

8P04



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ
И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ
(РОСПАТЕНТ)

ПАТЕНТ

№ 2104481

на **ИЗОБРЕТЕНИЕ**
"Рентгеновский рефлектометр"

Патентообладатель (ли): Турьянский Александр Георгиевич

Автор (авторы): Турьянский Александр Георгиевич,
Виноградов Александр Владимирович и Пиршин Игорь Владимирович

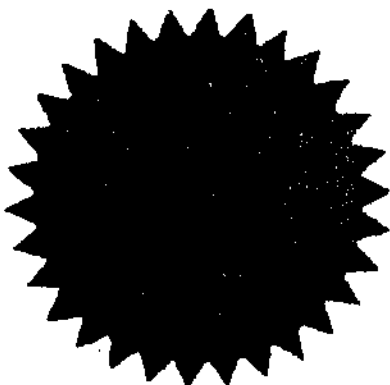
Приоритет изобретения 3 февраля 1997г.

Дата поступления заявки в Роспатент 3 февраля 1997г.

Заявка № 97101653

Зарегистрирован в Государственном
реестре изобретений 10 февраля 1998г.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР





(19) RU (11) 2104481 (13) C1

(51) 6 G 01 B 15/08, 15/00,
G 01 N 23/00, 23/20

Комитет Российской Федерации
по патентам и товарным знакам

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ к патенту Российской Федерации

1

(21) 97101653/28 (22) 03.02.97
(46) 10.02.98 Бюл. № 4
(72) Турьянский А.Г., Виноградов А.В.,
Пиршин И.В.

(71) (73) Турьянский Александр Георгие-
вич

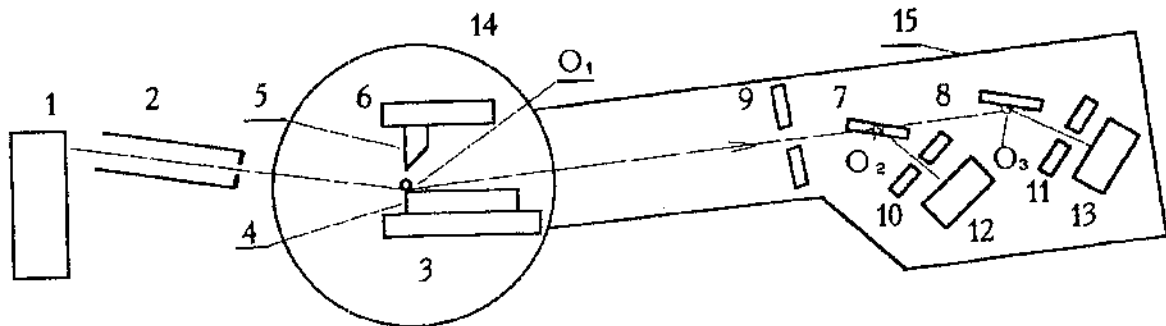
(56) O. Renner. Density Measurements of
Thin Germanium Films by Total Reflection of
X-Rays. Czechoslovak Journal of Physics, v.
B22, 1007-16, 1972. The New Siemens X-Ray
Reflectometer. A Tool with Outstanding
Capabilities. Siemens Analytical Application
Note N 337, Maerz, 1, 1994.

(54) РЕНТГЕНОВСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР

(57) Использование: в измерительной техни-
ке, а более конкретно прибор может быть
использован для контроля плотности, состава
и толщины тонких пленок, а также для
определения шероховатости поверхности.
Сущность изобретения: рентгеновский ре-
флектометр содержит источник полихрома-
тического рентгеновского излучения 1, сред-

2

ства коллимации рентгеновского пучка 2,
держатель 3 образца 4, выполненный с
возможностью вращения вокруг собственной
оси, поворотный кронштейн 15, для которого
предусмотрена возможность вращения вокруг
оси, совпадающей с осью держателя образца,
средства измерения углов поворота держате-
ля 3 образца 4 и поворотного кронштейна
15, размещенные на поворотном кронштейне
монохроматор 7 и детектор 12, причем
монохроматор выполнен с возможностью
поворота вокруг собственной оси, а для
детектора 12 предусмотрена возможность
изменения угла поворота относительно мо-
нохроматора 7. На поворотном кронштейне
размещены также второй монохроматор 8,
выполненный с возможностью поворота
вокруг собственной оси, и детектор 13, для
которого предусмотрена возможность измене-
ния угла поворота относительно второго
монохроматора 8, причем второй монохрома-
тор 8 расположен за первым 7 по ходу



Фиг. 1

C1

2104481

RU

RU

2104481

C1

рентгеновского пучка, а первый монохроматор 7 является полупрозрачным по меньшей

мере в одном из рабочих участков спектра.
2 з.п. ф-лы, 3 ил.

