



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01T 1/29 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2021105367, 02.03.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.03.2021

Дата регистрации:
24.05.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.03.2021

(45) Опубликовано: 24.05.2021 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

308015, Белгородская обл., г. Белгород, ул.
Победы, 85, НИУ "БелГУ", ОИС, Цуриковой
Н.Д.

(72) Автор(ы):

Нажмудинов Рамазан Магомедшапиевич
(RU),

Каплий Анна Андреевна (UA),

Кубанкин Александр Сергеевич (RU),

Кищин Иван Александрович (RU),

Болотов Егор Владимирович (RU)

(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: RU 182076 U1, 07.08.2018. RU 78576
U1, 27.11.2008. US 4059763 A, 22.11.1977. US
2005068048 A1, 31.05.2005.

(54) Устройство для измерения пространственных характеристик пучков ионизирующих излучений

(57) Реферат:

Полезная модель относится к ускорительной технике и может быть использована для измерения параметров пучков ионизирующих излучений: поперечных размеров, формы, поперечных профилей, положения, расходимости, эмиттанса. Устройство содержит сканирующие элементы, зажимы, держатели, энергодисперсионный рентгеновский детектор, линейный транслятор. Сканирующие элементы выполнены Г-образной формы и закреплены зажимами в держателях, связанных при помощи шарнирных соединений с направляющими,

которые прикреплены к основанию также шарнирными соединениями, кроме того, устройство дополнительно содержит моторизованный привод, осуществляющий управление сканирующими элементами. Предлагаемая полезная модель позволяет простым способом производить измерение характеристик пучков ионизирующих излучений: поперечных размеров, поперечных профилей, положения в пространстве, расходимости, эмиттанса.

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

Известен «Способ измерения параметров пучка заряженных частиц» (SU № 1684829, публ. 15.10.1991 г.). В патенте описывается устройство, содержащее маску, в которой под определенным углом проделаны щели. Измерение профилей пучка заряженных
10 частиц описанным способом 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, что накладывает ограничение на значение тока пучка.

В патенте под названием «Устройство измерения плотности тока пучков заряженных
15 частиц» (US № 3600580A, публ. 17.08.1971 г.) описывается проволоочный сканер, предназначенный для измерения поперечных профилей пучков заряженных частиц 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
20 движение провода во время сканирования профиля осуществляется за счет инерции. В процессе сканирования измеряется ток, образующийся при взаимодействии исследуемого пучка заряженных частиц со сканирующим проводом. К недостаткам такого устройства можно отнести сложность осуществления измерений профилей пучков заряженных частиц в различных точках вдоль оси пучка, так как в этом случае потребуется установка
25 нескольких таких сканеров (что не всегда возможно из-за ограничений, накладываемых на значения габаритных размеров устройства) или установка нескольких проволоочек, с каждой из которых придется отдельно обрабатывать сигнал (что усложняет систему измерений).

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

Известно устройство (Cutler R.I., Mohr J.K., Whittaker J.K., Yoder N.R. A high resolution wire scanner beam profile monitor with a microprocessor data acquisition system // IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, Vol. NS-30, No. 4, P. 2213–2215), в котором измерение пары поперечных профилей пучка заряженных частиц определяется по току вторичной
45 электронной эмиссии, образуемому при взаимодействии частиц пучка с проволоочкой, имеющей Г-образную форму. К недостаткам такого устройства можно отнести возможность измерения профилей только в одной точке пространства и сложность разделения сигналов при использовании в устройстве нескольких проволоочек.

