

УДК 533.9.08, 004.42

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

В.М. Градов, А.М. Зимин, С.Е. Кривицкий, А.В. Шумов (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5)

Статья посвящена созданию и апробации автоматизированного комплекса для спектральной диагностики плазмы сложного состава. Приведено описание аппаратной и программной частей комплекса, поддерживающего также режим дистанционного управления. Приведена методика обработки экспериментальных данных, проанализирована её применимость для диагностики магнетронной плазмы. Приведены полученные результаты и их обсуждение.

Ключевые слова: спектральная диагностика плазмы, автоматизированный комплекс, магнетронный разряд.

AUTOMATED SPECTROMETRIC COMPLEX FOR DIAGNOSTICS OF MAGNETRON DISCHARGE PLASMA. V.M. GRADOV, A.M. ZIMIN, S.E. KRIVITSKY, A.V. SHUMOV. The paper is devoted to creation and approbation of the automated complex for spectral diagnostics of plasma with compound structure. It supports remote control work. The processing technique of experimental data is resulted, its applicability for diagnostics of magnetron plasma is analyzed. There are received results and their discussion.

Key words: spectral diagnostics of plasma, measuring and computing complex, magnetron discharge.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные спектрально-аналитические комплексы ведущих отечественных и зарубежных фирм предоставляют исследователям широкие возможности в регистрации абсорбционных и эмиссионных спектров. Программное обеспечение этих комплексов включает в себя набор процедур для фильтрации сигналов, учёта температурных зависимостей чувствительности детекторов для приёма излучения, математической обработки регистрируемых сигналов (дифференцирование, интегрирование, сложение, вычитание). Однако в системе сервисов спектральных комплексов практически отсутствуют средства для получения и интерпретации информации об объекте исследования с целью нахождения его пространственно-временных качественных и количественных характеристик. Между тем эта составляющая спектральной диагностики основана на тщательном анализе физических процессов в исследуемой среде и является весьма трудоёмкой.

Физические процессы в электрических разрядах различаются очень сильно. Соответственно этому в плазме разряда определяющими являются те или иные механизмы излучения, которые характеризуются конкретным сочетанием параметров разряда (состав, концентрация, температура, оптическая плотность и др.) и их пространственными распределениями. Поэтому разработан целый ряд методов спектральной диагностики [1], позволяющих при определённых условиях по характеристикам линейчатого, молекулярного или непрерывного спектров определять температуры и концентрации различных компонентов и другие параметры разряда (например, величины напряженностей электрических полей в плазме). Однако при использовании того или иного способа диагностики для условий конкретного разряда приходится разрабатывать оригинальные методики обработки первичных результатов, получаемых при регистрации спектров с помощью измерительных комплексов, и проводить тщательный анализ их применимости.

В последнее время заметно повысился интерес к изучению физики магнетронного разряда, так как наряду с традиционными технологическими применениями [2] для нанесения покрытий магнетрон (рис. 1) используется также для моделирования взаимодействия ионных потоков с обращёнными к плазме компонентами термоядерного реактора и диагностическими зеркалами [3, 4]. Характерные параметры магнетронной распылительной системы (МРС): давление газа — от

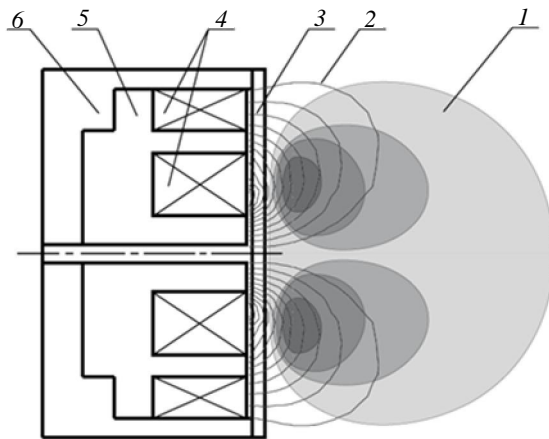


Рис. 1. Магнетронная распылительная система с электромагнитами: 1 — плазма; 2 — магнитные силовые линии; 3 — катод-мишень; 4 — катушки магнитной системы; 5, 6 — составной магнитопрод

