



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(52) СПК  
*A61F 9/08 (2020.08)*

(21)(22) Заявка: **2018138614, 06.04.2017**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**06.04.2017**

Дата регистрации:  
**11.11.2020**

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:  
**06.04.2016 FR 1653038;**  
**06.04.2016 FR 1653039;**  
**06.04.2016 FR 1653040;**  
**29.07.2016 FR 1657386**

(43) Дата публикации заявки: **18.05.2020** Бюл. № 14

(45) Опубликовано: **11.11.2020** Бюл. № 32

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на  
национальной фазе: **06.11.2018**

(86) Заявка РСТ:  
**EP 2017/058224 (06.04.2017)**

(87) Публикация заявки РСТ:  
**WO 2017/174710 (12.10.2017)**

Адрес для переписки:  
**101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 13, стр. 5,**  
**ООО "Союзпатент"**

(72) Автор(ы):

**РОМАНО, Фабрицио (FR),**  
**БЕРНАР, Орельен (FR),**  
**МОКЛЭР, Сириль (FR),**  
**БОБО, Эммануэль (FR)**

(73) Патентообладатель(и):

**КЕРАНОВА (FR),**  
**ЮНИВЕРСИТЕ ЖАН МОННЭ СЕН**  
**ЭТЬЕН (FR),**  
**САНТР НАСЪОНАЛЬ ДЕ ЛЯ РЕШЕРШ**  
**СЪЕНТИФИК (FR)**

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: **US 2010133246 A1, 03.06.2010. EP**  
**1790383 A1, 30.05.2007. US 2016067095 A1,**  
**10.03.2016. RU 2529391 C2, 27.09.2014.**

**(54) ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФОКУСИРОВКИ АППАРАТА ДЛЯ РАЗРЕЗАНИЯ ТКАНИ  
ЧЕЛОВЕКА ИЛИ ЖИВОТНОГО**

(57) Реферат:

Изобретение относится к медицинской технике. Аппарат для разрезания ткани человека или животного, такой как роговица или хрусталик, включает в себя устройство обработки для получения рисунка, состоящего по меньшей мере из двух точек воздействия, в плоскости фокусировки, при помощи лазерного пучка, генерируемого фемтосекундным лазером, при этом устройство обработки расположено на

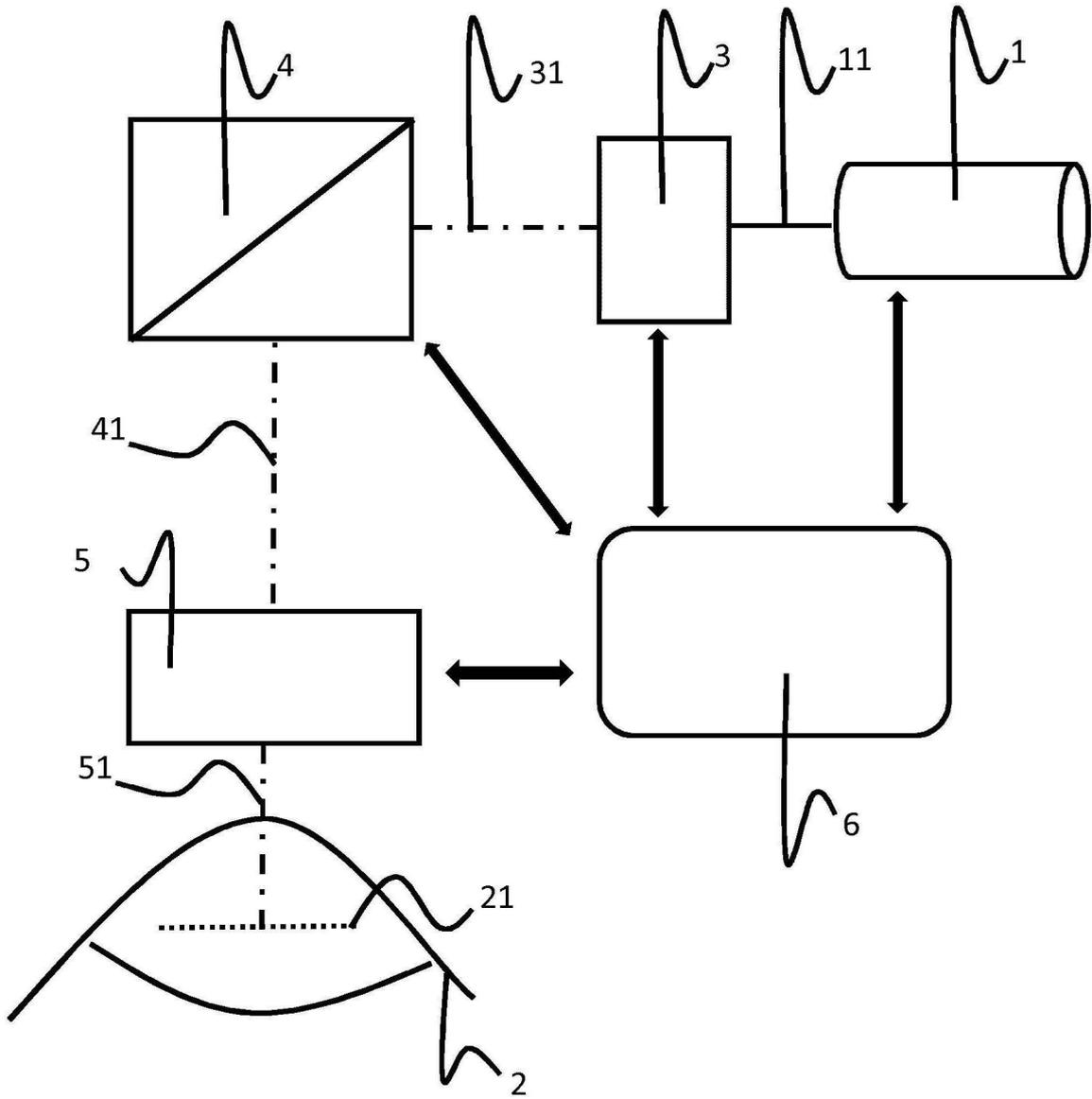
выходе указанного фемтосекундного лазера, согласно изобретению устройство обработки содержит оптическую систему фокусировки для фокусировки лазерного пучка в плоскости резания и блок управления, выполненный с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки вдоль оптического пути лазерного пучка для перемещения плоскости фокусировки по меньшей

**С 2  
2 7 3 6 1 0 2  
R U**

**R U  
2 7 3 6 1 0 2  
С 2**

мере в трех соответствующих плоскостях резания,  
чтобы получить послойный набор поверхностей

резания ткани. 14 з.п. ф-лы, 28 ил.



Фиг. 1

RU 2736102 C2

RU 2736102 C2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*A61F 9/08* (2020.08)

(21)(22) Application: **2018138614, 06.04.2017**

(24) Effective date for property rights:  
**06.04.2017**

Registration date:  
**11.11.2020**

Priority:

(30) Convention priority:  
**06.04.2016 FR 1653038;**  
**06.04.2016 FR 1653039;**  
**06.04.2016 FR 1653040;**  
**29.07.2016 FR 1657386**

(43) Application published: **18.05.2020 Bull. № 14**

(45) Date of publication: **11.11.2020 Bull. № 32**

(85) Commencement of national phase: **06.11.2018**

(86) PCT application:  
**EP 2017/058224 (06.04.2017)**

(87) PCT publication:  
**WO 2017/174710 (12.10.2017)**

Mail address:  
**101000, Moskva, ul. Myasnitskaya, d. 13, str. 5,**  
**OOO "Soyuzpatent"**

(72) Inventor(s):  
**ROMANO, Fabritsio (FR),**  
**BERNAR, Orelen (FR),**  
**MOKLER, Siril (FR),**  
**BOBO, Emmanuel (FR)**

(73) Proprietor(s):  
**KERANOVA (FR),**  
**YUNIVERSITE ZHAN MONNE SEN ETEN**  
**(FR),**  
**SANTR NASONAL DE LYA RESHERSH**  
**SENTIFIK (FR)**

(54) **OPTICAL SYSTEM FOR FOCUSING APPARATUS FOR CUTTING HUMAN OR ANIMAL TISSUE**

(57) Abstract:

FIELD: medical equipment.

SUBSTANCE: apparatus for cutting human or animal tissue, such as a cornea or lens, includes a processing apparatus for producing a pattern consisting of at least two exposure points, in a focusing plane using a laser beam generated by a femtosecond laser, wherein the processing device is located at the output of said femtosecond laser, according to the invention, the processing device comprises an optical focusing system

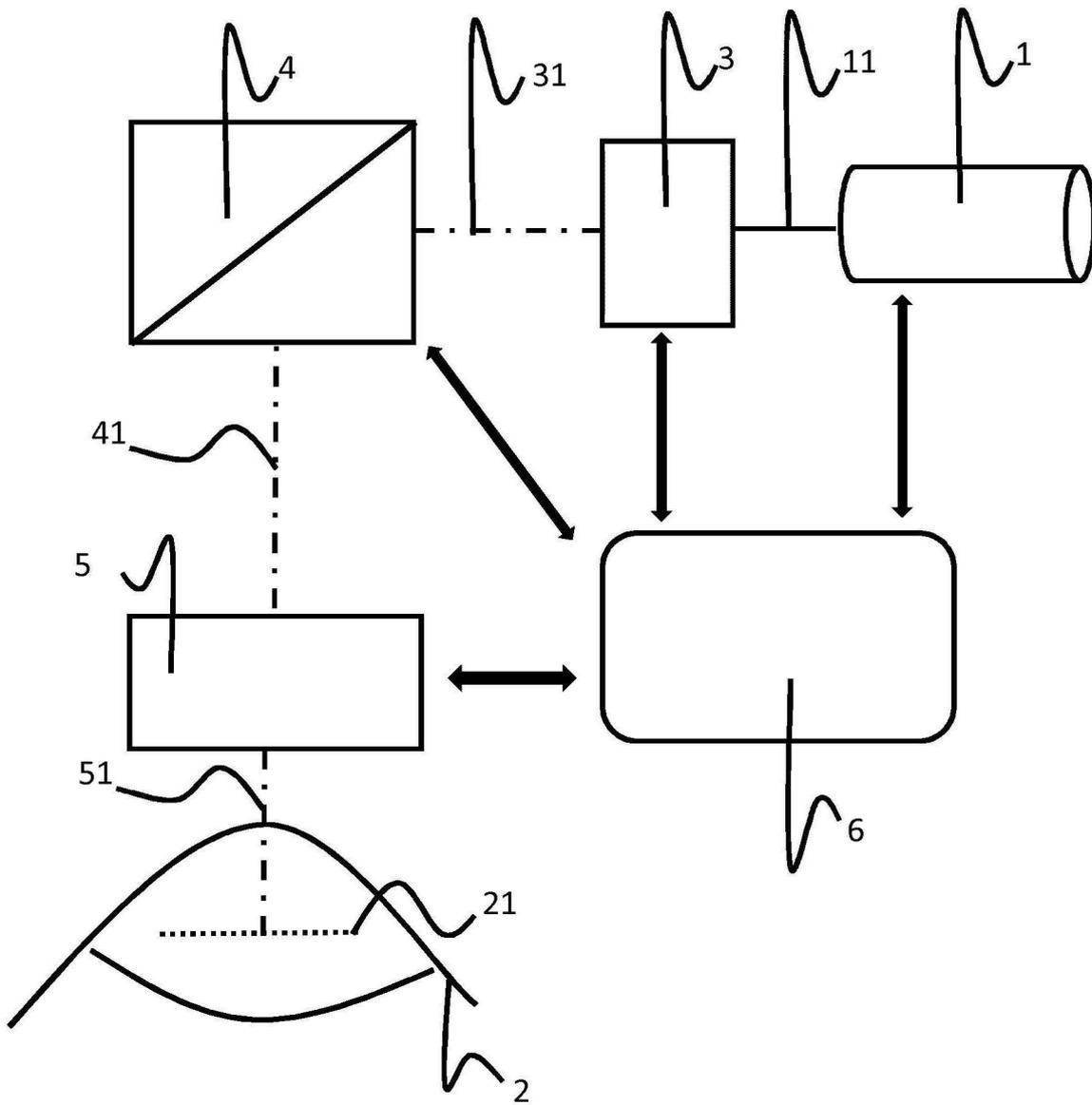
for focusing a laser beam in a cutting plane and a control unit configured to control the movement of the optical focusing system along the laser beam optical path for moving the focusing plane in at least three corresponding cutting planes, to obtain a layer-by-layer set of surfaces of cutting of fabric.

EFFECT: optical system for focusing apparatus for cutting human or animal tissue is disclosed.

15 cl, 28 dwg

RU 2 736 102 C2

RU 2 736 102 C2



Фиг. 1

#### Область техники

Настоящее изобретение относится к технической области хирургических операций, выполняемых при помощи фемтосекундного лазера, и, в частности, к области офтальмологической хирургии, а именно в применении для разрезания роговиц или хрусталиков.

Изобретение относится к устройству разрезания ткани человека или животного, такой как роговица или хрусталик, при помощи фемтосекундного лазера.

Под фемтосекундным лазером следует понимать световой источник, выполненный с возможностью излучения лазерного пучка в виде сверхкоротких импульсов, продолжительность которых составляет от 1 фемтосекунды до 100 пикосекунд, предпочтительно от 1 до 1000 фемтосекунд, в частности, около ста фемтосекунд.

#### Уровень техники

Из уровня техники известно выполнение хирургических операций на глазу при помощи фемтосекундного лазера, таких как операции разрезания роговиц или хрусталиков.

Фемтосекундный лазер является инструментом, выполненным с возможностью осуществления разрезания, например, роговичной ткани, посредством фокусировки лазерного пучка в строме роговицы и получения последовательности мелких смежных кавитационных пузырьков, которая затем образует линию разреза.

В частности, во время фокусировки лазерного пучка в роговице при нелинейной ионизации генерируется плазма, когда интенсивность лазера превышает пороговое значение, называемое порогом оптического пробоя. При этом образуется кавитационный пузырек, способствующий очень локальному разрыву близлежащих тканей. Таким образом, объем, реально разрушаемый лазером, является очень незначительным по сравнению с разрываемой зоной.

Зона, надрезаемая лазером при каждом импульсе, является очень небольшой, порядка микрона или десятка микрон в зависимости от мощности и фокусировки пучка. Таким образом, пластинчатое разрезание роговицы можно получить, только осуществляя ряд смежных воздействий на всей поверхности разрезаемой зоны.

Перемещение пучка можно производить при помощи сканирующего устройства, состоящего из управляемых гальванометрических зеркал и/или площадок, обеспечивающих перемещение оптических элементов, таких как зеркала или линзы. Это сканирующее устройство позволяет перемещать пучок по траектории возвратно-поступательного движения вдоль последовательности сегментов, образующих путь перемещения пучка.

Для вырезания роговицы на площади  $1 \text{ мм}^2$  необходимо произвести примерно 20000 воздействий очень близко друг к другу. В настоящее время эти воздействия производят одно за другим со средней скоростью 300000 воздействий в секунду. Для вырезания роговицы на площади около  $65 \text{ мм}^2$  с учетом времени, в течение которого лазер не излучает импульсы в конце сегмента, в среднем необходимо 15 секунд, чтобы навести зеркала на следующий сегмент. Следовательно, хирургическая операция разрезания является медленной.

Как известно, для оптимизации времени разрезания увеличивают частоту лазера. Однако увеличение частоты влечет за собой также повышение скорости перемещения пучка при помощи площадок или соответствующих сканеров. Увеличивают также промежуток между воздействиями лазера на разрезаемую ткань, но, как правило, в ущерб качеству резания.