Известно устройство (Ross M.C., Seeman J.T., Bong E., Hendrickson L., McCormick D., Sanchez-Chopitea L. Wire scanners for beam size and emittance measurements at the SLC // Conference Record of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco, CA, USA, 1991, vol.2, pp. 1201–1203) для определения профилей пучков при помощи
5 фотоэлектронного умножителя регистрируется интенсивность тормозного излучения, образующегося в проволочках Г-образной формы. К недостаткам такого устройства можно отнести невозможность разделить сигналы от разных проволочек и тот факт, что тормозное излучение релятивистских частиц направлено преимущественно вдоль их скорости, поэтому детекторы, регистрирующие тормозное излучение, приходится
10 устанавливать как можно ближе к оси пучка (чему могут препятствовать конструкционные особенности вакуумной системы).

Наиболее близким по исполнению к предлагаемой полезной модели является устройство, описанное в патенте «Рентгенофлуоресцентный проволочный сканер профилей пучков ионизирующих излучений» (RU № 182076 U1, публ. 07.08.2018 г.).
15 Устройство состоит из держателя, зажимов, сканирующих проволочек, линейного транслятора и энергодисперсионного детектора рентгеновского излучения. Измерение характеристик пучка ионизирующего излучения в этом устройстве осуществляется при перемещении набора проволочек из разных материалов в перпендикулярном к оси пучка направлении. При этом энергодисперсионный детектор регистрирует
20 интенсивность характеристического рентгеновского излучения, образующегося в проволочках, в зависимости от их положения. К недостаткам такого устройства можно отнести возможность измерять характеристики пучка только в одной плоскости, что не позволяет определить форму пучков с несимметричным поперечным сечением и их реальное положение в пространстве, а также невозможность изменять во время работы
25 положения проволочек относительно друг друга, что существенно осложняет проведение измерений в случае, когда характеристики пучков существенно изменяются с течением времени.

К общим недостаткам аналогов и прототипа следует отнести невозможность увеличения числа сканирующих элементов без осложнения конструкции системы сбора
30 данных, а также невозможность одновременного измерения основных характеристик пучка ионизирующего излучения (размеров, формы, траектории, расходимости, эмиттанса).

Задачей, на решение которой направлено предлагаемое техническое решение, является создание устройства, позволяющего одновременно в двух взаимно перпендикулярных
35 плоскостях измерять поперечные размеры, поперечные профили, положения, расходимости, эмиттанс пучков ионизирующих излучений (пучков заряженных и нейтральных частиц) любой формы по характеристикам рентгеновского излучения, образующегося в сканирующих элементах под действием пучков.

Поставленная задача решается с помощью предлагаемого устройства для измерения
40 пространственных характеристик пучков ионизирующих излучений, включающего сканирующие элементы, зажимы, держатели, энергодисперсионный рентгеновский детектор, линейный транслятор, причем сканирующие элементы, выполнены Г-образной формы и закреплены зажимами в держателях, связанных при помощи шарнирных соединений с направляющими, которые прикреплены к основанию также шарнирными
45 соединениями, кроме того устройство дополнительно содержит моторизованный привод, осуществляющий управление сканирующими элементами.

Предлагаемое устройство отличается от описанного в прототипе тем, что сканирующие элементы, выполненные из разных материалов, имеют Г-образную форму,

а также наличием шарнирных соединений и моторизованного привода, позволяющих изменять положение сканирующих элементов относительно друг друга. Г-образная форма сканирующих элементов позволяет определять поперечные профили и размеры пучков ионизирующих излучений, соответствующие двум взаимно перпендикулярным плоскостям (направлениям), что позволяет выполнить оценку формы пучка. В описанном прототипе характеристики пучка измеряются только в одной плоскости, что позволяет использовать прототип только при работе с осесимметричными пучками (круглой формы). Наличие шарнирных соединений и моторизованного привода позволяет в процессе измерений изменять расстояние между сканирующими элементами и их положение относительно друг друга, что обеспечивает возможность оперативного выбора оптимальной геометрии измерений при изменении пространственных параметров пучка ионизирующего излучения, а также обеспечивает возможность проведения измерений в разных точках, расположенных вдоль оси пучка, повышая тем самым точность определения его характеристик.

