



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
G01T 1/16 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2018118570, 21.05.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.05.2018

Дата регистрации:  
07.08.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.05.2018

(45) Опубликовано: 07.08.2018 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

308015, Белгородская обл., г. Белгород, ул.  
Победа, 85, НИУ "БелГУ", Цириковой Н.Д.

(72) Автор(ы):

Нажмудинов Рамазан Магомедшапиевич (RU),  
Каратаев Павел Владимирович (RU),  
Кубанкин Александр Сергеевич (RU),  
Каплий Анна Андреевна (UA)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Белгородский государственный  
национальный исследовательский  
университет" (НИУ "БелГУ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 4059763 A1, 22.11.1977. RU  
78576 U1, 27.11.2008. RU 2397481 C1,  
20.08.2010. US 20150247811 A1, 03.09.2015.

(54) Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений

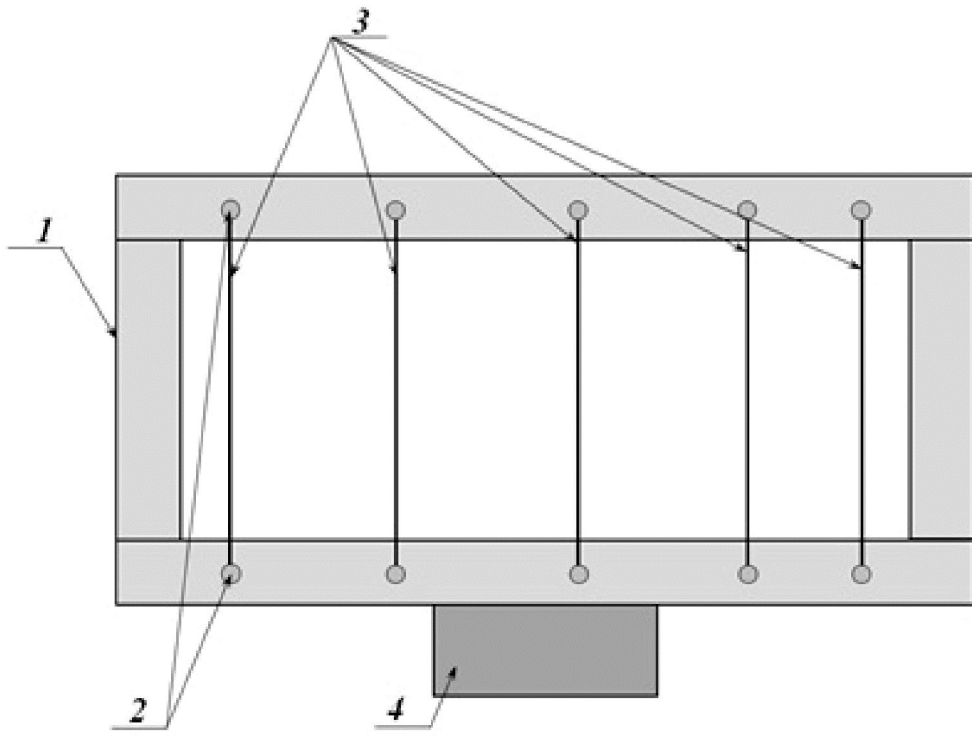
(57) Реферат:

Полезная модель относится к ускорительной технике и может быть использована для измерения параметров пучков ионизирующих излучений. Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений содержит держатель, сканирующие элементы, зажимы, средство для перемещения и детектор, при этом сканирующие элементы выполнены в виде множества сканирующих проволочек из разных материалов, закрепленных на держателе с помощью зажимов, а средством для перемещения является линейный

транслятор, перемещающий устройство в поперечном к оси пучка направлении, причем детектор, измеряющий спектры характеристического рентгеновского излучения, распространяющегося изотропно, является энергодисперсионным. Технический результат – повышение точности получения в процессе одного измерения основных характеристик пучков ионизирующего излучения: поперечных размеров, поперечных профилей, положения, расходимости, эмиттанса. 5 ил.

RU 182076 U1

RU 182076 U1



Фиг. 1

Полезная модель относится к ускорительной технике и может быть использована для измерения параметров пучков ионизирующих излучений: поперечных размеров, поперечных профилей, положения, расходимости, эмиттанса.

В связи с низкой стоимостью и простотой конструкции широкое распространение для измерения профилей пучков заряженных и нейтральных частиц получили  
5 проволоочные сетки, проволоочные сканеры, щелевые сканеры.

