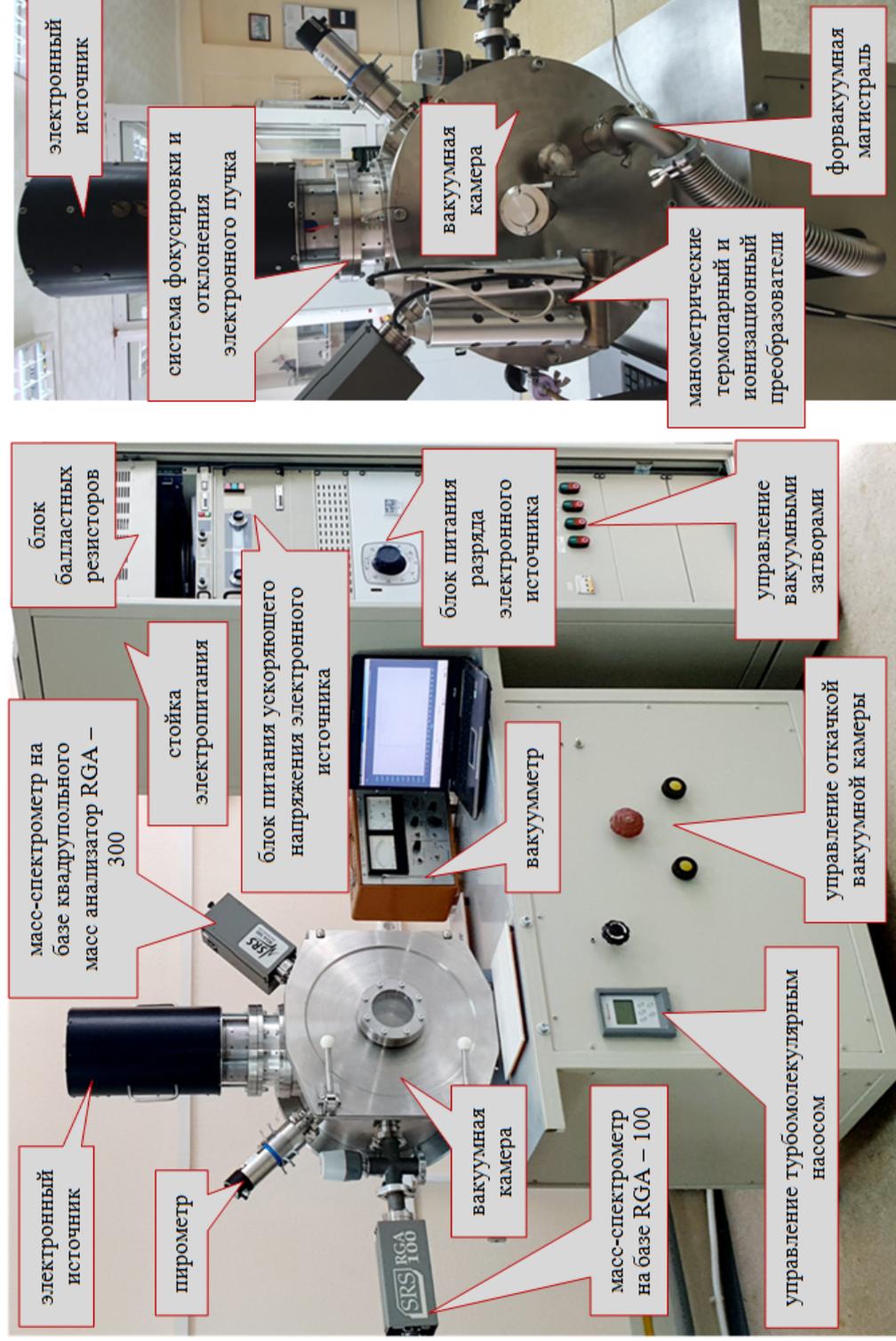


Рисунок 2.3 – Экспериментальная установка для диагностики пучковой плазмы и электронно-лучевого азотирования поверхностей металлов

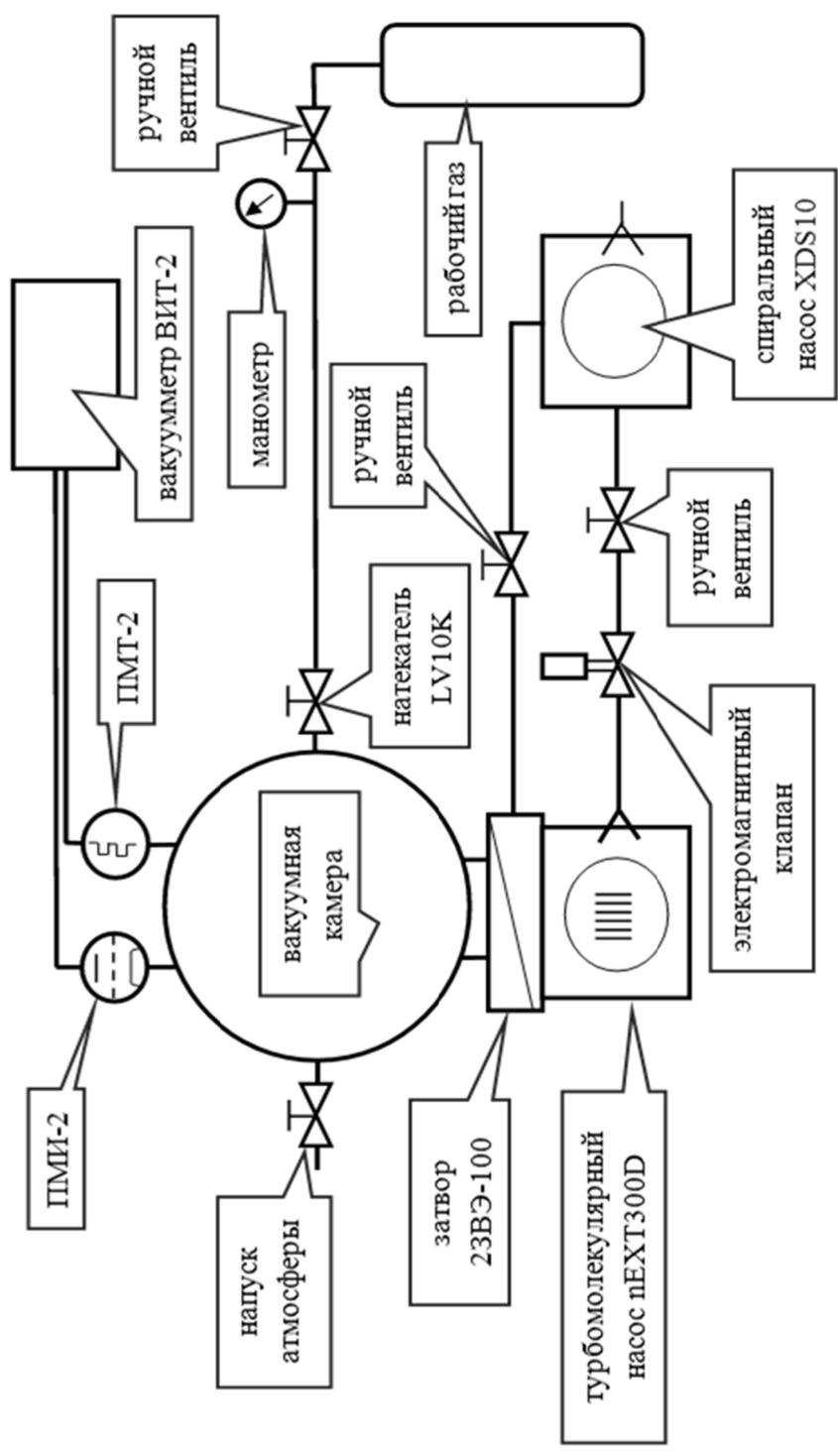


Рисунок 2.4 – Принципиальная вакуумная схема установки

2.3 Экспериментальная установка для сварки и спекания диэлектриков

Внешний вид экспериментальной установки для электронно-лучевой сварки и спекания диэлектриков (керамики, стекла и т.д.) представлен на рисунке 2.5.

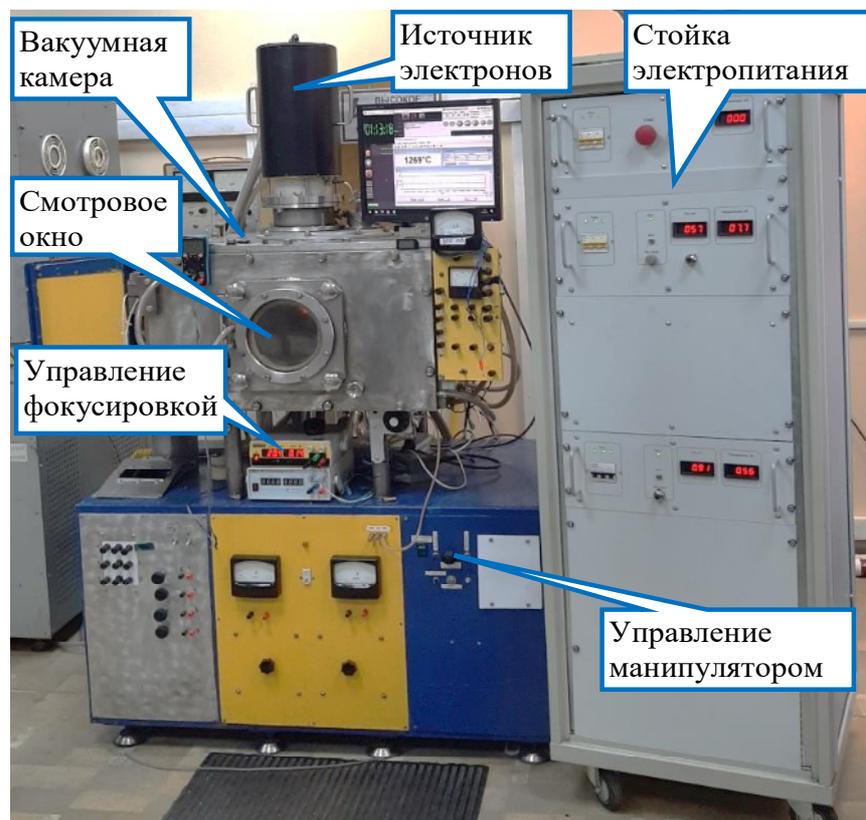


Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка
для сварки и спекания диэлектриков

Установка оснащена форвакуумным плазменным электронным источником, позволяющим формировать пучок электронов диаметром менее 1 мм при энергии электронов до 20 кэВ и токе пучка 50 мА. Вакуумная камера установки располагается на металлической раме, закрытой стальными панелями. Рабочий объем камеры – порядка 0,2 м³, что позволяет разместить в ней водоохлаждаемый коллектор, необходимые манипуляторы, устройства крепления и вращения образцов. Толщина стенок камеры составляет 20 мм с учетом полости для водоохлаждения. Толщина стенок обеспечивает эффективную защиту сотрудников от тормозного рентгеновского излучения при энергии электронов вплоть до 30 кВ. Наблюдение процессов,

происходящих в камере, осуществляется через смотровое окно диаметром 170 мм, выполненное в водоохлаждаемой дверце. В качестве рентгенозащитного материала окна используется стекло марки ТФ-5 толщиной 10 мм. Боковая и верхняя стенки камеры снабжены стандартными фланцами для установки одного или нескольких плазменных электронных источников. Необходимый уровень вакуума 5–50 Па обеспечивается использованием только механического форвакуумного насоса Vac Edwards E2M80 со скоростью откачки 80 м³/ч. Коммутация вакуумной системы осуществляется с помощью вакуумного вентиля. Для напуска рабочего газа применяется натекагель Edwards LV10K (Германия).

Все элементы вакуумной системы соединяются вакуумпроводом, выполненным из нержавеющей стали. Элементы управления вакуумной системой и низковольтные блоки электропитания располагаются на передней панели в нижней части корпуса вакуумной установки.

Высоковольтные блоки, предназначенные для электропитания электронных пушек, размещаются рядом с вакуумной установкой в стойках электропитания СЭ-1 (рисунок 2.6). Стойка СЭ-1 служит для электропитания плазменного источника электронов с учетом специфики нагрузки, каковой является тлеющий разряд с полым катодом и ускоряющий промежуток. СЭ-1 представлена единым энергетическим блоком, состоящим из блока питания непрерывного разряда (БПНР), высоковольтного источника питания (ВИП), панели управления и индикации (ПУИ) и баков, наполненных трансформаторным маслом, размещенных в шкафу 19''. Включение СЭ-1 осуществляется подачей сетевого напряжения на ПУИ при включении автомата 1. Нажатие кнопки «ПУСК» приводит к включению пускателя, расположенного в ПУИ, и подаче сетевого напряжения на все источники питания. Снятие сетевого напряжения со всех источников питания (кроме пускателя и автомата, расположенных в ПУИ) производится нажатием кнопки «СТОП». Подача сетевого напряжения на силовые части источников питания происходит после включения автоматов 2 и 3, расположенных на лицевых панелях соответствующего блока. Запуск источников питания выполняется переключением тумблеров 4 и 5 в положение «Вкл», после чего изменение напряжения на

выходных клеммах СЭ-1 производится вращением ручек «Регулировка» 6 и 7. Ток и напряжение на источниках питания отображается на цифровых индикаторах соответствующих блоков.

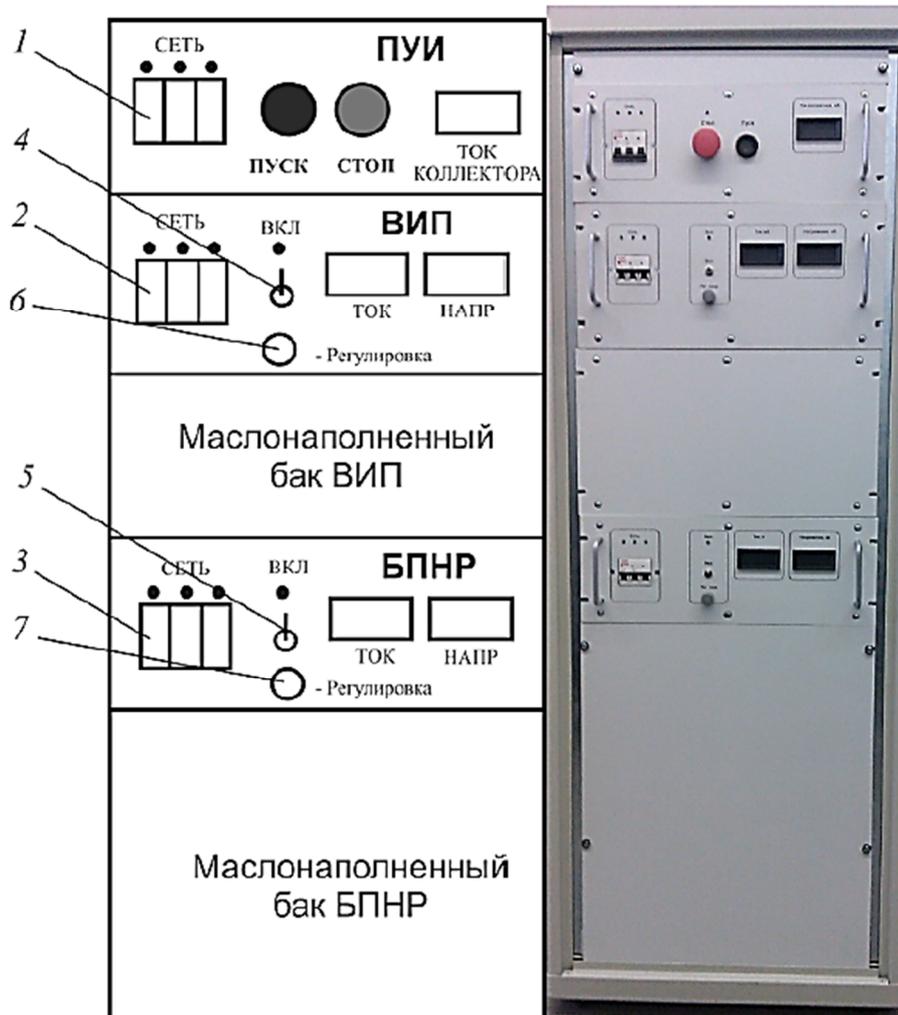


Рисунок 2.6 – Стойка электропитания плазменного источника электронов

Управление положением электронного пучка при сварке и спекании осуществляется электронной системой формирования и отклонения электронного пучка (ООО «НПК ТЭТа», Россия), представляющей собой отдельный блок, подключаемый к магнитным отклоняющим катушкам. Управляющие сигналы передаются в блок через программу управления, развертываемую на экране ноутбука. Интерфейс управляющей программы показан на рисунке 2.7. Блок позволяет задавать технологические карты перемещения и положение электронного пучка в плоскости мишени, управлять режимами

развертки пучка (эллипс, линия, растр и др.) и скоростью его перемещения.