В последнее время заметно повысился интерес к изучению физики магнетронного разряда, так как наряду с традиционными технологическими применениями [2] для нанесения покрытий магнетрон (рис. 1) используется также для моделирования взаимодействия ионных потоков с обращёнными к плазме компонентами термоядерного реактора и диагностическими зеркалами [3, 4]. Характерные параметры магнетронной распылительной системы (МРС): давление газа — от

долей до единиц Па, плотность ионного тока — до 1 А/см^2 , разрядное напряжение — несколько сотен вольт. Спектральная диагностика плазмы магнетронного разряда, реализующегося в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ -полях практически для любых сочетаний материала катода и плазмообразующего газа, предъявляет ряд специфических требований к диагностическому комплексу и его программному обеспечению.

В планарном магнетроне вблизи катода создаётся арочная конфигурация магнитного поля, индукция которого на поверхности мишени составляет десятки мТл и экспоненциально убывает по мере удаления от поверхности катода. Благодаря замагничности и замкнутому азимутальному дрейфу электронов в разряде по сравнению с тлеющим имеет место существенно более эффективная ионизация газа, отсутствует ограничение плотности тока пространственным зарядом, а ускоряющиеся в направлении катода-мишени высокоэнергетичные ионы плазмообразующего газа интенсивно распыляют катод-мишень. Угловое распределение распыленных атомов материала катода, вылетающих с его поверхности, приближенно соответствует косинусоидальному закону. Таким образом, МРС, предназначенные, в первую очередь, для нанесения покрытий на подложки, принципиально являются источником атомов с энергиями в несколько эВ, которые осаждаются на элементах конструкции, включая оптические стёкла иллюминаторов вакуумной камеры и диагностическую оптику.

Другая особенность диагностики магнетронного разряда заключается в его сильной зависимости от осевой координаты. Если на достаточном удалении от катода, где влияние магнитного поля несущественно, они близки к аналогичным параметрам для тлеющего разряда, то в области интенсивной ионизации вблизи поверхности катода концентрация заряженных частиц заметно повышается, что приводит к увеличению скоростей возбуждения атомов и процесса термализации электронов. Кроме того, здесь имеется несколько групп отрицательно заряженных частиц (например, электроны вторичной эмиссии), сильно отличающихся своими характеристиками. Наконец, состав плазмы магнетронного разряда является сложным: помимо атомов и ионов плазмообразующего газа, здесь присутствуют частицы материала катода, который часто состоит из нескольких компонентов. Эти причины характеризуют сложность спектральных исследований магнетронной плазмы и объясняют небольшое число экспериментальных работ, посвященных данной тематике, в периодических изданиях.

Таким образом, автоматизированный спектрометрический комплекс для диагностики плазмы магнетронного разряда должен предусматривать:

- сбор излучения из различных областей магнетронного разряда с возможностью пространственного сканирования разряда в условиях интенсивного распыления материала катода;
- автоматическую регистрацию спектра плазмы во всем видимом диапазоне длин волн;
- автоматическую идентификацию спектральных линий атомов и ионов, т.е. определение качественного состава плазмы;
- градуировку спектрометрической системы;
- компьютерное управление спектрометрическим комплексом для оперативного изменения его режимов работы;
- автоматизированную обработку результатов регистрации спектров излучения разряда, позволяющую оценивать пространственное распределение электронной температуры термализованного компонента плазмы;
- удаленный доступ к программно-аппаратному комплексу, позволяющий проводить дистанционные эксперименты.

СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Основу созданного нами автоматизированного спектрометрического комплекса, обеспечивающего программируемое управление работой оборудования и оперативную интерпретацию результатов, составляет многоканальный спектрометр AvaSpec-2048 с CCD-детекторной линейкой фирмы Avantes. Используемая конфигурация прибора перекрывает диапазон длин волн от 355 до 810 нм и включает 4 независимых канала, различавшихся диапазонами длин волн, характеристиками используемых дифракционных решеток (от 1200 до 3600 штрихов/мм), размерами щелей, фильтрами для обрезания гармоник второго порядка.

