

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2572045

### ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИНЗА

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН) (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013153666

Приоритет изобретения **03 декабря 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **01 декабря 2015 г.**

Срок действия патента истекает **03 декабря 2033 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Автор(ы): **НАЗЬМОВ Владимир Петрович (RU), ТОЛОЧКО  
Борис Петрович (RU)**

по

(

Г

(3

(4

(4

(5

Ад

(54

И

эле

уго

изг

энер

(56) (

W. Ja

2004,

30.06.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2013153666/28, 03.12.2013  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 03.12.2013  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 03.12.2013  
 (43) Дата публикации заявки: 10.06.2015 Бюл. № 16  
 (45) Опубликовано: 27.12.2015 Бюл. № 36  
 (56) Список документов, цитированных в отчете о  
 поиске: (см. прод.)  
 Адрес для переписки:  
 630090, г.Новосибирск, пр. академика  
 Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН, ОНИО

(72) Автор(ы):  
**НАЗЬМОВ Владимир Петрович (RU),**  
**ТОЛОЧКО Борис Петрович (RU)**  
 (73) Патентообладатель(и):  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**учреждение науки Институт ядерной физики**  
**им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН**  
**(ИЯФ СО РАН) (RU)**

(54) **ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИНЗА**(57) **Формула изобретения**

Преломляющая рентгеновская линза, состоящая из отдельных фокусирующих элементов в форме треугольных призм, отличающаяся тем, что геометрические размеры, угол при вершине и количество элементов в каждом ряду, а также материал, из которого изготавливаются фокусирующие элементы, варьируются в зависимости от выбранной энергии фотонов в диапазоне от мягкого рентгеновского излучения до гамма-излучения.

(56) (продолжение):

W. Jark, F. Perennes и др., Focusing X-rays with simple arrays of prism-like structures, J. Synchrotron Rad., 2004, 11, p.248-253. US 20060256919 A1, 16.11.2006. WO 2013160153 A1, 31.10.2013. US 20110158389 A1, 30.06.2011. SU 1491232 A1, 20.04.1998.

RU 2 572 045 C 2



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013153666/28, 03.12.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
03.12.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.12.2013

(43) Дата публикации заявки: 10.06.2015 Бюл. № 16

(45) Опубликовано: 27.12.2015 Бюл. № 36

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: (см. прод.)

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, пр. академика  
Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН, ОНИО

(72) Автор(ы):

**НАЗЬМОВ Владимир Петрович (RU),  
ТОЛОЧКО Борис Петрович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН  
(ИЯФ СО РАН) (RU)**

## (54) ПРЕЛОМЛЯЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИНЗА

(57) Реферат:

Преломляющая рентгеновская линза состоит из отдельных фокусирующих элементов в форме треугольных призм, упорядоченных в ряды. Геометрические размеры, угол при вершине и количество элементов в каждом ряду, а также материал, из которого изготавливаются фокусирующие элементы, варьируются в зависимости от выбранной энергии фотонов в диапазоне от мягкого рентгеновского излучения до гамма-излучения. Количество фокусирующих элементов в различных рядах определяется набором заданных энергий. Каждой выделенной

энергии может соответствовать от одного до нескольких рядов фокусирующих элементов. Фокусирующие элементы каждого ряда могут быть выполнены в виде как прямых, так и наклонных призм разного размера, с различным углом при вершине и с плоскими или параболическими боковыми сторонами. Пучок может фокусироваться в форме линии либо в форме точки. Технический результат - концентрация излучения в заданном диапазоне энергий на заданном расстоянии от линзы. 4 ил.

(56) (продолжение):

W. Jark, F. Perennes и др., Focusing X-rays with simple arrays of prism-like structures, J. Synchrotron Rad., 2004, 11, p.248-253. US 20060256919 A1, 16.11.2006. WO 2013160153 A1, 31.10.2013. US 20110158389 A1, 30.06.2011. SU 1491232 A1, 20.04.1998.