Большинство фемтосекундных лазеров для разрезания роговицы работают на

высоких рабочих частотах, в частности, сверх 100 кГц, связанных с системами перемещения пучка, объединяющих в себе сканеры и перемещающие площадки, что сказывается на общей стоимости установки и, следовательно, на стоимости хирургической операции.

5 Для решения этой проблемы быстроты разрезания лазером, как известно, используют гальванометрические зеркала для увеличения частоты, скорости и пути отклонения лазерного пучка.

Однако эта технология не позволяет получить вполне удовлетворительные результаты.

10 Другим решением для сокращения времени резания является создание множества кавитационных пузырьков одновременно. В документах US 2010/133246, EP 1790383 и US 2016/067095 описаны режущие устройства, основанные на технологии разделения единого первичного лазерного пучка на множество вторичных лазерных пучков. Эти устройства обычно содержат оптическую систему, такую как один (или несколько)  
15 делитель(ей) пучка, для производства вторичных лазерных пучков, каждый из которых позволяет генерировать соответствующий кавитационный пузырек.

Одновременное получение "n" кавитационных пузырьков позволяет сократить общую длительность разрезания в "n" раз. Разделение пучка на несколько пучков с целью ускорения операции уже было описано, но всегда при помощи чисто оптических  
20 решений либо с использованием дифракции, либо за счет множественных отражений. Результат ни разу не был применен в клинических условиях, так как различные пучки не имели одинаковый размер.

Кроме того, технология разделения приводит к увеличению диаметра множества вторичных лазерных пучков по отношению к диаметру единого первичного лазерного  
25 пучка, производимого фемтосекундным лазером. Действительно, вторичные лазерные пучки соответствуют разделенным в пространстве «участкам» единого первичного лазерного пучка. С учетом не равного нулю расстояния между различными вторичными лазерными пучками совокупный диаметр системы, образованной множеством вторичных пучков, превышает диаметр первичного лазерного пучка.

30 Это увеличение диаметра может быть недостатком, в частности, когда режущее устройство содержит сканирующую систему, такую как оптический сканер, для перемещения множества вторичных пучков в плоскости резания. Действительно, как правило, входной диаметр сканирующей системы примерно равен диаметру единого первичного лазерного пучка, поэтому некоторые вторичные пучки не попадают в  
35 систему сканирования.

Таким образом, решения резания на основе лазерного пучка применяются только для генерирования кавитационных пузырьков вдоль линии резания и даже в некоторых случаях для генерирования кавитационных пузырьков в плоскости резания.

40 Вместе с тем, ни одно из существующих решений не позволяет разрушить объем ткани, в частности, поскольку послойное построение плоскостей резания является слишком трудоемким в осуществлении, и время, связанное с таким послойным построением, несовместимо с продолжительностью хирургического вмешательства.

Настоящее изобретение призвано предложить режущий аппарат, позволяющий устранить по меньшей мере один из вышеупомянутых недостатков. В частности,  
45 настоящее изобретение призвано предложить режущий аппарат, позволяющий быстро и эффективно разрушать объем обрабатываемой ткани.

Раскрытие изобретения

В связи с этим изобретением предложен аппарат для разрезания ткани человека или

животного, такой как роговица или хрусталик, при этом указанный аппарат включает в себя фемтосекундный лазер, выполненный с возможностью излучения лазерного пучка в виде импульсов, и устройство обработки для получения рисунка, состоящего по меньшей мере из двух точек воздействия в плоскости фокусировки при помощи лазерного пучка, генерируемого фемтосекундным лазером, при этом устройство обработки расположено на выходе указанного фемтосекундного лазера, отличающийся тем, что устройство обработки содержит: оптическую систему фокусировки для фокусировки лазерного пучка в плоскости резания, и блок управления, выполненный с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки вдоль оптического пути лазерного пучка с целью перемещения плоскости фокусировки по меньшей мере в трех соответствующих плоскостях резания, чтобы получить послойный набор поверхностей резания ткани.

В рамках настоящего изобретения под выражением «точка воздействия» следует понимать зону лазерного пучка, которая заключена в фокальной плоскости и в которой интенсивность указанного лазерного пучка является достаточной для генерирования кавитационного пузырька в ткани.

В рамках настоящего изобретения под выражением «смежные точки воздействия» следует понимать две точки воздействия, расположенные друг против друга и не разделенные другой точкой воздействия. Под выражением «две соседние точки воздействия» следует понимать две точки из группы смежных точек, между которыми расстоянием является минимальным.

В рамках настоящего изобретения под «рисунком» следует понимать множество точек лазерного воздействия, генерируемых одновременно в плоскости фокусировки сформированным лазерным пучком, то есть пучком, модулированным по фазе, чтобы распределить его энергию на несколько отдельных пятен в плоскости фокусировки, соответствующей плоскости резания устройства.

Таким образом, изобретение позволяет изменять профиль интенсивности лазерного пучка в плоскости резания таким образом, чтобы повысить качество или скорость резания в зависимости от выбранного профиля. Этого изменения профиля интенсивности достигают за счет модуляции фазы лазерного пучка.

Оптическую модуляцию фазы осуществляют при помощи фазовой маски. После модуляции энергия падающего лазерного пучка сохраняется, и формирование пучка осуществляют путем воздействия на фронт волны. Фаза электромагнитной волны отображает моментальную ситуацию амплитуды электромагнитной волны. Фаза зависит как от времени, так и от пространства. В случае пространственного формирования лазерного пучка в расчет принимаются только изменения фазы в пространстве.

Фронт волны определяют как поверхность точек пучка, имеющих эквивалентную фазу (то есть поверхность, образованную точками, для которых время прохождения от источника пучка является одинаковым). Следовательно, изменение пространственной фазы пучка происходит через изменение его фронта волны.

Эта технология позволяет осуществлять операцию резания быстрее и эффективнее, так как она использует несколько лазерных пятен, каждое из которых производит один надрез и в соответствии с контролируемым профилем.

В рамках настоящего изобретения модуляция фазы фронта волны позволяет генерировать единый модулированный лазерный пучок, который образует несколько точек воздействия только в плоскости резания. Таким образом, модулированный лазерный пучок является единым вдоль всего пути распространения. Модуляция фазы фронта волны позволяет задержать или сдвинуть вперед фазы различных точек

поверхности пучка относительно первоначального фронта волны, чтобы каждая из этих точек осуществляла конструктивную интерференцию в N разных точках в фокальной плоскости линзы. Это перераспределение энергии на множество точек воздействия происходит только в одной плоскости (то есть в плоскости фокусировки) и не вдоль всего пути распространения модулированного лазерного пучка. В документе US 2010/0133246 было, наоборот, предложено использовать оптическую систему, основанную на фазе и позволяющую разделить первичный пучок на множество вторичных пучков, имеющих разные углы распространения.

Метод модуляции в соответствии с изобретением (путем генерирования единственного модулированного лазерного пучка) позволяет ограничить риски снижения качества разрезаемой поверхности. Действительно, если часть единого лазерного пучка теряется вдоль пути распространения пучка, значения интенсивности всех точек воздействия уменьшаются одновременно (сохранение однородности между разными точками воздействия рисунка), но ни одна точка воздействия не пропадет в плоскости резания. При применении метода разделения пучка, предложенного в документе US 2010/0133246, если часть из множества вторичных пучков оказывается утерянной вдоль пути распространения, то некоторые точки воздействия рисунка (соответствующие точкам воздействия, генерированным потерянными вторичными пучками) будут отсутствовать в плоскости резания, что существенно снижает качество производимого резания.

Режущий аппарат имеет также следующие предпочтительные, но не ограничительные отличительные признаки:

- блок управления может быть выполнен с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки для перемещения плоскости фокусировки между исходным положением и конечным положением в этом порядке, при этом конечное положение находится ближе к фемтосекундному лазеру, чем исходное положение;

- аппарат может дополнительно содержать систему формирования, позиционируемую между фемтосекундным лазером и оптической системой фокусировки, для модуляции фазы фронта волны лазерного пучка с целью получения лазерного пучка, модулированного по фазе в соответствии с заданным значением модуляции, вычисленным таким образом, чтобы распределить энергию лазерного пучка по меньшей мере на две точки воздействия, образующие рисунок в фокальной плоскости;

- длина оптического пути между системой формирования и оптической системой фокусировки может быть меньше 2 метров, предпочтительно меньше 1 метра;

- блок управления может быть запрограммирован для управления системой формирования таким образом, чтобы изменять форму рисунка между двумя соответствующим плоскостями резания;

- блок управления может быть запрограммирован для управления системой формирования, при этом указанный блок управления выполнен с возможностью передачи по меньшей мере первого и второго командных сигналов между двумя соответствующими плоскостями резания (или в одной и той же плоскости резания):

- при этом первый командный сигнал задает модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка по первому заданному значению модуляции, рассчитанному для распределения энергии лазерного пучка на множество первых точек воздействия в фокальной плоскости системы формирования, при этом первые точки воздействия образуют первый рисунок,

- второй командный сигнал задает модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка по второму заданному значению модуляции, рассчитанному для распределения энергии лазерного пучка на множество вторых точек воздействия в фокальной плоскости

системы формирования, при этом вторые точки воздействия образуют второй рисунок, отличный от первого рисунка.

5 - аппарат может дополнительно содержать оптический сканер, расположенный на выходе фемтосекундного лазера, для перемещения рисунка в плоскости резания в нескольких положениях в направлении перемещения;

- блок управления может быть запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы изменять вырезаемую площадь в плоскости фокусировки между двумя последовательными плоскостями резания;

10 - блок управления может быть запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы изменять форму вырезаемой зоны в плоскости фокусировки между двумя последовательными плоскостями резания;

- блок управления может быть запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы изменять шаг сканирования оптического сканера между двумя последовательными плоскостями резания;

15 - блок управления может быть запрограммирован для управления перемещением оптической системы фокусировки таким образом, чтобы расстояние между двумя последовательными плоскостями резания составляло от 2 мкм до 500 мкм;

20 - аппарат может дополнительно содержать фильтр, расположенный на выходе системы формирования, чтобы блокировать паразитную энергию, генерируемую в центре системы формирования;

- фильтр может содержать пластинку, включающую в себя: зону, непрозрачную для лазерного излучения, расположенную в центре пластинки, и зону, прозрачную для лазерного излучения, расположенную на периферии непрозрачной зоны;

25 - система формирования может представлять собой набор фазовых масок, при этом каждая маска действует на фазу лазерного пучка для распределения энергии лазерного пучка путем фазовой модуляции в соответствии с отдельным рисунком, при этом маски закреплены на устройстве перемещения, при этом блок управления запрограммирован для управления устройством перемещения (путем передачи одного или нескольких командных сигналов), чтобы перемещать каждую маску между: активным положением, 30 в котором маска перекрывает оптический путь лазерного пучка, и неактивным положением, в котором маска не находится на оптическом пути лазерного пучка;

- в варианте система формирования может представлять собой пространственный модулятор света, при этом блок управления запрограммирован для управления пространственным модулятором света путем передачи по меньшей мере одного 35 командного сигнала, задающего модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка по заданному значению модуляции, рассчитанному для распределения энергии лазерного пучка на множество точек воздействия в фокальной плоскости системы формирования;

40 - заданное значение модуляции может представлять собой фазовую маску, рассчитанную с использованием итеративного алгоритма, основанного на преобразовании Фурье.

Краткое описание чертежей

Другие отличительные признаки и преимущества изобретения будут более очевидны из нижеследующего описания, представленного в качестве не ограничительного примера, со ссылками на прилагаемые фигуры, на которых:

45 Фиг. 1 - схематичный вид установки, включающей в себя заявленный режущий аппарат.

Фиг. 2 - распределение интенсивности лазерного пучка в его фокальной плоскости.

Фиг. 3 - путь перемещения рисунка резания.

Фиг. 4 - плоскости резания при вырезании удаляемого объема ткани.

Фиг. 5-9, 11-18 и 20-22, 24 и 28 иллюстрируют различные примеры рисунка резания.

Фиг. 10, 19, 23 и 25-27 иллюстрируют матрицы кавитационных пузырьков.

Подробное описание изобретения

5 Объектом изобретения является аппарат для разрезания ткани человека или животного при помощи фемтосекундного лазера. В дальнейшем тексте описания изобретение будет представлено в качестве примера для разрезания роговицы глаза человека или животного.

### 1. Режущий аппарат

10 На фиг. 1 представлен пример выполнения заявленного режущего аппарата. Он может быть расположен между фемтосекундным лазером 1 и обрабатываемой мишенью 2.

Фемтосекундный лазер 1 выполнен с возможностью излучать лазерный пучок в виде импульсов. Например, лазер 1 излучает свет с длиной волны 1030 нм в виде импульсов  
15 продолжительностью 400 фемтосекунд. Лазер 1 имеет мощность 20 Вт и частоту 500 кГц.

Мишень 2 является, например, предназначенной для разрезания тканью человека или животного, такой как роговица или хрусталик.

Режущий аппарат содержит:

20 - систему 3 формирования, располагаемую на траектории лазерного пучка 11, выходящего из фемтосекундного лазера 1,

- оптический сканер 4 на выходе системы 3 формирования,

- оптическую систему 5 фокусировки на выходе оптического сканера 4.

Режущий аппарат содержит также блок 6 управления, обеспечивающий управление  
25 системой 3 формирования, оптическим сканером 4 и оптической системой 5 фокусировки.

Система 3 формирования позволяет модулировать фазу лазерного пучка 11, выходящего из фемтосекундного лазера 1, для распределения энергии лазерного пучка на множество точек воздействия в его фокальной плоскости, причем это множество генерируемых одновременно точек воздействия образует рисунок.

30 Оптический сканер 4 позволяет ориентировать выходящий из системы 3 формирования модулированный по фазе лазерный пучок для перемещения рисунка резания вдоль пути перемещения, заранее определенного пользователем, в плоскости 21 фокусировки.

Оптическая система 5 фокусировки позволяет перемещать плоскость 21 фокусировки,  
35 соответствующую плоскости резания, модулированного и отклоненного лазерного пучка 41.

Таким образом, система 3 формирования позволяет генерировать одновременно несколько точек воздействия, образующих рисунок, оптический сканер 4 позволяет перемещать этот рисунок в плоскости 21 фокусировки, и оптическая система 5  
40 фокусировки позволяет перемещать плоскость 21 фокусировки по глубине таким образом, чтобы создавать разрезы в последовательных плоскостях, образующих объем.

Далее со ссылками на фигуры следует более детальное описание различных элементов, входящих в состав режущего аппарата.

### 2. Элементы режущего аппарата.

#### 45 2.1. Система формирования

Система 3 пространственного формирования лазерного пучка позволяет изменять волновую поверхность лазерного пучка для получения точек воздействия, отделенных друг от друга в фокальной плоскости. В частности, система 3 формирования позволяет

модулировать фазу лазерного пучка 11, выходящего из фемтосекундного лазера 1, таким образом, чтобы получить единый лазерный пучок, модулированный по фазе в соответствии с заданным значением модуляции, рассчитанным таким образом, чтобы образовать пики интенсивности в фокальной плоскости пучка, при этом каждый пик производит соответствующую точку воздействия в фокальной плоскости, соответствующей плоскости резания.

Возможность получать единый модулированный лазерный пучок облегчает применение системы сканирования, такой как оптический сканер, для перемещения множества вторичных лазерных пучков в плоскости резания. Действительно, поскольку входной диаметр системы сканирования приблизительно соответствует диаметру исходного лазерного пучка, то использование единого модулированного лазерного пучка (диаметр которого по существу равен диаметру исходного лазерного пучка) ограничивает риски аберрации, которые могут появляться при технологии разделения пучка, описанной в документе US 2010/0133246.

