



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01J 3/10 (2018.05)

(21)(22) Заявка: 2017125698, 18.07.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.07.2017

Дата регистрации:
19.07.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.07.2017

(45) Опубликовано: 19.07.2018 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

115551, Москва, Шипиловский пр-д, 45, к. 1, кв.
117, Христофорову О.Б.

(72) Автор(ы):

Абраменко Дмитрий Борисович (RU),
Кривцун Владимир Михайлович (RU),
Шевелько Александр Петрович (RU),
Якушев Олег Феликсович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"РнД-ИСАН" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2593423 C1, 10.08.2016. US
7485869 B2, 03.02.2009. US 4241999 A,
30.12.1980. US 2006146344 A1, 06.07.2006.

(54) КОМПАКТНЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ВУФ СПЕКТРОМЕТР

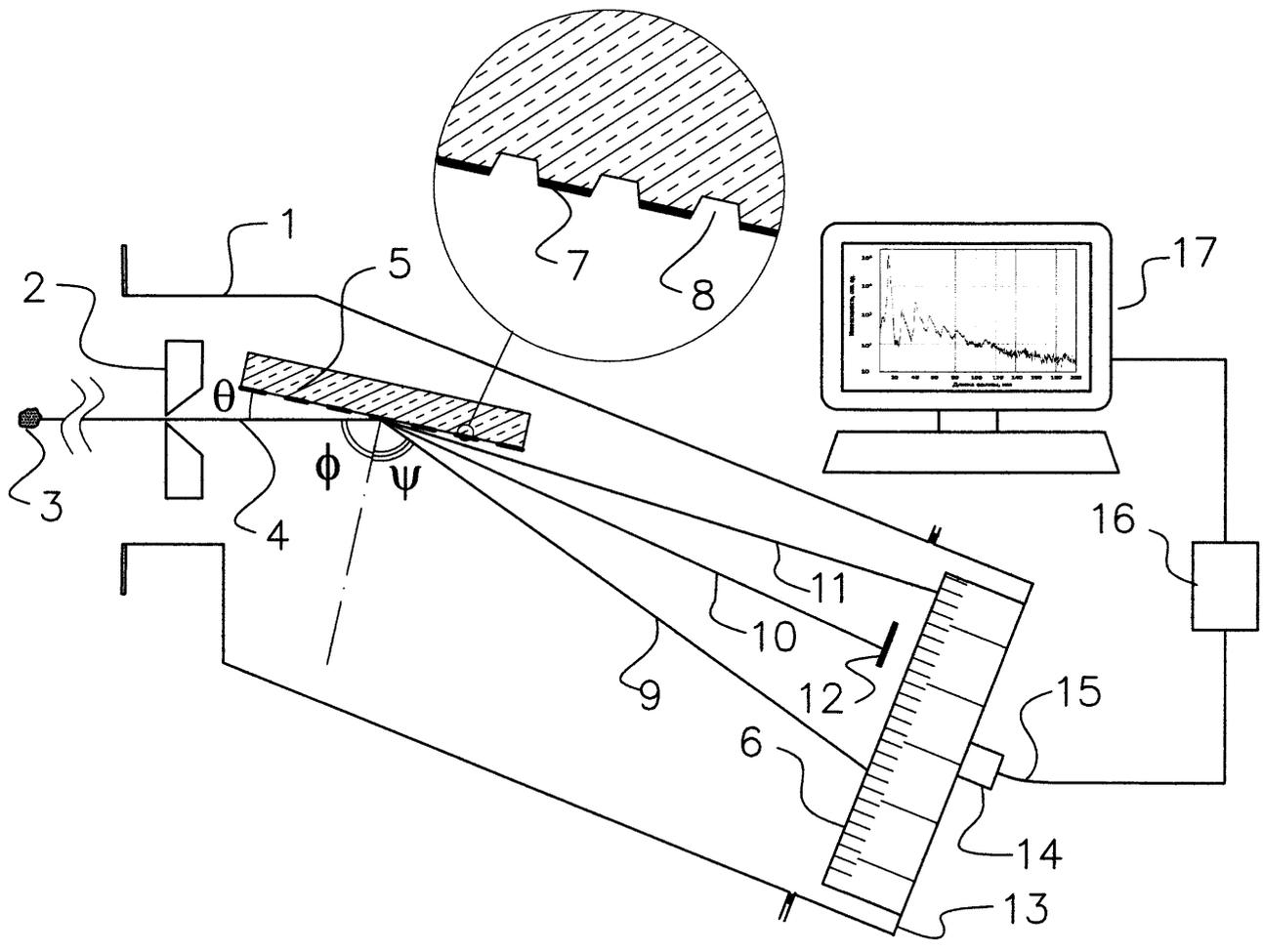
(57) Реферат:

Изобретение относится к области аналитического приборостроения и касается компактного широкодиапазонного спектрометра вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и мягкого рентгеновского (МР) диапазона. Спектрометр скользящего падения состоит из корпуса с входной щелью, дифракционной решетки и детектора. Дифракционная решетка с постоянным периодом d имеет плоские отражающие рабочие грани, лежащие в плоскости решетки, и не отражающие свет углубления между рабочими гранями. Детектор обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в плюс первом и в минус первом порядке дифракции, причем длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз меньше длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области

спектра минус первого порядка: $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, а спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ в рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз больше спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ в рабочей области спектра минус первого порядка: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$. Техническим результатом изобретения является регистрация спектра в широком спектральном диапазоне (3-200 нм), с умеренным спектральным разрешением $(\lambda/\delta\lambda \sim 15-30)$ и со значительно более высоким спектральным разрешением $(\lambda/\delta\lambda \sim 100-200)$ в узком мягком рентгеновском или экстремальном ультрафиолетовом диапазоне с возможностью измерения абсолютного выхода излучения в этих областях спектра, а также уменьшение размеров спектрометра. 2 н. и 19 з.п. ф-лы, 6 ил.

RU 2 661 742 C1

RU 2 661 742 C1



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01J 3/10 (2018.05)

(21)(22) Application: **2017125698, 18.07.2017**

(24) Effective date for property rights:
18.07.2017

Registration date:
19.07.2018

Priority:

(22) Date of filing: **18.07.2017**

(45) Date of publication: **19.07.2018** Bull. № 20

Mail address:

**115551, Moskva, Shipilovskij pr-d, 45, k. 1, kv. 117,
Khristoforovu O.B.**

(72) Inventor(s):

**Abramenko Dmitrij Borisovich (RU),
Krivtun Vladimir Mikhajlovich (RU),
Shevelko Aleksandr Petrovich (RU),
Yakushev Oleg Feliksovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu
"RnD-ISAN" (RU)**

(54) **COMPACT WIDE RANGE VUV SPECTROMETER**

(57) Abstract:

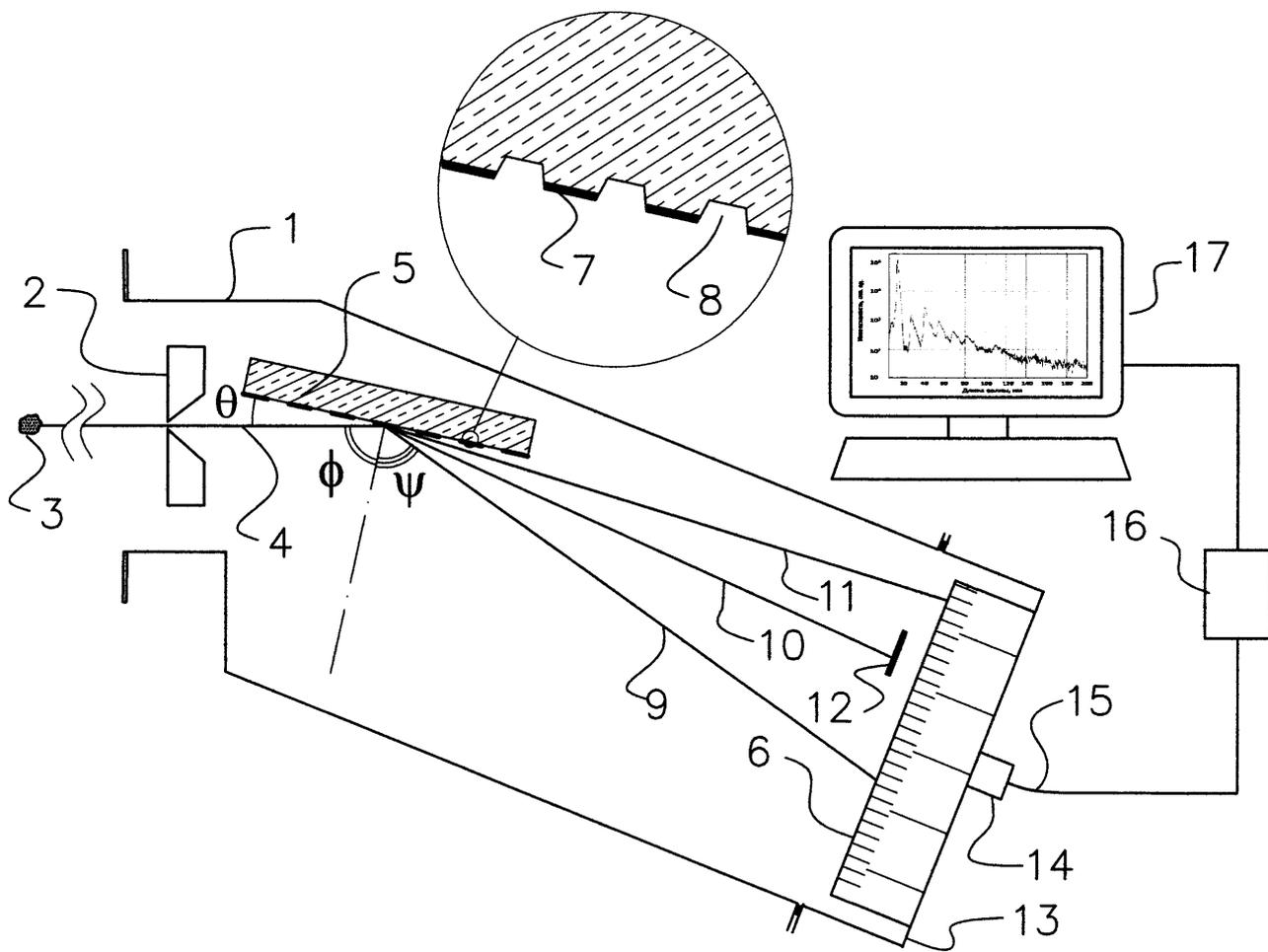
FIELD: instrument engineering.

SUBSTANCE: invention relates to analytical instrumentation and concerns a compact wide-range vacuum ultraviolet (VUV) spectrometer of a soft X-ray (SX) range. Spectrometer consists of a body with a slit, remote radiation source, diffraction grating and a detector. Radiation source illuminates the diffraction grating at a sliding angle θ . Diffraction grating with a constant period d has planar reflecting active faces, which lies in the plane of the grating and does not reflect the light of the depression between the active faces. Detector provides registration of a VUV spectrum in plus first and in minus first diffraction order, a long-wavelength line λ_{+1} of the spectrum working region of plus the first order is many times smaller than the long-

wavelength line λ_{-1} of this spectrum working region of minus the first order: $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, and the spectral resolution $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ in the spectrum working region of plus the first order is many times greater than the spectral resolution $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ in the spectrum working region of minus the first order: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$.

EFFECT: technical result of the invention is the detection of the spectrum in a wide spectral range (3–200 nm), with a moderate spectral resolution $(\lambda/\delta\lambda \sim 15-30)$ and with a much higher spectral resolution $(\lambda/\delta\lambda \sim 200)$ in a narrow soft x-ray or extreme ultraviolet range, it is possible to measure the absolute radiation yield in these spectral regions and to reduce the dimensions of the spectrometer.

21 cl, 6 dwg



Фиг. 1

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Изобретения относится к аналитическому приборостроению, а именно к компактным спектрометрам, предназначенным для измерения спектра вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения.

5 ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Спектроскопия ВУФ диапазона является одним из наиболее эффективных методов диагностики плазмы, применяемым в исследованиях горячей термоядерной плазмы, активной среды рентгеновских лазеров, астрофизической плазмы. Спектроскопия в экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне актуальна в связи с разработкой
10 литографических источников ЭУФ излучения на основе высокотемпературной плазмы для крупномасштабного производства интегральных схем нового поколения.

Для ВУФ диапазона находят применение спектрометры, в которых используются фазовые отражательные дифракционные решетки со скользящим падением луча. Обычно применяют вогнутые нарезные стеклянные дифракционные решетки, покрытые золотом
15 или вольфрамом. Сферические решетки более просты по сравнению с тороидальными, позволяющими повысить светосилу и улучшить пространственное разрешение. Угол скольжения составляет 1-10°.

Из [1] известен спектрометр для мягкого рентгеновского и ВУФ диапазона, содержащий расположенные на окружности Роуланда входную щель, вогнутую фазовую
20 дифракционную решетку скользящего падения и детектор. Спектрометр выполнен по схеме, близкой к Роуландовской, отличие состоит только в том, что поверхность регистрации плоская, а не изогнутая по окружности Роуланда, как это требуется для обеспечения широкой спектральной области регистрации, Спектрометр характеризуется достаточно высоким спектральным разрешением. Однако, из-за ограниченной
25 спектральной области регистрации в [1] потребовалось применение нескольких спектрометров, что значительно усложняет проведение измерений. Кроме этого, для ряда детекторов, например, использующих микроканальные пластины (МКП) их освещение при скользящем падении значительно снижает квантовую эффективность детектора, вместе с тем резко повышая уровень шума.