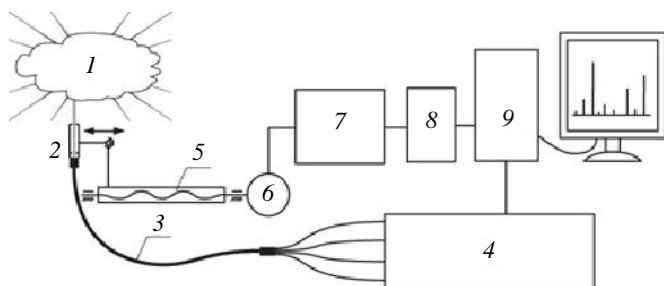


Рис. 2. Схема автоматизированного спектрометрического комплекса: 1 — плазма магнетронного разряда; 2 — оптическая головка; 3 — оптоволоконный кабель; 4 — многоканальный спектрометр; 5 — привод оптической головки; 6 — шаговый двигатель; 7 — блок управления шаговым двигателем; 8 — модуль сопряжения ЦАП—АЦП; 9 — персональный компьютер

Avantes, фокусирующая падающий поток излучения на входной торец оптического волокна. Расположение оптической головки перпендикулярно оси разряда вблизи плоскости катода-мишени и оптимизированные сечения щелей позволили обеспечить длительную работу диагностической системы без существенного изменения коэффициента пропускания собирающей оптики в течение нескольких часов работы, тогда как окно вакуумной камеры в этих условиях становится практически непрозрачным уже примерно через 10 минут после включения разряда. В то же время конструкция системы сбора излучения, форма и размеры щелей позволили обеспечить во всем спектральном диапазоне суммарный световой поток, поступающий в оптический тракт и на приемники детектора, на уровне, достаточном для его нахождения в зоне максимальной чувствительности детектора, рекомендуемой изготовителем спектрометра. Пространственное разрешение системы в направлении, параллельном оси разряда, составляло около 1 мм.

Для пространственного сканирования разряда была создана конструкция привода, позволяющая осуществлять управляемое от ПЭВМ перемещение системы сбора излучения внутри вакуумной камеры. Она предусматривала возможность переустановки оптической головки под любым углом к оси разряда и обеспечивала ее программируемое осевое перемещение. Для этого использовался расположенный в вакуумном объеме шаговый двигатель, вращение ротора которого с помощью винтовой передачи преобразовывалось в поступательное. Импульсы генерировались цифровым блоком управления шаговым двигателем, который поддерживал следующие функции:

- включение/выключение питания;
- изменение направления вращения ротора двигателя;
- подача импульсов для поворота ротора на 1 шаг;
- переключение режимов полного и половинного шагов.

Подключение блока управления к компьютеру осуществлялось с помощью USB — модуля ЦАП—АЦП марки E14-440D фирмы L-Card. Для подачи импульсов была использована одна из линий ЦАП данного модуля, остальные сигналы формировались цифровыми линиями платы.

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ КОМПЛЕКСА

Позиционирование оптической головки осуществлялось с помощью приложения Step Motor Control (SMC), а для настройки режимов работы, сбора результатов сканирования спектрометра, градуировки оптической системы и анализа полученных спектров была предназначена программа Spectral Analysis (SpectrAn). Удаленное управление спектрометром и сетевой анализ результатов регистрации спектров плазмы были реализованы с помощью динамического HTML. Основные интерфейсы управления работой комплекса и обработки данных приведены на рис. 3.

Для поддержки автоматизированного режима управления работой диагностического комплекса в среде Borland Delphi было разработано специализированное программное обеспечение.

Формирование тактовой частоты вращения ротора двигателя осуществлялось программно и позволяло обеспечить позиционирование оптической головки с высокой точностью, поскольку число шагов

Схема автоматизированного спектрометрического комплекса представлена на рис. 2. Его особенностями являются размещение собирающей оптики внутри камеры вблизи источника излучения и транспортировка излучения наружу посредством специального вакуумного оптического ввода и системы оптоволоконных кабелей.