Согласно представленному варианту выполнения, система 3 формирования является жидкокристаллическим пространственным модулятором света, известным под аббревиатурой SLM от английского "Spatial Light Modulator". Действительно, авторы изобретения обнаружили, что использование модулятора SLM является предпочтительным, несмотря на сведения из известных документов, которые не рекомендуют специалисту в данной области использовать такое устройство (см., в частности, параграф [0024] документа US 2015/0164689).

Модулятор SLM позволяет модулировать конечное распределение энергии лазерного пучка, в частности, в фокальной плоскости 21, соответствующей плоскости резания ткани 2. В частности, модулятор SLM выполнен с возможностью изменения пространственного профиля фронта волны первичного лазерного пучка 11, выходящего из фемтосекундного лазера 1, для распределения энергии лазерного пучка на разные пятна фокусировки в плоскости фокусировки. Это устройство позволяет ограничить затраты, связанные с промышленным внедрением предложенного решения.

Модуляцию по фазе фронта волны можно рассматривать как явление интерференций в двух измерениях. Каждый участок выходящего из источника исходного лазерного пучка задерживают или сдвигают вперед по отношению к первоначальному фронту волны, чтобы перенаправить каждый из этих участков для получения конструктивной интерференции в N разных точках в фокальной плоскости линзы. Это перераспределение энергии во множестве точек воздействия происходит только в одной плоскости (то есть в плоскости фокусировки), а не вдоль всего пути распространения модулированного лазерного пучка. Таким образом, наблюдение модулированного лазерного пучка до или после плоскости фокусировки не позволяет идентифицировать перераспределение энергии во множестве разных точек воздействия по причине этого явления, которое можно приравнять к конструктивным интерференциям (которые имеют место только в одной плоскости, а не вдоль всего пути распространения, как в случае разделения первоначального лазерного пучка на множество вторичных лазерных пучков).

Чтобы лучше понять это явление фазовой модуляции фронта волны, на фиг. 2 схематично показаны профили интенсивности 32а-32е, полученные для трех примеров разных оптических установок. Как показано на фиг. 2, излучаемый лазерным источником 1 лазерный пучок 11 проявляет пик интенсивности 32а гауссовой формы в точке воздействия 33а в плоскости 21 фокусировки. Введение делителя 7 пучка между источником 1 и плоскостью 21 фокусировки приводит к генерированию множества вторичных лазерных пучков 71, при этом каждый вторичный лазерный пучок 71

производит соответствующую точку воздействия 33b, 33c в плоскости 21 фокусировки вторичных лазерных пучков 71. Наконец, введение между источником 1 и плоскостью 21 фокусировки модулятора SLM 3, запрограммированного при помощи фазовой маски, образующей заданное значение модуляции, приводит к модуляции фазы фронта волны лазерного пучка 11, выходящего из источника 1. Лазерный пучок 31, фаза фронта волны которого была модулирована, позволяет задавать появление нескольких пиков интенсивности 33d, 33e, разделенных в пространстве в фокальной плоскости 21 лазерного пучка, при этом каждый пик 32d, 32e соответствует соответствующей точке воздействия 33d, 33e, реализующей резание. Метод модуляции фазы фронта волны позволяет генерировать одновременно несколько кавитационных пузырьков без ослабления первоначального лазерного пучка, производимого фемтосекундным лазером 1.

Модулятор SLM является устройством, состоящим из слоя жидких кристаллов с управляемой ориентацией и позволяющим динамично профилировать фронт волны и, следовательно, фазу лазерного пучка. Слой жидких кристаллов модулятора SLM скомпонован в виде сетки (или матрицы) пикселей. Оптической толщиной каждого пикселя управляют электрически путем ориентации молекул жидкого кристалла, принадлежащих к поверхности, соответствующей пикселю. Модулятор SLM (9) использует принцип анизотропии жидких кристаллов, то есть изменение индекса жидких кристаллов в зависимости от их пространственной ориентации. Ориентацию жидких кристаллов можно производить при помощи электрического поля. Таким образом, изменение индекса жидких кристаллов изменяет фронт волны лазерного пучка (4).

Как известно, модулятор SLM применяет фазовую маску, то есть карту, определяющую, каким образом необходимо изменить фазу пучка, чтобы получить заданное распределение амплитуды в его плоскости фокусировки. Фазовая маска является двумерным изображением, каждая точка которого связана с соответствующим пикселем модулятора SLM. Эта фазовая маска позволяет управлять индексом каждого жидкого кристалла модулятора SLM, преобразуя значение, связанное с каждой точкой маски, отображенной по уровням серого, заключенным между 0 и 255 (то есть от черного до белого), в командное значение, отображенное в виде фазы от 0 до 2 $\pi$ . Таким образом, фазовая маска представляет собой заданное значение модуляции, выведенное на модулятор SLM, чтобы получить при отражении неравное пространственное смещение фазы лазерного пучка (4), освещающего модулятор SLM. Разумеется, специалист в данной области знает, что диапазон уровня серого может меняться в зависимости от используемой модели модулятора SLM. Например, в некоторых случаях диапазон уровня серого может быть заключен между 0 и 220. Как правило, фазовую маску вычисляют при помощи:

- итеративного алгоритма, основанного на преобразовании Фурье, такого как алгоритм типа "IFTA", что является сокращением от англосаксонского выражения "Iterative Fourier Transform Algorithm", или
- различных алгоритмов оптимизации, таких как генетические алгоритмы или моделируемый отжиг.

Это позволяет контролировать однородность, интенсивность, качество и форму различных точек воздействия, создаваемых в плоскости резания.

Для модулятора SLM можно применять разные фазовые маски в зависимости от числа и положения требуемых точек воздействия в фокальной плоскости лазерного пучка. Во всех случаях специалист в данной области сможет рассчитать значение в каждой точке фазовой маски для распределения энергии лазерного пучка на различные пятна фокусировки в фокальной плоскости.

Таким образом, на основании гауссова лазерного пучка, генерирующего единственную точку воздействия, и при помощи фазовой маски модулятор SLM позволяет распределить его энергию путем фазовой модуляции таким образом, чтобы генерировать одновременно несколько точек воздействия в его плоскости фокусировки, исходя из единого лазерного пучка, сформированного путем фазовой модуляции (только один пучок на входе и на выходе модулятора SLM).

Кроме сокращения времени разрезания роговицы, метод модуляции фазы лазерного пучка в соответствии с изобретением обеспечивает также другие преимущества, такие как повышение качества поверхности после разрезания или сокращение смертности при эндотелиальных опухолях. Различные точки воздействия рисунка могут быть, например, разделены равномерными промежутками в двух измерениях фокальной плоскости лазерного пучка, чтобы получить сетку из лазерных пятен.

Таким образом, система 3 формирования позволяет осуществлять хирургическую операцию разрезания быстро и эффективно. Модулятор SLM позволяет динамично профилировать фронт волны лазерного пучка, так как его можно параметризовать в цифровом виде. Эта модуляция обеспечивает динамичное и воспроизводимое формирование лазерного пучка.

Модулятор SLM может быть также выполнен с возможностью формировать фронт волны лазерного пучка совсем по-другому. Например, каждая точка воздействия может иметь любую геометрическую форму, отличную от круглой (например, форму эллипса и т.д.). Это может дать некоторые преимущества в зависимости от предусматриваемого применения, такие как повышение скорости и/или качества резания.

## 2.2. Оптический сканер

Оптический сканер 4 позволяет отклонять модулированный по фазе лазерный пучок таким образом, чтобы перемещать рисунок 8 во множество положений 43а-43с в плоскости 21 фокусировки, соответствующей плоскости резания.

Оптический сканер 4 содержит:

- входное отверстие для захождения модулированного по фазе лазерного пучка 31, выходящего из блока 3 формирования,
- одно (или несколько) оптическое(их) зеркало (зеркал), поворачивающееся(ихся) вокруг по меньшей мере двух осей для отклонения модулированного по фазе лазерного пучка 31, и
- выходное отверстие, направляющее отклоненный модулированный лазерный пучок 41 в сторону оптической системы 5 фокусировки.

Используемый оптический сканер 4 является, например, сканирующей головкой IntelliScan III, выпускаемой компанией SCANLAB AG.

Входное и выходное отверстия такого оптического сканера 4 имеют диаметр примерно от 10 до 20 миллиметров, и достигаемые скорости сканирования составляют примерно от 1 м/с до 10 м/с.

Зеркало (или зеркала) соединено(ы) с приводом (или приводами) для обеспечения их поворота. Этот(и) привод(ы) для поворота зеркала (или зеркал) предпочтительно управляется(ются) блоком 6 управления, который будет подробно описан ниже.

Блок 6 управления запрограммирован для управления оптического сканера 4 таким образом, чтобы перемещать рисунок 8 вдоль пути 42 перемещения, заключенного в плоскости 21 фокусировки. В некоторых вариантах выполнения путь 42 перемещения содержит множество сегментов резания 42а-42с. Предпочтительно путь 42 перемещения может иметь форму зубца. В этом случае, если оптический сканер 4 начинает первый сегмент резания 42а слева, то второй сегмент резания 42b он начнет справа, затем третий

сегмент резания 42с слева, затем следующий сегмент справа и так далее по всему пути 42 перемещения рисунка 8. Это позволяет ускорить разрезание ткани и избежать необходимости для оптического сканера 4 опять располагать рисунок 8 в начало каждого последовательного сегмента резания 42а-42с.

5 Чтобы еще ускорить операцию разрезания в плоскости 21 фокусировки, предпочтительно путь 42 перемещения может иметь форму спирали. Это позволяет сохранять постоянной скорость сканирования оптического сканера 4 во всей плоскости резания. Действительно, в случае пути 42 перемещения в виде зубца оптический сканер 4 должен останавливаться в конце каждого сегмента резания 42а, чтобы переместиться  
10 на следующий сегмент резания 42b, что требует дополнительного времени.

Сканирование пучка оказывает влияние на получаемый результат резания. Действительно, применяемая скорость сканирования, а также шаг сканирования являются параметрами, влияющими на качество резания.

Предпочтительно шаг сканирования, соответствующий расстоянию “dist” между  
15 двумя смежными положениями 43а, 43b рисунка 8 вдоль сегмента пути 42 перемещения, выбирают таким образом, чтобы он был больше или равен диаметру точки 81 воздействия рисунка 8. Это позволяет ограничить риски наложения друг на друга точек воздействия во время последовательных облучений.

Если путь 42 перемещения имеет форму зубца, расстояние “éc” между двумя смежными  
20 сегментами 42а, 42b пути 42 перемещения предпочтительно выбирают таким образом, чтобы оно превышало размер рисунка 8 вдоль перпендикуляра к его направлению перемещения. Это тоже позволяет ограничить риски наложения друг на друга точек воздействия во время последовательных облучений.

Наконец, чтобы ограничить продолжительность операции разрезания в плоскости  
25 резания и обеспечивать при этом определенное качество резания, расстояние между двумя смежными сегментами 42а, 42b пути 42 перемещения можно выбрать равным максимуму (и предпочтительно меньшим) 3N-кратного диаметра точки 81 воздействия, где N является числом точек воздействия рисунка 8.

В варианте выполнения режущий аппарат дополнительно содержит призму Дове.  
30 Предпочтительно ее располагают между системой 3 формирования и оптическим сканером 4. Призма Дове позволяет осуществлять вращение рисунка 8, что может быть полезным в некоторых вариантах применения, или ограничивать размер зоны начала каждого сегмента резания 42а-42с.

Предпочтительно блок 6 управления может быть запрограммирован таким образом,  
35 чтобы активировать фемтосекундный лазер 1, когда скорость сканирования оптического сканера 4 превышает пороговое значение.

Это позволяет синхронизировать излучение лазерного пучка 11 со сканированием оптического сканера 4. В частности, блок 6 управления активирует фемтосекундный лазер 1, когда скорость поворота зеркала (или зеркал) оптического сканера 4 является  
40 постоянной. Это позволяет повысить качество резания за счет обеспечения однородной поверхности плоскости резания.

### 2.3. Оптическая система фокусировки

Оптическая система 5 фокусировки позволяет перемещать плоскость 21 фокусировки модулированного и отклоненного лазерного пучка 41 в определяемой пользователем  
45 плоскости резания ткани 2.

Оптическая система 5 фокусировки содержит:

- входное отверстие для захождения модулированного по фазе и отклоненного лазерного пучка, выходящего из оптического сканера,

- линзу (или несколько линз), оснащенную(ые) приводом для обеспечения ее(их) перемещения поступательным движением вдоль оптического пути модулированного по фазе и отклоненного лазерного пучка, и

5 - выходное отверстие, направляющее сфокусированный лазерный пучок в сторону обрабатываемой ткани.

Линза или линзы, используемые в оптической системе 5 фокусировки, могут быть линзами f-theta или телецентрическими линзами. Линзы f-theta и телецентрические линзы позволяют получать плоскость фокусировки по всему полю XY в отличие от стандартных линз, при которых она является изогнутой. Это позволяет гарантировать  
10 постоянный размер сфокусированного пучка по всему полю. В случае линз f-theta положение пучка прямо пропорционально применяемому сканером углу, тогда как в случае телецентрических линз пучок всегда является нормальным к образцу.

Блок 6 управления запрограммирован для управления перемещением линзы (или линз) оптической системы 5 фокусировки вдоль оптического пути лазерного пучка  
15 таким образом, чтобы перемещать плоскость 21 фокусировки по меньшей мере в трех соответствующих плоскостях резания 22а-22е, чтобы получить послойный набор плоскостей резания ткани 2. Это позволяет осуществлять разрезание в объеме 23, например, в рамках рефракционной хирургии.

Блок 5 управления выполнен с возможностью управлять перемещением оптической  
20 системы 5 фокусировки для перемещения плоскости 21 фокусировки между первым крайним положением 22а и вторым крайним положением 22е в этом порядке. Предпочтительно второе крайнее положение 22е находится ближе к фемтосекундному лазеру 1, чем первое крайнее положение 22а.

Таким образом, плоскости резания 22а-22е получают, начиная с наиболее глубокой  
25 плоскости резания 22а в ткани и послойно располагая последовательные плоскости резания до наиболее поверхностной плоскости резания 22е в ткани 2. Это позволяет избегать проблем, связанных с проникновением лазерного пучка в ткань 2.

Действительно, кавитационные пузырьки образуют непрозрачный пузырьковый барьер (известный под названием "OBL", что является сокращением от английского выражения  
30 "Opaque Bubble Layer"), препятствующий распространению под ними энергии лазерного пучка. Следовательно, предпочтительно сначала создавать наиболее глубокие кавитационные пузырьки, чтобы повысить эффективность режущего аппарата.

Предпочтительно длина оптического пути между системой 3 формирования и оптической системой 5 фокусировки меньше 2 метров и еще предпочтительнее - меньше  
35 1 метра. Это позволяет ограничить потери мощности, связанные с энергией, рассеиваемой на оптическом пути. Действительно, чем больше расстояние между системой 3 формирования и оптической системой 5 фокусировки, тем больше потеря мощности на пути.

Предпочтительно блок 6 управления может быть запрограммирован для изменения  
40 формы рисунка 8 между двумя последовательными плоскостями резания 22а-22b (или 22b-22с, или 22с-22d, или 22d-22е). Действительно, во время резания в объеме 23 иногда необходимо повышать точность резания в периферических плоскостях резания 22а, 22е и повышать скорость резания в промежуточных плоскостях резания 22b, 22с, 22d, находящихся между периферическими плоскостями резания 22а, 22е. Например, в случае  
45 разрезания объема 23, состоящего из послойно расположенных пяти плоскостей резания 22а-22е, блок 6 управления может управлять системой 3 формирования, передавая в нее:

- первую фазовую маску, соответствующую первому рисунку и позволяющую

повысить точность резания, когда плоскость фокусировки соответствует первой и пятой плоскостям резания 22a и 22e,

- вторую фазовую маску, когда плоскость фокусировки соответствует второй, третьей и четвертой плоскостям резания 22b-22d.