Частично этих недостатков лишен известный из [2] спектрометр с входной щелью,
30 амплитудной щелевой дифракционной решеткой, оптическим детектором на основе цифровой ПЗС камеры с задней подсветкой, предназначенный для регистрации в первом или минус первом порядке спектров ВУФ излучения. Ключевой чертой спектрометра является использование амплитудной решетки с отношением пропускающей и не
35 пропускающей частот 1:1, что обеспечивает подавление всех четных порядков спектра и существенное уменьшение интенсивностей излучения в нечетных высших порядках дифракции. Спектрометр характеризуется широким спектральным диапазоном, высокими светосилой и спектральным разрешением, а также компактностью. Эффективность амплитудной решетки можно рассчитать теоретически, что при
40 использовании абсолютно калиброванного оптического детектора позволяет проводить абсолютные измерения в достаточно широком диапазоне спектра.

Однако решетка на пропускание дорога, хрупка, подвержена осаждению загрязнений, что со временем может ухудшать структуру решетки и качество регистрируемого
45 спектрального изображения, снижая надежность прибора. Кроме этого, для диапазона длинных волн ($\lambda \geq 100$ нм) возникают большие трудности с расчетом пропускающей щелевой решетки, и оно становится неопределенным, ограничивая спектральный диапазон для абсолютных измерений.

Этих недостатков лишен известный из [3] компактный спектрометр для мягкого

рентгеновского и ВУФ диапазона, выполненный по схеме с "внероуландовской" регистрацией спектра. Спектрометр содержит входную щель, расположенную на окружности Роуланда, вогнутую дифракционную решетку скользящего падения и регистратор изображения, входная поверхность которого пересекает окружность Роуланда под углом, близким к нормальному. При этом регистрация спектра осуществляется в плоскости, перпендикулярной дифрагированным лучам, что определяет удобство и простоту использования спектрометра с различными типами детекторов. Достоинством спектрометра является его компактность, простота эксплуатации и высокая надежность.

Однако в указанной геометрии внероуландовского спектрометра идеальная фокусировка дифрагированного излучения имеет место только в одной точке - точке пересечения плоскости регистрации с кругом Роуланда, а с удалением от этой точки происходит падение спектральной разрешающей силы из-за дефокусировки. В результате регистрируемый спектральный диапазон достаточно узок, а спектральное разрешение достаточно низкое.

Этого недостатка частично лишен известный из [4] компактный ВУФ спектрометр, содержащий вогнутую дифракционную решетку скользящего падения, в котором входная щель расположена внутри окружности Роуланда, а поверхность оптического детектора, на которой формируется спектр, дважды пересекает поверхность фокусировки спектральных линий, соответствующую положению входной щели, смещенной с окружности Роуланда, В спектрометре достигается расширение регистрируемого диапазона ВУФ спектра, длинноволновая граница которого достигает около 50 нм.

Однако для ряда применений требуются измерения в более широком диапазоне ВУФ спектра. Так, при регистрации излучения литографических ЭУФ источников, желательны измерения, как вблизи рабочей длины волны источника, $\lambda=13,5$ нм, так и в как можно более широком ВУФ диапазоне с возможностью измерения абсолютного выхода излучения в различных областях спектра.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В основу изобретения положена задача усовершенствования компактного спектрометра за счет расширения диапазона регистрации ВУФ спектра и обеспечения возможности измерений абсолютных интенсивностей в спектре.

Техническим результатом изобретения является регистрация спектра одновременно в очень широком спектральном диапазоне (3-200 нм) с умеренным спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda\sim 15-30$) и со значительно более высоким спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda\sim 200$) в узком МР или ЭУФ диапазоне, например, около $\lambda=13,5$ нм. При этом обеспечивается возможность измерения абсолютного выхода излучения в этих областях спектра, достигается дальнейшее уменьшение размеров спектрометра.

Выполнение поставленной задачи реализуется с помощью предлагаемого спектрометра, содержащего расположенные в корпусе входную щель, которая освещается удаленным источником излучения и выделяет пучок излучения, освещающий под углом скольжения θ дифракционную решетку с постоянным периодом d , и детектор.

Отличие спектрометра состоит в том, что дифракционная решетка выполнена плоской, рельефной, с плоскими отражающими рабочими гранями, лежащими в плоскости решетки, и не отражающими свет углублениями между рабочими гранями, при этом детектор обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в минус первом порядке дифракции.

Предпочтительно рабочая область спектра находится в диапазоне от 5 до 200 нм.

Предпочтительно ширина рабочих граней дифракционной решетки равна $d/2$ -половине периода дифракционной решетки.

Предпочтительно глубина углублений между рабочими гранями решетки превышает $d/4 \sin \theta$.

5 Предпочтительно дифракционная решетка имеет профиль углублений между рабочими гранями либо прямоугольный, либо трапецеидальный.

Предпочтительно дифракционная решетки расположена максимально близко к входной щели.

10 Предпочтительно угловой размер источника излучения, определяемый отношением его характерного размера a к его удаленности A от входной щели, не превышает 10^{-3} рад: $a/A \leq 10^{-3}$ рад.

Предпочтительно угол скольжения θ находится в диапазоне от 4 до 6 градусов.

Предпочтительно детектор является многоэлементным.

15 Предпочтительно спектрометр имеет калибровку спектральной чувствительности.

В вариантах изобретения двухкоординатным детектором и освещением входной щели через установленную между ней и источником излучения дополнительную щель, параллельную плоскости дисперсии.

20 Предпочтительно край детектора определяет длинноволновую границу λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка.

Предпочтительно корпус выполнен в виде быстросъемной части герметичного соединения.

25 Предпочтительно спектрометр имеет дополнительную регистрацию ВУФ спектра в плюс первом порядке дифракции, при этом длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз меньшей длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка, $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, а спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ в минус первом порядке дифракции во много раз больше спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ в минус первом порядке дифракции: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$.

30 Предпочтительно край детектора определяет длинноволновую границу λ_{+1} рабочей области спектра в плюс первом порядке.

Предпочтительно детектор установлен по отношению к дифракционной решетке так, что угол дифракции в направлении на край детектора не больше 90° .

35 В вариантах изобретения угол скольжения θ выбран так, что соответствующая углу дифракции $\psi=90^\circ$ длина волны отсечки λ_{co} больше длины волны ЭУФ литографии 13,5 нм: $\lambda_{co} > 13,5$ нм, и рабочая область спектра плюс первого порядка включает в себя длину волны 13,5 нм: $\lambda_{+1} > 13,5$ нм.

40 В вариантах изобретения рабочая область спектра плюс первого порядка включает в себя длину волны 13,5 нм и длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка близка к длине волны 13,5 нм: $0 < (\lambda_{+1} - 13,5 \text{ нм}) \ll 13,5 \text{ нм}$.

В вариантах изобретения перед детектором установлен затвор, блокирующий излучение в нулевом порядке дифракции.

45 Предпочтительно спектрометр снабжен программным обеспечением, обеспечивающим сбор, обработку, отображение и хранение данных спектральных измерений в плюс первом и минус первом порядках дифракции.

В другом аспекте изобретение относится к компактному широкодиапазонному ВУФ спектрометру скользящего падения с расположенными в корпусе входной щелью, освещаемой удаленным источником излучения и выделяющей пучок излучения,

освещающий под углом скольжения θ дифракционную решетку с постоянным периодом d , и детектором излучения. Отличие спектрометра состоит в том, что дифракционная решетка выполнена плоской, рельефной, с плоскими отражающими рабочими гранями, лежащими в плоскости решетки, и не отражающими свет углублениями между рабочими гранями; детектор излучения обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в плюс первом порядке дифракции и в минус первом порядке дифракции, причем длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз меньше длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка: $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, а спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ в рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз больше спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ в рабочей области спектра минус первого порядка: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$.