Изобретение относится к области рентгенотехники и может быть использовано для контроля плотности, состава и толщины тонких пленок, а также для определения шероховатости поверхности различных изделий, полученных полировкой и другими методами финишной обработки.

Известен рентгеновский рефлектометр, содержащий источник полихроматического рентгеновского излучения, средства коллимации рентгеновского пучка, держатель образца, выполненный с возможностью вращения вокруг собственной оси, поворотный кронштейн, для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси, совпадающей с осью держателя образца, средства измерения углов поворота держателя образца и поворотного кронштейна, монохроматор и детектор [1].

В устройстве [1] монохроматор размещен между источником рентгеновского излучения и держателем образца. Поэтому для изменения используемого участка спектра требуется поворот на новый брегговский угол как монохроматора, так и наиболее массивных элементов измерительной схемы: источника рентгеновского излучения или средств измерения углов поворота держателя образца и поворотного кронштейна, являющихся, как правило, частями прецизионного оптико-механического гониометра. Изменение взаимного расположения указанных элементов рентгеновской схемы и последующая юстировка требует больших затрат времени, обычно превышающих в десятки раз продолжительность измерения параметров образцов. По этой причине измерения спектральной зависимости показателя преломления и угловых диаграмм рассеяния и отражения с помощью указанного устройства трудно воспроизводимы и неэффективны. Точное определение действительной и мнимой частей показателя преломления в различных участках спектра позволяет получать информацию о составе и плотности поверхностного слоя образца. Следствием указанных выше недостатков являются низкие достоверность и точность указанной информации, получаемой с помощью устройства [1].

Известен также рентгеновский рефлектометр, содержащий источник полихроматического рентгеновского излучения, средства коллимации рентгеновского пучка, держатель образца, выполненный с возможностью вращения вокруг собственной оси, поворотный кронштейн, для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси, совпадающей с осью держателя образца, средства

измерения углов поворота держателя образца и поворотного кронштейна, кристалл-монохроматор, кристалл-анализатор и детектор [2].

В указанном устройстве кристалл-монохроматор расположен между источником излучения и держателем образца, а кристалл-анализатор - за держателем образца по ходу рентгеновского пучка. С помощью монохроматора из первичного излучения выделяется рабочий участок спектра, а путем поворота кристалла-анализатора вокруг собственной оси измеряются углы отклонения зеркально отраженного или рассеянного излучения от направления первичного монохроматического пучка. В качестве анализатора используют совершенный кристалл, угол дифракции которого не изменяется при смещении зоны облучения. Это позволяет устранить зависимость результатов угловых измерений от позиции образца в пучке и его размеров. Однако установка второго кристалла резко снижает светосилу рентгенооптической схемы. Кроме того, изменение спектрального диапазона так же, как и для устройства [1], требует длительной и сложной юстировки.

В качестве прототипа заявляемого устройства выбран рентгеновский рефлектометр [3], содержащий источник полихроматического рентгеновского излучения, средства коллимации рентгеновского пучка, держатель образца, выполненный с возможностью вращения вокруг собственной оси, поворотный кронштейн, для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси, совпадающей с осью держателя образца, средства измерения углов поворота держателя образца и поворотного кронштейна, размещенные на поворотном кронштейне монохроматор и детектор, причем монохроматор выполнен с возможностью поворота вокруг собственной оси, а для детектора предусмотрена возможность изменения угла поворота относительно монохроматора.