Сбор излучения из локальных областей разряда производился при помощи перемещаемой вдоль оси разряда оптической головки, включавшей в себя три щелевые диафрагмы. В нижней части оптической головки размещена коллимационная линза COL производства фирмы

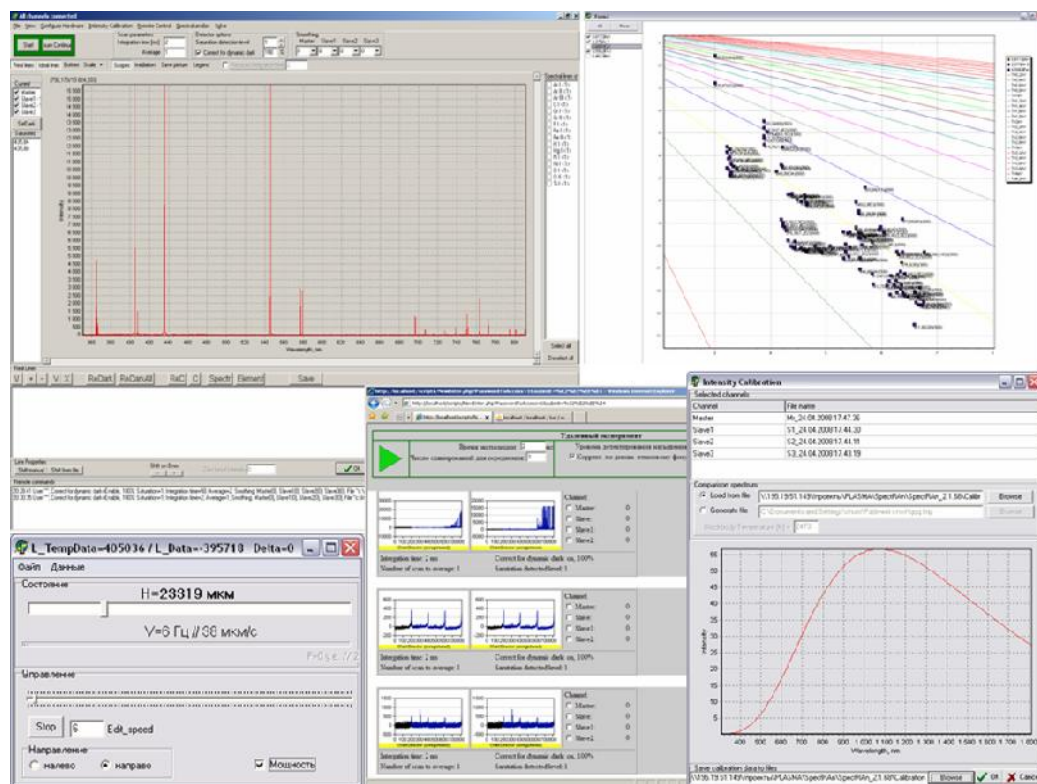


Рис. 3. Основные пользовательские интерфейсы спектрометрического комплекса

соответствовало количеству импульсов, сформированных на выходе платы сопряжения. В программе управления режимами работы и параметрами настройки электронных систем спектрометра от ЭВМ с помощью USB-интерфейса использовались драйверы и библиотека *as161.dll* фирмы Avantes. Созданный интерфейс (см. рис. 3) позволял изменять время интегрирования (Integration time), величину усреднения (Average), задавать параметры сглаживания (Smoothing), включать, выключать и настраивать режимы коррекции по динамическому темновому фону (Correct for dynamic dark) и детектирования насыщения (Saturation Detection Level).

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для автоматического обнаружения в эмиссионном спектре плазмы линий различных атомов и ионов в программе SpectrAn был реализован алгоритм идентификации спектральных линий по электронным таблицам атласа. Для этого использовалась база данных Национального института стандартов и технологии США (<http://www.nist.gov>). Перед началом обработки результатов экспериментатору предоставляется возможность формирования перечня атомов и ионов, которые могут присутствовать в плазме разряда.

Сначала из массивов с первичными значениями сигналов с каждого пикселя CCD-линейки, количество которых соответствует числу оптических каналов спектрометра, формировался единый блок данных, в котором хранилась информация обо всех линиях спектра разряда. Для каждой линии фиксировалась зависимость интенсивности от длины волны — профиль, а также длина волны, соответствующая максимуму. Спектральные линии выстраивались в порядке возрастания длины волны.

К каждому профилю из таблиц электронного атласа для предполагаемых компонентов плазмы подбирались лежащие в его окрестности атомные и ионные спектральные линии. Если разность значений длины волны табличной спектральной линии какого-либо элемента и соответствующей максимуму экспериментального профиля не превышала оптического разрешения канала спектрометра (для используемой конфигурации спектрометра — от 0,05 до 0,18 нм в зависимости от длины волны), зарегистрированная линия считалась принадлежащей соответствующему элементу. После этого идентификация компонента проверялась по совокупности его линий, а в блоке экспериментальных данных каждому профилю

лю ставились в соответствие константы для данного излучательного перехода (табличная длина волны, энергии верхнего и нижнего уровней, вероятность перехода, статистический вес). На этом завершался этап качественного анализа состава плазмы.

