

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **039835**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2022.03.18**

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

(21) Номер заявки  
**202190922**

(22) Дата подачи заявки  
**2019.10.04**

---

(54) **ОПТИЧЕСКИЕ ЗАЩИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МАРКИРОВАННЫЙ ОБЪЕКТ, СПОСОБ АУТЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТА И ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АУТЕНТИФИКАЦИИ ИЛИ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДДЕЛКИ**

---

(31) **18198945.0**

(56) AU-A4-2011101251

(32) **2018.10.05**

EP-A1-2963463

(33) **EP**

DE-A1-10108637

(43) **2021.07.31**

US-A1-2013066596

US-A1-2017255020

(86) **PCT/EP2019/076943**

(87) **WO 2020/070299 2020.04.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**СИКПА ХОЛДИНГ СА (СН)**

(72) Изобретатель:  
**Каллегари Андреа, Дего Пьер, Диноев  
Тодор, Эггер Филипп (СН)**

(74) Представитель:  
**Рыбина Н.А. (RU)**

---

(57) Раскрыт оптический защитный элемент, выполненный из преломляющего прозрачного или частично прозрачного оптического материала и содержащий оптический узел каустического слоя, имеющего перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором заданной глубины и фокусное расстояние  $f_c$ , и примыкающего линзообразного элемента с фокусным расстоянием  $f_L$ , причем оптический узел выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света через него, и формирования проецируемого изображения, содержащего каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя. Кроме того, раскрыты маркированный объект, а также способ визуальной аутентификации объекта и применение оптических защитных элементов для аутентификации или защиты от подделки.

---

**B1**

**039835**

**039835 B1**

### **Область техники, к которой относится изобретение**

Настоящее изобретение относится к области преломляющих или отражающих оптических защитных элементов, способных проецировать каустические узоры при приемлемом освещении, а также к способу и применению таких оптических защитных элементов для аутентификации или защиты от подделки.

### **Предпосылки 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 при приемлемом освещении 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, явные общеизвестные признаки могут не быть приемлемыми. 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 защитных элементов 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.

Решения для прозрачных окон банкнот описаны, например, в Guardian<sup>tm</sup> "Security Features Reference Guide", 2 выпуск, май 2013 г. Большинство раскрытых защитных признаков мешают прозрачности окна. Один из них (Eclipse®) этого не делает. Это дифракционное устройство, которое выявляет скрытое изображение, если смотреть через прозрачное окно на яркий точечный источник света.

Дифракционные защитные признаки, такие как Eclipse®, страдают рядом недостатков, включая сильную хроматическую аберрацию, необходимость в ярком источнике света и наличие дифракции нулевого порядка (т.е. остаточного света от источника) в проецируемом изображении.

Другими известными признаками являются дифракционные оптические элементы, используемые в режиме отражения или в режиме пропускания для проецирования узора на экране, 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 наблюдателя.

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.

Следовательно целью настоящего изобретения является преодоление недостатков предшествующего уровня техники и создание оптических защитных элементов, выполненных из преломляющего прозрачного или частично прозрачного оптического материала или содержащих перенаправляющую свет поверхность каустического слоя, при этом оптические защитные элементы могут быть легко аутентифицированы визуально человеком без использования каких-либо дополнительных средств (т.е. невоору-

женным глазом) или типичных и находящихся в свободном доступе средств, например, простого точечного источника света, такого как солнце, уличный фонарь, фотовспышка смартфона и т.д. (источник света считается "точечным", если его угловой размер меньше или равен  $1^\circ$ ).

Еще одной целью настоящего изобретения является создание оптического защитного элемента, который легко изготавливать в больших количествах или который совместим с процессами серийного производства. Кроме того, освещение оптического защитного элемента также должно быть возможно с помощью находящихся в свободном доступе средств (например, источника света, такого как светодиод мобильного телефона или солнце), и условия для хорошего визуального наблюдения пользователем (наблюдателем) не должны требовать слишком строгого относительного пространственного расположения источника света, оптического защитного элемента и глаз наблюдателя.

Другими словами, выполняемая пользователем (наблюдателем) манипуляция при проверке наличия защитного признака должна быть как можно более простой, а решение должно быть совместимо с самым широким диапазоном условий использования.

Еще одной целью настоящего изобретения является создание маркированного объекта, который содержит оптический защитный элемент, который имеет защитные признаки, которые могут быть легко аутентифицированы визуально человеком без использования каких-либо дополнительных средств (т.е. невооруженным глазом) или типичных и находящихся в свободном доступе средств (например, простая увеличительная линза или точечный источник, например светодиод мобильного телефона).

Еще одной целью настоящего изобретения является создание эффективного способа визуальной аутентификации объекта, маркированного оптическим защитным элементом, выполненным из преломляющего прозрачного или частично прозрачного оптического материала или содержащим отражающую перенаправляющую свет поверхность каустического слоя.

Еще одной целью настоящего изобретения является создание оптического защитного элемента для применения при аутентификации или защиты от подделки.

#### **Краткое описание изобретения**

Согласно одному аспекту настоящее изобретение относится к оптическому защитному элементу, выполненному из преломляющего прозрачного или частично прозрачного оптического материала и содержащему оптический узел каустического слоя, имеющего перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором заданной глубины и фокусное расстояние  $f_c$ , и примыкающего линзообразного элемента с фокусным расстоянием  $f_L$ , причем оптический узел выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света через него, и формирования проецируемого изображения, содержащего каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, смотрящего на точечный источник через оптический защитный элемент.

В отношении распространения света следует также отметить, что в качестве альтернативы порядок: источник  $\rightarrow$  каустический слой  $\rightarrow$  линза может быть изменен как: источник  $\rightarrow$  линза  $\rightarrow$  каустический слой (известный эквивалент в классической оптике).

Оптический защитный элемент не изменяет прозрачность прозрачного или частично прозрачного объекта или прозрачного окна, включенного в объект. Он также преимущественно упрощает манипуляцию и хорошее визуальное наблюдение со стороны пользователя (наблюдателя) при проверке наличия защитного признака и совместим с процессами серийного производства.

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.). Предпочтительно преломляющий оптический защитный элемент является прозрачным (или частично прозрачным) для видимого света (т.е. для длин волн света от приблизительно 380 нм до приблизительно 740 нм).

Оптический защитный элемент согласно настоящему изобретению 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 ( $f_L > 0$ ).

Предпочтительно отношение между фокусным расстоянием линзообразного элемента и фокусным расстоянием 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 точечного источника света до оптического защитного элемента; и

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

Положительное фокусное расстояние выбрано таким образом, чтобы быть равным или больше абсолютного значения отрицательного фокусного расстояния.

Отрицательное фокусное расстояние может составлять в диапазоне от -15 до -125 мм, и предпочтительно от -30 до -50 мм.

Например, каустический слой имеет отрицательное фокусное расстояние  $f_c$ , составляющее в диапазоне от -30 до -50 мм, и объединен с линзообразным элементом, имеющим соответствующее положительное фокусное расстояние  $f_L$ , составляющее в диапазоне от 30 до 50 мм, при этом линзообразный элемент представляет собой плоско-выпуклую линзу.

Оптический защитный элемент согласно настоящему изобретению используется для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

Согласно другому аспекту настоящее изобретение относится к оптическому защитному элементу, содержащему отражающую перенаправляющую свет поверхность оптического узла, сформированного каустическим слоем, имеющим рельефный узор заданной глубины и фокусное расстояние  $f_c$ , и примыкающим слоем оптического материала с фокусным расстоянием  $f_L$ , при этом указанный оптический узел выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света, и формирования проецируемого изображения, содержащего каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя.

