

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** **2 866 752** (13) **C1**

(51) МПК

G01N 21/01 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 27.07.2026)
Пошлина: учтена за 5 год с 06.12.2029 по 05.12.2030. Установленный срок для уплаты пошлины за 6 год: с 06.12.2029 по 05.12.2030. При уплате пошлины за 6 год в дополнительный 6-месячный срок с 06.12.2030 по 05.06.2031 размер пошлины увеличивается на 50%.

Начисление для уплаты
пошлины за поддержание
патента в силе

(52) СПК

G01N 21/01 (2026.05)

(21)(22) Заявка: **2025134505**, 05.12.2025

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.12.2025

Дата регистрации:
22.07.2026

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **05.12.2025**

(45) Опубликовано: **22.07.2026** Бюл. № **21**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Gryga, M., Chylek, J., Ciprian, D., Pokorny, P., Fort, T., Sobota, J., & Hlubina, P. (2025). A high-performance gas sensor employing a spacer-based cavity with distributed Bragg reflectors. IEEE Sensors Journal. Sinha, R., Jana, B., Mukherjee, R., & Maji, P. S. (2023). Porous Tamm Plasmon based refractive index gas sensor using four different

Plasmon active metals. Optical and Quantum Electronics, 55(2), 183. Tabassum, R., & Gupta, B. D. (2015). Surface plasmon resonance-based fiber-optic hydrogen gas sensor utilizing palladium supported zinc oxide multilayers and their nanocomposite. Applied optics, 54(5), 1032-1040. RU 2733824 C2, 07.10.2020.

Адрес для переписки:
121205, Москва, Инновационный центр "Сколково", ул. Луговая, д. 4, к. 2, ООО "ЦИС "Сколково", Котлов Дмитрий Владимирович

(72) Автор(ы):

**Федотов Василий Александрович (RU),
Луцзян Цянь (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

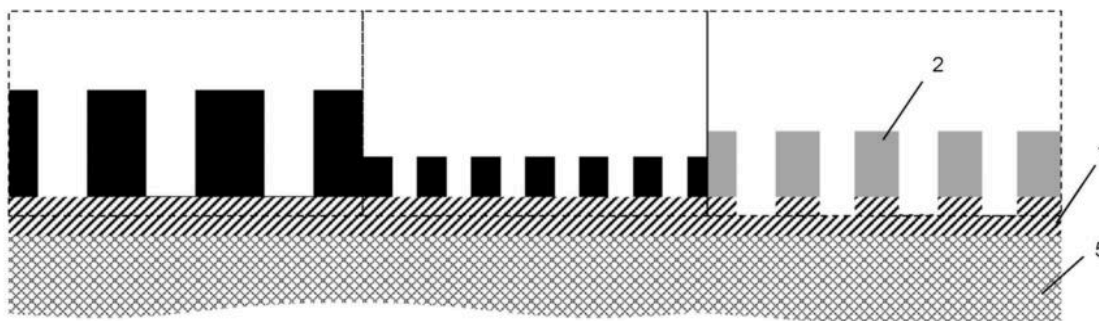
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования "Сколковский институт науки и технологий" (RU)

(54) Оптический датчик для детектирования паров и газов

(57) Реферат:

Изобретение относится к области измерений и анализа газообразных веществ, таких как пары, различные газы, в частности к оптическому датчику на основе зеркала Брэгга для детектирования паров или газов, в т.ч. дыхания человека.

Оптический датчик для детектирования паров и газов содержит Брэгговское зеркало, выполненное из N пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку. В плазмонной пленке выполнены по крайней мере две активные зоны в виде наноструктурированной области с множеством нанотверстий, имеющих наименьший размер 1-200 нм и расположенных на среднем расстоянии друг от друга 1-10 их наименьшего размера, и имеющих глубину 0,1-3 толщины плазмонной пленки. Техническим результатом является обеспечение контролируемой селективности при детектировании паров или газов в смесях. 2 н. и 21 з.п. ф-лы, 10 ил.



