

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043822**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.06.27

(51) Int. Cl. **B42D 25/324** (2014.01)
B42D 25/445 (2014.01)

(21) Номер заявки
202292805

(22) Дата подачи заявки
2021.04.07

**(54) ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ И СПОСОБ ВИЗУАЛЬНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТА**

(31) **20168421.4**

(32) **2020.04.07**

(33) **EP**

(43) **2022.11.25**

(86) **PCT/EP2021/059011**

(87) **WO 2021/204844 2021.10.14**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
СИКПА ХОЛДИНГ СА (CH)

(72) Изобретатель:
**Шварцбург Юлий, Тестуз Роман,
Каллегари Андреа (CH)**

(74) Представитель:
Абильманова К.С. (KZ)

(56) **WO-A1-2019063778**

US-A1-2016041398

AU-A4-2011101251

**MARIOS PAPAS ET AL.: "Goal-based
Caustics", COMPUTER GRAPHICS FORUM :
JOURNAL OF THE EUROPEAN ASSOCIATION
FOR COMPUTER GRAPHICS vol. 30, no.
2, 28 April 2011 (2011-04-28), pages
503-511, XP055306465, Oxford ISSN: 0167-7055,
DOI: 10.1111/j.1467-8659.2011.01876.x, the whole
document**

WO-A1-9937488

(57) Изобретение относится к антикопирующему оптическому элементу, содержащему каустический слой и маскирующий слой, выполненный с возможностью одновременного отображения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, и формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор, в условиях освещения оптического элемента источником света, причем проецируемое изображение отличается от эталонного изображения. Настоящее изобретение также относится к способу изготовления рельефного узора перенаправляющей свет поверхности указанного каустического слоя в соответствии со свойствами пропускания маскирующего слоя.

B1

043822

043822

B1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к области изготовления каустических оптических элементов, в частности к изготовлению преломляющей прозрачной или частично прозрачной перенаправляющей свет поверхности (или отражающей перенаправляющей свет поверхности) каустического слоя, а также к преломляющим/отражающим оптическим защитным элементам, способным проецировать каустические узоры в условиях приемлемого освещения.

Предпосылки создания изобретения

Существует необходимость в защитных признаках на объектах, которые могут быть аутентифицированы так называемым "человеком на улице" с использованием общедоступных средств. Эти средства включают использование пяти чувств - в основном, зрение и осязание - плюс использование широко распространенных инструментов, таких как, например, мобильный телефон.

Некоторыми распространенными примерами защитных признаков являются экспертные волокна, нити или фольга (встроенные в подложку, например, в бумагу), водяные знаки, элементы глубокой печати или микропечати (возможно, печати на подложке оптически изменяющимися красками), которые можно обнаружить на банкнотах, кредитных картах, удостоверениях личности, билетах, сертификатах, документах, паспортах и т. д. Эти защитные признаки могут включать оптически изменяющиеся краски, невидимые краски или люминесцентные краски (флуоресцирующие или фосфоресцирующие в условиях приемлемого освещения конкретным источником света возбуждения), голограммы и/или признаки, определяемые на ощупь. Основным аспектом защитного признака является то, что он обладает некоторым физическим свойством (оптическим эффектом, магнитным эффектом, структурой материала или химическим составом), которое очень трудно подделать, поэтому объект, маркированный таким защитным признаком, можно надежным образом признавать подлинным, если указанное свойство можно увидеть или обнаружить (визуально или с помощью конкретного устройства).

Однако, когда объект является прозрачным или частично прозрачным, данные признаки могут не быть подходящими. Фактически, прозрачные объекты зачастую требуют, чтобы защитный элемент, имеющий требуемые защитные свойства, не изменял свою прозрачность или внешний вид ни по эстетическим, ни по функциональным причинам. Известные примеры могут включать блистеры и флаконы для фармацевтических продуктов. Например, в последнее время в дизайн полимерных и гибридных банкнот включают прозрачное окно, создавая тем самым потребность в защитных признаках, которые совместимы с ним.

Большинство существующих защитных признаков для документов, банкнот, защищенных билетов, паспортов и т.д. не были специально разработаны для прозрачных объектов/областей и, как таковые, не подходят для такого применения. Другие признаки, например, полученные с помощью невидимых и флуоресцентных красок, требуют специальных инструментов для возбуждения и/или инструментов для обнаружения, которые могут быть недоступны "человеку на улице".

Известны полупрозрачные оптически изменяющиеся признаки (например, жидкокристаллические покрытия или скрытые изображения от поверхностных структур), которые могут обеспечивать такую функциональность. К сожалению, маркировку, включающую такие защитные признаки, как правило, можно увидеть на темном/однородном фоне, чтобы эффект был более заметным.

Другими известными признаками являются дифракционные оптические элементы, такие как неметаллизированные поверхностные голограммы. Недостатком этих признаков является то, что они демонстрируют очень низкий контрастный визуальный эффект при непосредственном просмотре. Кроме того, при использовании в сочетании с источником монохроматического света для проецирования узора им, как правило, требуется лазер для получения удовлетворительного результата. Кроме того, для обеспечения четко видимого оптического эффекта требуется довольно точное относительное пространственное расположение источника света, дифракционного оптического элемента и глаз пользователя.

Например, гравированные лазером микротекст и/или микрокоды были использованы для, например, стеклянных флаконов. Тем не менее, им необходимы дорогие инструменты для их реализации и специальный увеличительный инструмент для их обнаружения.

Вышеупомянутые проблемы были преодолены с помощью оптических (защитных) элементов, подходящих для прозрачных или частично прозрачных объектов, путем введения методологии проектирования, в которой используется каустический слой с преломляющей прозрачной или частично прозрачной перенаправляющей свет поверхностью, при этом каустический слой имеет рельефный узор, способный перенаправлять падающий свет, принятый от источника света, и формировать проецируемое изображение, содержащее каустический узор, который воспроизводит целевой эталонный узор.

Такой подход позволяет управлять каустическим узором, создавая форму поверхности каустического слоя. Вычислительные инструменты, основанные на переносе света, были разработаны для формирования практически любой желаемой формы путем оптимизации (расчета) геометрии преломляющей или отражающей поверхности каустических оптических элементов на основании целевого изображения. Каустические поверхности и способы расчета указанных каустических поверхностей на основании целевого эталонного изображения были раскрыты в предшествующем уровне техники, например

в европейской патентной заявке EP 2711745A2 раскрыта дискретизация сгенерированной поверхно-

сти в ячейку сетки, которая затем деформируется для корректировки яркости соответствующей области изображения. Затем определяется нормальное поле, связанное с ячейкой сетки, и оно интегрируется, чтобы найти соответствующую каустическую поверхность. Однако при произвольном изображении необходимо принять дополнительные меры предосторожности, чтобы соответствующее нормальное поле можно было интегрировать;

в европейской патентной заявке EP 2963464 A1 используют аналогичный подход для определения оптимальной транспортной карты (OTM) и аналогичным образом требуют расчета и интегрирования нормального поля.

в патенте США US 9188783B2 и заявке на патент США US 2016041398 A1 разделяют сгенерированную поверхность на набор микропатчей, каждый из которых отвечает за проецирование каустического ядра Гаусса, при этом наложение ядер приближает желаемое изображение. Однако недостатками способа являются артефакты дискретизации и трудности с разрешением областей с низкой интенсивностью. Нормальное поле также необходимо интегрировать;

в международных патентных заявках WO 2019063778 A1 и WO 2019063779 A1 раскрыт оптический защитный элемент, содержащий преломляющую перенаправляющую свет поверхность, рельефный узор которой способен перенаправлять падающий свет от источника света и формировать проецируемое изображение на проекционной поверхности, причем проецируемое изображение содержит каустический узор, который воспроизводит эталонный узор, который является легко визуально распознаваемым человеком.

Однако эти оптические элементы с каустической поверхностью имеют некоторые недостатки. Помимо того, что каустическая поверхность подвержена износу и истиранию, ее можно скопировать, сделав слепок с ее рельефного узора. Кроме того, наличие каустической поверхности в некоторой степени изменяет внешний вид объекта, возможно, делая его менее эстетически привлекательным и/или привлекая внимание к механизму проецирования каустического изображения. При определенных обстоятельствах можно угадать проецируемое изображение просто по форме поверхности, что снижает эффект неожиданности для человека, которому приходится использовать оптический элемент, например глядя через оптический элемент (в частности, если этот эффект "неожиданности" связан с аспектом защиты, который должен быть обеспечен оптическим элементом).

Таким образом, целью настоящего изобретения является создание антикопирующего оптического элемента с каустической поверхностью, который преодолевает вышеупомянутые недостатки.

Еще одной целью настоящего изобретения является создание маркированного объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы (например, сертификаты, паспорта, удостоверения личности, водительские права и т.д.) и банкноты, который содержит усовершенствованный оптический элемент.

Еще одной целью настоящего изобретения является создание способа визуальной аутентификации объекта, маркированного оптическим элементом, с использованием общедоступных средств.

Еще одной целью настоящего изобретения является применение оптического элемента для аутентификации или защиты от подделки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

Краткое описание изобретения

Согласно одному аспекту настоящее изобретение относится к оптическому элементу, содержащему каустический слой, выполненный из куска отражающего или преломляющего прозрачного или частично прозрачного первого оптического материала, и имеющему перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором, при этом

оптический элемент содержит маскирующий слой, расположенный, соответственно, на оптической поверхности оптического элемента или в

пределах оптического элемента, причем маскирующий слой содержит маскирующий узор и имеет изменяющийся коэффициент светопропускания, маскирующий слой способен, по меньшей мере, частично пропускать входящий свет в условиях освещения оптического элемента точечным источником света;

и

рельефный узор перенаправляющей свет поверхности каустического слоя выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого оптическим элементом от точечного источника света, и формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор.

Маскирующий слой может быть выполнен с возможностью отображения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, причем видимое изображение отличается от проецируемого изображения, в условиях освещения оптического элемента точечным источником света.

Предпочтительно профиль глубины рельефного узора имеет неровные края, сформированные механической обработкой поверхности куска первого оптического материала согласно рассчитанному профилю рельефного узора, имеющему разрывы, причем указанные механически обработанные неровные края соответствуют разрывам. Максимальная глубина профиля рельефного узора может быть меньше или равна 250 мкм. Однако максимальная глубина профиля рельефного узора предпочтительно может

быть меньше или равна 30 мкм. Согласно варианту осуществления настоящего изобретения перенаправляющая свет поверхность оптического элемента расположена поверх плоской основной подложки, и общая толщина оптического элемента меньше или равна 100 мкм. Рельефный узор перенаправляющей свет поверхности предпочтительно способен перенаправлять падающий свет, принятый от источника света, на расстоянии d_s от перенаправляющей свет поверхности, и формировать проецируемое изображение, содержащее каустический узор, на поверхности стенки на расстоянии d_i от перенаправляющей свет поверхности, причем значение d_i меньше или равно 30 см, а значение соотношения d_s/d_i больше или равно 5.

Согласно другому варианту осуществления оптический элемент может дополнительно содержать линзообразный элемент, примыкающий к каустическому слою и выполненный из преломляющего прозрачного или частично прозрачного второго оптического материала, причем линзообразный элемент выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого оптическим элементом от источника света, для формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор. Перенаправляющая свет поверхность может иметь фокусное расстояние f_C и фокусное расстояние f_L линзообразного элемента, выполненная с возможностью формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, смотрящего на источник света через оптический элемент. Оптический элемент может содержать одно из следующего:

- а) каустический слой с положительным фокусным расстоянием ($f_C > 0$) и линзообразный элемент с отрицательным фокусным расстоянием ($f_L < 0$), или
- б) каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ($f_C < 0$) и линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием ($f_L > 0$).

Предпочтительно отношение между фокусным расстоянием f_L линзообразного элемента и фокусным расстоянием f_C каустического слоя удовлетворяет следующему уравнению:

$$R - \left(\frac{1}{f_L} + \frac{1}{f_C} - \frac{1}{d_s} \right)^{-1} \geq d_R,$$

где

R представляет собой расстояние от каустического слоя до глаза наблюдателя;

d_s представляет собой расстояние от источника света до оптического элемента и

d_R представляет собой комфортное для чтения расстояние от глаза, которое составляет по меньшей мере 25 см.