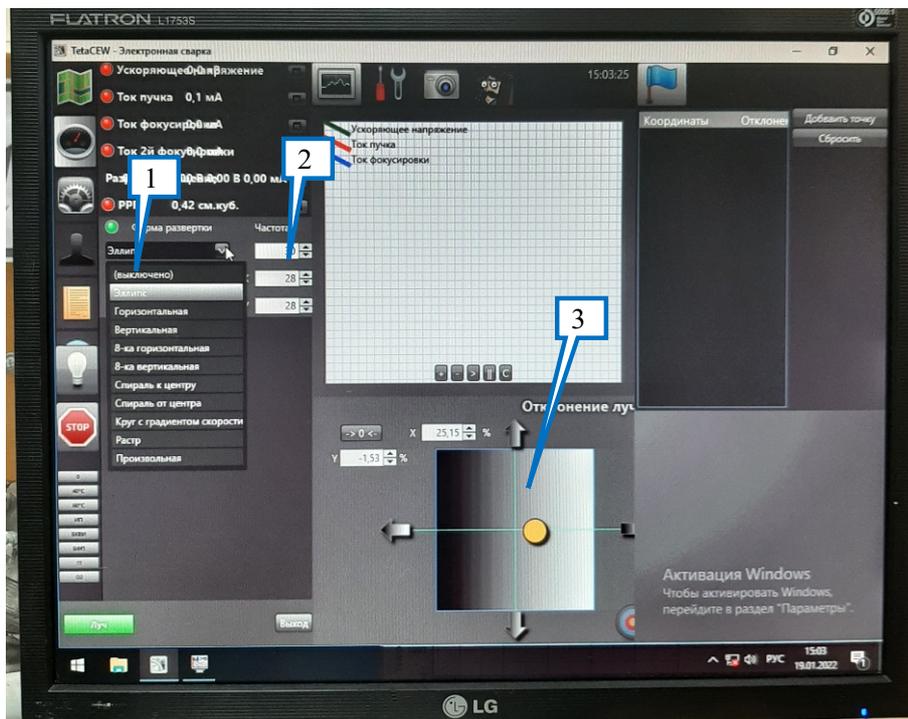


Рисунок 2.7 – Интерфейс программы для управления блоком развертки: 1 – окно выбора режима развертки электронного пучка; 2 – окно выбора частоты и масштаба развертки; 3 – область управления положением электронного пучка на мишени

Для равномерного нагрева образцов используются два режима сканирования. В первом режиме траектория движения пучка по поверхности образца задается в виде растра, размер области сканирования можно регулировать от 5×5 мм до 50×50 мм с частотой сканирования от 1 до 100 Гц. Во втором режиме электронный пучок перемещается таким образом, что место его попадания на мишень представляет собой окружность диаметром больше диаметра образца, но меньше размеров тигля (рисунок 2.8).

Таким образом, прогрев образца осуществляется за счет теплопроводности от тигля и облучения рассеянными электронами пучка. Для измерения температуры облучаемой электронным пучком поверхности образца в процессе спекания применяется инфракрасный пирометр RAYTEK 1МН. Контроль температуры тыльной стороны поверхности образца, не подверженной облучению электронным

пучком, выполняется контактным методом с использованием платина-платинородиевой термопары S-типа с рабочим диапазоном 0–1350 °С. Термоэдс измеряется высокоомным вольтметром и затем пересчитывается в значения температуры. Для обеспечения более плотного контакта термопары с образцом в последнем изготавливается отверстие глубиной 0,5 мм, в которое плотно помещается спай термопары.

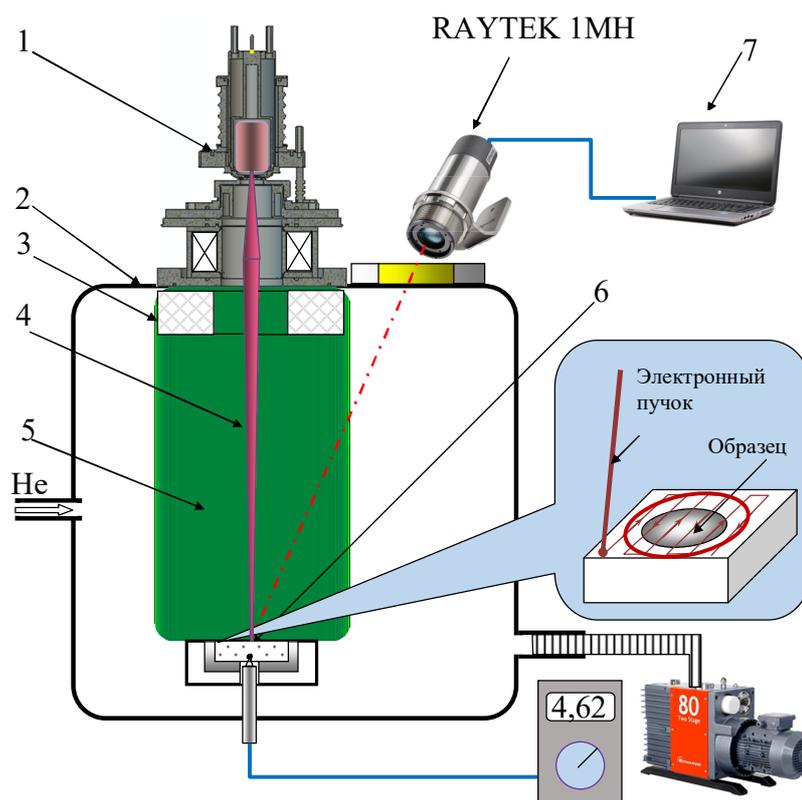


Рисунок 2.8 – Схема экспериментальной установки для спекания керамики: 1 – плазменный электронный источник; 2 – вакуумная камера; 3 – система отклонения пучка; 4 – электронный пучок; 5 – пучковая плазма; 6 – спекаемый образец; 7 – компьютер

2.4 Экспериментальная установка для генерации ленточного электронного пучка и плазменной обработки

Ленточные электронные источники, генерирующие электронные пучки с энергией в диапазоне 0,5–10 кВ и током от 0 до 200 мА в области давлений в единицы и десятки, разрабатываются на кафедре физики в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники на протяжении более 20 лет.

Конструктивно электронные источники представляют собой трех-электродную систему, состоящую из протяженного полого катода, плоского анода и экстрактора (рисунок 2.9). Протяженный полый катод 1 в виде полого параллелограмма и плоский анод 2 с эмиссионным окном, перекрытым металлической мелкоструктурной сеткой 3, формируют разрядный промежуток электронного источника. Ввиду использования плазменного катода в качестве эмиттера электронов отсутствует необходимость создания перепада давлений между электронным источником и рабочей камерой. Особенность источника заключается в уникальной форме ускоряющего узла, которая позволяет предотвратить пробой ускоряющего промежутка по так называемым «длинным путям», что обеспечивает электрическую прочность при давлениях до 30 Па и ускоряющем напряжении до 10 кВ.

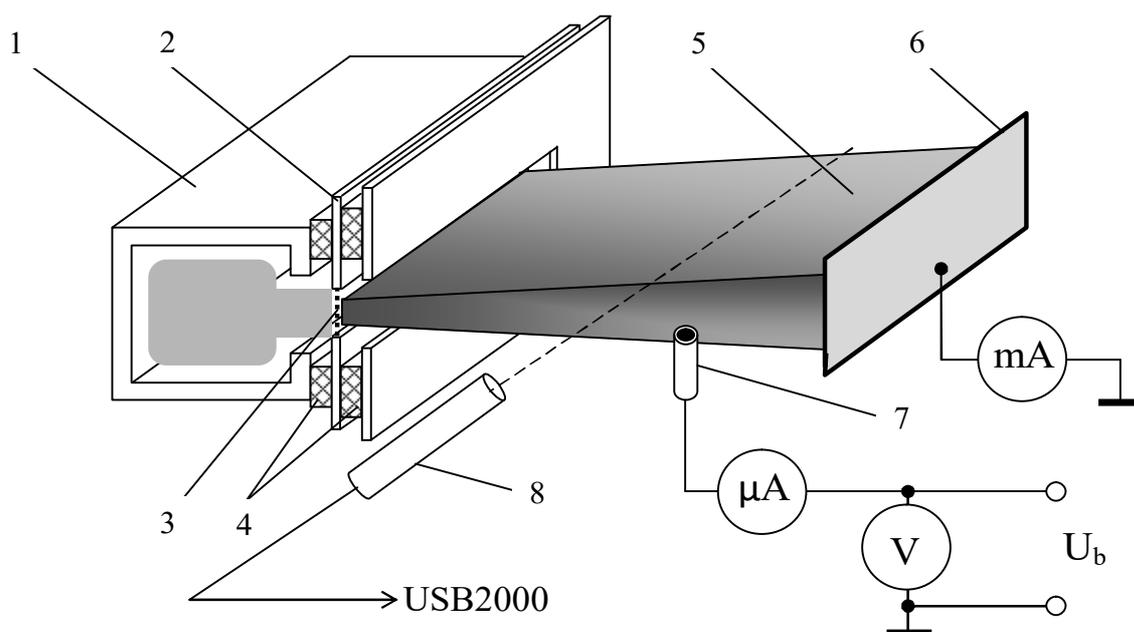


Рисунок 2.9 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – протяженный полый катод; 2 – анод; 3 – экстрактор; 4 – изоляторы;
 5 – электронный пучок; 6 – коллектор; 7 – одиночный зонд;
 8 – спектрометр; поперечный размер пучка $10 \times 1 \text{ см}^2$,
 длина образованной пучковой плазмы 40 см

Кроме того, особой конфигурации вставки в ускоряющий электрод позволяют получать слабо расходящийся электронный пучок в отсутствие транспортирующего продольного магнитного поля. Угол

расходимости электронного пучка не превышает 10 градусов. Поперечные размеры электронного пучка, формируемого таким электронным источником, 100×10 мм, протяженность участка транспортировки пучка в рабочей камере до коллектора 50 см.

Внешний вид источника и один из вариантов его расположения на вакуумной камере показан на рисунках 2.10, 2.11.

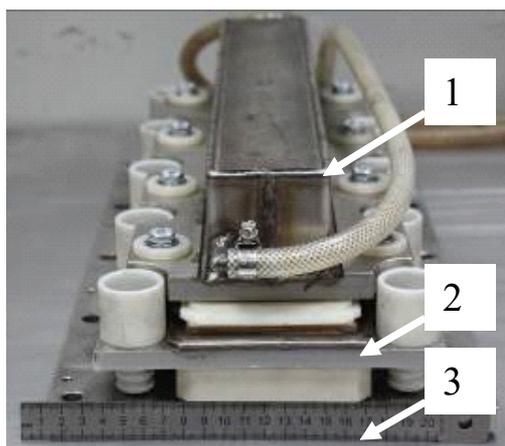


Рисунок 2.10 – Внешний вид источника электронов:
1 – протяженный полый катод; 2 – анод;
3 – ускоряющий электрод

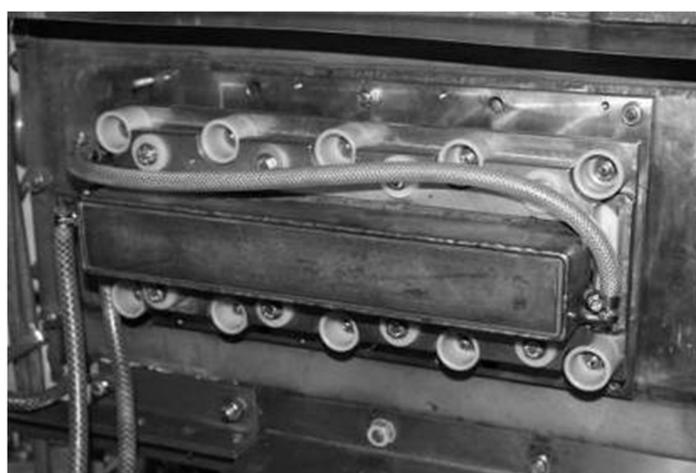


Рисунок 2.11 – Электронный источник
на вакуумной камере

Типичный вид вольт-амперных характеристик форвакуумного плазменного источника ленточного пучка электронов представлен на рисунке 2.12. Вид характеристик – типичный для плазменных источников электронов. На начальном этапе характеристики повышение

ускоряющего напряжения вызывает резкий рост величины тока эмиссии, который в дальнейшем проявляет тенденцию к насыщению – рост тока пучка замедляется. Для форвакуумных плазменных источников электронов наличие участка насыщения на вольт-амперной характеристике является еще одним доказательством генерации ускоренного электронного пучка.

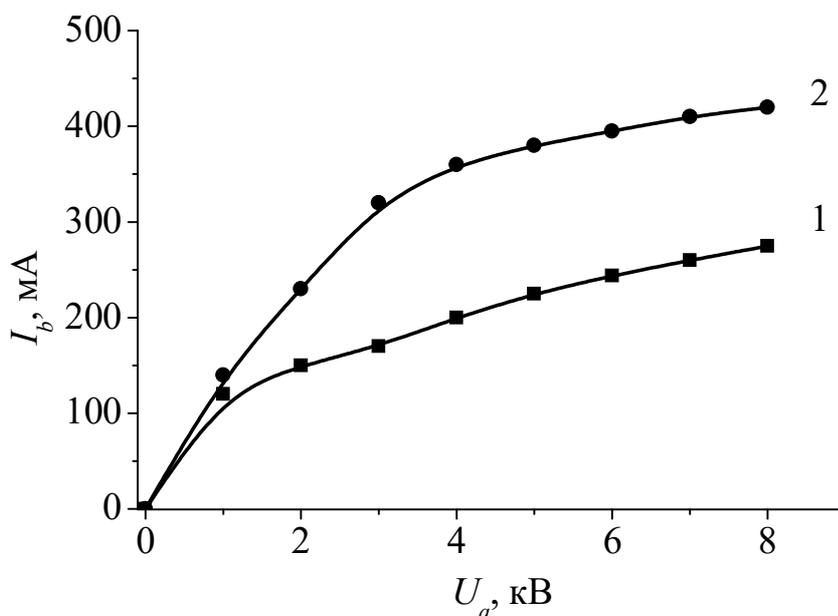


Рисунок 2.12 – Вольт-амперные характеристики модернизированного источника для различных токов разряда I_d :
1 – 200 мА; 2 – 400 мА. Давление 7 Па, аргон

Параметры источника, изображенного на рисунке 2.10, с катодной полостью длиной 10 см представлены в таблице 2.1. Выбор максимального тока разряда в 1 А связан с необходимостью предотвращения перехода разряда в дуговую форму горения. Ограничение ускоряющего напряжения на уровне 10 кВ обусловлено защитой персонала от возможного рентгеновского излучения при работе источника.

При распространении электронного пучка за счет ионизации молекул рабочего газа формируется пучковая плазма. Возможна генерация плазмы в двух режимах – спокойная плазма и с зажиганием пучково-плазменного разряда (ППР). Режим спокойной плазмы реализуется при относительно малых токах 150–200 мА, концентрация

пучковой плазмы аргона при этом не превышает $5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, температура электронов 0,5 эВ (рисунок 2.13, область I).

Таблица 2.1 – Эксплуатационные параметры источника ленточного электронного пучка

Режим работы	Непрерывный
Ток разряда, А	До 1
Ускоряющее напряжение, кВ	До 10
Ток пучка, мА	До 800
Размеры пучка в поперечном сечении, мм ²	100×4
Максимально достигаемая мощность электронного пучка, кВт	5
Плотность тока, мА/см ²	200
Рабочий газ	Остаточная атмосфера, гелий, воздух, метан, аргон, кислород, азот
Давление рабочего газа, Па	5 – 15

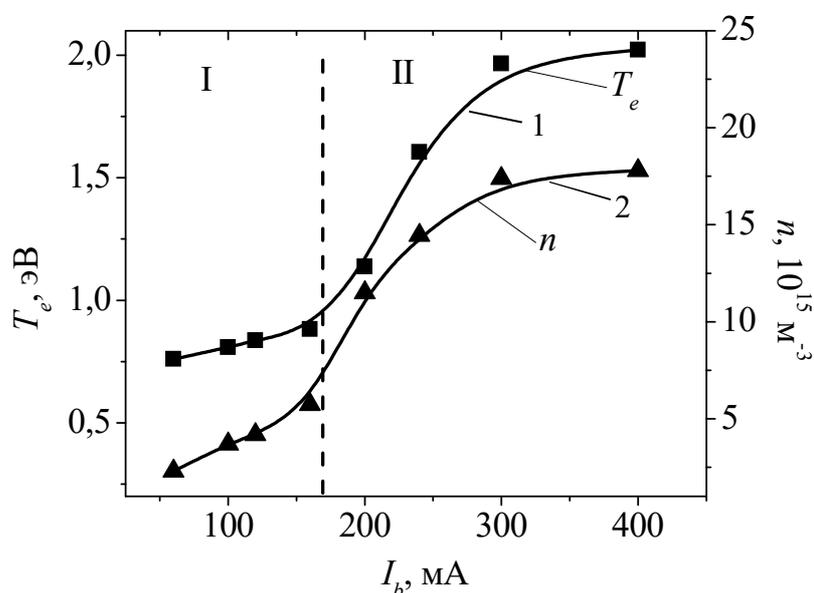


Рисунок 2.13 – Зависимость температуры электронов (кривая 1) и концентрации пучковой плазмы (кривая 2) от тока пучка. Давление 7 Па

Повышение тока пучка в два раза приводит к резкому увеличению концентрации и температуры электронов плазмы до $1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$

и 2 эВ (область II) соответственно. Повышение концентрации сопровождается также усилением интенсивности свечения плазмы (рисунок 2.14).