Фиг. 5

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Изобретение относится к области измерений и анализа газообразных веществ, таких как пары, различные газы, в частности, к оптическому датчику на основе зеркала Брэгга, совмещенного с наноструктурированной плазмонной пленкой, для детектирования (определение качественного и количественного состава) паров или газов, в частности, водяного пара, аммиака, ацетона, изопропанола и др.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Среди различных физических принципов, используемых в датчиках, таких как электронные, электрохимические, механические, акустические и магнитные, оптические методы выделяются своими уникальными и убедительными преимуществами. Оптический датчик - это устройство, которое преобразует изменения физических, химических или биологических параметров окружающей среды в измеряемые вариации одного или нескольких оптических свойств, таких как интенсивность, фаза, длина волны (или частота), состояние поляризации и т.д. Используя свет одновременно в качестве зонда и носителя информации, оптические датчики особенно хорошо подходят для широкого круга сложных задач.

Значительная часть оптических датчиков функционирует за счет регистрации изменений показателя преломления (ПП) окружающей среды, который служит косвенным измерением множества интересующих параметров среды, таких как концентрация, плотность, температура, давление, влажность и т.д. ПП - это безразмерная величина, характеризующая макроскопический электромагнитный отклик материала на свет. Изменения плотности материалов напрямую влияют на количество поляризуемых светом частиц в единице объема, а значит и на ПП. Поскольку плотность зависит от температуры и давления, ПП также является температуро- и давлением-зависимым параметром (термооптический и пьзооптический эффекты). Это позволяет использовать измерение ПП для косвенной оценки этих физических параметров, хотя при этом требуется учитывать и компенсировать их влияние при измерении изменений ПП, обусловленных изменением состава. Показатель преломления большинства материалов не является постоянным, а изменяется в зависимости от длины волны света - явление, известное как дисперсия. Оно возникает из-за того, что отклик материала (в частности, его поляризуемость) на колеблющееся электрическое поле световой волны зависит от частоты. Эта зависимость особенно выражена вблизи электронных или колебательных резонансов поглощения материала. Для поглощающих сред показатель преломления описывается комплексным числом $\vec{n} = n - ik$, где n - действительная часть (характеризует фазовую задержку), а k - мнимая часть (коэффициент экстинкции, определяющий потери на поглощение). Оба параметра пик зависят от длины волны. Оптические датчики, работающие по принципу измерения изменений поглощения, напрямую регистрируют k , тогда как устройства, основанные на фазовых сдвигах или смещениях резонанса, в основном чувствительны к изменениям n .

Хотя ПП можно использовать для обнаружения известного вещества или изменений его концентрации, плотности, температуры, давления и т.п., он не позволяет надежно различать разные вещества. Это связано с тем, что многие

химически различные вещества могут иметь одинаковый или почти одинаковый ПП, по крайней мере в видимом и ближнем ИК диапазонах, где отсутствуют электронные и вибронные переходы. Таким образом, датчик ПП может зафиксировать появление вещества или изменение его физических характеристик (если вещество уже контактирует с датчиком), но не способен определить, какое именно вещество взаимодействовало с активной областью датчика (если потенциальных вариантов несколько).

Наиболее распространенный подход к приданию оптическому датчику (и, на самом деле - многим другим типам датчиков) селективности заключается в функционализации его активной области химическими веществами, которые либо химически связываются с целевым веществом, либо даже образуют с ним новое химическое соединение. Основным недостатком этого подхода является сложность восстановления активной области датчика для следующего измерения после ее воздействия с исследуемым веществом. Поскольку в данном случае задействованы химические связи или реакции, восстановление активной области либо невозможно (вследствие необратимой химической реакции), либо требует значительного нагрева активной области для диссоциации образовавшегося соединения. Последнее создает серьезную нагрузку на конструкцию датчика и не гарантирует полной диссоциации, что существенно ограничивает воспроизводимость, срок службы и надежность таких датчиков.