Настоящее изобретение относится к области машиностроения, в частности микромашиностроения, а именно изготовления элементов микрооптики. Из существующего уровня техники известна рентгеновская преломляющая хроматическая линза, которая выполнена из одного материала и характеризуется специфическим профилем, на границе раздела которого с воздухом или вакуумом происходит преломление рентгеновской волны. Такая линза с параболическим преломляющим профилем, впервые запатентованная японским исследователем Томие (Т. Tomie "X-ray-lens", Japan Patent №6-045288, February 18, 1994), была в последующем оптимизирована и реализована в геометрии с минимизированным поглощением (L. Shabel'nikov, V. Nazmov, F.J. Pantenburg, J. Mohr, V. Saile, V. Yunkin, S. Kouznetsov, V. Pindyurin, I. Snigireva, A. Snigirev "X-ray lens with kinoform refractive profile created by x-ray lithography", Proc. SPIE 4783, Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics p.176, November 1, 2002; doi: 10.1117/12.455688). Недостатками данного технического решения являются зависимость фокусного расстояния и, соответственно, размер фокуса от энергии фотонов, так как источники рентгеновского излучения, как синхротроны, так и рентгеновские трубки, генерируют фотоны в широком диапазоне энергий.

Наиболее близким к заявленному техническому решению является дробление непрерывного преломляющего параболического профиля на целое число фокусирующих элементов треугольной формы с возрастанием количества фокусирующих элементов от оптической оси линзы к ее краю по линейному закону (W. Jark, F. Perennes, M. Matteucci, L. Mancini, F. Montanari, L. Rigon, G. Tromba, A. Somogyi, R. Tucoulou and S. Bohic "Focusing X-rays with simple arrays of prism-like structures" J. Synchrotron Rad. (2004). 11, 248-253 [doi: 10.1107/S0909049504005825]). Равно как и у линз с непрерывным параболическим профилем, недостатками данного технического решения являются уже упоминавшая ранее зависимость фокусирующих свойств линзы от энергии фотонов, и, так как наибольшее количество фокусирующих элементов представлено во внешнем ряду линзы, большая длина внешнего ряда, определяющая общую длину линзы, хотя вклад энергии в фокус, привнесенный внешним рядом, может быть пренебрежимо мал.

Задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является оптимизация количества и размера фокусирующих элементов в каждом ряду с целью концентрации фотонов заданного спектрального диапазона энергий на заданном расстоянии от линзы. Данная задача решается за счет того, что заявленная преломляющая рентгеновская линза содержит в каждом ряду фокусирующие элементы призматической формы, геометрические параметры поперечного сечения которых, а также материал и количество меняются от ряда к ряду, и это изменение отвечает заданным энергиям из спектра падающего излучения, причем:

- количество фокусирующих элементов в ряду может отвечать заданной энергии, которой соответствует максимальное количество фотонов в спектре падающего излучения;
- количество фокусирующих элементов в различных рядах может соответствовать набору как последовательно возрастающих (или убывающих) заданных энергий, так и набору энергий, рассчитываемых из каких-либо других соображений, например, максимального пропускания излучения различными рядами фокусирующих элементов;
- каждой выделенной энергии из заданного спектра может отвечать от одного до нескольких рядов фокусирующих элементов;
- фокусирующие элементы каждого ряда могут быть выполнены разного размера;
- фокусирующие элементы каждого ряда могут быть выполнены с различным углом при вершине;

- полихроматический пучок может фокусироваться линзой как в одном, так и в двух направлениях, образуя фокус либо в форме линии, либо в форме точки, соответственно;
- количество фокусирующих элементов в рядах, отвечающее необходимой энергии, может варьироваться с учетом пространственно-энергетического распределения излучения как, например, у источников синхротронного излучения, так и с учетом поглощения каждого ряда в случае фокусировки излучения с анизотропным пространственным распределением, как это наблюдается у рентгеновских трубок,
- фокусирующие призмы могут быть выполнены с плоскими или параболическими боковыми сторонами;
- фокусирующие элементы могут быть выполнены как в виде прямых, так и наклонных призм.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является концентрация излучения в заданном диапазоне энергией на заданном расстоянии  $F$  от линзы. Фокусное расстояние линзы  $F$  рассчитывается в случае, когда длина линзы много меньше фокусного расстояния, с помощью выражения:

$$F = \frac{A}{2N\delta\beta\alpha} \quad (1)$$

где:  $A$  - расстояние от оптической оси линзы до середины заданного ряда фокусирующих элементов;  $N$  - количество фокусирующих элементов в данном ряду;  $\alpha$  - полуугол при вершине фокусирующего элемента (фиг.1);  $\delta(E)$  - декремент показателя преломления материала фокусирующего элемента при заданной энергии фотонов  $E$  (показатель преломления в рентгеновском диапазоне  $= 1 - i\beta + \delta$ ,  $\beta(E)$  - коэффициент поглощения материала). Формула (1) получена непосредственно из закона Снеллиуса для  $\delta(E) \ll 1$ , что наблюдается в диапазонах рентгеновского и гамма излучения.