Оптический элемент согласно настоящему изобретению можно использовать для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы, акцизные марки и банкноты.

Согласно другому аспекту настоящее изобретение относится к способу визуальной аутентификации объекта, маркированного вышеупомянутым оптическим элементом с маскирующим слоем, наблюдателем, включающему этапы, на которых

оптический элемент освещают точечным источником света;

визуально наблюдают проецируемое изображение, содержащее видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор; и

решают, является ли объект подлинным, при оценке наблюдателем того, является ли каустический узор визуально похожим на эталонный узор.

В предпочтительном варианте осуществления, в котором в условиях освещения оптического элемента точечным источником света маскирующий слой выполнен с возможностью отображения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, причем способ включает дополнительный этап визуального наблюдения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, и этап принятия решения о том, является ли объект подлинным, включает дополнительную верификацию наблюдателем того, что видимое изображение визуально отличается от каустического узора.

Дополнительный аспект настоящего изобретения относится к способу изготовления рельефного узора перенаправляющей свет поверхности каустического слоя, выполненного из куска преломляющего прозрачного или частично прозрачного или отражающего первого оптического материала, причем каустический слой содержит маскирующий слой, расположенный, соответственно, на оптической поверхности оптического элемента или в пределах оптического элемента, маскирующий слой содержит маскирующий узор и имеет изменяющийся коэффициент светопропускания, маскирующий слой способен по меньшей мере частично пропускать входящий свет в условиях освещения оптического элемента точечным источником света, каустический слой способен перенаправлять падающий свет, принятый от точечного источника света, и формировать проецируемое изображение, содержащее каустический узор, причем способ включает компьютеризированные этапы, на которых

обеспечивают дискретное представление входного целевого изображения эталонного узора, содержащего множество P из N пикселей изображения p_i координат $\{(x_i, y_i)\}$ в плоскости изображения, со связанными ненулевыми целевыми интенсивностями света $\{I_i\}$, $i=1, \dots, N$, распределенными в заданной об-

ласти целевого изображения и соответствующими целевому каустическому узору целевого изображения; вычисляют кусочно-линейное представление перенаправляющей свет поверхности $z = F(x,y)$ каустического слоя с высотой z выше плоскости координат (x,y) на основании представления перенаправляющей свет поверхности посредством пересекающихся кусков поверхностей $z = f_i(x,y)$, $i=1,\dots,N$, соответственно полученных от стационарности длины оптического пути лучей, преломленных или отраженных каустическим слоем и сфокусированных в точках $P(i)$ плоскости изображения координат (x_i,y_i) , $i=1,\dots,N$, при этом каждый кусок поверхности $z = f_i(x,y)$ представляет собой поверхность вращения вокруг оси, проходящей через точку $P(i)$ с вершиной в точке (x_i,y_i,z_i) , высотой $z_i = f_i(x_i,y_i)$, $i=1,\dots,N$, причем кусочно-линейное представление перенаправляющей свет поверхности, связанной с соответственными значениями высот N вершин, сформировано огибающей пересечений соответствующих N кусков поверхностей $z = f_i(x,y)$, $i=1,\dots,N$;

для заданного множества соответственных значений высот z_1,\dots,z_N вершин N кусков поверхностей рассчитывают соответствующее множество значений интенсивностей света $I(1),\dots,I(N)$, которые соответственно сфокусированы в точках $P(1),\dots,P(N)$ каустическим слоем, перенаправляющим падающий свет через связанную кусочно-линейную перенаправляющую свет поверхность согласно изменяющемуся коэффициенту светопропускания маскирующего узора; и

рассчитывают соответственные значения N высот z_1,\dots,z_N N вершин соответствующих N кусков поверхностей, которые минимизируют разности между соответственными значениями рассчитанных интенсивностей света $I(1),\dots,I(N)$, сфокусированных в точках $P(1),\dots,P(N)$ через связанную перенаправляющую свет поверхность, и соответственными значениями целевых интенсивностей света I_1,\dots,I_N , тем самым получают перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором, способным перенаправлять падающий свет, принятый от источника света оптическим элементом, содержащим маскирующий слой, и формировать проецируемое изображение, содержащее целевой каустический узор, который воспроизводит эталонный узор.

Каждый кусок поверхности $z=f_i(x,y)$, $i=1,\dots,N$, может приближаться при параксиальном приближении путем разложения в ряд Тейлора порядка k , большего или равного двум выражения куса поверхности, полученного из стационарности длины оптического пути. Этап расчета высот z_i , минимизирующих разности между рассчитанными интенсивностями света $I(i)$ и соответствующими целевыми интенсивностями света I_i , для $i=1,\dots,N$, можно осуществлять посредством метода оптимизации без градиента. Альтернативно, этап расчета высот z_i , минимизирующих разности между рассчитанными интенсивностями света $I(i)$ и соответствующими целевыми интенсивностями света I_i , для $i=1,\dots,N$, можно осуществлять посредством метода оптимизации с использованием диаграммы мощности для вычисления связанной функции потерь и ее производных.

Изготовленную перенаправляющую свет поверхность можно использовать для генерирования машинно-сопоставимого представления для управления инструментом для механической обработки, предназначенным для механической обработки перенаправляющей свет поверхности каустического слоя. Указанное машинно-сопоставимое представление может использоваться, например, стандартные для отрасли форматы, такие как стереолитография (STL) или исходная спецификация обмена графической информацией (IGES). В частности, машинно-сопоставимое представление можно также использовать для управления инструментом для механической обработки перенаправляющей свет поверхности промежуточной подложки, используемой в дальнейшем для массового производства каустических слоев путем копирования (такое копирование может включать одно из с рулона на рулон, с фольги на фольгу, УФ-литье и тиснение).

Кроме того, способ изготовления рельефного узора может включать предварительный этап настройки маскирующего слоя для отображения в условиях освещения оптического элемента точечным источником видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, отличное от эталонного узора.

Далее настоящее изобретение будет описано более полно со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых проиллюстрированы основные аспекты и признаки настоящего изобретения.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 проиллюстрирована оптическая конфигурация преломляющего оптического элемента для проецирования каустического узора в общем случае, когда отсутствует маскирующий слой.

На фиг. 2 проиллюстрирован пример согласно настоящему изобретению оптического элемента для проецирования каустического узора, в котором присутствует маскирующий слой, который способствует определению проецируемого узора.

На фиг. 3А показан оптический элемент с объединенными маскирующим слоем и каустическим слоем согласно настоящему изобретению, причем маскирующий слой имеет эталонное изображение (портрет Леонардо), отличное от проецируемого изображения (каустический узор Джоконды).

Фиг. 3В соответствует оптическому элементу по фиг. 3А, когда маскирующий слой удален: с искажениями и ложными признаками, видимыми на проецируемом изображении.

На фиг. 3С показан оптический элемент согласно настоящему изобретению с маскирующим слоем, имеющим эталонное изображение "tree", отличное от проецируемого изображения (дерева), причем оп-

тический элемент формируется на прозрачном блоке из PMMA.

На фиг. 4А проиллюстрирован оптический элемент с объединенными маскирующим слоем и каустическим слоем согласно настоящему изобретению, причем маскирующий слой имеет эталонное изображение " $E = m c^2$ ", отличное от проецируемого изображения (каустический узор портрета Эйнштейна).

Фиг. 4В соответствует оптическому элементу по фиг. 4А, когда маскирующий слой удален: с искажениями и ложными признаками, видимыми на проецируемом изображении.

На фиг. 5 проиллюстрирован оптический элемент, представляющий собой прозрачный элемент согласно настоящему изобретению, с объединенными маскирующим слоем и каустическим слоем для проецирования каустического узора непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, с линзообразным элементом с отрицательным фокусным расстоянием и каустическим слоем с положительным фокусным расстоянием.

На фиг. 6 проиллюстрирован другой оптический элемент, представляющий собой прозрачный элемент согласно настоящему изобретению, с объединенными маскирующим слоем и каустическим слоем для проецирования каустического узора непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, с линзообразным элементом с положительным фокусным расстоянием и каустическим слоем с отрицательным фокусным расстоянием.

На фиг. 7 проиллюстрирован подробный вид преломляющего оптического элемента по фиг. 2.

На фиг. 8 показаны параллельные лучи, освещающие с равномерной интенсивностью часть входной грани каустического слоя, покрытого частью маскирующего узора, и формирующие точку изображения.

На фиг. 9 показаны параллельные лучи, освещающие с равномерной интенсивностью часть входной грани каустического слоя, покрытого частью маскирующего узора, с кусочно-линейным приближением перенаправляющей свет поверхности, и формирующие множество точек изображения.

Подробное описание

В оптике термин "каустика" относится к огибающей световых лучей, преломленных или отраженных одной или более поверхностями, по меньшей мере одна из которых изогнута, а также к проекции таких световых лучей на другую поверхность. Более конкретно, каустика представляет собой кривую или поверхность, касающуюся каждого светового луча, определяющую границу огибающей лучей как кривую концентрированного света. Например, световой узор, сформированный солнечными лучами на дне бассейна, представляет собой каустическое "изображение" или узор, сформированный единственной перенаправляющей свет поверхностью (волнистой поверхностью раздела воздух-вода), в свою очередь, свет, проходящий через изогнутую поверхность жидкого стекла, создает остроконечный узор на столе, на котором лежит жидкое стекло, при его пересечении двух или более поверхностей (например, воздух-стекло, стекло-вода, воздух-вода и т.д.), которые перенаправляют его путь.

Далее в качестве примера будет использована наиболее распространенная конфигурация, в которой (преломляющий) каустический слой оптического элемента связан одной (изогнутой) поверхностью или перенаправляющей свет поверхностью, и в качестве примера будет использована одна плоская поверхность без ограничения более общих случаев. В данном документе ссылку будут делать на более общий термин "каустический узор" (или "каустическое изображение") в качестве светового узора, сформированного, например, на экране (проекционной поверхности), когда оптическая поверхность подходящей формы (с перенаправляющей свет поверхностью, имеющей приемлемый рельефный узор) каустического слоя перенаправляет свет от источника, чтобы отвести его от некоторых областей экрана, и концентрирует его в других областях экрана в предварительно определенном световом узоре (т.е., таким образом, формируя указанный "каустический узор"). Перенаправление относится к изменению пути световых лучей от источника при наличии каустического слоя по отношению к пути от источника к экрану в отсутствие каустического слоя. Каустический слой (преломляющий или отражающий) является, таким образом, куском первого оптического материала, имеющим перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором, пригодным для перенаправления света, принятого от источника света, для формирования каустического изображения. Оптический элемент согласно настоящему изобретению содержит каустический слой и может дополнительно содержать дополнительный(ые) оптический(ие) элемент(ы) (например, линзу или опорную подложку), участвующий(ие) в перенаправлении света.

В свою очередь, под перенаправляющей свет оптической поверхностью будет подразумеваться "рельфный узор", а под куском первого оптического материала, связанного этой поверхностью, будет подразумеваться каустический слой. Следует отметить, что каустический узор может быть результатом перенаправления света более чем одной поверхностью и более чем одним объектом, хотя, возможно, ценой повышенной сложности. Кроме того, рельефный узор для создания каустического узора не следует путать с дифракционным узором (как, например, в защитных голограммах).

Концепция настоящего изобретения может, например, применяться к обычным объектам, таким как потребительские товары, удостоверения личности/кредитные карты, банкноты и так далее. Для этого требуется значительное уменьшение размера оптического элемента и, в частности, доведение глубины рельефа рельефного узора ниже допустимых значений. Для этой цели особенно полезен эффективный рабочий процесс, поскольку он позволяет выполнять несколько итераций дизайна до тех пор, пока не будут выполнены все эксплуатационные ограничения.

В этом описании под термином "рельеф" следует понимать существование разности высот (измеряемой вдоль оптической оси оптического элемента) между самой высокой точкой и самой низкой точкой поверхности, по аналогии с разностью абсолютной высоты между дном долины и вершиной горы (т.е. в масштабе "от вершины до долины"). Поскольку способ согласно настоящему изобретению не ограничен конкретным рельефом, для многих применений предполагается, что максимальная глубина рельефного узора оптического элемента, как правило, меньше или равна 250 мкм или более предпочтительно меньше или равна 30 мкм, при этом она превышает предел, наложенный ультраточной механической обработкой (УРМ) и процессом воспроизведения, т.е. приблизительно 0,2 мкм.