Между совокупностью существенных признаков заявляемого объекта и достигаемым техническим результатом существуют следующие причинно-следственные связи.

При выполнении в предложенном виде спектрометр позволяет регистрировать спектры в минус первом порядке дифракции в очень широком спектральном диапазоне ($5 \div 200$ нм).

Плоская дифракционная решетка с плоскими отражающими рабочими гранями, лежащими в плоскости решетки, и не отражающими свет углублениями между рабочими граням является более прочной и надежной по сравнению с решеткой на пропускание, а также более доступной, простой и дешевой, поскольку для ее производства требуется менее половины технологического процесса изготовления решеток на пропускание [5].

Использование плоской амплитудной отражающей решетки с шириной рабочих граней равной $d/2$ позволяет устранить все четные порядки дифракции и обеспечивает глубокое подавление более высоких нечетных порядков, обеспечивая измерения с высоким уровнем сигнала и низким уровнем шума. Этому также способствует установка перед детектором излучения затвора, блокирующего излучение в нулевом порядке дифракции.

Геометрия такой решетки позволяет надежно рассчитать коэффициент ее отражения для различных длин волн. Наряду с использованием абсолютно калиброванного оптического детектора это позволяет проводить абсолютные или количественные измерения в широком спектральном диапазоне, в частности, определять эффективность ЭУФ источников и энергетический баланс их излучения в различных спектральных диапазонах. В соответствии с этим в предпочтительных вариантах реализации изобретения спектрометр имеет калибровку спектральной чувствительности.

Освещение плоской амплитудной отражающей решетки с углом скольжения θ в диапазоне от 4 до 6 градусов обеспечивает достижение оптимально высоких значений коэффициента отражения дифракционной решетки, ее заполнения пучком излучения и разрешающей силы $\lambda/\delta\lambda$ спектрометра.

Оптимизация разрешающей силы $\lambda/\delta\lambda$ спектрометра также достигается за счет малого, $\leq 10^{-3}$ рад, углового размера источника излучения и размещения дифракционной решетки максимально близко к входной щели. Последнее также способствует минимизации габаритных размеров спектрометра, характеризующегося чрезвычайно компактной конструкцией.

Использование многоэлементного оптического детектора, в частности ПЗС-детектора, позволяет иметь высокую чувствительность, высокую стабильность измерений и возможность калибровки для количественных измерений.

В варианте спектрометра с двухкоординатным детектором и дополнительной щелью,

параллельной плоскости дифракции, дополнительно обеспечивается регистрация размера источника излучения в различных диапазонах ВУФ спектра с высоким пространственным разрешением.

Наряду с регистрацией спектра в минус первом порядке дифракции в очень широком спектральном диапазоне (5÷200 нм) с умеренным разрешением ($\lambda/\delta\lambda \sim 15-30$) спектрометр позволяет одновременно регистрировать в плюс первом порядке дифракции в более узком спектральном диапазоне, например, 5-15 нм с достаточно высоким спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda \sim 100 \div 150$).

Спектрометр позволяет производить измерение спектральных и энергетических параметров литографических источников ЭУФ излучения одновременно вблизи длины волны ЭУФ литографии 13,5 нм и вне ее в широком спектральном диапазоне.

Установка затвора защищает детектор от чрезмерной засветки области нулевого порядка дифракции, обеспечивая работу детектора в номинальном режиме.

Программное обеспечение обеспечивает удобство измерений, в том числе, в двух спектральных диапазонах.

Конструкция спектрометра обеспечивает его чрезвычайную компактность, удобство установки и эксплуатации.

Вышеупомянутые и другие особенности и преимущества изобретения станут более очевидными из последующего описания и формулы изобретения.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Существо изобретений поясняется прилагаемыми чертежами, на которых:

Фиг. 1 - схематичное изображение широкополосного ВУФ спектрометра в соответствии с настоящим изобретением,

Фиг. 2 - спектр лазерной Sn- плазмы в ВУФ диапазоне 6-200 нм,

Фиг. 3 - спектры лазерной Sn- плазмы в плюс первом и минус первом порядках дифракции с подавлением дифракции нулевого порядка,

Фиг. 4 - схема измерений с дополнительной щелью в плоскости дифракции для визуализации размера источника,

Фиг. 5 изображения спектров с пространственным разрешением в направлении, перпендикулярном направлению дифракции,

Фиг. 6 - фотография опытного образца спектрометра.

Данные чертежи не охватывают и, тем более, не ограничивают весь объем вариантов реализации данного технического решения, а являются лишь иллюстрирующими материалами частных случаев его выполнения.

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗОБРЕТЕНИЯ.

Данное описание служит для иллюстрации осуществления изобретения и ни в коей мере объема настоящего изобретения.

В соответствии с примером осуществления изобретения, иллюстрируемым Фиг. 1, компактный широкодиапазонный ВУФ спектрометр скользящего падения содержит расположенные в корпусе 1 входную щель 2, освещаемую удаленным источником излучения 3 и выделяющей пучок излучения 4, освещающий под углом скольжения θ дифракционную решетку 5 с постоянным периодом d , и детектор 6. Спектрометр характеризуется тем, что дифракционная решетка 5 выполнена плоской, рельефной, с плоскими отражающими рабочими гранями 7, лежащими в плоскости решетки 5, и не отражающими свет углублениями 8 между рабочими гранями 7, при этом детектор 6 обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в минус первом порядке дифракции.

Дифракционный порядок (-1) соответствует углам дифракции $\psi < \varphi$, где φ - угол падения, а дифракционный порядок (+1) соответствует углам дифракции $\psi > \varphi$. На Фиг.

1 лучи 9, 10 и 11 отражаются от дифракционной решетки 5 соответственно в минус первом, нулевом и плюс первом порядках дифракции.

Для предотвращения чрезмерной засветки части детектора 6 перед ним может быть установлен затвор 12, блокирующий излучение в нулевом порядке дифракции. При этом корпус 1 может быть снабжен наружным рычагом, позволяющим перемещать затвор в рабочее положение.

Детектор 6 предпочтительно расположен внутри корпуса детектора 13, который может представлять собой съемную часть вакуумируемого корпуса 1 спектрометра. Детектор через герметичный электрический ввод 14 с разъемом соединен кабелем 15 с блоком управления 16. В вариантах реализации устройства блок управления 16, может быть расположен внутри корпуса детектора 13. В свою очередь, блок управления 16 подключен через USB-кабель к персональному компьютеру (ПК) 17. Питание спектрометра осуществляется предпочтительно через USB-порт компьютера, а его работа - с помощью управляющей программы, также являющейся инструментом проведения различных анализов регистрируемых спектров.

Предпочтительно детектор 6 является многоэлементным. Для регистрации ВУФ спектров в качестве детектора может использоваться цифровая ПЗС камера с задней подсветкой, что позволяет иметь высокую чувствительность и возможность калибровки спектрометра для проведения количественных измерений.