Известно устройство под названием «Система мониторинга пучков и система облучения пучками заряженных частиц» (US № 9044605B2, публ. 02.06.2015 г.). В патенте описан сеточный проволоочный сканер для измерения положения и поперечных  
10 профилей (распределения плотности тока) пучка ускоренных заряженных частиц. Один сканер состоит из множества тонких проводящих проволочек, натянутых на рамку в плоскости, перпендикулярной к оси пучка. Процесс измерения профиля и положения пучка заряженных частиц сводится к измерению тока, образующегося в каждой  
15 проволочке под действием пучка за счет оседания части частиц пучка и за счет выбивания вторичных частиц. К недостаткам такого сканера можно отнести низкую точность измерений, обусловленную наличием расстояния между соседними изолированными друг от друга проволочками и их конечным размером. Необходимость измерять сигнал от каждой проволочки отдельно также усложняет систему измерений.

В патенте под названием «Способ измерения параметров пучка заряженных частиц»  
20 (SU № 1684829, публ. 15.10.1991 г.) описывается устройство, в котором измерение профилей пучка заряженных частиц происходит при построении зависимости тока пучка, прошедшего через систему щелей, от его положения. К недостатку такой системы можно отнести высокую тепловую нагрузку, которой подвергается маска с проделанными щелями, что накладывает ограничение на значение тока пучка.

В патенте под названием «Устройство измерения плотности тока пучков заряженных частиц» (US № 3600580A, публ. 17.08.1971 г.) описывается проволоочный сканер, предназначенный для измерения поперечных профилей пучков заряженных частиц  
25 высокой интенсивности. Основу сканера составляет бериллиевый провод толщиной 0.25 мм. Главной особенностью устройства является высокая скорость движения провода (около 6 м/с) в перпендикулярном оси пучка направлении и тот факт, что движение провода во время сканирования профиля осуществляется за счет инерции. В  
30 процессе сканирования измеряется ток, образующийся при взаимодействии исследуемого пучка заряженных частиц со сканирующим проводом (сумма тока части пучка, попадающего на провод, и тока вторичных частиц, выбитых пучком). К недостаткам  
35 такого устройства можно отнести сложность осуществления измерений профилей пучков заряженных частиц в различных точках вдоль оси пучка, так как в этом случае потребуется установка нескольких таких сканеров (что не всегда возможно из-за ограничений, накладываемых на значения габаритных размеров устройства) или установка нескольких проволочек, с каждой из которых придется отдельно  
40 обрабатывать сигнал (что усложняет систему измерений).

Также известно техническое решение, описанное в патенте под названием «Монитор для точного измерения вертикального и горизонтального профилей пучков» (US № 20050068048A1, публ. 31.03.2005 г.). Устройство предназначено для измерения  
45 пары поперечных профилей (во взаимно перпендикулярных направлениях) пучка частиц одновременно в двух местах вдоль оси пучка. Возможность проведения таких измерений обеспечивается вращением четырех проволочек геликоидальной формы в области прохождения пучка. В процессе измерений регистрируется зависимость тока вторичных электронов от угла поворота сканера. К недостаткам такого устройства можно отнести

возможную деформацию тонких проволочек в процессе сканирования, что повлечет искажение измеряемой зависимости, а также сложность увеличения числа точек вдоль оси пучка, в котором производится сканирование. Кроме того, проблемы могут возникнуть при придании проволочкам требуемой формы.

5 Наиболее близким к предлагаемой полезной модели является устройство, описанное в патенте «Монитор тока, положения и профилей пучка электронов» (US № 4059763А, публ. 22.11.1977 г.). Измерение профилей пучка ускоренных электронов в этом устройстве осуществляется при перемещении тонких фольг в области прохождения пучка электронов в перпендикулярных его оси направлениях. При этом происходит  
10 регистрация зависимости интенсивности тормозного излучения от положения фольг. Тормозное излучение образуется в фольгах при облучении пучком ускоренных электронов, а его интенсивность пропорциональна плотности тока пучка. К недостаткам такого устройства можно отнести невозможность разделить сигналы от разных фольг, в связи с чем они не могут использоваться одновременно, а также тот факт, что  
15 тормозное излучение релятивистских электронов направлено преимущественно вдоль их скорости, поэтому детекторы, регистрирующие тормозное излучение, приходится устанавливать как можно ближе к оси пучка.