Основной недостаток указанного устройства - случайные ошибки при измерениях в различных участках спектра. Эти ошибки обусловлены тем, что такие измерения с помощью устройства [3] необходимо проводить последовательно после настройки аппаратуры на новый участок спектра. В результате этого изменяются условия регистрации данных вследствие дрейфа электрических параметров источника рентгеновского излучения, детектора и электронного канала обработки данных за время настройки и за время повторного измерения. Это, как

правило, приводит к появлению неконтролируемых ошибок, связанных с изменениями спектра рентгеновского излучения, амплитуды импульсов детектора, уровня шумов и коэффициента усиления электронного канала обработки данных. Другим источником ошибок является невозможность первичных угловых координат поверхности образца относительно пучка после настройки на новый участок спектра. Угловые погрешности в основном обусловлены неконтролируемыми смещениями образца при повторном введении в рентгеновский пучок и конечной точностью измерения углов с помощью гониометрического устройства.

В устройстве [3] для перестройки на новый участок спектра требуется поворот только конечных элементов измерительной схемы: монохроматора и детектора. Однако если при этом выбирается узкий участок рентгеновского спектра, то настройка монохроматора и детектора совместно с приемной щелью на максимум дифракционного пика требует значительных затрат времени. Общие затраты времени на контроль отдельного образца, как правило, складываются из времени измерения t_m в каждом из участков спектра, времени настройки t_a измерительной системы и определения исходных угловых координат t_k . Обычно $t_a + t_k \gg t_m$. Поэтому производительность измерений при контроле параметров образцов с помощью устройства [3] оказывается низкой.

При создании настоящего изобретения решалась задача повышения точности измерений при работе в различных участках спектра.

Основными техническими результатами изобретения являются двукратное уменьшение предельной ошибки измерения углов при изменении рабочего спектра и сокращение случайных ошибок измерения интенсивности, обусловленных дрейфом электрических параметров аппаратуры. Дополнительным техническим результатом является сокращение времени измерений при контроле единичных образцов.

В соответствии с изобретением указанные технические результаты достигаются тем, что в рентгеновский рефлектометр, содержащий источник полихроматического рентгеновского излучения, средства коллимации рентгеновского пучка, держатель образца, выполненный с возможностью вращения вокруг собственной оси, поворотный кронштейн, для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси, совпадающей с осью держателя образца, средства измерения углов поворота держателя образца и поворотного

кронштейна, размещенные на поворотном кронштейне монохроматор и детектор, причем монохроматор выполнен с возможностью поворота вокруг собственной оси, а для детектора предусмотрена возможность изменения угла поворота относительно монохроматора, дополнительно введены второй монохроматор и второй детектор, размещенные на поворотном кронштейне, второй монохроматор выполнен с возможностью поворота вокруг собственной оси, а для второго детектора предусмотрена возможность изменения угла поворота относительно второго монохроматора, причем второй монохроматор расположен за первым монохроматором по ходу рентгеновского пучка, а первый монохроматор является полупрозрачным по меньшей мере в одном из рабочих участков спектра.

Указанные технические результаты достигаются также тем, что первый монохроматор выполнен в виде пластины, удовлетворяющей условию

$$0,05 < \mu d / \sin(\theta) < 0,5,$$

где μ - линейный коэффициент ослабления излучения для рабочего участка спектра, проходящего через пластину;

d - толщина пластины;

θ - брегговский угол для отражаемого пластиной участка спектра.

Указанные технические результаты достигаются также тем, что первый монохроматор выполнен из пиролитического графита.

Состав и расположение элементов измерительной схемы согласно заявляемому изобретению обеспечивают выделение в регистрируемом излучении двух спектральных участков и их последующую независимую регистрацию двумя детектирующими каналами. Это позволяет проводить параллельные измерения угловых зависимостей коэффициента отражения и пропускания, а также диаграмм рассеяния по меньшей мере в двух участках спектра. Тем самым исключаются ошибки, присущие известному устройству, которые обусловлены невозможностью условий измерения вследствие дрейфа электрических параметров аппаратуры и дополнительными ошибками определения угловых координат при повторной регистрации данных. Этим также достигается сокращение времени измерений и обеспечивается повышение производительности.

На фиг. 1 в общем виде изображена измерительная схема рентгеновского рефлектометра; на фиг. 2 - блок-схема электронной системы управления и обработки данных измерения; на фиг. 3 - угловые зависимости коэффициента зеркального отражения $R(\theta)$

от поверхности образца в двух узких участках спектра с энергиями E_1 (кривая 1) и E_2 (кривая 2) для случая $E_1 > E_2$.