Преимущество предлагаемой полезной модели заключается в возможности одновременного (за один проход) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях измерения поперечных профилей пучков ионизирующих излучений любой формы в различных местах вдоль оси пучка, где установлены сканирующие элементы Г-образной формы, посредством регистрации спектров характеристического излучения сканирующих элементов, выполненных из разных материалов, используя всего один энергодисперсионный рентгеновский детектор рентгеновского излучения, а также в возможности по результатам измерений определить положение (траекторию), размеры, расходимость, форму и эмиттанс пучка ионизирующего излучения любой формы.

Технический результат заключается в одновременном измерении характеристик пучков ионизирующего излучения любой формы: поперечных размеров, поперечных профилей, формы, положения, расходимости, эмиттанса, — в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Это достигается посредством размещения в нескольких местах вдоль оси пучка сканирующих элементов Г-образной формы, выполненных из разных материалов и закрепленных в держателях, положение которых можно изменять относительно друг друга. Держатели со сканирующими элементами монтируются на линейном трансляторе, способном одновременно перемещать все сканирующие элементы в поперечном к оси пучка направлении. Параметры пучков определяются по спектрам характеристического рентгеновского излучения, образующегося при взаимодействии пучка ионизирующего излучения со сканирующими элементами и регистрируемых энергодисперсионным рентгеновским детектором.

Полезная модель поясняется чертежом.

Фиг. 1 — Общий вид предлагаемой полезной модели

Фиг. 2 — Общий вид держателя с закрепленным сканирующим элементом

Фиг. 3 — Настройка положения сканирующих элементов при помощи

моторизованного привода

Фиг. 4 — Изображение держателя с закрепленным сканирующим элементом

Фиг. 5 — Спектры рентгеновского излучения, образующегося в сканирующих элементах под действием пучка

Фиг. 6 — Поперечные профили пучка ионизирующего излучения, измеренные при помощи предлагаемой полезной модели

Фиг. 7 — Зависимость размеров и формы пучка от расстояния, измеренная при помощи предлагаемой полезной модели

Устройство (Фиг.1) состоит из сканирующих элементов 1, зажимов 2, держателей 3,

энергодисперсионного рентгеновского детектора 4, направляющих 5, шарнирных соединений 6 и 8, основания 7, моторизованного привода 9 и линейного транслятора 10.

Сканирующие элементы 1 при помощи зажимов 2 крепятся на держатели 3 (Фиг. 2). Сканирующие элементы 1 имеют Г-образную форму и могут быть выполнены или иметь покрытия из различных материалов с не совпадающими друг с другом значениями энергии характеристического рентгеновского излучения, что позволит разделить регистрируемые энергодисперсионным рентгеновским детектором 4 сигналы от каждого сканирующего элемента 1. Длина каждого сканирующего элемента 1 должна обеспечивать возможность его закрепления с помощью зажимов 2 в держателе 3, а толщина должна быть существенно меньше поперечных размеров пучка ионизирующего излучения. Держатели 3 соединяются между собой посредством направляющих 5 и шарнирных соединений 6. Направляющие 5 с установленными на них держателями 3, крепятся к основанию 7 при помощи шарнирных соединений 8. Шарнирные соединения 6 и 8 позволяют изменять относительное расположение сканирующих элементов 1 в держателях 3 относительно друг друга, сохраняя их параллельность (Фиг. 3). Управление положением держателей 3 относительно друг друга и угол между направляющими 5 и осью пучка осуществляется при помощи моторизованного привода 9. Основание 7 монтируется на линейный транслятор 10, который обеспечивает перемещение всего устройства в целом в перпендикулярном к предполагаемой оси пучка направлении (направления перемещения устройства показаны стрелкой на Фиг. 1 и 4). Для измерения спектров рентгеновского излучения (Фиг. 5), образующегося при взаимодействии пучка ионизирующего излучения со сканирующими элементами 1, используется энергодисперсионный рентгеновский детектор 4.