Согласно этому описанию под разностью высот между самой высокой и самой низкой точкой в рельефном узоре на перенаправляющей свет поверхности подразумевается глубина рельефа 8.

Под каустическим узором (изображением), формирующим приближение цифрового изображения, следует понимать световой узор, проецируемый оптическим элементом, в условиях освещения подходящим точечным источником. Как упомянуто выше, оптический элемент следует понимать как пластину из преломляющего (или отражающего) материала, ответственного за создание каустического узора.

Перенаправляющая(ие) свет поверхность(и) представляет(представляют) собой поверхность (или поверхности) каустического слоя (оптического элемента), ответственного за перенаправление входящего света от источника на экран или (предварительно плоскую) проекционную поверхность, где формируется каустический узор.

Подложка из первого оптического материала, используемая для изготовления каустического слоя оптического элемента, является подложкой из исходного материала, поверхность которой специально сформирована так, чтобы иметь рельефный узор и, таким образом, формировать перенаправляющую свет поверхность. В случае отражающей перенаправляющей свет поверхности подложка из первого оптического материала необязательно является однородной или прозрачной; то же самое применимо в случае оригинальной поверхности, используемой только для дальнейшего копирования. Например, материал может быть непрозрачным для видимого света, и отражательную способность затем можно получить путем классической металлизации сформированной поверхности. В случае преломляющей перенаправляющей свет поверхности подложка из исходного материала является прозрачной, или частично прозрачной, и однородной с показателем преломления n (для фотонов спектра, видимого человеческому глазу), и под соответствующей перенаправляющей свет поверхностью подразумевается "преломляющая прозрачная или частично прозрачная перенаправляющая свет поверхность с показателем преломления n ".

Оригинальная перенаправляющая свет поверхность согласно данному описанию является первой физической реализацией перенаправляющей свет поверхности из рассчитанной поверхности. Она может быть скопирована в несколько копий (штампов), которые затем используются для серийного копирования.

Точечный источник (см. фиг. 1-2), используемый в этом описании, является источником света S , угловой размер которого (с точки зрения оптического элемента) достаточно мал, чтобы можно было считать, что свет исходит из одной точки на расстоянии d_s от перенаправляющей свет поверхности. Опыт показывает, что это означает, что количество: (диаметра источника) $\times d_i/d_s$, является меньше желаемого разрешения (например, 0,05-0,1 мм) целевого каустического узора на проецируемом изображении на проекционной поверхности на расстоянии d_i от перенаправляющей свет поверхности. Под экраном следует понимать поверхность, на которую проецируется каустический узор. Под расстоянием между источником и перенаправляющей свет поверхностью также подразумевается расстояние источника d_s , и под расстоянием между перенаправляющей свет поверхностью и экраном подразумевается расстояние изображения d_i .

Термин "штамп" (или штамп для копирования, когда необходимо устранить неоднозначность) в основном используется для обозначения физического объекта, несущего профиль перенаправляющей свет поверхности, которая используется для серийного копирования. Его можно использовать, например, для создания копии оригинальной перенаправляющей свет поверхности (исходный рельеф, воспроизводимый путем тиснения или впрыскивания из оригинала, несущего соответствующий перевернутый рельеф). Для инструмента, используемого для механической обработки рельефного узора перенаправляющей свет поверхности, используется термин "инструмент для механической обработки" для устранения неоднозначности.

На фиг. 1 представлена схематическая иллюстрация типичной оптической конфигурации преломляющего оптического элемента для проецирования каустического узора, который воспроизводит (значимый) эталонный узор. Оптический элемент (1), выполненный из куска преломляющего прозрачного или частично прозрачного первого оптического материала, и содержащий каустический слой (2) с преломляющей поверхностью (3), перенаправляет свет от точечного источника S и проецирует его на подходящем экране (4), который может быть любой поверхностью любого объекта, и т.д., где формируется распознаваемый (наблюдателем) каустический узор (5). Изображение может представлять собой, например, логотип, картинку, номер или любую другую информацию, которая может иметь отношение к конкретному контексту. Предпочтительно, экран представляет собой плоскую проекционную поверхность или

плоскую часть любого объекта. Конкретный дизайн перенаправляющей свет поверхности (3) может позволить проецировать (распознаваемый) каустический узор на изогнутой поверхности.

Конфигурация согласно фиг. 1 показывает, что свет, принятый оптическим элементом (1) от источника S, перенаправляется рельефным узором подходящей формы перенаправляющей свет поверхности (3) каустического слоя (2). Эта общая идея известна, например, из отражающих поверхностей для автомобильных фар, отражателей и линз для светодиодного освещения, оптических систем в лазерной оптике, проекторов и камер. Однако, как правило, цель состоит в том, чтобы преобразовать неоднородное распределение света в однородное распределение.

Напротив, целью настоящего изобретения, как проиллюстрировано на фиг. 2, является получение неоднородного светового узора, т.е. каустического узора (5), который (приблизительно) воспроизводит некоторые области относительной яркости эталонного узора (например, как представлено на цифровом изображении эталонного узора), когда оптический элемент (1) дополнительно содержит маскирующий слой (6) с маскирующим узором (7), который модифицирует пропускание через оптический элемент (1) света, принятого от источника света S (согласно маскирующему узору). Таким образом, рельефный узор перенаправляющей свет поверхности (3) должен быть специально приспособлен к свойствам пропускания маскирующего узора для обеспечения видимого каустического узора (5), каустика которого воспроизводит (приблизительно) заданный эталонный узор. Оптический материал, формирующий маскирующий узор (7) маскирующего слоя (6), может быть непрозрачным (т.е. не пропускающим свет) или более или менее прозрачным для видимого света, испускаемого источником света S. Конечно, в случае непрозрачного оптического материала маскирующего узора (7), маскирующий слой (6) должен содержать непрозрачную часть, которая может пропускать свет согласно (ненулевому) коэффициенту оптического пропускания. Что касается светопропускания, маскирующий слой (6) может, таким образом, характеризоваться изменяющимся коэффициентом светопропускания t , который может локально изменяться от нуля (в случае блокировки падающего света непрозрачной частью маскирующего узора) до единицы (в случае полного пропускания падающего света через немаскированную часть каустического слоя). Промежуточные локальные значения коэффициента светопропускания $0 < t < 1$ возможны в случае частичной прозрачности соответствующей локальной части маскирующего узора (7). Маскирующий слой (6) может быть слоем какого-либо конкретного оптического материала. Маскирующий слой (6) может иметь постоянную толщину, но при этом содержать две отдельные части с материалами, имеющими разные коэффициенты пропускания и примыкающими друг к другу согласно контуру маскирующего узора (7). Однако маскирующий слой может быть просто результатом (локальной) модификации (формирования маскирующего узора) свойства светопропускания оптического материала самого оптического элемента, или маскирующий узор может быть результатом локальной модификации свойств оптического пропускания первого оптического материала маскирующего слоя: например, путем локальной пескоструйной обработки поверхности куска первого оптического материала, чтобы локально изменить его коэффициент светопропускания t согласно маскирующему узору. Маскирующий слой (6) может быть расположен на входной оптической поверхности (по отношению к входящему свету от источника S) оптического элемента (1), или на другой оптической поверхности, или внутри самого оптического элемента (т.е. в виде внутреннего слоя), или на перенаправляющей свет поверхности (3) (см. фиг. 2): в последнем случае, маскирующий слой (6) может дополнительно защищать перенаправляющую свет поверхность (3) (например, для предотвращения износа). В примере, проиллюстрированном на фиг. 2, маскирующий слой (6) расположен на входной грани оптического элемента (1), маскирующий узор (7) имеет форму креста (т.е. "X") и тонкий рельефный узор перенаправляющей свет поверхности (3) каустического слоя (2) рассчитан таким образом, чтобы обеспечить проецируемый каустический узор (5) на экране (4), представляющий собой легко идентифицируемый символический лик без креста, который легко идентифицируется наблюдателем как воспроизводящий (известный) эталонный узор. Кроме того, в случае отсутствия маскирующего слоя (например, удаления, или в случае поддельного рельефного узора каустического слоя), рельефный узор затем проецирует (измененный) каустический узор (5'), представляющий собой символический лик, перечеркнутый крестом X. В этом случае наблюдатель может легко обнаружить, что оптический элемент не является подлинным, так как видимый каустический узор не воспроизводит правильный эталонный узор.

Предпочтительно (см. фиг. 3, 4), маскирующий узор (7) содержит видимое изображение (8), которое воспроизводит эталонное изображение (например, портрет, логотип и т.д.), которое может видеть наблюдатель, смотря на маскирующий слой (6), особенно в условиях освещения источником S оптического элемента (1). Более предпочтительно видимое изображение (8) не похоже на видимый каустический узор (5), тем самым вызывая эффект удивления у наблюдателя, смотрящего на освещенный маскирующий слой (6) и проецированный каустический узор (5).

Таким образом, преимущество настоящего изобретения состоит в том, что оптический элемент, оснащенный маскирующим слоем (6), трудно подделать. Например, в случае если маскирующий слой (6) подлинного оптического элемента расположен на входной грани указанного оптического элемента (1) (т.е. на поверхности оптического элемента, которая первой принимает свет, испускаемый источником S, как проиллюстрировано на фиг. 2), или внутри куска преломляющего прозрачного или частично про-

зрачного материала оптического элемента, фальшивомонетчик, желающий изготовить оптический элемент, способный обеспечить видимый каустический узор, соответствующий эталонному узору, путем воспроизведения рельефного узора подлинного каустического слоя (3) (например, путем изготовления слепка рельефного узора для получения формы для воспроизведения оптического элемента), но без очень точного расположения соответствующего маскирующего узора (т.е. совмещения с рельефным узором) или без обеспечения маскирующего слоя, не получит желаемый видимый каустический узор, который убедительно воспроизводит правильный эталонный узор. Таким образом, даже в случае оптического элемента, маскирующий слой которого не предназначен для отображения определенного видимого изображения, если освещенный рельефный узор (3) вместе с его маскирующим слоем (6) позволяют формировать каустический узор (5) на экране (4), воспроизводя с достаточным качеством (возможно, отличающимся общим коэффициентом масштабирования интенсивности) известный эталонный узор, то человек при простом визуальном наблюдении каустического узора на экране легко увидит, является ли он действительным воспроизведением эталонного узора или нет и, в случае, если каустический узор достаточно похож на эталонный узор, считается, что оптический элемент или объект, маркированный указанным оптическим элементом, является (с большой вероятностью) подлинным.

На фиг. 3А-В и 4А-В проиллюстрирован эффект удаления маскирующего слоя при воспроизведении эталонного изображения с оптического элемента, рельефный узор каустического слоя которого обработан согласно рисунку, учитывая наличие маскирующего слоя. Маскирующий слой в этих примерах был нанесен на поверхность оптического элемента так, чтобы его можно было легко удалить. На фиг. 3В и 4В также проиллюстрирован случай копии оптического элемента и, в частности, его перенаправляющей свет поверхности, выполненной фальшивомонетчиком, не воспроизведшим соответствующий маскирующий слой. На фиг. 3А показан оптический элемент (1), освещенный источником, с расположенным на его входной грани маскирующим слоем (6), представляющим собой известный портрет (эталонное изображение) Леонардо да Винчи, а рельефный узор каустического слоя (на задней части оптического элемента, не показан), адаптированный к маскирующему слою, проецирует видимый каустический узор (5), представляющий собой известный портрет Джоконды (эталонный узор). Наблюдатель, глядя на отображаемое видимое изображение и проецируемый каустический узор, может легко аутентифицировать оптический элемент (или объект, маркированный таким оптическим элементом), визуальное оценив, что видимое изображение действительно похоже на эталонное изображение, а проецируемый каустический узор действительно похож на эталонный узор. Однако в случае удаления маскирующего слоя с входной грани оптического элемента, как показано на фиг. 3В, конечно, нет видимого изображения эталонного изображения, но также проецируемый видимый узор теперь показывает явно ухудшенное представление эталонного узора. В этом последнем случае наблюдатель, по меньшей мере, четко обнаружит, что проецируемый каустический узор не похож на эталонный узор. Фиг. 3С соответствует оптическому элементу, сформированному на прозрачном блоке из РММА размером $100 \times 100 \times 20$ мм, который был механически обработан фрезерованием CNC с помощью полусферического алмазного инструмента для получения проецируемого изображения дерева (в условиях освещения) и с областью маскирующего узора, соответствующей слову "tree", сформированному путем травления очень маленьким инструментом для получения матового эффекта, который, таким образом, блокирует свет только в этой области. Таким образом, получается входная грань с хорошо читаемым словом "tree", а на проецируемом изображении показано дерево (при освещении).