Использование химической функционализации для придания селективности, однако, можно избежать в одном важном случае - при детектировании паров и газов. В этом случае целевое вещество может селективно адсорбироваться активной областью датчика посредством капиллярной конденсации, которая обеспечивается наноструктурированием поверхности активной области.

Из уровня техники известен оптический датчик, содержащий пористый гирофильный слой субмикронных частиц оксида кремния, расположенный на одномерном фотонном кристалле из диэлектрических слоев $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ (Valeriy Zaytsev Timur I. Ermatov, Fedor S Fedorov, Nikita Balabin, Pavel O. Kapralov, Julia V. Bondareva, Daria O. Ignatyeva, Boris N. Khlebtsov, Sergey S. Kosolobov, Vladimir I. Belotelov, Albert G. Nasibulin and Dmitry A. Gorin*, Design of an Artificial Opal/Photonic Crystal Interface for Alcohol Intoxication Assessment: Capillary Condensation in Pores and Photonic Materials Work Together, Analytical Chemistry, том 15, номер 36, 26 августа 2022, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.analchem.2c00573>).

Недостатком раскрытого выше технического решения является трудно контролируемая селективность паров и сложность при опросе сенсора.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Задачей заявленного изобретения является разработка оптического датчика для определения качественного и количественного состава паров/газов с контролируемой селективностью путем вовлечения капиллярной конденсации последних на массиве нанотверстий, сделанных в тонкой плазмонной пленке.

Техническим результатом изобретения является обеспечение контролируемой, селективности при детектировании паров/газов.

Указанный технический результат достигается за счет того, что оптический датчик для детектирования паров и газов содержит Брэгговское зеркало, выполненное из N-пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку, при этом в плазмонной пленке выполнены по крайней мере две активные зоны в виде наноструктурированной области с множеством нанотверстий, имеющих наименьший размер 1-200 нм и расположенных на среднем расстоянии друг от друга 1-10 их наименьшего размера и имеющих глубину 0,1-3 толщины плазмонной пленки.

Брэгговское зеркало может быть нанесено на подложку.

Плазмонная пленка выполнена из металла, выбранного из группы: золото, серебро, медь, алюминий, сплавов указанных металлов самих с собой или с другими металлами, проводящих оксидов и нитридов переходных металлов.

Толщина плазмонной пленки составляет 3-500 нм.

Ширина наноструктурированных областей выполнена 0,001-1 ширины Брэгговского зеркала, длина наноструктурированных областей выполнена 0,001-1 длины Брэгговского зеркала.

Плазмонная пленка в смежных наноструктурированных областях может быть выполнена из разных или одинаковых материалов.

Плазмонная пленка в смежных наноструктурированных областях может иметь одинаковую или разную толщину.

При необходимости, между плазмонной пленкой и Брэгговским зеркалом нанесен слой непоглощающего или слабо поглощающего материала толщиной 0,1-2 толщины плазмонной пленки.

В смежных наноструктурированных областях наноотверстия могут быть выполнены одинаковой или разной формы, выбранной из группы: щелевидной, круглой, овальной, прямоугольной, крестовидной формы и/или одинаковой или разной глубины и/или одинакового или разного наименьшего размера и/или имеют периодичное и/или квазипериодичное и/или хаотичное расположение относительно друг друга.

Наноотверстия щелевидной, овальной, прямоугольной, крестообразной формы могут быть выполнены разной и/или одинаковой длины.

В одной и той же наноструктурированной области наноотверстия могут быть выполнены одинаковой или разной формы, выбранной из группы: щелевидной, круглой, овальной формы и/или одинаковой или разной глубины и/или одинакового или разного наименьшего размера и/или имеют периодичное и/или квазипериодичное и/или хаотичное расположение относительно друг друга.

Наноотверстия щелевидной, овальной, прямоугольной, крестообразной формы могут быть выполнены разной /или одинаковой длины.

По крайней мере в одной активной зоне могут быть расположены зондовые электроды для радиочастотных измерений импеданса конденсата.