Измерение характеристик пучка (сканирование) с помощью предлагаемого устройства происходит следующим образом: устройство в собранном виде (Фиг. 1) размещается на участке пучкового канала, где требуется выполнить измерения характеристик пучка ионизирующего излучения. С помощью моторизованного привода 9 настраивается угол между направляющими 5 и осью пучка (устройство при максимальных углах наклона направляющих 5 показано на Фиг. 3а и 3в; на Фиг. 3б показан случай, когда направляющие 5 параллельны оси пучка). Угол между направляющими 5 и осью пучка ионизирующего излучения определяет расстояние между сканирующими элементами 1, измеряемого вдоль оси пучка. Далее при помощи линейного транслятора 10 происходит одновременное перемещение держателей 3 с закрепленными сканирующими элементами 1 в перпендикулярном к предполагаемой оси пучка направлении (как показано стрелкой на Фиг. 1) с заданным шагом. При этом сканирующие элементы 1 последовательно или одновременно пересекают пучок. Благодаря Г-образной форме пересечение пучка сканирующим элементом 1 происходит в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (Фиг. 4). При взаимодействии пучка ионизирующих излучений со сканирующими элементами 1 образуется характеристическое рентгеновское излучение, спектр которого на каждом шаге транслятора 10 регистрируется энергодисперсионным рентгеновским детектором 4. Энергодисперсионный рентгеновский детектор 4 должен обеспечивать возможность измерения спектров в диапазоне энергий характеристического рентгеновского излучения, испускаемого каждым сканирующим элементом 1. Во время сканирования измеряется зависимость интенсивности характеристического рентгеновского излучения от положения держателей 3 со сканирующими элементами 1 (Фиг. 6). Эта зависимость и содержит поперечные профили (поперечные распределения плотности потока) пучка ионизирующего

излучения, измеренные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в месте расположения конкретного сканирующего элемента 1. Поскольку сканирующие элементы 1 выполнены из разных материалов, их характеристическое излучение имеет разную энергию, что позволяет разделить сигналы от каждого из сканирующих элементов 1 в регистрируемых спектрах, даже в случае их одновременного взаимодействия с пучком. Полученные для каждого сканирующего элемента 1 зависимости интенсивности характеристического излучения от координаты держателя 3 (или транслятора 10) позволяют определить поперечные профили пучка в местах расположения сканирующих элементов 1. Таким образом, при помощи полезной модели за один проход можно получить данные о поперечных профилях пучка, измеренные во взаимно перпендикулярных направлениях, в разных точках (число этих точек определяется количеством сканирующих элементов 1), расположенных вдоль оси пучка. По измеренным профилям можно определить, как изменяются размер и форма пучка ионизирующего излучения, что позволяет вычислить расходимость и эмиттанс пучка. Также измеренные профили позволяют установить реальное положение пучка относительно предполагаемой оси.

Предлагаемое устройство может дополнительно содержать неограниченное количество расположенных на любом расстоянии сканирующих элементов 1, выполненных из различных материалов. Также устройство позволяет производить измерения как в условиях вакуума, так и при атмосферном давлении. Требование к давлению остаточных газов в области распространения пучка определяется 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 низких энергий поглощается в воздухе, что накладывает ограничение на выбор материала для изготовления сканирующих элементов.

Пример работы устройства.