На фиг. 4А проиллюстрирован другой яркий пример с маскирующим узором маскирующего слоя, представляющий собой известную формулу Эйнштейна $E = m \cdot c^2$ (эталонное изображение), тогда как рельефный узор соответствующего каустического слоя адаптирован проецировать известный портрет Альберта Эйнштейна (эталонный узор): в случае удаления маскирующего слоя, не появляется никакое видимое изображение в условиях освещения входной грани оптического элемента и проецируемый каустический узор теперь показывает портрет А. Эйнштейна, но отчетливо перечеркнут каустическим узором формулы $E = m \cdot c^2$. Здесь также наблюдатель может легко определить, отсутствует ли маскирующий слой или нет, и являются ли изображение на входной грани и проецируемый каустический узор соответственно визуальными похожими на эталонное изображение и эталонный узор.

Согласно варианту осуществления по фиг. 2 световые лучи от (точечного) источника света S распространяются к преломляющему оптическому элементу (1) на расстоянии d_s от источника с перенаправляющей свет поверхностью (3), имеющей рельефный узор. Оптический элемент в данном случае выполнен из куска прозрачного или частично прозрачного однородного материала с показателем преломления n . Каустический узор (5) проецируется на экране (4) на расстоянии изображения d_i от перенаправляющей свет поверхности (3) оптического элемента (1). Аутентичность оптического элемента (и, следовательно, объекта, маркированного данным элементом) может быть оценена непосредственно путем визуальной проверки наблюдателем степени сходства между проецируемым каустическим узором (5) и известным эталонным узором.

Предпочтительно рельефный узор (3) рассчитывают на основании конкретного целевого цифрового изображения эталонного узора. Из этого рассчитанного рельефного узора можно создать соответствующую

ший физический рельефный узор на поверхности подложки из подходящего оптического материала, т.е. прозрачного или частично прозрачного материала с показателем преломления n (или отражающей поверхности из непрозрачного материала в случае отражающего оптического элемента), с использованием, например, ультраточной механической обработки (UPM) или литографии в сером цвете. В случае механической обработки рельефа на поверхности подложки из непрозрачного оптического материала для формирования отражающей поверхности, хорошая отражательная способность будет получена либо подходящими свойствами самого материала, либо посредством дополнительной традиционной операции нанесения тонкого слоя металла (металлизации) на рельеф. В UPM используют инструменты для механической обработки алмазов и нанотехнологии для достижения очень высокой точности, чтобы допуски могли достигать "субмикронного" уровня или даже "наномасштабного" уровня. В отличие от этого "высокая точность" в традиционной механической обработке означает допуски в микронах в однозначных числах. Другими потенциально подходящими технологиями для создания физического рельефного узора на поверхности являются лазерная абляция и литография в оттенках серого. Как известно в области микропроизводства, каждая из этих технологий имеет свои сильные и слабые стороны с точки зрения стоимости, точности, скорости, разрешения и т.д.

Подходящая подложка из оптического материала для преломляющего перенаправляющего свет оптического элемента должна быть оптически прозрачной, прозрачной или, по меньшей мере, частично прозрачной и механически устойчивой. Как правило, коэффициент пропускания $T \geq 50\%$ является предпочтительным, а $T \geq 90\%$ является наиболее предпочтительным. Кроме того, можно использовать низкую мутность $H \leq 10\%$, но $H \leq 3\%$ является предпочтительным, а $H \leq 1\%$ является наиболее предпочтительным. Оптический материал также должен вести себя правильно во время процесса механической обработки, чтобы обеспечить гладкую и бездефектную поверхность. Примером подходящей подложки является оптически прозрачная пластина из PMMA (также известна под коммерческими названиями Plexiglas, Lucite, Perspex и т.д.). Для отражающих каустических перенаправляющих свет оптических элементов подходящая подложка из оптического материала должна быть механически устойчивой, и должна быть возможность придать ей зеркальную поверхность. Примером подходящей подложки является металл, такой как те, которые используются для изготовления оригиналов нарезных дифракционных решеток и лазерных зеркал, или неотражающая подложка, которая может быть дополнительно металлизирована.

Для крупномасштабного производства требуются дальнейшие этапы создания штампа и серийного копирования оптического элемента на целевом объекте. Подходящим процессом для создания штампа из оригинала является, например, гальванопластика. Подходящие процессы для серийного копирования являются, например, горячее тиснение полимерной пленки или литье фотополимера под воздействием УФ-излучения, и их можно осуществлять в процессе печати либо с рулона на рулон, либо с фольги на фольгу. В целях серийного копирования ни оригинал, ни полученный из него штамп не должны быть оптически прозрачными, поэтому также можно использовать непрозрачные материалы (в частности, металлы), даже когда конечный продукт является преломляющим оптическим элементом. Тем не менее, в некоторых случаях может быть преимущественно, чтобы оригинал был прозрачным, поскольку он позволяет проверять качество каустического изображения, прежде чем приступить к тиснению и серийному копированию.

Критическим аспектом использования оптического элемента с перенаправляющей свет поверхностью, имеющей рельефный узор и маскирующий слой, в качестве защитных признаков является его физический масштаб, который должен быть совместим с целевым объектом, подлежащим маркировке, и оптическая конфигурация, необходимая для проецирования каустического изображения.

Как правило, максимальный боковой размер оптического элемента ограничен общим размером объекта и обычно может варьироваться от нескольких см до менее 1 см в менее благоприятных случаях. Для определенных применений, таких как, например, для банкнот, целевая общая толщина может быть чрезвычайно малой (порядка 100 мкм или менее). Кроме того, допустимые изменения толщины (рельеф) являются еще меньшими по ряду причин, включая механические ограничения (слабые места, связанные с более тонкими областями) и эксплуатационные соображения (например, при укладке банкнот в стопку, стопка будет выпуклой ввиду более толстой части бумажки, что усложняет манипуляции с банкнотами и хранение). Как правило, для банкноты общей толщиной приблизительно 100 мкм целевая толщина для рельефного узора оптического элемента, который должен быть включен в эту банкноту, может составлять приблизительно 30 мкм. Для кредитной карты или удостоверения личности толщиной приблизительно 1 мм целевая толщина для рельефного узора оптического элемента, который должен быть включен в эту кредитную карту/удостоверение личности, будет составлять менее чем приблизительно 400 мкм и предпочтительно не более чем приблизительно 250 мкм.

Кроме того, расстояние между источником и изображением, как правило, ограничено удобством пользователя до нескольких десятков сантиметров. Заметными исключениями являются солнце или узконаправленный источник света, установленный на потолке, которые, однако, менее доступны при определенных обстоятельствах. Кроме того, соотношение d_s/d_i между двумя расстояниями, как правило, пре-

вышает 5-10, чтобы получить более четкое изображение (и с хорошей контрастностью), которое легче распознать. Кроме того, соотношение $d_s/d_i \geq 5$ вместе с источником S света, который предпочтительно является точечным (например, осветительный светодиод обычного мобильного телефона), позволяет считать, что источник света фактически приблизительно "бесконечно удален" и, таким образом, проекционная поверхность на только приблизительно фокусном расстоянии от оптического элемента будет подходящей для четкого просмотра проецируемого каустического узора. Как следствие, условия хорошего визуального наблюдения пользователем не требуют слишком строгого относительного пространственного расположения источника света, оптического элемента и глаз пользователя.

Хотя в данном документе описана только конфигурация пропускающего каустического оптического элемента, те же рассуждения могут быть применены к отражающей конфигурации с небольшими изменениями (в частности, в отношении применения принципа Ферма).

Согласно варианту настоящего изобретения (преломляющий) оптический элемент может быть прозрачным элементом, как проиллюстрировано на фиг. 5-6, каустический слой которого имеет перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором заданной глубины и фокусное расстояние f_c , а примыкающий линзообразный элемент с фокусным расстоянием f_L которого выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света через него, и формирования проецируемого каустического узора непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, смотрящего на точечный источник через оптический элемент. Предпочтительно оптический элемент содержит одно из следующего:

a) каустический слой с положительным фокусным расстоянием ($f_c > 0$) и линзообразный элемент с отрицательным фокусным расстоянием ($f_L < 0$), как показано на фиг. 5, или

b) каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ($f_c < 0$) и линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием ($f_L > 0$), как показано на фиг. 6.

В примере, проиллюстрированном на фиг. 5, оптический элемент имеет маскирующий слой (6), расположенный на входной грани, и для того, чтоб глаз (9) смог увидеть проецируемый каустический узор (5) в условиях освещения источником света S, каустический слой (2) имеет высоту от пика до впадины $\Delta h = 30$ мкм и фокусное расстояние 40 мм и объединен с отрицательным линзообразным элементом (10), вставленным рядом с ним. Источник света S расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического слоя (2). Установку проводят перед глазом (9) на расстоянии приблизительно 20-30 мм, которое считается расстоянием R удаления выходного зрачка. Также показано каустическое изображение (5) на сетчатке глаза. Пучки, выходящие из оптического элемента, расходятся, и, таким образом, радужная оболочка глаза ограничивает поле зрения и видимую часть каустического изображения. Чем ближе оптический элемент к глазу, тем больше поле зрения и тем больше видимая часть каустического изображения.

В примере, проиллюстрированном на фиг. 6, оптический элемент также имеет маскирующий слой (6), расположенный на входной грани, каустический слой (2') имеет перенаправляющую свет поверхность, которая является отрицательной копией исходного элемента, используемого на фиг. 5, и, таким образом, имеет отрицательное фокусное расстояние - 40 мм. Он объединен с положительным линзообразным элементом (10') и удерживается аналогично установке на фиг. 5 на расстоянии R от глаза (9). Источник света S также расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического элемента (2'). Соответствующий каустический узор (5) создается на сетчатке глаза. Как показано на фигуре, видна большая часть каустического узора по сравнению с изображением на фиг. 5, поскольку лучи на выходе оптического элемента сходятся, и радужная оболочка глаза отсекает меньше лучей, прежде чем они достигнут сетчатки глаза.

В целях описания удобно определить декартову систему отсчета, ось z которой выровнена с оптической осью оптического элемента и направлена от источника к изображению, а плоскость (x, y) перпендикулярна оптической оси. Для иллюстрации концепции настоящего изобретения рассматривается простой оптический элемент "плоско-выпуклого" типа (фиг. 2 и 7), который освещается пучком (по существу) параллельных лучей, при этом маскирующий слой расположен внутри или на первом оптическом материале каустического слоя. На фиг. 7 показан подробный вид примера по фиг. 2, в котором маскирующий слой (6) нанесен на входную грань плоско-выпуклого оптического элемента (1) и маскирующий узор (7) имеет форму "X". Маскирующий слой (6) проходит по существу перпендикулярно оптической оси и имеет форму, соответствующую заданному маскирующему узору, что позволяет маскирующему слою блокировать или по меньшей мере уменьшить светопропускание падающих лучей через некоторую(-ые) часть(-и) каустического слоя (2), пропуская падающие лучи через другую(-ие) часть(-и) каустического слоя. Распространение на случай источника света на конечном расстоянии является простым путем добавления линзообразного элемента, преобразующего источник на конечном расстоянии в виртуальный источник на бесконечности. Функция линзообразного элемента в конечном итоге может быть реализована непосредственно в каустическом оптическом элементе. Оси x и y, таким образом, лежат на плоскости оптического элемента (которая параллельна входной грани оптического элемента). Каустическая поверхность, соответствующая рельефному узору перенаправляющей свет поверхности (3), матема-

тически описана скалярной функцией $z = F(x, y)$, определяющей расстояние z поверхности от эталонной плоскости $z = 0$ в точке координат (x, y) оптического элемента. Для удобства дальнейшего описания эта плоскость может быть расположена на задней поверхности оптического элемента (1), и в этом случае $z = F(x, y)$ равна толщине оптического элемента (см. фиг. 7). В примере, показанном на фиг. 7, эта плоскость параллельна плоскости каустического узора.

Точно так же каустический узор описан скалярной функцией $I(x', y')$, определяющей интенсивность света в точке (или пикселе) координат (x', y') на плоскости изображения на экране (4).