Согласно настоящему изобретению оптический защитный элемент содержит одно из следующего:

- a) каустический слой с положительным фокусным расстоянием ( $f_c > 0$ ) и слой оптического материала с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_L < 0$ ), или
- b) каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_c < 0$ ) и линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием ( $f_L > 0$ ).

Предпочтительно отношение между фокусным расстоянием слоя оптического материала и фокусным расстоянием 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;

$d_s$  представляет собой расстояние от точечного источника света до оптического защитного элемента; и

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

Оптический защитный элемент согласно настоящему изобретению используется для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

Согласно еще одному аспекту настоящее изобретение относится к маркированному объекту, выбранному из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты, который содержит оптический защитный элемент с защитными признаками, которые могут быть легко аутентифицированы визуально человеком либо без использования каких-либо дополнительных средств (т.е. невооруженным глазом), либо с использованием типичных и находящихся в свободном доступе средств (например, простой общедоступный точечный источник света).

Согласно еще одному аспекту настоящее изобретение относится к способу визуальной аутентификации объекта, маркированного оптическим защитным элементом, описанным в данном документе, наблюдателем, включающему этапы, на которых:

освещают перенаправляющую свет поверхность оптического защитного элемента точечным источником света на расстоянии  $d_s$  от перенаправляющей свет поверхности;

визуально наблюдают виртуальное изображение каустического узора на расстоянии  $d_i$  от оптического защитного элемента; и

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

Согласно еще одному аспекту настоящее изобретение относится к применению оптического защитного элемента, как описано в данном документе, для аутентификации или защиты от подделки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

Далее настоящее изобретение будет описано более полно со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых одинаковые цифры представляют одинаковые элементы на разных фигурах и на которых проиллюстрированы основные аспекты и признаки настоящего изобретения.

#### Краткое описание чертежей

На фиг. 1 представлена схематическая иллюстрация оптической конфигурации оптического защитного элемента согласно одному аспекту настоящего изобретения, где каустический слой имеет положительное фокусное расстояние ( $f_c > 0$ ), а линзообразный элемент имеет отрицательное фокусное расстояние ( $f_L < 0$ ).

На фиг. 2 представлена схематическая иллюстрация оптической конфигурации оптического защит-

ного элемента согласно одному аспекту настоящего изобретения, где каустический слой имеет отрицательное фокусное расстояние ( $f_c < 0$ ), а линзообразный элемент имеет положительное фокусное расстояние ( $f_L > 0$ ).

На фиг. 3 проиллюстрирована схематическая установка, используемая для записи физических изображений согласно оптической конфигурации, проиллюстрированной на фиг. 1.

На фиг. 4 проиллюстрирована схематическая установка, используемая для записи физических изображений с использованием каустического слоя с отрицательным фокусным расстоянием, соединенного с положительной линзой.

На фиг. 5 и 6 показаны примеры изображений, полученных с помощью вышеупомянутой установки с использованием положительного каустического слоя, изготовленного для проецирования каустического изображения на поверхность на расстоянии 40 мм за оптическим защитным элементом ( $f_c = 40$  мм), соединенного с отрицательными линзообразными элементами, имеющими  $f_L = (-30)$  мм и  $f_L = (-50)$  мм соответственно.

На фиг. 7 и 8 показаны примеры изображений, полученных с помощью установки, описанной на фиг. 4, в которой используют копию с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_c = (-40)$  мм) каустического оптического элемента, используемого на фиг. 5 и 6, и соединяют с положительными линзообразными элементами, имеющими фокусные расстояния  $f_L = 40$  мм и  $f_L = 50$  мм соответственно.

На фиг. 9 показаны примеры возможных оптических защитных элементов, включающих: а) элемент с положительным каустическим слоем 2 с отдельными положительными элементарными линзами 8 с отдельной отрицательной линзообразной линзой 3, б) элемент с каустическим слоем 2 и с задней поверхностью, представляющей собой отрицательный линзообразный элемент 3, в) каустический слой 2 на поверхности отрицательного линзообразного элемента 3 (сумма обеих поверхностей).

На фиг. 10 показаны примеры возможных оптических защитных элементов, включающих: а) элемент с отрицательным каустическим слоем 2 и отдельным положительным линзообразным элементом 3, б) элемент с отрицательным каустическим слоем 2 и с задней поверхностью, представляющей собой положительный линзообразный элемент 3, в) отрицательный каустический слой 2 на поверхности положительного линзообразного элемента 3 (сумма обеих поверхностей).

На фиг. 11 и 12 проиллюстрированы оптические схемы создания изображения на сетчатке глаза с помощью группы элементарных линз каустического слоя оптического защитного элемента, при этом каустический слой с положительным фокусным расстоянием ( $f_c > 0$ ) и линзообразный элемент с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_L < 0$ ) объединены.

На фиг. 13 и 14 показаны оптические схемы создания изображения на сетчатке глаза с помощью группы элементарных линз каустического слоя оптического защитного элемента, при этом каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_c < 0$ ) и линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием ( $f_L > 0$ ) объединены.

На фиг. 15 и 16 показаны оптическая установка и смоделированные (с трассировкой лучей) изображения, создаваемые оптическим защитным элементом, имеющим положительный каустический слой с  $f_c = 40$  мм, примыкающий к отрицательной линзе с  $f_L = (-40)$  мм, и он расположен на расстоянии 25 мм от модели глаза с диаметром радужной оболочки 3 и 5 мм соответственно.

На фиг. 17 и 18 показаны смоделированные (с трассировкой лучей) изображения, создаваемые оптическим защитным элементом, имеющим отрицательный каустический слой с  $f_c = (-40)$  мм, примыкающий к положительной линзе с  $f_L = 40$  мм, и он расположен на расстояниях 25 и 40 мм соответственно от модели глаза с фиксированным диаметром радужной оболочки 3 мм.

На фиг. 19 и 20 показаны изображения, создаваемые оптическим элементом, имеющим каустический слой с  $f_c = (-40)$  мм и линзообразный элемент с  $f_L = 45$  мм, при этом каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием накладывается на линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием.

### Подробное описание

В этом описании используются несколько терминов, которые определены далее ниже.

В оптике термин "каустика" относится к огибающей световых лучей, отраженных или преломленных 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, образованный солнечными лучами на дне бассейна, представляет собой каустическое "изображение" или узор, сформированный единственной преломляющей 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.

Подложка из оптического материала, используемая для изготовления оптического (защитного) элемента, является подложкой из исходного материала, поверхность которой специально сформирована, например механически обработана так, чтобы иметь рельефный узор и, таким образом, формировать пе-

ренаправляющую свет поверхность. Форма подложки из оптического материала может также быть обработана посредством процесса копирования, такого как тиснение, формование, литье под воздействием УФ-излучения 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. Для цели настоящего изобретения, т.е. обеспечения оптического защитного элемента, способного создавать визуально распознаваемый каустический узор, прозрачный или частично прозрачный материал фактически соответствует материалу с низкой мутностью ( $H$ ) и высоким коэффициентом пропускания ( $T$ ), так что диффузия света не ухудшает формирование визуально распознаваемого каустического узора. Как правило, коэффициент пропускания  $T > 50\%$  является предпочтительным, а  $T > 90\%$  является наиболее предпочтительным. Кроме того, можно использовать низкую мутность  $H < 10\%$ , но  $H < 3\%$  является предпочтительным, а  $H < 1\%$  является наиболее предпочтительным. Подходящая подложка из оптического материала также должна вести себя правильно во время процесса формования (например, механической обработки), чтобы обеспечить гладкую и бездефектную поверхность. Примером подходящей подложки является оптически прозрачная пластина из РММА (также известна под коммерческими названиями Plexiglas, Lucite, Perspex и т.д.).