5 Точно так же, блок 6 управления может быть запрограммирован для изменения шага “dist” оптического сканера 4 и/или формы разрезаемой зоны (путем изменения пути перемещения рисунка) между двумя соответствующим плоскостями резания. Это позволяет также либо повысить точность резания, либо повысить скорость резания от одной плоскости резания к другой.

10 Наконец, блок 6 управления может быть запрограммирован для управления оптическим сканером 4 таким образом, чтобы изменять площадь, вырезаемую в плоскости 21 фокусировки между двумя последовательными плоскостями резания 22d, 22e. Это позволяет изменять форму вырезаемого в конечном счете объема в зависимости от предусмотренного применения.

15 Предпочтительно расстояние между двумя последовательными плоскостями резания составляет от 2 мкм до 500 мкм и, в частности:

- от 2 до 20 мкм для обработки объема, требующего высокой точности, например, при рефракционной хирургии, предпочтительно с промежутком от 5 до 10 мкм, или

20 - от 20 до 500 мкм для обработки объема, не требующего высокой точности, например, для разрушения центральной части ядра хрусталика, предпочтительно с промежутком от 50 до 200 мкм.

Разумеется, это расстояние может меняться в объеме 23, состоящем из послойного набора плоскостей резания 22a-22e.

#### 2.4. Фильтр

25 Режущий аппарат может также содержать фильтр, расположенный на выходе системы 3 формирования.

Фильтр позволяет, с одной стороны, блокировать «паразитную» энергию, генерируемую в центре системы 3 формирования (явление, известное под названием «нулевого порядка»). Действительно, во время модулирования по фазе лазерного пучка при помощи системы формирования часть лазерного пучка, выходящего из лазерного источника 1, не подвергается модуляции (по причине пространства, существующего между пикселями жидких кристаллов модулятора SLM). Эта не модулированная часть лазерного пучка может приводить к образованию пика энергии в центре модулятора SLM.

35 С другой стороны, фильтр позволяет ограничить риски лазерных травм, наносимых пациенту в случае отказа системы 3 формирования. Действительно, если система 3 формирования неисправна, лазерный пучок не модулируется, что приводит к образованию пика очень сильной энергии в центре системы 3 формирования. Блокируя этот пик очень сильной энергии, фильтр позволяет избежать несвоевременного образования кавитационных пузырьков.

Фильтр может быть установлен между двумя собирающими линзами, расположенными на выходе системы 3 формирования. Действительно, порядок 0 может быть устранен только в плоскости Фурье (то есть в фокусе линзы), где происходит формирование пучка.

45 Например, фильтр представляет собой пластинку, прозрачную к лазерному излучению на всей своей поверхности за исключением центральной области пластинки, которая является непрозрачной к лазерному излучению. Чтобы сделать центральную область пластинки непрозрачной к лазерному излучению, фильтр может содержать

непрозрачную накладку, расположенную в центре поверхности, при этом накладка имеет диаметр, превышающий или равный диаметру лазерного пучка.

При этом фильтр позиционируют таким образом, чтобы прямая, нормальная к системе 3 формирования и проходящая через центр указанной системы 3 формирования, проходила также через центральную область, непрозрачную к лазерному излучению.

## 2.5. Блок управления

Как было указано выше, блок 6 управления позволяет управлять различными элементами, входящими в состав режущего аппарата, а именно фемтосекундным лазером 1, системой 3 формирования, оптическим сканером 4 и оптической системой 5 фокусировки.

Блок 6 управления соединен с этими различными элементами через одну (или несколько) шину(шин) связи, обеспечивающую(ие):

- передачу командных сигналов, таких как
- фазовая маска в систему формирования,
- сигнал активации в фемтосекундный лазер,
- скорость сканирования в оптический сканер,
- положение оптического сканера вдоль пути перемещения,
- глубина резания в оптическую систему фокусировки,
- прием данных измерения, поступающих от различных элементов системы, таких как
- скорость сканирования, достигаемая оптическим сканером, или
- положение оптической системы фокусировки, и т.д.

Блок 6 управления может состоять из одного (или нескольких) рабочих постов, и/или из одного (или нескольких) компьютеров, или может быть блоком любого другого типа, известного специалисту в данной области. Например, блок 6 управления может включать в себя мобильный телефон, электронный планшет (такой как IPAD®), карманный персональный компьютер (или "PDA" - сокращение от англо-саксонского выражения "Personal Digital Assistant"), и т.д. Во всех случаях блок 6 управления содержит процессор, запрограммированный для обеспечения управления фемтосекундным лазером 1, системой 3 формирования, оптическим сканером 4, оптической системой 5 фокусировки, и т.д.

## 2.6. Рисунок

Изменяемая модуляция фронта волны лазерного пучка позволяет генерировать множественные одновременные точки 81 воздействия, каждая из которых имеет размер и контролируемое положение в плоскости 21 фокусировки.

Эти различные точки 81 воздействия образуют рисунок 8 в фокальной плоскости модулированного лазерного пучка.

Число точек 81 воздействия уменьшается настолько же, насколько уменьшается время, необходимое для хирургической операции разрезания.

Вместе с тем, размер рисунка 8, число содержащегося в нем точек 81 воздействия и их соответствующие положения относительно направления перемещения являются техническими характеристиками, выбираемыми надлежащим образом, чтобы соблюдать технические условия, связанные с разрезанием ткани, что будет показано ниже.

### 2.6.1. Условия и выбираемые решения

#### 2.6.1.1. Максимальное число точек воздействия в рисунке

Чтобы ускорить разрезание ткани 2, предпочтительно используют рисунок 8, включающий в себя максимальное число точек 81 воздействия. В современных офтальмологических лазерных системах энергия на один импульс и на одно пятно,

необходимая для разрезания роговицы, составляет около 1 мДж. Таким образом, при использовании фемтосекундного лазера, такого как лазерный источник Satsuma (выпускаемый компанией Amplitude System), выдающий мощность 20 Вт при частоте 500кГц, то есть максимальную энергию 40 мкДж/импульс, теоретически можно создать рисунок 8, состоящий из 40 идентичных точек 81 воздействия.

Однако в любой лазерной системе вдоль оптического пути происходят потери. Так, в прототипе, испытанном заявителем, мощность, достигающая роговицы, составляет всего 12 Вт при формировании шести точек 81 воздействия общим размером (30мкм\*20мкм). Диаметр сфокусированного пучка составил 8 мкм против максимального значения, составляющего около 4 мкм для современных офтальмологических лазеров. В рамках испытанного заявителем прототипа была необходима энергия на одно пятно, в 4 раза превышающая энергию современных офтальмологических лазеров, то есть 4 мДж. Таким образом, для этого прототипа был выбран рисунок, состоящий из шести точек 81 воздействия (максимум). Разумеется, если мощность фемтосекундного лазера 1 является более значительной, рисунок 8 может содержать число точек 81 воздействия более шести.

#### 2.6.1.2. Распределение точек воздействия в рисунке

Шесть точек 81 воздействия рисунка 8 могут быть распределены в соответствии с разными конфигурациями.

Например, шесть точек 81 воздействия могут быть распределены вдоль единственной линии. При этом общая длина рисунка 8 равна сумме диаметра точки 81 воздействия и расстояния между центрами крайних точек 81 воздействия рисунка 8. Ширина рисунка 8 равна диаметру точки 81 воздействия.

Как было указано выше, формирование лазерного пучка влечет за собой потерю мощности, связанную с энергией, рассеиваемой на оптическом пути. Общий размер формирования (и, следовательно, размер рисунка 8) входит в число факторов, влияющих на эту потерю энергии.

Чем больше размер (по длине и по ширине) рисунка 8, тем больше потеря мощности. Таким образом, распределение шести точек 81 воздействия на единственной линии приводит к большой потере мощности.

Например:

- рисунок 8 размером 30мкм\*22мкм, содержащий шесть точек 81 воздействия, дает потерю мощности около 10%, тогда как

- рисунок 8 размером 84мкм\*20мкм, содержащий пять точек 81 воздействия, дает потерю мощности около 25%.

Таким образом, для данного числа точек 81 воздействия «компактные» рисунки (соотношение размеров по длине и по ширине близко к 1) приводят к меньшей потере энергии.

По этой причине точки 81 воздействия рисунка 8 предпочтительно заключены в поверхности, для которой соотношение между длиной и шириной составляет от 1 до 4, предпочтительно от 1 до 2 и еще предпочтительнее - от 1 до 1,5.

Например, шесть точек 81 воздействия рисунка 8 могут быть распределены на первой и второй параллельных линиях 82, 83:

- при этом первая линия 82 проходит через три точки 81a-81c воздействия, образующие первый триплет, и

- вторая линия 83 проходит через три другие точки 81d-81f воздействия, образующие второй триплет, отличный от первого триплета.

Рисунок, соответствующий этому распределению, показан на фиг. 5. Предпочтительно

точки 81a-81f воздействия рисунка могут быть смещены от одной линии к другой в направлении перемещения D. В частности, точки 81a-81c воздействия первого триплета могут быть смещены на не равное нулю расстояние (в направлении перемещения D) по отношению к точкам 81d-81f воздействия второго триплета. Это позволяет избежать наложения друг на друга кавитационных пузырьков в плоскости резания во время перемещения рисунка 8 оптическим сканером 4.

#### 2.6.1.3. Минимальное расстояние между точками воздействия рисунка

Кроме распределения точек 81 воздействия рисунка 8, другим параметром рисунка является расстояние между смежными точками воздействия.

Это расстояние определено условиями, связанными с системой формирования.

Во время операции формирования лазерного пучка, выходящего из фемтосекундного лазера, «слишком близкие» точки воздействия накладываются друг на друга по причине пространственной когерентности источника. Эти наложения нарушают форму точек воздействия и делают невозможным контроль уровня интенсивности лазера в каждой точке воздействия. Следовательно, расстояние между смежными точками рисунка должно быть достаточным, чтобы ограничить это явление наложения между слишком близкими точками воздействия.

Это «достаточное расстояние» зависит от фокусировки пучка. Чем больше сфокусирован пучок, тем меньше будет это расстояние. С другой стороны, чем меньше сфокусирован пучок, тем больше будет это расстояние.

Учитывая условия рабочего расстояния, связанные с применениями при хирургии заднего сегмента глаза, условия воспроизводимости формирования, а также аберраций оптической системы, нарушающих пространственную когерентность пучка, предел разделения двух пятен составляет примерно 10 мкм.

Поэтому «достаточное расстояние» между центрами двух смежных точек воздействия превышает 5 мкм, предпочтительно превышает 10 мкм и еще предпочтительнее составляет от 10 мкм до 20 мкм, в частности, от 10 мкм до 15 мкм.

#### 2.6.1.4. Ориентация рисунка по отношению к направлению перемещения

Базовая форма, показанная на фиг. 5, может быть ориентирована в сетке по-разному.

Ориентация этой базовой формы, наиболее очевидная для специалиста в данной области, показана на фиг. 6. Эта ориентация состоит в перемещении рисунка в направлении перемещения D, перпендикулярном к двум линиям 82, 83, образованным первым и вторым триплетами точек воздействия 81a-81c и 81d-81f.

Однако применению такой ориентации препятствуют различные ограничения, связанные с системой формирования и с направлением перемещения рисунка.

Как было указано выше, предпочтительно расстояние между двумя смежными точками 81a, 81b рисунка превышает 10 мкм. При перемещении рисунка в направлении перемещения, перпендикулярном к двум линиям 82, 83, образованным первым и вторым триплетами точек воздействия 81a-81c и 81d-81f, расстояние между кавитационными пузырьками, генерируемыми на смежных сегментах 42a, 42b, параллельных направлению перемещения рисунка, будет составлять около 15 мкм.

Однако «классическое» расстояние между смежными кавитационными пузырьками при разрезании роговицы составляет от 2 мкм до 7 мкм, в частности, равно 5 мкм.

Следовательно, необходимо «наклонить» рисунок 8 таким образом, чтобы соседние кавитационные пузырьки, генерируемые на смежных сегментах 42a, 42b, параллельных направлению D перемещения рисунка, были разделены расстоянием, по существу равным 5 мкм, в направлении перемещения.

Следует отметить, что на одном и том же сегменте 42a расстояние 5 мкм между двумя

смежными кавитационными пузырьками можно получить, регулируя шаг перемещения оптического сканера 4.

### 2.6.2. Примеры выбранных рисунков

На фиг. 7-9 представлены различные примеры рисунка, который можно использовать для заявленного режущего аппарата.

В варианте выполнения, представленном на фиг. 7, рисунок содержит три точки воздействия 81a-81c, расположенные вдоль линии 82 рисунка. Точки воздействия разделены расстоянием “d” в направлении перемещения D. Линия рисунка наклонена под углом “α” относительно направления перемещения D оптического сканера 4 таким образом, что кавитационные пузырьки вдоль прямой, перпендикулярной к направлению перемещения D, разделены расстоянием “e” в плоскости резания. При этом получают следующее отношение между различными расстояниями “d” и “e” и углом наклона “α”:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{e}{d} \right)$$

Предпочтительно угол наклона “α” рисунка составляет от 10° до 80°.

В варианте выполнения, представленном на фиг. 8, рисунок содержит четыре точки воздействия 81a-81d, расположенные вдоль двух параллельных линий 82, 83 рисунка 8:

- первая пара точек воздействия 81a, 81b расположена вдоль первой линии 82 рисунка,
- вторая пара точек воздействия 81c, 81d расположена вдоль второй линии 83 рисунка.

Этот рисунок имеет форму квадрата, наклоненного под углом наклона “α” относительно направления перемещения оптического сканера. Получаем следующее отношение:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{e}{d} \right)$$

где:

- “α” является углом наклона каждой линии рисунка относительно направления перемещения,
- “d” соответствует расстоянию между двумя смежными точками воздействия,
- “e” соответствует расстоянию между двумя смежными точками воздействия в направлении, перпендикулярном к направлению перемещения рисунка.

В варианте выполнения, представленном на фиг. 9, рисунок содержит шесть точек воздействия 81a-81f, расположенных вдоль двух параллельных линий рисунка 8:

- первый триплет точек воздействия расположен вдоль первой линии рисунка,
- второй триплет точек воздействия расположен вдоль второй линии рисунка.

Этот рисунок имеет форму прямоугольника, наклоненного под углом наклона “α” относительно направления перемещения оптического сканера. Получаем следующее отношение:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{e}{d} \right)$$

где:

- “α” является углом наклона каждой линии рисунка относительно направления перемещения,
- “d” соответствует расстоянию между двумя смежными точками воздействия, и “e” соответствует расстоянию между двумя смежными точками воздействия в направлении, перпендикулярном к направлению перемещения рисунка.

### 2.6.3. Теория, связанная с определением рисунков

Далее следует описание шагов, предпринятых заявителем для определения возможных форм рисунков точек воздействия, позволяющих получить в конечном итоге компоновку кавитационных пузырьков, представляющую собой повторяющуюся регулярную

5 матрицу:

- либо в виде квадрата,

- либо в виде равностороннего треугольника,

соблюдая при этом минимальный промежуток между смежными точками воздействия, чтобы ограничить вышеупомянутое явление наложения.

10 Существует множество возможных рисунков, чтобы получить при проекции во время их перемещения равномерную и повторяющуюся матрицу кавитационных пузырьков, отстоящих друг от друга на 5 мкм, на всей обрабатываемой площади. Вместе с тем, существует также «идеальная» матрица, точки воздействия в которой достаточно удалены друг от друга, чтобы избежать наложений, и являются достаточно близкими,

15 чтобы общая площадь рисунка была небольшой и вписывалась в ограниченное поле, что является предпочтительным по причине ограниченного размера оптических компонентов и зеркал, которые находятся на пути лазерного пучка.