Таким образом, связь между параметрами  $A$ ,  $N$  и  $\alpha$  задается посредством выражения (1). С другой стороны, эффективная апертура (не поглощающая излучение апертура, пропускающая поток фотонов, равный потоку фотонов сквозь линзу) для линз с постоянными параметрами  $h$  и  $\alpha$  может быть определена из выражения (V. Nazmov, R.Simon, "Mosaic-like micropillar array for hard x-ray focusing-one-dimensional version", 23 (2013), pp.095015):

$$A_{\text{eff}} \approx h + 2\delta F \frac{(\ln N + 0,577)}{\mu h} \quad (2),$$

где  $h$  - высота треугольника в сечении фокусирующего элемента (фиг.1),  $\mu$  - коэффициент ослабления излучения в геометрии тонкого луча,  $\mu = \frac{4\pi\beta}{\lambda}$ ,  $\lambda$  - длина волны излучения. Например, для полимерного материала, используемого при изготовлении рентгеновских линз,  $\delta \approx 10^{-6}$  и  $\mu \approx 10^{-4}$  мкм<sup>-1</sup> (что соответствует энергии фотонов около 16 кэВ) эффективная апертура достигает нескольких миллиметров при  $F=1$  м (при условии, что еще наблюдается заметное приращение функции  $\ln N$  с увеличением  $N$ , т.е.  $\ln N \approx 5$ ). Из (2) видно также, что высота треугольников  $h$  в сечении фокусирующих элементов должна быть как можно меньше, однако воспроизводимые результаты для  $h$  при формировании рентгеновской линзы методом глубокой рентгеновской литографии лежат в области от нескольких микрометров и более.

Сущность изобретения поясняется чертежами, на которых изображены:

- схема сечения призматического фокусирующего элемента (фиг.1);
- схема расположения призматических фокусирующих элементов в линзе с линейным

фокусом (фиг.2а) и точечным фокусом (фиг.2б). Стрелками показано направление фронта волны падающего излучения;

- пример сечения преломляющей монохромной линзы с линейной формой фокуса. В данном случае количество одинаковых по форме и размеру фокусирующих элементов 5  
изменяется по линейному закону в зависимости от расстояния  $nh$  от оптической оси линзы до середины  $n$ -го ряда. Для одной энергии фотонов  $E_1$  (фиг.3), определяющей величину декремента показателя преломления  $\delta(E_1)$ , фокусное расстояние линзы:

$$F = \frac{nh}{2nm\delta(E_1)\text{tg}\alpha} \quad (3)$$

где  $n$  - номер ряда (нумерация начинается от оси линзы),  $m$  - количество фокусирующих элементов в первом ряду;

- пример сечения преломляющей полихромной линзы с линейной формой фокуса. Количество фокусирующих элементов для фиксированного фокусного расстояния  $F$  15  
задается с учетом расстояния от оптической оси линзы  $A$ , высоты  $h$  и полуугла при вершине  $\alpha$  поперечного сечения фокусирующих элементов и энергии фотонов  $E$  (фиг.4).

Для полихромной линзы такие параметры как высота  $h_n$ , угол при вершине  $\alpha_n$ , количество фокусирующих элементов  $N_n$  в ряду, а также энергия квантов  $E_n$  варьируются так, чтобы соотношение

$$\frac{A_n}{2N_n\delta(E_n)\text{tg}\alpha_n} \quad (4)$$

оставалось постоянным, а постоянство выражения  $\frac{A_n}{2N_n\delta(E_n)\text{tg}\alpha_n}$  справедливо для

25 монохромной линзы.

Изготовление линзы с вышеописанными фокусирующими элементами базируется на технологии создания маски, содержащей рисунок, включающий требуемые параметры:  $A$ ,  $N$ ,  $\text{tg}\alpha$  и  $h$ , и технологии переноса рисунка маски в нижележащий толстый 30  
слой материала. Первой может служить как электронная литография, так и фотолитография, рентгеновская или ионная литография. Процесс переноса рисунка маски может быть выполнен с помощью глубокой рентгеновской литографии или глубокой фотолитографии, а также реактивно-ионного травления (т.н. Бош-процесс).