К общим недостаткам аналогов и прототипа следует отнести невозможность разделения сигналов от разных (нескольких) сканирующих элементов и получить все  
20 необходимые характеристики пучков ионизирующего излучения в процессе одного измерения.

Задачей, на решение которой направлено предлагаемое техническое решение является создание устройства, предназначенного для определения поперечных размеров, поперечных профилей, положения, расходимости, эмиттанса пучков ионизирующих  
25 излучений (пучков заряженных и нейтральных частиц) по характеристикам образующегося в проволочных сканерах под действием пучков ионизирующих излучений характеристического рентгеновского излучения.

Поставленная задача решается с помощью предлагаемого рентгенофлуоресцентного проволочного сканера профилей пучков ионизирующих излучений, который содержит  
30 держатель, сканирующие элементы, зажимы, средство для перемещения и детектор рентгеновского излучения, отличающийся тем, что сканирующие элементы выполнены в виде множества сканирующих проволочек из разных материалов, закрепленных на держателе с помощью зажимов, средством для перемещения выступает линейный транслятор, перемещающий устройство в поперечном к оси пучка направлении, а  
35 используемый детектор является энергодисперсионным и позволяет измерять спектры характеристического рентгеновского излучения, распространяющегося изотропно.

Предлагаемое устройство отличается от описанного в прототипе тем, что содержит одновременно множество сканирующих проволочек, выполненных из разных материалов. При облучении сканирующих проволочек пучком ионизирующих излучений  
40 образуется характеристическое рентгеновское излучение, энергия которого определяется элементным составом проволочек, а интенсивность пропорциональна плотности потока частиц пучка. Таким образом, спектр излучения, регистрируемого детектором, будет содержать набор узких пиков, энергия которых зависит от состава конкретной проволочки, а интенсивность (амплитуда) несет в себе информацию о характеристиках  
45 исследуемого пучка. В описанном прототипе детектор измеряет только интенсивность излучения, а не его спектр, что не позволяет разделить сигнал от нескольких сканирующих элементов. Причем в прототипе регистрируется не характеристическое, а тормозное излучение, имеющее сплошной спектр, что также не позволяет разделить

сигнал от разных сканирующих элементов. Кроме того, интенсивность тормозного излучения обратно пропорциональна квадрату массы частиц пучка, что позволяет эффективно использовать прототип только для измерения характеристик пучка электронов. В предлагаемом устройстве регистрируется характеристическое рентгеновское излучение, которое образуется под действием ионизирующего излучения любого вида, что позволяет использовать предлагаемое устройство для измерения характеристик пучков электронов, протонов, ионов, атомов, рентгеновского и гамма-излучения. В прототипе используются детекторы, предназначенные для измерения интенсивности тормозного излучения, которые необходимо располагать как можно ближе к оси исследуемого пучка. В предлагаемом устройстве используется энергодисперсионный детектор, предназначенный для измерения спектров характеристического рентгеновского излучения, распространяющегося изотропно (во всех направлениях), что позволяет расположить детектор в произвольном месте относительно оси пучка и сканирующих проволочек (последние при этом должны остаться в области видимости детектора).

Преимущество предлагаемого изобретения заключается в возможности одновременного (за один проход) измерения поперечных профилей пучков ионизирующих излучений в различных местах вдоль оси пучка, где установлены сканирующие проволочки, посредством регистрации спектров характеристического излучения проволочек, выполненных из разных материалов, используя всего один энергодисперсионный детектор рентгеновского излучения, а также в возможности по результатам измерений определить необходимые характеристики: положение (траекторию), размеры, расходимость и эмиттанс пучка.

Технический результат заключается в высокой точности полученных в процессе одного измерения основных характеристик пучков ионизирующего излучения: поперечных размеров, поперечных профилей, положения, расходимости, эмиттанса. Это достигается посредством размещения в нескольких местах вдоль оси пучка сканирующих проволочек, выполненных из разных материалов и закрепленных в держателе, способном перемещать сканирующие проволочки в поперечном к оси пучка направлении, с последующей регистрацией спектров характеристического рентгеновского излучения, образующегося при взаимодействии сканирующих проволочек с пучком ионизирующего излучения, энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения.

Полезная модель поясняется чертежами.

Фиг. 1 – Общий вид предлагаемой полезной модели (вид сбоку).