Для проведения количественного анализа в программе SpectrAn был реализован разработанный нами алгоритм обработки результатов, основанный на методе относительных интенсивностей. Для учета спектральной чувствительности оптического тракта и детекторов он потребовал градуировки оптической системы, которая проводилась с помощью программы SpectrAn по образцовой температурной лампе ТРУ 1100-2350. Соответствующий этой задаче интерфейс был приведён на рис. 3.

Для анализа результатов каждого эксперимента, однозначно характеризуемого фиксированными значениями напряжения и тока разряда, давления в вакуумной камере и местоположения оптической головки, использовался набор файлов результатов сканирования с различным временем интегрирования — от 3 до 10 спектров излучения по каждому из четырех каналов спектрометра. Зарегистрированные данные со спектрометра после градуировки подвергались вычету предварительно отснятого темнового фона и сглаживанию паразитных шумов. В итоге формировался массив количественных характеристик идентифицированных спектральных линий. При этом линии, наложенные друг на друга, а также с интенсивностью ниже уровня помех и вызывающие насыщение пикселей, исключались из дальнейшего анализа.

По экспериментально измеренным относительным интенсивностям спектральных линий рассчитывалась заселенность верхних уровней N_k :

$$N_k = I/(A_{k \rightarrow i} (E_k - E_i)),$$

где I — измеренная интенсивность спектральной линии; $A_{k \rightarrow i}$ — вероятность перехода с верхнего уровня k на нижний уровень i ; E_k и E_i — энергии уровней.

Затем в соответствии с законом Больцмана, представленным в виде

$$\ln \left\{ \left(\frac{N_k}{g_k} \right) / \left(\frac{N_0}{g_0} \right) \right\} = -\frac{E_k}{k_B T},$$

где g_k и g_0 — статистические веса основного и k -го уровней; k_B — постоянная Больцмана; T — температура возбуждения, формировался массив значений линейной функции $y(x)$: $y = kx + b$, где $x = E_k$, а

$$y = \ln \left\{ \left(\frac{N_k}{g_k} \right) / \left(\frac{N_0}{g_0} \right) \right\}.$$

Далее осуществлялось вычисление температур возбуждения для верхних уровней спектральных линий, по которым после линейной аппроксимации методом наименьших квадратов определялись температуры распределения для атома или иона каждого химического элемента. При этом предполагалась ударно-столкновительная модель заселения уровней энергии частиц электронами.

ПРИМЕНЕНИЕ СОЗДАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАЗМЫ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА С КАТОДОМ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Работа комплекса и методики спектральных измерений параметров плазмы обрабатывались на стенде МАУГЛИ, аналогичном использованной при моделировании взаимодействия плазмы с первой стенкой установке МАГРАС [3], с катодом-мишенью МРС из стали 12Х18Н10Т. Для исследуемых режимов диаметр окружности зоны максимального воздействия ионного потока на распыляемую мишень составлял около 50 мм, а ширина полосы преимущественного распыления катода — около 15 мм.

В результате качественного анализа спектра магнетронной плазмы сложного состава были идентифицированы линии атомов и ионов аргона (плазмообразующий газ), а также атомов распыленных компонентов материала мишени: железа, хрома и никеля (всего более 200). Для количественных исследований в серии из нескольких десятков экспериментов проводилась регистрация эмиссионного спектра плазмы при различных значениях параметров разряда (тока, напряжения, давления аргона) на разных удалениях оптической головки от катода-мишени.

Относительные интенсивности линий позволили найти температуру распределения населённостей отдельных групп уровней. Было показано, что в пределах погрешности измерений (не превышаю-

щей 0,2 эВ) усредненные по диаметру разряда данные о распределении атомов Ar, Cr, Fe, Ni по всем возбужденным уровням в области интенсивного свечения разряда хорошо укладываются на графики, описывающие больцмановский закон распределения с единой для всех уровней температурой, где по оси абсцисс отложены энергии верхнего уровня, а по оси ординат — значения $\ln((N_k/g_k)/(N_0/g_0))$ (рис. 4). Это позволяет предположить, что она близка к электронной температуре плазмы.