В случае отражающей перенаправляющей свет поверхности подложка из оптического материала необязательно является однородной или прозрачной. Например, материал может быть непрозрачным для видимого света (отражательную способность затем получают путем классической металлизации механически обработанной поверхности). 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.

В этом варианте осуществления термин "линзообразный элемент" может являться либо отражающим каустическим слоем (как, например, "зеркальный" слой), нанесенным на поверхность подложки, либо может являться преломляющим каустическим слоем, нанесенным на отражающую поверхность подложки (передающий элемент).

"Перенаправляющая(-ие) свет поверхность(-и)" представляет(-ют) собой поверхность (или поверхности) оптического защитного элемента, ответственную за перенаправление входящего света от источника на проекционную поверхность, где формируется каустический узор. Согласно настоящему изобретению проекционная поверхность является сетчаткой глаза наблюдателя, как будет описано в данном документе далее.

Термин "каустический узор" (или "каустическое изображение") относится к световому узору, сформированному на проекционной поверхности, когда оптическая поверхность подходящей формы (т.е. имеющая приемлемый рельефный узор) перенаправляет свет от подходящего (предпочтительно, но необязательно точечного) источника, чтобы отвести его от некоторых областей проекционной поверхности и сконцентрировать его на других областях проекционной поверхности в предварительно определенном световом узоре (т.е. таким образом формируя указанный "каустический узор"). Перенаправление относится к изменению пути световых лучей от источника при наличии оптического элемента по отношению к пути от источника к проекционной поверхности в отсутствие оптического элемента. Согласно настоящему изобретению рассматриваемая проекционная поверхность представляет собой сетчатку человеческого глаза.

В свою очередь, под изогнутой оптической поверхностью будет подразумеваться "рельефный узор", а под оптическим элементом, ограниченным этой поверхностью, будет подразумеваться оптический защитный элемент. Следует отметить, что каустический узор может быть результатом перенаправления света более чем одной изогнутой 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). Согласно предпочтительному варианту осуществления настоящего изобретения максимальная глубина рельефного узора оптического защитного элемента составляет  $< 250$  мкм или более предпочтительно  $< 30$  мкм, при этом она превышает предел, наложенный ультраточной механической обработкой (UPM) 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.

Каустические элементы, как правило, изготавливаются для проецирования светового узора на экран за элементом. Для иллюстрации концепции настоящего изобретения каустическая поверхность может быть смоделирована как совокупность небольших линзообразных элементов, т.е. "элементарных линз", совместно определяющих поверхность. Таким образом, в этой игрушечной модели каустическую поверхность можно представить как совокупность положительных элементарных линз с фокусным расстоянием, например, приблизительно 40 мм. Это расстояние, на котором каустическое изображение формируется в проекции при освещении коллимированным лучом. Фактически, защитный элемент представляет собой оптический узел каустического слоя (имеющего каустическую поверхность с рельефным узором) и передающего элемента для перенаправления падающего света. Передающий элемент может

быть линзообразным элементом (или множеством коаксиальных линзообразных элементов) или простым опорным элементом, возможно отражающим, на который нанесен каустический слой.

Для реальных примеров каустические слои используются в настоящем изобретении в объединении с соответствующими линзами (т.е. передающими элементами), чтобы получить изображение, которое формируется непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя. Эти каустические слои могут быть двух типов:

"положительные", когда они способны (взяты по отдельности) формировать реальное каустическое изображение, проецируемое на поверхность, при освещении точечным источником света;

"отрицательные", когда они способны формировать виртуальное изображение (с той же стороны от источника света).

В обоих вышеупомянутых случаях (положительные и отрицательные каустические слои) изображение обычно формируется на расстоянии ( $d_i$ ) нескольких сантиметров от оптического элемента; например на расстоянии 40 мм, когда источник бесконечно удален (т.е.  $d_s \gg d_i$ ). Это значение называется в данном документе "фокусным расстоянием" ( $f_c$ ) каустического слоя, по аналогии со случаем классической линзы. Если заданная поверхность каустического слоя проецирует реальное каустическое изображение, дополнительная поверхность будет проецировать идентичное, но виртуальное изображение, и наоборот.

Фокусное расстояние двух поверхностей также будет иметь одинаковое абсолютное значение (и противоположный знак). В приведенных ниже примерах используются как положительные, так и отрицательные каустические поверхности.

Возвращаясь к изображениям, линза (как передающий элемент) преобразует реальное изображение, проецируемое каустическим элементом, в виртуальное изображение на приемлемом для чтения расстоянии, так что изображение создается непосредственно на сетчатке глаза при просмотре образца. Изображение может представлять собой, например, логотип, картинку, номер или любую другую информацию, которая может иметь отношение к конкретному контексту.

Термины "реальное изображение" и "виртуальное изображение" используются в данном документе по аналогии с классической оптикой. Для реального изображения пучки лучей, соответствующие точкам изображения, сходятся. Для виртуального изображения (расходящиеся) пучки лучей, кажется, исходят из соответствующих точек изображения при расширении назад, но если экран расположен в месте расположения виртуального изображения, на нем не будет сформировано фактическое изображение.

Соответственно виртуальное изображение источника света называется виртуальным источником.

Для исследования большого количества оптических поверхностей, конфигураций и параметров изготовление всех соответствующих каустических слоев становится непомерно дорогостоящим, и вместо этого использовалось оптическое моделирование. Оптическое моделирование проводилось с помощью трассировки лучей с использованием коммерческой программы (Zemax). Следует подчеркнуть, что точность моделирования сопоставима с точностью, используемой для большинства приложений в оптике формирования изображений (например, при изготовлении линз камеры). Следовательно можно предположить, что результаты с высокой степенью уверенности соответствуют действительности.

Параметры, используемые для моделирования человеческого глаза, приведены в таблице ниже.

Параметры моделирования человеческого глаза

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Фокусное расстояние, $f$              | 17 мм (например, 17 мм в воздухе и 22 мм в воде)  |
| Диаметр радужной оболочки, $d_{iris}$ | 2,5–7 мм (например, 3 мм закрытой радужной оболочки и 5 мм расширенной радужной оболочки) |
| Расстояние для чтения, $d_R$          | 250 мм  |
| Угол визуализации глаза, $\theta$     | 5° (центральная ямка сетчатки глаза - точная визуализация)<br>20° (пятно сетчатки глаза)  |

На фиг. 1 показана оптическая схема оптического защитного элемента согласно одному аспекту настоящего изобретения, в которой каустический слой имеет положительное фокусное расстояние ( $J_c > 0$ ), а линзообразный элемент имеет отрицательное фокусное расстояние ( $f_L < 0$ ). Чтобы увидеть изображение глазом при освещении источником 1 света, каустический слой 2 с высотой от пика до впадины  $\Delta h = 30$  мкм и фокусным расстоянием 40 мм был объединен с вставленным рядом с ним отрицательным линзообразным элементом 3 (в проиллюстрированном на фиг. 1 варианте осуществления со стороны глаза). Как показано на фиг. 1, источник 1 света расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического слоя 2. Установку проводят перед глазом 4 на расстоянии приблизительно 20-30 мм, которое считается расстоянием  $R$  удаления выходного зрачка. Изображение 5 на сетчатке глаза также показано на фиг. 1. Лучи, выходящие из оптического защитного элемента, расходятся, и, таким образом, радужная оболочка глаза ограничивает поле зрения и видимую часть каустического изображения. Чем ближе опти-

ческий элемент к глазу, тем больше поле зрения и тем больше видимая часть каустического изображения.

