

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2523424

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет" (ФГБОУ ВПО "СПбГПУ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013100558

Приоритет изобретения 09 января 2013 г.

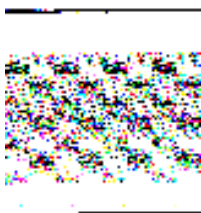
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 26 мая 2014 г.

Срок действия патента истекает 09 января 2033 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013100558/07, 09.01.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
09.01.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.01.2013

(45) Опубликовано: 20.07.2014 Бюл. № 20

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Мордасов Н.Г., Диагностика трубчатого пучка релятивистских электронов по передаточной функции мишени-конвертера, ЖТФ, 2003, т.73, N2, с.107-112. RU 2006879C2, 30.01.1994. RU 2155413C2, 27.08.2000. RU 2416111C1, 10.04.2011. JPS 58027079A, 17.02.1993. US 7995706B2, 09.08.2011. WO 95020241A1, 27.07.1995

Адрес для переписки:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул.,  
29, ФГБОУ ВПО "СПбГПУ", Отдел  
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Архипов Александр Викторович (RU),  
Дворецкая Наталья Владиславовна (RU),  
Лукша Олег Игоревич (RU),  
Соминский Геннадий Гиршевич (RU),  
Герд Гантенбейн (DE),  
Стефан Керн (DE)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Санкт-  
Петербургский Государственный  
политехнический университет" (ФГБОУ  
ВПО "СПбГПУ") (RU)

## (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

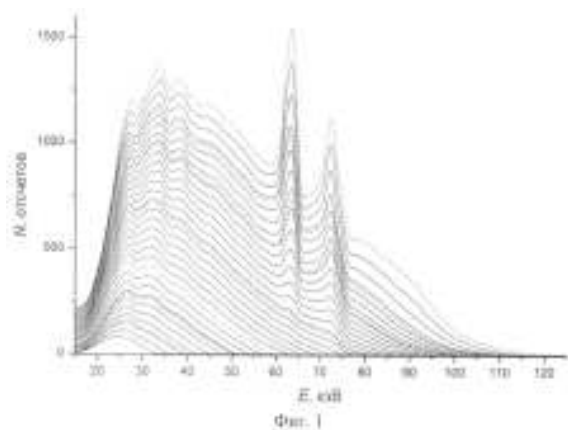
(57) Реферат:

Изобретение относится к технике измерения электрических величин, а также к технике определения характеристик электронных потоков с магнитным удержанием и может быть использовано в высоковольтных и сильноточных электронно-лучевых приборах, находящих применение в электронной технике, при реализации разнообразных технологических процессов и в физическом эксперименте. Способ включает выделение тормозного рентгеновского излучения с участка поверхности твердого тела, бомбардируемого электронами, измерение характеристик тормозного рентгеновского излучения и определение энергетического распределения в пучке электронов на основе данных о тормозном рентгеновском излучении. В любой последовательности измеряют

энергетический спектр тормозного рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка и спектры тормозного рентгеновского излучения моноэнергетических пучков, создаваемых в той же системе формирования в условиях пренебрежимо малого разброса по энергии электронов в пучках, измеряют энергетические спектры тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических электронных пучков при дискретных значениях энергии электронов в этих пучках, на основе данных об энергетических спектрах тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических электронных пучков рассчитывают функцию ядра обратного интегрального преобразования и определяют энергетическое распределение электронов в

исследуемом пучке путем выполнения операции обратного интегрального преобразования с полученным ядром к функции, описывающей

спектр рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка. 4 ил.



R U 2 5 2 3 4 2 4 C 1 4 2 4 2 4

R U 2 5 2 3 4 2 4 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H01J 47/00* (2006.01)  
*G01R 29/00* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013100558/07, 09.01.2013

(24) Effective date for property rights:  
09.01.2013

Priority:

(22) Date of filing: 09.01.2013

(45) Date of publication: 20.07.2014 Bull. № 20

Mail address:

195251, Sankt-Peterburg, Politekhnikeskaja ul., 29,  
FGBOU VPO "SPbGPU", Otdel intellektual'noj  
sobstvennosti

(72) Inventor(s):