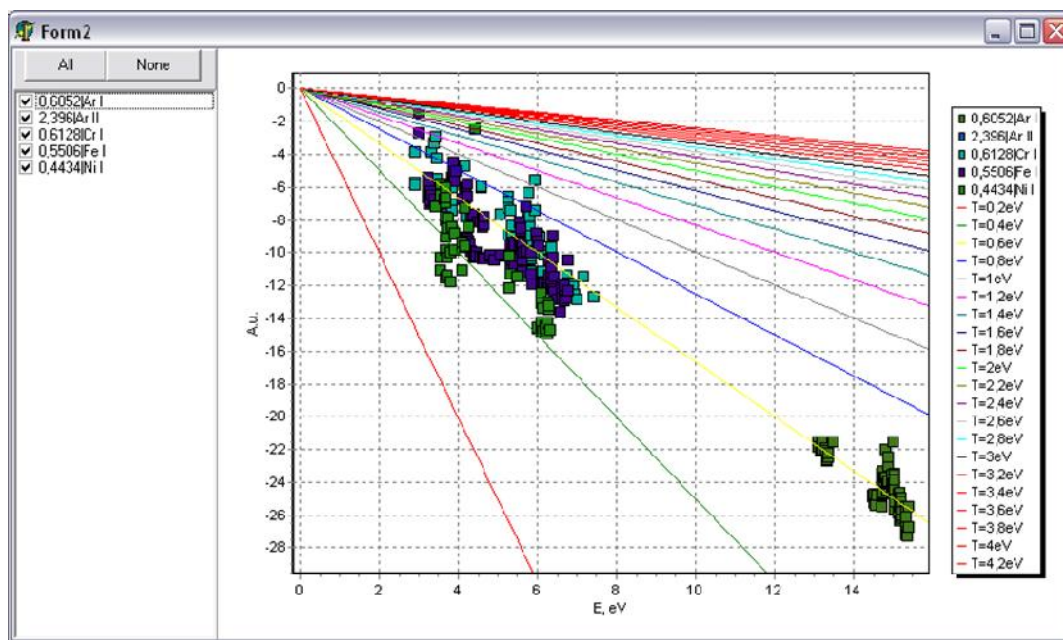


Рис. 4. Распределение заселённости уровней атомов в окне программы SpectrAn (расстояние от мишени 7 мм, давление аргона 0,5 Па, разрядное напряжение 650 В). Прямые, исходящие из начала координат, соответствуют постоянной температуре, изменяемой с шагом 0,2 эВ

Найденные значения температур по атомным линиям элементов в области интенсивной ионизации в исследуемых диапазонах давлений и токов совпадают в пределах точности. В то же время температуры, полученные по линиям ионов аргона, превышают значения для атомов в 3—5 раз, что, по-видимому, связано с особенностями их взаимодействия с электронами.

Из графиков, приведенных на рис. 5, 6, видно, что температура распределения убывает с ростом давления. Эта зависимость сохраняет свой характер на различных удалениях от катода. Такой характер изменения температуры объясняется, на наш взгляд, тем, что с уменьшением давления снижается скорость возбуждения атомов, которая пропорциональна произведению концентраций нейтральных атомов и электронов максвелловского «хвоста». Чтобы обеспечить постоянную плотность тока в разряде, концентрация высокоэнергетичных электронов должна возрасти, что приводит к увеличению электронной температуры, а следовательно, и температуры распределения.

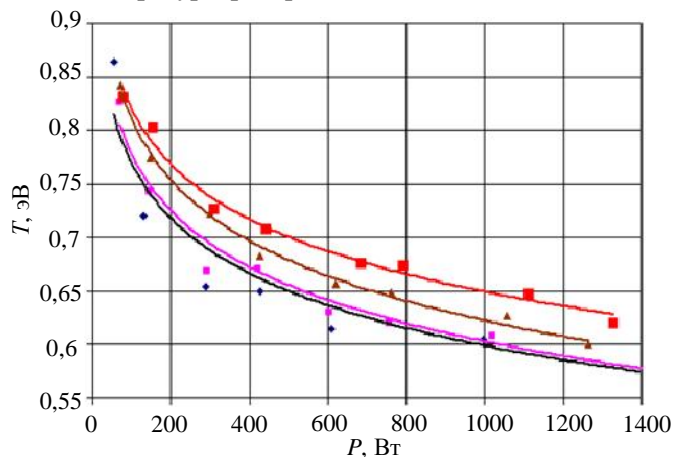


Рис. 5. Температура распределения для атомов аргона на расстоянии от катода 7 мм в зависимости от мощности разряда при различных значениях давления аргона (Па): ♦ — 3,26; ■ — 2,39; ▲ — 1,52; ■ — 0,96