Применение фото-, рентгено-литографического метода переноса рисунка маски позволяет применить различные материалы при формировании отдельных рядов 35  
фокусирующих элементов. А именно, некоторые ряды могут быть изготовлены непосредственно из полимерного фото-, рентгено-чувствительного материала (резиста), в другие ряды после дополнительного маскирования могут быть гальванически осаждены металлы, такие как медь, никель, золото, рений. В таком случае соотношение (4) может быть обобщено с учетом декремента показателя преломления различных 40  
материалов  $\delta_n$  и представляет собой формулу изобретения, выраженную математически:

$$\frac{A_n}{2N_n\delta_n(E_n)\text{tg}\alpha_n} \quad (5)$$

Описание фигур

45 Фиг.1а представляет собой сечение одного фокусирующего элемента треугольной формы, боковые стороны которого могут быть искривлены, в основном, по параболическому закону. Угол при вершине, задающий изменение направления распространения падающей волны,  $\alpha$ , высота элемента  $h$ . Кривизна боковых сторон

также может варьироваться. В общем случае количество фокусирующих элементов в ряду, имеющих разную кривизну, может быть различным, вплоть до полностью прямых боковых сторон.

5 Фиг.2. В пространстве фокусирующий элемент представляет собой призму (прямоугольную или наклонную). Призмы, ориентированные в одном направлении, обеспечивают фокус в форме линии (фиг.2а). Призмы, ориентированные в двух взаимно перпендикулярных направлениях, обеспечивают фокус в форме точки (фиг.2б).

10 Фиг.3. Сечение монохромной преломляющей линзы для энергии фотонов  $E_1$ . У такой линзы количество фокусирующих элементов в каждом ряду возрастает по линейному закону в зависимости от расстояния данного ряда от оптической оси линзы.

15 Фиг.4. Сечение полихромной преломляющей линзы для различных энергий фотонов. У такой линзы количество фокусирующих элементов в каждом ряду меняется в зависимости от расстояния данного ряда от оптической оси линзы, высоты  $h$  и угла при вершине  $\alpha$  для определенных энергий ( $E_1$  и  $E_2$ , как это изображено на фигуре, причем в данном случае  $E_1 < E_2$ , поскольку  $nm_1 < nm_2$ . Соответственно,  $E_3 < E_4$ , поскольку

$$\frac{A_n}{2N_n \delta(E_3) \operatorname{tg} \alpha_n} < \frac{A_n}{2N_n \delta(E_4) \operatorname{tg} \alpha_n}.$$

20 Работает линза следующим образом. Первоначально линза ориентируется относительно источника излучения так, чтобы направление распространения излучения совпадало с ее оптической осью. Между линзой и фокусом, непосредственно перед последним, устанавливается апертурная диафрагма (щель - в случае одномерного распределения или отверстие - в случае двумерной фокусировки), на оптической оси линзы. Как только оптимальное положение достигнуто, в фокусе линзы на расчетном 25 расстоянии от нее сконцентрируются фотоны заданного диапазона энергий, что может быть зафиксировано рентгеновским детектором с энергетическим разрешением. В общем случае на детекторе будет наблюдаться видоизмененный спектр первичного излучения. Предполагается проводить изготовление линз по LIGA-технологии на базе глубокой рентгенолитографии и использовать линзы для фокусировки рентгеновского 30 синхротронного излучения, обладающего широким спектром, на образец с целью повышения его освещенности.

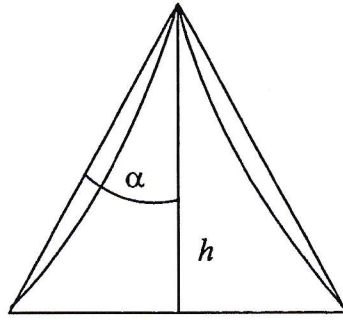
#### Формула изобретения

35 Преломляющая рентгеновская линза, состоящая из отдельных фокусирующих элементов в форме треугольных призм, отличающаяся тем, что геометрические размеры, угол при вершине и количество элементов в каждом ряду, а также материал, из которого изготавливаются фокусирующие элементы, варьируются в зависимости от выбранной энергии фотонов в диапазоне от мягкого рентгеновского излучения до гамма-излучения.