В состав измерительной схемы рефлектометра входят: источник полихроматического рентгеновского излучения (рентгеновская трубка) 1, рентгеновский коллиматор 2, держатель 3 образца 4, коллимирующий экран 5, устройство линейного перемещения 6, монохроматоры 7, 8, щели 9 - 11, детекторы 12, 13, опора 14, поворотный кронштейн 15. Образец 4 механически или с помощью вакуумного присоса фиксируется в держателе 3. Коллимирующий экран 5 закреплен в устройстве линейного перемещения 6, обеспечивающем регулировку ширины просвета между поверхностью образца 4 и торцом коллимирующего экрана 5. Для монохроматора 7 и детектора 12 совместно со щелью 10 предусмотрена возможность независимых поворотов в измерительной плоскости вокруг оси O_2 , а для монохроматора 8 и детектора 13 совместно со щелью 11 - возможность независимых поворотов в измерительной плоскости вокруг оси O_3 . Первый по ходу рентгеновского пучка монохроматор 7 выполнен в виде тонкой пластины из пиролитического графита. Толщина пластины выбирается в зависимости от материала анода рентгеновской трубки. Например, для медного анода она находится в пределах 50 - 100 мкм. Детекторы 12, 13 выполнены на базе комбинации сцинтиллятор + ФЭУ. В корпусе детекторов размещены предусилители импульсов ФЭУ. Оси O_1 , O_2 , O_3 и щель 9 размещены вдоль одной линии. Изменение ширины рентгеновского пучка осуществляется путем регулировки длин выходной щели коллиматора 2 и щели 9. Средством измерения угловых поворотов опоры 14 и кронштейна 15 является серийный гониометр (не показан), обеспечивающий непрерывное или пошаговое перемещение опоры 14 и кронштейна 15 вокруг оси O_1 с минимальной дискретностью шага не более $0,005^\circ$. Ход рентгеновского пучка показан тонкой линией со стрелкой.

Электронная система управления и обработки данных измерения содержит 1-й канал обработки в составе: усилитель 16, дискриминатор 17 амплитуды импульсов, счетчик импульсов 18; 2-й канал обработки в составе: усилитель 19, дискриминатор 20 амплитуды импульсов, счетчик 21, блоки питания 22 - 24, процессор 25, электромеханическое устройство 26; формирователь импульсов 27; датчики углового перемещения 28, 29, персональный компьютер 30, линию связи 31, электромеханический затвор 32 (фиг. 2).

Элементы 16-18 и 19-21 образуют два независимых канала обработки импульсов, поступающих соответственно от детекторов 12 и 13. Автономный блок питания 23 обеспечивает стабилизированное низковольтное напряжения для электронных схем, блок питания 22 - высокое напряжение для детекторов 12, 13, блок питания 24 - реверсируемое напряжение для электромеханического устройства 26, с помощью которого осуществляется непрерывное или пошаговое вращение опоры 14 и поворотного кронштейна 15 вокруг оси O_1 . Датчики углового перемещения 28, 29 представляют собой пары светодиод - фотодиод, разделенные прозрачным диском (не показан), для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси O_1 совместно с поворотным кронштейном 15. По окружности диска с постоянным угловым шагом нанесены зачерненные полоски. Электромеханический затвор 32 установлен в защитном корпусе источника полихроматического рентгеновского излучения 1. Связь персонального компьютера 30 с системой управления осуществляется через процессор 25. Связь процессора 25 с устройством питания источника полихроматического рентгеновского излучения 1 осуществляется по линии связи 31. Для хранения данных и программы управления сбором процессор 25 имеет расширенную память объемом не менее 64 Кб.

Перед началом работы производится настройка рентгеновского рефлектометра на спектральные диапазоны, в которых будут проводиться измерения. При использовании трубок с анодом из одного химического элемента (Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Ag) или их комбинации спектральные диапазоны выбирают так, чтобы они содержали наиболее интенсивные характеристические линии K_α и K_β материала анода. Для этого разворачивают поворотный кронштейн 15 до совпадения центра щели 9 с осью прямого пучка. Монохроматор 7 разворачивают вокруг оси O_2 на брегговский угол θ_1 , например, для линии Cu K_α , а детектор 12 и щель 10 на удвоенный брегговский угол $2\theta_1$. Монохроматор 8 разворачивают вокруг оси O_3 на брегговский угол для линии θ_2 для линии Cu K_β , а детектор 13 и щель 11 на удвоенный брегговский угол $2\theta_2$. Путем углового качания элементов 7 - 13 добиваются максимума интенсивности, регистрируемой детекторами 12, 13. При этом ширину окна и нижний порог амплитуды импульсов, пропускаемых через дискриминаторы 17, 20 выбирают так, чтобы получить максималь-

