

## РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ИОГАННА

© 2024 г. Е. О. Баронова\*

РНИЦ “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: baronova04@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Представлен подробный анализ режимов работы спектрометров Иоганна для точечного и протяженного источников. Эксперименты по определению параметров плазмы рекомендуется проводить по относительным интенсивностям рентгеновских линий. Анализ направлен на совершенствование методов рентгеновской спектроскопии.

*Ключевые слова:* диагностика плазмы, рентгеновская спектроскопия, фокусирующие спектрометры.

**DOI:** 10.56304/S2079562923030065

### ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская спектроскопия — эффективный инструмент изучения параметров плотной высокотемпературной плазмы. Предоставляя разностороннюю информацию, такой метод является не инвазивным и во многих случаях требует использования относительно дешевых и простых приборов. Соответствующие теоретические подходы, созданные за полвека, постоянно развиваются и в настоящее время. Относительные интенсивности теоретически выбранных рентгеновских линий используются для определения электронной температуры и электронной плотности плазмы, а форма линий содержит информацию об электромагнитных полях. Наличие множества экзотических рентгеновских диагностических линий в непосредственной близости друг от друга требует спектрального разрешения  $\delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$ . Фокусирующие спектрометры высо-

кого разрешения, широко используемые для регистрации рентгеновских спектров, основаны на схеме Иоганна [1], которая изначально предназначалась для работы с решетками. Внедрение рентгеновско-изогнутых кристаллов позволило использовать эти устройства в рентгеновской спектроскопии. Однако, для корректной интерпретации результатов каждого конкретного эксперимента требуется учет особенностей его геометрии. Некоторые из этих особенностей кратно обсуждаются в данной статье для случаев точечных и протяженных источников.

### РАБОТА СПЕКТРОМЕТРОВ ИОГАННА

Рисунок 1 показывает оптическую схему работы спектрометра Иоганна для случаев различного расположения точечного источника по отношению к кругу Роуланда. На рис. 1а точечный источник расположен на круге Роуланда, и, согласно

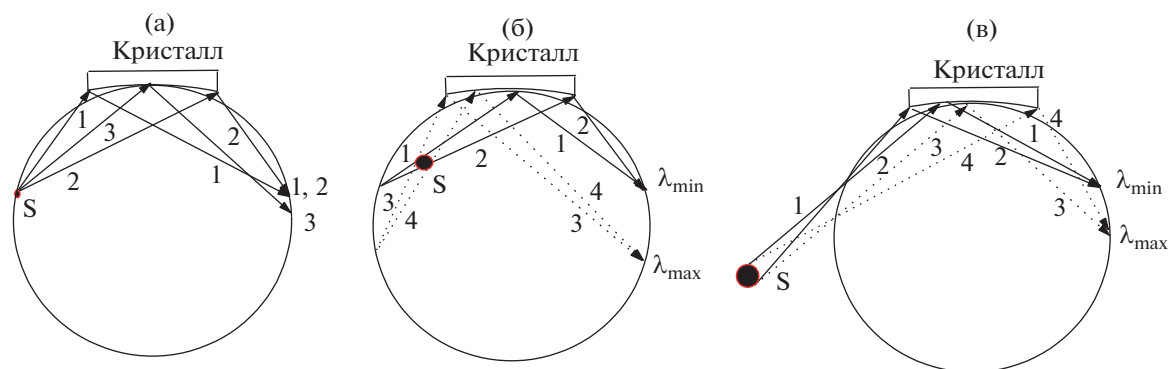


Рис. 1. Работа прибора Иоганна, точечный источник.