Фиг. 2 – Схема работы рентгенофлуоресцентного проволочного сканера профилей пучков ионизирующих излучений (вид сверху).

Фиг. 3 – Спектры рентгеновского излучения, измеренные энергодисперсионным детектором.

Фиг. 4 – Поперечный профиль пучка ионизирующего излучения, измеренный при помощи рентгенофлуоресцентного проволочного сканера профилей пучков ионизирующих излучений.

Фиг. 5 – Зависимость размера пучка от расстояния, измеренная при помощи рентгенофлуоресцентного проволочного сканера профилей пучков ионизирующих излучений.

Устройство состоит из держателя 1, зажимов 2, сканирующих проволочек 3, линейного транслятора 4 (Фиг. 1) и энергодисперсионного детектора 5 рентгеновского излучения (Фиг. 2).

На держатель 1, выполненный в виде рамки, устанавливаются зажимы 2 для последовательного крепления сканирующих проволочек 3. Сканирующие проволочки 3 могут быть выполнены из различных материалов, имеющих разные (не совпадающие друг с другом) энергии характеристического излучения, например, из титана, меди, молибдена, вольфрама, платины и др. или углерода с нанесенным покрытием, что позволит разделить регистрируемые энергодисперсионным детектором 5 рентгеновского излучения сигналы от каждой из них. Длина каждой сканирующей проволочки 3 должна обеспечивать возможность ее закрепления с помощью зажимов 2 в держателе 1, а толщина должна быть существенно меньше поперечных размеров пучка ионизирующего излучения. Держатель 1 с закрепленными сканирующими проволочками 3 устанавливается на линейный транслятор 4. Линейный транслятор 4, обеспечивает перемещение держателя 1 со сканирующими проволочками 3 в перпендикулярном к оси пучка направлении (Фиг. 2). Для измерения спектров рентгеновского излучения, образующегося при взаимодействии пучка ионизирующего излучения с проволочками, используется энергодисперсионный детектор 5 рентгеновского излучения.

Измерение характеристик пучка (сканирование, испускаемого) с помощью предлагаемого устройства происходит следующим образом: держатель 1 с закрепленными с помощью зажимов 2 сканирующими проволочками 3 крепится к линейному транслятору 4 под некоторым углом  $\alpha$  (Фиг. 2), значение которого может быть равно и  $0^\circ$ , но в этом случае проволочки будут располагаться одна за другой вдоль оси пучка, что допустимо при измерении характеристик пучков частиц высоких энергий. Затем, при перемещении держателя 1, с установленными сканирующими проволочками 3 закрепленными зажимами 2, с помощью линейного транслятора 4 происходит поочередное или одновременное пересечение проволочками пучка ионизирующего излучения. Число сканирующих проволочек 3, взаимодействующих с пучком одновременно, определяется поперечным размером пучка и углом  $\alpha$  между осью пучка и держателем 1. При взаимодействии пучка ионизирующих излучений со сканирующими проволочками 3 образуется характеристическое излучение, спектр которого на каждом шаге транслятора 4 регистрируется энергодисперсионным детектором 5 рентгеновского излучения, например, полупроводниковым кремниевым или кадмий-теллурическим детектором. Энергодисперсионный детектор 5 рентгеновского излучения должен обеспечивать возможность измерения спектров в диапазоне энергий характеристического рентгеновского излучения, испускаемого каждой сканирующей проволочкой 3. Энергодисперсионный детектор 5 рентгеновского излучения может устанавливаться под любым углом  $\beta$  относительно оси пучка ионизирующего излучения, требуется только, чтобы в область видимости энергодисперсионного детектора 5 попадали все сканирующие проволочки 3. При этом измеряется зависимость интенсивности характеристического излучения от положения держателя 1 со сканирующими проволочками 3. Эта зависимость и является поперечным профилем (поперечным распределением плотности потока) пучка ионизирующего излучения. Поскольку сканирующие проволочки 3 выполнены из разных материалов, их характеристическое излучение имеет разную энергию, что позволяет разделить сигналы от каждой из сканирующих проволочек 3 в регистрируемых спектрах, даже в случае их одновременного взаимодействия с пучком. Полученные для каждой из сканирующих проволочек 3 зависимости интенсивности характеристического излучения от положения держателя 1 позволяют определить поперечные профили пучка в местах расположения сканирующих проволочек 3. Таким образом, при помощи полезной модели за один

проход можно измерить поперечные профили пучка в разных точках (число измеряемых профилей определяется количеством сканирующих проволочек 3), расположенных вдоль его оси. По измеренным профилям можно определить, как вдоль оси изменяется размер пучка ионизирующего излучения, что позволяет вычислить расходимость и эмиттанс пучка. Также измеренные профили позволяют измерить реальное положение пучка относительно предполагаемой оси.