ную величину отношения полезный сигнал/шум. После настройки устанавливается образец 4 в позицию, при которой его край совмещен с осью O_1 (см. фиг. 1) и находится на заданном расстоянии от торца экрана 5, например 30 мкм. Это позволяет сохранять фиксированную расходимость отраженного пучка, попадающего на монохроматоры 7, 8 через щель 9.

Работа рентгеновского рефлектометра при измерении коэффициента зеркального отражения осуществляется следующим образом. В память персонального компьютера 30 оператором вводятся данные об условиях измерений: начальная угловая точка отсчета по образцу θ_0 , текущие угловые координаты образца 4 и приемной щели 7 соответственно θ_{c1} и θ_{c2} , угловой шаг между отсчетами по образцу θ_s , количество угловых точек отсчета N , время измерения t_i в угловой точке, величины высокого напряжения на рентгеновской трубке U_1 и ФЭУ - U_2 , ток трубки I .

По команде начала сбора, поступающей от персонального компьютера 30, в память процессора 25 передаются данные об условиях сбора. Дальнейшая работа осуществляется в автономном режиме. Процессор 25 передает коды установки рабочих параметров по линии 31 на устройство питания источника полихроматического излучения 1 и блок питания 22, обеспечивающий установку заданного напряжения на детекторах 11, 13 в течение промежутка времени $T_{ст}$. По истечении $T_{ст}$ командой процессора 25, поступающей на блок питания 24, включается электромеханическое устройство 26, обеспечивающее независимые угловые повороты опоры 14 с держателем образца и поворотного кронштейна 15. Во время вращения опоры 14 и кронштейна 15 датчиками угловых перемещений 28 и 29 считываются угловые метки, которые в виде импульсов через формирователь 27 поступают в процессор 25. Вращение прекращается путем последовательного прерывания питания электромеханического устройства 26 при поступлении в процессор 25 от датчика 28 углового перемещения образца и от датчика 29 углового перемещения приемной щели 9 соответственно

$|\theta_{c1} - \theta_0|/\theta_{min}$ и $|\theta_{c2} - \theta_0|/\theta_{min}$ импульсов (θ_{min} - минимальный угловой шаг, регистрируемый датчиками 28 и 29). После установки исходного углового положения поверхность образца 4 и приемная щель 9 развернуты на отрицательные углы соответственно $-\theta_1$ и $-2\theta_1$ относительно оси пучка,

падающего на образец через щелевой просвет, образуемый краем образца 4 и экраном 5. Далее по команде процессора 25, поступающей на электромеханическое устройство 26 через блок питания 24, производится механическое сцепление узлов вращения опоры 14 и поворотного кронштейна 15 через редуктор, обеспечивающий угловое перемещение образца 4 и приемной щели 9 в соотношении 1:2. Подготовка к началу измерений завершается командой процессора 25, поступающей через блок питания 24 на электромеханический затвор 32, открывающий выходное окно источника полихроматического рентгеновского излучения 1.

Через время задержки t_1 после открытия затвора от процессора 25 на счетчики 18, 21 поступают команды управления, открывающие их входы на заданный промежуток времени t_i , в течение которого счетчиками 18 и 21 регистрируется число импульсов, поступивших соответственно от детекторов 12 и 13 через предусилители 16, 19 и дискриминаторы 17, 20. По истечении времени счета процессором 25 на счетчики 18, 21 поступают команды управления, закрывающие их входы, а на блок питания 24 - команда подачи рабочего напряжения на электромеханическое устройство 26; производится опрос данных счетчиков 18, 21, которые помещаются в память процессора 25, а их счетные регистры обнуляются. При вращении механически сцепленных опоры 14 и поворотного кронштейна 15 процессором 25 регистрируются импульсы от датчика 28 угловых перемещений образца. После поступления θ_s/θ_{min} импульсов, соответствующих повороту образца 4 на угол θ_s и приемной щели 9 на угол $2\theta_s$, по команде управления процессора 25, поступающей на блок питания 24, прерывается подача рабочего напряжения на электромеханическое устройство 26. На счетчики 18, 21 от процессора 25 поступают команды управления, открывающие их входы на заданный промежуток времени t_i . Рассмотренный цикл измерений и угловых перемещений повторяется $N-1$ раз. После завершения N -го цикла измерений процессором 25 в персональный компьютер 30 передается сообщение об окончании сбора данных; запускается программа считывания накопленных данных из памяти процессора 25, которые в графическом виде выводятся на дисплей персонального компьютера 30 (см. фиг. 3). Далее программой запрашивается подтверждение одного из следующих вариантов продолже-