Arkhipov Aleksandr Viktorovich (RU),  
Dvoret'skaja Natal'ja Vladislavovna (RU),  
Luksha Oleg Igorevich (RU),  
Sominskij Gennadij Girshevich (RU),  
Gerd Gantenbejn (DE),  
Stefan Kern (DE)

(73) Proprietor(s):

Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija "Sankt-  
Peterburgskij Gosudarstvennyj politekhnikeskij  
universitet" (FGBOU VPO "SPbGPU") (RU)

(54) **METHOD OF DETERMINING ENERGY SPECTRUM OF ELECTRONS IN ELECTRON BEAM**

(57) Abstract:

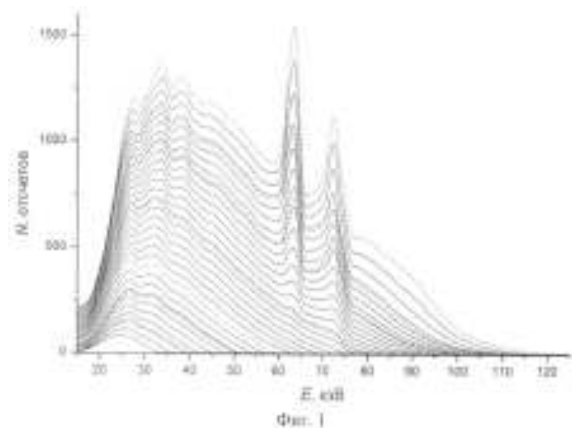
FIELD: physics.

SUBSTANCE: method includes picking up continuous X-ray radiation from a portion of the surface of a solid body bombarded with electrons, measuring characteristics of the continuous X-ray radiation and determining energy distribution in the electron beam based on data on the continuous X-ray radiation; measuring, in any sequence, the energy spectrum of the continuous X-ray radiation of the investigated electron beam and the spectra of the continuous X-ray radiation of single-velocity beams generated in the same system in conditions of negligible electron energy spread in beams; measuring the energy spectra of continuous X-ray radiation for single-velocity electron beams at n discrete electron energy values in said beams; based on data on energy spectra of continuous X-ray radiation for single-velocity electron beams, calculating the kernel function of inverse integral transformation and determining energy distribution of electrons in the investigated beam

by performing inverse integral transformation to obtain a kernel to a function which describes the spectrum of X-ray radiation of the investigated electron beam.

EFFECT: improved method.

4 dwg



RU 2 523 424 C1

RU 2 523 424 C1

Изобретение относится к технике измерения электрических величин, а также к технике определения характеристик электронных пучков с магнитным удержанием и может быть использовано в высоковольтных и сильноточных электронно-лучевых приборах, находящихся применение в электронной технике, при реализации разнообразных технологических процессов и в физическом эксперименте.

При конструировании электронно-лучевых приборов, а также для отыскания эффективных путей их совершенствования необходима информация о распределении электронов в электронном потоке по энергии. Энергетический спектр электронов определяется сложными процессами в системах формирования электронного потока и на участке его транспортировки, развитием разнообразных неустойчивостей пространственного заряда. В СВЧ устройствах, наряду с этим, разброс электронов по энергии может быть связан с действием СВЧ полей разнообразных электродинамических структур. Как правило, не удается описать закономерности формирования и характеристики энергетического распределения теоретически. Поэтому особенно важно экспериментальное определение этих характеристик.

Известен способ определения характеристик распределения электронов по энергии в электронном пучке (D.V.Kas'yanenko, O.I.Louksha, B.Piosczyk, G.G.Sominski, M.Thumm. Experimental Investigation of Electron Energy Spectra in Collector Region of Moderate-Power Millimeter-Wave Gyrotron //ITG-Fachbericht Proceedings "Displays and Vacuum Electronics" (May 3-4, 2004, Garmisch-Partenkirchen, Germany) VDE Verlag GMBH, Berlin, Offenbach, 2004, N<sub>0</sub>183, p.81-86), состоящий в том, что в коллекторе электронов делают малое отверстие, проводят часть электронного потока через это отверстие в установленный за отверстием анализатор и измеряют методом тормозящего поля распределение электронов по энергии. Для реализации способа приходится оснащать электронный прибор сложным анализатором и системами, обеспечивающими транспортировку электронов, прошедших сквозь отверстие, в анализатор. Такой метод неприменим для оперативного определения энергетических характеристик электронного потока в стандартных электронно-лучевых приборах. Кроме того, для того, чтобы свести к минимуму возмущение электронного потока, в анализатор пропускают малый по величине ток электронов. Поэтому при реализации метода в высоковольтных и сильноточных приборах большие трудности представляет измерение малых токов в присутствии больших по величине паразитных сигналов и наводок.