Предлагаемая полезная модель использовалась для определения положения, формы, размеров, расходимости и эмиттанса пучков электронов с энергией 10–50 кэВ, током около 1 мкА и минимальным размером около 0.3 мм. В качестве сканирующих элементов 1 использовались металлические проволочки толщиной 0.1 мм, изготовленные из титана, меди, вольфрама и платины, закрепленные на дюралюминиевых держателях 3 при помощи винтовых зажимов 2. При помощи моторизованного привода 9 устанавливался угол между направляющими 5 и предполагаемой осью пучка, при котором в процессе сканирования перекрытие пучка сканирующими элементами 1 происходило по очереди. Для измерения спектров характеристического рентгеновского излучения, образующегося в сканирующих элементах 1 под действием пучка, использовался полупроводниковый кремниевый энергодисперсионный рентгеновский детектор 4, способный измерять спектры излучения в диапазоне энергий 1–20 кэВ с разрешением 130 эВ. Все элементы устройства помещались в вакуумную камеру, в которой поддерживалось давление остаточных газов 1×10^{-3} Па. В процессе измерений электромеханический линейный транслятор 10 перемещал все элементы устройства, закрепленные на основании 7, перпендикулярно оси пучка с шагом 0.1 мм. На каждом шаге энергодисперсионный рентгеновский детектор 4 регистрировал спектр характеристического рентгеновского излучения, образующегося в сканирующих элементах 1 (примеры спектров представлены на Фиг. 5). После сканирования строились зависимости интенсивности излучения каждого сканирующего элемента 1 от координаты

положения держателя 3. Данные зависимости (Фиг. 6) содержат два пика, соответствующие поперечным профилям пучка, измеренным во взаимно перпендикулярных плоскостях (направлениях), и позволяют определить поперечные размеры пучка σ_x и σ_y и его координаты в местах расположения каждого сканирующего элемента 1. Горизонтальная L и вертикальная H координаты пучка могут быть определены по формулам:

$$L = (l_1 + l_2)/2 + L_0, H = (l_1 - l_2)/2 + H_0,$$

где L – горизонтальная координата пучка ,

l_1 и l_2 – положение максимумов пиков интенсивности характеристического рентгеновского излучения (Фиг. 6),

H – вертикальная координата пучка,

L_0 и H_0 – константы, определяемые при юстировке устройства.

На основе измеренных размеров σ_x и σ_y пучка строят зависимости (Фиг. 6), полученные в результате фитирования по формулам:

$$\sigma_x^2 = A_x(z - z_0)^2 + \sigma_{x,\min}^2, \sigma_y^2 = A_y(z - z_0)^2 + \sigma_{y,\min}^2$$

где σ_x и σ_y – размеры пучка,

z – координата вдоль оси пучка,

$\sigma_{x,\min}$ и $\sigma_{y,\min}$ – минимальные размеры пучка,

z_0 , A_x и A_y – параметры фитирования.

Результаты фитирования (Фиг. 7) позволяют определить, как меняются размеры и форма пучка, а также вычислить расходимости и эмиттансы:

$$\varepsilon_x = \sigma_{x,\min} \sqrt{A_x}, \varepsilon_y = \sigma_{y,\min} \sqrt{A_y}$$

$$\theta_x = 2 \arctg(\varepsilon_x / \sigma_{x,\min}), \theta_y = 2 \arctg(\varepsilon_y / \sigma_{y,\min}),$$

где ε_x и ε_y – эмиттансы пучка,

θ_x и θ_y – расходимости пучка,

$\sigma_{x,\min}$ и $\sigma_{y,\min}$ – минимальные размеры пучка,

A_x и A_y – параметры фитирования.

Применение предлагаемого устройства возможно 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. Предлагаемая полезная модель позволяет простым способом производить измерение характеристик пучков ионизирующих излучений: поперечных размеров, поперечных профилей, положения в пространстве, расходимости, эмиттанса.

(57) Формула полезной модели

Устройство для измерения пространственных характеристик пучков ионизирующих излучений, содержащее сканирующие элементы, зажимы, держатели, энергодисперсионный рентгеновский детектор, линейный транслятор, отличающееся тем, что сканирующие элементы выполнены Г-образной формы и закреплены зажимами в держателях, связанных при помощи шарнирных соединений с направляющими, которые прикреплены к основанию также шарнирными соединениями, кроме того, устройство дополнительно содержит моторизованный привод, осуществляющий управление сканирующими элементами.