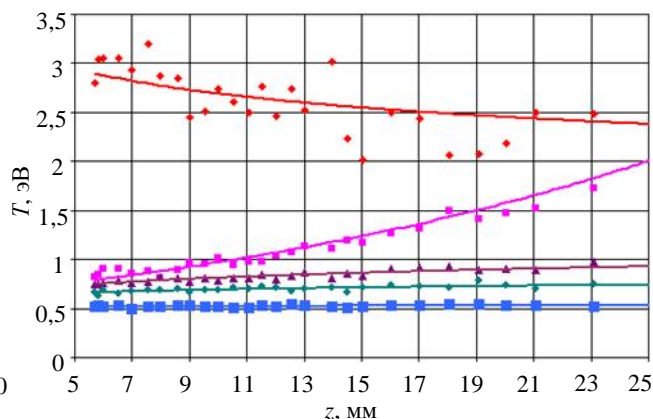


Рис. 6. Измеренные значения температуры в зависимости от расстояния от катода при давлении 0,5 Па и напряжении разряда 650 В: ■ — Ar I; ♦ — Ar II; ▲ — Cr; ♦ — Fe; ■ — Ni

Характер зависимости температуры от осевой координаты, полученной по линиям атомов металлов, на большом удалении от катода совпадает с поведением электронной температуры в положительном столбе тлеющего разряда.

В отличие от полученных по линиям атомов металлов практически постоянных значений T найденные по линиям аргона температуры возрастают с увеличением расстояния от поверхности мишени. Этот эффект можно объяснить тем, что с удалением от катода термализация электронного компонента плазмы становится всё менее эффективной, а возбуждение нетермализованными электронами, напротив, играет большую роль. При взаимодействии высокоэнергетичных электронов с атомами других веществ в данных условиях основными являются процессы рождения заряженных частиц, а не возбуждения, что связано с низкими значениями потенциалов ионизации их атомов.

Отсюда следует, что достоверное измерение данным методом истинной температуры термализованной части электронов при наличии большого числа высокоэнергетичных нетермализованных электронов возможно лишь по атомам тех веществ, низкий потенциал ионизации которых не позволяет им эффективно возбуждаться от столкновений с такими частицами. Измеренные по ионам аргона высокие температуры также свидетельствуют о существенном вкладе в их возбуждение нетермализованной группы высокоэнергетичных электронов.

УДАЛЁННЫЙ ДОСТУП К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ КОМПЛЕКСУ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

На базе установки МАУГЛИ и описанного автоматизированного спектрометрического комплекса создана система удалённой диагностики плазмы через глобальную сеть [5] (рис. 7), предназначенная также и для использования в учебных целях, программное обеспечение которой включает в себя системы регистрации и авторизации пользователей, пользовательские интерфейсы удалённого управления и доступа к результатам проведённых экспериментов, работающие посредством стандартного Web-интерфейса, а также интегрированную базу данных, реализованную под управлением MySQL.