Информацию о пространственном распределении в поперечном сечении электронного пучка у коллектора можно получить, не возмущая потока электронов и не внося изменений в конструкцию электронного прибора, в результате измерения теплового (Патент №2006879) и/или тормозного рентгеновского (В.М.Дувидзон, О.С.Маркевич, В.В.Свинцов и др. Приборы и техника эксперимента, 1990, с.192-194) излучений, обусловленных бомбардировкой коллектора электронами пучка. Однако описанные методы не позволяют определять распределение электронов по энергии.

Известен способ определения энергетического спектра электронов, включающий выделение тормозного рентгеновского излучения с участка поверхности твердого тела или коллектора, бомбардируемого электронами, и измерение характеристик тормозного рентгеновского излучения. (Н.Г.Мордасов. «Диагностика трубчатого пучка релятивистских электронов по передаточной функции мишени-конвертера», ЖТФ, 2003, т.73, №2, с.107-112) - прототип.

В способе-прототипе энергетический спектр электронов в пучке определяют на основе большого объема полученных в эксперименте данных о тормозном рентгеновском излучении и о пучке, включая данные о мощности и углом

распределении тормозного излучения, об энергии, переносимой в исследуемом пучке, и энергии, поглощенной в мишени-коллекторе, об угле падения электронов на мишень и о токе пучка. Кроме того, для определения энергетического распределения электронов в пучке необходимо проведение численных расчетов с использованием

5 сконструированной автором передаточной функции, в которых используется ряд предположений о характеристиках пучка и закономерностях его взаимодействия с материалом мишени. По оценкам автора удовлетворительная точность в определении передаточной функции достигается при энергиях электронов свыше 2-3 МэВ.

10 Технической задачей изобретения является расширение области применения способа определения энергетического спектра электронов, основанного на анализе характеристик тормозного рентгеновского излучения, в область энергий электронов меньше 1-2 МэВ, а также упрощение и сокращение процедуры получения и обработки экспериментальных данных с одновременным сохранением достоверности способа определения энергетического спектра электронов в электронном пучке.

15 Поставленная задача достигается тем, что для получения информации об энергетическом спектре электронов, бомбардирующих поверхность твердого тела, измеряют в любой последовательности энергетический спектр тормозного рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка и измеряют энергетические спектры тормозного рентгеновского излучения моноэнергетических пучков,

20 создаваемых в той же системе формирования в условиях пренебрежимо малого разброса по энергии электронов в пучках, измеряют энергетические спектры тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических электронных пучков при  $n$  дискретных значениях энергии электронов в этих пучках, на основе данных об энергетических спектрах тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических

25 электронных пучков рассчитывают функцию ядра обратного интегрального преобразования и определяют энергетическое распределение электронов в исследуемом пучке путем выполнения операции обратного интегрального преобразования с полученным ядром к функции, описывающей спектр рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка, причем величину  $n$  выбирают удовлетворяющей

30 соотношению  $n > n_{\min}$ , где  $n_{\min}$  - минимальное значение  $n$ , при котором погрешность в определении функции ядра обратного интегрального преобразования не превышает заданного значения.

Предлагаемый способ имеет существенные преимущества по сравнению с прототипом. В отличие от прототипа он позволяет определять энергетические

35 распределения электронов в широком классе используемых на практике электронно-пучковых устройств (например, СВЧ и технологических) с умеренными (менее 2-3 МэВ) энергиями электронов и не требует ни сложных экспериментальных исследований, ни трудоемкой и длительной обработки результатов.

40 Рассмотрим примеры реализации предлагаемого способа. Поясняют результаты экспериментов и расчетов, выполненных для проверки возможности реализации способа, фиг.1, фиг.2, фиг.3 и фиг.4.