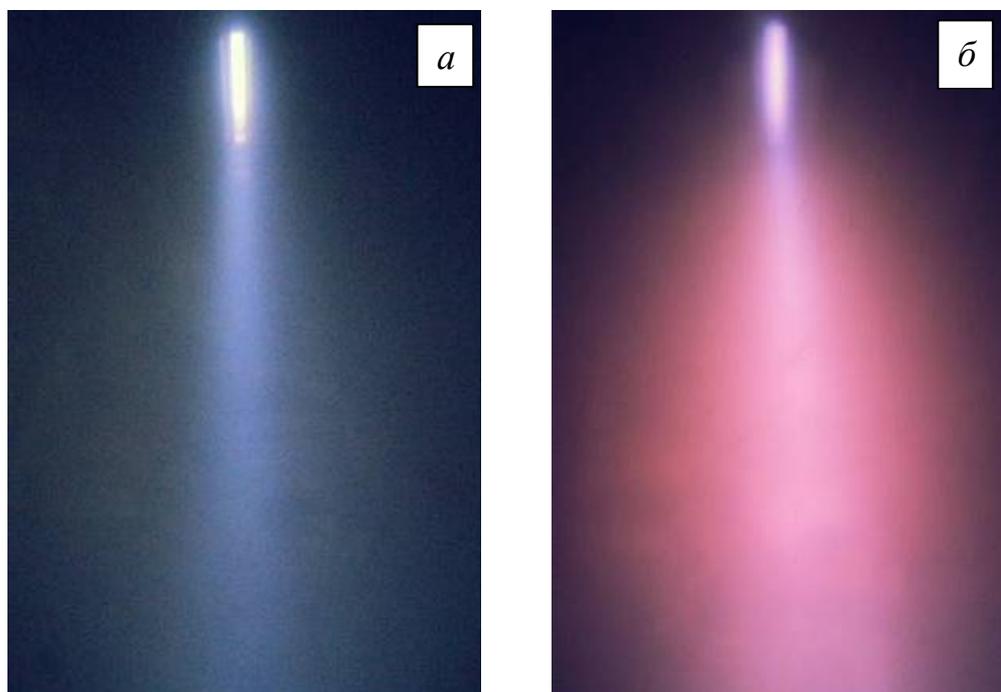


Рисунок 2.14 – Свечение пучковой плазмы при различных токах пучка: *a* – 200 мА; *б* – 250 мА; давление 7 Па, ускоряющее напряжение 2 кВ

Указанные результаты, а также смещение максимума энергии электронов пучка в область более низких энергий указывают на зажигание пучково-плазменного разряда при взаимодействии электронного пучка и созданной им плазмы. В формируемом при этом плазменном образовании типа «плазменный лист» концентрация плазмы и температура электронов составляют $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и 1–2,5 эВ соответственно. Достигнутые значения параметров и размеров плазмы позволяют использовать ее в технологиях поверхностной модификации различных изделий с плоской протяженной формой.

3 ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ПЛАЗМЫ

Проблемы, возникающие при диагностике плазмы, генерируемой в процессе нанесения покрытий из металлов и диэлектриков, как правило, связаны с нежелательным осаждением проводящих или непроводящих покрытий на электродах измерительных устройств. Кроме этого, в форвакуумной области давлений длина свободного пробега иона до столкновения с нейтралами газа составляет единицы миллиметров, поэтому на сантиметровых расстояниях от области генерации пучковой плазмы до места регистрации ионов их зарядовые состояния могут существенно изменяться. Наконец, относительно высокое давление приводит к снижению электрической прочности и вероятность пробоев при отборе заряженных частиц на зонд или ускорении ионов плазмы существенно выше. Поэтому использование стандартного масс-спектрометрического оборудования и зондовых методик весьма затруднительно. Наличие плотной пучковой плазмы, генерируемой электронным пучком при его транспортировке в форвакуумной области давлений, также накладывает требования к диагностическому оборудованию, используемому для измерения параметров электронного пучка. Именно особенности диагностики параметров пучковой плазмы и электронного пучка в области повышенных давлений обусловили необходимость создания и модернизации экспериментального диагностического оборудования.

3.1 Измерение параметров плазмы

Одиночный зонд Ленгмюра цилиндрической, плоской или сферической конфигурации широко используется для измерения параметров газоразрядной плазмы. На собирающей поверхности зонда может присутствовать несколько монослоев адсорбированного газа. Но этот газ не приводит к значительным изменениям электрической проводимости поверхности зонда. Напротив, в процессах испарения металла или диэлектрика собирающая поверхность зонда покрывается пленкой испаряемого материала и его соединений с молекулами

рабочего газа. В случае испарения металла это вызывает увеличение площади поверхности зонда или запыление изолятора зонда и появление токов утечек и даже его «закорачивание». При испарении диэлектриков последствия более катастрофичны. Диэлектрическая пленка на поверхности зонда приводит к его электрической изоляции от плазмы, что делает зондовые измерения невозможными. Поэтому для измерения параметров плазмы в условиях электронно-лучевого испарения диэлектрика используется зонд Ленгмюра оригинальной конструкции (рисунок 3.1).

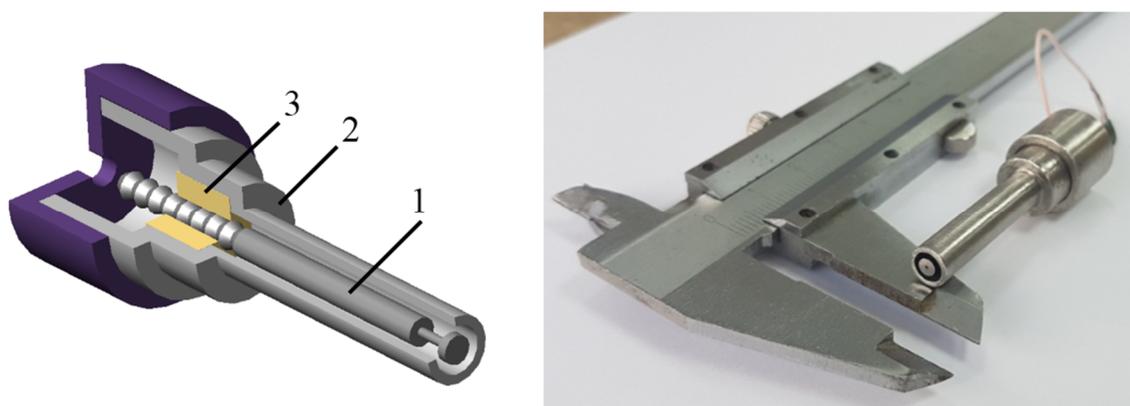


Рисунок 3.1 – Конструкция (слева) и внешний вид (справа) зонда для измерений параметров плазмы при испарении диэлектриков: 1 – токособирающий электрод; 2 – экран; 3 – керамический изолятор

Для уменьшения скорости роста покрытий на собирающей поверхности зонда диаметром 3 мм токособирающий электрод 1 помещается в трубчатый заземлённый металлический экран 2. Ионная ветвь вольт-амперной характеристики зонда при измерении плазмы пучка приведена на рисунке 3.2.

Общая схема проведения зондовых измерений параметров пучковой плазмы представлена на рисунке 3.3. Перемещение зонда осуществляется с помощью трехкоординатного манипулятора. Таким образом обеспечивается возможность измерения параметров плазмы в любой области объема вакуумной камеры.

Пример измеренных концентрации n , потенциала ϕ_p и температуры электронов T_e пучковой плазмы, созданной внутри металлической полости, как функций давления приведен на рисунке 3.4. Видно,

что все параметры зависят от давления и потенциала полости. Таким образом, разработанный зонд может использоваться для измерения параметров плазмы даже в таких сложных для изучения объектах, как полости, заполненные плазмой.

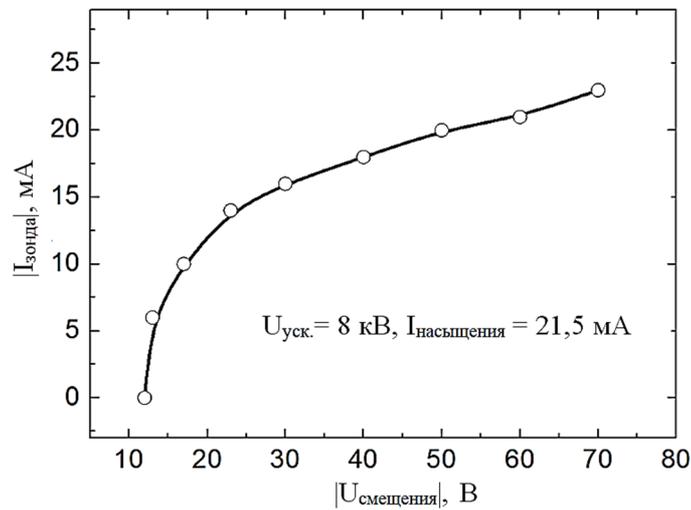


Рисунок 3.2 – Вольт-амперная характеристика ионной ветви зонда при измерении плазмы пучка и подаче на зонд отрицательного смещения

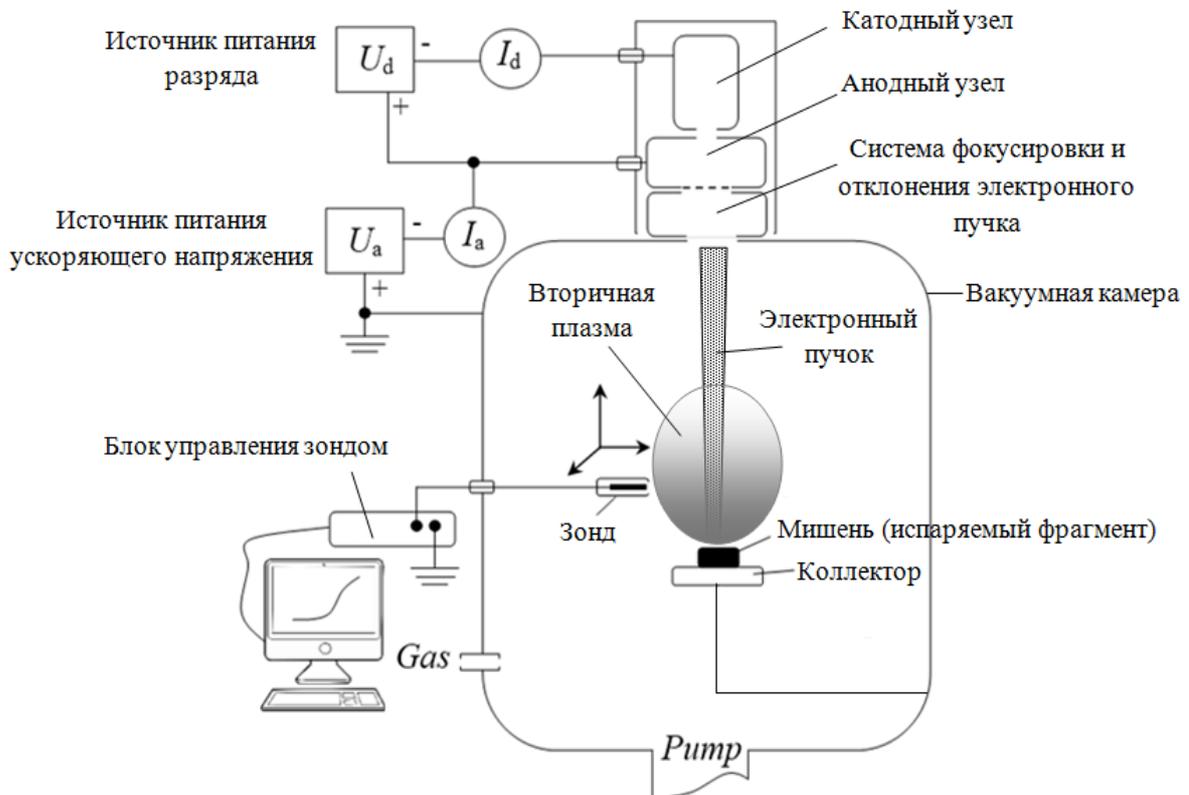


Рисунок 3.3 – Схема измерения параметров плазмы одиночным Ленгмюровским зондом

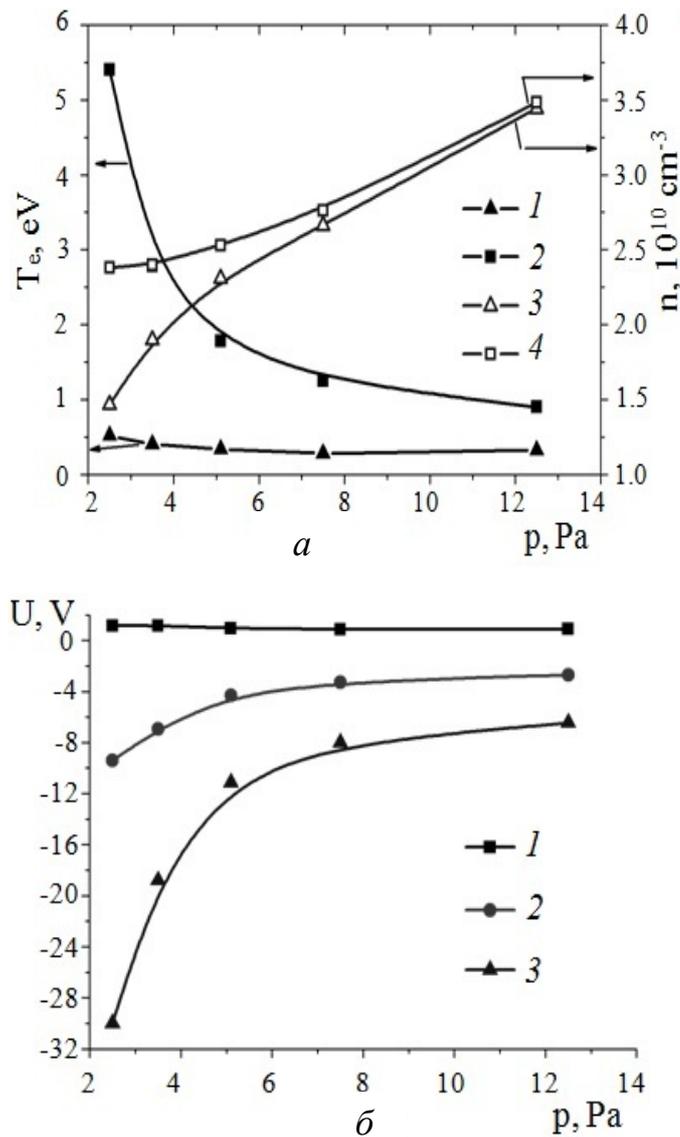


Рисунок 3.4 – Температура электронов T_e и концентрация плазмы n (а), а также потенциал плазмы ϕ_p и потенциал ϕ_{fl} изолированной полости (б) как функции давления; 1, 3 – заземленная полость, 2, 4 – изолированная полость (а); 1 – ϕ_p в заземленной полости, 2 – ϕ_p в изолированной полости, 3 – ϕ_{fl} (б); $I_b = 25 \text{ mA}$, $U_a = 3 \text{ кэВ}$

Для определения параметров плазмы в отсутствие электродов в плазме, относительно которых измеряется ВАХ одиночного зонда (ВЧ- и СВЧ-разряды, распадающаяся плазма), используется двойной зонд. Стоит отметить, что система двойного зонда является «плавающей» (изолированной) и искажения плазмы зондом при измерениях значительно меньше, чем в системе одиночного зонда. Двойной зонд позволяет определять температуру электронов T_e по ВАХ

в окрестности плавающего потенциала и концентрацию заряженных частиц по ионному току насыщения. Метод двойного зонда для исследования плазмы заключается в помещении в плазму двух одинаковых зондов и подаче между ними напряжения. Минимальное расстояние между зондами определяется тем расстоянием, на котором еще отсутствует экранирование одного зонда другим. Двойной Ленгмюровский зонд представляет собой керамическую трубку с двумя отверстиями, через которые протянуты две вольфрамовые проволоки, выступающие за пределы керамического изолятора. Двойной зонд крепится на держателе таким образом, что его рабочая часть находится в промежутке между катодом и анодом и токоприемные поверхности зондов погружены в плазму. К проволокам прикрепляется двойной кабель, выведенный наружу вакуумной камеры, он подключается к блоку питания и регистрации двойного зонда.

Схема измерений показана на рисунке 3.5.

