23

# Регистрация спектров на 6.65 метровом ВУФ-УФ спектрометре с помощью многоканального детектора

© П.С. Анциферов[1,2], Л.В. Степанов[1,2], Н.Д. Матюхин[1,3]

[1] Институт спектроскопии Российской академии наук,
Москва, Троицк, Россия
[2] Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., Долгопрудный, Россия

e-mail: lvstepanov@edu.hse.ru

*Поступила в редакцию 14.10.2025 г.*
*В окончательной редакции 14.10.2025 г.*
*Принята к публикации 28.12.2025 г.*

Сообщено о разработке системы регистрации спектров на ПЗС-линейке для уникального ВУФ спектрометра, построенного на основе сферической дифракционной решетки с радиусом 6.65 m. Была использована линейка HAMAMATSU S11156-2048-02, которая устанавливалась по касательной к окружности Роуланда с возможностью механического перемещения для сканирования спектра. Были получены спектрограммы в диапазоне длин волн 2130−2270 Å. Описана методика сшивки регистрируемых спектральных участков для получения обзорной спектрограммы. Предложена методика анализа крыльев спектральных линий с целью выделения лоренцевского вклада.

**Ключевые слова:** системы регистрации спектров, ПЗС-линейка, ВУФ спектрометр.

DOI: 10.61011/OS.2026.02.62698.8633-25

## Введение

Институт спектроскопии РАН располагает уникальным спектрометром на область 50−250 nm, построенным на сферической решетке с радиусом 6.65 m в нормальном падении и обладающим теоретическим спектральным разрешением $\lambda/\delta\lambda \cong 10^5$. С его помощью был получен ряд важных результатов по идентификации энергетических уровней ионов, имеющих приложения в разных областях физики, таких как астрофизика [1], лазеры ВУФ диапазона [2], литография [3] и др. Рассчитанный на работу с фотоматериалами, в настоящий момент спектрометр нуждается в переходе на систему регистрации спектров, основанную на других принципах. В настоящей работе сообщается о создании системы регистрации спектров на основе ПЗС-линейки. Помимо описания методики работы с такой системой в статье рассказывается также о новых возможностях обработки спектров. Приведены результаты, полученные с помощью дугового разряда с железными электродами в области 200 nm.

## Регистрация спектров с помощью ПЗС-линейки

В спектрометре используется вогнутая дифракционная решетка (радиус кривизны $R = 6.65$ m) с золотым покрытием с полным рабочим размером 175 mm, имеющая плотность штрихов 1200 gr/mm, обеспечивающая обратную линейную дисперсию 1.25 Å/mm (рис. 1). В настоящих измерениях спектрометр настроен на диапазон от 1900 до 2500 Å, что позволило работать без откачки объема спектрометра. Излучение падает на решетку под углом $\varphi = 3.7°$, коротковолновая и длинноволновая границы диапазона соответствуют углам 9.4° и 13.62° соответственно (рис. 1).

В настоящей работе применена ПЗС-линейка HAMAMATSU S11156-2048-02, содержащая 2048 элементов высотой 1 mm и размером пикселя в направлении дисперсии 14 $\mu$m. Полный размер линейки в направлении дисперсии составляет 28 mm. Линейка устанавливается в кассетном узле спектрометра касательно к окружности Роуланда

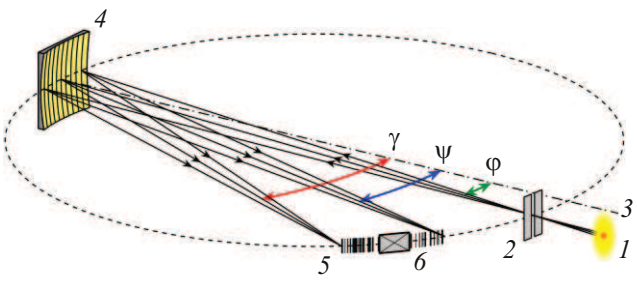


**Рис. 1.** Схема спектрометра. *1* — источник излучения (электрическая дуга), *2* — входная щель спектрометра, *3* — нормаль к дифракционной решетке, *4* — вогнутая дифракционная решетка, *5* — поверхность фокусировки спектральных линий, *6* — ПЗС-линейка; $\varphi = 3.7°$, $\psi = 9.4°$, $\gamma = 13.62°$.