Первоначальная проверка способа производилась с использованием лабораторного рентгеновского источника на базе трубки с вольфрамовой мишенью. Рентгеновские спектры измерялись спектрометром "X-123 CdTe" производства Amptek Inc. Были

45 измерены рентгеновские спектры трубки при нескольких значениях ускоряющего электроны напряжения (напряжения питания) от 40 до 120 кВ.

На фиг.1 изображены спектры тормозного рентгеновского излучения с коллектора лабораторного рентгеновского источника при различных значениях ускоряющего

электроны напряжения  $U$  (пунктирные линии) и построенные на их основе базисные функции интегрального преобразования (сплошные линии), используемого для определения электронных энергетических распределений.

Помимо этого были получены «смешанные» спектры, во время экспозиции которых напряжение питания трубки (и энергии электронов в пучке) изменялись известным образом. Такие спектры использовались для определения энергетических распределений электронов, которые должны были соответствовать характеру изменения напряжения питания рентгеновского источника при их получении. Регулируя соотношение времен экспозиции с электронами разной энергии  $eU$ , можно было менять соотношение амплитуд соответствующих составляющих в энергетическом спектре электронов. На фиг.2а приведен типичный смешанный спектр тормозного рентгеновского излучения, полученный при экспозиции в потоках электронов с энергиями 70 и 110 кэВ. Отношение времени экспозиции для электронов указанных энергий в данном случае было равно 2:1.

Для определения энергетического распределения электронов применялась следующая методика расчета.

Решение (функция распределения электронов по энергиям) представлялось дискретным. Предполагалось, что приходящий на коллектор пучок состоит из групп электронов с энергиями  $W_i$  и парциальными токами  $I_i(W_i)$ . Определялась зависимость  $I_i(W_i)$ . Зарегистрированный экспериментально спектр тормозного рентгеновского излучения также представлялся в дискретной форме - в виде набора значений спектральной плотности  $N_j$  для ряда значений энергии фотонов  $E_j$ . При таком описании спектр тормозного излучения  $N_j(E_j)$  можно выразить через сумму вкладов моноэнергетических групп электронов:

$$N_j(E_j) \equiv \sum_i N_{ij} I_i(W_i) \quad (1)$$

Математически базисная матрица  $N_{ij}$  задает дискретное представление ядра интегрального преобразования, описывающего сложение рентгеновских спектров моноэнергетических парциальных электронных потоков в общий спектр, доступный для измерения в эксперименте. С точки зрения физического описания процесса каждая строка этой матрицы (базисная функция)  $N_{ij}(E_j) \equiv N_{ij}(W_i, E_j)$  представляют собой рентгеновский спектр потока электронов с энергией  $W_i$  и единичным током. Для обсуждаемых ниже вычислений эта функция двух переменных (или в дискретном представлении - набор функций одной переменной) определялась на основании набора рентгеновских спектров, измеренных для моноэнергетического пучка при разных энергиях электронов  $eU$ .

Значения энергии электронов в таких режимах  $eU$  считались численным параметром. Интерполяция (или при необходимости - экстраполяция) этого параметра к значению  $W_i$  давала  $i$ -ую базисную функцию (сплошные линии на фиг.1). Вычисления базисных функций проводились для всех значений  $W_i$ , для которых требовалось определить величины парциальных токов электронов  $I_i$  с соответствующими энергиями.

Операция обратного интегрально преобразования (деконволюции) в выбранной дискретной постановке состояла в нахождении такого набора значений парциальных токов моноэнергетических групп электронов  $I_i(W_i)$ , при котором измеренный спектр рентгеновского излучения  $N_j(E_j)$  наилучшим образом описывался математической

моделью (1). Задача рассматривалась как задача оптимизации с целевой (минимизируемой) функцией, равной сумме квадратов отклонений модельной функции  $N_j(E_j)$  (по формуле (1)) от ее экспериментально измеренного спектра рентгеновского излучения для изучаемого режима. При этом на решение накладывалось ограничение  $I_j \geq 0$ , соответствующее неотрицательности токов парциальных моноэнергетических пучков. Поиск оптимума проводился с использованием программы на языке Pascal методом координатного спуска по алгоритму золотого сечения.