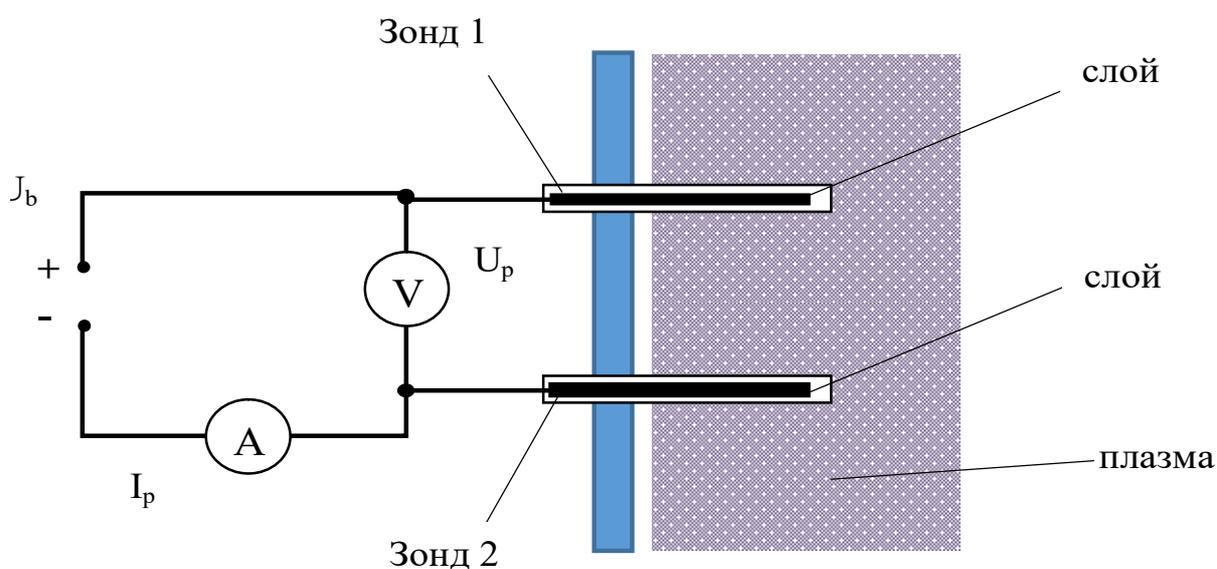


Рисунок 3.5 – Схема подключения двойного зонда

Для исследований используются зонды, изготовленные из вольфрамовых проволок диаметром 0,2–1 мм и длиной 3–6 мм. Типичный вид ВАХ двойного зонда изображен на рисунке 3.6. Несимметричный вид ВАХ связан с некоторым различием потенциала плазмы в местах расположения зондов, а также неполной идентичностью самих зондов.

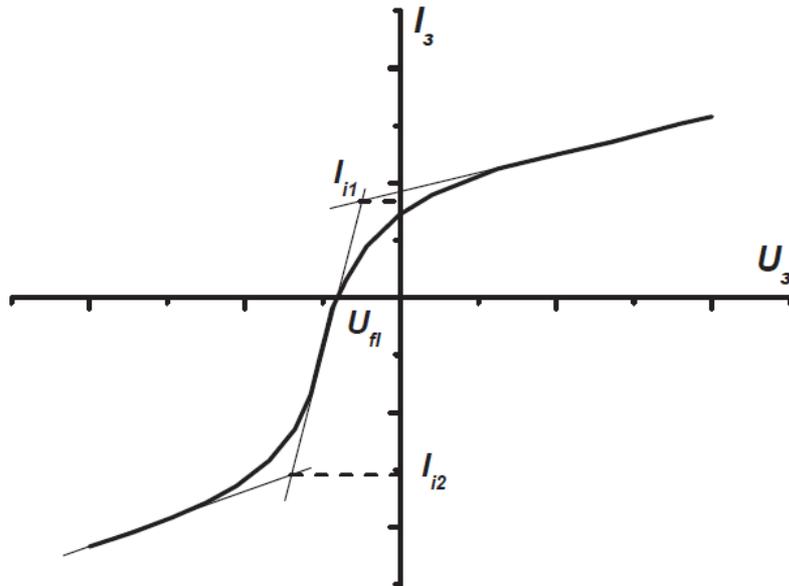


Рисунок 3.6 – ВАХ двойного зонда

Расчет параметров плазмы осуществляется путем аппроксимации прямыми наклонных участков зондовой характеристики. Далее определяются точки пересечения прямых с вертикальной осью I , находятся углы наклона и угловые коэффициенты прямых. Значение производной тока $\left(\frac{dU}{dI}\right)_0$ в точке пересечения ВАХ с осью токов рассчитывается программным методом.

Расчет электронной температуры производится по формуле:

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{I_{i1} I_{i2}}{I_{i1} + I_{i2}} \frac{dU}{dI}, \quad (3.1)$$

где k – постоянная Больцмана; T_e – электронная температур; e – элементарный заряд; I_{i1} – точка пересечения линейной экстраполяции левой пологой части ВАХ с осью тока; I_{i2} – угловой коэффициент зависимости тока i_+ левой пологой зависимости ВАХ зонда; $\left(\frac{di}{dU}\right)_0$ – тангенс угла наклона характеристики в области начала координат (производная полного тока в точке с потенциалом $U = 0$).

Концентрация электронов определяется по формуле:

$$n_e = \frac{i_+}{0,4 \cdot S_3 \cdot e \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{M_i}}}, \quad (3.2)$$

где M_i – масса иона; S_3 – площадь поверхности одного из зондов.

Автоматическое снятие зондовых характеристик и получение параметров плазмы осуществляется при использовании блока питания и регистрации. Внешний вид блока питания и регистрации двойного зонда представлен на рисунке 3.7. Данный блок предназначен для подачи пилообразного напряжения на зонды и регистрации зависимости тока, протекающего между зондами. На передней панели имеются ручки регулировки параметров пилообразного напряжения (амплитуды, длительности и частоты), кнопки режима запуска (одиночный старт, циклическое повторение, внешний запуск) и выбора чувствительности регистрируемых сигналов.



Рисунок 3.7 – Внешний вид блока питания и регистрации двойного зонда

Считывание и обработка регистрируемых сигналов осуществляется компьютером при помощи специального программного обеспечения. После считывания сигналов напряжения и тока, протекающего через зонды, программа автоматически строит вольт-амперную характеристику в центральной части программы. Пример характерной ВАХ представлен на рисунке 3.8.

Для автоматического расчета параметров плазмы необходимо внести в соответствующие окна программы данные о газе, площади

приемной поверхности зонда. По вольт-амперной характеристике и представленным выше формулам автоматически рассчитываются температура электронов плазмы и ее концентрация.

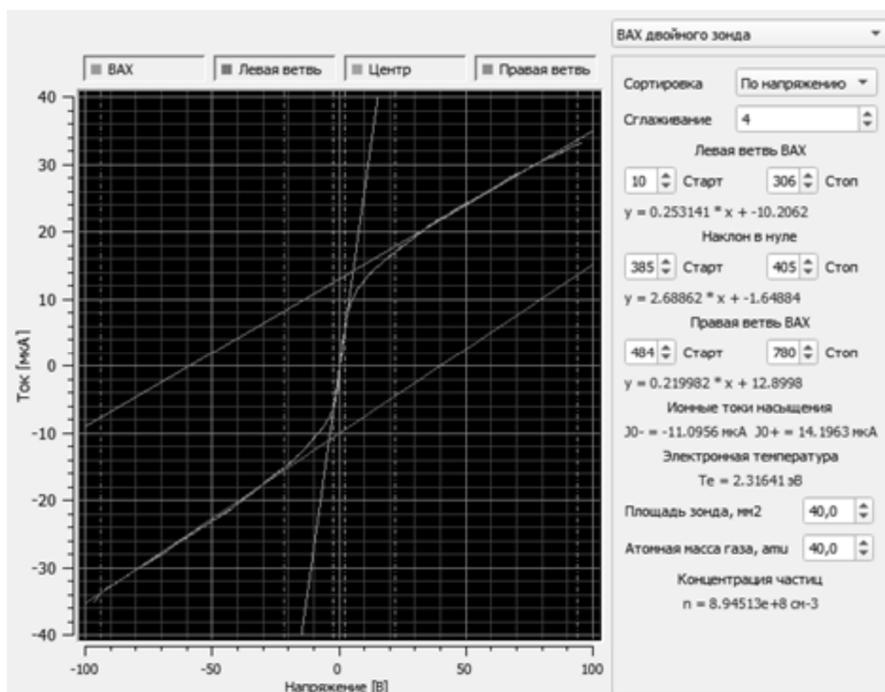


Рисунок 3.8 – Вкладка «ВАХ двойного зонда»

3.2 Спектрометрические измерения параметров плазмы

Диагностика плазмы с помощью исследования испускаемого ею излучения относится к дистанционным методам исследования. Преимущества спектроскопической диагностики – в существенно меньших возмущениях, вносимых исследуемым зондом (в данном случае приемником излучения) в плазму. Расположение приемника вне плазмы позволяет снизить влияние измерений на параметры и, кроме того, проводить дистанционные измерения.

Диапазон спектральной чувствительности спектрометра Ocean Optics USB2000 (США) (рисунок 3.9) захватывает ультрафиолетовую область и видимый спектр 200–800 нм, разрешение прибора 0,3 нм. Для сбора излучения используется тонкая собирающая кварцевая линза диаметром 5 мм. В фокальной плоскости линзы располагается приемный конец оптоволоконного кабеля, второй конец кабеля подключается к спектрометру (рисунок 3.10).



Рисунок 3.9 – Спектрометр Ocean Optics USB2000

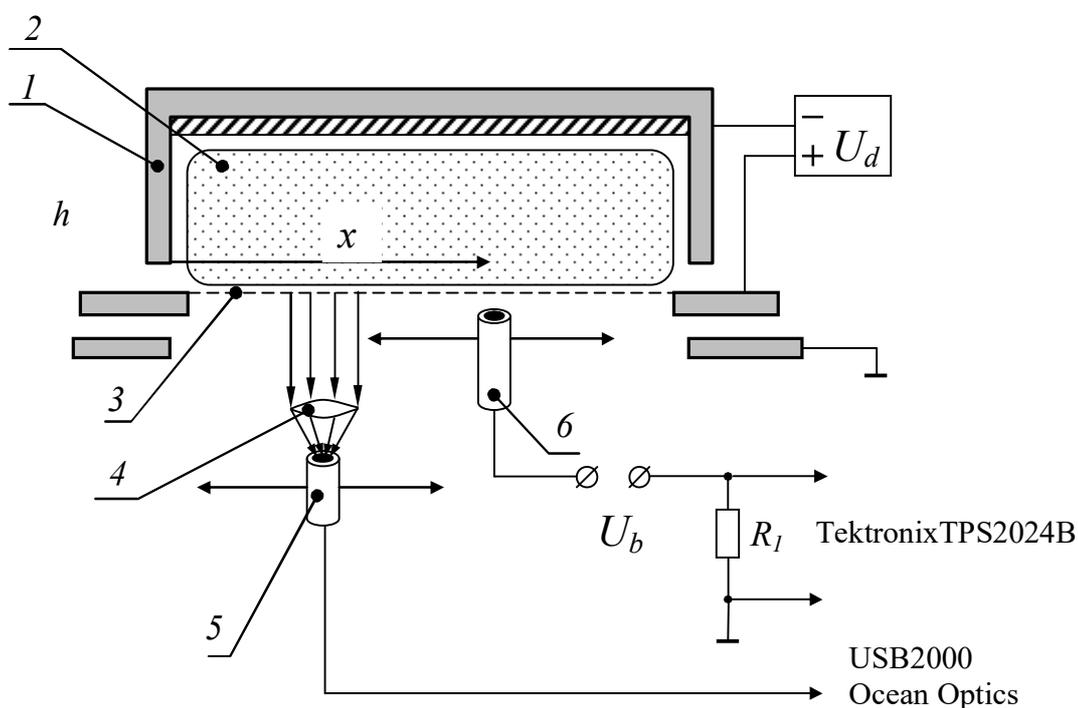


Рисунок 3.10 – Схема спектроскопических измерений параметров плазмы: 1 – разрядная система плазменного электронного источника; 2 – плазма тлеющего разряда; 3 – эмиссионная сетка; 4 – тонкая линза; 5 – приемная часть оптоволоконного кабеля спектрометра; 6 – перемещаемый Ленгмюровский зонд

Конструкция держателя линзы и кабеля позволяет проводить измерения спектра непосредственно в вакуумной камере. Обработка спектра осуществляется стандартным программным обеспечением, прилагаемым к спектрометру (рисунок 3.11).

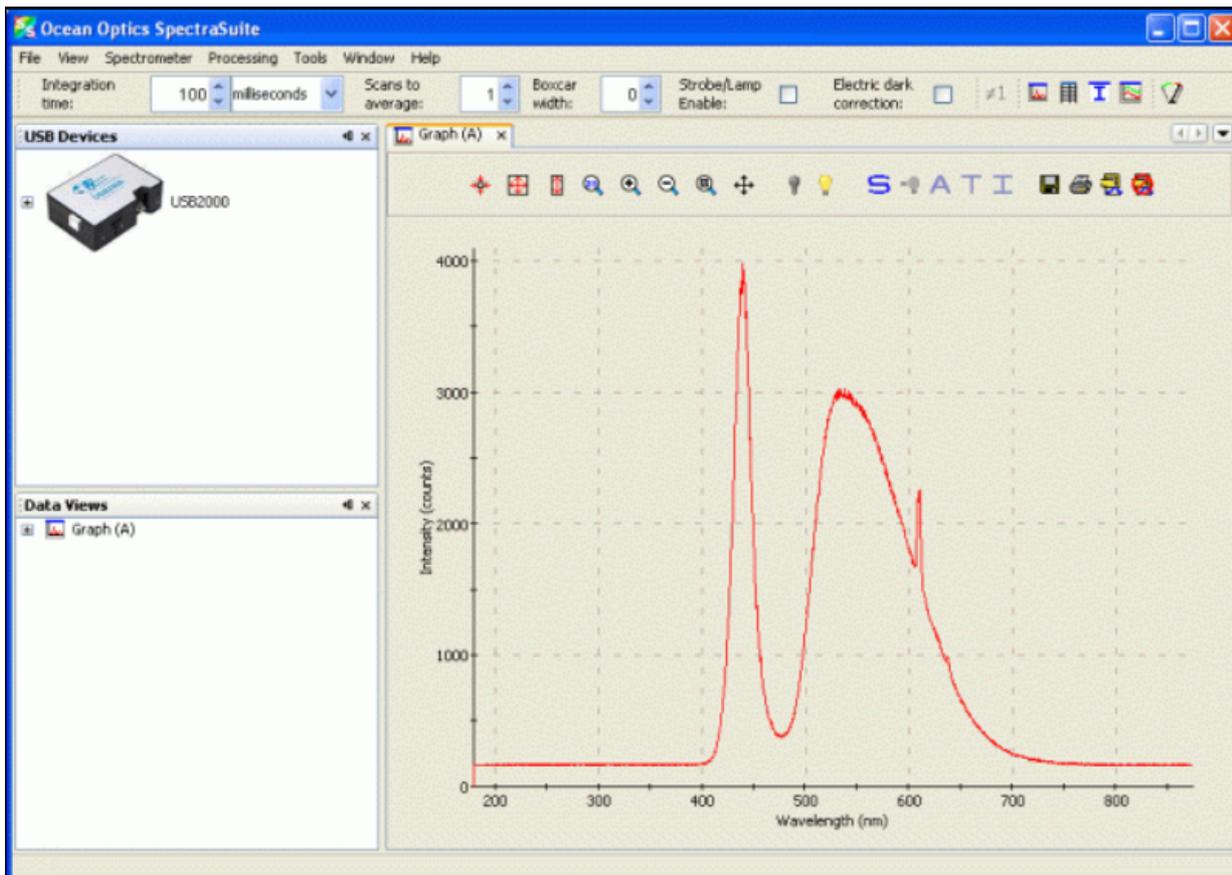


Рисунок 3.11 – Интерфейс программы спектрометра Ocean Optics USB2000

На рисунке 3.12 представлены типичные спектры свечения плазмы тлеющего разряда в катодной полости для различных газов. Отчетливо выделяются характерные для данного газа полосы свечения, а также полосы, характерные для азота. Наличие свечения азота связано с его присутствием в остаточной атмосфере вакуумной камеры и с его неполным удалением при напуске другого газа.

Расположение спектрометра на устройстве перемещения позволяет измерить изменение спектра свечения вдоль катодной полости. При перемещении приемной части спектрометра спектр свечения регистрируется с интервалом 1 с и далее по известной скорости перемещения и величине пройденного пути рассчитывается положение, соответствующее определенному спектру. Из полученного массива данных выбираются длины волн, характерные для используемого рабочего газа. По изменению интенсивности свечения плазмы разряда можно косвенно судить об изменении ее плотности.