ния: запись данных в постоянную память, повторение сбора, выход из программы.

Максимальная ошибка измерения коэффициентов отражения R_1 и R_2 при угле скольжения $\theta = \theta_x$ складывается из следующих составляющих:

dI_1 - ошибка измерения угловой координаты зеркально отраженного излучения;

dI_2 - ошибка измерения угловой координаты первичного пучка;

dI_3 - погрешность счета из-за дрейфа высокого напряжения и тока рентгеновской трубки;

dI_4 - погрешность счета из-за дрейфа параметров электронного канала обработки импульсов;

dI_5, dI_6 - статистические ошибки счета импульсов прямого и отраженного пучков.

В общем случае полная ошибка измерения является также функцией угла скольжения θ_x и времени измерения данных t_i . При фиксированных θ_x и t_i для суммарной предельной ошибки E_s можно записать

$$E_s = \sum_{i=1}^{i=6} dI_i(\theta_x, t_i)$$

При последовательных измерениях с помощью устройства [3] геометрические составляющие dI_1, dI_2 суммарной ошибки E_s измерения удваиваются, так как при оценке предельной ошибки необходимо рассматривать наименее благоприятный случай. Погрешности счета dI_3 и dI_4 , связанные с дрейфом электрических параметров, возрастают с увеличением полного времени контрольно-измерительного цикла T_r прибли-

зительно пропорционально $\sqrt{T_r}$. В общем случае составляющими T_r являются времена настройки на спектральный участок t_a , определения угловых координат t_k , установки и смены образца t_c и собственно измерения t_m . При параллельных измерениях с помощью заявляемого рефлектометра в двух спектральных диапазонах $t_m = T_r$, то есть время дрейфа и обусловленные им погрешности минимальны.

Единственной составляющей, которая может возрастать при одновременных измерениях с помощью заявляемого устройства, является статистическая ошибка счета импульсов, что обусловлено частичным поглощением излучения при его прохождении через монохроматор 7. При выборе в качестве монохроматора тонкой пластины из пиролитического графита толщиной 70 мкм

ослабление характеристического излучения $Cu K\alpha$ составляет 23 %, интегральный коэффициент отражения излучения $Cu K\alpha$ снижается не более чем на 10-20%. Это приводит к увеличению среднего квадратичного отклонения приблизительно $\leq 14\%$, которое может быть устранено пропорциональным ослаблению увеличением мощности источника полихроматического рентгеновского излучения 1, либо увеличением времени сбора данных. При увеличении времени сбора дополнительная погрешность вследствие дрейфа электрических параметров остается заведомо меньшей, чем при последовательных измерениях, так как в полное время T_r не входят составляющие t_a, t_k, t_c и время повторного сбора.

В отличие от дифрактометрической схемы монохроматор рентгеновского рефлектометра не является фокусирующим и поэтому может быть выполнен из плоского мозаичного кристалла, что позволяет повысить светосилу устройства. По сравнению с другими известными кристаллами-монохроматорами на основе Si, SiO_2 , Ge, LiF пиролитический графит имеет минимальное значение линейного коэффициента ослабления (μ_0) в диапазоне длин волн 0,05 - 0,2 нм, наиболее часто используемых в рентгеновской рефлектометрии, и при указанной толщине и площади порядка 1 см² сохраняет пластинчатую форму. При настройке на брегговский угол коэффициент вторичной экстинкции для пиролитического графита, как правило, значительно превышает линейный коэффициент ослабления. По этой причине для получения минимальных статистических ошибок счета квантов в обоих измерительных каналах рефлектометра его применение в качестве первого монохроматора является оптимальным.