Применение описанного алгоритма математической обработки позволило для представленного на фиг.2а рентгеновского спектра получить распределение электронов по энергии, приведенное на фиг.2б. Показано распределение, полученное деконволюцией рентгеновского спектра с ядром интегрального преобразования, определяемым базисными функциями, представленными на фиг.1. Положение и площади пиков в этом распределении соответствуют заданному в эксперименте ступенчатому изменению напряжения на трубке рентгеновского источника, что подтверждает работоспособность предлагаемого способа.

Предлагаемый способ был также испытан на экспериментальной установке Института технологии г.Карлсруе (Германия). Были измерены характеристики энергетического распределения электронов в коллекторной области мощного импульсного гиротрона. Электроны удерживаемого магнитным полем электронного пучка ускорялись напряжением  $U$ , которое можно было менять в широких пределах приблизительно от 40 до 90 кВ, и осаждались на медном коллекторе. Ток пучка  $I$  при заданном напряжении можно было регулировать в широких пределах от нуля примерно до 65 А, меняя накал термокатода магнетронно-инжекционной пушки.

На фиг.3 схематически изображен фрагмент коллекторной секции гиротрона. На внутренней поверхности коллектора показан участок, бомбардируемый электронами пучка (ЭП). Показан также поток тормозного рентгеновского излучения с этого участка, проходящий сквозь алюминиевое окно в коллекторе (рентген, излучение).

В проведенных экспериментах можно было регистрировать тормозное рентгеновское излучение, проходящее не только сквозь алюминиевое окно, но также и в других направлениях сквозь конструктивные элементы гиротрона из нержавеющей стали или из меди. При выводе излучения сквозь детали из меди или нержавеющей стали поглощение излучения было значительно больше, чем при его извлечении сквозь алюминиевое окно. Однако высокая чувствительность спектрометра обеспечивала регистрацию спектров тормозного излучения и в этом случае.

Измерения проводились в двух характерных режимах. В рабочем режиме гиротрона (при токе  $I \geq 60$  А и напряжениях  $U \geq 60$  кВ) действие высокочастотных полей в резонаторе, а также паразитных колебаний пространственного заряда в системе формирования электронного пучка, приводило к разбросу скоростей электронов в пучке. В широком интервале напряжений при токах меньше пускового ( $I < 10$  А) в отсутствие интенсивных высокочастотных колебаний формировался практически моноэнергетический пучок с энергией электронов  $eU$ .

На фиг.4а и 4б показаны энергетические спектры тормозного рентгеновского излучения, измеренные при одинаковом ускоряющем электроны напряжении  $U=79$  кВ и различных токах электронного пучка 7. Спектр тормозного излучения, полученный при токе электронного пучка  $I=8.5$  А, приведен на фиг.4а. При столь малом токе пренебрежимо малы ВЧ-поля на пути пучка и пучок практически моноэнергетический. В этих условиях максимальная энергия рентгеновских фотонов близка к значению энергии электронов  $eU$ , что характерно для моноэнергетических потоков. На фиг.4б

