

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПЛЕНОК

Н.П. ПОЛУЭКТОВ, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,

В.Н. ХАРЧЕНКО, проф. каф. физики МГУЛ, д-р техн. наук,

И.И. УСАТОВ, асп. каф. физики МГУЛ,

Ю.П. ЦАРЬГОРОДЦЕВ, доц. каф. физики МГУЛ, канд. техн. наук

caf-physics@mgul.ac.ru

Физические свойства и качество наноструктур, получаемых в плазменных установках различных типов, существенно зависят от параметров плазменного разряда. Измерение таких параметров, а также их контроль на протяжении всего технологического процесса являются чрезвычайно важными задачами плазменных технологий.

В настоящей статье мы представляем автоматизированную систему контроля параметров плазмы для получения наноструктурных пленок на установке магнетронного разряда с полым катодом, разработанную на кафедре физики МГУЛ [1].

Схема установки магнетронного разряда представлена на рис. 1. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 140 мм, длина 100 мм), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него вставляются цилиндрические мишени из различных металлов. Магнитное поле создается

18-ю столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенными вокруг катода и соединенными магнитопроводами. Передний магнитопровод представляет собой кольцо, а задний – диск. На нем установлена магнитная система, подобная обычному магнетрону, состоящая из кольцевых магнитов различной полярности. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Скрещенные $E \times B$ поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации ($10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Вакуумная камера состоит из катода – источника плазмы и реактора (диаметр 35 см, длина 55 см).

Автоматизированная система контроля параметров плазмы (далее АСКП) реализует следующие методы диагностики.

1. Зондовая (производится зондом Ленгмюра). Определяются:

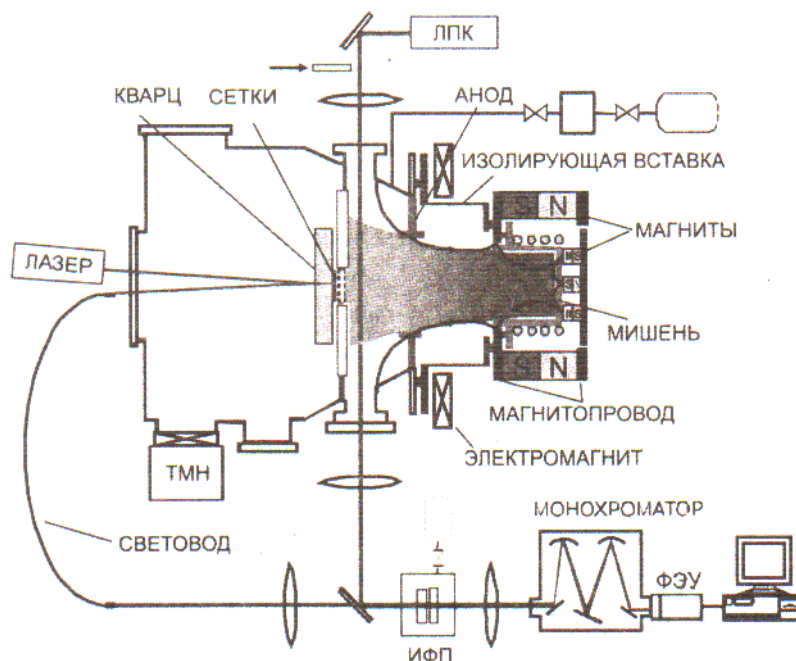


Рис. 1. Схема установки магнетронного разряда

- а. концентрация ионов и электронов;
 - б. плавающий и плазменный потенциал;
 - в. температура и распределение электронов по энергиям;
2. Спектральная. Определяются:
- а. спектр;
 - б. степень ионизации потока атомов мишени;
 - в. концентрация атомов и ионов в плазме;
 - г. температура атомов и ионов;
3. Тепловых потоков из плазмы на подложку.

Аппаратная часть системы построена на базе платы сбора данных PCI6221 фирмы National Instruments, блока подготовки сигналов и нескольких специально изготовленных модулей. Аналоговые входы и выходы имеют гальваническую развязку, что снижает помехи в измерительных цепях. Программное обеспечение, как для регистрации данных (виртуальные приборы), так и для их обработки, написаны на языке визуального программирования LabVIEW. Запуск всех программных модулей и обмен данными между ними производит программная оболочка – сервер виртуальных приборов.