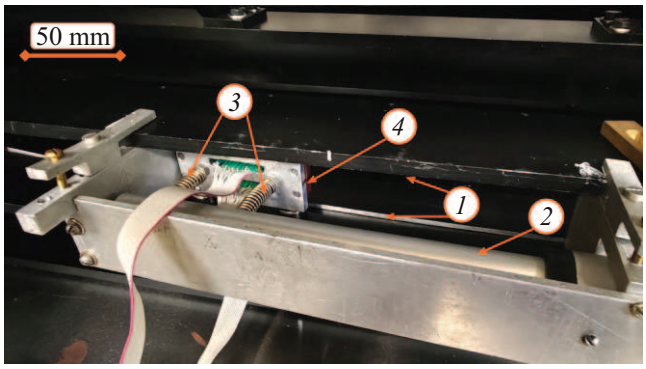


**Рис. 2.** Узел ПЗС-линейки. *1* — направляющие вдоль окружности Роуланда, *2* — линейный актуатор, *3* — прижимные пружины, *4* — каретка с ПЗС-матрицей (на рисунке не видна). В левом верхнем углу приведен масштаб рисунка.

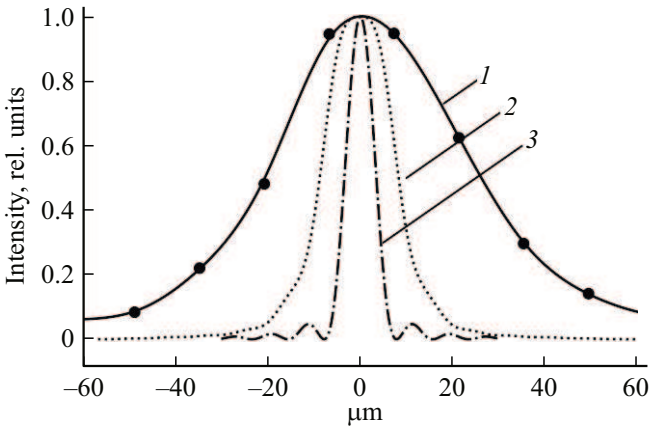


**Рис. 3.** *1* — экспериментальный профиль спектральной линии Fe II $3d^64s^5D_{3/2} - 3d^64p^4F_{3/2}$, $\lambda = 2250.175$ Å, *2* — численная модель аппаратной функции, *3* — вклад в аппаратную функцию от дифракции на апертуре решетки.

(рис. 1). Относительно небольшой размер линейки, с одной стороны, обеспечивает фокусировку на всей ее длине, но, с другой стороны, делает необходимым сканирование регистрируемого спектра для получения достаточного спектрального обзора. В представленном варианте системы регистрации каретка с ПЗС-линейкой перемещается по имеющимся направляющим вдоль окружности Роуланда с помощью линейной винтовой передачи с пружинным прижимом (рис. 2).

Для проведения тестовых экспериментов в качестве источника излучения был использован дуговой разряд с электродами из железа, рабочий ток 6 A. Электроды охлаждались водой и продувались потоком аргона при давлении 1 bar. Время экспозиции ПЗС-линейки составляло 3 s.

На рис. 3 представлен профиль спектральной линии Fe II $3d^64s^5D_{3/2}-3d^64p^4F_{3/2}$, $\lambda = 2250.175$ Å [4] вместе с вкладом от дифракции на апертуре решетки [5] и результатом моделирования аппаратной функции спектрометра с помощью программы Zemax. Видно, что разрешение спектрометра позволяет изучать спектральный профиль линий применяемой дуги, основной вклад в ширину которого вносит ударное уширение [6,7].

Была получена зависимость средней ширины спектральных линий *FWHM* от величины ширины входной щели. Результаты представлены на рис. 4, *a*. Каждая экспериментальная точка на графике получена усреднением по 10 спектральным линиям, выбранным равномерно по всему полученному спектру. Здесь же даются результаты расчета аппаратной ширины спектральных линий, полученные с помощью программы Zemax, которые характеризуют реальные возможности спектрометра.