На фиг. 2 показана оптическая схема оптического защитного элемента, в которой каустический слой имеет отрицательное фокусное расстояние ( $f_c < 0$ ), а линзообразный элемент имеет положительное фокусное расстояние ( $f_l > 0$ ). Каустический элемент 2' имеет поверхность, которая является отрицательной копией исходного элемента, используемого на фиг. 1, и в результате имеет отрицательное фокусное расстояние -40 мм. Он совмещен с положительным линзообразным элементом 3' и удерживается аналогично установке на фиг. 1 на расстоянии R от глаза 4. Как показано на фиг. 2, источник 1 света расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического элемента 2'. Изображение 5 создается на сетчатке глаза. Как показано на фигуре, видна большая часть каустического изображения по сравнению с изображением на фиг. 1, поскольку лучи на выходе защитного элемента сходятся, и радужная оболочка глаза отсекает меньше лучей, прежде чем они достигнут сетчатки глаза.

Схематическая установка, используемая для записи физических изображений, показана на фиг. 3. Глаз моделируется модулем 6 коммерческой камеры (uEye UI-1225LE-C-HQ), оснащенным объективом 8 с фокусным расстоянием 16 мм (Fujinon HF16A-1B) с фокусировкой 250 мм и датчиком 7 цвета VGA. Установка выбрана для получения изображений, которые напоминают то, что видит глаз. В этом случае каустический слой 2 с высотой от пика до впадины  $\Delta h = 30$  мкм (обработанный на пластине  $10 \times 10$  мм из PMMA толщиной 2 мм) и фокусным расстоянием 40 мм объединяется со вставленным рядом с ним отрицательным линзообразным элементом 3. Используемые отрицательные линзообразные элементы 3 имеют соответствующие фокусные расстояния -15, -30, -50 и -125 мм. В варианте осуществления, показанном на фиг. 3, расстояние от отрицательного линзообразного элемента 3 до объектива 8 составляет 50 мм. Источник 1 света представляет собой фотовспышку мобильного телефона, в настоящем неограничивающем варианте осуществления представляет собой светодиод телефона Samsung S3. Как показано на фиг. 3, источник 1 света расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического слоя 2.

Датчик камеры моделировал сетчатку глаза, на которой формировалось каустическое изображение. В некоторых случаях также использовалась большая апертура, чтобы максимально увеличить поле зрения. В настоящем раскрытии термин "поле зрения" означает поперечный размер видимого окна, а не его угловой размер. Также было отмечено, что при заданном расстоянии до каустического элемента приблизительно 50 мм изображение, зарегистрированное камерой, было похоже на то, что было видно невооруженным глазом в нормальных офисных условиях, если смотреть через каустический элемент на карманный фонарик, когда радужная оболочка открыта приблизительно на 3-4 мм.

На фиг. 4 показана схематическая установка, используемая для записи физических изображений. Как и на фиг. 3, глаз моделируется модулем 6 коммерческой камеры (uEye UI-1225LE-C-HQ), оснащенным объективом 8 с фокусным расстоянием 16 мм (Fujinon HF16A-1B) с фокусировкой 250 мм (диафрагма полностью открыта), и датчиком 7 цвета VGA, и источник 1 света представляет собой фотовспышку мобильного телефона (в данном неограничивающем варианте осуществления это светодиод телефона Samsung S3). Каустический слой 2' с высотой от пика до впадины  $\Delta h = 30$  мкм (полученный как копия поверхности каустического слоя, используемого на фиг. 3) и отрицательным фокусным расстоянием -40 мм объединяется со вставленным рядом с ним положительным линзообразным элементом 3'. Положительные линзообразные элементы 3' имеют соответствующие фокусные расстояния 40 и 50 мм. В варианте осуществления, показанном на фиг. 4, расстояние от отрицательного линзообразного элемента 3 до объектива 8 составляет 5 мм. Источник 1 света расположен на расстоянии по меньшей мере 400 мм от каустического слоя 2.

На фиг. 5 и фиг. 6 показаны примеры изображений, полученных с помощью вышеупомянутой установки согласно фиг. 3 с использованием отрицательных линзообразных элементов, имеющих  $f_l = (-30)$  мм и  $f_l = (-50)$  мм, соответственно, и каустических слоев с фокусными расстояниями  $f_c = 40$  мм.

В частности, на фиг. 5 изображено резкое изображение с полем зрения (FOV), которое может покрывать только 2/3 символа 100. Это то, что видно невооруженным глазом, если смотреть сквозь элемент на фотовспышку мобильного телефона.

В свою очередь, на фиг. 6 изображено, что при использовании отрицательного линзообразного элемента, имеющего  $f_l = (-50)$  мм, изображение начинает размываться, поскольку отрицательный линзообразный элемент недостаточно мощный, чтобы компенсировать положительное фокусное расстояние каустического слоя. FOV больше, чем линзообразный элемент, имеющий  $f_l = (-30)$  мм, и видна большая часть изображения. Однако изображение занимает меньшую площадь на датчике ("сетчатке"). Соответственно при увеличении фокусного расстояния поле зрения увеличивается, но степень увеличения уменьшается.

На фиг. 7 и 8 показаны примеры изображений, полученных с помощью установки, описанной на фиг. 4. Копия каустического слоя, используемая для генерирования изображений на фиг. 5 и фиг. 6, используется в данном случае как отрицательный каустический слой с фокусным расстоянием  $f_c = (-40)$  мм для генерирования изображений на фиг. 5 и 6. Положительные линзы  $f_l = 40$  мм и  $f_l = 50$  мм используются для создания виртуальных изображений, подходящих для наблюдения. В обоих случаях видимая часть каустического узора намного больше по сравнению с примерами, приведенными на фиг. 5 и 6. Это про-

исходит из-за сходящихся световых лучей за такими оптическими защитными элементами. В случае, показанном на фиг. 8, увеличение меньше, и часть кругового отсечения происходит из-за апертуры линзы 12,7 мм. В любом случае такая конфигурация позволяет полностью видеть апертуру каустического слоя размером 10×10 мм.

С целью определения соответствующих параметров и практического диапазона применимости оптических элементов функции, выполняемые каждым компонентом оптического узла, образующего оптический элемент, описываются и анализируются отдельно.

В реальном оптическом элементе эти функции могут выполняться вместе с помощью одного элемента, действующего как каустический слой, так и как передающий элемент, или по отдельности с помощью оптического узла из одного каустического слоя и одного (или более) передающего элемента, как проиллюстрировано на фиг. 9 и 10.

На фиг. 9 показаны примеры возможных оптических элементов, включающих: а) элемент с каустическим слоем 2 с элементарными линзами 9 и отдельным отрицательным (плоско-вогнутым) линзообразным элементом 3 (передающий элемент), б) элемент с каустическим слоем с элементарными линзами 9 и передающий элемент с изогнутой задней поверхностью, представляющей собой отрицательный линзообразный элемент 3, с) каустический слой с элементарными линзами 9 на изогнутой поверхности (плоско-вогнутого) отрицательного линзообразного элемента 3 (сумма обеих поверхностей).

На фиг. 10 показаны примеры возможных оптических элементов, включающих: а) элемент с отрицательным каустическим слоем 2 с элементарными линзами 9 и отдельным (плоско-выпуклым) положительным линзообразным элементом 3, б) элемент с отрицательным каустическим слоем с элементарными линзами 9 и с задней поверхностью, представляющей собой положительный линзообразный элемент 3, с) отрицательный каустический слой 2 с элементарными линзами 9 на поверхности положительного линзообразного элемента 3 (сумма обеих поверхностей). Следует отметить, что все поверхности, которые имеют прогиб (высоту кривизны) выше максимального, разрешенного внешними ограничениями (от пика до впадины, расширяющего заранее определенный максимум), можно уменьшить с помощью техники "Fresnelization".