Предлагаемое устройство может содержать неограниченное количество расположенных на любом расстоянии сканирующих проволочек 3, выполненных из различных материалов, различной длины и толщины. Все геометрические размеры предлагаемой полезной модели могут варьировать в зависимости от поставленной задачи и характеристик используемого энергодисперсионного детектора 5 рентгеновского излучения, в частности, рабочего диапазона энергий и энергетического разрешения, и это не повлияет на полученный технический результат. Также устройство позволяет производить измерения как в условиях вакуума, так и при атмосферном давлении. Требование к давлению остаточных газов в области распространения пучка диктуется параметрами этого пучка (энергией и типом частиц), а не особенностями работы полезной модели. В случае осуществления измерений при атмосферном давлении необходимо принять во внимание, что рентгеновское излучение с энергией ниже 5 кэВ сильно поглощается в воздухе, что накладывает ограничение на выбор материала для изготовления сканирующих проволочек 3.

#### Конкретный пример работы устройства

Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений использовался для измерения характеристик пучка электронов с энергией 40 кэВ и постоянным током 1 мкА, испускаемого электронной пушкой и фокусируемого магнитной соленоидальной линзой. На держатель 1 длиной 200 мм, шириной 100 мм с помощью зажимов 2 были установлены последовательно пять сканирующих проволочек 3: титановая, вольфрамовая, молибденовая, медная и платиновая. Титановая сканирующая проволочка толщиной 45 мкм была установлена на расстоянии 11 мм от внутреннего края держателя 1, затем на расстоянии 38.5 мм от нее была установлена вольфрамовая сканирующая проволочка толщиной 100 мкм, затем на расстоянии 42.5 мм от вольфрамовой была установлена молибденовая сканирующая проволочка толщиной 100 мкм, затем на расстоянии 39.5 мм от молибденовой была установлена медная сканирующая проволочка толщиной 85 мкм и последней на расстоянии 26.3 мм от медной была установлена платиновая сканирующая проволочка толщиной 95 мкм. Держатель 1 с закрепленными с помощью зажимов 2 сканирующими проволочками 3 устанавливался на моторизованный вакуумный линейный транслятор 4 Standa 8MT175-100-VSS42 и помещался в вакуумную камеру, где поддерживалось давление порядка  $1 \times 10^{-5}$  торр. В качестве энергодисперсионного детектора 5 рентгеновского излучения использовался полупроводниковый кремниевый дрейфовый детектор Amptek XR-100SDDfast (совместно с блоком спектрометрической аппаратуры Amptek PX5), способный измерять спектры рентгеновского излучения в диапазоне 1–20 кэВ с разрешением около 130 эВ и эффективностью выше 20 %. Энергодисперсионный детектор 5 рентгеновского излучения монтировался на фланец вакуумной камеры под углом  $\beta = 150^\circ$  к оси пучка (Фиг. 2). Держатель 1 с установленными сканирующими проволочками 3 был повернут относительно оси пучка на угол  $\alpha = 9^\circ$ . Такая геометрия позволила измерить профили пучка электронов на расстояниях 78 мм (платиновая сканирующая проволочка), 104 мм (медная сканирующая проволочка), 143 мм (молибденовая сканирующая проволочка), 185 мм