Второй серией тестовых измерений явилось изучение зависимости регистрируемых ширин линий от величины апертуры решетки. Результаты представлены на рис. 4, *b*. Здесь можно видеть увеличение ширины линий при ограничении рабочего размера решетки менее 100 mm. Это связано с увеличением дифракционного вклада,

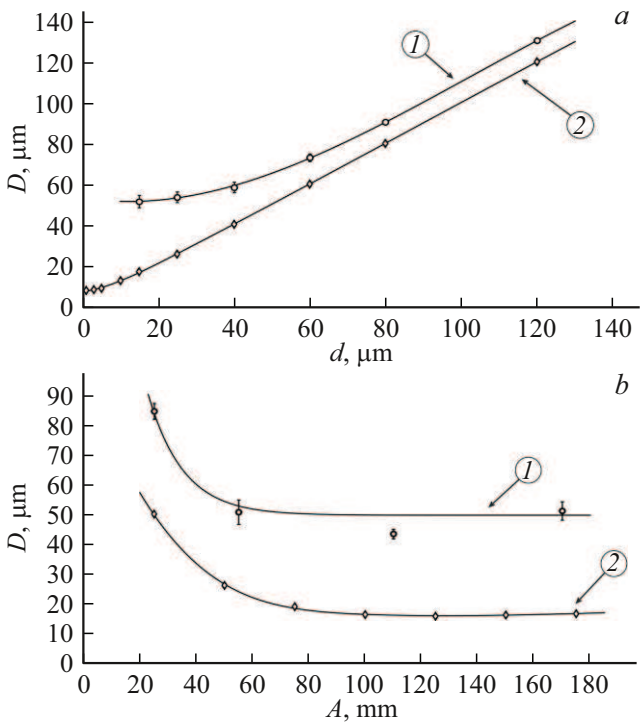


**Рис. 4.** (*a*) Зависимость ширин спектральных линий от ширины входной щели. *1* — экспериментальные данные (ошибка на уровне $3\sigma$), *2* — результат компьютерного моделирования с помощью программы Zemax. *D* — ширина наблюдаемых спектральных линий ($\mu$m), *d* — ширина входной щели спектрометра ($\mu$m). (*b*) Зависимость ширины спектральных линий от ширины рабочей области вогнутой дифракционной решетки. *1* — экспериментальные данные. Каждая точка усреднена по 12 измерениям, ошибка на уровне $3\sigma$, *2* — результат компьютерного моделирования с помощью программы Zemax. *D* — ширина наблюдаемых спектральных линий ($\mu$m), *A* — ширина рабочей области дифракционной решетки (mm). Ширина входной щели спектрометра в данной серии экспериментов $d = 15\,\mu$m.

что иллюстрируется расчетом с помощью программы Zemax. Некоторая немонотонность экспериментальных точек может быть отнесена к нестабильности условий дугового разряда.

## Сшивка соседних участков спектра

Как правило, ПЗС-матрицы и линейки обладают небольшим размером. Так, применяемая в настоящем случае линейка способна охватить спектральный участок размером 28 mm. Реальный размер спектрограмм, получаемых в спектральных системах, подобных описываемой, составляет величину в несколько десятков cm. Следовательно, как уже отмечалось, возникает необходимость сканирования спектра путем перемещения ПЗС-линейки касательно к окружности Роуланда. При этом полная спектрограмма составляется из отдельных фрагментов, которые должны быть „сшиты“ по длинам волн. В принципе такая задача может быть решена при использовании прецизионной системы позиционирования каретки с ПЗС-линейкой. В настоящей работе используется метод сшивки отдельных спектральных участков, основанный на анализе корреляционной функции перекрывающихся частей. Экспериментальная спектрограмма интерполируется сплайнами и затем численно строится корреляционная функция Γ для перекрытия спектрограмм $S_i(x)$ и $S_{i+1}(x)$:

$$\Gamma_{i,i+1}(\Delta x) = \int S_i(x) S_{i+1}(x + \Delta x) dx. \qquad (1)$$

Была произведена процедура сшивки 5 спектрограмм: на рис. 5 представлена область перекрытия первой и второй спектрограмм, а на рис. 6 дана соответствующая функция корреляции, нормированная на максимум.