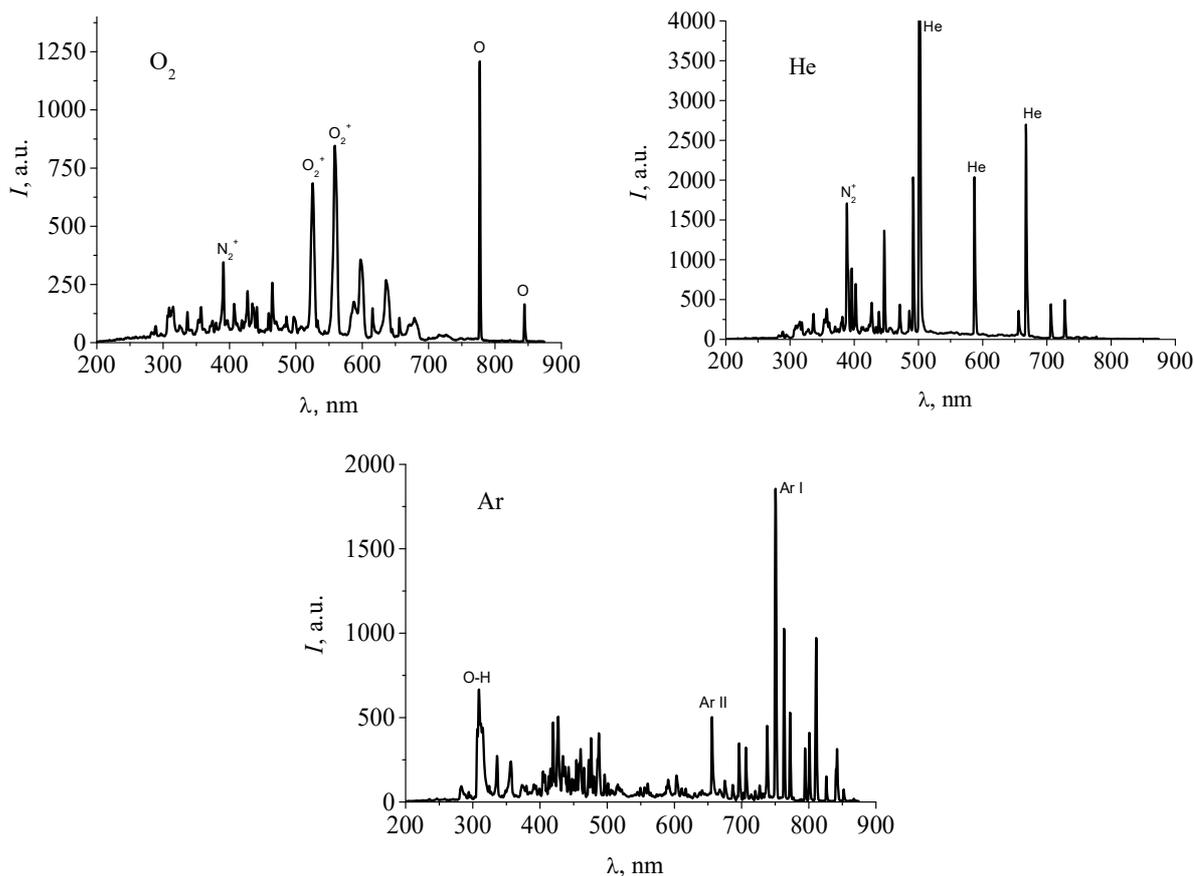


Рисунок 3.12 – Типичные спектры плазмы кислорода, гелия и аргона

3.3 Обращенный времяпролетный спектрометр

Масс-зарядовый состав плазмы является важным параметром при нанесении покрытий на поверхность. Поток ионов из плазмы вместе с потоком паров материала является средой, из которой формируется покрытие, следовательно, эти потоки во многом определяют его свойства. Для исследования пучковой плазмы при нанесении диэлектрических покрытий электронно-лучевым методом в форвакууме используется обращенный времяпролетный спектрометр. Принцип его работы состоит в извлечении и ускорении ионов из пучковой плазмы для анализа ее состава по времени пролета отклоненных от оси времяпролетной системы ускоренных ионов. Такая концепция построения спектрометра связана с тем, что нанесение покрытий проводится на поверхность, находящуюся под потенциалом, близким к потенциалу заземленной вакуумной камеры, поэтому потенциал плазмы также близок к нулю. Главной особенностью

обращенного времяпролетного спектрометра является возможность отбора и ускорения ионов из плазмы, а следовательно, анализ масс-зарядового состава ионов плазмы, находящейся под потенциалом, близким к потенциалу земли.

При нанесении диэлектриков в процессе испарения неэлектропроводных мишеней пары материала мишени распространяются в широком диапазоне углов. Это приводит к запылению элементов диагностического оборудования. Другой проблемой является нанесение покрытий при относительно высоком давлении, при котором пробег ускоренных ионов до столкновения с нейтралами газа не превышает сантиметра. Таким образом, существующие масс-спектрометры не подходят для исследования пучковой плазмы. Для решения указанных проблем в обращенном спектрометре отбор ионов осуществляется через апертуру малого диаметра – 2 мм. Апертура такого диаметра ограничивает поступление паров диэлектрика в спектрометр, а в сочетании с дифференциальной откачкой спектрометра турбомолекулярным насосом обеспечивает в трубе дрейфа давление ниже 10^{-3} Па, при котором длина свободного пробега ускоренных ионов до их столкновений с нейтралами была на порядок больше, чем база спектрометра, и их движение в трубе дрейфа происходит практически без столкновений. При подаче отклоняющего импульса (рисунок 3.13) ионный пучок отклоняется от оси и попадает на металлическую сетку-конвертер, с нитей которой в результате вторичной ионно-электронной эмиссии выбиваются электроны. Эти вторичные электроны снова ускоряются потенциалом спектрометра и регистрируются вторичным электронным умножителем.

Схема экспериментальной установки для измерения масс-зарядового состава плазмы с помощью обращенного масс-спектрометра представлена на рисунке 3.14.

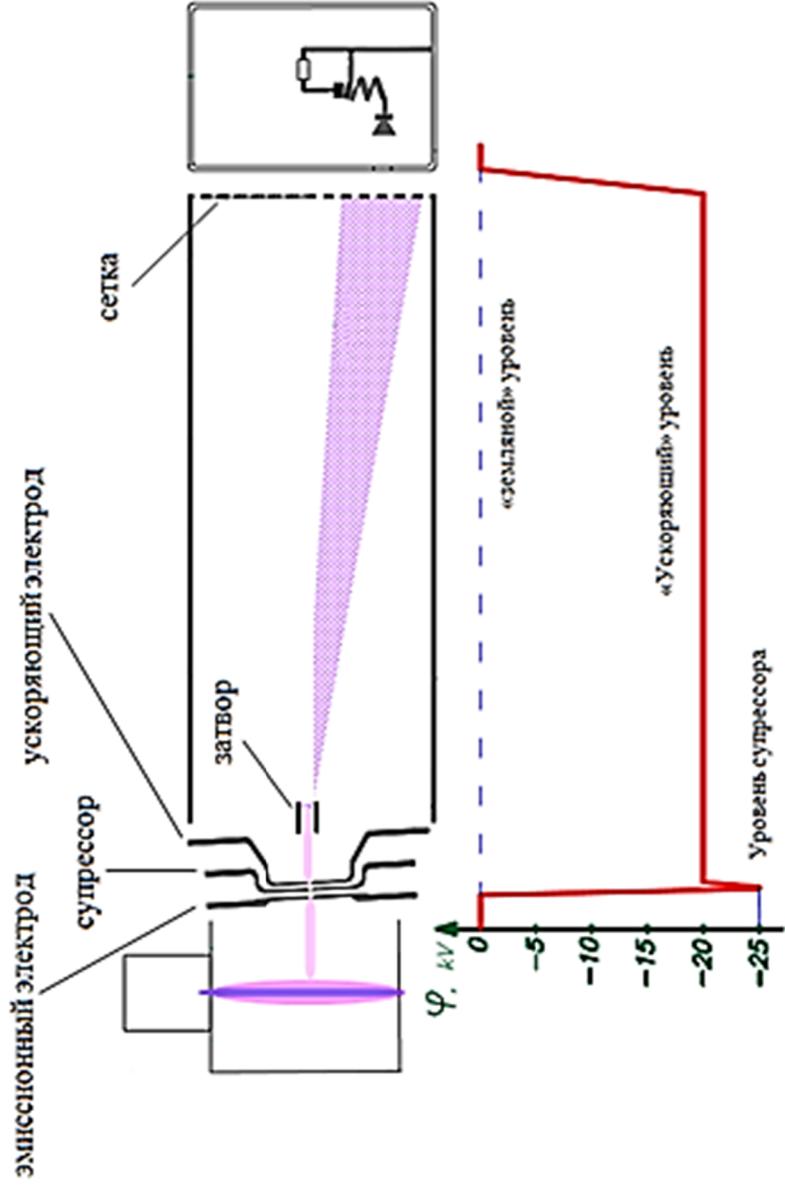


Рисунок 3.13 – Упрощенная схема времяпролетного спектрометра и распределение потенциала вдоль его оси

Конструкция спектрометра включает трехэлектродную одноапертурную систему формирования пучка ускоренных ионов 6–8, отбираемых из пучковой плазмы, трубу дрейфа ионов 4 и систему измерения 1–2. Размер отверстий в плазменном (эмиссионном) заземленном электроде 8, супрессоре 7 и ускоряющем высоковольтном электроде 6 равен 2 мм. Величина постоянного ускоряющего напряжения 10–20 кВ. Затвор спектрометра представляет собой две плоскопараллельные пластины 5 размером 20×8 мм из нержавеющей стали, расстояние между которыми 4 мм. К пластинам прикладывается импульс отклоняющего напряжения амплитудой до 2 кВ, длительностью 150 нс и с фронтами 25 нс, создающий между ними электрическое поле, силовые линии которого перпендикулярны пучку ионов и отклоняют его от оси. Столь малое время отклонения по сравнению с временем пролета ионами трубы дрейфа длиной 1,2 м (время прохождения наиболее легкими ионами H^+ около 1 мкс) приводит к формированию отклонённого сгустка ионов, в котором по мере движения ионы разделяются по скоростям. Поскольку для всех ионов ускоряющее напряжение одинаково, то скорости ионов в конечном счете определяются их зарядовым состоянием и массой: $(eQ_i/M_i)^{1/2}$.

В обращенном спектрометре супрессор 7, ускоряющий электрод системы извлечения 6, отклоняющие пластины 5, труба дрейфа 4 и сеточный электрод-конвертер 3 узла регистрации смещены относительно земли на потенциал полного ускоряющего напряжения. Для такой конфигурации электродов достаточно сложной проблемой является регистрация малых ионных токов на коллекторе. В данном случае эта проблема решается установкой металлической сетки-конвертера 6 и регистрацией выбитых из неё вторичных электронов, ускоряемых и регистрируемых вторичным электронным умножителем (ВЭУ) 2. Таким образом, по временам задержки пиков, регистрируемых на измерительном сопротивлении 1, возможно определить величину eQ_i/M_i для конкретного ионного компонента, а следовательно, масс-зарядовый состав исследуемой плазмы, а по величинам интенсивностей пиков – соотношение ионных компонентов. На рисунке 3.15 представлены осциллограммы импульса отклоняющего напряжения (верхний луч) и сигнала регистрируемых спектрометром

ионов пучковой плазмы, генерируемой при напуске в вакуумную камеру смеси из трёх газов: гелия, азота и кислорода.

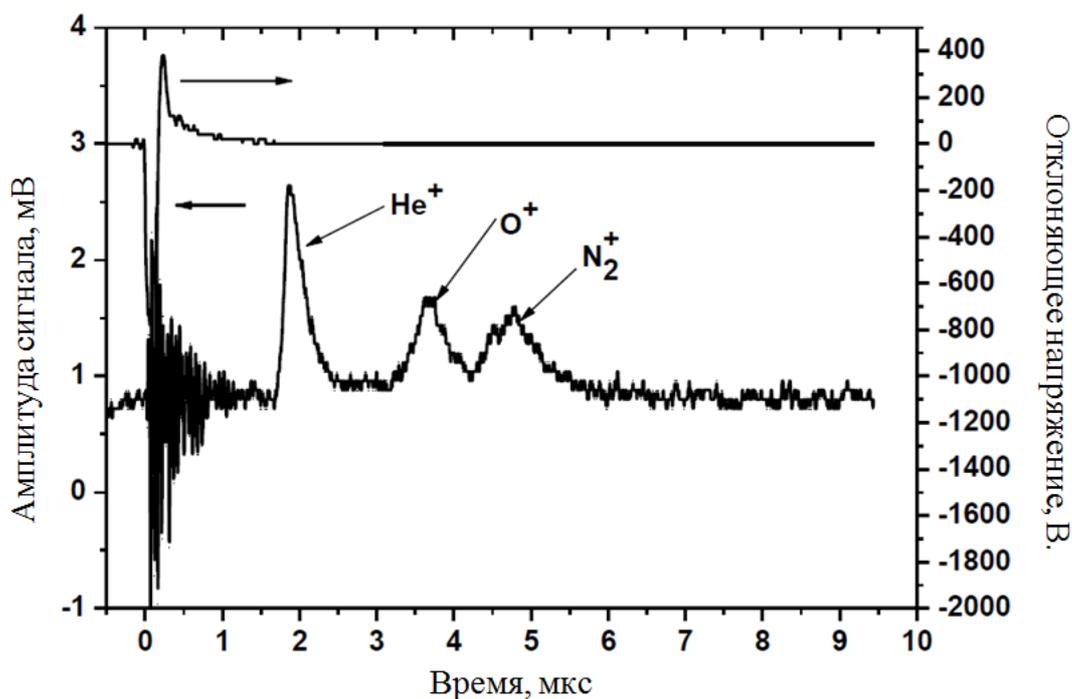


Рисунок 3.15 – Спектр пучковой плазмы при напуске в камеру смеси газов He, N₂, O₂. Давление в области генерации пучковой плазмы 5 Па, ток пучка 40 мА

В спектре различаются ионы всех газов, входящих в напускаемую смесь, но вместе с тем наблюдаются шумы, и сигнал ВЭУ смещен на 1 мВ даже без приложения импульса отклоняющего напряжения, что связано с засветкой ВЭУ рассеянными ионами пучка. Для уменьшения засветки конвертера в трубе дрейфа 2 на расстоянии 90 см от отклоняющих пластин размещается диафрагма 3 (рисунок 3.16) со смещенным от оси системы отверстием диаметром 15 мм. Диафрагма экранирует пучок ускоренных ионов в отсутствие отклоняющего импульса ионного потока, что снижает поступление фоновых ионов на сеточный электрод-конвертер.

Рассмотрим характерные особенности масс-спектрометра на примере ионного спектра на рисунке 3.17. Несомненным достоинством спектрометра является то, что он отображает за один импульс все ионы пучковой плазмы, а по величине пиков позволяет оценить их относительную концентрацию.

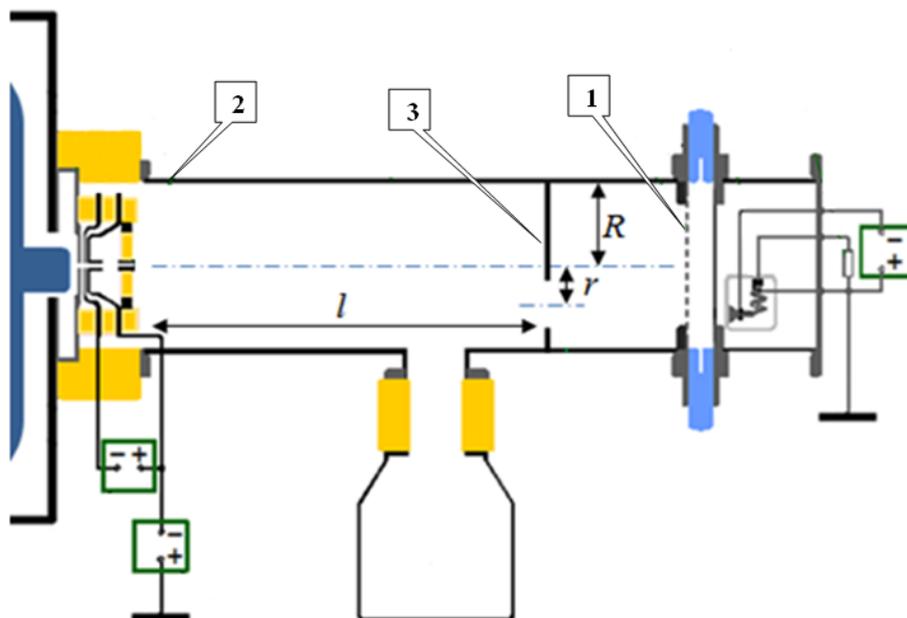


Рисунок 3.16 – Модернизированный обращенный масс-зарядовый спектрометр: 1 – сеточный электрод-конвертер; 2 – труба дрейфа; 3 – диафрагма

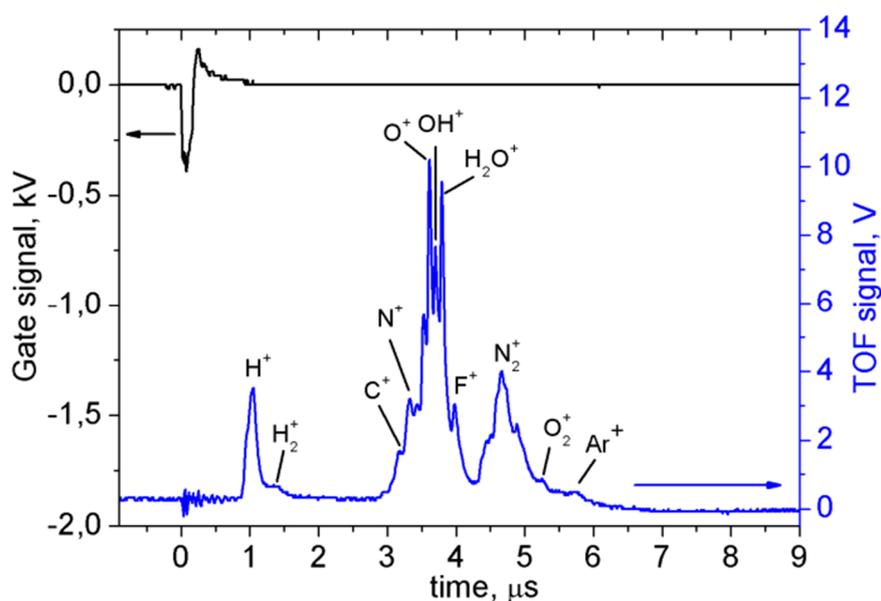


Рисунок 3.17 – Масс-спектр ионов пучковой плазмы, полученный после модернизации спектрометра. Ток пучка электронов 20 мА, энергия электронов 3 кэВ, ускоряющее ионы напряжение 10 кВ

Спектрометр позволяет вести мониторинг состава плазмы с характерным временным разрешением 10 мс. Такого временного разрешения вполне достаточно для проведения исследований масс-

зарядового состава пучковой плазмы. Вместе с тем ширина пиков ионной составляющей относительно большая, что затрудняет количественное определение концентрации ионов с близкими отношениями eQ_i/M_i . Например, на рисунке 3.17 видно, что в составе плазмы присутствуют ионы C^+ и N^+ , но пики «сливаются» между собой и с группой пиков O^+ , OH^+ , H_2O^+ , образованных при ионизации паров воды из атмосферы. Определение количества ионов C^+ или N^+ возможно, но требует существенных временных затрат для расшифровки спектра. Для более тонкой диагностики ионов с близкими отношениями eQ_i/M_i , например ионов изотопов, следует использовать прибор с большим разрешением, а этот спектрометр целесообразно применять в качестве обзорного при проведении работ по нанесению диэлектрических покрытий электронно-лучевым методом в форвакууме.

