

9. Потрахов Е. Н. Микрофокусная рентгенография – инновационная технология медицинской диагностики // Медицинская техника. 2012. № 5. С. 44–47.
10. Применение микрофокусной рентгенографии при диагностике заболеваний древнего человека /

А. П. Бужилова, М. В. Добровольская, М. Б. Медникова и др. // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 152–162.

V. B. Bessonov, A. V. Obodovsky, A. Yu. Gryaznov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

I. A. Boyko
ZAO «Svetlana-X-Ray» (Saint-Petersburg)

MICROFOCUS X-RAY RADIOGRAPHY IN THE STUDY OF ARCHAEOLOGICAL SITES, MUSEUM OBJECTS AND WORKS OF ART

This article covers physical and technical principles of the radiography method with direct geometric magnification of the object (microfocus radiography). Features of obtaining X-ray images on devices with extended and point focal spot are discussed. Results of studies of archaeological sites and museum objects with microfocus X-ray radiography method are shown.

X-ray radiography, microfocus X-ray radiography, X-ray inspection, geometric magnification, focal spot

УДК 533.9.08

А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Особенности анализа состава плазмы с помощью малогабаритного оптического спектрометра

Рассмотрены особенности применения малогабаритного оптического спектрометра для анализа состава плазмы. Описаны возможности разработанного программного обеспечения для идентификации спектральных линий в спектре излучения. Рассмотрены сложности, возникающие при анализе спектров излучения плазмы сложного состава.

Эмиссионная спектроскопия, оптический спектрометр, состав плазмы, спектральная линия

Оптическая эмиссионная спектроскопия широко применяется для контроля ионно-плазменных процессов травления и осаждения материалов [1]–[6]. В них удаляемое или осаждаемое вещество находится в распыленной фазе и, испытывая соударения с электронами, частично переходит в возбужденное состояние. Обратный переход частиц из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием излучения, которое несет информацию о плотности возбужденных состояний атомов и молекул распыленного вещества и других компонентов газовой среды.

Основными преимуществами спектрометрических систем контроля являются: простота

встраивания в технологический процесс, отсутствие контакта с вакуумным объемом технологической камеры, высокая помехозащищенность, а также возможность наблюдения за параметрами процесса в реальном времени.

В случае если технологический процесс окончательно не отработан, для регистрации спектров можно использовать универсальный оптический спектрометр, например ISM3600, разработанный в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [7]–[10]. Для управления прибором и анализа спектров используется программное обеспечение (ПО) Aspect2010.

