

8. Пат. на способ № RUS 2 499 648. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / В. Н. Востров, П. В. Кононов. 25.06. 2012.

9. Пат. на полезную модель № RUS 116079. Устройство для раскатки буртов на трубных заготовках / В. Н. Востров, П. В. Кононов. 07.12.2011.

10. Кононов П. В., Востров В. Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. 2013. № 9. С. 46–49.

P. V. Kononov, V. N. Vostrov  
Saint-Petersburg state polytechnical university

I. E. Kononova  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## ANALYSIS STRESS-STRAIN STATE ITEMS WITH FLANGE BRASS USING ATOMIC FORCE MICROSCOPY

*Model samples brass parts with the help of technology rolling flanges on the generator side of the tubular blank were created. The morphology of plastically deformed surface layers of the model samples was investigated using atomic force and optical microscopy. Values of heights and scope parameter that expresses the surface roughness of the selected five maximum heights and hollows were calculated. Fractal analysis of surfaces structures using atomic force microscopy was conducted.*

**Details of the flanges, brass, forming part of the tubular blank, atomic force microscopy, fractal analysis**

УДК 543.423

Д. К. Кострин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Автоматический поиск положения спектральных линий при анализе спектров излучения плазмы

*Рассмотрены требования, выдвигаемые к алгоритмам поиска спектральных линий при анализе спектров плазмы. Приведены результаты работы двух быстродействующих методов поиска с помощью тестового программного обеспечения. Показана возможность применения полученных результатов для анализа состава плазмы при контроле технологических процессов.*

**Спектральная линия, оптический спектр, спектрометр, излучение плазмы**

Спектрометрический контроль имеет широкое применение в ионно-плазменных процессах травления и осаждения материалов [1]. В данных процессах 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 [2].

Спектральные системы контроля достаточно просто встраиваются в технологический процесс. Методами спектрального контроля прямо или косвенно оцениваются качество газовой среды, скорость и появление конечной точки при травлении пленок в плазмохимических установках, степень ионизации плазмы, температура нейтральных частиц и электронов. Спектрометрический контроль в распылительном нанесении пленок применяется для контроля скорости распыления материала, для измерения и поддержания на заданном уровне соотношения распыляемых ком-

понентов при нанесении смесей материалов, для обеспечения воспроизводимых по свойствам покрытий в установках реактивного напыления путем слежения за участниками реакции, для измерений соотношения между концентрациями ионов и нейтральных частиц. Во всех перечисленных применениях спектрального контроля анализируют и сравнивают интенсивность выбранных линий в электронных спектрах атомов и ионов [1], [2].

Преимуществом использования спектрометрического оборудования для контроля ионно-плазменных процессов является не только простота встраивания таких систем в технологический процесс, но и отсутствие контакта с вакуумным объемом технологической камеры, а также возможность диагностики процессов в реальном масштабе времени.

Анализ линейчатых спектров плазмы подразумевает использование программного обеспечения (ПО), построенного с применением алгоритмов автоматического определения положения спектральных линий [3], что позволяет проводить качественный и количественный анализ состава плазмы. Основным требованием, предъявляемым к алгоритмам поиска спектральных линий, является высокое быстродействие, позволяющее производить поиск линий в режиме реального времени.

Задача выявления спектральных линий линейчатых спектров необходима для корректной работы алгоритмов качественного спектрального анализа. Существует целый ряд алгоритмов, применяемых в химических исследованиях для выявления серии пиков и сопоставления их профилями различных веществ [4], [5]. Чаще всего такие алгоритмы специализируются на анализе пептидных компонентов и не подходят для анализа оптиче-

ских спектров. В свою очередь, методов детектирования пиков в оптическом диапазоне не так много. Алгоритм выявления спектральной линии должен обеспечивать отсеку шумовой составляющей, учет несимметричности сигнала, разрешение задачи вложенных пиков, дуплетов и триплетов.

Существует ряд подходов к выявлению спектральных линий. Стоит отметить следующие алгоритмы: поиск локального максимума, метод вписывания функции, вейвлет-анализ, анализ сонограмм. Некоторые из этих алгоритмов действительно хорошо справляются с задачей выделения пиков, но выполняются недостаточно быстро, даже при использовании современных вычислительных мощностей, и теряют свою актуальность при анализе спектров в реальном времени.

В данной статье рассмотрены наиболее простые и при этом быстродействующие алгоритмы, позволяющие определять положение спектральной линии. При этом ради увеличения быстродействия работы алгоритма приходится жертвовать возможностями дополнительного анализа. Для оценки возможностей алгоритмов была написана тестовая программа на языке C# в среде разработки Microsoft Visual Studio, позволяющая обрабатывать оптические спектры, полученные с помощью разработанных на кафедре электронных приборов и устройств спектрометра ISM3600 [6] и комплекса ПО «Aspect2010» [7]. На рис. 1 приведен результат анализа спектра излучения плазмы разряда в жидкости с помощью одного из исследуемых алгоритмов в тестовой программе.