Указанный технический результат достигается также за счет того, что способ детектирования паров и газов с использованием оптического датчика, содержащего Брэгговское зеркало, выполненное из N-пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку, при этом в плазмонной пленке выполнены по крайней мере две активные зоны в виде наноструктурированной области с множеством наноотверстий, включает следующие этапы:

а) Взаимодействие по крайней мере двух активных областей оптического датчика со средой детектируемой смеси газа и/или пара, с последующей селективной капиллярной конденсацией каждого газа и/или пара из смеси в наноотверстиях соответствующих активных зон оптического датчика;

б) Освещение по крайней мере двух активных зон оптического датчика с сконденсированным в наноотверстиях газом и/или паром источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса Таммовского плазмона и центром, расположенный в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в каждой активной зоне оптического датчика с помощью системы оптического анализа, и регистрацией резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика, соответствующего Таммовскому плазмону.

с) Определение количественного и качественного состава смеси газов и/или паров на основании величины сдвига резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика между зарегистрированным резонансом в спектральном отклике и реперным резонансом в спектральном отклике.

Реперный резонанс в спектральном отклике получают либо на этапе калибровки датчика в замкнутой среде, либо в ходе измерений при предварительном нагреве активной области датчика с последующим освещением по крайней мере одной активной зоны оптического датчика тем же источником света, что используется и при опросе датчика в процессе детектирования паров/газов, с последующим измерением спектрального отклика в активной зоне оптического датчика с помощью системы оптического анализа, и регистрацией резонанса в спектральном отклике, соответствующего Таммовскому плазмону.

Реперный резонанс в спектральном отклике получают при освещении неструктурированной области плазмонной пленки оптического датчика источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса Таммовского плазмона и центром, расположенный в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в неструктурированной области оптического датчика с помощью системы оптического анализа, и регистрацией реперного резонанса в спектральном отклике неструктурированной области оптического датчика, соответствующего Таммовскому плазмону.

Активные зоны датчика освещаются источником света по нормали к активной зоне датчика или под углом не более 90° к нормали. При этом источник света размещен со стороны плазмонной пленки, и луч света напрямую освещает активную зону датчика, или со стороны Брегговского зеркала, и луч света, проходя Брэгговское зеркало, освещает активную зону датчика.

Используют широкополосный источник света с системой оптического анализа в виде анализатора спектра или узкополосный источник света с системой оптического анализа в виде фотоприемника, при этом узкополосный источник света выполнен с длиной волны, перестраиваемой в пределах ширины резонанса Таммовского плазмона или с фиксированной длиной волны, изначально совпадающей с положением резонанса Таммовского плазмона.

Спектральный отклик представляет собой спектр поглощения, спектр пропускания или спектр отражения.

При необходимости, в процессе капиллярной конденсации осуществляют нагрев по крайней мере одной активной зоны оптического датчика.

При необходимости, в процессе капиллярной конденсации осуществляют охлаждение по крайней мере одной активной зоны оптического датчика.

Источник света и/или система оптического анализа могут быть встроены в датчик или расположены на удалении от активной зоны датчика.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Изобретение будет более понятным из описания, не имеющего ограничительного характера и приводимого со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых изображено:

Фиг. 1 - структура заявленного датчика. 1 - Брэгговское зеркало; 2 – плазмонная пленка

Фиг. 2 - заявленный датчик, состоящий из двух активных областей различной площади (вид сверху). 3 - наноструктурированная область; 4 - неструктурированная область

Фиг. 3 - Формы заявленных nanoотверстий: а)-с) четырехугольные формы; d)-e) четырехугольные формы со скругленными углами; f) треугольные формы; g) треугольные формы со скругленными углами; h) круглые формы; i) овальные формы; k)-m) крестообразные формы.

Фиг. 4 - Формы заявленных nanoотверстий: а) кольцообразные формы; b)-f) кольцообразной формы с одним или более разрывами; g) в форме четырехугольной рамки; h) в форме треугольной рамки.