Кроме того, в качестве удобной системы игрушечных моделей используется набор микролинз для проецирования "каустического изображения" (или "каустического узора"), состоящего из регулярного массива точек. Для объяснения принципа работы настоящего изобретения этот подход имеет несколько преимуществ по сравнению с использованием более сложной поверхности каустического слоя:

выбранная система очень проста для понимания, описания и моделирования;

она содержит наиболее важные признаки каустического слоя;

соответствующие параметры могут быть определены аналитически, и они имеют четко определенное значение (например, фокусное расстояние каустического слоя).

Изученные таким образом концепции могут быть затем напрямую перенесены на более сложный случай общей поверхности каустического слоя. В рамках этой схемы оптический элемент сочетает в себе следующие функции:

создание каустического изображения (реального или виртуального) в некотором месте в пространстве (необязательно в пределах аккомодационной способности глаза);

перенос каустического изображения в приемлемое место, чтобы глаз мог сфокусировать его на сетчатке глаза. Учитывая аккомодационную способность глаза, ретранслируемое изображение должно располагаться на расстоянии по меньшей мере 25 см от глаза. На практике оптический элемент располагается прямо перед глазом или, самое большее, на расстоянии нескольких сантиметров от него, поэтому ретранслируемое изображение формируется за оптическим элементом (виртуальное изображение);

направление лучей, формирующих изображение, таким образом, чтобы они могли проходить через зрачок, не будучи отсеченными.

Есть два основных способа выполнения первых двух функций (третья функция будет отдельно рассмотрена ниже).

Один вариант осуществления заключается в объединении каустического слоя с положительным фокусным расстоянием ( $f_c > 0$ ) и линзообразного элемента с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_l < 0$ ), см. фиг. 9 и далее фиг. 11-12, на которых изображены оптические схемы создания изображения на сетчатке глаза с помощью группы линз 3 и элементарных линз каустического слоя 2 оптического защитного элемента 10. Используя вышеупомянутую игрушечную модель для объяснения этого варианта осуществления, с помощью коллимированного светового луча 11 от источника, расположенного на большом расстоянии или бесконечности, отрицательный линзообразный элемент 3 создает виртуальное изображение 12 источника. Виртуальное изображение 12 располагается между оптическим элементом 10 и фокусной точкой линзы 3. Свет, исходящий от виртуального изображения 12, разделяется на световые поля массивом элементарных линз, и линза 14 глаза создает несколько ярких точек на сетчатке глаза, которые представляют собой несколько изображений 13 виртуального источника 12, причем каждое яркое пятно соответствует линзе из массива элементарных линз. Линза 14 глаза действует как линза Фурье, фокусируя все параллельные лучи в одной точке на сетчатке глаза. Группа ярких точек на плоскости 15 изображения сетчатки глаза формирует растр, подобный каустическому изображению.

В качестве альтернативы, положительную каустическую поверхность можно рассматривать как проектирующую реальное изображение (одна точка на элементарную линзу), которое преобразуется отрицательной линзой в виртуальное изображение на приемлемом расстоянии от глаза, обозначенного цифрой 17 на фиг. 12. Следует отметить, что оптический элемент с положительным каустическим слоем имеет диаметр поля зрения (FOV), который ограничен диаметром радужной оболочки 16. Это ограничение можно увидеть в формулах:

$$d_1 = d_{\text{iris}} \left| f_L \right| / \left( \left| f_L \right| + R \right),$$

$$d_2 = 2 \left| f_L \right| \tan(\theta/2), \text{ и}$$

$$d_{\text{FOV}} = \min(d_1, d_2).$$

где:

$d_{\text{iris}}$  представляет собой диаметр радужной оболочки;

$R$  представляет собой расстояние от каустического слоя до глаза;

$f_L$  представляет собой фокусное расстояние линзообразного элемента; и

$\theta$  представляет собой рассматриваемый угол визуализации глаза. Например, принимая во внимание только часть глаза с самым высоким разрешением (центральную ямку сетчатки)  $\theta=5^\circ$ , а также часть сетчатки с более низким разрешением,  $\theta=20^\circ$  (см. таблицу).

В предельном случае, когда  $R$  стремится к нулю,  $d_{\text{FOV}}$  является наибольшим, но никогда не превышает диаметр радужной оболочки глаза. Более того, случай с  $R=0$  мм невозможен, так как всегда должно быть некоторое расстояние от глаза до каустического слоя.

Другой вариант осуществления заключается в объединении каустического слоя с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_C < 0$ ) и линзообразного элемента с положительным фокусным расстоянием ( $f_L > 0$ ), см. фиг. 10 и далее фиг. 13 и 14, на которых изображены оптические схемы создания изображения на сетчатке глаза (плоскости 15 изображения сетчатки глаза) с помощью группы элементарных линз каустического слоя 2', объединенных с положительным линзообразным элементом 3' в оптическом элементе 10.

Как уже упомянуто, каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием ( $f_C < 0$ ) способен формировать виртуальное каустическое изображение 12 на одной и той же стороне источника света. Каждая из маленьких линз каустического слоя 2 создает виртуальный источник (виртуальное изображение источника) перед линзообразным элементом 3. Набор этих виртуальных источников представляет собой виртуальный объект, который затем отображается следующим положительным линзообразным элементом 3 для формирования виртуального каустического изображения 17, которое сам глаз отображает на сетчатке 15 глаза в виде изображения 13. Следует отметить, что фокусное расстояние положительной линзы следует выбирать равным или большим абсолютному значению фокуса элементарных линз каустики. Это позволяет создавать виртуальное каустическое изображение 17 дальше, чем минимальное расстояние  $d_R$  чтения для глаза, и предотвращает напряжение глаза для отображения лучей от сходящегося конуса света. Таким образом, формирование виртуального изображения на приемлемом расстоянии  $d_R$  облегчает аккомодацию глаза.

В данном случае часть каустического слоя, которую видит глаз, т.е. диаметр поля зрения ( $d_{\text{FOV}}$ ), определяется углом визуализации глаза  $\theta$  и диаметром радужной оболочки глаза  $d_{\text{iris}}$ , см. фиг. 13 и 14. В этом случае:

$$d_{\text{FOV}} = \min(d_1, d_2)$$

где:

$$d_1 = 2f_L \tan(\theta/2);$$

$$d_2 = d_{\text{iris}} / |R - f_L|.$$

В целом увеличение расстояния  $R$  до фокусного расстояния линзы  $f_L$  позволяет видеть большую часть оптического элемента (в отличие от случая положительного каустического слоя). Как и в предыдущем примере, рассматриваемый угол  $\theta$  визуализации глаза определяет, насколько точно будет видно каустическое изображение. Выше углового предела центральной ямки сетчатки (более  $5^\circ$ ) каустическое изображение воспринимается глазом, но с уменьшающимся разрешением.

Требование, заключающееся в том, чтобы виртуальное изображение формировалось на комфортном для чтения расстоянии  $d_R$  от глаза (обычно по меньшей мере 25 см), переводится в следующее уравнение:

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

где:

$f_L$  и  $f_C$  представляют собой фокусные расстояния линзообразного элемента и каустического слоя соответственно;

$R$  представляет собой расстояние от каустического слоя до глаза; и

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

Следует отметить, что вышеупомянутая формула является асимптотически точной для бесконечно удаленного источника света. Для конечного расстояния  $ds$  от источника правильное уравнение фактически имеет вид:

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

На практике  $ds$  достаточно велико, чтобы его можно было рассматривать на бесконечности (и следовательно  $1/d_s \approx 0$ ), так что асимптотическая формула используется в следующем обсуждении.