15

20

25

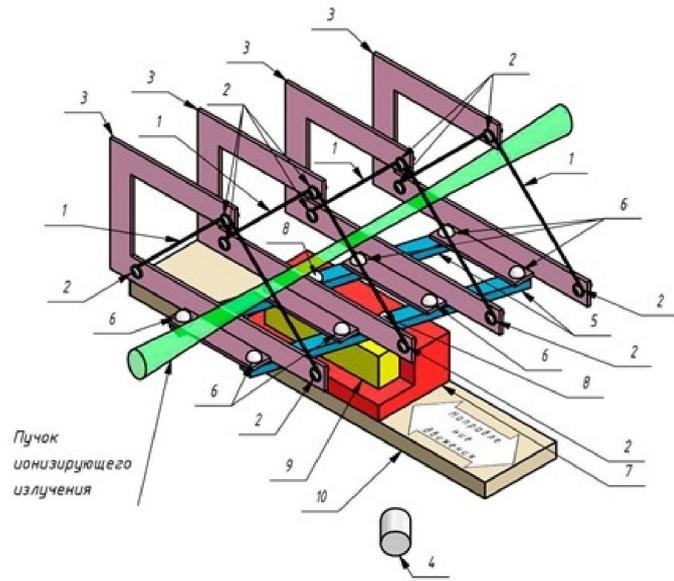
30

35

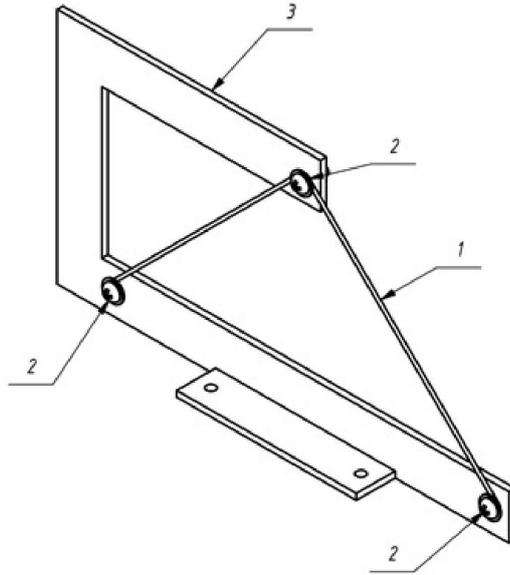
40

45

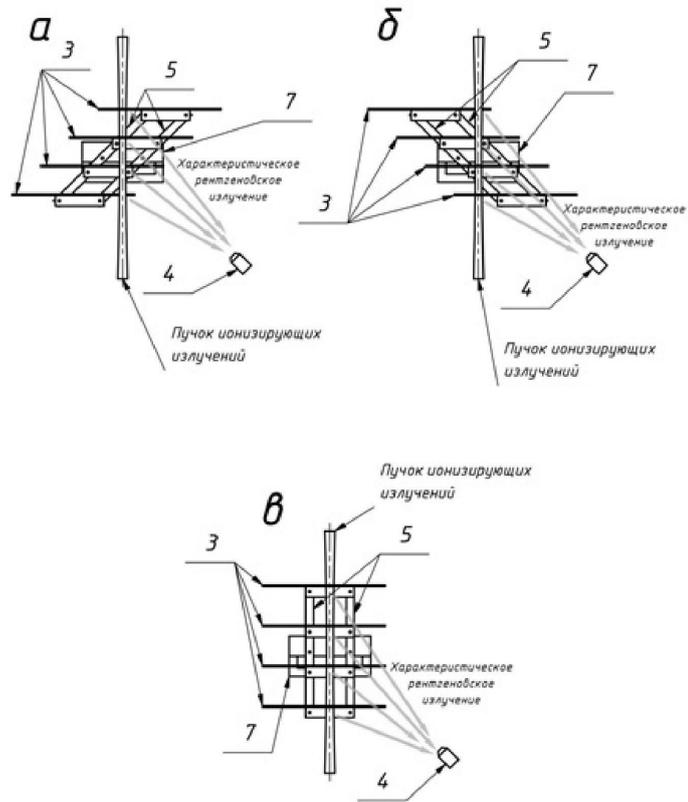
1



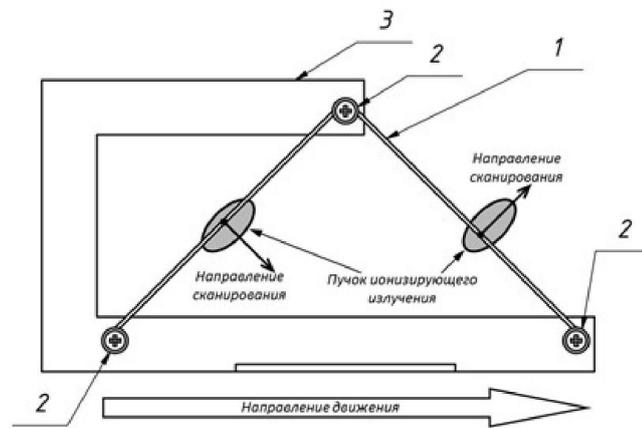