Фиг. 5 - Структура заявленного датчика, с тремя активными областями в виде nanoщелей (слева на право): активная область 1 имеет самую большую толщину плазмонной пленки, глубина nanoщели соответствует толщине плазмонной пленки; активная область 2 имеет самую маленькую толщину плазмонной пленки, глубина nanoщели соответствует толщине плазмонной пленки; активная область 3 имеет толщину плазмонной пленки, имеющее значение в диапазоне между активными областями 1 и 2, глубина nanoщели больше толщины плазмонной пленки (nanoщель выполнена и в части материала Брэгговского зеркала). Черная и серая заливка плазмонной пленки показывает различный материал в смежных наноструктурированных областях (например, золото и серебро), из которой изготовлена пленка.

Фиг. 6 - Структура заявленного датчика, с тремя активными областями в виде nanoщелей с одинаковой толщиной плазмонной пленки в каждой области (слева на право): активная область 1 имеет глубину nanoщели больше толщины плазмонной пленки (nanoщель выполнена и в части материала Брэгговского зеркала); активная область 2 имеет глубину nanoщели меньше толщины плазмонной пленки; активная область 3 имеет глубину nanoщели, соответствующую толщине плазмонной пленки. Черная и серая заливка плазмонной пленки показывает различный материал в смежных наноструктурированных областях (например, золото и серебро), из которой изготовлена пленка.

Фиг. 7 - Зависимость длины волны резонанса Таммовского плазмона от величины показателя преломления конденсата, рассчитанная для четырех разных решеток из nanoщелей. Решетки сделаны в золотой пленке с толщиной 50 нм. Пленка нанесена на поверхность Брэгговского зеркала, состоящего из 11 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ с толщинами 159 нм/246 нм. Параметры nanoщелей (ширина:период:глубина, нм): черная кривая - 40:300:50; зеленая кривая - 83:430:66; синяя кривая - 75:427:76; красная кривая - 56:373:61.

Фиг. 8 - Спектры отражения активной области датчика, содержащей решетку из nanoщелей, которые рассчитаны для четырех разных величин показателя преломления конденсата, n . Параметры nanoщели: (ширина:период:глубина, нм)= (56:373:61). Решетка сделана в золотой пленке с толщиной 50 нм. Пленка нанесена на поверхность Брэгговского зеркала, состоящего из 11 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ с толщинами 159 нм/246 нм.

Фиг. 9 - Изменение спектра отражения активной области, содержащей решетку нанощелей с указанными ниже параметрами, при конденсации паров указанных ниже веществ. Решетки сделаны в золотой пленке с толщиной 50 нм. Пленка нанесена на поверхность Брэгговского зеркала, состоящего из 11 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ с толщинами 159 нм/246 нм. Кривая в виде пунктирной линии - реперный спектр; черная кривая - спектр с конденсатом, образованным в нанощелях при конденсации следующих веществ: а) аммиак, параметры нанощели: (ширина:период:глубина, мм)=(40:300:50); б) ацетон, параметры нанощели: (ширина:период:глубина, мм)=(56:373:61).

Фиг. 10 - Изменение спектра отражения активной области, содержащей решетку нанощелей с указанными ниже параметрами, при конденсации паров указанных ниже веществ. Решетки сделаны в золотой пленке с толщиной 50 нм. Пленка нанесена на поверхность Брэгговского зеркала, состоящего из 11 пар слоев $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ с толщинами 159 нм/246 нм. Кривая в виде пунктирной линии - реперный спектр; черная кривая - спектр с конденсатом, образованным в нанощелях при конденсации следующих веществ: а) изопропанол, параметры нанощели: (ширина:период:глубина, мм)=(75:427:76); б) вода, параметры нанощели: (ширина:период:глубина, мм)=(83:430:66).