В предпочтительных вариантах реализации изобретения ширина рабочих граней 7 дифракционной решетки равна $d/2$ - половине периода дифракционной решетки устраняет все четные порядки дифракции и обеспечивает глубокое подавление более высоких нечетных порядков.

Установка дифракционной решетки под скользящим углом устраняет рассеяние и отражение света углублениями 8 решетки. Для этого глубина углублений 8 между рабочими гранями 7 решетки превышает $d/4 \sin \theta$, что обеспечивает простую геометрию дифракционной решетки с отражением только от рабочих граней 7.

Все это обеспечивает измерения с высоким уровнем сигнала и низким уровнем шума.

Для упрощения дифракционная решетка имеет профиль углублений между рабочими гранями либо прямоугольный, либо трапециевидальный.

Амплитудная дифракционная решетка, выполненная в указанном виде является более прочной и надежной по сравнению с амплитудной решеткой на пропускание, а также более доступной и простой в изготовлении. Геометрия такой дифракционной решетки позволяет надежно рассчитать коэффициент ее отражения для различных длин волн, что наряду с использованием абсолютно калиброванного детектора позволяет проводить количественные измерения в широком спектральном диапазоне.

Спектральное разрешение $\delta\lambda$ определяется числом штрихов N дифракционной решетки, участвующих в дифракции, шириной изображения монохроматической линии в плоскости регистрации для точечного и протяженного источника и шириной аппаратной функции используемого детектора. В соответствии с изобретением эти факторы, определяющие результирующее значение спектрального разрешения, оптимизируются следующим образом.

Для оптимизации числа штрихов N , участвующих в дифракции, дифракционная решетка установлена так, что угол скольжения θ предпочтительно находится в диапазоне от 4 до 6 градусов. Это также позволяет повысить отражение дифракционной решетки в ВУФ диапазоне. При этом углу скольжения θ от 4 до 6 градусов соответствует малая длина волны отсечки с коротковолновой стороны рабочей области спектра: от 4 до 6 нм.

Для оптимизации разрешающей силы $\lambda/\delta\lambda$ спектрометра за счет уменьшения ширины изображения монохроматической линии в плоскости регистрации детектора 6 угловой размер источника излучения 3, определяемый отношением его характерного размера

a к его удаленности A от входной щели, предпочтительно не превышает 10^{-3} рад:

$$a/A \leq 10^{-3} \text{ рад.}$$

С этой же целью дифракционная решетка расположена максимально близко к входной щели, в частности, расстояние l от дифракционной решетки 5 до входной щели 2 много меньше расстояния L от дифракционной решетки до детектора: $l \ll L$. Это также минимизирует размер спектрометра.

Для оптимального использования детектора и согласования его пространственного разрешения с реальной спектральной структурой направление дифракции на край детектора определяет длинноволновую границу λ_{-1} рабочей области спектра в минус первом порядке дифракции.

Под краем детектора имеется ввиду край рабочей области детектора, для многоэлементного линейного детектора это крайний элемент детектора, а для двухкоординатного детектора - крайний столбец элементов детектора, ориентированный перпендикулярно плоскости дифракции.

Предпочтительно рабочая область спектра в минус первом порядке дифракции находится в диапазоне от 5 до 200 нм. Спектральные измерения в этом диапазоне позволяют диагностировать плазменные источники излучения, в том числе, предназначенные для проекционной ЭУФ литографии.

Обычно источники излучения для проекционной ЭУФ литографии основаны на использовании лазерной плазмы олова (Sn). На Фиг. 2 представлен спектр лазерной Sn-плазмы в ВУФ диапазоне 6-200 нм, полученный в минус первом порядке дифракции с помощью спектрометра, выполненного в соответствии с настоящим изобретением. В соответствии с возможностями программного обеспечения спектрометра спектр представлен в полулогарифмическом масштабе.

В предпочтительном варианте реализации изобретения, иллюстрируемом Фиг. 1, спектрометр характеризуется дополнительной регистрацией ВУФ спектра в плюс первом порядке дифракции. При этом длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз меньшей длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка, $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, а спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ в минус первом порядке дифракции во много раз больше спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ в минус первом порядке дифракции: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$.

Для рационального использования детектора 6 угол ψ дифракции в направлении на край детектора не больше 90° , при этом направление дифрагированного луча на край детектора 6 соответствует направлению на граничную длину волны рабочей области спектра плюс первого порядка.

В предпочтительных вариантах реализации изобретения для оптимального использования детектора оба его края определяют длинноволновые границы λ_{-1} и λ_{+1} рабочих областей спектра минус первого и плюс первого порядков.

В спектрометре, выполненном в соответствии с изобретением, дифракционная картина в (+1) и (-1) дифракционных порядках сильно асимметрична. Плюс первый порядок имеет длину волны отсечки λ_{co} , соответствующую углу дифракции $\psi=90^\circ$. Вблизи λ_{co} дисперсия спектрометра D [нм/мм] очень мала и спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ велико. Угол скольжения θ может быть выбран таким образом, чтобы интересующий

диапазон длин волн, в частности, около $\lambda=13,5$ нм, был как можно ближе к λ_{co} . В этом случае можно достичь среднего спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ до (100-200) на $\lambda=13,5$ нм в (+1) дифракционном порядке и наблюдать очень широкий спектральный диапазон в (-1) порядке с низким спектральным разрешением: $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ до (15-30).

В соответствии с этим, в предпочтительном варианте изобретения угол скольжения θ выбран так, что соответствующая углу дифракции $\psi=90^\circ$ длина волны отсечки λ_{co} больше длины волны ЭУФ литографии 13,5 нм: $\lambda_{co}>13,5$ нм, и рабочая область спектра плюс первого порядка включает в себя длину волны 13,5 нм: $\lambda_{+1}>13,5$ нм. При этом предпочтительно, что длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра близка к длине волны 13,5 нм: $0<(\lambda_{+1}-13,5 \text{ нм})\ll 13,5$ нм.

Спектрометр был испытан с использованием в качестве источника излучения 3 лазерной плазмы. Для генерации плазмы был использован CO_2 -лазер с длиной волны излучения 10,6 мкм, энергией 0,5 Дж в импульсе длительностью 100 нс и фокальным пятном диаметром 300 мкм. В качестве материала мишени использовалось олово и другие материалы. Использовался детектор Hamamatsu S7030-1006N SPL с количеством пикселей 1024×58 , рабочей областью $24,6\times 1,36$ мм.

Тестирование проведено при следующих параметрах:

- ширина входной щели 84 мкм,
- расстояние источник излучения - входная щель - 400 мм,
- угол скольжения $\theta=5,5^\circ$,
- расстояние входная щель - дифракционная решетка 3,5 мм,
- дифракционная решетка: период $d=3$ мкм, размер 3×3 мм, материал - SiO_2 ,
- углубления прямоугольного профиля шириной $d/2=1,5$ мкм,
- расстояние дифракционная решетка - детектор - 56 мм.