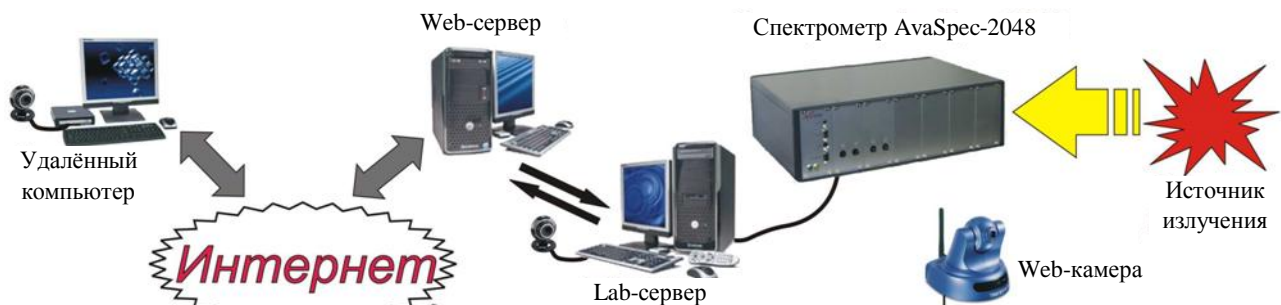


Рис. 7. Схема удалённой диагностики плазмы через глобальную сеть

Управляющий работой спектрометра компьютер (Lab-сервер) связан локальной сетью с Web-сервером, имеющим выход в Интернет. При проведении сетевого эксперимента удалённый экспериментатор с помощью интерфейса удалённого управления (в виде динамических HTML-страниц) задаёт параметры режима функционирования спектрометра, которые после проверки на корректность транслируются на Lab-сервер для выполнения программой SpectrAn. Результаты заносятся в базу данных и предоставляются экспериментатору в графическом и табличном виде как оперативно во время проведения сеанса управления, так и по его завершении.

Во время проведения удалённого эксперимента имеется возможность подключения к Web-камере, позволяющей в реальном времени наблюдать за ходом проведения эксперимента. Удалённый экспериментатор посредством соответствующего интерфейса может перемещать объектив камеры по горизонтали и вертикали, увеличивать и уменьшать изображение, рассматривая компоненты комплекса и источник излучения.

Созданное программное обеспечение не только поддерживает режимы сетевого управления и сетевого обмена информацией, но и предоставляет дополнительные возможности для обработки данных с учётом специфики исследуемого магнетронного разряда.



Владимир Михайлович Градов, профессор, д.техн.н.



Александр Михайлович Зимин, профессор, д.техн.н.
e-mail: zimin@power.bmstu.ru



Семён Евгеньевич Кривицкий, аспирант



Андрей Валерьевич Шумов, ведущий программист

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования процессов в плазме магнетронного разряда на основе четырёхканального спектрометра AvaSpec-2048 создан автоматизированный спектрометрический комплекс, поддерживающий также режим дистанционного управления. Комплекс позволяет регистрировать эмиссионные спектры различных участков магнетронного разряда.

Разработаны методика и алгоритмы статистической обработки результатов сканирования спектра излучения, позволяющие рассчитать температуры распределения атомов и ионов по уровням энергии для различных элементов плазмы магнетронного разряда. Сканирование плазменного образования в осевом направлении дало возможность осуществить пространственную привязку данных.

Создано оригинальное программное обеспечение, позволяющее проводить градуировку системы спектральной диагностики и обеспечивающее автоматизированную обработку экспериментальных данных для идентификации спектральных линий атомов и получения локальных параметров магнетронной плазмы.

Применение комплекса для диагностики плазмы магнетронного разряда показало, что специализированный комплекс и реализованные методики обработки данных работоспособны и удобны в использовании. Автоматизация позволяет значительно снизить трудоёмкость обработки спектральных данных.

Характер полученных зависимостей от параметров разряда качественно согласуется с современными представлениями о физических процессах в магнетронном разряде, а результаты соответствуют имеющимся литературным данным. Это позволяет сделать вывод как о перспективности созданного спектрометрического комплекса, так и о применимости реализованной в нём методики диагностики плазмы магнетронного разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методы** исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. Пер. с англ. — М.: Мир, 1971. 552 с.
2. **Данилин Б.С., Сырчин В.К.** Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
3. **Елистратов Н.Г., Зимин А.М., Васильев Н.Н. и др.** Моделирование распыления и переосаждения бериллия в условиях, ожидаемых в реакторе ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 1, с. 34—41.
4. **Рогов А.В., Вуколов К.Ю.** Моделирование условий распыления в ИТЭР с использованием магнетронной установки. Методика и режимы распыления. — Там же, с. 9—25.
5. **Krivitskiy S.E., Romadanov I.V., Shumov A.V., Zimin A.M.** Integration of basic sciences and engineering: from optics and quantum physics to spectral plasma diagnostics. Engineering education. — In: Proc. of Intern. Conf. ICSEE-2008. Pecs — Budapest, Hungary, 2008. Paper № 84.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2008 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 1, с. 64—71.