Внешний вид созданного обращенного времяпролетного масс-спектрометра приведен на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Экспериментальная установка, оснащенная времяпролетным спектрометром

Спектрометр можно использовать для решения широкого круга научных задач, например при разложении газов электронным пучком, исследовании мощных разрядов в вакууме среднего давления, при изучении плазмохимических процессов и реакций, то есть везде, где есть интенсивные потоки плазмы, высокая концентрация нейтральных частиц – там, где использование стандартного масс-спектрометрического оборудования затруднено.

3.4 Масс-спектрометрия ионного состава плазмы на основе квадрупольного анализатора остаточной газовой атмосферы

Для детального измерения в пучковой плазме ионов элементов и их изотопов используются масс-спектрометры на базе квадрупольных анализаторов остаточной газовой атмосферы RGA-100 и RGA-300. Такие анализаторы выпускаются компанией Stanford Research Systems (США). Они позволяют проводить масс-анализ состава газовых смесей, молекулы которых имеют массу до 100 а.е.м. (RGA-100) и до 300 а. е. м. (RGA-300). Кроме высокого разрешения молекул по массам, приборы имеют компактное исполнение и находят применение, например, для поиска течей в вакуумных установках и при давлении газовой среды 10^{-4} Па или ниже. Квадрупольный тракт газоанализатора и система регистрации чувствительны к нанесению покрытий, и прибор не может непосредственно применяться для анализа пучковой плазмы при нанесении диэлектрических покрытий. Поэтому используется модернизированная конструкция анализатора остаточной газовой атмосферы RGA.

Модернизация заключалась в демонтаже штатного ионизатора RGA и установке трехэлектродной одноапертурной системы извлечения из плазмы ионов и формирования ионного потока в рабочий объем анализатора. Внешний вид исходного анализатора остаточной атмосферы RGA-100 и масс-зарядового спектрометра на базе модифицированного RGA-300 приведен на рисунках 3.19 и 3.20, а схема установки с квадрупольными масс-спектрометрами – на рисунке 3.21.

В состав квадрупольного масс-спектрометра на базе RGA (RGA-100 или RGA-300) входят система извлечения ионов (электроды 9–11), фильтр масс 12, блок управления 14, цилиндр Фарадея 13, а также система откачки на основе откачного поста Pfeiffer Hi Cube 80 Eco (Германия).

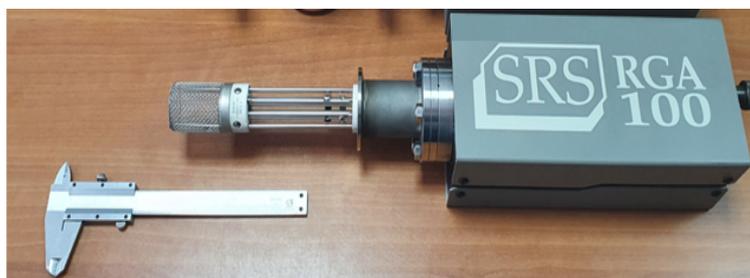


Рисунок 3.19 – Внешний вид исходного анализатора остаточной атмосферы RGA-100



Рисунок 3.20 – Внешний вид масс-спектрометра на базе RGA-300

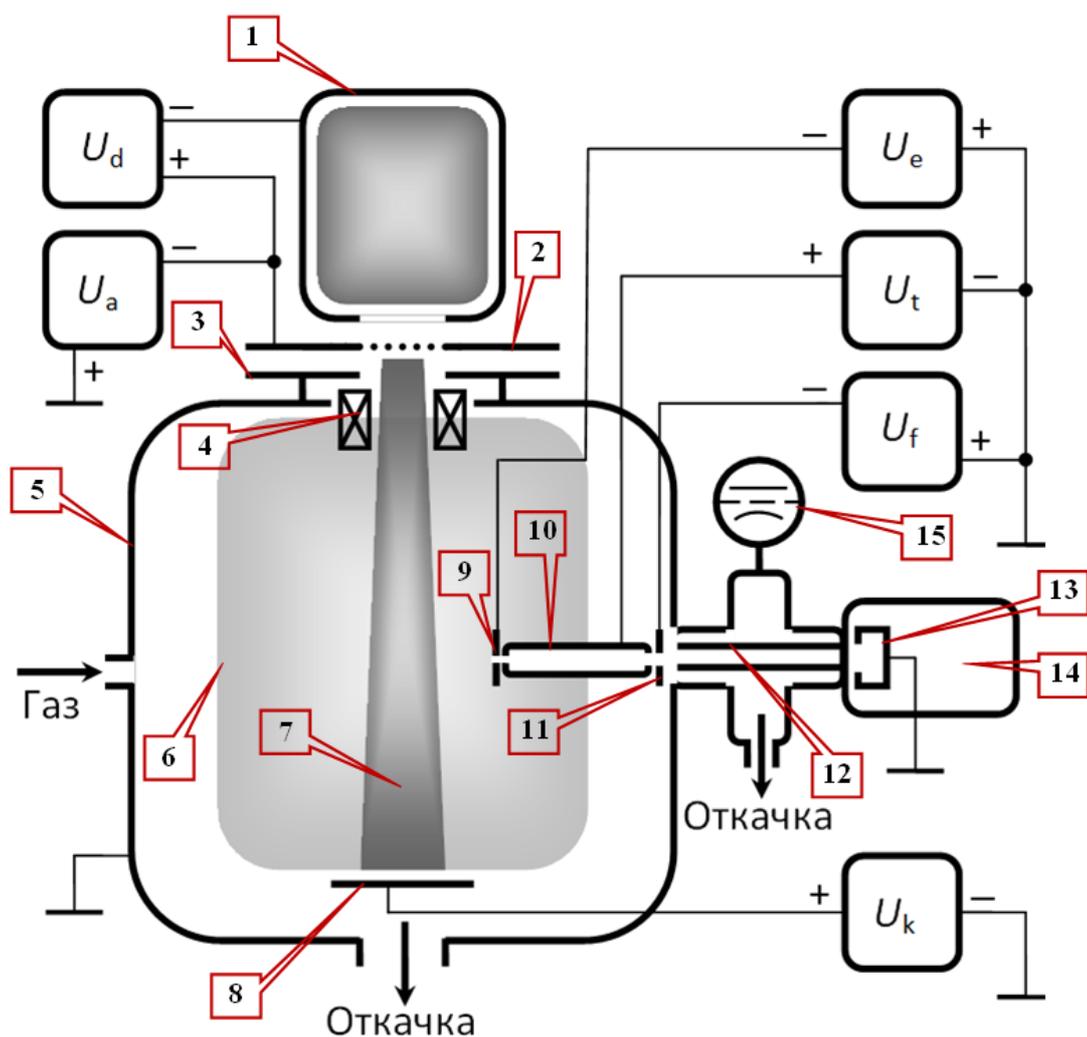


Рисунок 3.21 – Схема установки с квадрупольным масс-спектрометром для исследования пучковой плазмы: 1 – полый катод; 2 – анод с перфорированным электродом; 3 – ускоряющий электрод; 4 – фокусирующая система; 5 – вакуумная камера; 6 – пучковая плазма; 7 – пучок электронов; 8 – коллектор; 9 – извлекающий электрод; 10 – труба дрейфа; 11 – фокусирующий электрод; 12 – квадрупольные электроды фильтра масс; 13 – цилиндр Фарадея; 14 – блок управления спектрометром; 15 – ионизационная лампа; источники питания: разряда с полым катодом (U_d), ускоряющего напряжения (U_a), извлекающего электрода (U_e), трубы дрейфа (U_t), фокусирующего электрода коллектора (U_k)

Пост имеет скорость откачки форвакуумной и высоковакуумной системами $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $240 \text{ м}^3/\text{ч}$ соответственно. Электроды системы извлечения выполнены из дюралюминия и электрически изолированы друг от друга и от других частей спектрометра и вакуумной камеры. Извлекающий электрод 9 представляет собой диск толщиной 2 мм с апертурой диаметром $0,7 \text{ мм}$ в центральной части. Он обеспечивает перепад давления между вакуумной камерой, в которой происходит нанесение диэлектрических покрытий, и откачиваемым объемом масс-спектрометра. Для уменьшения проникновения паров испаряемой керамики с целью защиты электродов масс-спектрометра используется труба дрейфа 10 длиной 160 мм , имеющая внешний и внутренний диаметры 16 мм и 10 мм соответственно. Кроме того, труба дрейфа обеспечивает транспортировку ионного потока из области генерации пучковой плазмы 3 в область фокусирующего электрода 11. Этот электрод выполнен в виде пластины с отверстием диаметром 5 мм и служит для фокусировки ионов из трубы дрейфа 10 в область квадрупольных электродов 12. Так как давление в области транспортировки и фильтрации ионов является ключевым фактором, влияющим на разрешающую способность прибора, то во время работы контроль за давлением внутри анализатора осуществляется по показаниям ионизационной лампы 15 (ПМИ-2).

Поскольку цилиндр Фарадея 13, регистрирующий ионный сигнал, находится под потенциалом земли, то на коллектор электронного пучка 8 подается положительное относительно земли смещение величиной $U_k = 30 \text{ В}$. В результате пучковая плазма приобретает положительный относительно земли потенциал и возникает градиент потенциала между плазмой и цилиндром Фарадея спектрометра. Этот градиент приводит к появлению направленного ионного потока в спектрометр. Для направления ионного потока в область сепарации на извлекающий электрод 9 дополнительно подается отрицательный относительно земли потенциал U_e порядка минус 20 В . Труба дрейфа 10 находится под небольшим положительным потенциалом $U_t = 2,5 \text{ В}$ для удержания ионов на оси системы. Распределение потенциала между электродами спектрометра при оптимальных напряжениях на них показано на рисунке 3.22,г.

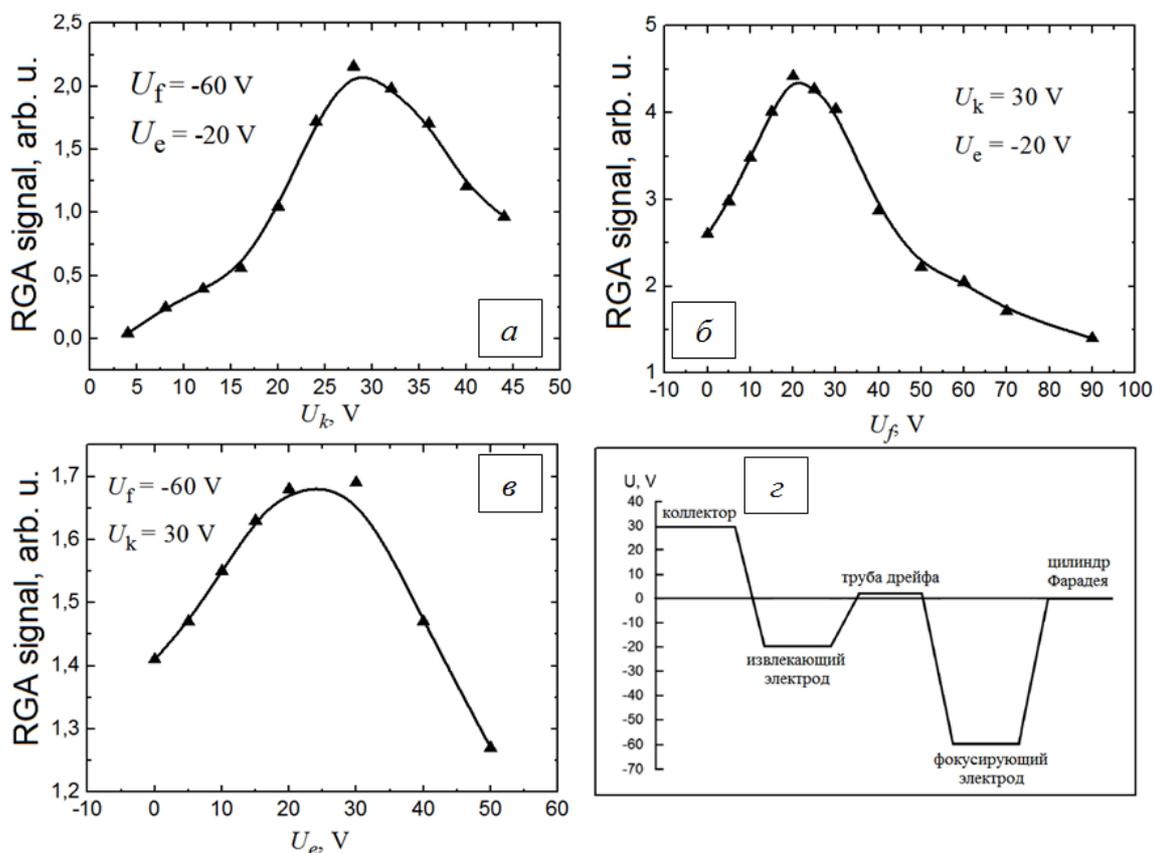


Рисунок 3.22 – Амплитуда сигнала спектрометра как функция напряжений на электродах (а – в) и распределение оптимальных потенциалов между электродами спектрометра (г)

Уменьшение данных значений по абсолютной величине приводит к заметному снижению амплитуды сигнала, а их увеличение – к незначительному росту.

Пример ионного спектра плазмы при электронно-лучевом испарении бора приведен на рисунке 3.23.

На спектре отчетливо видны пики, соответствующие изотопам ионов бора, а также пики углерода и ионов CN^+ . Различие в массах для соседних пиков составляет всего 1 а.е.м. Созданный спектрометр позволяет с временным разрешением от 1 до 10 с получать участки ионного спектра исследуемой плазмы и детально определять концентрацию каждого типа ионов, включая ионы изотопов. Таким образом, он может использоваться для прецизионных исследований определенных участков всего масс-зарядового спектра. Главной особенностью спектрометра является возможность отслеживать с интервалом 1 с временные зависимости концентрации в плазме до семи типов

ионов с различными отношениями eQ_i/M_i . Вместе с тем использование его в качестве монитора не вполне удобно, поскольку для восприятия большого количества отдельных пиков от 1 до 300 а.е.м. требуется не менее 5 с. Для этой цели лучше подходит обращенный времяпролетный спектрометр. Созданные на базе RGA квадрупольные спектрометры позволяют не только исследовать ионы напускаемых в камеру рабочих газов (аргон, азот, кислород, углеводороды) и ионы испаряемых пучком твердых веществ, но и производить детальный анализ изотопического состава плазмы испаряемых диэлектрических или полупроводниковых материалов, например алюмооксидной керамики или бора. Масс-зарядовый спектрометр на базе RGA может найти применение и в других областях физики и химии, например при исследовании изотопического состава плазменных установок разделения изотопов или в плазмохимии с использованием органических веществ, при разложении которых образуются широкие спектры ионов изотопов элементов, слабо различающихся по массам.

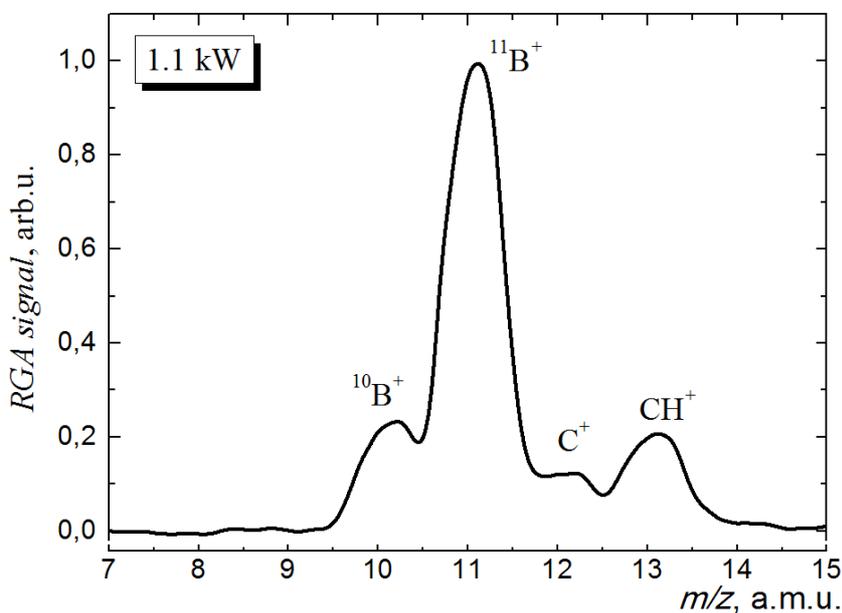


Рисунок 3.23 – Масс-спектры ионов пучковой плазмы при распылении чистого бора; мощность пучка 1,1 кВт

3.5 Измерение плотности тока ленточного электронного пучка

Для измерения распределения плотности тока электронного пучка используется специально сконструированный перемещаемый коллектор тока (измерительный зонд). Измерительный зонд (рисунок 3.24) состоит из защитной металлической трубки 1 диаметром 12 мм и длиной 20 см с продольной прорезью 2 шириной 2 мм для прохождения электронов пучка 5.