На Фиг. 3. представлен измеренные спектры лазерной Sn-плазмы. Спектрометр позволяет наблюдать очень широкий спектральный диапазон 6-200 нм в (-1) порядке с низким спектральным разрешением $(\lambda/\delta\lambda)_{-1} \sim 15-30$ и узкий спектральный диапазон около длины волны ЭУФ литографии $\lambda=13,5$ нм со средним спектральным разрешением $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \sim 100-200$. На Фиг. 3 представлен спектр с подавлением дифракции нулевого порядка, предохраняет детектор от чрезмерной засветки и обеспечивает регистрацию спектра с высоким уровнем сигнала и низким уровнем шума.

В соответствии с вариантом изобретения, схематично иллюстрируемом Фиг. 4, спектрометр имеет двухкоординатный детектор 6, и освещение входной щели 2 осуществляется через установленную между ней и источником излучения 3 дополнительную щель 18, параллельную плоскости дисперсии. Это позволяет регистрировать размер излучающей области ВУФ источника на различных длинах волн ВУФ спектра с высоким пространственным разрешением.

Изображения спектров (без подавлением дифракции нулевого порядка) лазерной плазмы кремния (Si) и фторида лития (LiF), полученные с цифровой ВУФ камерой Andor в качестве двухкоординатного детектора, представлены на Фиг. 5.

Предпочтительно спектрометр снабжен программным обеспечением, дающим возможность сбора, обработки, отображения и хранения данных спектральных измерений в плюс первом и минус пером порядках дифракции, что обеспечивает удобство эксплуатации спектрометра с уникальным набором регистрируемых параметров.

На Фиг. 6 представлена фотография опытного образца спектрометра, демонстрирующая чрезвычайную компактность спектрометра, максимальный размер

которого не превышает 30 см.

С целью обеспечения удобства эксплуатации корпус спектрометра выполнен в виде быстросъемной части герметичного соединения. Для этого, как показано на Фиг. 6, корпус 1 спектрометра может содержать входной фланец KF-40, позволяющий быстро осуществлять соединение спектрометра с вакуумной камерой, содержащей источник ВУФ излучения, и отсоединение от нее

Таким образом, спектрометр позволяет одновременно регистрировать спектры на краю (+1) порядка отражения с достаточно высоким спектральным разрешением ($\lambda/\delta\lambda \sim 100 \div 150$) и в (-1) порядке - с умеренным разрешением ($\lambda/\delta\lambda \sim 15-30$), но в очень широком спектральном диапазоне (5-200 нм). Заранее рассчитанный коэффициент отражения амплитудной отражающей дифракционной решетки и использование абсолютно калиброванного детектора, в частности, ПЗС детектора, позволяют проводить абсолютные или количественные измерения интенсивностей в этих спектральных диапазонах. Спектрометр эффективен для контроля источников излучения, обладающих малой угловой апертурой. В вариантах реализации спектрометра обеспечивается регистрация размеров эмитирующей области источника излучения в различных диапазонах ВУФ спектра. Спектрометр характеризуется чрезвычайной компактностью и удобством эксплуатации.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ

Предложенное изобретение предназначено для использования в приборостроении, в частности при создании спектрометров ВУФ диапазона, в том числе для контроля плазменных источников излучения, предназначенных для проекционной ЭУФ литографии.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Schwob J.L., et al. Review of Scientific Instruments, 58, 1601 (1987).
2. Wilhein, T., et al. Review of Scientific Instruments, 70 (3), 1694 (1999).
3. Shevelko A.P. et al. Plasma Physics Reports. 34 (11), 944 (2008).
4. Antsiferov P.S., et al. Review of Scientific Instruments 87, 053106 (2016).
5. Wilhein T., et. al. Review of Scientific Instruments. 70, 1694 (1999).

(57) Формула изобретения

1. Компактный широкодиапазонный ВУФ спектрометр скользящего падения с расположенными в корпусе входной щелью, освещаемой удаленным источником излучения и выделяющей пучок излучения, освещающий под углом скольжения θ дифракционную решетку с постоянным периодом d , и детектором, характеризующийся тем, что

дифракционная решетка выполнена плоской, рельефной, с плоскими отражающими рабочими гранями, лежащими в плоскости решетки, и не отражающими свет углублениями между рабочими гранями, при этом

детектор обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в минус первом порядке дифракции.

2. Устройство по п. 1, в котором рабочая область спектра в минус первом порядке дифракции находится в диапазоне от 5 до 200 нм.

3. Устройство по п. 1, в котором ширина рабочих граней дифракционной решетки равна $d/2$ - половине периода дифракционной решетки.

4. Устройство по п. 1, в котором глубина углублений между рабочими гранями решетки превышает $d/4 \sin \theta$.

5. Устройство по п. 1, в котором дифракционная решетка имеет профиль углублений между рабочими гранями либо прямоугольный, либо трапецеидальный.

6. Устройство по п. 1, в котором дифракционная решетка расположена максимально близко к входной щели.

7. Устройство по п. 1, в котором угловой размер источника излучения, определяемый отношением его характерного размера a к его удаленности A от входной щели, не превышает 10^{-3} рад: $a/A \leq 10^{-3}$ рад.

8. Устройство по п. 1, в котором угол скольжения θ находится в диапазоне от 4 до 6 градусов.

9. Устройство по п. 1, в котором детектор является многоэлементным.

10. Устройство по п. 1, имеющее калибровку спектральной чувствительности.

11. Устройство по п. 1, в котором детектор является двухкоординатным и освещение входной щели осуществляется через установленную между ней и источником излучения дополнительную щель, параллельную плоскости дисперсии.

12. Устройство по п. 1, в котором край детектора определяет длинноволновую границу λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка.

13. Устройство по п. 1, в котором корпус выполнен в виде быстросъемной части герметичного соединения.

14. Устройство по любому из пп. 1-13 с дополнительной регистрацией ВУФ спектра в плюс первом порядке дифракции, при этом длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз меньше длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка: $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$.

15. Устройство по п. 14, в котором детектор установлен так, что угол дифракции в направлении на край детектора не больше 90° .

16. Устройство по п. 14, в котором край детектора определяет длинноволновую границу λ_{+1} рабочей области спектра плюс первого порядка.

17. Устройство по п. 14, в котором угол скольжения θ выбран так, что соответствующая углу дифракции $\psi = 90^\circ$ длина волны отсечки λ_{co} больше длины волны ЭУФ литографии 13,5 нм: $\lambda_{co} > 13,5$ нм, и рабочая область спектра плюс первого порядка включает в себя длину волны 13,5 нм: $\lambda_{+1} > 13,5$ нм.

18. Устройство по п. 14, в котором рабочая область спектра плюс первого порядка включает в себя длину волны 13,5 нм и длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области спектра близка к длине волны 13,5 нм: $0 < (\lambda_{+1} - 13,5 \text{ нм}) \ll 13,5 \text{ нм}$.

19. Устройство по п. 14, в котором перед детектором установлен затвор, блокирующий излучение в нулевом порядке дифракции.

20. Устройство по п. 14, в котором спектрометр снабжен программным обеспечением, обеспечивающим сбор, обработку, отображение и хранение данных спектральных измерений в плюс первом и минус первом порядках дифракции.