Следует отметить, что использование декартовых координат является вопросом удобства и вместо них также можно использовать другие системы (например, в случае, когда каустическая поверхность является частью изогнутого объекта или поддерживается им). Точно так же задняя поверхность оптического элемента не обязательно должна быть плоской, хотя, очевидно, это необходимо учитывать при расчетах.

В вариантах осуществления настоящего изобретения используется свойство, заключающееся в том, что свет распространяется по путям с постоянной оптической длиной, где длина оптического пути является локальным экстремумом по отношению к любому небольшому изменению пути (т.е. принцип Ферма). Для любой заданной точки (x_0, y_0) каустического узора пучок лучей малого поперечного сечения, сходящийся на ней, прошел пути одинаковой оптической длины. Как правило, рельефный узор перенаправляющей свет поверхности (3) каустического слоя (2) имеет глубину рельефа ϵ , очень малую по сравнению с расстоянием d между каустическим слоем и плоскостью изображения, на которой формируется каустическое изображение (см. фиг. 7): действительно, как правило, полученное в результате значение ϵ меньше 300 мкм, в то время как d больше 5 см (таким образом, $\epsilon/d < 6 \cdot 10^{-3}$), глубина рельефа ϵ определяется как разность высот между самой высокой и самой низкой точкой рельефного узора. Общая толщина каустического слоя (2) равна $(e+\epsilon)$, где e - толщина однородной части оптического материала каустического слоя. Как правило, толщина e также очень мала по сравнению с расстоянием наблюдения d , т.е. обычно e меньше миллиметра (таким образом, $e/d \leq 2 \cdot 10^{-2}$, и $(e+\epsilon)/d \leq 2,6 \cdot 10^{-2}$). Однако слой толщиной e , соответствующий распространению входящих световых лучей внутри каустического слоя в виде простых параллельных лучей, не влияет на разность оптического пути и, таким образом, не учитывается. Рассматривая каустический слой (2), проиллюстрированный на фиг. 7, для источника света S , расположенного в бесконечности (для простоты, так что имеются параллельные входящие лучи; однако, распространение на случай источника света на конечном расстоянии является несложным, просто рассматривая оптическую линзу, преобразующую источник конечного расстояния в виртуальный источник в бесконечности), ($s_i = \infty$, $d_i = d$), учитывают разность длины оптического пути Δl между:

(i) длиной оптического пути $l(x_0, y_0)$ прямого луча, входящего в грань плоскости (на уровне $z=0$) каустического слоя (2), в точке (x_0, y_0) , проходящего через каустический слой в первый оптический материал с показателем преломления n до точки (x_0, y_0) на уровне z_0 перенаправляющей свет поверхности уравнения $z = F(x, y)$, и достигающего фокусной точки (x_0, y_0) плоскости изображения на экране (4), и (ii) длиной оптического пути $l(x, y)$ луча, входящего в грань плоскости (на уровне $z=0$) каустического слоя, в точке (x, y) , ближайшей к точке (x_0, y_0) , проходящего через каустический слой до точки (x, y) на уровне z перенаправляющей свет поверхности, и отклоняемого в точку (x_0, y_0) плоскости изображения.

Если r является расстоянием между точками (x_0, y_0) и (x, y) , т.е.

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

то имеют

$$\Delta l \equiv l(x_0, y_0) - l(x, y) = n(z_0 - z) + (d - z_0) - \sqrt{r^2 + (d - z)^2}.$$

Согласно принципу Ферма должны иметь $\Delta l = 0$ и, таким образом, при решении квадратного уравнения в z , получают

$$\frac{z_0 - z}{d - z_0} = \frac{1}{n + 1} \left(\sqrt{1 + \frac{r^2}{(d - z_0)^2} \frac{n + 1}{n - 1}} - 1 \right),$$

где ввиду $\epsilon \ll d$, имеют $d - z_0 \approx d$. Таким образом, указанное $z = f_0(x, y)$, обозначающее локальное представление поверхности $z = F(x, y)$ (т.е. вокруг точки (x_0, y_0)), и $z_0 = f_0(x_0, y_0)$, представляющее собой расчет на вершине, можно написать следующее:

$$z = f_0(x, y) = f_0(x_0, y_0) + \frac{d}{n + 1} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{n + 1}{n - 1} \left(\frac{r}{d} \right)^2} \right],$$

который представляет собой поверхность вращения вокруг оси z с вершиной в точке (x_0, y_0, z_0) .

Следовательно, если вместо фокусной точки (x_0, y_0) рассматривать любую из фокусных точек (x_i, y_i) на плоскости изображения ($i=1, \dots, N$), можно определить локальное (т.е. с вершиной в точке (x_i, y_i)) приближение $F(x, y)$ следующим образом:

$$z = f_i(x, y) = f_i(x_i, y_i) + \frac{d}{n+1} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{r_i}{d}\right)^2} \right],$$

где $z_i = f_i(x_i, y_i)$, и

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}.$$

Следовательно, функция $F(x, y)$, задающая общую форму перенаправляющей свет поверхности (3) каустического слоя (2), может быть локально представлена в соответствии с вышеупомянутой стационарностью оптического пути кусочно-линейной поверхностью, являющейся огибающей, полученной в результате пересечения кусков поверхностей с "функциями элементарной формы" $z = f_i(x, y)$ вокруг вершин (x_i, y_i) , соответствующих заданным точкам (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$, на плоскости изображения (на экране (4)).

Дополнительным преимуществом настоящего изобретения из данного наблюдения является то, что при паракиальном приближении, т.е. где $r \ll d$, и, таким образом

$$\delta_i = \left(\frac{r_i}{d}\right)^2 \ll 1.$$

это локальное представление каустической поверхности может дополнительно приближаться вблизи от (x_i, y_i) с помощью первых нескольких ненулевых членов разложения в ряд Тейлора выражения в пределах квадратных скобок:

$$1 - \sqrt{1 + \frac{n+1}{n-1} \delta_i^2} \approx -\frac{n+1}{2(n-1)} \delta_i^2 + \frac{(n+1)^2}{8(n-1)^2} \delta_i^4 + \dots.$$

Например, если рассматривать локальное приближение $f_i(x, y)$ $F(x, y)$ вокруг точки (x_i, y_i) и учитывать только первый ненулевой член разложения в ряд Тейлора, получаем упрощенное приближение локального представления:

$$f_i(x, y) \approx f_i(x_i, y_i) - \frac{d}{2(n-1)} \left(\frac{r_i}{d}\right)^2,$$

которое описывает параболоид вращения с осью, центрированной в (x_0, y_0) , как показано на фиг. 8, с "высотой" $z_i = f_i(x_i, y_i)$ относительно плоскости (x, y) в $z = 0$ и соответствующей вершине параболоида (пространственных координат (x_i, y_i, z_i)).

Для разложения в ряд Тейлора до следующего ненулевого порядка ($k = 4$) получаем приближение локального представления вокруг точки (x_i, y_i) следующим образом:

$$z = f_i(x, y) \approx f_i(x_i, y_i) - \frac{d}{2(n-1)} \left(\frac{r_i}{d}\right)^2 + \frac{d(n+1)}{8(n-1)^2} \left(\frac{r_i}{d}\right)^4.$$

При рассмотрении кусочно-линейного параболоидного приближения $F(x, y)$, заданного приближением до первого ненулевого порядка локального представления $f_i(x, y)$, пересечение двух таких (круговых) параболоидов, имеющих соответственно высоту z_i выше точки (x_i, y_i) и высоту z_j выше смежной точки (x_j, y_j) , обычно определяет параболу в плоскости, перпендикулярной прямой линии, соединяющей две точки (x_i, y_i) и (x_j, y_j) . Таким образом, для множества точек $\{(x_j, y_j), j=1, \dots, N\}$ плоскости изображения и соответствующего множества высот $\{z_i, i=1, \dots, N\}$ вершин параболоидов, соответственно связанных с указанными точками, полученная в результате (внешняя) огибающая пересечения этих параболоидов (определяющая кусочно-линейную перенаправляющую свет поверхность) сформирована частями параболоидов, ограниченными острыми параболическими кривыми. Эти кривые можно вычислить, решив простые алгебраические уравнения второго порядка. В случае разложения в ряд Тейлора порядка $k = 4$ или выше соответствующие "функции элементарной формы" $z = f_i(x, y)$ более сложны, чем простые параболоиды, и расчет линий пересечения кусков поверхностей (при установке разной высоты их вершин) становится более трудоемким.

В примере, показанном на фиг. 8, входящие параллельные лучи освещают плоскую (входную) грань $z = 0$ каустического слоя с эффективной неравномерной интенсивностью света $I_M(x, y) = I_0 t(x, y)$, где I_0 представляет собой равномерную интенсивность падающего света, из-за наличия маскирующего узора с (локальным) коэффициентом светопропускания $t(x, y)$, и, таким образом, для заданного кусочно-линейного приближения перенаправляющей свет поверхности $z = F(x, y)$, т.е. для заданного множества N вершин (x_i, y_i, z_i) и соответствующих функций элементарной формы $f_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$, вклад в интенсивность $I(j)$ в точке (x_j, y_j) плоскости изображения из огибающей пересечений элементарных кусков поверхности, как проиллюстрировано на фиг. 9, можно математически описать следующим образом:

$$I(j) = \iint I_0 t(x, y) \prod_{i=1, i \neq j}^N H[f_j(x, y) - f_i(x, y)] dx dy,$$

с использованием "функции трассировки" (i, j принадлежат $\{1, \dots, N\}$):

$$\prod_{i=1, i \neq j}^N H[f_j(x, y) - f_i(x, y)],$$

при этом функция $H[X]$ является известной ступенчатой функцией Хевисайда, определяемой

$$H(X) = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ 1, & X \geq 0 \end{cases}$$

и где интегралы взяты по опорному домену каустического элемента (т.е. "окно" или область сбора света). Стоит обратить внимание, что в принципе нет никаких конкретных ограничений в отношении формы и/или размера окна. Однако простые геометрические формы, компактные формы и выпуклые формы являются преимущественными для вычислительных и практических целей.

Таким образом, выражение кусочно-линейного приближения (для заданного числа N точек изображения (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$) представления каустической поверхности $z = F(x, y)$ имеет следующий вид:

$$F(x, y) \sim \sum_{j=1}^N f_j(x, y) \prod_{i=1, i \neq j}^N H[f_j(x, y) - f_i(x, y)].$$

После получения кусочно-линейного приближения перенаправляющей свет поверхности $z = F(x, y)$ (для заданного множества из N вершин), необходимо оценить соответствующее распределение интенсивности света $I(i)$, $i=1, \dots, N$ в выбранных соответственных точках (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$, плоскости изображения, и оценить разность для каждой целевой точки (x_i, y_i) между $I(i)$ и заданной (целевой) интенсивностью I_i в той же точке, соответствующей целевому каустическому узору, который нужно воспроизвести. Таким образом, высоты z_i , $i=1, \dots, N$ вершин итеративно заданы таким образом, что сумма

$$S = \sum_{i=1}^N |I(i) - I_i|^2$$

минимизируется.