Источники информации

1. P. Croce, L. Nevot, B. Pardo. Contribution a l'etude des couches minces par reflexion speculaire de rayons X. *Nouv. Revue d'Optique Appliquee*, v. 3, N 1, 37-50, (1972).
2. O. Renner. Density Measurements of Thin Germanium Films by Total Reflection of X-Rays. *Czechoslovak Journal of Physics*, v. B22, 1007-16, (1972).
3. The New Siemens X-Ray Reflectometer. A Tool with Outstanding Capabilities. Siemens Analytical Application Note N 337, Maerz 1, (1994).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Рентгеновский рефлектометр, содержащий источник полихроматического рентгеновского излучения, средства коллимации рентгеновского пучка, держатель образца, выполненный с возможностью вращения вокруг собственной оси, поворотный кронштейн, для которого предусмотрена возможность вращения вокруг оси, совпадающей с осью держателя образца, средства измерения углов поворота держателя образца и поворотного кронштейна, размещенные на поворотном кронштейне монохроматор и детектор, причем монохроматор выполнен с возможностью поворота вокруг собственной оси, а для детектора предусмотрена возможность изменения угла поворота относительно монохроматора, отличающийся тем, что в него дополнительно введены второй монохроматор и второй детектор, размещенные на поворотном кронштейне, второй монохроматор выполнен с возможностью поворота вокруг собственной оси, а для второго

детектора предусмотрена возможность изменения угла поворота относительно второго монохроматора, причем второй монохроматор расположен за первым по ходу рентгеновского пучка, а первый монохроматор является полупрозрачным по меньшей мере в одном из рабочих участков спектра.

2. Рефлектометр по п.1, отличающийся тем, что первый монохроматор выполнен в виде пластины, удовлетворяющей условию

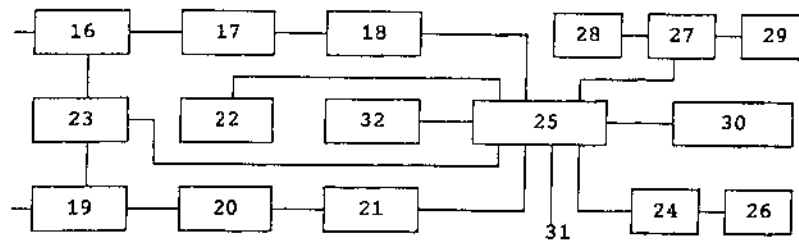
$$0,05 < \mu d / \sin(\theta) < 0,5,$$

где μ - линейный коэффициент ослабления излучения для рабочего участка спектра, проходящего через пластину;

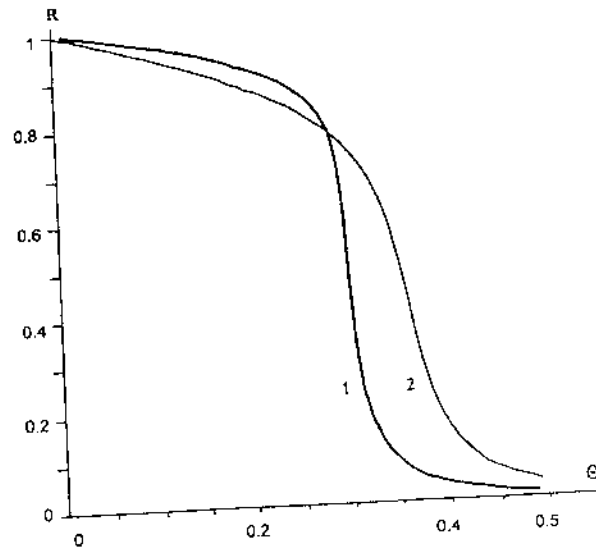
d - толщина пластины;

θ - брегговский угол для отражаемого пластиной участка спектра.

3. Рефлектометр по п.1, отличающийся тем, что первый монохроматор выполнен из пиролитического графита.



Фиг. 2



Фиг. 3

Заказ *4/2* Подписное
ВНИИПИ, Рег. ЛР № 040720
113834, ГСП, Москва, Раушская наб., 4/5

121873, Москва, Бережковская наб., 24 стр. 2.
Производственное предприятие «Патент»