Прежде чем перейти к реализации алгоритмов поиска следует применить ряд мер по обработке исходных спектральных данных. Сигнал фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью (ФПЗС) [8], с использованием которого построен

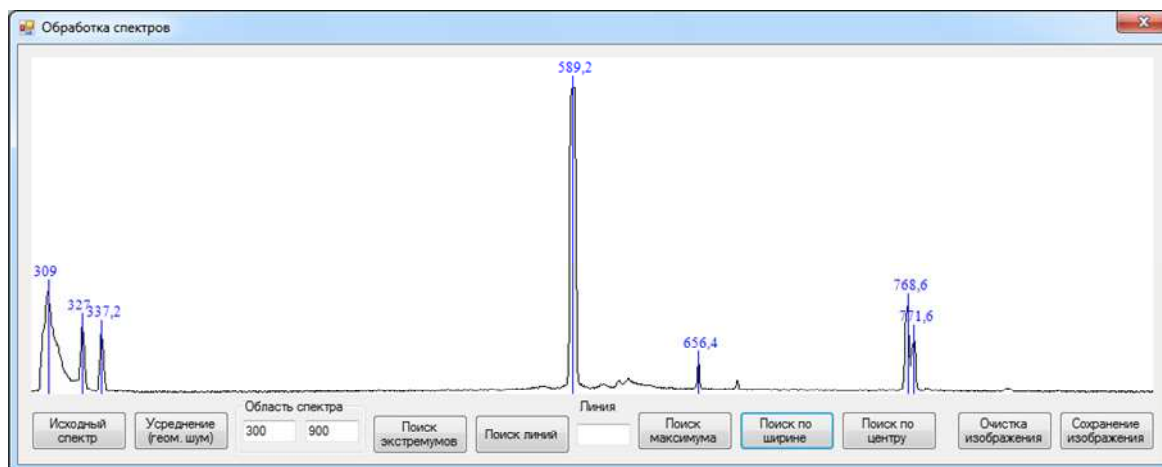


Рис. 1

спектрометрический комплекс ISM3600, имеет некоторый уровень шума, состоящего из нескольких компонентов [7]. Первый компонент – это «геометрический» шум, обусловленный топологией фотоприемника. Для упрощения вывода сигнала в данном типе ФПЗС используются транспортные регистры по обе стороны фотоприемника. Таким образом, четные и нечетные пиксели имеют несколько различные параметры. В режиме удаления геометрического шума производится линейная интерполяция четных и нечетных пикселей, что позволяет повысить точность определения положения спектральных линий.

Следующий компонент – это собственный шум ФПЗС. Для его снижения можно произвести усреднение по нескольким снятым спектрам. Однако вместе с увеличением числа измерений вырастет и общее время получения итогового спектра, таким образом, требуется определение некоторого компромиссного решения по числу усреднений. Предварительная фильтрация данных уменьшает шанс обнаружения ложного спектрального пика [3].

Спектральная линия не является бесконечно узким пиком, она всегда имеет естественное уширение. Также уширение спектральной линии происходит в приборе, производящем измерения. В итоге спектральная линия представляет собой сильно уширенный, зашумленный колоколообразный сигнал. Часто максимум такого сигнала находится не в центре и не соответствует положению спектральной линии. Примеры форм спектральных линий приведены на рис. 2: *а* – неравномерно уширенная линия; *б* – линия «идеальной» формы; *в* – частично разрешенный дуплет.

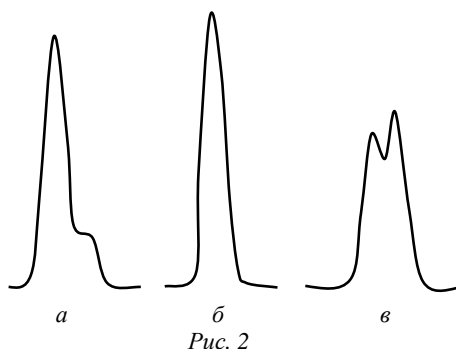


Рис. 2

Первый алгоритм, который будет рассмотрен в данной статье, осуществляет поиск положения спектральных линий с помощью расчета так называемого центра тяжести (ЦТ) фигуры. Порядок выполнения действий в данном алгоритме следующий:

- поиск максимумов во всем спектральном диапазоне;
- удаление из рассмотрения пиков, обладающих малой интенсивностью;
- поиск нижних границ пиков;
- расчет центра тяжести для каждого из пиков.