Положение $\Delta x_{\max}$ определяет величину относительного сдвига соседних спектрограмм, что позволяет установить единую координатную шкалу для всех полученных спектрограмм. Для анализа точности описанной процедуры сшивки были проведены 6 независимых сшивок по 5 спектрограмм в каждой. Среднеквадратичное

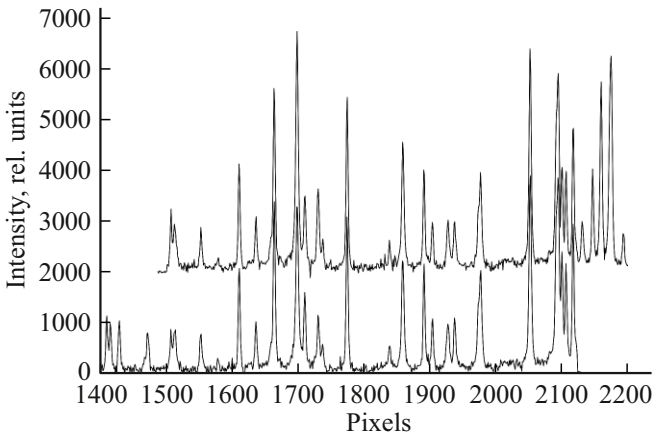


**Рис. 5.** Область перекрытия сшиваемых спектрограмм.

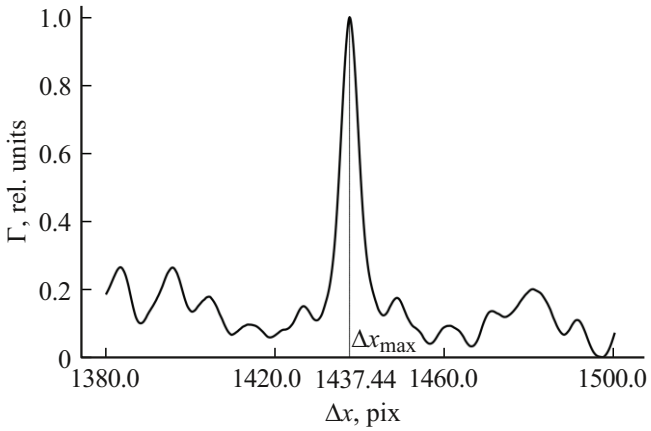


**Рис. 6.** Функция корреляции сшиваемых на рис. 5 спектрограмм.

отклонение разности положений крайних спектральных линий, расстояние между которыми составило величину 120.1 mm, оказалось равным 1.2 $\mu$m. Полная спектрограмма была прокалибрована по длинам волн согласно данным [4], точность калибровки составила величину 0.01 Å в диапазоне 2130–2270 Å.

## Выделение лоренцева вклада в спектральный профиль отдельной линии

Профиль спектральной линии, регистрируемой любой спектральной системой, определяется несколькими вкладами. Помимо вклада аппаратной функции, для систем с высоким спектральным разрешением существенными становятся вклады, связанные с уширением в плазме, а также естественная ширина. Все вклады в уширение спектральной линии можно разделить на две группы — вклады с быстро спадающими крыльями (доплеровский, щелевой аппаратный) и вклады с лорецевыми крыльями (естественный, ударное уширение). В работе [8] предложена идея выделения лоренцева вклада, основанная на измерении интегральной относительной интенсивности крыльев спектральной линии. Если форма спектральной линии $S(\lambda, \lambda_0)$ является лоренцевой с $FWHM = \gamma$ ($\lambda$ — текущая длина волны, $\lambda_0$ — центр спектральной линии), то зависимость относительной интегральной интенсивности крыльев $R(\delta\lambda)$, определенной как

$$R(\delta\lambda, \lambda_0) = \frac{\int_{-\infty}^{\lambda_0 - \delta\lambda} S(\lambda, \lambda_0) d\lambda + \int_{\lambda_0 + \delta\lambda}^{\infty} S(\lambda, \lambda_0) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda, \lambda_0) d\lambda}, \qquad (2)$$

имеет асимптотику

$$R(\delta\lambda, \lambda_0)_{\delta\lambda \to \infty} \to \frac{\gamma}{\pi \delta\lambda},$$

что легко показать прямым вычислением, результаты которого демонстрируются на рис. 7.