Мы просто наблюдали расположение пятен либо при квадратной матрице, либо при матрице в виде равностороннего треугольника и определили возможные рисунки для

20 получения такого расположения после приведения в движение рисунка при помощи оптического сканера.

#### 2.6.3.1. Определение рисунка для получения компоновки кавитационных пузырьков в виде треугольной равносторонней матрицы

На фиг. 10, где показана вырезанная плоскость, включающая в себя множество

25 кавитационных пузырьков 100, можно наблюдать компоновку пузырьков в виде равностороннего треугольника, образующего матрицу 101.

Наблюдение позволило нам идентифицировать несколько возможных рисунков, которые вписываются в эту матрицу, как показано на фиг. 11a-11c.

На практике невозможно применить ни одну из трех показанных матриц.

30 Действительно, если расстояние, разделяющее 2 пузырька разрезаемой поверхности, равно  $D$  или 5 мкм, то во избежание наложений необходимо, чтобы минимальное расстояние между 2 точками воздействия рисунка было равно 10 мкм, то есть как минимум  $2D$ .

Однако в трех примерах рисунков, показанных на фиг. 11a-11c, всегда существуют

35 по меньшей мере две точки воздействия рисунка, слишком близкие друг к другу (расстояние =  $D * \cos(30^\circ) * 2 = 1,73 * D$ . То есть при  $D = 5$  мкм расстояние равно 8,65 мкм (см. фиг. 12).

Эти наблюдения позволили нам определить рисунок, в котором все точки воздействия отстоят друг от друга на расстояние  $2 * D$  и который позволяет получить компоновку

40 в виде равностороннего треугольника.

Первый пример рисунка показан на фиг. 13-15, где все точки отстоят друг от друга как минимум на  $2 * D$ , то есть для расстояний  $A$  и  $B$ , если  $D = 5$  мкм:

$$A = D * \cos(30^\circ) * 4 = 17 \text{ мкм}$$

45 
$$B = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2} = 13,22 \text{ мкм}$$

С другой стороны, расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга точками матрицы равно

$$C = \sqrt{(4,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2} = 31,22 \text{ мкм}$$

Наконец, на этой матрице точное распределение углов (см. фиг. 15) позволяет воспроизвести равномерный рисунок в виде равностороннего треугольника, и углы относительно горизонтали и вертикали равны:

$$A = D * \cos(30^\circ) * 4$$

$$5 \quad B = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

$$C = \sqrt{(4,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

$$\alpha = 19,1^\circ$$

$$\beta = 16,1^\circ$$

10 Второй пример рисунка показан на фиг. 16-18, где все точки отстоят друг от друга как минимум на  $2 * D$ , то есть для расстояний  $A$ , если  $D = 5$  мкм:

$$A = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2} = 13,22 \text{ мкм.}$$

15 С другой стороны, расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга точками равно

$$C = \sqrt{(5,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2} = 35 \text{ мкм}$$

Наконец, на этом рисунке точное распределение углов позволяет воспроизвести матрицу в виде равностороннего треугольника, и углы относительно горизонтали и вертикали равны:

$$20 \quad A = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

$$C = \sqrt{(5,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

$$\alpha = 19,1^\circ$$

$$25 \quad \beta = 16,1^\circ$$

Таким образом, из вышеизложенного вытекает, что можно использовать два разных рисунка, чтобы после приведения в движение получить регулярную компоновку пузырьков, расположенных в матрице в виде равностороннего треугольника.

30 Выбор между первым или вторым рисунками скорее всего будет сделан в пользу первого, так как максимальный промежуток между 2 наиболее удаленными точками равен 31,22 мкм, а не 35 мкм, то есть форма является более компактной.

Дополнительным преимуществом этих рисунков является то, что число точек можно увеличить сверх 6 (2 x 3 точки) путем добавления новых рядов точек, соблюдая те же расстояния и углы и переходя к рисункам из 9 (3 x 3) или 12 точек (3 x 4) и более.

35 2.6.3.2. Определение рисунка для получения компоновки кавитационных пузырьков в виде квадратной матрицы

На фиг. 19, где показана вырезанная плоскость, включающая в себя множество кавитационных пузырьков 100, можно наблюдать компоновку пузырьков в виде квадрата, образующую матрицу 101.

40 Наблюдение позволило нам идентифицировать возможный рисунок, который вписывается в эту матрицу и который соблюдает минимальный промежуток между 2 точками, равный 2-кратному расстоянию  $D$ :

$$A = \sqrt{8D^2} = 14,14 \text{ мкм}$$

$$45 \quad B = \sqrt{5D^2} = 11,18 \text{ мкм}$$

$$E = 3D = 15 \text{ мкм.}$$

С другой стороны, расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга точками рисунка равно:

$$C = \sqrt{41D^2} = 32 \text{ мкм}$$

Наконец, на этой матрице точное распределение углов позволяет воспроизвести правильный рисунок в виде квадрата, и угол относительно горизонтали равен  $\alpha = 26,56^\circ$ .

### 2.6.3.3. Частный случай перемежающихся рисунков

Мы описали принцип использования рисунков лазерных пятен для получения равномерной компоновки кавитационных пузырьков в обрабатываемой ткани. Эти рисунки имеют особую компоновку лазерных пятен, расположение которых относительно друг друга и разделяющее их расстояние позволяют соблюдать изложенные выше требования и, в частности, минимальное расстояние между каждым пятном, чтобы избежать наложений, и максимальное расстояние между каждой точкой воздействия, чтобы добиться удовлетворительного качества резания. Все представленные выше рисунки характеризуются тем, что, когда их приводят в движение при сканировании сканером, они равномерно и однородно покрывают поверхность равноудаленными кавитационными пузырьками, не оставляя необработанных зон. В конце сегмента, имеющего регулярную компоновку точек воздействия, как показано на фиг. 23, сканер задает матрице перемещение на один шаг 106, равный расстоянию между наиболее удаленными друг от друга рядами 104 точек воздействия, увеличенному на расстояние между двумя смежными линиями 105.

Вариант рисунка, представленный на фиг. 24, предполагает оставление необработанной зоны ZNT, показанной на фиг. 25, и эту зону ZNT можно обработать при следующем сканировании с компоновкой перемежающихся точек воздействия. Для этого, шаг, задаваемый сканером между двумя последовательными сегментами, не является постоянным и будет один раз из двух равен двукратному расстоянию между двумя смежными рядами 107 точек воздействия и один раз из двух равен расстоянию между наиболее удаленными друг от друга рядами 108 точек воздействия, увеличенному на расстояние между двумя смежными линиями 105.

### 2.6.3.4. Частный случай рисунка с центральной точкой воздействия

На фиг. 28 представлен другой пример рисунка, который можно использовать для разрезания ткани. Этот рисунок содержит множество (то есть по меньшей мере три) периферических точек 81Р воздействия и центральную точку 81В воздействия, расположенную в барицентре рисунка, в частности, в примере, представленном на фиг. 28, на уровне пересечения между диагональными осями, проходящими через противоположные периферические точки воздействия.

Присутствие этой центральной точки воздействия позволяет воспользоваться явлением генерирования энергии в центре рисунка (явление, известное под названием «нулевого порядка»). Действительно, во время фазовой модуляции лазерного пучка 11 при помощи системы 3 формирования часть лазерного пучка, выходящего из фемтосекундного лазера, остается не модулированной (по причине наличия пространства между пикселями жидких кристаллов модулятора SLM). Эта немодулированная часть лазерного пучка может привести к появлению пика энергии в центре модулятора SLM.

Если рисунок не содержит точки воздействия на уровне этого барицентра, необходимо ограничить этот пик энергии нулевого порядка, чтобы избежать несвоевременного образования кавитационных пузырьков при перемещении рисунка в плоскости резания.

### 2.6.3.5. Примечания

Выше было описано, каким образом следует расположить точки воздействия многоточечного лазерного пучка, чтобы образующиеся пузырьки имели равномерную и регулярную компоновку на поверхности разрезания ткани. Среди бесконечного

множества неравномерных компоновок, которые тоже можно использовать, было показано, что для получения регулярной компоновки в виде равностороннего треугольника существуют два предпочтительных типа рисунков и для получения регулярной компоновки в виде квадрата существует один предпочтительный рисунок.  
 5 Для всех предпочтительных матриц были рассчитаны промежутки и углы между каждой точкой матрицы.

Разумеется, изобретение касается также любого типа рисунка, точки воздействия в котором в достаточной степени удалены друг от друга, чтобы избежать наложений, и движение которого позволяет получить при проекции относительно равномерный  
 10 охват разрезаемой поверхности даже без регулярного повторения геометрической матрицы, даже если представленные матрицы дают лучшие результаты.

Недостатком этого типа форм рисунка является введение «зоны начала процесса» 102 на периферии регулярной зоны 103. В этой зоне начала процесса 102 разрезание является неполным, как показано на фиг. 22. Хотя размер этой зоны начала процесса  
 15 102 является очень незначительным по отношению к общему размеру разреза (менее 0,5% диаметра роговичной крышки 8 мм для представленных примеров), эта зона начала процесса 102 должна быть максимально короткой.

#### 2.6.4. Режущее устройство, связанное с рисунком, и соответствующий способ

Подводя итог всему вышесказанному относительно различных характеристик,  
 20 связанных с рисунком, авторы изобретения предложили аппарат для разрезания ткани человека или животного, такой как роговица или хрусталик, при этом указанный аппарат включает в себя фемтосекундный лазер, выполненный с возможностью излучения лазерного пучка в виде импульсов, и устройство обработки, расположенное на выходе указанного фемтосекундного лазера, для обработки лазерного пучка,  
 25 генерируемого фемтосекундным лазером, при этом устройство обработки содержит:  
 - систему 3 формирования, позиционируемую на траектории указанного пучка для модуляции фазы фронта волны лазерного пучка с целью получения лазерного пучка, модулированного по фазе в соответствии с заданным значением модуляции, вычисленным таким образом, чтобы распределить энергию лазерного пучка по меньшей  
 30 мере на две точки 81 воздействия, образующие рисунок 8 в фокальной плоскости 21, соответствующей плоскости резания, при этом каждая точка воздействия осуществляет один разрез,

- оптический сканер 4, расположенный на выходе системы формирования, для перемещения рисунка в плоскости резания в нескольких положениях 43 в направлении  
 35 перемещения D,

- блок управления, включающий в себя процессор, запрограммированный для обеспечения управления фемтосекундным лазером, системой формирования и оптическим сканером с целью наклона рисунка относительно направления перемещения таким образом, чтобы по меньшей мере две точки воздействия рисунка были разделены:

40 - не равным нулю расстоянием вдоль первой оси, параллельной направлению перемещения, с одной стороны, и

- не равным нулю расстоянием вдоль второй оси, перпендикулярной к направлению перемещения, с другой стороны.

Предпочтительно рисунок может содержать по меньшей мере две (в частности, три)  
 45 смежные точки воздействия, расположенные вдоль линии рисунка, при этом угол между указанной линией рисунка и направлением перемещения составляет от 10 до 80°, предпочтительно от 15° до 40° и еще предпочтительнее от 19° до 30°. Кроме того, рисунок может содержать:

- первый набор по меньшей мере из двух (в частности, трех) точек воздействия, расположенных вдоль первой линии рисунка, и
- второй набор по меньшей мере из двух (в частности, трех) других точек воздействия, расположенных вдоль второй линии рисунка, параллельной относительно первой

5

Кроме того, рисунок может содержать по меньшей мере один другой набор точек воздействия, расположенный вдоль по меньшей мере одной другой линии рисунка, параллельной относительно первой и второй линий. Точки воздействия второго набора могут быть смещены на не равное нулю расстояние относительно точек воздействия

первого набора. В варианте каждая точка воздействия второго набора может находиться на одной линии с соответствующей точкой воздействия первого набора вдоль прямой, перпендикулярной к направлению перемещения. Предпочтительно расстояние между

двумя смежными точками воздействия рисунка может превышать 5 мкм, предпочтительно превышать 10 мкм и еще предпочтительнее - составлять от 10 до 15

мкм. Рисунок может быть также вписан в площадь, в которой соотношение между

длиной и шириной составляет от 1 до 4, предпочтительно от 1 до 2 и еще предпочтительнее от 1 до 1,5. Наконец, рисунок может содержать центральную точку воздействия, расположенную в барицентре рисунка.

10

15

Авторы изобретения предложили также способ управления режущим аппаратом, включающим в себя фемтосекундный лазер, выполненный с возможностью излучения лазерного пучка в виде импульсов, устройство обработки, расположенное на выходе фемтосекундного лазера для обработки лазерного пучка, при этом устройство обработки содержит систему формирования, и оптический сканер, при этом способ

содержит этапы, на которых:

20

25

- используя систему формирования, модулируют фазу фронта волны лазерного пучка таким образом, чтобы получить лазерный пучок, модулированный по фазе в соответствии с заданным значением модуляции, рассчитанным для распределения энергии лазерного пучка по меньшей мере на две точки 81 воздействия, образующие рисунок в фокальной плоскости, соответствующей плоскости резания, при этом каждая

30

- используя оптический сканер, перемещают рисунок в плоскости резания в несколько положений в направлении перемещения D,

- наклоняют рисунок относительно направления перемещения таким образом, чтобы по меньшей мере две точки воздействия рисунка были разделены:

35

- не равным нулю расстоянием вдоль первой оси, параллельной направлению перемещения, с одной стороны, и

- не равным нулю расстоянием вдоль второй оси, перпендикулярной к направлению перемещения, с другой стороны.

Предпочтительно этап модуляции может включать в себя формирование рисунка, содержащего по меньшей мере две (в частности, три) смежные точки воздействия, расположенные вдоль линии рисунка, при этом угол между указанной линией рисунка и направлением перемещения составляет от 10 до 80°, предпочтительно от 15° до 40° и еще предпочтительнее от 19° до 30°. Кроме того, этап модуляции может включать в себя формирование рисунка, содержащего:

40

45

- первый набор по меньшей мере из двух (в частности, трех) точек воздействия, расположенных вдоль первой линии рисунка, и

- второй набор по меньшей мере из двух (в частности, трех) точек воздействия, расположенных вдоль второй линии рисунка, параллельной относительно первой

линии.

Этап модуляции может также включать в себя формирование рисунка, имеющего по меньшей мере один другой набор точек воздействия, расположенных вдоль по меньшей мере одной другой линии рисунка, параллельной относительно первой и второй линий. Кроме того, этап модуляции может включать в себя формирование рисунка, в котором точки воздействия второго набора смещены на не равное нулю расстояние относительно точек воздействия первого набора. В варианте этап модуляции может включать в себя формирование рисунка, в котором каждая точка воздействия второго набора находится на одной линии с соответствующей точкой воздействия первого набора вдоль прямой, перпендикулярной к направлению перемещения.

Предпочтительно этап модуляции может включать в себя формирование рисунка, в котором расстояние между двумя смежными точками воздействия рисунка превышает 5 мкм, предпочтительно превышает 10 мкм и еще предпочтительнее - составляет от 10 до 15 мкм.

Этап модуляции может дополнительно включать в себя формирование рисунка, вписанного в площадь, в которой соотношение между длиной и шириной составляет от 1 до 4, предпочтительно от 1 до 2 и еще предпочтительнее от 1 до 1,5. Наконец, этап модуляции может также включать в себя формирование рисунка, содержащего центральную точку воздействия, расположенную в барицентре рисунка.