21. Компактный широкодиапазонный ВУФ спектрометр скользящего падения с расположенными в корпусе входной щелью, освещаемой удаленным источником излучения и выделяющей пучок излучения, освещающий под углом скольжения θ дифракционную решетку с постоянным периодом d , и детектором излучения, характеризующийся тем, что дифракционная решетка выполнена плоской, рельефной, с плоскими отражающими рабочими гранями, лежащими в плоскости решетки, и не отражающими свет углублениями между рабочими гранями; детектор излучения обеспечивает регистрацию ВУФ спектра в плюс первом порядке дифракции и в минус первом порядке дифракции, причем длинноволновая граница λ_{+1} рабочей области

спектра плюс первого порядка во много раз меньшей длинноволновой границы λ_{-1} рабочей области спектра минус первого порядка: $\lambda_{+1} \ll \lambda_{-1}$, а спектральное разрешение $(\lambda/\delta\lambda)_{+1}$ в рабочей области спектра плюс первого порядка во много раз больше спектрального разрешения $(\lambda/\delta\lambda)_{-1}$ в рабочей области спектра минус первого порядка: $(\lambda/\delta\lambda)_{+1} \gg (\lambda/\delta\lambda)_{-1}$.

10

15

20

25

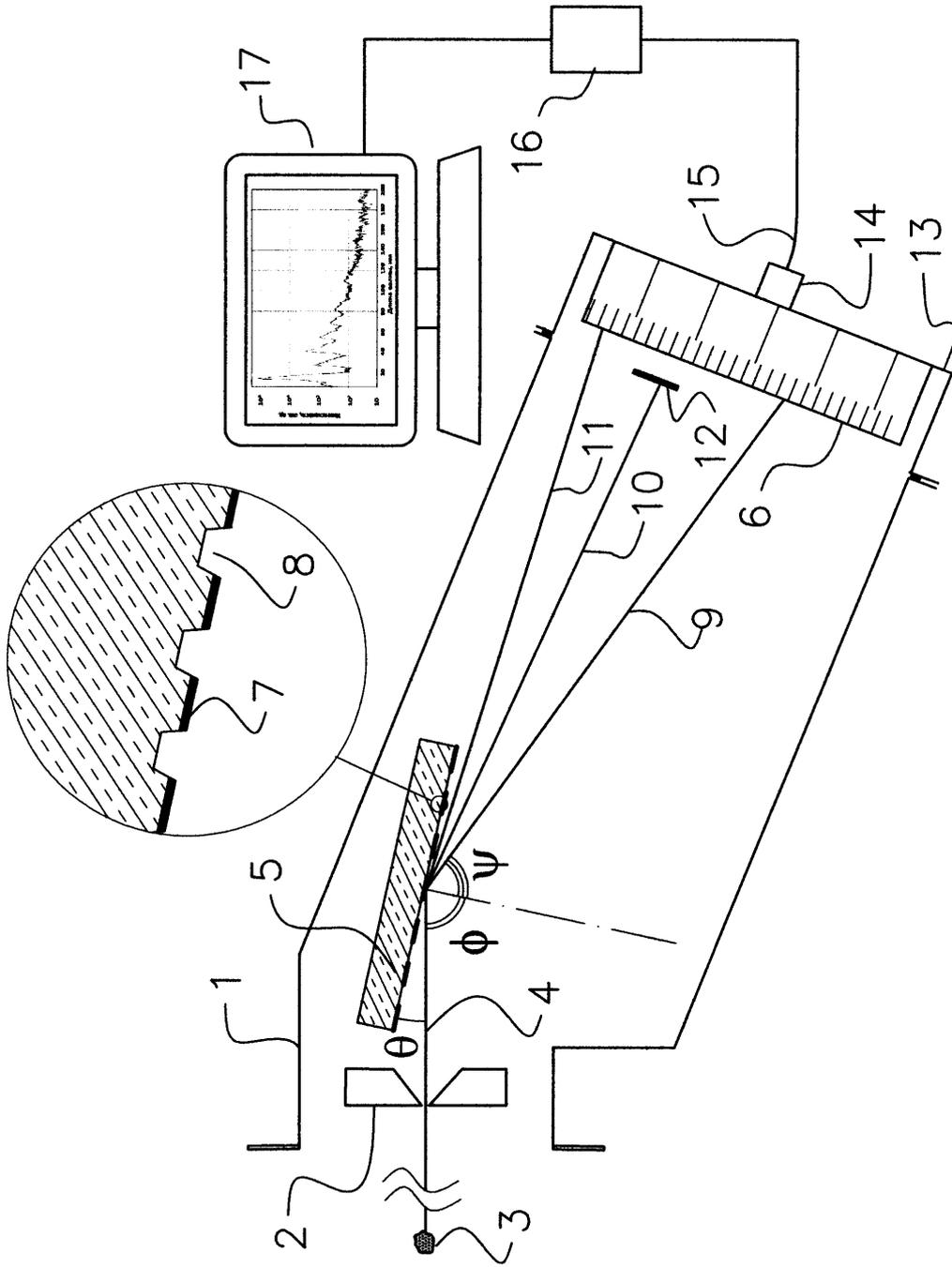
30

35

40

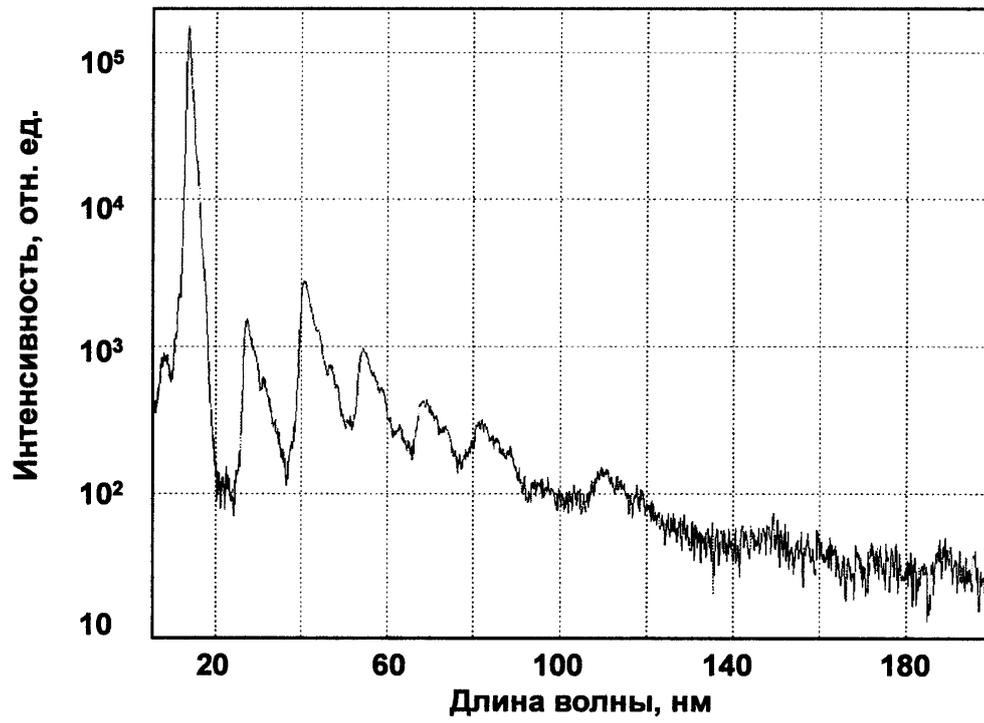
45

1

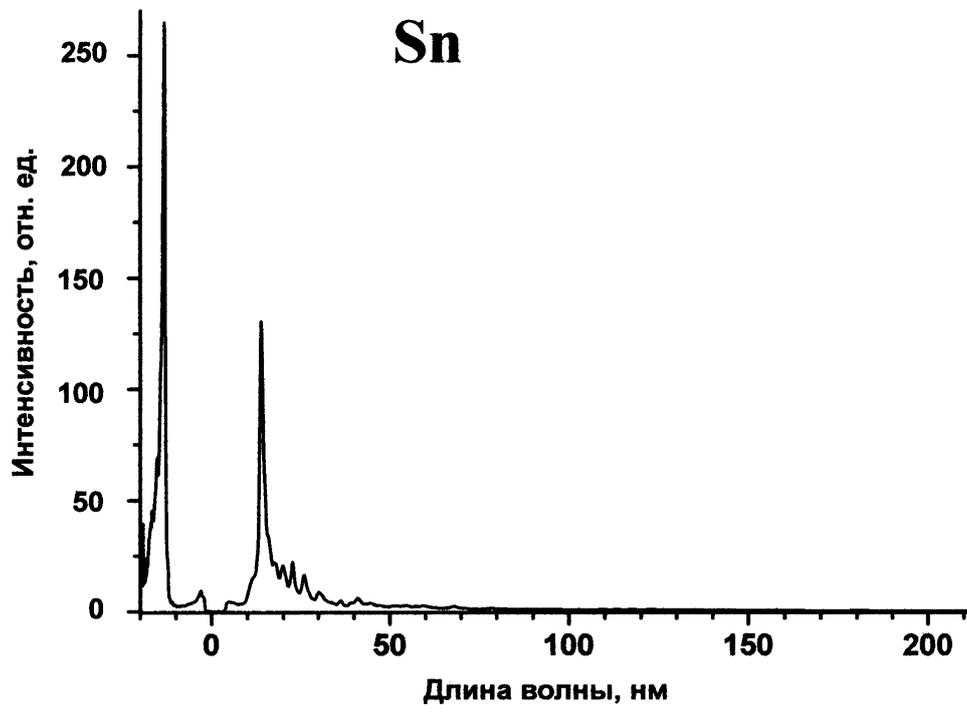


Фиг. 1

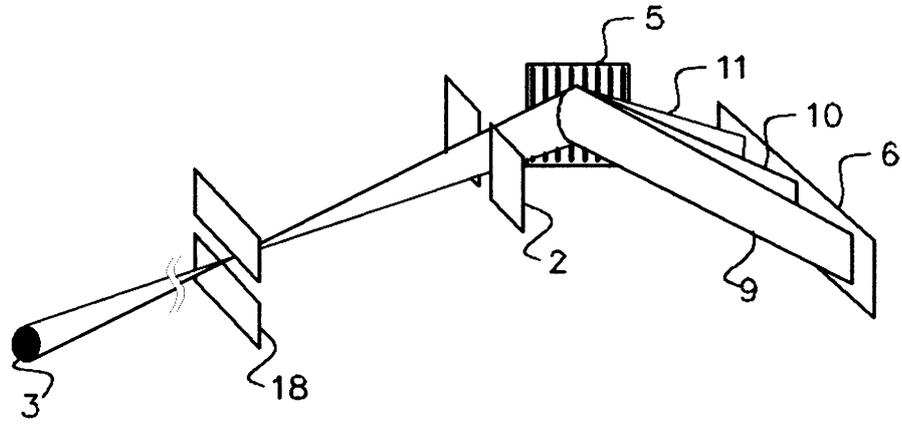
2



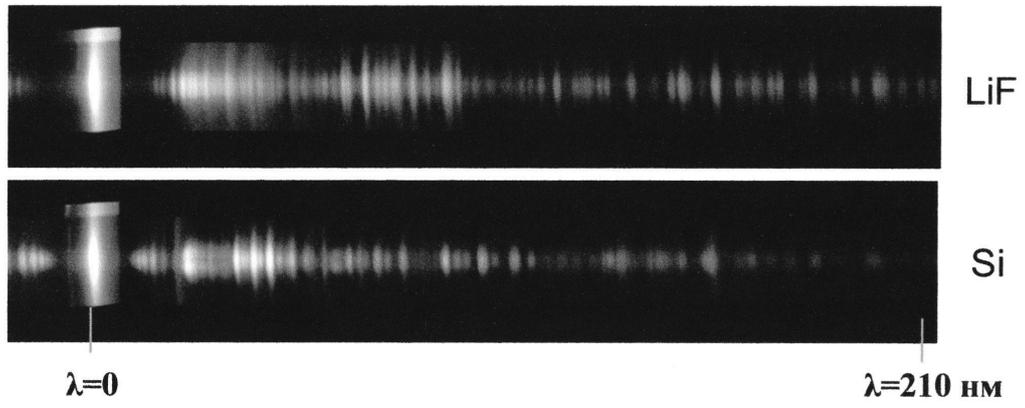
Фиг. 2



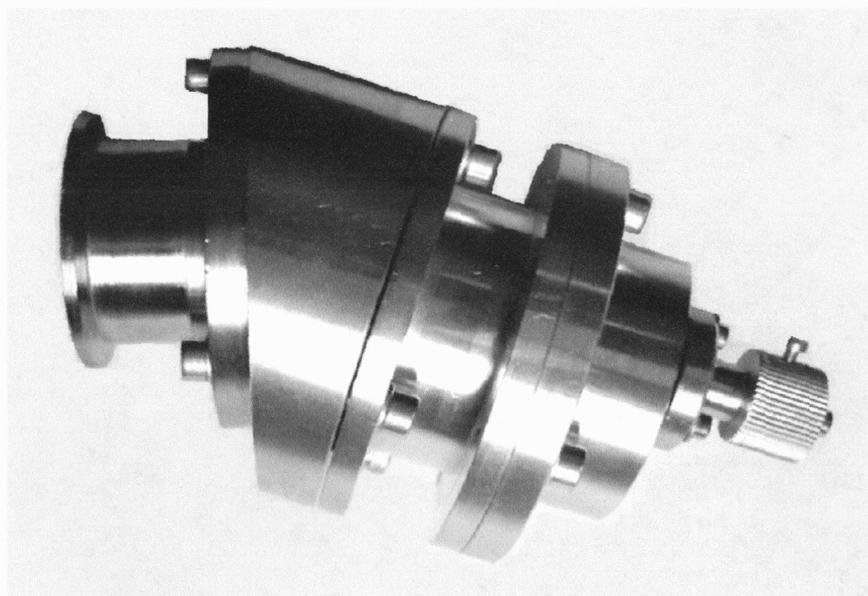
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6