Как уже указывалось, не все лучи, которые, по-видимому, исходят от виртуального источника, могут проникать в зрачок и достигать сетчатки глаза, поскольку некоторые из них блокируются радужной оболочкой. Соответственно, на сетчатке глаза формируется только часть целевого изображения, а остальная часть отсекается. Какая часть изображения в конечном итоге видна, зависит от геометрии и параметров линзы, как показано на фиг. 11-14.

В частности, когда отрицательный каустический слой объединяется с положительным линзообразным элементом, огибающая пучков лучей сходится к зрачку. И наоборот, когда положительный каустический слой объединяется с отрицательным линзообразным элементом, огибающая пучков лучей расходится. Следовательно для того, чтобы была видна большая часть изображения, предпочтительно работать с отрицательным каустическим слоем в объединении с положительным линзообразным элементом.

Более конкретно, если диаметр поля зрения ( $d_{FOV}$ ) определяется как диаметр части каустического слоя, которая фактически способствует формированию изображения на сетчатке глаза, сразу можно увидеть, что:

когда положительный каустический слой объединяется с отрицательным линзообразным элементом,  $d_{FOV}$  обязательно будет меньше диаметра зрачка  $d_{iris}$ , поскольку  $d_{FOV} = d_{iris} |f_L| / (|f_L| + R)$ ;

когда отрицательный каустический слой объединяется с положительным линзообразным элементом,  $d_{FOV}$  может быть существенно больше  $d_{iris}$ , в зависимости от точной геометрии и от того, ослаблено ли ограничение, определяемое максимальным углом  $\theta$  визуализации глаза.

В случае использования положительного каустического слоя в объединении с отрицательной линзообразным элементом изображение отсекается радужной оболочкой. Для заданного фокусного расстояния каустического слоя: чем больше фокусное расстояние линзообразного элемента (в абсолютной величине,  $|f_L|$ ), тем больше часть каустического изображения, проецируемого на сетчатку глаза. Однако,  $|f_L|$  нельзя сделать произвольно большим, поскольку для  $|f_L| > f_C$  аккомодационной способности глаза уже недостаточно, чтобы сфокусировать изображение на сетчатке глаза, поскольку это не будет удовлетворять уравнению (E). Кроме того, даже при увеличении  $|f_L|$ , воспринимаемый размер изображения не изменяется. Другими словами, большая часть изображения становится видимой просто потому, что детали становятся меньше, а не потому, что рамка изображения становится больше.

На фиг. 15 и 16 показано использование оптического защитного элемента, расположенного на расстоянии 25 мм от глаза наблюдателя и построенного из положительного каустического слоя с фокусным расстоянием  $f_C = 40$  мм, связанного с отрицательным линзообразным элементом с фокусным расстоянием  $f_L = (-40)$  мм. Расходящийся свет от оптического элемента отсекается радужной оболочкой глаза диаметром  $d_{iris} = 3$  мм, как показано на фиг. 15. Видна небольшая часть всего каустического изображения. Несмотря на ограниченное поле зрения, глаз может сканировать изображение, чтобы увидеть гораздо большую часть предполагаемого каустического изображения, чтобы гарантировать аутентичность объекта.

Один из способов увеличить видимую часть каустического узора - уменьшить проходящий свет и заставить глаз открыть радужную оболочку. На фиг. 16 показана большая часть каустического узора, видимого глазом, когда радужная оболочка открыта до  $d_{iris} = 5$  мм. Изображение на сетчатке глаза, показанной в правой части, подобно изображению, которое получено камерой, как показано на фиг. 5, при этом каустический слой имеет фокусное расстояние  $f_C = 40$  мм, а отрицательный линзообразный элемент имеет фокусное расстояние  $f_L = (-30)$  мм.

Следует отметить, что в физиологически нормальных условиях глаз реагирует на свет закрытием зрачка, что приводит к конфликтной ситуации: с одной стороны, хотелось бы, чтобы на сетчатке глаза формировалось яркое изображение, и в то же время зрачок должен оставаться открытым как можно шире.

Из этих соображений очевидно, что объединение положительного каустического слоя с отрицательным линзообразным элементом можно использовать для проецирования каустического изображения на сетчатку глаза, но это не оптимально с точки зрения взаимодействия с пользователем.

В случае объединения отрицательного каустического слоя с положительным линзообразным элементом проблема отсечения может быть решена при соответствующем выборе геометрии и параметров. Поскольку в этой схеме пучки лучей сходятся к зрачку, при заданном диаметре зрачка обычно видна большая часть изображения.

Если в нормальных условиях радужная оболочка глаза считается открытой от 3 до 5 мм, то, например, каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием -40 мм и положительная линза 40 мм,

удерживаемые на расстоянии 25 мм от глаза, позволяют увидеть часть каустического элемента размером более 7,5 мм.

Предпочтительно, чтобы увидеть еще большую часть каустического слоя, можно увеличить расстояние от глаза с 25 до, например, 40 мм, как показано на фиг. 17 и 18. В общем случае отрицательного каустического элемента в объединении с положительным линзообразным элементом оптимальное расстояние от глаза приблизительно равно фокусному расстоянию положительного линзообразного элемента.

На фиг. 17 и 18 показаны смоделированные (т.е. с трассировкой лучей) изображения, создаваемые оптическим защитным элементом, имеющим отрицательный каустический слой с  $f_c = (-40)$  мм, примыкающий к положительной линзе с  $f_L = 40$  мм, и он расположен на расстояниях 25 и 40 мм соответственно от модели глаза 4 с фиксированным диаметром радужной оболочки 3 мм. На фиг. 17 в левой части фигуры показана установка, состоящая из пластины каустического слоя и отрицательного линзообразного элемента с глазом 4 наблюдателя на расстоянии 25 мм, а в правой части фигуры показано каустическое изображение, которое проецируется на сетчатку глаза наблюдателя. Наблюдаемое каустическое изображение не является полным, поскольку радужная оболочка глаза диаметром 3 мм отсекает некоторые лучи, которые перенаправляются из рельефного узора, построенного с помощью отрицательных элементарных линз и соединенного с положительной линзой, а также удерживаемого на расстоянии 25 мм от глаза. Большее расстояние от каустического элемента до глаза помогает уменьшить отсекание каустического изображения, как показано на фиг. 18. Другой способ уменьшить отсекание каустического изображения - это уменьшение интенсивности изображения за счет уменьшения пропускания каустического элемента и, таким образом, вынуждая глаз открыть радужную оболочку, скажем, на 5 мм или больше в диаметре.

В частном случае, когда расстояние от глаза до каустического слоя равно фокусному расстоянию положительного линзообразного элемента, все пучки лучей сходятся вместе и проходят через зрачок без помех.

Отношение между фокусными расстояниями линзообразного элемента и каустическим слоем должно по-прежнему удовлетворять уравнению (E), чтобы глаз мог фокусировать пучки лучей на сетчатке.

До сих пор функции, выполняемые каустическим оптическим элементом и линзой, описывались отдельно и моделировались двумя отдельными компонентами. Это удобно для понимания и объяснения (i) того, как формируется каустическое изображение, и (ii) какие есть соответствующие параметры. Однако на практике строгих требований в этом смысле нет, и две функции могут быть объединены в один "эффективный" компонент.