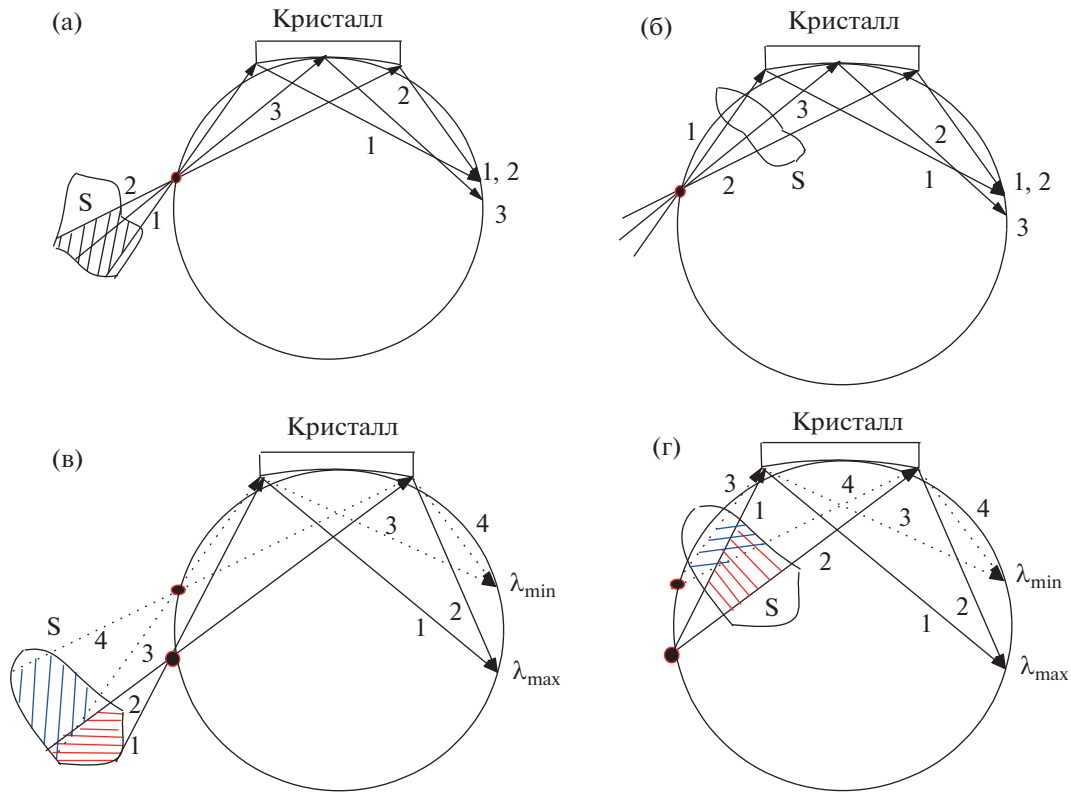


Рис. 2. Работа прибора Иоганна в случае протяженного кристалла.

геометрии Иоганна, спектрометр работает как монохроматор, только одна длина волны отражается —  $\lambda_m$ , которая удовлетворяет соотношению Брэгга для лучей 1, 2, 3, отраженных от кристалла под углом  $\theta_m$ . В этой геометрии светосила прибора достаточно высока, так как вся поверхность кристалла отражает данную линию  $\lambda_m$ .

Лучи 1 и 2 отражаются от кристалла и пересекаются в одной и той же точке на круге Роуланда, в то время как луч 3 пересекает круг Роуланда ниже этой точки. Расстояние между точкой пересечения луча 3 и лучей 1, 2 с правой стороны круга Роуланда соответствует оптической компоненте уширения рентгеновской линии ( $\delta x_{opt}$ ), измеряемой сферическими aberrациями от полной поверхности кристалла. В этом режиме работы присутствует также и дифракционное уширение ( $\delta\theta_{dif}$ ), так что ширина рентгеновской линии больше, чем расстояние между точками 1, 2 и 3 на правой стороне круга Роуланда. Дифракционное уширение не показано на рисунке для простоты.

Однако, расположение источника на круге Роуланда является достаточно экзотическим случаем. Обычно источник находится на некотором расстоянии внутри или вне круга Роуланда, как это указано на рис. 1б, 1в. Рисунки 1б, 1в свидетельствуют, что длина волны  $\lambda_{min}$  отражается ча-

стью кристалла, заключенной между лучами 1 и 2, в то время как длина волны  $\lambda_{max}$  отражается частью кристалла ограниченной лучами 3 и 4. Очевидно, что  $\lambda_{min}$  и  $\lambda_{max}$  отражаются различными областями кристалла. В диагностике плазмы, основанной на анализе относительных интенсивностей рентгеновских линий, традиционно предполагается, что кристаллы отражают излучение однородно вдоль поверхности, и, таким образом, коэффициенты отражения для двух различных рентгеновских линий одинаковы. Однако, это не выполняется для изогнутых кристаллов [2], и, кроме того, это не всегда справедливо даже для плоских образцов [3].