ПО поддерживает следующие функции: управление чувствительностью фотоприемника,

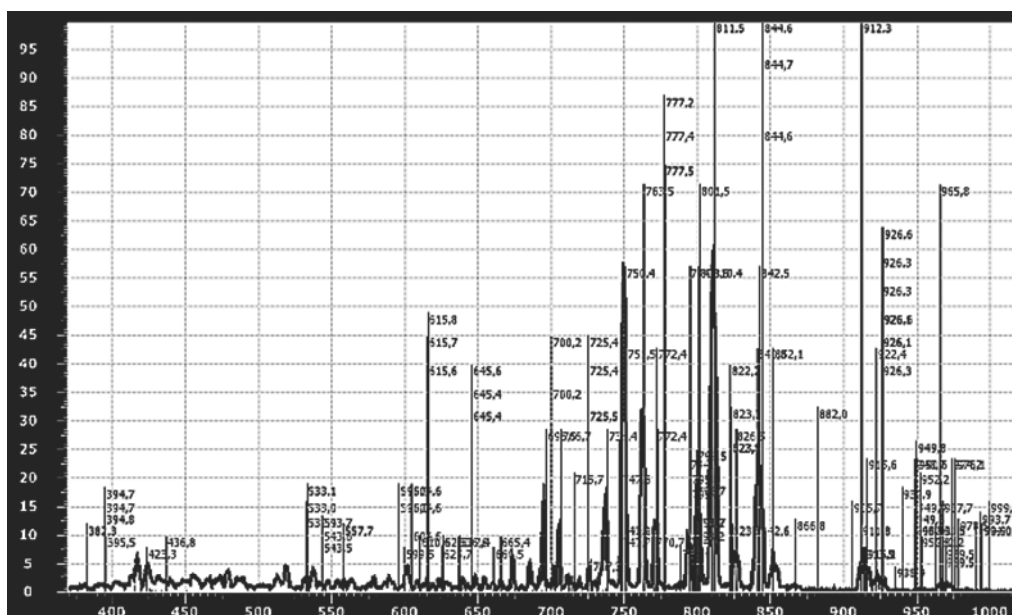


Рис. 1

автоматический учет темнового сигнала, изменение масштаба по шкале длин волн при отображении спектра, однократная запись спектра, запись спектра с усреднением по заданному числу измерений, периодическое отображение спектра в осциллографическом режиме, расчет ширины спектральной полосы в выбранном диапазоне. В осциллографическом режиме спектр снимается непрерывно через равные промежутки времени, определяемые чувствительностью прибора (временем накопления заряда) и временными затратами на передачу и обработку данных.

Часть функций ПО предназначена для анализа эмиссионных спектров излучения плазмы. Для точного измерения длины волны и соответствующей ей амплитуды линии спектра можно навести указатель на спектральную линию, и около нее появятся цифры, характеризующие амплитуду, длину волны линии и ее спектральную ширину на выбранной указателем высоте. Для упрощения работы со спектрами излучения на экране программы можно отобразить спектральные линии любого элемента из Периодической таблицы Менделеева.

В разработанном ПО также имеется режим сравнения энергии двух спектральных линий для простейшего анализа эмиссионных спектров излучения. В качестве параметров в этом случае задаются две зоны по длинам волн. В процессе измерения производится интегрирование сигнала по обеим зонам. Диапазон длин волн рекомендуется задавать в соответствии со спек-

тральным разрешением прибора (1.5 нм) и реальной шириной требуемой спектральной линии. В дальнейшем при каждом измерении будет производиться интегрирование в пределах заданных зон и вычисляться отношение полученных значений.

Линии выбранных элементов выводятся одновременно с анализируемым спектром, что позволяет оценить их наличие в газовой среде анализируемой плазмы. На рис. 1 приведен спектр излучения плазмы с отображением линий аргона (показаны в виде вертикальных маркеров с указанием длины волны). Данный спектр содержит ряд линий кислорода, аргона и других веществ, участвующих в процессе, что затрудняет его анализ. При рассмотрении возможностей анализа состава газовой смеси в технологической камере имеет смысл перейти к рассмотрению фрагмента спектра, содержащего несколько линий.

В рабочей камере технологической установки всегда используется несколько элементов и их можно одновременно вывести на экран, например кислород и аргон. Разрешение малогабаритного спектрометра составляет примерно 1.5 нм, что приводит к объединению нескольких близко расположенных линий в одну, при этом линии разных элементов могут сливаться, что дополнительно усложняет анализ состава плазмы. На рис. 2 показан фрагмент спектра с отображением линий кислорода и аргона.

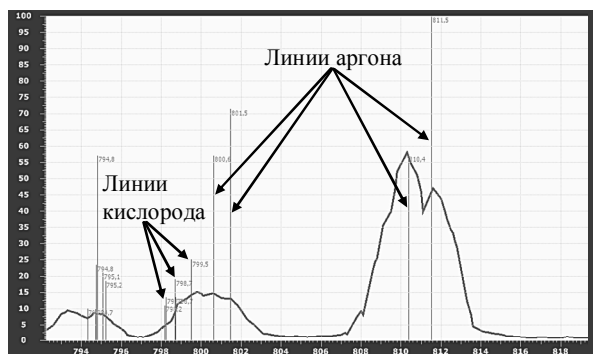


Рис. 2

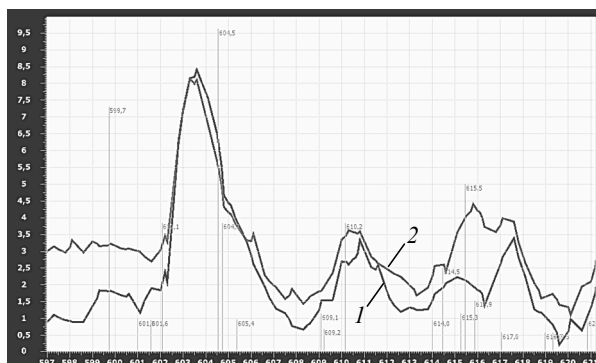


Рис. 3

Используемые в технологических установках компоненты, как правило, имеют достаточно большое количество спектральных линий, однако всегда можно найти спектральную область, в которой наличие или отсутствие необходимого элемента достаточно легко определяется. На рис. 3 приведен фрагмент спектров излучения плазмы в процессе нанесения покрытия без тантала (1) и с наличием тантала (2) в рабочей камере.