Если поверхность каустического слоя и поверхность линзообразного элемента объединены вместе в единую оптическую поверхность, объединенная поверхность может быть рассчитана непосредственно путем адаптации численных методов, которые используются для расчета только каустической поверхности. Однако в большинстве случаев справедливо параксиальное приближение тонких элементов. Удобно, что эта новая поверхность просто соответствует алгебраической сумме двух отдельных поверхностей. Другими словами, если поверхность линзообразного элемента, с осью  $z$  вдоль оптической оси оптического узла, задана  $z = g_L(x, y)$ , а поверхность каустического слоя -  $z = g_C(x, y)$ , то полученная в результате эквивалентная объединенная поверхность задана  $z = g_L(x, y) + g_C(x, y)$ .

Согласно настоящему изобретению каустический слой может иметь отрицательное фокусное расстояние  $f_c$ , составляющее в диапазоне от -30 до -50 мм, например  $f_c = -40$  мм, и он объединен с линзообразным элементом, имеющим положительное фокусное расстояние  $f_L$ , составляющее в диапазоне от 30 до 50 мм, например  $f_L = 45$  мм, при этом линзообразный элемент представляет собой плоско-выпуклую линзу.

На фиг. 19-20 показаны изображения, создаваемые оптическим элементом, имеющим каустический слой с  $f_c = (-40)$  мм и линзообразный элемент с  $f_L = 45$  мм, при этом каустический слой с отрицательным фокусным расстоянием накладывается на линзообразный элемент с положительным фокусным расстоянием.

В связи с этим, как показано на фиг. 19, для диаметра радужной оболочки глаза  $d_{iris} = 3$  мм поле, видимое глазом на расстоянии удаления выходного зрачка 25 мм, не соответствует полному изображению и даже не является круглым. Перемещение каустики на расстояние более 25 мм, например на 40 мм, открывает поле зрения (FOV), что улучшает качество создаваемого изображения. Это должным образом проиллюстрировано фиг. 20.

Согласно настоящему изобретению оптический защитный элемент может быть нанесен на или включен в объект, выбранный из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты, тем самым получая маркированный объект согласно настоящему изобретению.

Указанный объект может быть легко визуальным аутентифицирован наблюдателем с использованием способа визуальной аутентификации маркированного объекта, включающего этапы, на которых:

освещают перенаправляющую свет поверхность оптического защитного элемента точечным источником света на расстоянии  $d_s$  от перенаправляющей свет поверхности;

визуально наблюдают виртуальное изображение каустического узора, сформированного на расстоянии от глаза, которое больше комфортного для чтения расстояния  $d_R$  (т.е. сравнимо с аккомодационной способностью глаза); и

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

Другими словами, аутентичность оптического защитного элемента (и следовательно объекта, маркированного данным защитным элементом) может быть оценена непосредственно путем визуальной проверки степени сходства между проецируемым каустическим узором и эталонным образом.

Оптический защитный элемент согласно настоящему изобретению можно использовать для аутентификации или защиты от подделки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты. Такое использование, как правило, включает без ограничения маркировку объекта оптическим защитным элементом и визуальную аутентификацию маркированного объекта, как упомянуто выше.

Соответственно маркированный объект может быть аутентифицирован "человеком на улице" с использованием общедоступных средств. При освещении подходящим источником света изображение проецируется непосредственно на сетчатку глаза наблюдателя и не изменяет прозрачность объекта, на который оно нанесено. Преимущественно, можно работать даже со слабым источником света (например, отражением на поверхности, светодиодным индикатором и т.д.). Кроме того, изображение, проецируемое признаком, не имеет значительной хроматической аберрации и не страдает от значительных артефактов из-за остаточного рассеянного света, который не используется для формирования изображения.

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

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Оптический защитный элемент, выполненный из преломляющего прозрачного или частично прозрачного оптического материала и содержащий оптический узел, образованный формирующим каустический узор каустическим слоем, имеющим перенаправляющую свет поверхность с рельефным узором заданной глубины и фокусное расстояние  $f_C$ , и примыкающим к указанному слою линзообразным элементом с фокусным расстоянием  $f_L$ , причем оптический узел выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света через него, и формирования проецируемого изображения, содержащего каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя, смотрящего на точечный источник через оптический защитный элемент.

2. Оптический защитный элемент по п.1, содержащий 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 ( $f_L > 0$ ).

3. Оптический защитный элемент по п.2, отличающийся тем, что отношение между фокусным расстоянием линзообразного элемента и фокусным расстоянием 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 точечного источника света до оптического защитного элемента; и

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

4. Оптический защитный элемент по любому из пп.2 или 3, отличающийся тем, что положительное фокусное расстояние выбрано таким образом, чтобы быть равным или больше абсолютного значения отрицательного фокусного расстояния.

5. Оптический защитный элемент по любому из пп.2-4, отличающийся тем, что отрицательное фокусное расстояние составляет в диапазоне от -15 до -125 мм, в частности от -30 до -50 мм.

6. Оптический защитный элемент по любому из пп.2-5, отличающийся тем, что каустический слой имеет отрицательное фокусное расстояние  $f_C$ , составляющее в диапазоне от -30 до -50 мм, и объединен с линзообразным элементом, имеющим положительное фокусное расстояние  $f_L$ , составляющее в диапазоне от 30 до 50 мм, при этом линзообразный элемент представляет собой плоско-выпуклую линзу.

7. Оптический защитный элемент по любому из пп.1-6, предназначенный для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

8. Оптический защитный элемент, содержащий отражающую перенаправляющую свет поверхность

оптического узла, сформированного каустическим слоем, имеющим рельефный узор заданной глубины и фокусное расстояние  $f_c$ , и примыкающим слоем оптического материала с фокусным расстоянием  $f_L$ , при этом указанный оптический узел выполнен с возможностью перенаправления падающего света, принятого от точечного источника света, и формирования проецируемого изображения, содержащего каустический узор, непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя.

9. Оптический защитный элемент по п.8, содержащий одно из следующего:

а) каустический слой с положительным фокусным расстоянием ( $f_c > 0$ ) и слой оптического материала 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 ( $f_L > 0$ ).

10. Оптический защитный элемент по п.9, отличающийся тем, что отношение между фокусным расстоянием слоя оптического материала и фокусным расстоянием 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;

$d_s$  представляет собой расстояние от точечного источника света до оптического защитного элемента; и

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

11. Оптический защитный элемент по п.8, предназначенный для маркировки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

12. Маркированный объект, выбранный из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты, отличающийся тем, что объект содержит оптический защитный элемент по любому из пп.1-11.

13. Способ визуальной аутентификации объекта, маркированного оптическим защитным элементом по любому из пп.1-11, наблюдателем, отличающийся тем, что способ включает этапы, на которых:

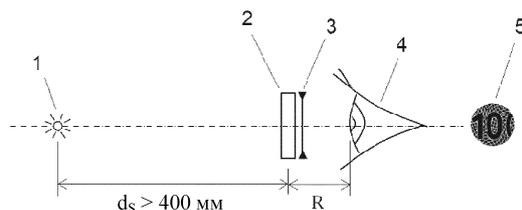
освещают перенаправляющую свет поверхность оптического защитного элемента точечным источником света на расстоянии  $d_s$  от перенаправляющей свет поверхности;

визуально наблюдают через оптический защитный элемент виртуальное изображение каустического узора на расстоянии  $d_i$  от оптического защитного элемента с

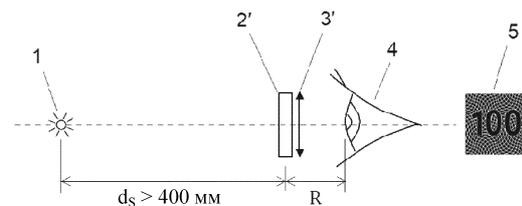
$$d_i = \left| \left( \frac{1}{f_L} + \frac{1}{f_c} - \frac{1}{d_s} \right)^{-1} \right|;$$

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

14. Применение оптического защитного элемента по любому из пп.1-11 для аутентификации или защиты от подделки объекта, выбранного из группы, включающей потребительские товары, ценные документы и банкноты.