Расчет центра тяжести фигуры осуществляется по следующей формуле:

$$\lambda_{\text{ЦТ}} = \frac{\sum \lambda_n I_n}{\sum I_n},$$

где  $\lambda_n$  – длина волны  $n$ -й точки, принадлежащей данному пику;  $I_n$  – интенсивность для  $n$ -й точки, принадлежащей данному пику.

Данный алгоритм обладает достаточным быстродействием и позволяет эффективно определять реальное положение спектральных линий. Существенным недостатком алгоритма является невозможность определения положения линий в не полностью разрешенном дуплете (рис. 2, *в*).

Решение такой задачи требует вписывания в фигуру, ограничивающую пик двух математических функций Гаусса, Лоренца или Войта и подгонки их параметров до получения существующей формы пика [9]. Длины волн, соответствующие положениям спектральных пиков, в данном случае определяются параметрами вписанных функций. Такое дополнение к алгоритму во многом уменьшает его быстродействие и не применимо для анализа в режиме реального времени.

Второй рассмотренный алгоритм проще в реализации и имеет большее быстродействие. Порядок выполнения действий для него следующий:

- поиск максимумов ( $\lambda_{\text{пик}}$ ,  $I_{\text{пик}}$ ) во всем спектральном диапазоне;
- удаление из рассмотрения пиков, обладающих малой интенсивностью;
- поиск левой ( $\lambda_{\text{лев}}$ ) и правой ( $\lambda_{\text{прав}}$ ) границ фигуры на полувысоте пика;
- расчет центра фигуры ( $\lambda_{\text{ЦФ}}$ ) на полувысоте (рис. 3).

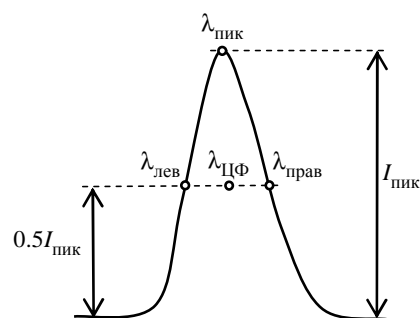


Рис. 3

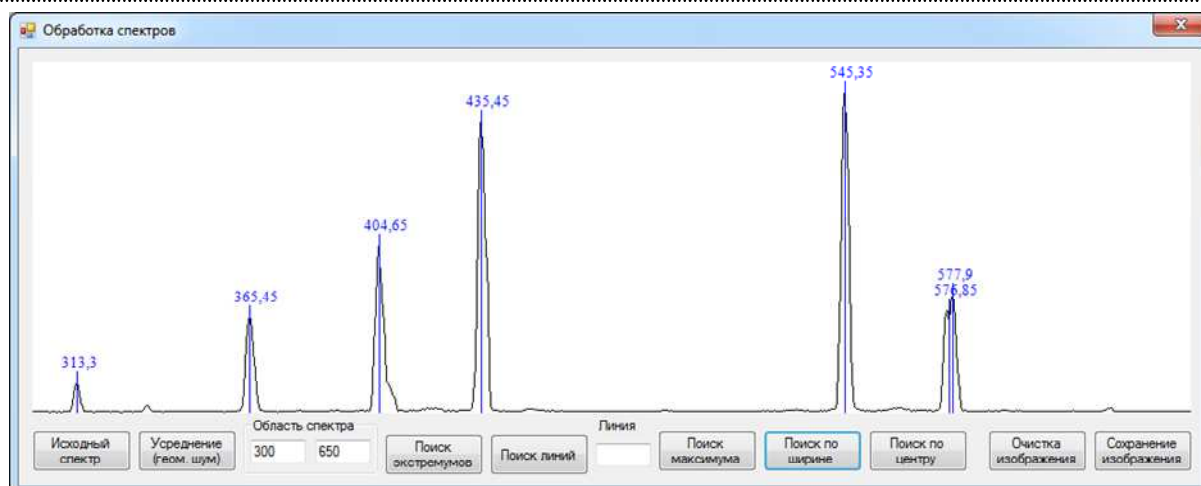


Рис. 4

Способ поиска	Длина волны спектральной линии, нм						
	Максимум спектрального пика	313.60	365.35	404.00	435.10	545.00	576.15
Центр тяжести фигуры	313.45	365.45	404.55	435.35	545.30	577.25	577.25
Центр пика на полувысоте	313.30	365.45	404.65	435.45	545.35	576.85	577.90
Теоретическое значение	312.60	365.00	404.67	435.83	546.07	576.96	579.07

Данный алгоритм в отличие от предыдущего позволяет обрабатывать частично разрешенные дуплеты линий. В случае их наличия алгоритм при поиске  $\lambda_{ЦФ}$  переходит от полувысоты пика к интенсивности, соответствующей точке разделения «слипшихся» линий (см. рис. 2, в).