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Оптический датчик для детектирования паров/газов содержит Брэгговское зеркало 1, выполненное из N-пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку 2, при этом в плазмонной пленке выполнены по крайней мере две наноструктурированные области 3 с множеством нанотверстий, имеющих наименьший размер 1-200 нм, расположенных на среднем расстоянии (период) друг от друга 1-10 их ширины и имеющих глубину 0,1-3 толщины плазмонной пленки.

Средние расстояния между нанотверстиями могут быть не только регулярными в пределах одной и той же наноструктурированной сенсорной области датчика, при условии, что среднее расстояние будет меньше рабочей длины волны облучающего света (т.е. нанотверстия могут быть расположены не только периодически, но и квазипериодично и даже хаотично, при условии что среднее расстояние между нанотверстиями выдержано в заданных пределах).

Количество слоев, а также их толщина и ПП Брэгговского зеркала определяются спектром источника света. Структура такого Брэгговского зеркала может быть легко подобрана для работы в видимой, ближней или средней ИК областях спектра, и без труда изготовлена с использованием известных методов осаждения тонких пленок.

В качестве диэлектрического слоя с высоким ПП используют пентаоксид ниобия, пентаоксид тантала, диоксид титана и другие известные материалы, применяемые в Брэгговском зеркале.

В качестве диэлектрического слоя с низким ПП используют диоксид кремния, оксид алюминия, фторид магния и другие известные материалы, применяемые в Брэгговском зеркале.

В качестве полупроводникового слоя с высоким ПП используют кремний, арсенид галлия, фосфат индия и другие известные материалы, применяемые в Брэгговском зеркале.

В качестве полупроводникового слоя с низким ПП используют пористый кремний, карбид кремния, арсенид алюминия и другие известные материалы, применяемые в Брэгговском зеркале.

Нанотверстия в наноструктурированной области, являющейся активной зоной оптического датчика, выполнены любой формы: круглые, щелевидные и др., в т.ч. формы раскрытые на фиг. 3-4. Нанотверстия могут быть выполнены глубиной меньше или равной толщине плазмонной пленки, либо глубиной больше толщины плазмонной пленки так, что проникают в прилегающий слой Брэгговского зеркала. Количество наноструктурированных областей задается числом компонентов в смеси паров/газов, которые подлежат детектированию, но может быть и больше, чем количество детектируемых компонентов паров/газов. Наноструктурированная область выполнена из нанотверстий, формирующие параметры наноструктурирования: различный наноузор с разными расстояниями между смежными отверстиями, в частности периодичное, квазипериодичное и хаотичное расположение нанотверстий (при условии, что среднее расстояние будет меньше рабочей длины волны облучающего света), расположены в ряд или в любой другой ориентации, имеют разную форму и размеры.

Наименьший размер одного нанотверстия в наноструктурированной области составляет 1-200 нм. Под наименьшим размером для нанотверстий в форме овала

(фиг. 3h) подразумевается малая ось эллипса; для нанодоверстий в форме круга (фиг. 3i) подразумевается диаметр; для нанодоверстий в форме треугольника (фиг. 3f-g) подразумевается длина малой стороны; для нанодоверстий в форме, раскрытых на фиг. 1a-e, k-m, фиг. 4, подразумевается ширина.

В одной и той же наноструктурированной области или в смежных областях нанодоверстия могут быть выполнены одинаковой или разной формы, выбранной из группы: щелевидной, круглой, овальной, прямоугольной, крестообразной формы и/или одинаковой или разной глубины и/или одинакового или разного наименьшего размера и/или имеют периодическое и/или квазипериодическое и/или хаотичное расположение относительно друг друга.

Нанодоверстия щелевидной, овальной, прямоугольной, крестообразной формы могут быть выполнены разной и/или одинаковой длины.

Разные наноструктурированные области, отличающиеся параметрами наноструктурирования, материалом, толщиной или габаритными размерами, детектируют разные компоненты смеси паров/газов.

Нанодоверстия одинаковой формы, но разной длины и/или ориентации могут быть скомбинированы в пределах одной и той же наноструктурированной сенсорной области датчика.