Подсистема зондовых измерений

Состоит из виртуального прибора регистрации вольтамперных характеристик

(ВАХ) зонда и подпрограмм их обработки. Используется электростатический зонд Ленгмюра [2] диаметром 0.35 и длиной 5 мм, который вводится в плазму либо по радиусу разряда, либо по его оси (см. рис. 1). Виртуальный прибор генерирует линейно меняющееся напряжение в заданном диапазоне в пределах (-80..+80) В с заданным шагом и синхронно регистрирует напряжение и ток зонда. ВАХ, состоящая из 800 пар значений напряжение-ток, регистрируется за время около 2 секунд. Малое время регистрации является необходимым условием работы в металлической плазме, где на зонд и другие датчики происходит осаждение пленки металла. Графический интерфейс виртуального прибора позволяет задавать все параметры регистрации, и имеет графическое окно, где отображается ВАХ.

Подпрограмма обработки вольтамперных характеристик позволяет в интерактивном режиме производить сглаживание данных кубическими сплайнами и параллельно вычисляет первую и вторую производные. Далее производится расчет основных параметров плазмы: температуры электронов и функции распределения их по энергиям, концентрации заряженных частиц (электронов и ионов), причем два последних параметра определяются в рамках различных моделей. По результатам работы автоматически формируется файл отчета со стандартизованным именем. Зависи-

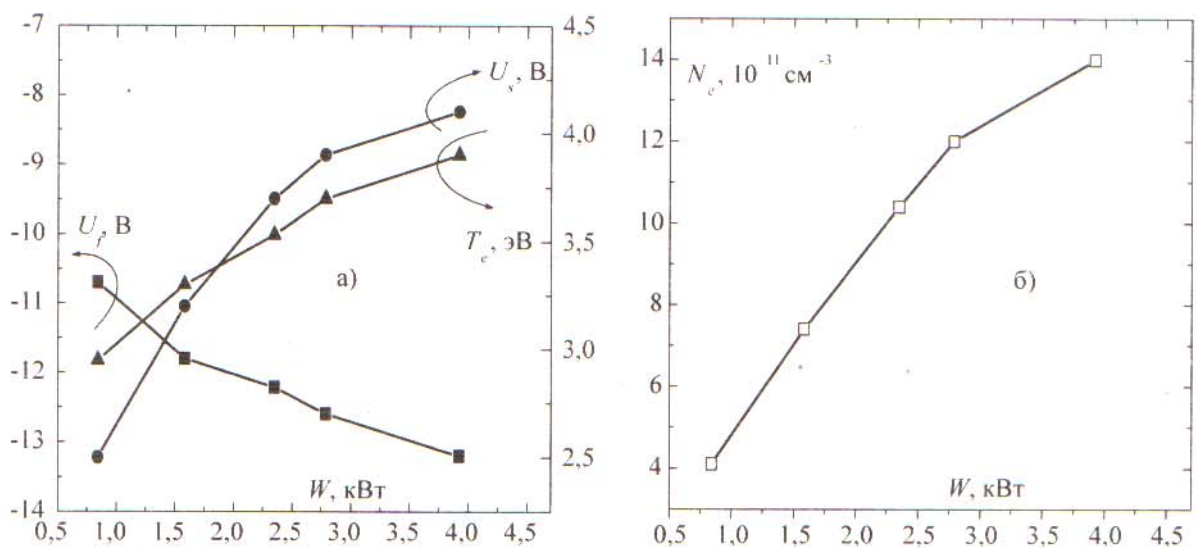


Рис. 2. Зависимости плавающего потенциала U_f , потенциала плазмы U_s и температуры электронов T_e (а) и концентрации плазмы n_e (б) от мощности разряда. Диаметр катода – 140 мм. Зонд – на расстоянии 19 см от катода

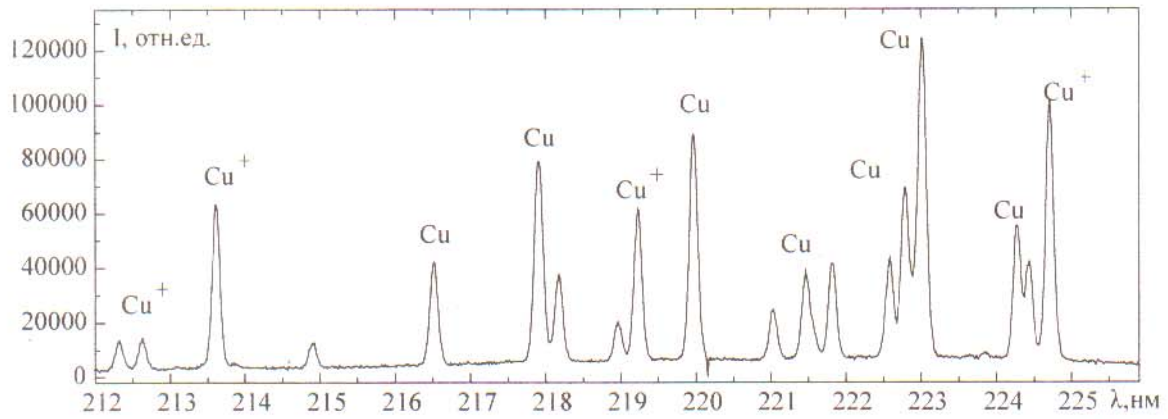


Рис. 3. Спектр излучения атомов и ионов (+) распыляемого металла в плазменном разряде. Ультрафиолетовая область