На рис. 4 приведены результаты поиска спектральных линий с помощью тестовой программы с применением второго алгоритма. Для эксперимента выбран спектр излучения ртутной лампы низкого давления, имеющий ряд хорошо изученных спектральных линий разной формы в большом интервале длин волн.

Результаты определения положения спектральных линий для ртутной лампы низкого давления с применением обоих рассмотренных алгоритмов приведены в таблице. Для сравнения показаны истинные значения длин волн спектральных линий, а также положения максимумов линий на спектре.

Анализ данных, приведенных в таблице, позволяет сделать вывод о том, что оба алгоритма дают возможность получить значения положения спектральных линий, достаточно близкие к теоретическим значениям. При этом точность работы второго алгоритма (при том, что он проще и быстрее) выше. Следует заметить, что погрешность определения положения линий, скорее всего, связана не с работой алгоритма, а с качеством калибровки спектрометра по длинам волн [10].

Рассчитанные данные положения спектральных линий позволяют провести качественный состав анализа плазмы. Учитывая разрешение спектрометра, погрешности калибровки прибора по длинам волн, наличие шумов и неточность работы алгоритмов поиска, рассчитанные координаты спектральных линий будут отличаться от теоретических значений. Принимая во внимание тот факт, что для каждого атома, иона или химического соединения существует целый ряд спектральных линий, возникает значительная сложность в определении, какому именно элементу соответствует данный спектральный пик.

Для большинства технологических процессов заранее известно, какие атомы, ионы или химические соединения могут присутствовать в составе исследуемой плазмы. Таким образом, при определении принадлежности пика конкретному элементу можно ограничить поиск небольшим рядом элементов. При этом следует задать диапазон отклонений расчетного положения спектрального пика от теоретического.

В заключение можно отметить, что рассмотренные алгоритмы поиска положения пиков при их простоте и быстродействии позволяют эффективно определять длины волн спектральных линий. Полученные данные могут далее использоваться для анализа состава плазмы в режиме реального времени, что позволяет при контроле технологических процессов своевременно реагировать на изменение состава плазменного потока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю. А., Ветров Н. З., Лисенков А. А. Плазмохимический синтез карбида титана на медных подложках // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 15. С. 33–39.
2. Кострин Д. К. Исследование возможности экспресс-контроля состава воды оптическим спектрометром при использовании разряда в жидкости // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 7. С. 15–19.
3. Кострин Д. К., Ухов А. А. Обнаружение и компенсация ложных спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 26–28.
4. Vu T. N., Laukens K. Getting Your Peaks in Line: A Review of Alignment Methods for NMR Spectral Data // Metabolites. 2013. Vol. 3. P. 259–276.
5. Antoniadis A., Bigot J., Lambert-Lacroix S. Peaks detection and alignment for mass spectrometry data // J. de la Société Française de Statistique. 2010. Vol. 151, № 1. P. 17–37.
6. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.
7. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 8–13.
8. 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.
9. Brown A. J. Spectral Curve Fitting for Automatic Hyperspectral Data Analysis // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2006. Vol. 44, № 6. P. 1601–1608.
10. Коррекция спектральной характеристики оптического спектрометра при исследовании источников инфракрасного излучения / Д. К. Кострин, А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 2. С. 3–5.

D. K. Kostrin

*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## AUTOMATIC SEARCH OF SPECTRAL LINES POSITION IN THE ANALYSIS OF SPECTRUMS OF PLASMA RADIATION

*The requirements for the search algorithms of spectral lines in the analysis of spectrums of plasma are considered. Results of work of two high-speed search methods by means of the test software are given. Possibility of application of the received results for the analysis of composition of plasma is shown in the control of technological processes.*

**Spectral line, optical spectrum, spectrometer, plasma radiation**

УДК 681.785.5

А. А. Ухов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Влияние тактовых импульсов на уровень шумов ПЗС-фотоприемников

*Рассмотрено влияние формирователей тактовых импульсов, выполненных на логических элементах, на шумы выходного сигнала линейного фотоприемника. Показана возможность снижения уровня шумов путем ограничения спектральной полосы тактовых импульсов и предложен соответствующий схемотехнический способ реализации метода. Выявлена зависимость снижения уровня шумов от параметров элементов RC-фильтра.*

**Прибор с зарядовой связью, тактовые импульсы, оптический спектрометр, RC-фильтр**

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) предназначены для преобразования пространственного распределения оптического излучения в электри-

ческий сигнал. Двухкоординатные ПЗС, обычно именуемые матрицами, используют в основном в фотоаппаратах и видеокамерах. Однокоординат-