### 3. Принцип работы

Далее следует описание принципа работы режущего аппарата, представленного на фиг. 1, в рамках разрушения хрусталика в ходе операции на катаракте. Разумеется, что настоящее изобретение не ограничивается только операцией на катаракте.

На первом этапе блок 6 управления:

- передает в систему 3 формирования первую фазовую маску, соответствующую первому рисунку обработки,
  - передает командный сигнал в оптическую систему 5 фокусировки для перемещения плоскости фокусировки на уровень первой плоскости резания в глубине глаза,
  - активирует перемещение оптического сканера 4 до исходного положения резания.
- Сканирование происходит по X, Y, и сканер оснащен зеркалом X, которое обеспечивает сканирование вдоль каждого сегмента пути перемещения рисунка, и другим зеркалом Y, которое после завершения одного сегмента позволяет поменять сегмент. Таким образом, зеркала X и Y работают поочередно.

Когда система 5 фокусировки и оптический сканер 4 оказываются в надлежащем положении и когда фазовая маска загружена в систему 3 формирования, блок 6 управления активирует фемтосекундный лазер 1. Этот лазер генерирует лазерный пучок 11, который проходит через систему 3 формирования. Система 3 формирования модулирует фазу лазерного пучка. Модулированный по фазе лазерный пучок 31 выходит из системы 3 формирования и входит в оптический сканер 4, который отклоняет модулированный лазерный пучок 31. Модулированный и отклоненный лазерный пучок 41 входит в оптическую систему 5 фокусировки, которая фокусирует его в первой плоскости резания.

Каждая точка 81 воздействия рисунка 8 производит кавитационный пузырек. Фемтосекундный лазер 1 продолжает излучать другие импульсы в виде лазерного пучка с определенной частотой. Между каждым импульсом зеркало X поворачивается на определенный угол, что приводит к перемещению рисунка 8 и к созданию новых кавитационных пузырьков, смещенных относительно предыдущих, образуя линию. Таким образом, в плоскости резания формируется первое множество образующих

линию кавитационных пузырьков, причем эти пузырьки расположены в соответствии с рисунком 8 резания. Меняя скорость перемещения зеркала и/или частоту генерирования импульсов фемтосекундным лазером, можно менять расстояние между двумя последовательными рисунками.

5 После того, как это множество пузырьков образует завершённую линию, блок 6 управления деактивирует лазерный источник 1, подает команду на остановку поворота зеркала X и подает команду на поворот зеркала Y оптического сканера 4 до следующего положения резания в зависимости от шага сканирования оптического лазера 4, затем  
10 опять запускает поворот зеркала X в обратном направлении. Когда оптический сканер 4 оказывается в надлежащем положении и зеркало X достигает своей постоянной заданной скорости, блок 6 управления опять активирует фемтосекундный лазер 1. Лазерный пучок 11 проходит через систему 3 формирования, оптический сканер 4 и оптическую систему 5 фокусировки. В первой плоскости резания образуется второй ряд множества кавитационных пузырьков, образующий вторую линию, параллельную  
15 относительно первой линии и расположенную рядом с ней.

Эти операции повторяются во всей первой плоскости резания.

Когда оптический сканер 4 просканирует всю площадь первой плоскости резания, генерируется первая зона резания (форма и размеры которой контролирует блок 6 управления).

20 Блок 6 управления деактивирует фемтосекундный лазер 1 и подает команду на:  
- перемещение поступательным движением линзы (или линз) оптической системы 5 фокусировки для перемещения плоскости 21 фокусировки во вторую плоскость резания,  
- перемещение вращением зеркала (или зеркал) оптического сканера 4 в исходное положение резания второй плоскости резания,  
25 - возможную загрузку системой 3 формирования другой фазовой маски для изменения расположения и/или размера точек воздействия рисунка, и т.д.

Блок 6 управления повторяет операции управления фемтосекундным лазером 1, системой 3 формирования, оптическим сканером 4 и системой 5 фокусировки во второй плоскости резания и, в целом, в последовательных плоскостях резания.

30 После этих различных этапов получают послойный набор плоскостей резания, соответствующий разрушаемому объёму 23.

#### 4. Выводы

Таким образом, изобретение позволяет получить эффективный режущий инструмент. Поскольку точки воздействия рисунка имеют по существу одинаковые размеры (форма,  
35 положение и диаметр каждого пятна динамично контролируются при помощи фазовой маски, рассчитанной и выведенной на модулятор SLM, которая может корректировать погрешности), кавитационные пузырьки, разрывающие разрезаемые биологические ткани, тоже имеют одинаковые размеры. Это позволяет повысить качество получаемого результата с однородной плоскостью резания, в которой все остаточные тканевые  
40 точки имеют по существу одинаковый размер и позволяют хирургу производить рассечение приемлемого качества с учетом важности качества состояния поверхности разрезаемой ткани, если речь идет, например, о роговице.

Изобретение было описано для операций разрезания роговицы в области офтальмологической хирургии, но, разумеется, его можно применять для любого типа операции в офтальмологической хирургии, не выходя за рамки изобретения. Например, изобретение находит свое применение в рефракционной хирургии на роговице, такое как лечение аметропий, в частности, близорукости, дальнозоркости, астигматизма, при  
45 лечении потери аккомодации, в частности, пресбиопии.

Изобретение находит также применение при лечении катаракты с рассечением роговицы, разрезанием задней капсулы хрусталика и фрагментацией хрусталика. Наконец, изобретение связано со всеми случаями клинического или экспериментального применения на роговице или на хрусталике глаза человека или животного.

5 В еще более широком смысле изобретение относится к области лазерной хирургии и находит свое предпочтительное применение при рассечении и, в частности, испарении мягких тканей животного или человека с повышенным содержанием воды.

Понятно, что в описанное выше изобретение можно вносить многочисленные изменения, не выходя при этом за рамки представленных новых сведений и преимуществ.

10 Например, в различных описанных выше вариантах выполнения представленная оптическая система фокусировки, расположенная на выходе оптического сканера, содержит единый модуль, позволяющий:

- с одной стороны, фокусировать модулированный и отклоненный лазерный пучок, и
- 15 - с другой стороны, перемещать плоскость фокусировки в различные плоскости резания.

В варианте оптическая система фокусировки может состоять из двух разных модулей, каждый из которых обеспечивает одну из двух следующих функций:

- первый модуль, называемый «модулем позиционирования по глубине» и
- 20 расположенный на входе оптического сканера, позволяет перемещать плоскость фокусировки в различные плоскости резания,
- второй модуль, называемый «концентрирующим модулем» и расположенный на выходе оптического сканера, позволяет фокусировать модулированный и отклоненный лазерный пучок.

25 В различных описанных выше вариантах выполнения описанная система формирования является модулятором SLM. В варианте система формирования может состоять из множества фазовых масок, при этом каждая фазовая маска действует на фазу лазерного пучка, чтобы распределять энергию лазерного пучка путем фазовой модуляции в соответствии с отдельным рисунком. Например, каждая фазовая маска

30 может представлять собой пластинку (прозрачную к лазерному пучку) переменной толщины, получаемую путем травления.

В этом случае фазовые маски могут быть закреплены на устройстве перемещения, позволяющем перемещать каждую фазовую маску между:

- активным положением, в котором фазовая маска перекрывает оптический путь
- 35 лазерного пучка,
- неактивным положением, в котором фазовая маска не находится на оптическом пути лазерного пучка.

Устройство перемещения содержит, например, подвижную опору, выполненную с возможностью вращения вокруг оси вращения, параллельной оптическому пути

40 лазерного пучка, при этом подвижная опора выполнена таким образом, чтобы обеспечивать позиционирование соответствующей фазовой маски на оптическом пути лазерного пучка с целью изменения его фазы. Однако это решение требует включения в аппарат (устройство перемещения) механических элементов и поэтому не является предпочтительным решением.

45 Кроме того, в представленном выше описании блок управления передает командный сигнал в систему формирования (такой как фазовая маска в случае, когда система формирования является пространственным модулятором света) для распределения энергии лазерного пучка (путем фазовой модуляции) по меньшей мере на две точки

воздействия, образующие рисунок в его фокальной плоскости. В варианте блок управления может быть запрограммирован для передачи нескольких разных командных сигналов, позволяющих генерировать отличные друг от друга рисунки. Это позволяет изменять профиль интенсивности лазерного пучка в зависимости от разных рисунков в плоскости резания, например, для повышения качества резания на уровне контуров поверхности, разрезаемой в плоскости резания.

Следовательно, все изменения этого типа могут быть включены в объем прилагаемой формулы изобретения.

10 (57) Формула изобретения

1. Аппарат для разрезания ткани человека или животного, такой как роговица или хрусталик, содержащий фемтосекундный лазер (1), выполненный с возможностью излучения лазерного пучка в виде импульсов, и устройство обработки для получения рисунка (8), состоящего по меньшей мере из двух точек (81) воздействия в плоскости (21) фокусировки, при помощи лазерного пучка, генерируемого фемтосекундным лазером, при этом устройство обработки расположено на выходе указанного фемтосекундного лазера, отличающийся тем, что устройство обработки содержит:

15 - систему формирования для модуляции фазы фронта волны генерированного фемтосекундным лазером (1) лазерного пучка таким образом, чтобы получить единственный модулированный по фазе лазерный пучок, при этом указанный генерированный фемтосекундным лазером (1) лазерный пучок модулируется в соответствии с заданным значением модуляции, вычисленным таким образом, чтобы распределить энергию единственного модулированного по фазе лазерного пучка по меньшей мере на две точки воздействия, образующие указанный рисунок (8) в фокальной плоскости указанного единственного модулированного по фазе лазерного пучка,

25 - оптическую систему (5) фокусировки для фокусировки указанного единственного модулированного по фазе лазерного пучка в плоскости резания, при этом система формирования расположена между фемтосекундным лазером и оптической системой фокусировки, и

30 - блок (6) управления, выполненный с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки вдоль оптического пути лазерного пучка для перемещения плоскости (21) фокусировки по меньшей мере в трех соответствующих плоскостях резания, так чтобы получить послойный набор поверхностей резания ткани.

2. Аппарат по п. 1, в котором блок управления выполнен с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки для перемещения плоскости фокусировки между исходным положением и конечным положением в этом порядке, при этом конечное положение находится ближе к фемтосекундному лазеру, чем исходное положение.

3. Аппарат по п. 1, в котором длина оптического пути между системой формирования и оптической системой фокусировки меньше 2 метров, предпочтительно меньше 1 метра.

4. Аппарат по любому из пп. 1-3, в котором блок управления запрограммирован для управления системой формирования таким образом, чтобы изменять форму указанного рисунка между двумя соответствующими плоскостями резания.

45 5. Аппарат по п. 4, в котором блок управления запрограммирован для управления системой (3) формирования, при этом указанный блок (6) управления выполнен с возможностью передачи по меньшей мере первого и второго командных сигналов между двумя соответствующими плоскостями резания:

- при этом первый командный сигнал вызывает модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка в соответствии с первым заданным значением модуляции, рассчитанным для распределения энергии лазерного пучка на первые точки воздействия в фокальной плоскости системы формирования, при этом первые точки воздействия образуют первый рисунок,

5 - второй командный сигнал вызывает модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка в соответствии со вторым заданным значением модуляции, рассчитанным для распределения энергии лазерного пучка на вторые точки воздействия в фокальной плоскости системы формирования, при этом вторые точки воздействия образуют второй рисунок, отличный от первого рисунка.

6. Аппарат по любому из пп. 1-5, дополнительно содержащий:

- оптический сканер, расположенный далее по ходу пучка от фемтосекундного лазера, предназначенный для перемещения рисунка в плоскости резания в положения вдоль направления перемещения.

15 7. Аппарат по п. 6, в котором блок управления запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы между двумя последовательными плоскостями резания изменять вырезаемую область в плоскости фокусировки.

8. Аппарат по п. 6 или 7, в котором блок управления запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы между двумя  
20 последовательными плоскостями резания изменять форму вырезаемой области в плоскости фокусировки.

9. Аппарат по любому из пп. 6-8, в котором блок управления запрограммирован для управления оптическим сканером таким образом, чтобы между двумя  
25 последовательными плоскостями резания изменять шаг сканирования оптического сканера.

10. Аппарат по любому из пп. 1-9, в котором блок управления выполнен с возможностью управления перемещением оптической системы фокусировки таким образом, чтобы расстояние между двумя последовательными плоскостями резания составляло от 2 мкм до 500 мкм.

30 11. Аппарат по п. 1, дополнительно содержащий фильтр, расположенный на выходе системы (3) формирования, чтобы блокировать паразитную энергию, генерируемую в центре системы (3) формирования.

12. Аппарат по п. 11, в котором фильтр содержит пластинку, включающую в себя:

35 - зону, непрозрачную для лазерного излучения, расположенную в центре пластинки, и

- зону, прозрачную для лазерного излучения, простирающуюся по периферии непрозрачной зоны.

13. Аппарат по любому из пп. 1-12, в котором система (3) формирования представляет собой набор фазовых масок, при этом каждая маска действует на фазу лазерного пучка, для того чтобы распределять энергию лазерного пучка путем фазовой модуляции в соответствии с отдельным рисунком, при этом маски закреплены на устройстве перемещения, при этом блок управления запрограммирован для управления устройством перемещения таким образом, чтобы перемещать каждую маску между:

45 - активным положением, в котором маска перекрывает оптический путь лазерного пучка,

- неактивным положением, в котором маска не находится на оптическом пути лазерного пучка.

14. Аппарат по любому из пп. 1-12, в котором система (3) формирования представляет

собой пространственный модулятор света, при этом блок управления запрограммирован для управления пространственным модулятором света путем передачи по меньшей мере одного управляющего сигнала, вызывающего модуляцию фазы фронта волны лазерного пучка в соответствии с заданным значением модуляции, рассчитанным для 5 распределения энергии лазерного пучка на точки воздействия в фокальной плоскости системы формирования.

15. Аппарат по п. 14, в котором заданное значение модуляции представляет собой фазовую маску, рассчитанную с использованием итеративного алгоритма, основанного на преобразовании Фурье.