Для обработки спектральных данных в ПО может использоваться специальный калькулятор, его операции позволяют строить достаточно сложные выражения. Например, для определения соотношения энергий пиков элементов требуется не просто поделить амплитуду одного пика на амплитуду другого, а вычислить отношение их

интегралов. Однако необходимо иметь в виду, что данные операции предназначены для текущих ручных вычислений и не могут быть использованы для автоматизации процессов.

На рис. 4 в качестве примера показаны зависимости интенсивности спектральных линий аргона и кислорода в процессе нанесения пленок пятиоксида тантала от объемной концентрации кислорода (1 – линия кислорода 777.5 нм; 2 – линия аргона 738.4 нм; 3 – линия аргона 763.5 нм; 4 – линия аргона 751.5 нм). Данные результаты получены с применением описанного ПО и спектрометра ISM3600.

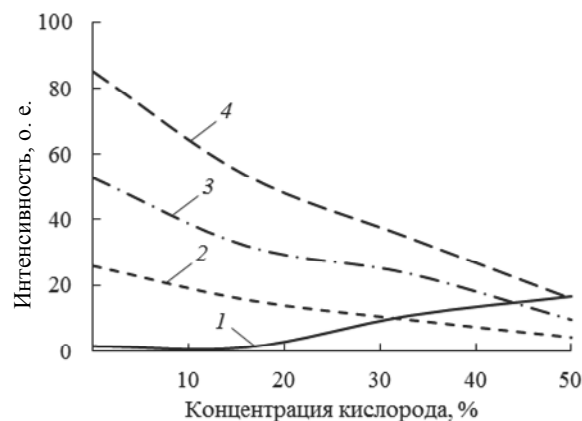


Рис. 4

Приведенные результаты подтверждают эффективность применения оптической спектроскопии для контроля состава плазмы в процессе нанесения пленок, что позволяет управлять параметрами получаемых покрытий. Спектрометрический способ контроля не только прост и относительно дешев в реализации, но и позволяет без какого-либо воздействия на процесс производить диагностику процессов в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колгин Е. А., Ухов А. А., Савушкин А. В. Спектрометры на основе полихроматора и одномерной ПЗС-матрицы: опыт разработки и применения // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2–3. С. 120–126.
2. Быстров Ю. А., Кострин Д. К., Лисенков А. А. Спектрометрический анализ состава плазменного потока вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 23, № 1. С. 164–166.
3. Кострин Д. К. Автоматический поиск положения спектральных линий при анализе спектров излучения плазмы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 11–15.
4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Повышение метрологических характеристик спектрометрического оборудования при диагностике ионно-плазменных процессов // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 34–38.
5. Повышение точности спектрального метода измерения параметров оптически прозрачных тонких пленок / В. А. Герасимов, Д. К. Кострин, Л. М. Селиванов, А. А. Ухов // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 39–42.
6. Комлев А. Е., Ухов А. А., Комлев А. А. Комплекс требований к оборудованию для осаждения пленок оксидов методом реактивного магнетронного распыления // Вакуумная техника и технология. 2012. Т. 22, № 4. С. 245–248.

7. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.

8. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.

9. Ухов А. А. Влияние тактовых импульсов на уровень шумов ПЗС-фотоприемников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 15–19.

10. Ухов А. А. Применение цифровой двойной коррелированной выборки для обработки сигнала линейного ПЗС-фотоприемника // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 7. С. 11–14.

A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

FEATURES OF THE ANALYSIS OF COMPOSITION OF PLASMA BY MEANS OF THE COMPACT OPTICAL SPECTROMETER

Features of application of a compact optical spectrometer for the analysis of composition of plasma are considered. Capabilities of the developed software for identification of spectral lines in a spectrum of radiation are described. The difficulties arising in the analysis of spectrums of radiation of plasma with complex structure are considered.

Emissive spectroscopy, optical spectrometer, composition of plasma, spectral line