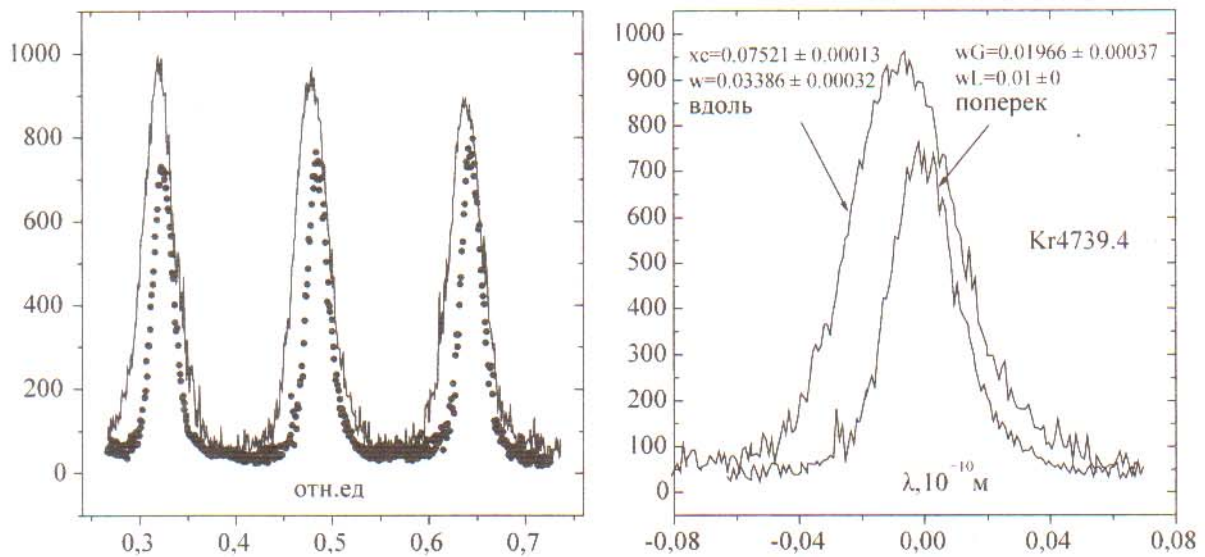


Рис. 4. Контур спектральной линии излучения буферного газа Kr473.94 нм. Слева – сигнал сканирования спектра. Справа – контуры линии излучения ионов криптона, зарегистрированные поперек и вдоль плазменного потока

мости параметров плазмы от вкладываемой в разряд мощности показаны на рис. 2.

Подсистема спектральных измерений

Ввиду достаточно малой интенсивности излучения плазмы спектры регистрируются методом счета фотонов. Излучение выводится из плазменной камеры через кварцевые окна (см. рис. 1) на вход монохроматора МДР-12. На выходе монохроматора устанавливается ФЭУ, сигнал с которого через быстродействующий фильтр-усилитель и формирователь импульсов поступает на счетчик виртуального прибора регистрации спектра. Монохроматор, вращая дифракционную решетку шаговым двигателем, производит развертку спектра. Синхронно с разверткой

спектра в каждой его точке измеряется частота прихода фотонов.

Измеренный спектр получает подпрограмма обработки. Она позволяет, во-первых, производить привязку всего спектра по длинам волн и, во-вторых, детально исследовать отдельные спектральные линии и их группы.

Для детального исследования контура отдельной спектральной линии с целью определения температуры атомов и ионов [3] применяется иная конфигурация системы. Перед монохроматором устанавливается интерферометр Фабри-Перо, сканируемый давлением. Монохроматор устанавливается на длину волны исследуемой линии, а в качестве сигнала, пропорционального длине волны, виртуальный прибор регистрирует

напряжение, пропорциональное давлению в камере интерферометра. Аппаратная функция системы в этом случае определяется по длине волны гелий-неонового лазера. Контур отдельной спектральной линии излучения плазмы показан на рис. 4. Справа – контуры линии излучения ионов буферного газа, зарегистрированные поперек и вдоль плазменного потока. Ширина спектральной линии определяется в данном случае температурой ионов, которая и рассчитывается исходя из ширины. Контур линии, зарегистрированной вдоль потока, смещен в фиолетовую область за счет направленной скорости движения ионов (продольный эффект Доплера). По величине смещения оценивается направленная скорость.