Нанодоверстия могут быть заменены или дополнены нанодоверстиями других форм и/или глубины в пределах одной и той же наноструктурированной сенсорной области датчика.

Брэгговское зеркало нанесено на подложку 5, например, плавленый кварц, стекло, сапфир и другие известные из данной области подложки.

Плазменная пленка выполнена из металла, выбранного из группы: золото, серебро, медь, алюминий, сплавы указанных металлов между собой, а также их сплавы с бивалентными металлами, например, кадмием, цинком, палладием, проводящие оксиды и нитриды переходных металлов, например, оксид индия-олова, оксид алюминия-цинка, оксид галлия-цинка, нитрид циркония, нитрид титана.

Толщина плазменной пленки составляет 3-500 нм и выбирается с учетом оптических характеристик Брэгговского зеркала, параметров источника излучения и свойств детектируемого газа или пара, обеспечивая резонансное взаимодействие с излучением.

Ширина наноструктурированной области выполнена 0,001-1 ширины (ширина поверхности, на которое нанесена наноструктурированная область) Брэгговского зеркала, длина наноструктурированной области выполнена 0,001-1 длины (длины поверхности, на которое нанесена наноструктурированная область) Брэгговского зеркала. Разная ширина и длина наноструктурированной области позволяет создать активную область датчика, состоящую из наноструктурированной области 3 и неструктурированной области 4. Смежные наноструктурированные области могут иметь одинаковый или различный наноузор, определяемый на основе одинаковой или разной формы нанодоверстий; одинаковой или разной ширины области; одинаковой или разной длины области; одинакового или разного наименьшего размера нанодоверстий; одинаковой или разной глубины нанодоверстий; одинакового или разного среднего расстояния между нанодоверстиями.

Плазменная пленка в смежных наноструктурированных областях выполнена из разных или одинаковых материалов, например, одна область выполнена из золота, а другая - из меди, либо обе области выполнены из золота.

Плазменная пленка в смежных наноструктурированных областях имеет одинаковую или разную толщину, например в одной области пленка имеет толщину 10 нм, а в другой - 20 нм, либо две области имеют одинаковую толщину пленки 20 нм.

Нанодоверстия в смежных наноструктурированных областях имеют одинаковую или разную глубину, например в одной области нанодоверстия имеют глубину 5 нм, а в другой - 13 нм (либо нанодоверстия в обеих областях имеют одинаковую глубину 10 нм), при толщине плазменной пленки 10 нм.

По крайней мере в одной активной зоне могут быть расположены зондовые электроды для радиочастотных измерений импеданса конденсата.

Между плазменной пленкой и Брэгговским зеркалом может быть нанесен слой непоглощающего или слабо поглощающего материала толщиной 0,1-2 толщины плазменной пленки для подстройки рабочей длины волны датчика и/или обеспечения свето-индуцированного нагрева. В качестве непоглощающего или слабо поглощающего слоя используют те же материалы, что и в Брэгговском зеркале или другие известные материалы, которые можно нанести на поверхность зеркала тонким однородным ровным слоем.

Заявленный датчик изготавливают следующим образом. На первом этапе формируют структуру Брэгговского зеркала, например, путем осаждения N-пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления. В заявленном датчике можно использовать уже готовое Брэгговское зеркало, содержащее требуемое количество чередующихся слоев с требуемой разницей в их ПП. Далее на поверхности Брэгговского зеркала формируют плазмонную пленку, например путем осаждения. При необходимости Брэгговское зеркало может быть расположено на подложке.

Работа заявленного датчика основана на капиллярной конденсации компонентов паров/газов в массиве наноотверстий сделанных в тонкой плазмонной пленке, с последующим детектированием конденсата оптически через спектральный сдвиг резонанса так-называемого плазмона Тамма.

Условия для капиллярной конденсации определяются наименьшим размером наноотверстий. Формирование вдоль активной области датчика наноотверстий с различными наименьшими размерами обеспечивает конденсацию различных паров/газов в разных, заранее определенных областях на чипе датчика, отличающихся размерами наноотверстий.