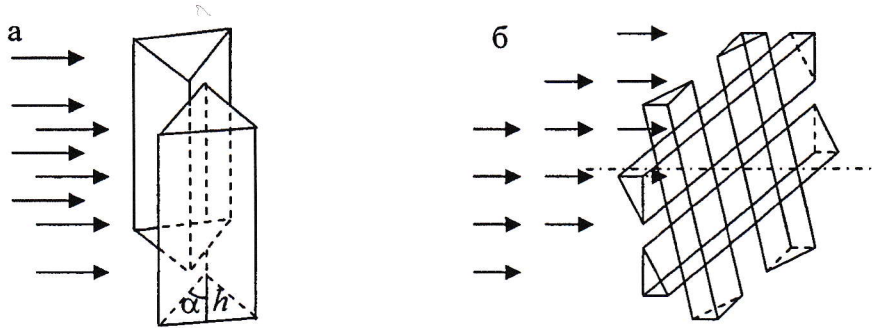
40

45

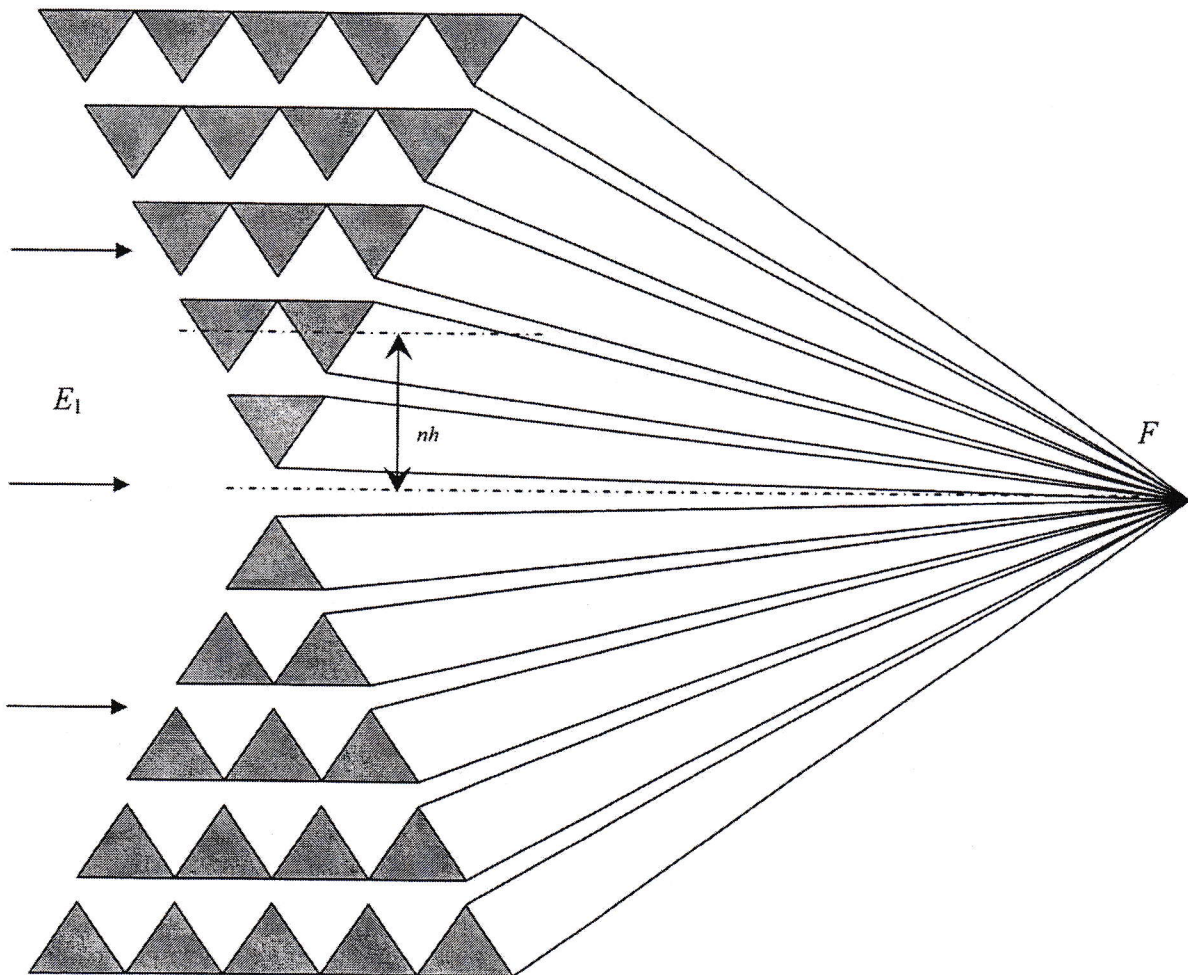