2



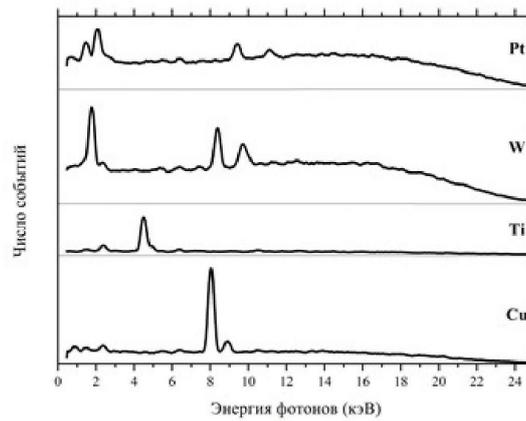
Фиг. 2



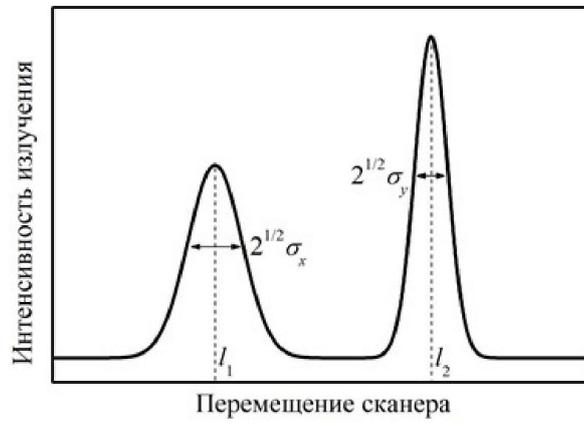
Фиг. 3



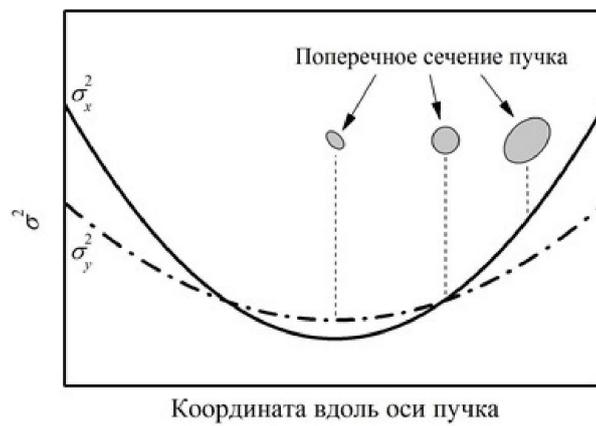
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7