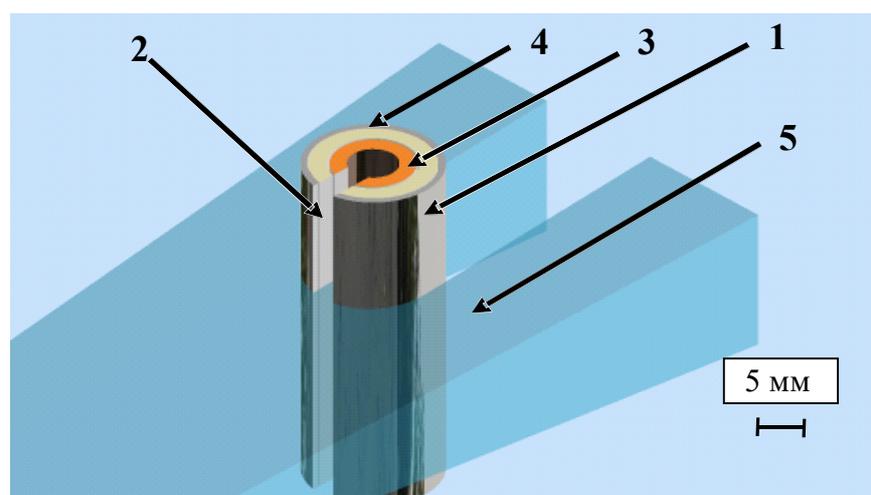


Рисунок 3.24 – Внешний вид измерительного зонда:

- 1 – защитная металлическая трубка; 2 – продольная прорезь;
- 3 – керамическая изолирующая трубка; 4 – приемная медная трубка;
- 5 – электронный пучок

Внутри защитной металлической трубки устанавливается керамическая изолирующая трубка 3 и приемная медная трубка 4. В каждой из трубок изготавливается продольная прорезь. Трубки фиксируются таким образом, чтобы электроны пучка при прохождении через продольную прорезь шириной 2 мм собирались внутренней поверхностью медной трубки, сигнал с которой подается на измерительный безындуктивный резистор номиналом 10 кОм и регистрируется осциллографом Tektronix TDS 2004B. Схема подключения представлена на рисунке 3.25.

Типичный вид сигнала с осциллографа приведен на рисунке 3.26,а.

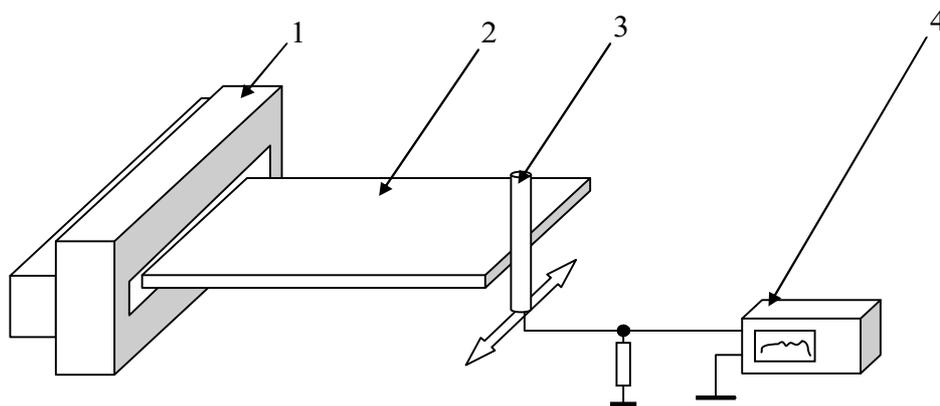
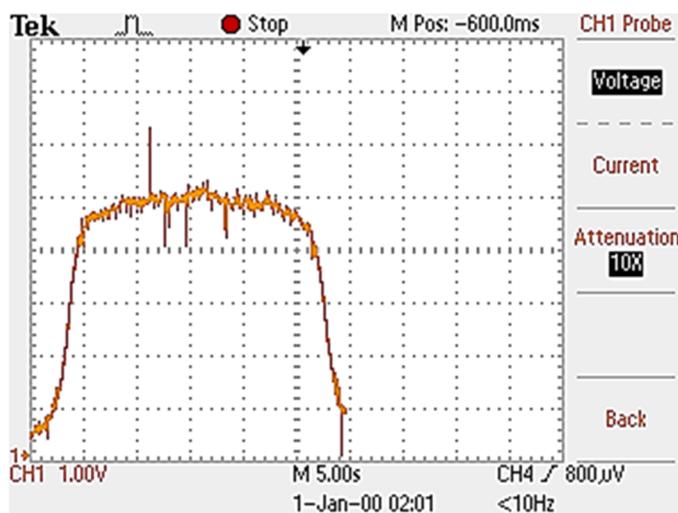
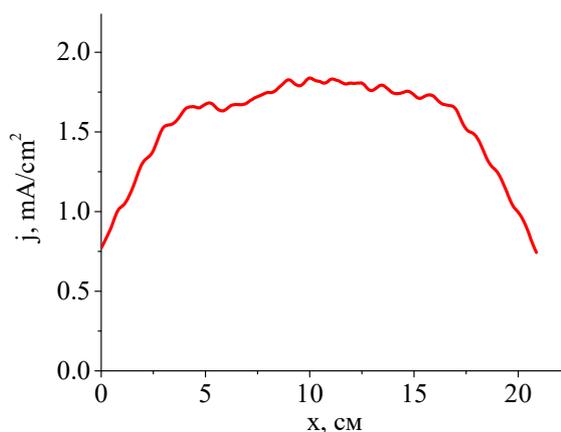


Рисунок 3.25 – Схема измерений и подключения осциллографа:
 1 – форвакуумный плазменный электронный источник;
 2 – электронный пучок; 3 – коллектор электронного пучка;
 4 – осциллограф



a



б

Рисунок 3.26 – Характерный сигнал с осциллографа при измерении распределения плотности тока электронного пучка (*a*), распределение плотности тока пучка после обработки (*б*)

По известному времени перемещения зонда определяется его координата в пространстве. После обработки сигнала с осциллографа получается распределение плотности тока электронного пучка (рисунк 3.26,б).

3.6 Измерение диаметра и энергетического спектра электронного пучка

Как уже отмечалось ранее, генерация электронных пучков в форвакуумной области давлений сопровождается образованием плазмы, поток ионов из которой оказывает существенное влияние на электрическую прочность ускоряющего промежутка и определяет величину предельного рабочего давления плазменного электронного источника. Кроме того, при распространении электронного пучка в газовой среде происходит взаимодействие уже сформированного пучка с молекулами газа, интенсивность которого напрямую зависит от параметров самого пучка, а также от давления газа в области транспортировки. В связи с этим требуется проводить измерения диаметра и энергетического спектра пучка как наиболее важных параметров для дальнейшего технологического применения.

Эффективность использования электронного пучка для технологических целей во многом определяется удельной мощностью электронного пучка. И если величина мощности $P = IU$ может быть измерена достаточно просто, то для измерения диаметра пучка существуют различные методы измерения: как прямые, так и косвенные. К наиболее точным методам относится прямой метод, заключающийся в отклонении пучка на край либо ножевой диафрагмы, либо круглого отверстия, под которыми располагается принимающий ток коллектор (цилиндр Фарадея). Так получают кривую сканирования (кривую набегания), т.е. зависимость тока пучка от расстояния до края диафрагмы. Дифференцирование кривой набегания позволяет восстановить профиль распределения плотности тока пучка. К недостаткам данного способа можно отнести влияние неровностей края диафрагмы на точность измерений, наличие вторичных электронов, рождаемых на диафрагме, а также искажение сигнала, регистрируемого цилиндром Фарадея. Наиболее простым способом измерения

диаметра пучка является метод вращающегося зонда, заключающийся в том, что электронный пучок последовательно пересекает два идентичных протяженных зонда в виде вольфрамовых проволок малого диаметра, движущихся перпендикулярно оси пучка. По временной зависимости тока, приходящегося на проволоки, строится зависимость распределения плотности тока пучка по его сечению. За диаметр пучка принимается ширина на уровне полувысоты в радиальном распределении плотности тока. Недостатком данного метода является наличие шумов в регистрируемом сигнале за счет того, что токовый сигнал снимается с трущихся частей зонда. Переход в форвакуумную область давлений приводит к появлению еще одного источника шумов – пучковой плазмы, образующейся вдоль пути распространения электронного пучка. Для снижения уровня шумов пара проволочных зондов заменяется вращающимся металлическим диском с двумя параллельными прорезями, токосъемный коллектор помещается на оси пучка под вращающимся диском. Схема измерений представлена на рисунке 3.27. Расстояние z , проходимое пучком в вакуумной камере, отсчитывается от эмиссионного электрода источника до плоскости металлического диска.

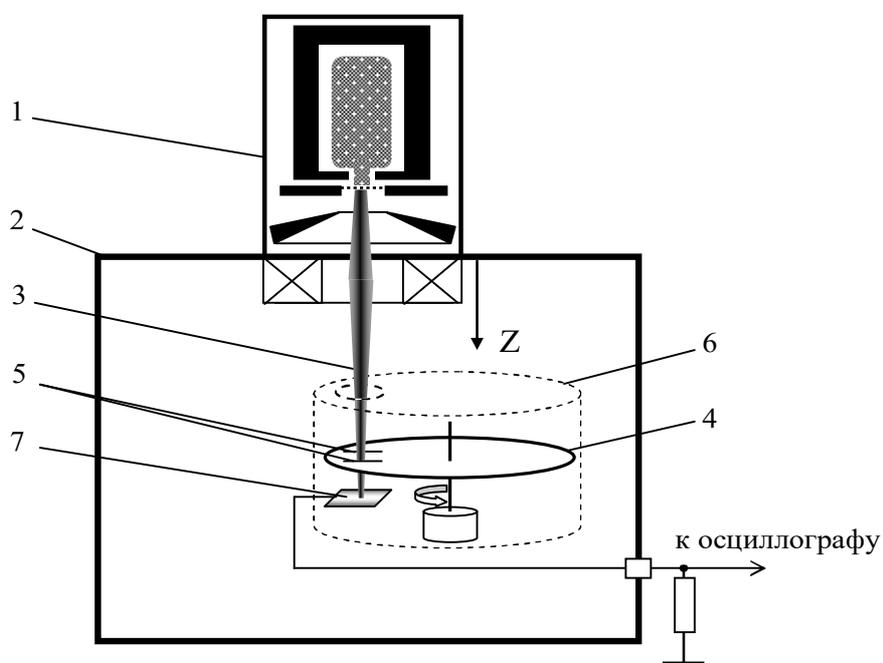


Рисунок 3.27 – Схема измерения диаметра электронного пучка:
 1 – плазменный источник электронов; 2 – вакуумная камера;
 3 – цилиндрический электронный пучок; 4 – металлический диск;
 5 – пара щелей; 6 – защитный экран; 7 – коллектор

Форвакуумный плазменный электронный источник 1 размещается на верхнем фланце вакуумной камеры 2. Формируемый источником электронный пучок 3 направляется на вращающийся зонд таким образом, чтобы при вращении диска 4 пучок пересекал поочередно каждую из щелей 5. Для устранения влияния пучковой плазмы на результаты измерений вся конструкция экранируется заземленным металлическим экраном 6, имеющим отверстие для прохождения пучка. Ось вращения диска располагается параллельно оси пучка. Расстояние между серединами щелей устанавливается заведомо большим нескольких диаметров электронного пучка, в первом приближении, определяемом визуально, – по свечению создаваемой им плазмы. Электроны, прошедшие через щели, улавливаются коллектором 7, сигнал с которого через резистор поступает на вход цифрового осциллографа марки Tektronix. Типичная осциллограмма сигнала с зонда представлена на рисунке 3.28.

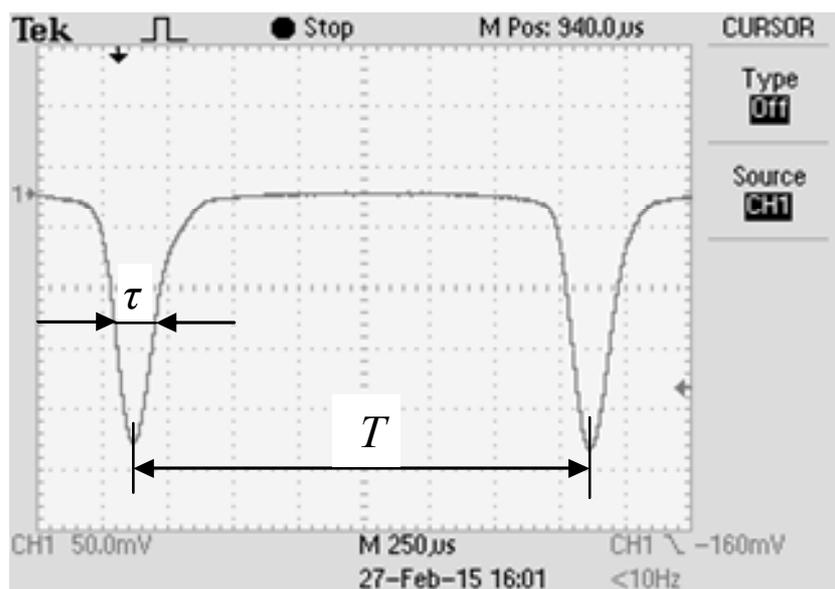


Рисунок 3.28 – Типичная осциллограмма сигнала с коллектора в процессе измерения диаметра электронного пучка

Осциллограмма сигнала обрабатывается по стандартной для этого метода процедуре. Расстояние между серединами щелей задает соответствие пространственного масштаба временной шкале на осциллограмме. Принимая во внимание то, что профиль пучка имеет гауссово распределение радиальной плотности тока, диаметр пучка определяется на полувысоте амплитуды тока:

$$d_b = L \frac{\tau}{T}, \quad (3.2)$$

где L – расстояние между серединами щелей, м; T – временной интервал между амплитудными значениями сигналов на осциллограмме, с; τ – ширина сигнала, измеренная на половине его амплитуды, с.

Для повышения точности при измерении диаметра используются данные, полученные из 10 снятых в одних условиях осциллограмм. Погрешность данного метода не превышает 10 %.

3.7 Измерение энергетического спектра электронного пучка

Как отмечалось выше, трансформация энергетического спектра электронов пучка позволяет судить об эффективности транспортировки пучка в области повышенных давлений. Для исследования энергетического спектра электронов в пучке, как правило, используется метод тормозящего поля. Суть метода заключается в том, что часть электронов пучка перед попаданием на коллектор проходит область тормозящего поля. Электроны с энергией, достаточной для преодоления тормозящего поля, создают ток мишени. Дифференцирование зависимости тока мишени от ускоряющего напряжения позволяет определить распределение электронов по энергиям. При этом для измерения энергии максимальная величина тормозного напряжения должна быть сравнима с ускоряющим напряжением порядка 10–20 кВ, что в условиях форвакуума неизбежно приводит к возникновению разряда между пластинами анализатора и заземленными стенками вакуумной камеры. Разделение электронов по энергиям без необходимости ввода высокого напряжения внутрь вакуумной камеры возможно при измерении характеристик тормозного рентгеновского излучения с участка поверхности электронного коллектора. Указанный способ требует сложного диагностического оборудования и дает наиболее точные результаты при измерении пучков электронов с энергиями 2–3 МэВ. Более простым способом для отклонения электронов является использование магнитного поля.

Схема измерения энергетического спектра с применением магнитного анализатора представлена на рисунке 3.29.