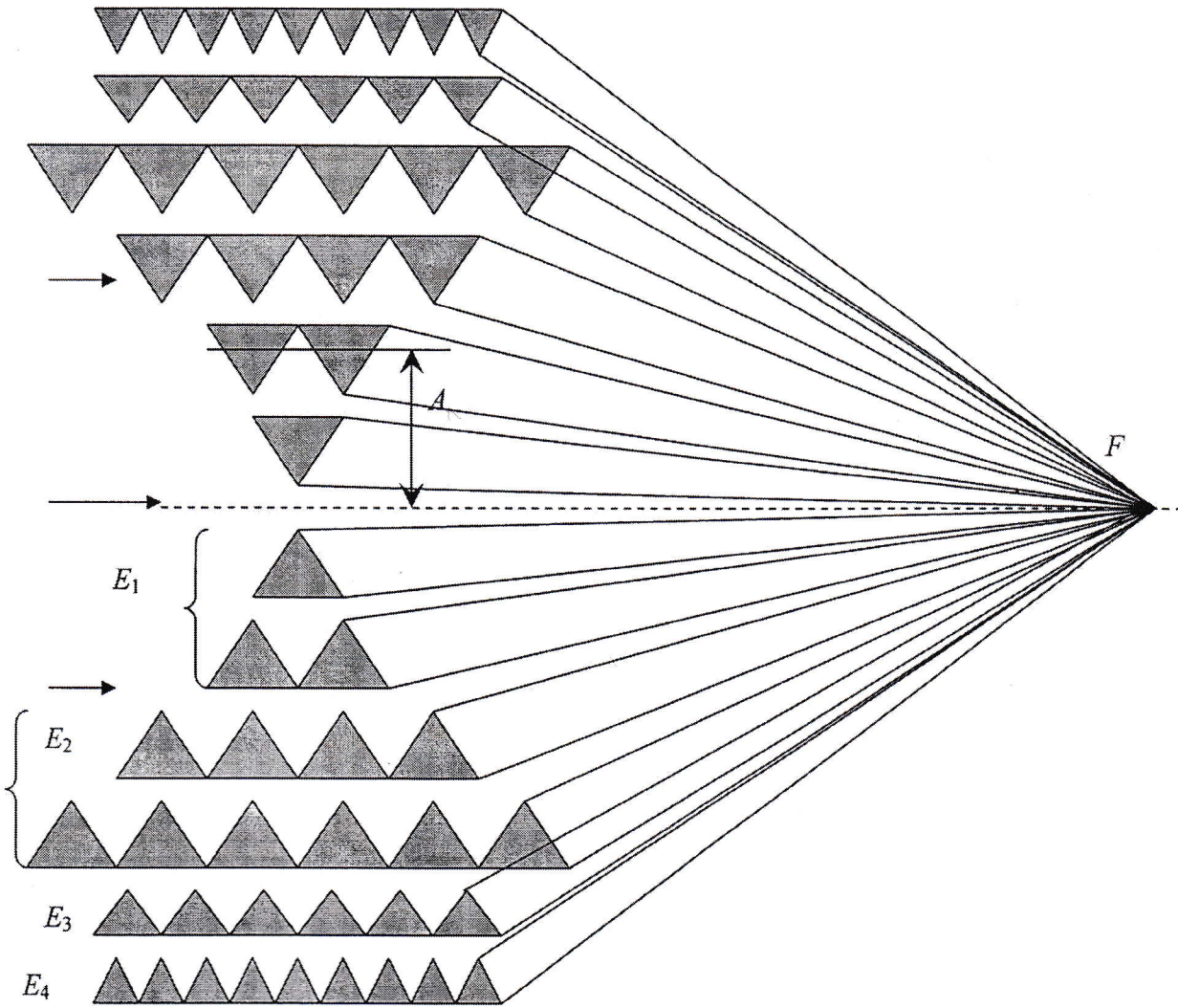
Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3



Фиг.4