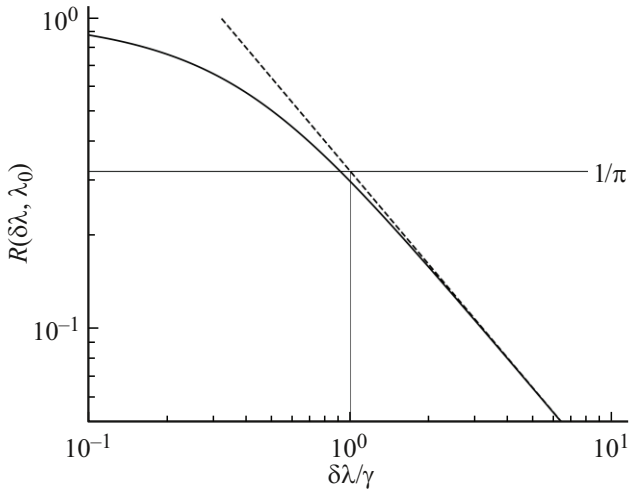


**Рис. 7.** Относительная интегральная интенсивность в крыльях лоренцева профиля.

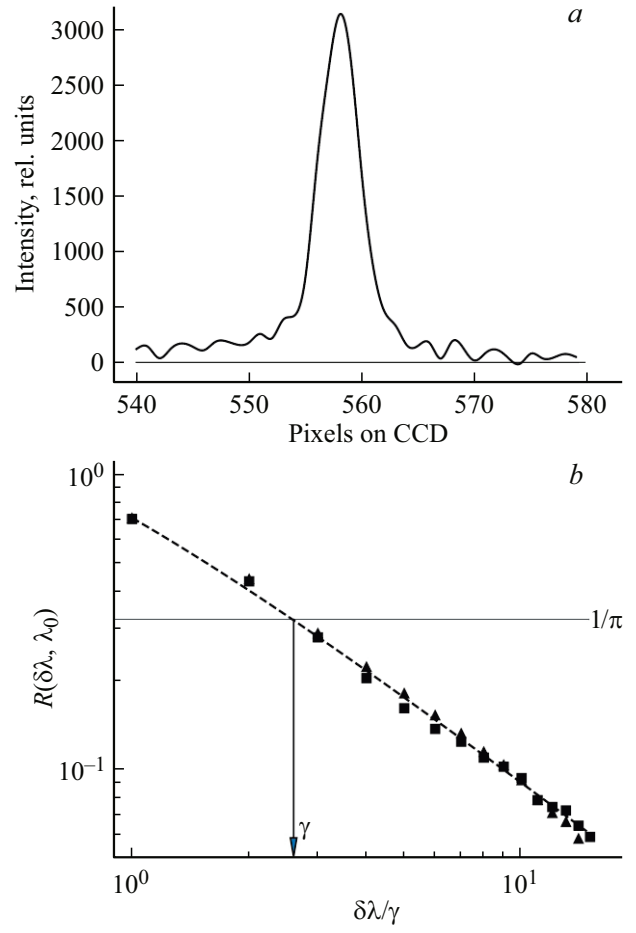


**Рис. 8.** (*a*) Спектральная линия Fe I $3d^6 4s^2\,{}^5D - 3d^6 4s 4p\,{}^3F^o$, $\lambda = 2132.017$ Å. (*b*) Асимптотика относительной интегральной интенсивности крыльев, треугольники — правое крыло, квадраты — левое крыло.