(вольфрамовая сканирующая проволочка) и 223 мм (титановая сканирующая проволочка) от центра соленоидальной линзы. В процессе измерений держатель 1 с закрепленными сканирующими проволочками 3 перемещался перпендикулярно оси пучка при помощи линейного транслятора 4 с шагом 0.2 мм. При этом сканирующие проволочки 3 пересекали пучок электронов по очереди. На каждом шаге с помощью энергодисперсионного детектора 5 рентгеновского излучения в течение 1 секунды происходило измерение спектра рентгеновского излучения, образующегося в сканирующих проволочках 3 под действием пучка (примеры измеренных спектров излучения от разных сканирующих проволочек 3 представлены на Фиг. 3). После завершения сканирования (после того как все проволочки пересекли пучок электронов) были построены зависимости интенсивности характеристических линий, соответствующих каждой сканирующей проволочке 3, от положения держателя 1. Эти зависимости соответствуют распределениям плотности тока, то есть поперечным профилям пучка электронов, поскольку интенсивность характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) пропорциональна току пучка. Пример измеренного таким образом профиля пучка для молибденовой сканирующей проволочки представлен на Фиг. 4. Измеренные профили позволили определить размер пучка (величину стандартного отклонения  $\sigma$ ) на разных расстояниях от фокусирующей соленоидальной линзы и вычислить расходимость и эмиттанс пучка. На Фиг. 5 представлена зависимость величины квадрата стандартного отклонения от расстояния для исследуемого пучка электронов (точками обозначены измеренные значения, линией – результат фитирования параболой  $\sigma^2 = A(x - x_0)^2 + \sigma_0^2$ , где  $x$  – расстояние от линзы;  $A = 2.774 \cdot 10^{-4}$ ,  $x_0 = 0.166$  м и  $y_0 = 1.504 \cdot 10^{-4}$  м – параметры фитирования). Из полученных данных было определено, что минимальный размер пучка (ширина на полувысоте) достигается на расстоянии 166 мм от линзы и составляет  $2.355y_0 = 0.35$  мм, эмиттанс составляет  $e = y_0\sqrt{A} = 2.51$  р мм мрад (нормализованный эмиттанс 1.01 р мм мрад), а расходимость пучка равна  $2\arctg(e/y_0) = 1.92^\circ$ .

Устройство найдет применение в ускорителях заряженных частиц низких и высоких энергий; в электронных, протонных и ионных микроскопах; в системах электронной и ионной литографии; в установках ионной имплантации; в системах, содержащих источники нейтральных атомов, молекул, рентгеновского и гамма-излучения, и в других устройствах, где используются пучки ионизирующих излучений.

35

#### (57) Формула полезной модели

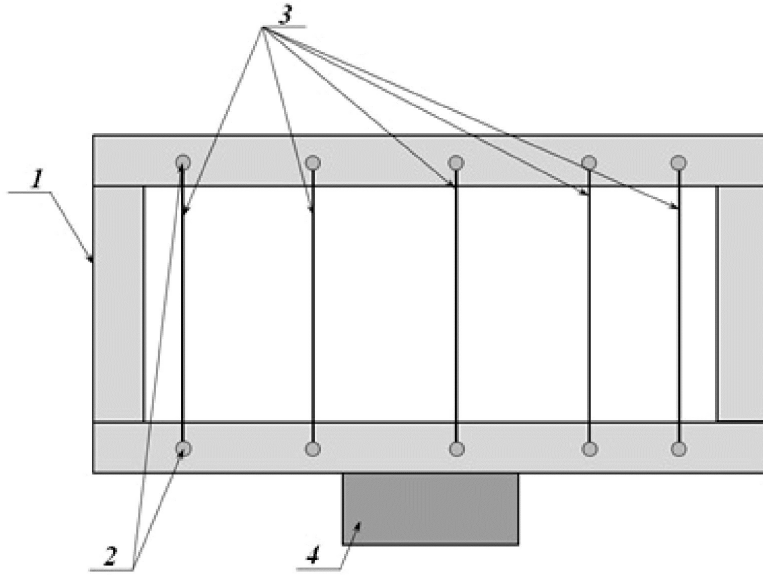
Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений, содержащий держатель, сканирующие элементы, зажимы, средство для перемещения и детектор, отличающийся тем, что сканирующие элементы выполнены в виде множества сканирующих проволочек из разных материалов, закрепленных на держателе с помощью зажимов, а средством для перемещения является линейный транслятор, перемещающий устройство в поперечном к оси пучка направлении, причем детектор, измеряющий спектры характеристического рентгеновского излучения, распространяющегося изотропно, является энергодисперсионным.