Например, если локальные куски поверхностей $f_j(x, y)$ приближаются главным членом разложения в ряд Тейлора, т.е. параболоидами, ненулевая интенсивность $I(j)$ в точке (x_j, y_j) на плоскости изображения исходит только из того, что осталось от параболоида вершины (x_j, y_j, z_j) , т.е. параболоида (j) , после пересечения с остальными параболоидами, формирующими кусочно-линейную поверхность F , имеющую соответственные вершины (x_i, y_i, z_i) , $i \neq j$, $i \in \{1, \dots, N\}$ (и возможно с границей окна каустического слоя). В случае, если параболоид (j) полностью маскируется по меньшей мере одним параболоидом (i) (т.е. если z_i является достаточно большим относительно z_j), интенсивность $I(j)$ равна нулю. Как упомянуто выше, контур пересечения двух параболоидов (i) и (j) представляет собой параболу в плоскости, перпендикулярной прямой линии, соединяющей две точки (x_i, y_i) и (x_j, y_j) , при этом данная плоскость параллельна оптической оси вдоль z : пересечение этой плоскости с плоскостью (x, y) при $z = 0$ определяет прямой отрезок. При рассмотрении пересечений параболоида (j) с соседними параболоидами (i) соответствующие прямые отрезки на плоскости $z=0$ очерчивают выпуклую многоугольную ячейку Ω_j . Очевидно, что интенсивность света $I(j)$, доставляемая в точку (x_j, y_j) плоскости изображения, является результатом только входящих (равномерных) параллельных лучей, проходящих через маскирующий слой (который взвешивает плотность потока света через локальный коэффициент пропускания $t(x, y)$) и собранных ячейкой Ω_j , и, таким образом, доставляемая интенсивность света $I(j)$ пропорциональна взвешенной области $a(j)$ ячейки Ω_j , т.е. области, взвешенной локальным средним значением коэффициента пропускания маскирующего слоя над ячейкой Ω_j , что соответствует эффективному весовому значению

$$p_j = \iint_{\Omega_j} t(x, y) dx dy.$$

Конечно, сумма всех взвешенных областей ячеек, связанных с огибающей всех пересекающихся параболоидов, должна быть равна полной "эффективной" области A (на плоскости $z=0$), т.е. области окна, взвешенной пропусканием маски:

$$\sum_{i=1}^N a(i) = A.$$

Это ограничение учитывается путем выбора приемлемой нормализации при (итеративной) минимизации суммы

$$S = \sum_{i=1}^N |I(i) - I_i|^2$$

Каждый раз при изменении относительных разностей между высотами вершин параболоидов (путем увеличения или уменьшения хотя бы одной из N высот), области ячеек изменяются соответствующим образом: изменение высоты вершин, таким образом, эквивалентно изменению областей ячеек. При изменении высот z_i и z_j соответственных вершин двух параболоидов, соответствующих двум смежным точкам (x_i, y_i) и (x_j, y_j) , например, путем изменения z_j в $z_j + \delta z_j$ (другие высоты остаются неизменными), отрезок границы между ячейкой Ω_i (относящейся к параболоиду (i)) и ячейкой Ω_j (относящейся к параболоиду (j)) будет перемещаться в сторону ячейки Ω_i , если δz_j является положительным (т.е. взвешенная область $a(i)$ уменьшается), и будет перемещаться в сторону ячейки Ω_j , если δz_j является отрицательным (т.е. взвешенная область $a(i)$ увеличивается). Более того, поскольку интенсивности пропорциональны

(взвешенным) областям ячеек, минимизация суммы S эквивалентна минимизации суммы

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N |a(i) - a_i|^2$$

где a_i является значением области, соответствующим целевой интенсивности I_i , $i=1, \dots, N$. Взвешенную область $a(i)$ можно рассматривать как параметр, связанный с ячейкой Ω_i , и изменение высот вершин параболоидов эквивалентно изменению параметров ячеек, формирующих разбиение области окна. Взвешенная область $a(j)$ является результатом пересечений параболоидов и может быть рассчитана с помощью вышеупомянутой функции трассировки как (интегрирование осуществляют по плоскости (x, y) ' области окна)

$$a(j) = \frac{I(j)}{I_0} = \iint t(x, y) \prod_{i=1, i \neq j}^N H[f_j(x, y) - f_i(x, y)] dx dy.$$

Приведенное выше рассуждение на примере параболоидных поверхностей остается верным, даже если выражение куска поверхности, непосредственно полученного от стационарности длины оптического пути, не приближается или приближается выражением Тейлора к любому (четному) порядку $k > 2$ (поскольку полученное выражение все еще описывает поверхность вращения): на шаге p итерации операции минимизации множество значений $\{z_i^{(n)}, i=1, \dots, N\}$ определяет множество ячеек $\{\Omega_i^{(n)}, i=1, \dots, N\}$, представляющих пересечения поверхностей N кусков $\{z = f_i^{(n)}(x, y), i=1, \dots, N\}$ и соответствующее множество взвешенных областей ячеек $\{a^{(n)}(i), i=1, \dots, N\}$, где

$$a^{(n)}(j) = \iint \prod_{i=1, i \neq j}^N t(x, y) H[f_j^{(n)}(x, y) - f_i^{(n)}(x, y)] dx dy,$$

ограничение является

$$\sum_{i=1}^N a^{(n)}(i) = A,$$

а функция потерь является. Приближение перенаправляющей свет поверхности описано следующим образом.

$$F^{(n)}(x, y) \sim \sum_{j=1}^N f_j^{(n)}(x, y) \prod_{i=1, i \neq j}^N H[f_j^{(n)}(x, y) - f_i^{(n)}(x, y)].$$

Процесс минимизации функционала (т.е. функции потерь)

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N |a(i) - a_i|^2$$

можно осуществлять согласно любому известному методу минимизации, такому как, например, симплекс-метод Недлера-Мида (без использования производных) (J.A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization", The Computer Journal, vol. 7 (4), 1965 г., стр. 308-313). Конечно, можно использовать другие методы оптимизации без использования производных, например, метод покоординатного спуска (см. Stephen J. Wright, "Coordinate Descent Algorithms", Mathematical Programming, vol. 151 (1), июнь 2015 г., стр. 3-34) или метод многоуровневого координатного поиска ("MCS") (см. W. Huyer and A. Neumaier, "Global Optimization by Multilevel Coordinate Search", Journal of Global Optimization, vol.14 (4), июнь 1999 г., стр. 331-355).

Согласно настоящему изобретению и с вышеупомянутым кусочно-линейным представлением перенаправляющей свет поверхности, техническая задача расчета перенаправляющей свет поверхности каустического слоя, содержащего маскирующий слой, который пригоден для перенаправления падающего света, принятого от источника света, для формирования проецируемого изображения, содержащего заданный каустический узор (т.е. заданное распределение ненулевой интенсивности света) целевого изображения, решается следующим образом:

обеспечивают дискретное представление входного целевого изображения, содержащего P множество N пикселей изображения p_i координат $\{(x_i, y_i)\}$, $i = 1, \dots, N$, в плоскости изображения, со связанными ненулевыми целевыми интенсивностями света $\{I_i\}$, распределенными в заданной области целевого изображения и соответствующими целевому каустическому узору целевого изображения;

вычисляют кусочно-линейную перенаправляющую свет поверхность $z = F(x, y)$ каустического слоя с высотой z выше плоскости координат (x, y) на основании представления перенаправляющей свет поверхности посредством пересекающихся кусков поверхностей $f_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$, соответственно полученных от стационарности длины оптического пути лучей, преломленных или отраженных каустическим слоем и сфокусированных в точках $P(i)$ плоскости изображения координат (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$,

при этом каждый кусок поверхности $z = f_i(x, y)$ представляет собой поверхность вращения вокруг оси, проходящей через точку $P(i)$ с вершиной в точке (x_i, y_i, z_i) , высотой $z_i = f_i(x_i, y_i)$, $i=1, \dots, N$, причем кусочно-линейная перенаправляющая свет поверхность, связанная с соответственными значениями высот вершин N , формируется огибающей пересечений соответствующих N кусков поверхностей;

для заданного множества соответственных значений высот z_1, \dots, z_N вершин N кусков поверхностей рассчитывают соответствующее множество значений интенсивностей света $I(1), \dots, I(N)$, которые соответственно сфокусированы в точках $P(1), \dots, P(N)$ каустическим слоем, перенаправляющим падающий свет через связанную кусочно-линейную перенаправляющую свет поверхность; и

рассчитывают соответственные значения N высот z_1, \dots, z_N N вершин соответствующих N кусков поверхностей, которые минимизируют разности между соответственными значениями рассчитанных интенсивностей света $I(1), \dots, I(N)$, сфокусированных в точках $P(1), \dots, P(N)$ через связанную перенаправляющую свет поверхность, и соответственными соответствующими значениями целевых интенсивностей света I_1, \dots, I_N .

Например, при минимизации функции потерь Σ с помощью симплекс-метода Нелдера и Мида оптимизация начинается с множества из $N+1$ точек $Q(1), \dots, Q(N+1)$, расположенных в вершинах невырожденного симплекса S в N -мерном пространстве оптимизации (т.е. N высот z_1, \dots, z_N), и соответствующего множества значений функции потерь

$$\sum_{i=1}^{N+1} Q(i)$$

Затем метод осуществляет последовательность преобразований рабочего симплекса S , направленную на уменьшение значений функции потерь в его вершинах. На каждом этапе преобразование определяется путем вычисления одной или более контрольных точек вместе с их значениями функции потерь и сравнения этих значений функции потерь со значениями в текущих вершинах с целью замены наихудшей вершины, т. е. одной с наибольшим значением функции потерь, лучшей вершиной. Контрольные точки можно выбрать в соответствии с одной из четырех эвристик: (i) отражение или (ii) расширение от худшей вершины; или (iii) сжатие или (iv) сжатие в сторону лучшей вершины(вершин). Минимизация завершается, когда рабочий симплекс S становится достаточно малым или когда значения функции потерь в вершинах становятся достаточно близкими. Посредством четырех эвристических преобразований алгоритм Нелдера-Мида обычно требует только одного или двух вычислений функции на каждом шаге, в то время как многие другие методы прямого поиска используют по меньшей мере N вычислений функции потерь. Интуитивное объяснение алгоритма Нелдера-Мида приведено в (Press, WH; Teukolsky, SA; Vetterling, WT; Flannery, BP (2007). "Section 10.5. Downhill Simplex Method in Multidimensions". Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3rd ed.). New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-88068-8): (Press, WH; Teukolsky, SA; Vetterling, WT; Flannery, BP (2007).

"Симплекс-метод спуска с вершины теперь включает серию шагов, большинство из которых просто перемещают точку симплекса, где функция наибольшая ("самая высокая точка"), через противоположную сторону симплекса в нижнюю точку. Эти шаги называются отражениями, и они построены так, чтобы сохранить объем симплекса (и, следовательно, сохранить его невырожденность). Когда это возможно, метод расширяет симплекс в том или ином направлении, чтобы сделать более крупные шаги. Когда он достигает "дна долины", метод сжимается в поперечном направлении и пытается просочиться вниз по долине. Если возникает ситуация, когда симплекс пытается "пройти сквозь игольное ушко", он сжимается во всех направлениях, втягиваясь вокруг своей самой нижней (лучшей) точки".

Согласно предпочтительному варианту осуществления настоящего изобретения оптимальную перенаправляющую свет поверхность преимущественно получают посредством (универсального) метода диаграммы мощности (также известного как метод диаграммы Вороного или метод диаграммы Лагерра/Вороного (см. F. de Goes et al., "Blue Noise through Optimal Transport", CAN Transactions on Graphics, vol. 31 (6), (SIGGRAPH Asia) 2012) (также см. веб-сайт <http://www.geometry.caltech.edu/BlueNoise/>, с доступным исходным кодом).

Действительно, этот метод является действенным, и доказано, что в случае, соответствующем задаче оптимизации настоящего изобретения, метод диаграммы мощности как уникальное решение "...для любых заданных ограничений емкости" минимизирует вогнутую функцию весовых значений (не путать с весовыми значениями площадей ячеек из-за коэффициента пропускания $t(x,y)$), причем весовые значения w_i соответствуют в данном случае высотам z_i , и емкости m_i , соответствуют в данном случае взвешенным областям ячейки $a(i)$ (см., в частности, приложение к цитированной выше статье de Goes et al.)

Поскольку любое изображение можно приблизить конечным набором пикселей, каустическую поверхность можно приблизить элементами соответствующих кусков поверхностей (например, параболоидов). Следовательно, при заданном целевом изображении $I_c(x',y')$ задача расчета каустической поверхности, которая его генерирует, сводится к нахождению приемлемого набора весовых значений $\{w_i\}$ для заданного набора приближающихся точек $I_c(x',y')$.

В соответствии с гипотезой оптимального переноса (см. вышеупомянутую статью de Goes et al.), это эквивалентно нахождению весовых значений $\{w_i\}$ (в данном случае высот $\{z_i\}$) для диаграммы мощности сайтов $\{(x_i, y_i)\}$, так что емкости $\{m_i\}$ (в данном случае взвешенные области ячейки $\{a(i)\}$) пропорциональны целевым интенсивностям изображения $\{I_c(x_i, y_i)\}$. После получения оптимального множества высот $\{z_i, i=1, \dots, n\}$ и соответствующих границ ячеек $\partial\Omega_i$ (ячеек Ω_i , взвешенных областей $a(i)$) с помощью метода диаграммы мощности, кусочно-линейная поверхность восстанавливается с учетом пересечений цилиндров, построенных вдоль оси z , основания которых сформированы границами ячеек, с соответственными кусками поверхностей с вершинами на указанных полученных высотах. В предпочтительном варианте осуществления куски поверхностей приближаются параболоидами: в этом случае граница $\partial\Omega_i$ ячейки Ω_i является многоугольной, и расчеты расстояний точки до границы и градиентов значительно упрощаются. В более общем случае (т.е. куски поверхностей не приближаются или приближаются путем

разложения в ряд Тейлора порядка более 2), граница $\partial\Omega_i$ ячейки Ω_i по-прежнему является замкнутой кривой, но состоит из изогнутых линий, и вышеупомянутые расчеты расстояний точки до границы и градиентов более сложные.