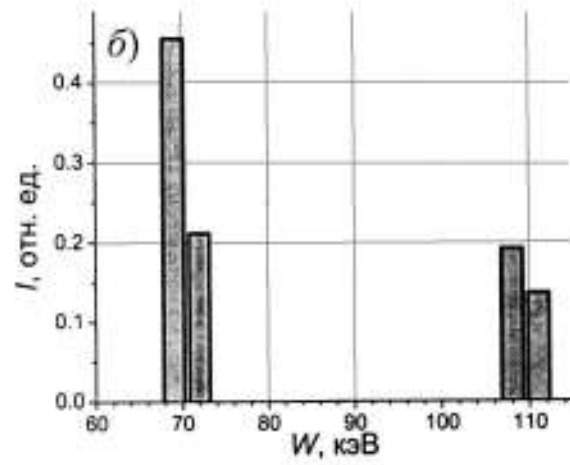
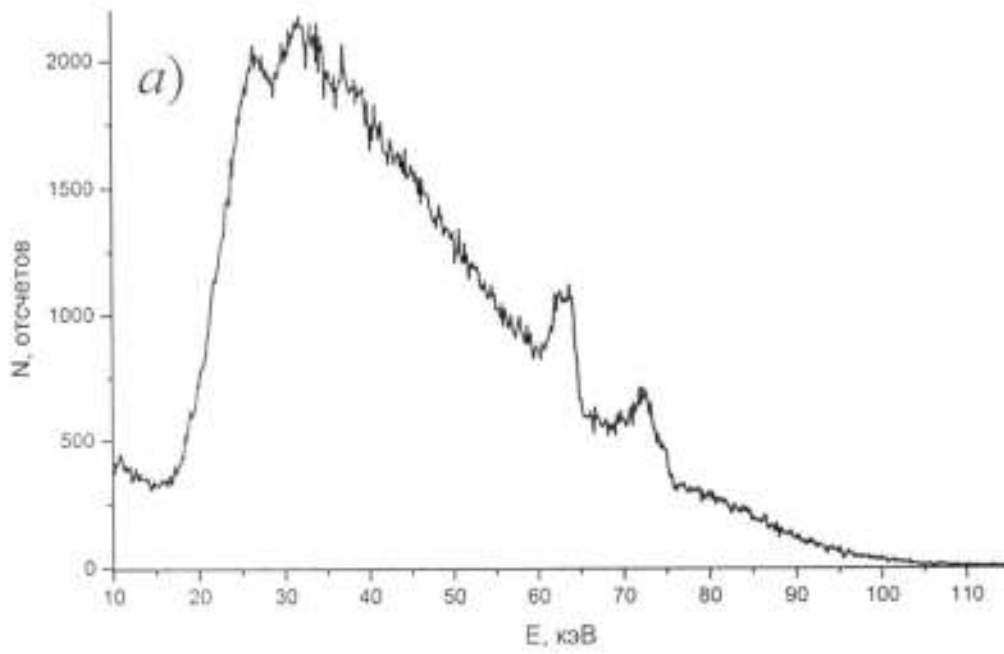


показан энергетический спектр тормозного рентгеновского излучения, измеренный в рабочем режиме при токе пучка  $I=62$  А и выходной мощности гиротрона  $P=760$  кВт. В рабочем режиме на пути транспортировки электронов существуют большие по амплитуде высокочастотные поля, приводящие к увеличенному разбросу электронов по энергии и к уширению спектров тормозного излучения (следует из сравнения фиг.4а и 4б). «Завал» спектров тормозного излучения в области малой энергии рентгеновских фотонов обусловлен поглощением в алюминии излучения по пути к спектрометру. Распределение электронов по энергиям для рабочего режима гиротрона, рассчитанное в соответствии с описанным ранее алгоритмом, представлено на фиг.4в.

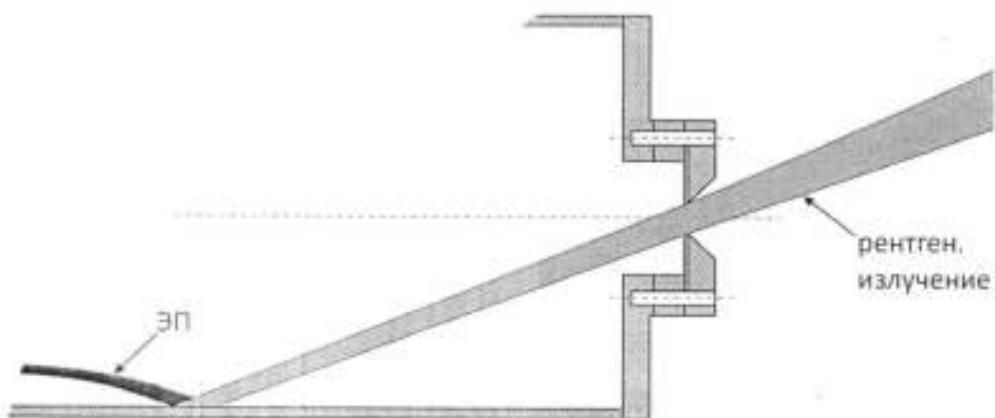
Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты подтверждают возможность реализации предлагаемого способа. Способ достаточно прост и оперативен. Он может быть использован для определения энергетического спектра электронов в стандартных электронно-лучевых приборах и не требует их реконструкции. Способ может быть применен для получения информации о спектре энергий электронов вплоть до достаточно малых порядка 30 кэВ и не имеет видимых ограничений со стороны больших энергий, что выгодно отличает его от способа-прототипа, с помощью которого энергетические спектры могут быть определены только для электронов с энергиями свыше 2-3 МэВ. Информацию об энергетическом спектре электронов по предлагаемому способу получают с использованием простой в эксплуатации и дешевой аппаратуры.