Концентрация распыленных атомов металла определяется методом атомно-абсорбционной спектроскопии [3]. Спектр лампы с полым катодом содержит линии металла, идентичные распыляемому магнетроном. Излучение лампы, проходя через разряд, частично поглощается плазмой, что регистрируется приемником после монохроматора. Монохроматор настроен на заданную спектральную линию металла. Концентрация атомов распыленного металла вычисляется по параметру поглощения

$$A = 1 - ((I_{\text{плазма+лампа}} - I_{\text{плазма}}) / I_{\text{лампа}}).$$

Степень ионизации атомов металла является чрезвычайно важным параметром в технологических процессах получения наноструктурных пленок, в особенности на рельефных поверхностях. Измерение степени ионизации производится следующим образом (рис.1). В качестве запыляемой металлом подложки используется прозрачная кварцевая пластина. Перед ней устанавливается система из двух сеток, между которыми в определенные моменты создается тормозящая ионы разность потенциалов. Когда такая разность потенциалов создана, то запыление пластины происходит только нейтральными атомами, когда нет, то атомами и ионами. Толщина напыленной тонкой пленки металла контролируется по ее коэффициенту отражения. Для этого на обратную сторону пленки через прозрачную пластику направляется

луч лазера со стабильной интенсивностью, а интенсивность отраженного луча регистрируется фотоэлектронным умножителем через монохроматор. На рис. 5 слева показана зависимость коэффициента отражения (пропорционального толщине пленки) от времени напыления. Коэффициент наклона графика пропорционален скорости напыления. Пунктиром показано изменение во времени тормозящего ионы напряжения. Степень ионизации атомов металла определяют по отношению скоростей напыления на двух этапах: торможение ионов и прохождение ионов. График справа показывает, что поток ионов металла достигает 60 %.

Подсистема измерений теплового потока подробно описана в [4]. Тепловой поток из плазмы измеряется специально спроектированным датчиком, представляющим собой нестационарный калориметр. Калориметрическим телом служит диск из тантала (диаметр– 17 мм, толщина– 0.5 мм). Тепловой поток q_0 определяется из разности между производными температуры диска-калориметра по времени dT/dt на этапах нагревания (н) (плазма включена) и остывания (о)(плазма выключена)

$$q_0 = S^{-1}mc(T) \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_н + \left(\frac{dT}{dt} \right)_о \right],$$

где S, m, c – площадь, масса и удельная теплоемкость диска.

Температура диска измеряется микротермопарой. Временная реализация сигнала с термопары через инструментальный усилитель с гальванической развязкой регистрируется соответствующим субприбором.

Подпрограмма вычисления теплового потока

- 1) принимает данные температурного хода, сглаживает их сплайнами, вычисляет первые производные на этапе нагрева и охлаждения;
- 2) вычисляет тепловые потоки при нескольких заранее выбранных пользователем температурах датчика;
- 3) вычисляет среднее значение и стандартное отклонение теплового потока.