Минимизация по w_i функционала

$$\sum_i |m_i - I_i|^2$$

может быть решена простым алгоритмом градиентного спуска (см., например, вышеупомянутую статью F. de Goes et al.). Процесс начинается с исходного множества $\{w_i\}$ (чаще всего, когда все значения принимаются равными), а затем сходится к оптимальному множеству $\{w_i\}$ соответствующего разбиения на ячейки Ω_i емкостей m_i . Тогда из полученного в результате оптимального множества $\{w_i\}$ получают множество высот элементов параболоида $\{z_i\}$ и из границ $\partial\Omega_i$ полученных в результате многоугольных ячеек Ω_i , путем пересечения вертикальных (вдоль z) цилиндров основания $\partial\Omega_i$ с помощью параболоидов строится финальная кусочно-линейная каустическая поверхность.

Каустический слой, имеющий перенаправляющую свет поверхность, вычисленную и изготовленную согласно настоящему изобретению, формирует проецируемое изображение, которое содержит каустический узор, который воспроизводит эталонный узор, который легко распознается человеком без использования дополнительных средств (например, невооруженным глазом) или типичных и находящихся в свободном доступе средств, так что объект, маркированный этим оптическим защитным элементом, может быть легко визуально аутентифицирован человеком. Прозрачный аспект преломляющего оптического защитного элемента делает его особенно подходящим для маркировки, по меньшей мере, частично прозрачных подложек (например, стеклянных или пластиковых бутылок, крышек от бутылок, часовых стекол, ювелирных изделий, драгоценных камней и т.д.).

Раскрытый способ изготовления преломляющей прозрачной или частично прозрачной перенаправляющей свет поверхности или отражающей перенаправляющей свет поверхности каустического слоя является быстрым, масштабируемым, надежным и точным. Это позволяет значительно сократить количество итераций, необходимых для перехода от целевого изображения к соответствующей поверхности, поскольку нет необходимости в исправлениях или корректировках. Это также сокращает общее время, необходимое для изготовления.

Кроме того, исключается этап расчета и интегрирования нормального поля и обеспечивается эффективный метод оптимизации за счет минимизации ограничений емкости.

Кроме того, полностью исключается вмешательство пользователя, помимо указания целевого изображения и принятия полученной в результате поверхности. Устранение необходимости во вмешательстве пользователя значительно упрощает реализацию способа в производственном контексте, где не всегда доступны специальные навыки.

Другой способ изготовления рельефного узора каустического слоя, содержащего маскирующий слой, описан ниже, на примере оптического элемента, показанного на фиг. 2. Данный способ основан на методе "инверсивного каустического дизайна", как подробно описано в европейском патенте EP 2963464 B1 M. Pauly, R. Testuz и Y. Schwartzburg, путем обеспечения присутствия маскирующего слоя с изменяющимся локальным коэффициентом пропускания (согласно маскирующему узору). Метод Pauly et al. (см. EP 2963464 B1, в частности фиг. 2 и абзацы [0047]-[0073]) сначала находит оптимальное отображение того, как каждый световой луч, определяемый направлением и интенсивностью в каждой точке перенаправляющей свет поверхности, должен отводиться для получения заданного распределения выходного света в заданной плоскости. Учитывая это отображение, можно найти нормальную ориентацию для каждой точки на поверхности, так что, используя закон Снеллиуса, исходящий луч пересекает назначенную выходную точку. Это приводит к целевому нормальному полю. Затем необходимо найти непрерывную поверхность, которая имеет это нормальное поле как свойство. Это поле обычно не интегрируемо: необходимо найти поверхность, максимально соответствующую этому полю, используя, например, интегрирование Пуассона или решение аналогичного нелинейного уравнения. Затем эти этапы повторяются до сходимости.

Адаптированный метод Pauly et al. включает следующие этапы, на которых:

обеспечивают исходную геометрию преломляющей или отражающей перенаправляющей свет поверхности (см. поверхность (5) фиг. 2 документа EP 2963464 B1) каустического слоя, содержащего маскирующий слой;

дискретизируют исходную перенаправляющую свет поверхность с помощью ячейки сетки, причем ячейка сетки представляет собой падающее освещение через маскирующий слой на указанной поверхности, где каждое положение x_s вершины ячейки сетки содержит входящее направление и значение интенсивности светового луча;

строят диаграмму Вороного множества сайтов S ячейки сетки на исходной перенаправляющей свет поверхности;

дискретизируют целевую поверхность с помощью ячейки сетки, при этом положения вершин ячейки сетки и направления лучей инициализируются из преломляющей или отражающей перенаправляющей свет поверхности и падающего освещения;

отслеживают траектории лучей от источника света через преломляющую или отражающую перенаправляющую свет поверхность в положениях x_S вершин ячейки сетки на приемнике (см. экран (3) приемника фиг. 2 и фиг. 7 документа EP 2963464 B1) для получения кусочно-линейного представления излучения источника E_S на приемнике, при этом каждый сайт s_i множества сайтов S на приемнике приблизительно представляет собой одинаковую величину потока Φ_i ;

определяют (см. §[0047]-[0049] документа EP 2963464 B1) целевое положение x_R на приемнике для каждого светового луча, который покидает преломляющую или отражающую перенаправляющую свет поверхность каустического слоя, так что общее распределение излучения на приемнике точно соответствует целевому излучению E_T , и определяют как каждая ячейка Вороного C_i диаграммы Вороного на перенаправляющей свет поверхности должна быть деформирована и смещена таким образом, чтобы ее поток Φ_i распределялся для соответствия целевому распределению E_T , причем определение включает (см. §[0023] и [0028] документа EP 2963464 B1):

(i) определение нормалей на перенаправляющей свет поверхности для каждой вершины ячейки сетки с использованием закона Снеллиуса из целевых положений x_R на приемнике для каждого светового луча;

(ii) перемещение вершин для наилучшего соответствия нормалям целевой поверхности при соблюдении плотностей потока Φ_i ;

повторение этапов (i) и (ii) и

после сходимости вышеуказанных итераций интегрирование нормалей на перенаправляющей свет поверхности для получения оптимизированной целевой поверхности (см. поверхность (7) фиг. 2 документа EP 2963464 B1).

Дальнейший способ изготовления рельефного узора каустического слоя, содержащего маскирующий слой, основан на методе M. Papas, W. Jarosz, W. Jacob, S. Rusinkiewicz, W. Matusik и T. Weyrich: "Goal-based Caustics", EUROGRAPHICS 2010, M.Chen и O. Deussen (Guest Editors), выпуск 30, номер 2, 2011 г. См. также патент США US 9188783 B2 этих авторов.

Эти документы раскрывают методы изготовления и производства поверхности, которая создает желаемое изображение при освещении источником света. Желаемое изображение разлагается на набор ядер Гаусса. Определяют форму линзы микропатча, соответствующую каждому ядру Гаусса, и полученные линзы микропатча собирают, чтобы сформировать очень непрерывную поверхность, которая будет отбрасывать приближение желаемого изображения, сформированного из суммы множества каустик Гаусса. Раскрытые методы можно использовать для создания конструкции перенаправляющей свет поверхности, поддающейся фрезерованию или другому производственному процессу.

В частности, в патенте US9188783B2 (см. столбец 5, строки 3-36 и фиг. 2) и в цитируемой выше статье (см. раздел 4, Gaussian Image Decomposition) объясняется, как приблизить изображения с использованием неотрицательных линейных комбинаций m анизотропных функций ядра Гаусса,

$$f(x) = \sum_{i=0}^m \frac{w_i}{2\pi \sqrt{\det \Sigma_i}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i)\right)$$

где вычисляемые параметры представляют собой весовые значения w_i , средние значения μ_i и ковариационные матрицы Σ_i двумерной m -членной смешанной модели Гаусса (GMM). В методе Papas et al. все весовые значения имеют одинаковое значение

$$w_i = \frac{1}{m}, i = 1, \dots, m.$$

Однако, при наличии маскирующего слоя весовое значение, связанное с каждым патчем, необходимо скорректировать с помощью (среднего) коэффициента пропускания маскирующего слоя для соответствующей области патча. Таким образом, если t_i обозначает средний коэффициент пропускания маскирующего слоя для области i патча, в приведенной выше линейной комбинации следует использовать изменяющееся весовое значение

$$w_i = \frac{1}{m} * t_i, i = 1, \dots, m$$

вместо единого весового значения Papas et al. С этой модификацией весового значения оставшиеся этапы метода Papas et al. такие же, как раскрыто в цитируемом патенте и статье.

Вышеуказанный предмет изобретения следует считать иллюстративным, а не ограничивающим, и он служит для лучшего понимания настоящего изобретения, определяемого независимыми пунктами формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Оптический элемент с каустическим слоем для маркировки объекта, выполненный из куска отражающего или преломляющего прозрачного или частично прозрачного первого оптического материала и имеющий перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором, отличающийся тем, что

оптический элемент содержит маскирующий слой, расположенный на оптической поверхности оптического элемента или в пределах оптического элемента, причем маскирующий слой содержит маскирующий узор и имеет изменяющийся коэффициент светопропускания, маскирующий слой способен, по меньшей мере, частично пропускать входящий свет в условиях освещения оптического элемента точечным источником света; и

рельефный узор перенаправляющей свет поверхности каустического слоя выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого оптическим элементом от точечного источника света, и формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор.

2. Оптический элемент по п.1, отличающийся тем, что в условиях освещения оптического элемента точечным источником света маскирующий слой выполнен с возможностью отображения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, причем видимое изображение отличается от проецируемого изображения.

3. Оптический элемент по любому из пп.1 и 2, отличающийся тем, что профиль глубины рельефного узора имеет неровные края, сформированные механической обработкой поверхности куска первого оптического материала согласно рассчитанному профилю рельефного узора, имеющему разрывы, причем указанные механически обработанные неровные края соответствуют разрывам.

4. Оптический элемент по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что профиль рельефного узора имеет максимальную глубину, которая меньше или равна 30 мкм.

5. Оптический элемент по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что профиль рельефного узора имеет максимальную глубину, которая меньше или равна 250 мкм.

6. Оптический элемент по любому из пп.1-5, отличающийся тем, что рельефный узор перенаправляющей свет поверхности способен перенаправлять падающий свет, принятый от источника света, на расстоянии d_s от перенаправляющей свет поверхности, и формировать проецируемое изображение, содержащее каустический узор, на поверхности стенки на расстоянии d_i от перенаправляющей свет поверхности, причем значение d_i меньше или равно 30 см, а значение соотношения d_s/d_i больше или равно 5.

7. Оптический элемент по любому из пп.1-6, отличающийся тем, что указанный элемент дополнительно содержит линзообразный элемент, примыкающий к каустическому слою и выполненный из преломляющего прозрачного или частично прозрачного второго оптического материала, причем линзообразный элемент выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого оптическим элементом от источника света, для формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор,

при этом перенаправляющая свет поверхность имеет фокусное расстояние f_c и

линзообразный элемент имеет фокусное расстояние f_L и выполнен с возможностью формирования проецируемого изображения, содержащего видимый каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, смотрящего на источник света через оптический элемент.

8. Оптический элемент по п.7, отличающийся тем, что указанный элемент содержит одно из следующего:

а) каустический слой с положительным фокусным расстоянием ($f_c > 0$) и линзообразный элемент с отрицательным фокусным расстоянием ($f_L < 0$) или

б) каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ($f_c < 0$) и линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием ($f_L > 0$).