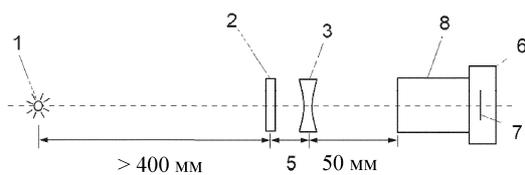


Фиг. 1

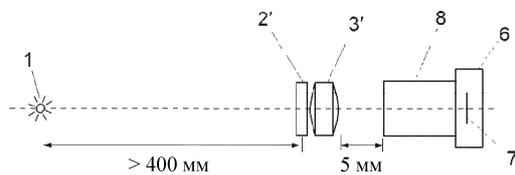


Фиг. 2

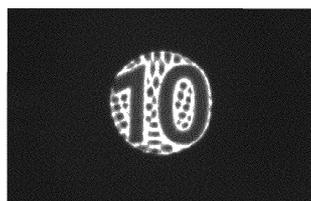
039835



Фиг. 3

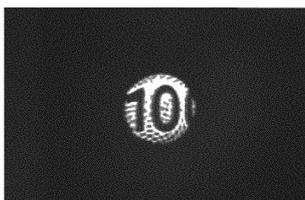


Фиг. 4



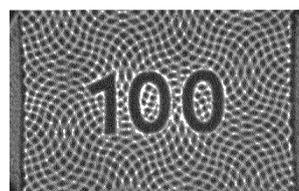
$f_C = 40 \text{ мм}, f_L = 30 \text{ мм}$

Фиг. 5



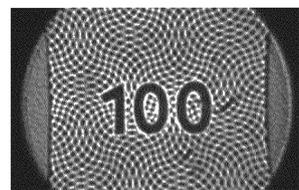
$f_C = 40 \text{ мм}, f_L = -50 \text{ мм}$

Фиг. 6



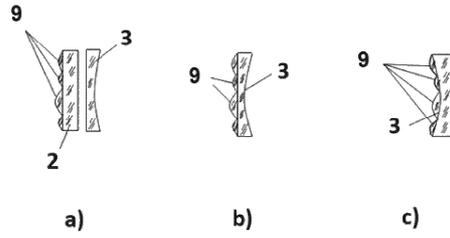
$f_C = -40 \text{ мм}, f_L = 40 \text{ мм}$

Фиг. 7

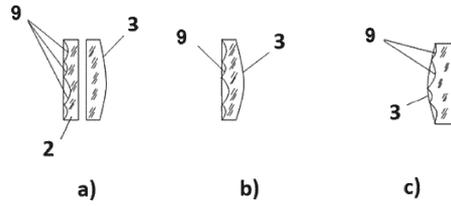


$f_C = -40 \text{ мм}, f_L = 50 \text{ мм}$

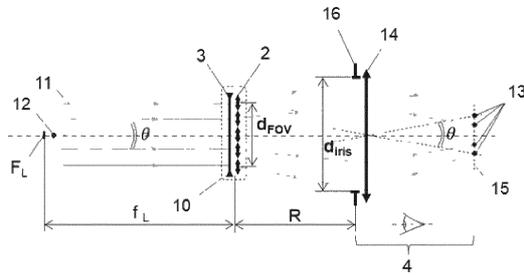
Фиг. 8



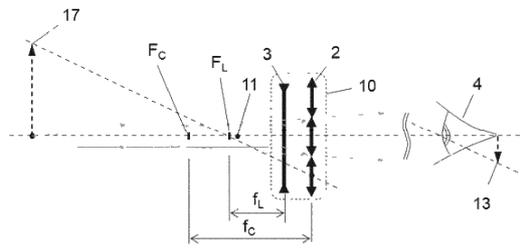
Фиг. 9



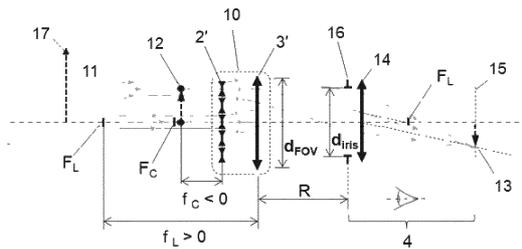
Фиг. 10



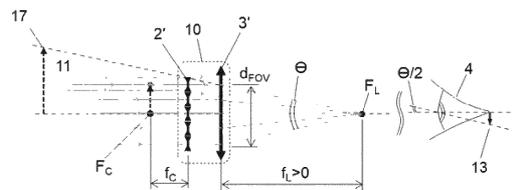
Фиг. 11



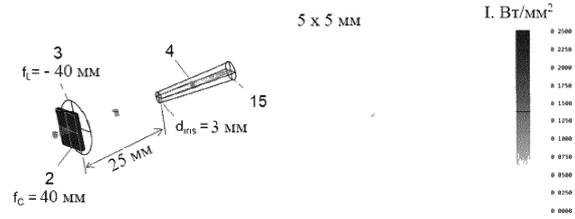
Фиг. 12



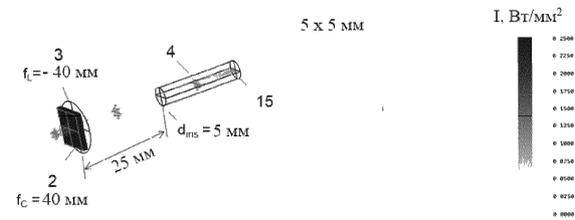
Фиг. 13



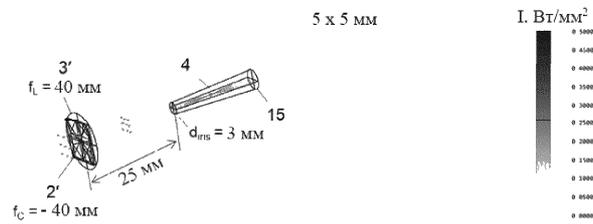
Фиг. 14



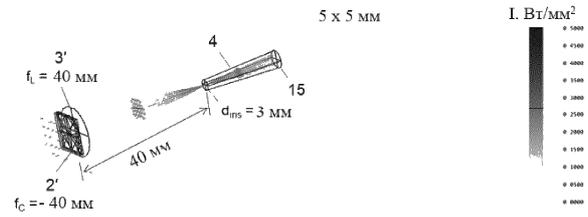
Фиг. 15



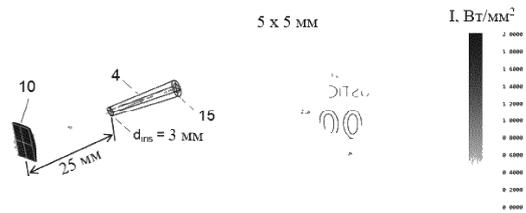
Фиг. 16



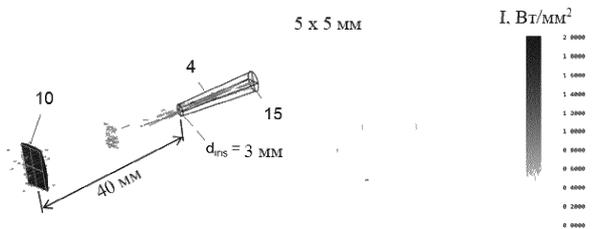
Фиг. 17



Фиг. 18



Фиг. 19



Фиг. 20