#### Формула изобретения

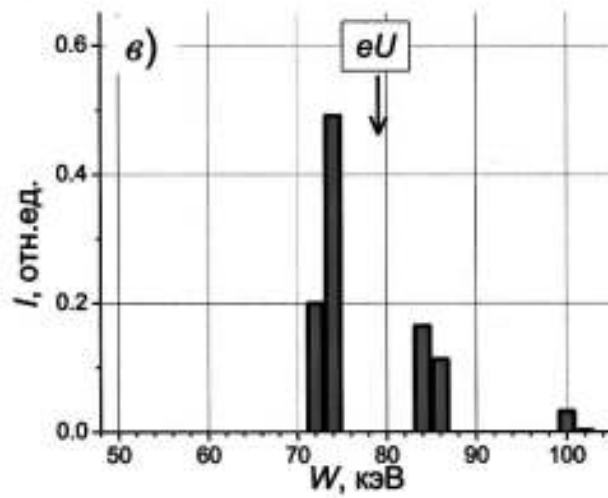
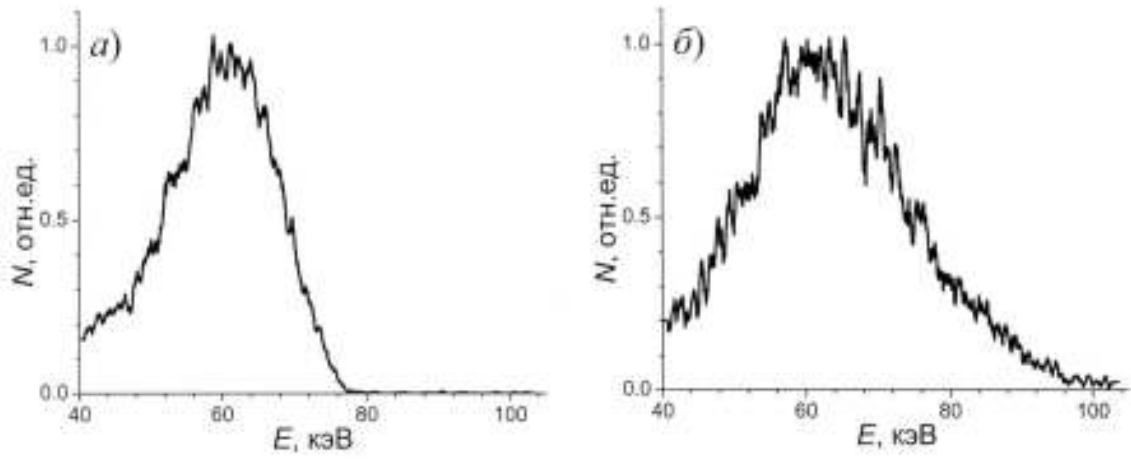
Способ определения энергетического спектра электронов в электронном пучке, в процессе которого бомбардируют электронами участок поверхности твердого тела, выделяют тормозное рентгеновское излучение с упомянутого участка и измеряют его характеристики, отличающийся тем, что в любой последовательности измеряют энергетический спектр тормозного рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка и спектры тормозного рентгеновского излучения моноэнергетических пучков, создаваемых в той же системе формирования в условиях пренебрежимо малого разброса по энергии электронов в пучках, измеряют энергетические спектры тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических электронных пучков при  $n$  дискретных значениях энергии электронов в этих пучках, на основе данных об энергетических спектрах тормозного рентгеновского излучения для моноэнергетических электронных пучков рассчитывают функцию ядра обратного интегрального преобразования и определяют энергетическое распределение электронов в исследуемом пучке путем выполнения операции обратного интегрального преобразования с полученным ядром к функции, описывающей спектр рентгеновского излучения исследуемого электронного пучка, причем величину  $n$  выбирают удовлетворяющей соотношению  $n \geq n_{\min}$ , где  $n_{\min}$  - минимальное значение  $n$ , при котором погрешность в определении функции ядра обратного интегрального преобразования не превышает заданного значения.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг.4