9. Оптический элемент по п.8, отличающийся тем, что отношение между фокусным расстоянием f_L линзообразного элемента и фокусным расстоянием f_c каустического слоя удовлетворяет следующему уравнению:

$$R - \left(\frac{1}{f_L} + \frac{1}{f_c} - \frac{1}{d_s} \right)^{-1} \geq d_R,$$

где

R представляет собой расстояние от каустического слоя до глаза наблюдателя;

d_s представляет собой расстояние от источника света до оптического элемента и

d_R представляет собой комфортное для чтения расстояние от глаза, которое составляет по меньшей мере 25 см.

10. Оптический элемент по любому из пп.1-9, предназначенный для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы, акцизные марки и банкноты.

11. Способ визуальной аутентификации наблюдателем объекта, маркированного оптическим эле-

ментом по любому из пп.1-9, отличающийся тем, что способ включает этапы, на которых
 оптический элемент освещают точечным источником света;
 визуально наблюдают проецируемое изображение, содержащее видимый каустический узор, который воспроизводит эталонный узор; и
 решают, является ли объект подлинным, при оценке наблюдателем того, является ли каустический узор визуально похожим на эталонный узор.

12. Способ по п.11, отличающийся тем, что в условиях освещения оптического элемента точечным источником света маскирующий слой выполнен с возможностью отображения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, причем способ включает дополнительный этап визуального наблюдения видимого изображения, которое воспроизводит эталонное изображение, и при этом этап принятия решения о том, является ли объект подлинным, включает дополнительную верификацию наблюдателем того, что видимое изображение визуально отличается от каустического узора.

13. Способ изготовления рельефного узора перенаправляющей свет поверхности каустического слоя на оптическом элементе для маркировки объекта, выполненном из куска преломляющего прозрачного или частично прозрачного, или отражающего первого оптического материала, причем оптический элемент содержит маскирующий слой, расположенный на оптической поверхности оптического элемента или в пределах оптического элемента, маскирующий слой содержит маскирующий узор и имеет изменяющийся коэффициент светопропускания, маскирующий слой способен, по меньшей мере, частично пропускать входящий свет в условиях освещения оптического элемента точечным источником света, каустический слой способен перенаправлять падающий свет, принятый от точечного источника света, и формировать проецируемое изображение, содержащее каустический узор, отличающийся тем, что способ включает компьютеризированные этапы, на которых

обеспечивают дискретное представление входного целевого изображения эталонного узора, содержащего множество P из N пикселей изображения p_i координат $\{(x_i, y_i)\}$ в плоскости изображения, со связанными ненулевыми целевыми интенсивностями света $\{I_i\}$, $i=1, \dots, N$, распределенными в заданной области целевого изображения и соответствующими целевому каустическому узору целевого изображения;

вычисляют кусочно-линейное представление перенаправляющей свет поверхности $z = F(x, y)$ каустического слоя с высотой z выше плоскости координат (x, y) на основании представления перенаправляющей свет поверхности посредством пересекающихся кусков поверхностей $z = f_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$, полученных от стационарности длины оптического пути лучей, преломленных или отраженных каустическим слоем и сфокусированных в точках $P(i)$ плоскости изображения координат (x_i, y_i) , $i=1, \dots, N$, при этом каждый кусок поверхности $z = f_i(x, y)$ представляет собой поверхность вращения вокруг оси, проходящей через точку $P(i)$ с вершиной в точке (x_i, y_i, z_i) , высотой $z_i = f_i(x_i, y_i)$, $i=1, \dots, N$, причем кусочно-линейное представление перенаправляющей свет поверхности, связанной с соответственными значениями высот N вершин, сформировано огибающей пересечений соответствующих N кусков поверхностей $z = f_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$;

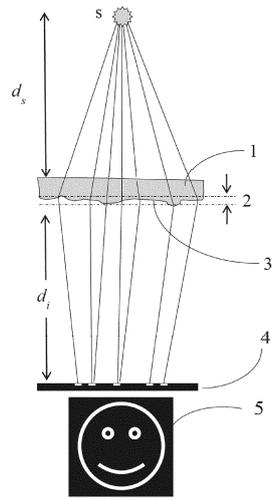
для заданного множества соответственных значений высот z_1, \dots, z_N вершин N кусков поверхностей рассчитывают соответствующее множество значений интенсивностей света $I(1), \dots, I(N)$, которые сфокусированы в точках $P(1), \dots, P(N)$ каустическим слоем, перенаправляющим падающий свет через связанную кусочно-линейную перенаправляющую свет поверхность согласно изменяющемуся коэффициенту светопропускания маскирующего узора; и

рассчитывают соответственные значения N высот z_1, \dots, z_N N вершин соответствующих N кусков поверхностей, которые минимизируют разности между соответственными значениями рассчитанных интенсивностей света $I(1), \dots, I(N)$, сфокусированных в точках $P(1), \dots, P(N)$ через связанную перенаправляющую свет поверхность, и соответственными соответствующими значениями целевых интенсивностей света I_1, \dots, I_N ,

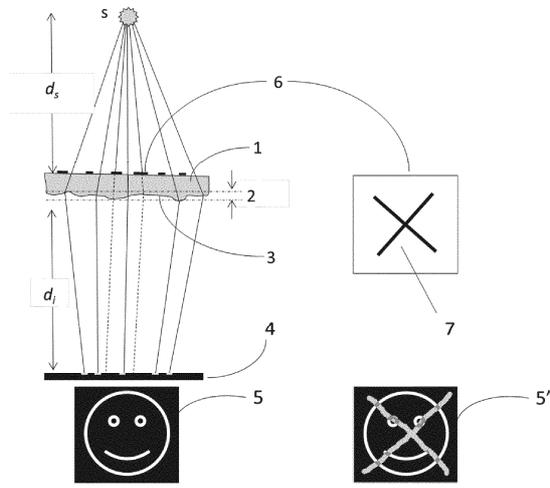
тем самым получают перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором, способным перенаправлять падающий свет, принятый от источника света оптическим элементом, содержащим маскирующий слой, и формировать проецируемое изображение, содержащее целевой каустический узор, который воспроизводит эталонный узор.

14. Способ по п.13, отличающийся тем, что каждый кусок поверхности $z=f_i(x, y)$, $i=1, \dots, N$ приближается при параксиальном приближении путем разложения в ряд Тейлора порядка k , большего или равного двум выражения куска поверхности, полученного из стационарности длины оптического пути.

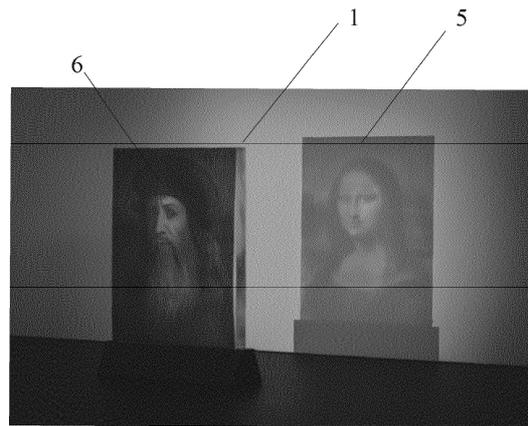
15. Способ по любому из п.13 и п.14, отличающийся тем, что изготовленную перенаправляющую свет поверхность используют для генерирования машинно-сопоставимого представления для управления инструментом для механической обработки, предназначенным для механической обработки перенаправляющей свет поверхности каустического слоя.



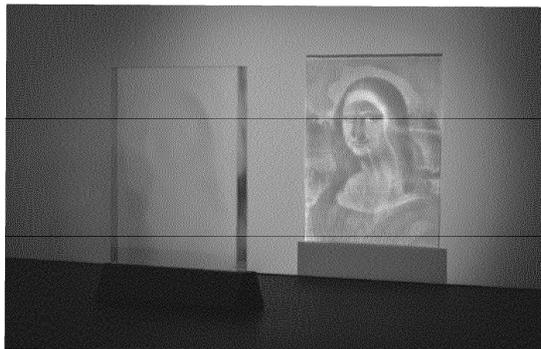
Фиг. 1



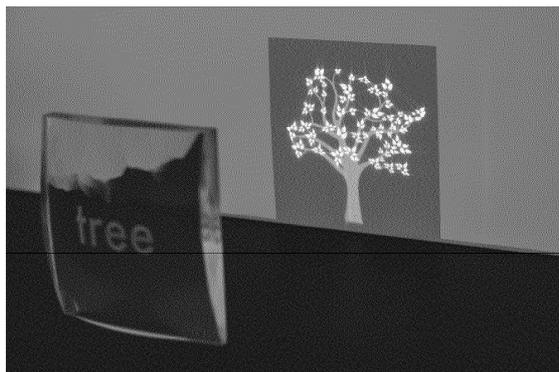
Фиг. 2



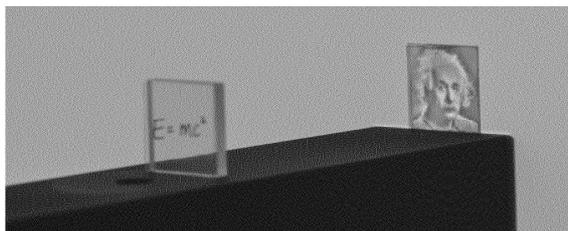
Фиг. 3А



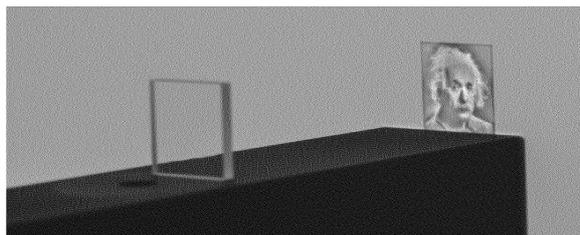
Фиг. 3В



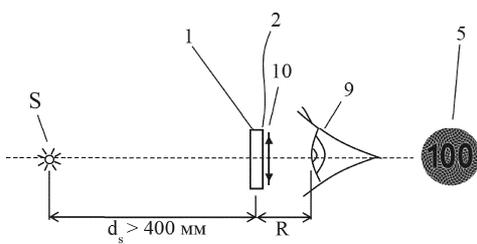
Фиг. 3С



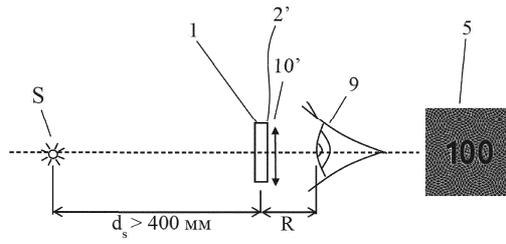
Фиг. 4А



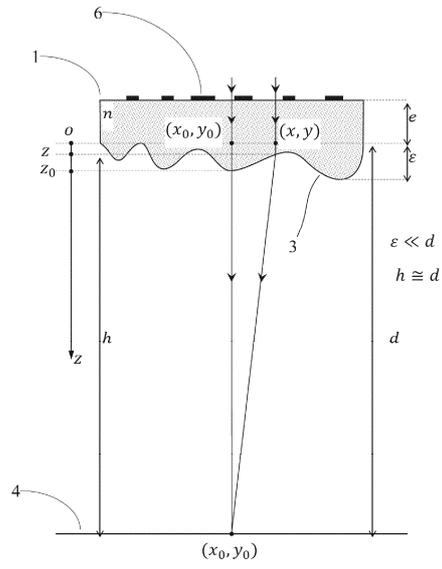
Фиг. 4В



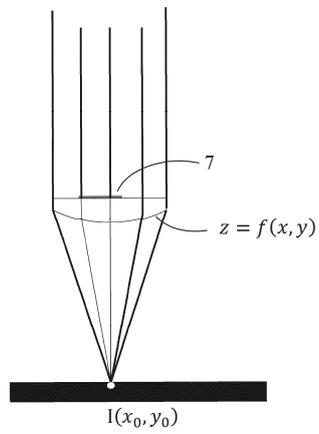
Фиг. 5



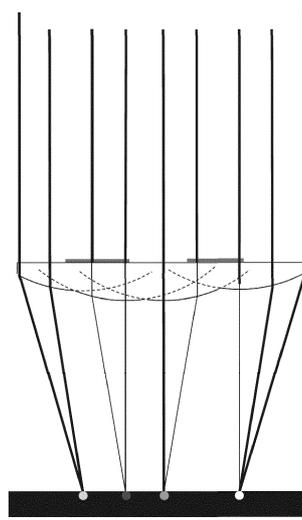
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



$I(\{x_i, y_i\})$

Фиг. 9