45

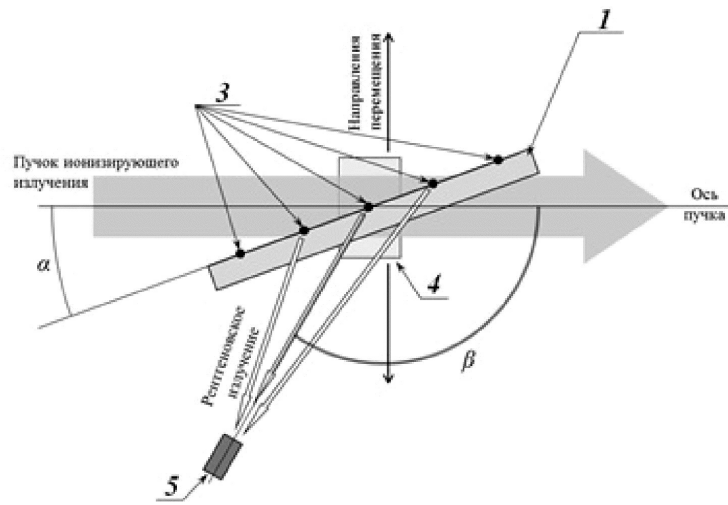


1

**Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер  
профилей пучков ионизирующих излучений**



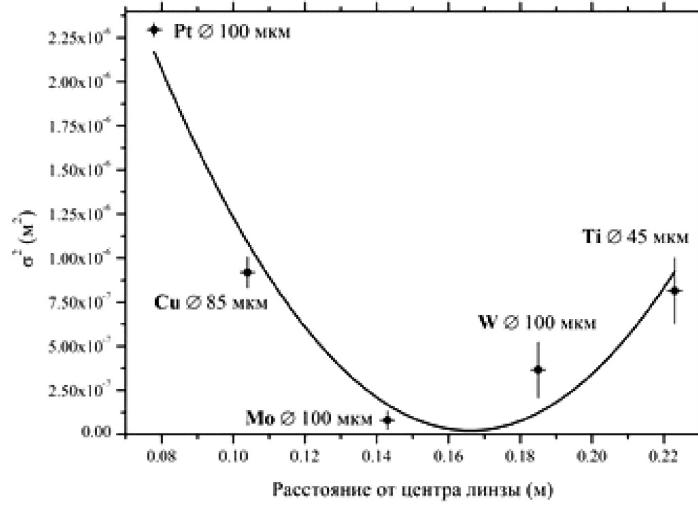
**Фиг. 1**



**Фиг. 2**

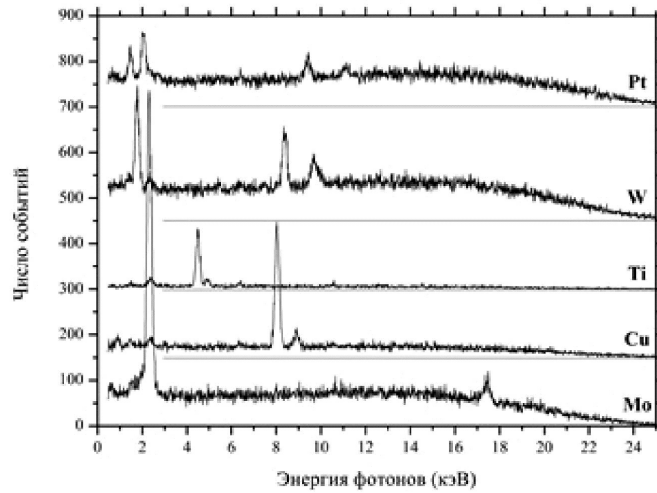
2

**Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер  
профилей пучков ионизирующих излучений**

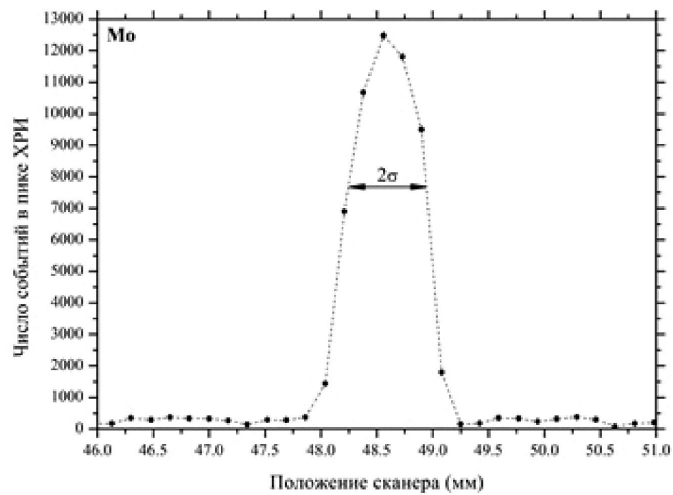


**Фиг. 5**

**Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер  
профилей пучков ионизирующих излучений**



**Фиг. 3**



**Фиг. 4**