В работе [8] утверждается, что асимптотика интегральной интенсивности крыльев спектральной линии не изменяется, если лоренцев контур сворачивается с любым другим контуром, обладающим быстро спадающими крыльями. Это свойство было применено к анализу профиля спектральных линий, полученных с помощью ПЗС-регистрации спектров на 6.65 метровом спектрометре. На рис. 8 приведен пример обработки спектральной линии Fe I $3d^6 4s^2\,{}^5D - 3d^6 4s 4p\,{}^3F^o$, $\lambda = 2132.017$ Å. Алгоритм обработки включает учет реального интегрирования в конечных пределах, а также фитинг уровня фона.

Полная ширина на полувысоте данной линии составляет 3.77 пикселя ($53\,\mu$m), измеренный лоренцев вклад составляет 2.63 пикселя ($37\,\mu$m). Для различных линий величина лоренцева вклада меняется в пределах 2–3 пикселя. Поскольку применяемая дуга горит при атмосферном давлении, то основным механизмом, дающим лоренцев вклад, является ударное уширение [6]. Доплеровский вклад составляет величину порядка одного пикселя. Таким образом, вклад аппаратной функции в наблюдаемый профиль мал по сравнению с шириной линии, что соответствует результату, приведенному на рис. 3.

## Заключение

В настоящей работе описан вариант применения ПЗС-линейки для регистрации спектров, получаемых с помощью уникального 6.65 метрового спектрометра. Предложенная методика позволяет продолжить с его помощью работы по изучению спектров многозарядных ионов в ВУФ диапазоне. Одной из задач, решенных в рамках этой методики, является формирование обзорного спектра с помощью ПЗС-линейки, которая обладает относительно небольшим размером (28 mm). В общем случае для решения этой задачи необходимо сканирование спектра путем механического перемещения линейки касательно к окружности Роуланда с прецизионным контролем ее положения (с точностью порядка $1\,\mu$m). Для случая плотного спектра возможно осуществить сшивку отдельных спектральных участков с помощью анализа корреляционной функции их пересекающихся участков.

В работе также сообщается о возможности выделения лоренцева вклада в наблюдаемый профиль одиночной линии путем анализа распределения интенсивности в ее крыльях, что позволяет изучать ударное уширение спектральных линий.

В работах по исследованию энергетической структуры многозарядных ионов важным моментом является использование адекватных источников излучения. Так, дуга при атмосферном давлении дает относительно широкие линии, что ограничивает точность измерений. Возможным источником излучения, дающим узкие спектральные линии в ВУФ диапазоне, может стать плазменно-пучковый разряд [9]. Его применение входит в планы дальнейших работ на уникальном спектрометре.

### Благодарности

Авторы глубоко признательны А.Н. Рябцеву и Э.Я. Кононову, трудами которых был создан уникальный комплекс 6.65 метрового спектрометра, за их поддержку и помощь в настоящей работе.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Госзадания FFUU-2025-0005.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

[1] M. Ding, A.N. Ryabtsev, E.Y. Kononov, F. Concepcion, T. Ryabchikova, J.C. Pickering. Astronomy & Astrophysics, **684**, A149 (2024). DOI: 10.1051/0004-6361/202348794
[2] S.S. Churilov, A.N. Ryabtsev, J.-F. Wyart. Physica Scripta, **38** (3), 326 (1988).
[3] A.N. Ryabtsev, E.Ya. Kononov. JQSRT, **226**, 51 (2019). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.01.012
[4] A. Kramida, Yu. Ralchenko. J. Reader and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (version 5.12). [Электронный ресурс]. URL: https://physics.nist.gov/asd DOI: 10.18434/T4W30F
[5] В.И. Малышев. *Введение в экспериментальную спектроскопию* (Наука, М., 1979).
[6] М.А. Мазинг, Л.С. Мандельштам. ЖЭТФ, **36** (4), 1329 (1959).
[7] Г. Грим. *Уширение спектральных линий в плазме* (Мир, М., 1978).
[8] P.S. Antsiferov. JQSRT, **55** (1), 149 (1996). DOI: 10.1016/0022-4073(96)81784-5
[9] Л.В. Степанов, П.С. Анциферов, Н.Д. Матюхин. ЖТФ, **95** (7), 1297 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60651.463-24