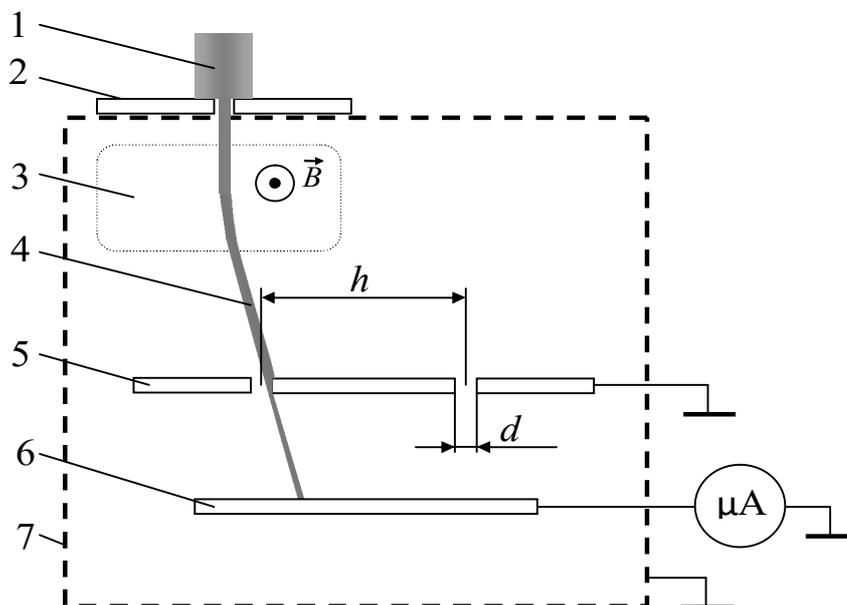


Рисунок 3.29 – Устройство магнитного энергоанализатора:
1 – электронный пучок; 2 – коллиматорная щель; 3 – магнитный зазор отклоняющей катушки; 4 – выделенная часть электронного пучка;
5 – пластина с щелями; 6 – коллектор; 7 – экран

Из электронного пучка 1 выделяется часть путем направления пучка на узкую коллиматорную щель 2 шириной 100 мкм. Выделенный пучок 4 после прохождения области магнитного поля, сформированного в зазоре отклоняющей электромагнитной катушки 3, попадает на разделительную металлическую пластинку 5 с парой щелей шириной $d = 100$ мкм. Одна из щелей располагается непосредственно под коллиматорной, вторая находится на расстоянии $h = 1$ см от первой. Изменение величины тока в магнитной катушке приводит к отклонению электронного пучка и, как следствие, к последовательному пересечению обеих щелей. Электроны, прошедшие через любую из щелей, попадают на коллектор 6, который регистрирует токовый сигнал. Анализатор устанавливается таким образом, чтобы ток коллектора регистрировался при отсутствии тока на отклоняющей катушке, в этом случае коллиматорная и первая щель в разделительной пластинке располагаются на оси пучка. Заземленный металлический

экран 7 устраняет влияние пучковой плазмы на результаты измерений в процессе работы энергоанализатора.

Несмотря на простоту конструкции анализатора, неоднородность магнитного поля в зазоре магнитной катушки не превышает одного процента от величины текущего значения магнитного поля.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

4.1 Метод лежащей капли

Метод лежащей капли позволяет определить угол смачивания поверхности жидкостью и охарактеризовать таким образом смачиваемость поверхности, ее гидрофильность либо гидрофобность. Измерение угла контакта легко выполняется путем определения касательной (угла) капли жидкости с поверхностью скольжения у основания. Выбор такого метода обусловлен относительной легкостью, с которой угол контакта может быть измерен на подходящих подготовленных твердых поверхностях.

Для определения контактного угла методом лежащей капли на предварительно очищенную поверхность с помощью шприца наносят каплю дистиллированной воды малого диаметра. Диаметр капли подбирают в диапазоне 2–5 мм. При большем диаметре на форму капли будут оказывать влияние силы гравитации, при меньшем диаметре – силы поверхностного натяжения. С помощью микроскопа и зеркала получают вид сбоку капли и поверхности. Контактный угол определяется через 1–2 мин геометрическим методом по ее высоте h и радиусу r в предположении сферической модели формы капли (рисунок 4.1). Для контактного угла меньше 90 градусов используется формула

$$\theta = \arccos \frac{1 - \left(\frac{h}{r}\right)^2}{1 + \left(\frac{h}{r}\right)^2}, \quad (4.1)$$

для больших углов

$$\theta = 90^\circ + \arccos \frac{2hr}{h^2 + r^2}. \quad (4.2)$$

Для уменьшения погрешности осуществляются измерения контактного угла не менее 5 раз. За значение контактного угла принимается среднеарифметическое всех измерений.

Параметры капли h и d измеряются с помощью микроскопа МБС-10. На рисунке 4.2 изображено оборудование для определения краевого угла смачивания.

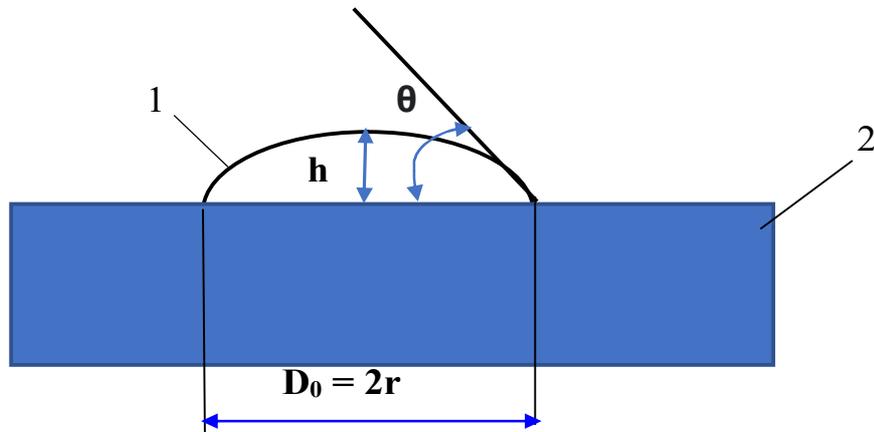


Рисунок 4.1 – Метод лежащей капли:
1 – образец; 2 – подложка

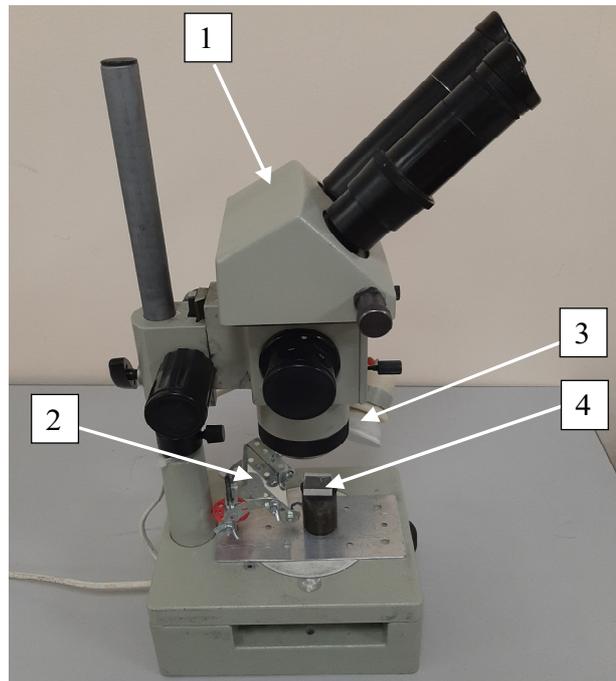


Рисунок 4.2 – Оборудование
для определения краевого угла смачивания:
1 – микроскоп МБС-10; 2 – зеркало;
3 – лампа подсветки, 4 – образец

Измерения проводятся следующим образом: на столик–держатель помещается исследуемый образец, включается лампа, прикрепленная к микроскопу. Микроскоп устанавливается таким образом, чтобы через зеркало был виден в профиль исследуемый образец. Путем регулировки высоты расположения микроскопа добиваются резкого изображения профиля капли (рисунок 4.3).

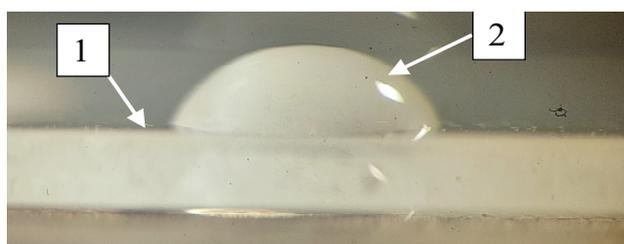


Рисунок 4.3 – Изображение профиля капли:
1 – полимер; 2 – капля воды

После шприцем на поверхность наносится капля. С помощью винтов можно регулировать положение образца относительно двух осей. Регулируя винт, можно производить увеличение изображения в микроскопе. Параметры h и d определяются с помощью окуляра со шкалой от 0 до 18.

4.2 Спектроскопические методы анализа

К спектроскопическим методам анализа относятся методы, основанные на взаимодействии вещества с электромагнитным излучением. К таким методам относится *ИК-спектрометрия* на основе использования ИК-спектрометра (Фурье-спектрометр Infracum FT-801) (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Фурье-спектрометр Infracum FT-801

Прибор представляет собой интерферометр, на выходе которого при линейном изменении разности оптического хода происходит модуляция светового потока с частотой, пропорциональной волновым числам или частотам электромагнитного излучения, т.е. происходит селективная частотная модуляция. Спектральный состав излучения определяется с помощью обратного преобразования Фурье.

Основные технические характеристики FT-801: спектральный диапазон 470–5700 см⁻¹ (21–1,8 мкм), серийный вариант, используется светоделитель ZnSe CVD с неограниченным сроком службы, подходит для работы в условиях повышенной влажности.

4.3 Оборудование для диагностики параметров покрытий

Для подготовки образцов, измерения параметров и исследования свойств диэлектрических покрытий, полученных электронно-лучевым методом в форвакуумной области давлений, а также азотированной пучковой плазмой поверхности титана применяется современное аналитическое оборудование центров коллективного пользования и научных лабораторий Томского научно-образовательного центра.

Для подготовки образцов используются:

- шлифовально-полировальная машина Saphir 320 (Германия), оснащенная автоматической головкой Rubin 500 с диаметром рабочей поверхности шлифовального диска 200 мм, скоростью вращения 50–600 об/мин и возможностью загрузки до 5 образцов в одном автоматическом цикле;

- шлифовально-полировальный станок MP-1C (Китай) с диском для шлифования диаметром 230 мм, регулируемой скоростью шлифовки-полировки 50–1000 об/мин, возможностью подключения полуавтоматического держателя на 3 образца диаметром 30 мм.

Шлифовальные машины пригодны для шлифования поверхностей любых металлов и даже керамик и обеспечивают конечную шероховатость поверхности 50 нм.

Для определения толщины полученных покрытий используются:

- прибор Calotest-CAT-S 0000 (Швейцария) с диапазоном измерения 0,1–50 мкм и с возможностью измерения толщины покрытия

не только на плоских образцах, но и на образцах с цилиндрической и сферической поверхностью. Методика измерения основана на анализе «сферического шлифа», полученного при вращении шара диаметром 10–30 мм со скоростью 10–3000 об/мин, который прижимается к поверхности образца с заданной нагрузкой;

– бесконтактный оптический микроинтерферометр ММИ-4 (Россия), принцип работы которого основан на получении изображения микрогеометрии поверхности объектов, измерении параметров шероховатости и толщин пленок по высоте уступов, образованных краем пленки. Для таких измерений на образцы до нанесения покрытия наносится маска из маркера, после образования покрытия маска удаляется и по высоте уступа определяется толщина покрытия.

Для определения микротвердости покрытий используются:

– нанотвердомер NANO Hardness Tester ННТ-S-АХ-000Х (Швейцария), позволяющий с высокой точностью определять нано- и микротвердость, модуль Юнга, выполнять тесты для анализа текучести материала, исследования пленок на разрыв и усталость. Для измерения изменяющейся во времени нагрузки, глубины проникновения и площади отпечатка применяются инденторы Виккерса или Берковича;

– микротвердомер ПМТ-3 (Россия) с диапазоном нагрузки 0,019–4,9 Н, в котором используется метод вдавливания в испытуемый материал алмазного наконечника Виккерса;

– нанотвердомер Nanotest 600 (Великобритания), в котором алмазный индентор квадратного сечения с двухгранным углом 136° воздействует на поверхность образца в различных точках с постоянной нагрузкой 100 г. Фиксировалась глубина проникновения и площадь отпечатка индентора. Твердость поверхности поперечного шлифа образцов определяется по методике Оливера – Фарра с использованием трехгранного индентора Берковича с углом $65,03^\circ$ между осью и гранью.

Измерения износостойкости полученных покрытий проводятся с использованием трибометра Pinon Disc and Oscillating TRIBO tester (Франция) по методике «шар на диске». Поверхность образца подвергается воздействию сферического наконечника из карбида вольфрама с нагрузкой 2 Н. Коэффициент трения определяется путем

измерения прогиба рычага. Скорость износа рассчитывается по формуле

$$V = 2\pi RA/FL, \quad (4.3)$$

где R – радиус трека, мкм; A – площадь поперечного сечения канавки износа, мкм²; F – величина приложенной нагрузки, Н; L – пройденная шариком дистанция, м.

Рентгенофазовый анализ состава модифицированного слоя выполняется на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (Япония). В исследуемом образце определяется фазовый состав, размер областей когерентного рассеяния, параметры кристаллической решетки и величина деформации кристаллической решетки сформированного слоя.

Элементный состав покрытий исследуется с использованием:

– растрового электронного микроскопа Hitachi S3400N (Япония), оснащенного приставкой энергодисперсионного микроанализа BrukerX'Flash 5010;

– оже-электронного спектрометра «Шхуна-2» (Россия), предназначенного для анализа элементного состава поверхностных слоев материалов и исследования профилей концентрации элементов по глубине в соединениях, сплавах, тонкопленочных структурах и на границах раздела. Разрешение по глубине 0,5–1,0 нм, чувствительность 0,1–0,5 % ат, чувствительность по поверхностной концентрации 10^{12} – 10^{13} ат/см².

Для исследования профилей поверхности покрытий используется трехмерный бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station (Франция). Прибор полностью автоматизирован и оснащен программным обеспечением, которое управляет процессом сканирования образца, осуществляет запись данных, их математическую и графическую обработку. Программное обеспечение включает 260 различных функций обработки результатов измерений.

Исследования поверхности покрытий проводятся с использованием:

– оптического инвертированного микроскопа OLIMPUS GX (Япония), оснащенного широкопольными окулярами, позволяющими проводить сканирование образца. Увеличение регулируется от 50 до 1000 крат;

– сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 (Япония), в котором для исследования неэлектропроводных образцов не требуется наносить специальное покрытие. Увеличение составляет 15–30000 крат, разрешение – 30 нм.

Коэффициенты теплопроводности покрытий определяются на приборе Laser Flash DLF-1 фирмы Discovery (США), который работает по методу «вспышки». Это наиболее распространенный способ определения температуропроводности. Он заключается в равномерном облучении верхней поверхности небольшого образца лазерным импульсом. Температурно-временная зависимость на нижней поверхности регистрируется твердотельным оптическим датчиком. Температуропроводность устанавливается по термограмме. На основе полученных значений с учетом плотности образца определяется его теплоемкость и теплопроводность.

Литература

1. Electron beam deposition of ceramic coatings at fore-vacuum pressure / A. Tyunkov [et al.] // Prospects of Fundamental Sciences Development (PFSD-2016). AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1772. – P. 040002-1–040002-5. – doi: 10.1063/1.4964561.

2. An experimental test-stand for investigation of electron-beam synthesis of dielectric coatings in medium vacuum pressure range / A.V. Tyunkov [et al.] // Vacuum. – 2019. – Vol. 163. – P. 31–36.

3. Юшков, Ю. Г. Оптимизация эмиссионного электрода в электронном источнике с плазменным катодом в форвакууме / Ю. Г. Юшков, Д. Б. Золотухин, А. В. Тюньков // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по материалам XLIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2017. – № 2(36). – С. 92–96.

4. Forevacuum Plasma Electron Source for Dielectric Surface Treatment / A. Zenin [et al.] // 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – 2018. – doi: 10.1109/ISHCE.2018.8521231.

5. Особенности генерации пучковой плазмы в изолированной металлической полости в форвакуумной области давлений / Д. Б. Золотухин [и др.] // Доклады Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2017. – № 1.

6. Исследование масс-зарядового состава пучковой плазмы форвакуумного источника электронов с помощью обращенного времяпролетного спектрометра / Ю. Г. Юшков [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. – 2014. – Т. 57, № 11/3.

7. Inverse time-of-flight spectrometer for beam plasma research / Yu. G. Yushkov [et al.] // Citation: Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85. – P. 083306. – doi: 10.1063/1.4893651.

8. Мониторинг масс-зарядового состава пучковой плазмы при давлении до 10 Па / Д. Б. Золотухин [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. – 2015. – Т. 58, № 9/3.

9. Золотухин, Д. Б. Обращенный времяпролетный спектрометр для исследования масс-зарядового состава плазмы в форвакуумной области давлений / Д. Б. Золотухин, Ю. Г. Юшков // Тр. всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2014». – Томск : В-Спектр, 2014. – С. 149–152.

10. Золотухин, Д. Б. Исследование масс-зарядового состава плазмы обращенным времяпролетным спектрометром / Д. Б. Золотухин, Ю. Г. Юшков, К. П. Савкин // XI междунар. конф. студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – 2014.

11. Modified quadrupole mass analyzer RGA-100 for beam plasma research in forevacuum pressure range / D. B. Zolotukhin [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2015. – Vol. 86, No 12. – P. 123301.

12. Тюньков, А. В. Мониторинг масс-зарядового состава пучковой плазмы модернизированным квадрупольным анализатором в форвакуумной области давлений / А. В. Тюньков, Ю. Г. Юшков, А. С. Климов // Прикладная физика. – 2016. – № 1. – С. 96–99.

13. Генерация пучковой плазмы в металлической полости в форвакуумной области давлений: эксперимент и моделирование / Д. Б. Золотухин [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. – 2015, Сентябрь. – Т. 58, № 9/2. – С. 132–137.

Учебное издание

Юшков Юрий Георгиевич
Климов Александр Сергеевич

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ
И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ФОРВАКУУМЕ

Учебное пособие

Подписано в печать 07.11.2023.2023. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 3,95. Заказ № 268. Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.