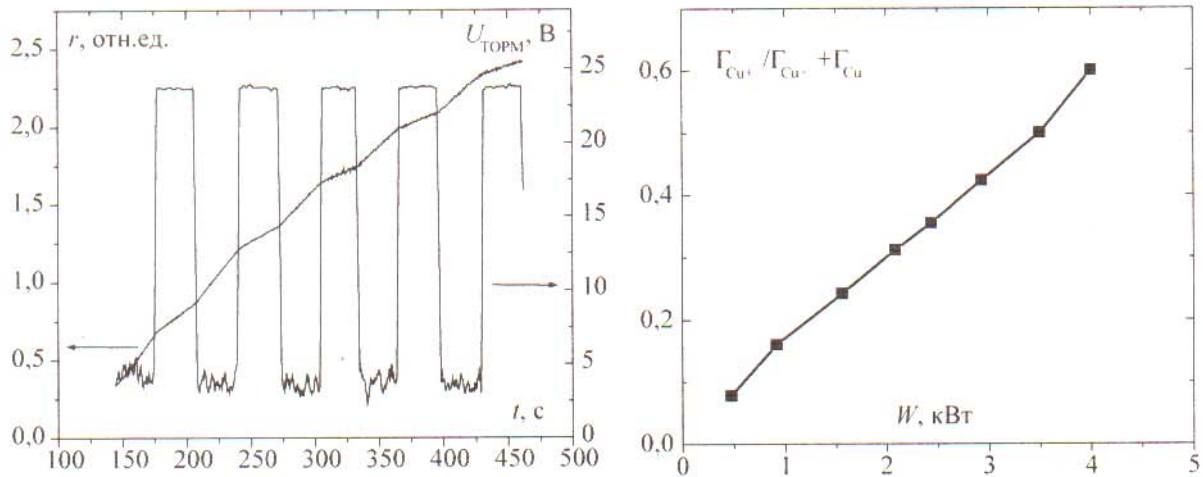


Рис. 5. Слева – коэффициент отражения осаждаемой пленки Cu как функция времени и задерживающего потенциала сетки. 10 мТорр, $W = 2.2$ кВт. Справа – зависимость степени ионизации атомов металла от мощности

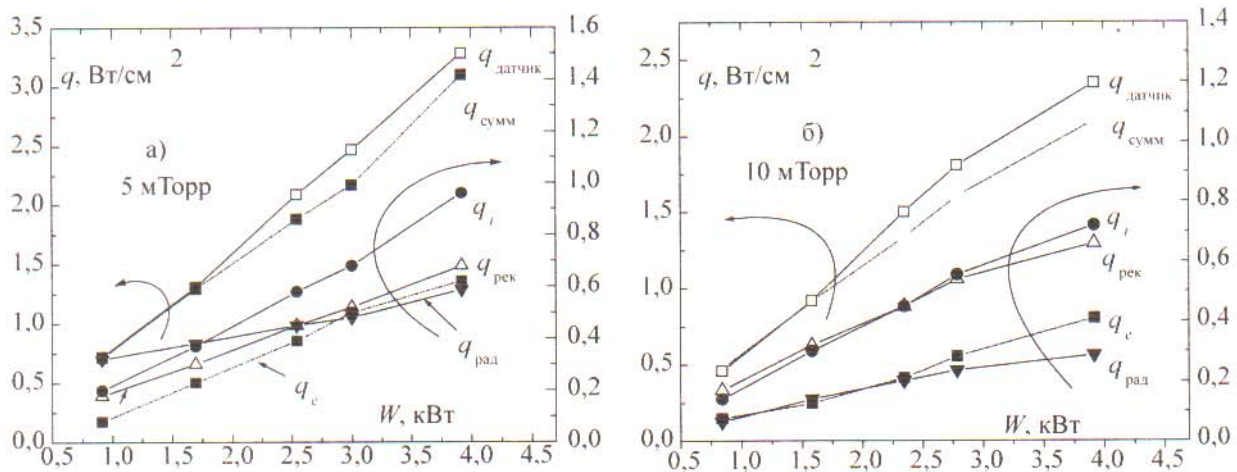


Рис. 6. Зависимость теплового потока плазмы и его компонентов от мощности разряда при разных давлениях. q_i, q_e – вклады ионов и электронов; $q_{рек}$ – рекомбинация ионов; $q_{рад}$ – излучение; $q_{сумм}$ – сумма вкладов

На рис. 6 приведены графики зависимости экспериментальных и теоретических зависимостей теплового потока от мощности при разных давлениях. Здесь показаны также вклады в тепловой поток различных факторов: электронов, ионов, нейтралов, излучения, рассчитанные по результатам зондовых и спектральных измерений. Значения теплового потока, измеренного датчиком, и суммарного теплового потока от различных составляющих согласуются в пределах точности измерений (10 %).

Разработанная автоматизированная система измерений используется для контроля параметров плазмы в процессе получения наноструктурных пленок, а также для отра-

ботки оптимальных режимов с целью получения изделий с заданными свойствами.

Библиографический список

1. Царьгородцев, Ю.П. Нанесение металлических пленок с использованием магнетронного разряда в системе с полым катодом / Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, В.Н. Харченко и др. // Электроника. – 2009. – № 3. – С. 19–24.
2. Чан, П. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме / П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян. – М.: Мир, 1978. – 201 с.
3. Спектроскопия газоразрядной плазмы: Сб. статей / С.Э. Фриш. – Л.: Наука, 1970. – 362 с.
4. Царьгородцев, Ю.П. Тепловые потоки в магнетронном разряде с полым катодом / Ю.П. Царьгородцев, Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов // Труды 5-ой Российской национальной конференции по теплообмену. – 2010. – Т. 1. – С. 142–145.