10

15

20

25

30

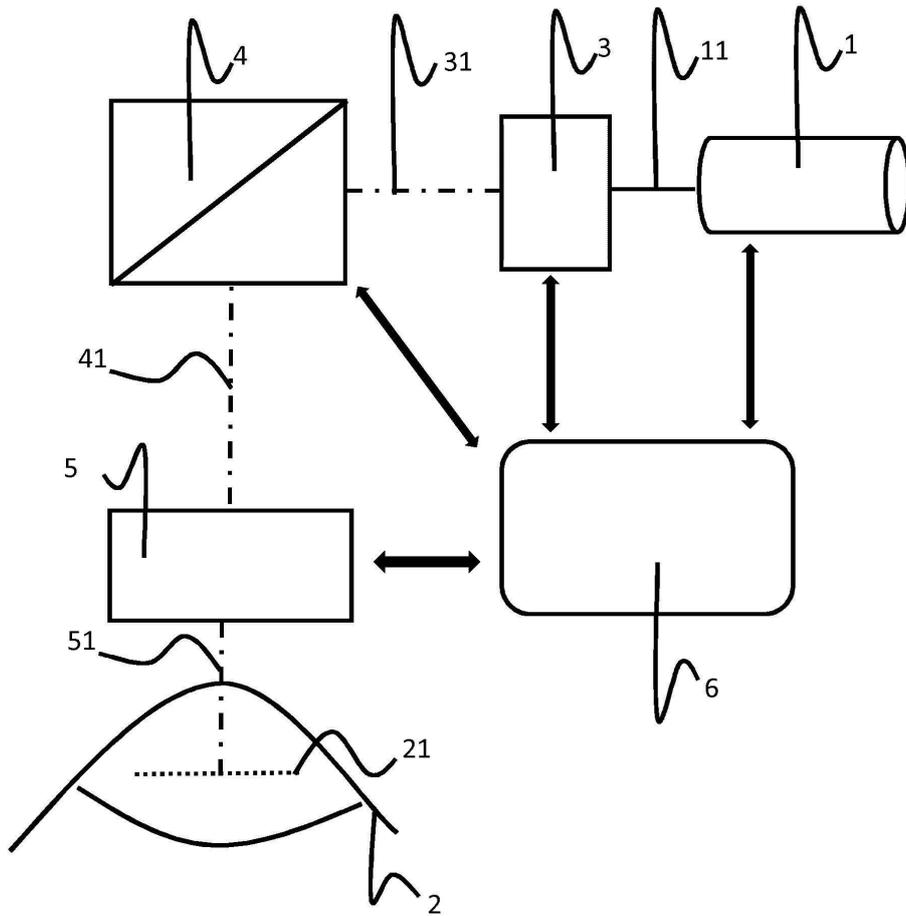
35

40

45

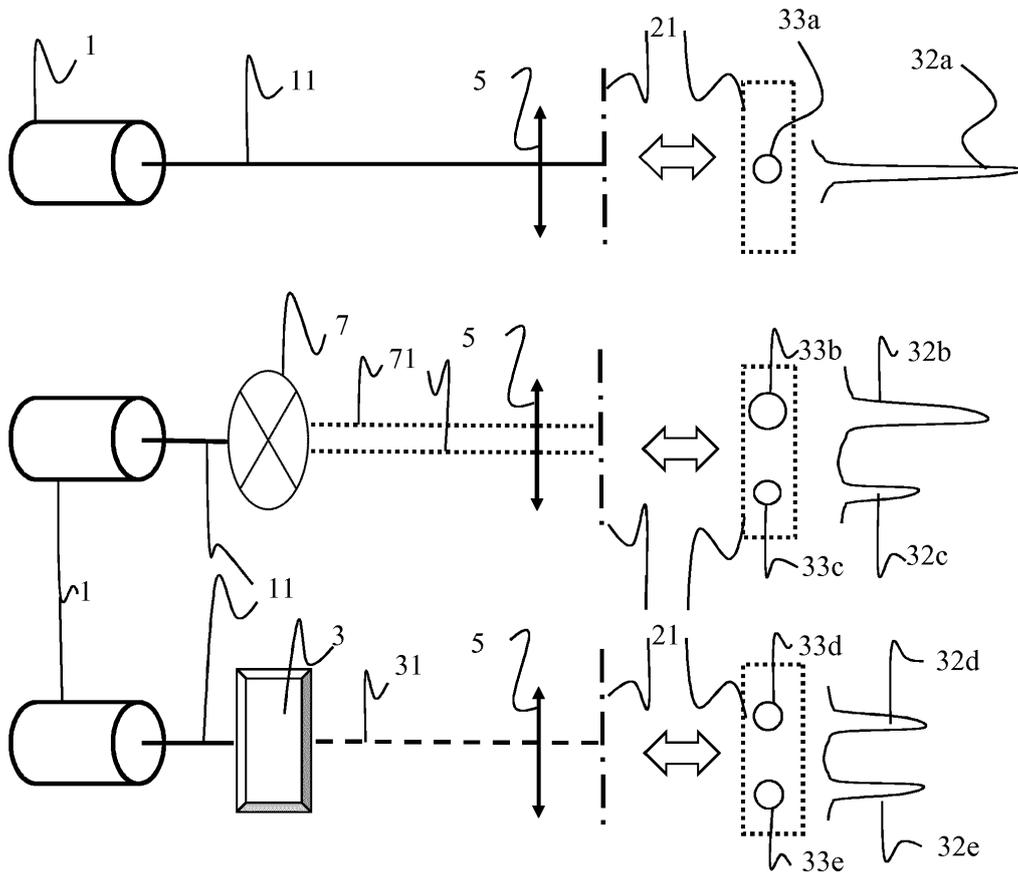
1

1/13



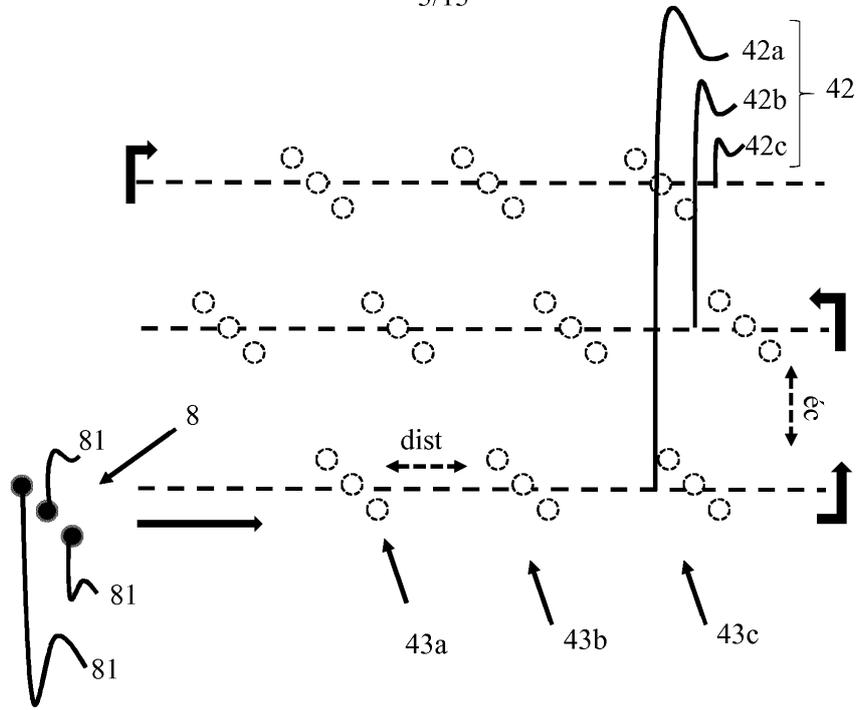
Фиг. 1

2

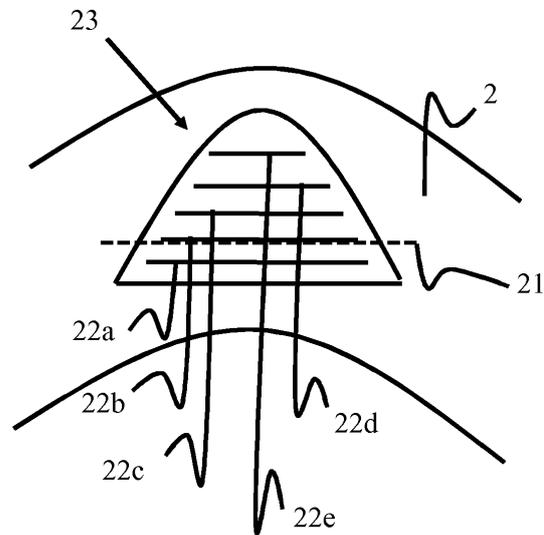


Фиг. 2

3/13

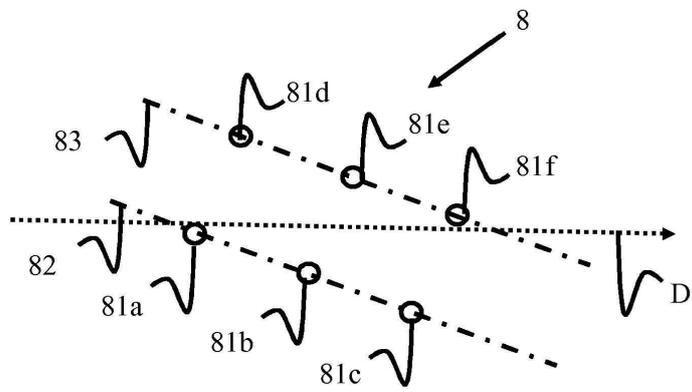


Фиг. 3

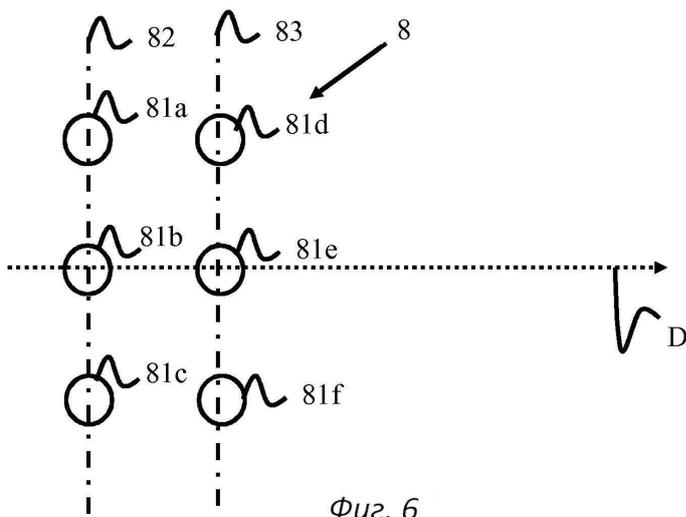


Фиг. 4

4/13

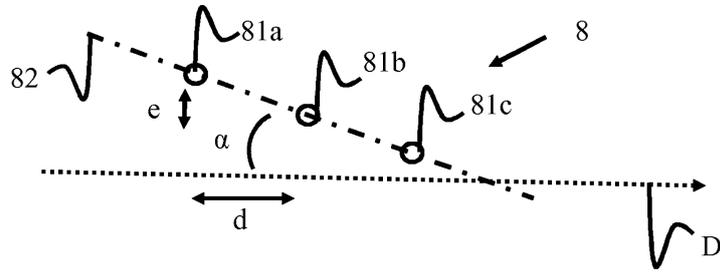


Фиг. 5

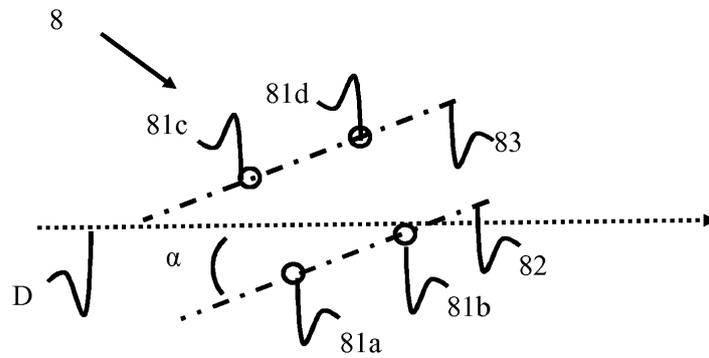


Фиг. 6

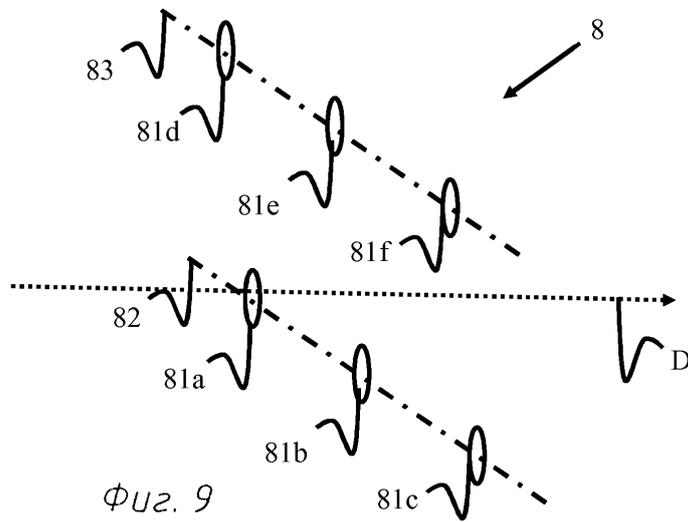
5/13



$\Phi_{uz. 7}$

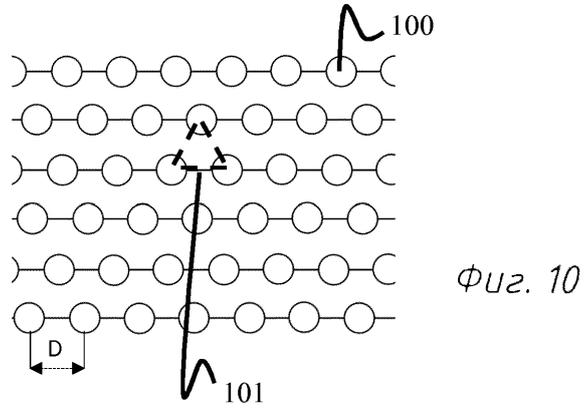


$\Phi_{uz. 8}$

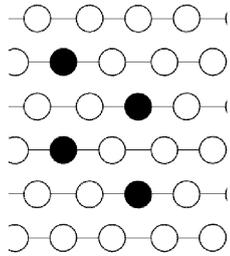


$\Phi_{uz. 9}$

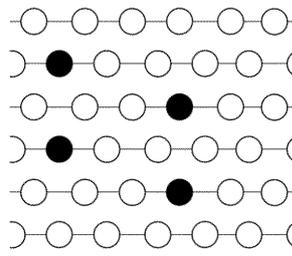
6/13



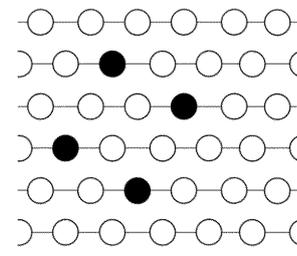
$\Phi_{100}$



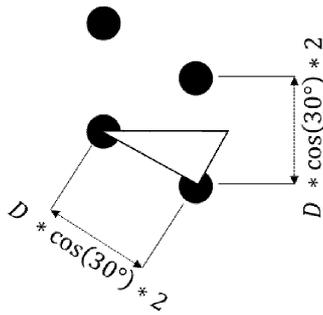
$\Phi_{100}$



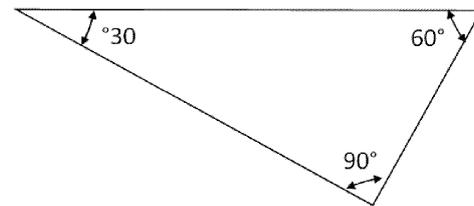
$\Phi_{100}$



$\Phi_{100}$

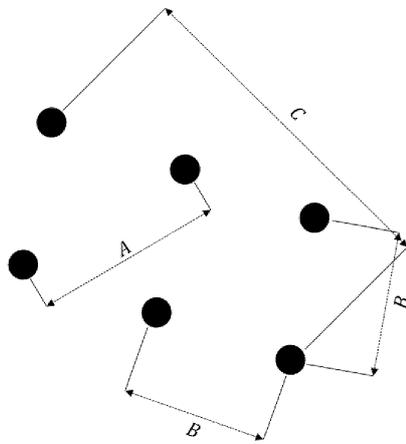
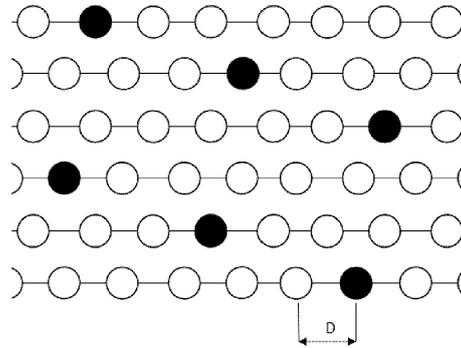