Отметим некоторые основные особенности, следующие из рис. 1б, 1в, и важные для диагностики плазмы: а) регистрируемый диапазон длин волн  $\Delta\lambda = (\lambda_{max} - \lambda_{min})$  зависит от длины кристалла и от расстояния между кристаллом и источником; б) только небольшая часть поверхности кристалла отражает выбранную спектральную линию, так что оптическая компонента уширения линии ( $\delta x_{opt}$ ) существенно меньше той, которая имеет место на рис. 1а; в) так как лишь небольшая часть кристалла отражает выбранную линию, и две различных линии отражаются различными областями кристалла, то необходимо исследовать локальный коэффициент отражения для данного кристалла.

Для данной длины волны и точечного источника, расположенного вдали от круга Роуланда, оптическое уширение зависит от размера работающей на отражение части кристалла, который определяется размером источника и расстоянием от источника до кристалла. На рис. 1б, 1в оптическое уширение ( $\delta\theta_{\text{opt}}$ ) и дифракционное уширение ( $\delta\theta_{\text{dif}}$ ) для  $\lambda_{\text{max}}$  и  $\lambda_{\text{min}}$  не показаны.

Рисунок 2 демонстрирует работу спектрометра Иоганна в случае регистрации спектров протяженных источников. На рис. 2а, 2б излучение с длиной волны  $\lambda_m$  эмитируется протяженным источником, расположенным внутри или вне круга Роуланда. В этом случае необходимо обратить внимание на следующие особенности: а) регистрируемые фотоны излучаются областью источника, ограниченной лучами 1 и 2; б) если размер источника превышает размер области, ограниченной лучами 1 и 2, то полная поверхность кристалла участвует в отражении излучения (в противном случае излучение отражается лишь частью кристалла); в) оптическое уширение линии ( $\delta\theta_{\text{opt}}$ ), аналогично случаю, указанному на рис. 1а, и измеряется абберациями с полной поверхности кристалла; г) дифракционное уширение линии ( $\delta\theta_{\text{dif}}$ ) также оценивается кривой отражения зарегистрированной с полной поверхности кристалла.

Рисунок 2в, 2г демонстрирует регистрацию диапазона длин волн  $\Delta\lambda = (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})$  для случая протяженного источника, расположенного внутри или вне круга Роуланда. Основные особенности регистрации спектров в этой геометрии таковы: а) каждая длина волны отражается полной поверхностью кристалла, так что необходимо знать усредненный коэффициент отражения и оптические абберации с полной поверхности кристалла; б) оптическая компонента уширения любой ли-

нии, принадлежащей интервалу ( $\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}$ ), превышает оптическую компоненту уширения, указанную на рис. 1б, 1в; в) каждая длина волны регистрируется из определенной области источника, так что, например,  $\lambda_{\text{max}}$  и  $\lambda_{\text{min}}$  регистрируются из различных его областей, перекрытие которых зависит от размеров кристалла и источника, значений этих длин волн и геометрии эксперимента.

## ВЫВОДЫ

Приведенный анализ необходимо принимать во внимание при интерпретации относительных интенсивностей линий, зарегистрированных в любом эксперименте. Очевидно, что оценка параметров плазмы является более или менее корректной, если рассматриваемые линии регистрируются из одной и той же области плазмы, используется адекватная модель для их интерпретации, весь тракт спектрометра прокалиброван, и т.д. Например, для ситуации, указанной на рис. 1б, 1в, необходимо знать локальные коэффициенты отражения кристалла, в то время как для геометрии эксперимента, указанной на рис. 2в, 2г, необходимо измерить коэффициенты отражения с полной поверхности кристалла. В случае протяженного источника (токамак) необходимо принимать во внимание степень перекрытия областей, излучающих рассматриваемые диагностические линии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Johann H. H.* // *Z. Phys.* 1931. V. 69. P. 185.
2. *Lider V.V., Baronova E.O., Stepanenko M.M.* // *Crystallogr. Rep.* V. 46 (3). P. 341.
3. *Pereira N.R. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. V. 86 (10). P. 103704.

## Operation Modes of Johann Spectrometers

E. O. Baronova\*

*National Research Centre "Kurchatov institute", Moscow, 123182 Russia*

\*e-mail: baronova04@mail.ru

Received March 3, 2023; revised May 11, 2023; accepted May 15, 2023

**Abstract**—A detailed analysis of regimes of operation of Johann spectrometers is presented for the point-like and extended sources. It is recommended for the experiments on determination of plasma parameters to be carried out from relative intensities of X-ray lines. The analysis is aimed at improving X-ray spectroscopy methods.

**Keywords:** plasma diagnostics, X-ray spectroscopy, focusing spectrometers