$\Phi_{100}$



7/13

Фиг. 13

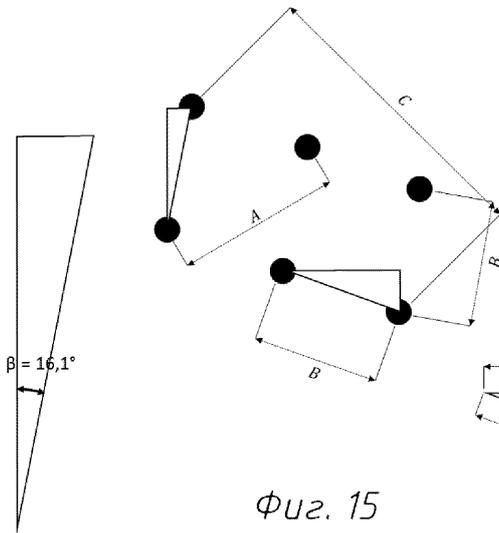


$$A = D * \cos(30^\circ) * 4$$

$$B = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

$$C = \sqrt{(4,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

Фиг. 14



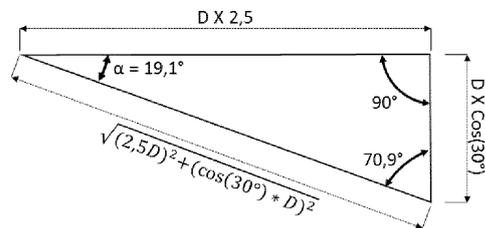
$$A = D * \cos(30^\circ) * 4$$

$$B = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

$$C = \sqrt{(4,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

$$\alpha = 19,1^\circ$$

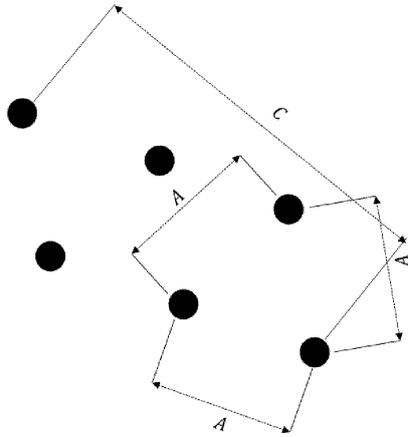
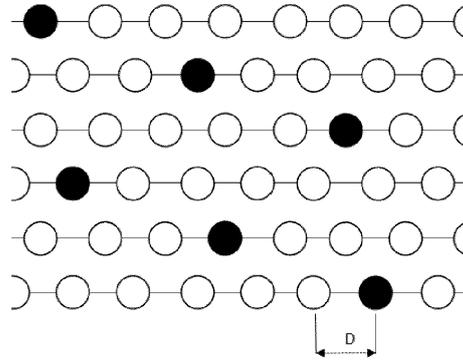
$$\beta = 16,1^\circ$$



Фиг. 15

8/13

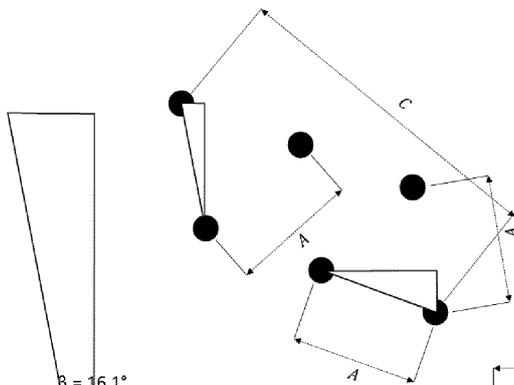
Фиг. 16



$$A = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

$$C = \sqrt{(5,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

Фиг. 17



$$A = \sqrt{(2,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * D)^2}$$

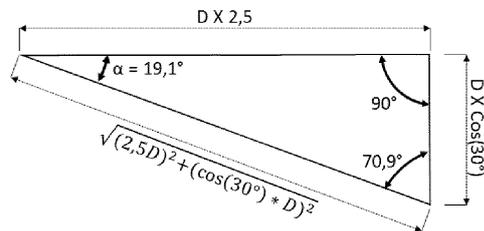
$$C = \sqrt{(5,5D)^2 + (\cos(30^\circ) * 5D)^2}$$

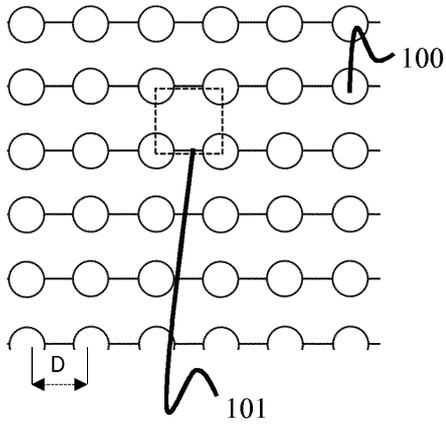
$$\alpha = 19,1^\circ$$

$$\beta = 16,1^\circ$$

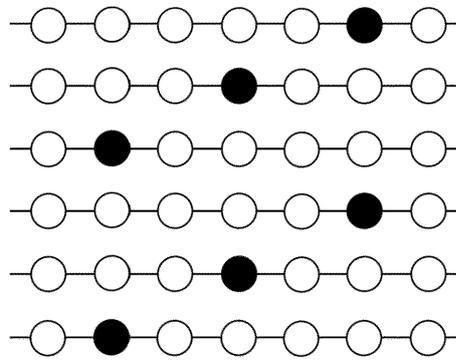
$\beta = 16,1^\circ$

Фиг. 18

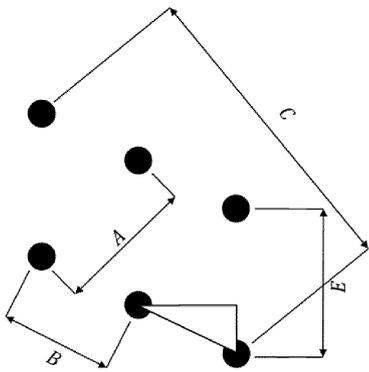




Фиг. 19

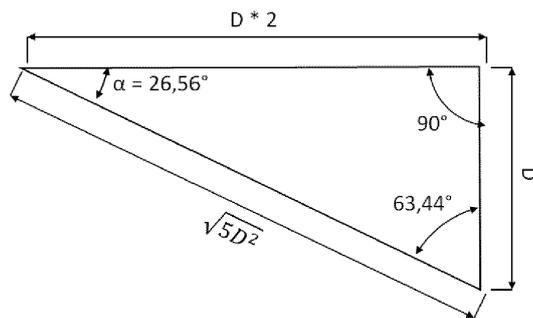


Фиг. 20

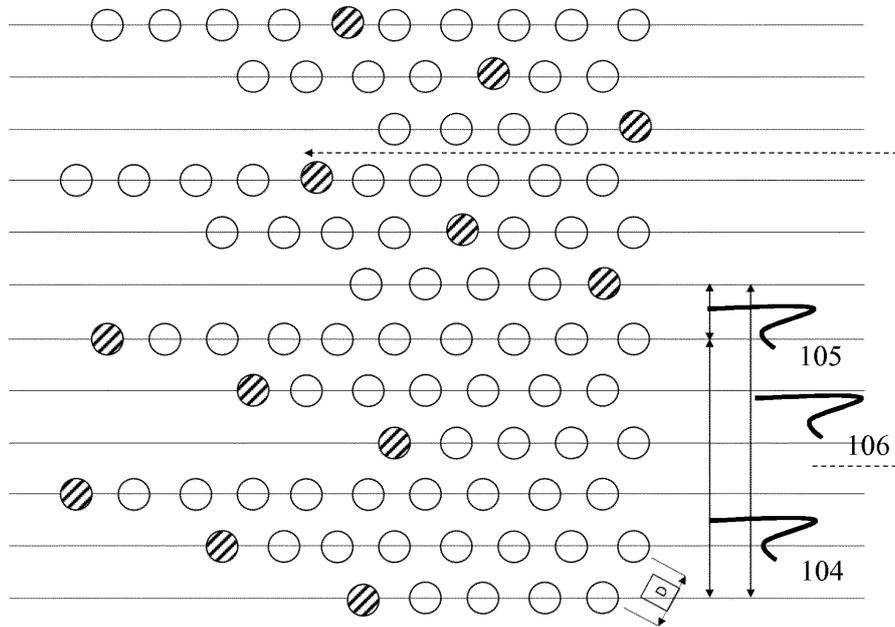
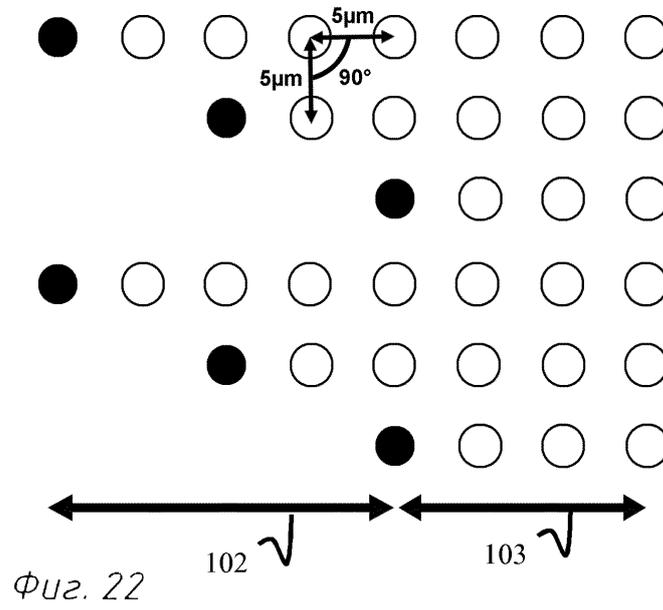


Фиг. 21

$$\begin{aligned}
 A &= \sqrt{8D^2} \\
 B &= \sqrt{5D^2} \\
 C &= \sqrt{41D^2} \\
 E &= 3D \\
 \alpha &= 26,56^\circ
 \end{aligned}$$

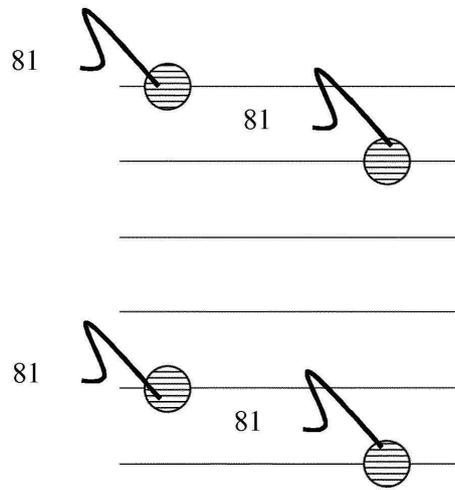


10/13

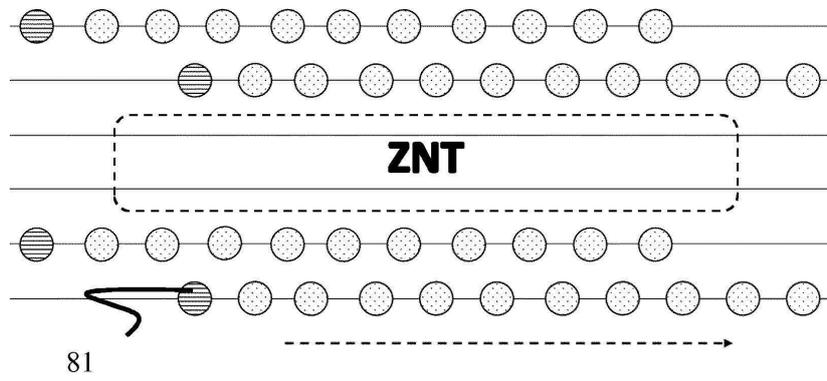


$\Phi_{uz. 23}$

11/13

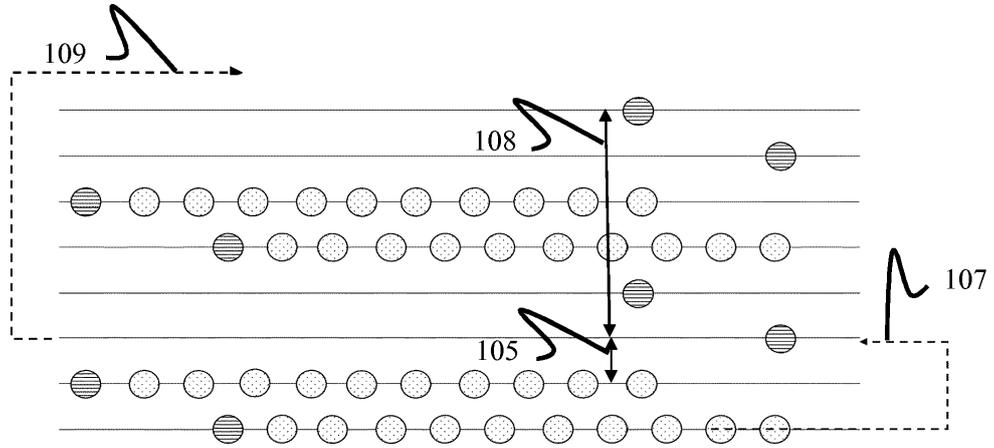


Фиг. 24

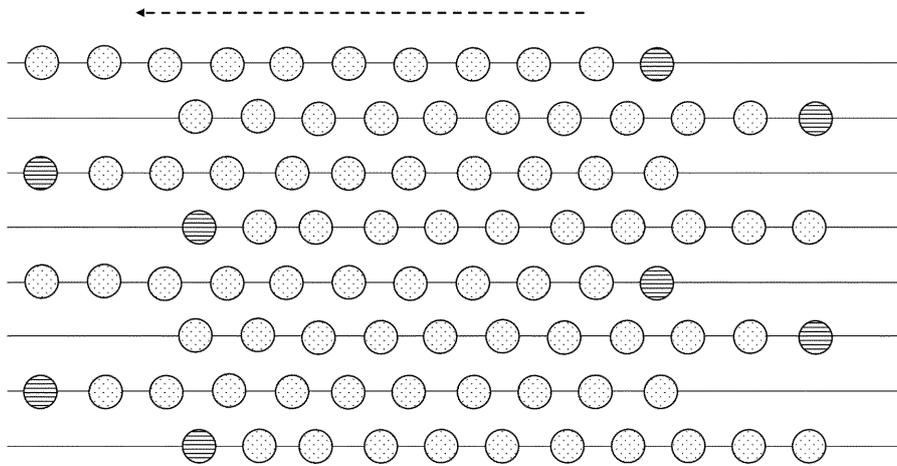


Фиг. 25

12/13

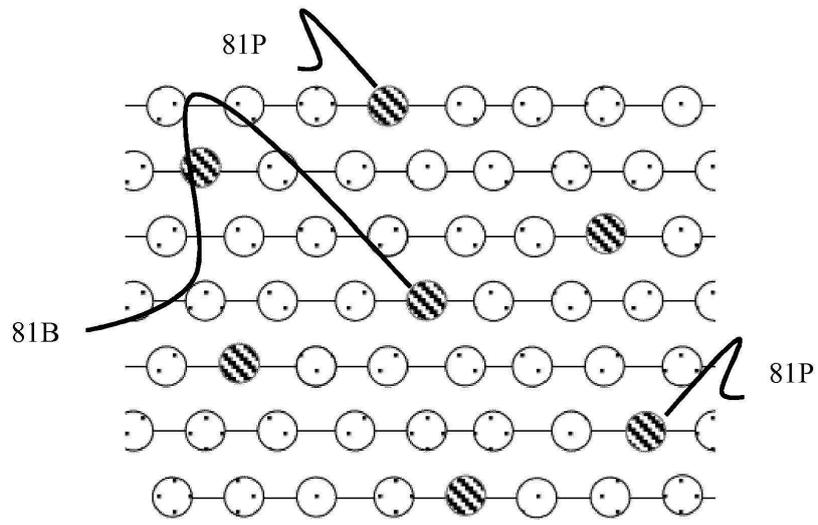


Фиг. 26



Фиг. 27

13/13



$\Phi_{U2.28}$