Плазмон Тамма легко возбуждается в широком диапазоне углов падения (включая нормальное падение) в одномерном фотонном кристалле (т.е. Брэгговское зеркало), покрытого наноструктурированной плазмонной пленкой. Более конкретно, плазмон Тамма соответствует оптической моде, запертой на границе, раздела между плазмонной пленкой и Брэгговским зеркалом, и проявляется как очень узкий резонанс в спектральном отклике полученной гибридной металлodieлектрической оптической структуры. Возбуждение Таммовских плазмонов на одной и той же длине волны и с одинаковой чувствительностью к изменениям ПП в наноструктурированных сенсорных областях датчика, предназначенных для конденсации разных паров/газов, обеспечивается за счет подбора расстояния между наноотверстиями и их глубины, в т.ч. когда наноотверстия делаются глубже толщины плазмонной пленки, уходя в примыкающий слой Брэгговского зеркала.

Способ детектирования паров и газов с использованием оптического датчика осуществляют следующим образом.

Перед проведением измерений необходимо подготовить датчик к новому измерению и определить реперный спектральный отклик. Датчик подготавливается путем нагрева его активной области для удаления конденсата. Реперный спектральный отклик датчика либо уже предварительно измерен в замкнутой среде на этапе калибровки датчика и находится в памяти устройства, либо измеряется путем освещения специальной калибровочной области датчика со сплошной (неструктурированной) плазмонной пленкой, толщина которой подобрана так, чтобы давать реперный резонанс (резонанс у сплошной плазмонной пленки абсолютно не чувствителен к изменениям окружающей среды), либо путем освещения по крайней мере одной активной зоны оптического датчика после удаления там конденсата, тем же источником света, что используется и при опросе датчика в процессе детектирования паров/газов, с последующим измерением спектрального отклика в активной зоне оптического датчика, и регистрацией реперного резонанса в спектральном отклике, соответствующему Таммовскому плазмону.

Далее оптическому датчику позволяют остыть и помещают в среду детектируемой смеси газа и/или пара (если до этого он находился в замкнутой среде), в результате чего происходит взаимодействие по крайней мере двух активных областей оптического датчика со средой детектируемой смеси газа и/или пара, с последующей селективной капиллярной конденсацией каждого газа и/или пара из смеси в наноотверстиях в соответствующих активных зонах оптического датчика.

Далее осуществляют освещение по крайней мере двух активных зон оптического датчика со сконденсированным в наноотверстиях газом и/или паром источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса Таммовского плазмона и центром, расположенный в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в каждой активной зоне оптического датчика с помощью анализатора спектра, и регистрацией резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика, соответствующего Таммовскому плазмону.

На последнем этапе определяют количественный и качественный состав смеси газов и/или паров на основании величины сдвига резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика между зарегистрированными резонансом в спектральном отклике и реперным резонансом в спектральном отклике.

Активные зоны датчика освещаются источником света по нормали к активной зоне датчика или под углом не более 90° .

Спектральный отклик представляет собой спектр поглощения, спектр пропускания или спектр отражения.

При освещении активных зон оптического датчика используют широкополосный или узкополосный источник света с длиной волны, перестраиваемой в пределах ширины резонанса Таммовского плазмона или с фиксированной длиной волны, изначально совпадающей с положением резонанса Таммовского плазмона.

Как видно из фиг. 7-10 определенная длина волны резонанса в спектральном отклике (например, спектр отражения) соответствует определенному показателю преломления конденсата, следовательно, селективность датчика при определении количественного и качественного состава газа построена на определении факта сдвига резонанса в спектральном отклике активных зон (например, спектр отражения), что позволяет определить качественный состав, и на определении величины сдвига измеренного резонанса по отношению к реперному резонансу в спектральном отклике (например, спектр отражения), определяющей количественный состав.

Спектральная полоса источника света должна быть не меньше ширины резонанса Таммовского плазмона (или шире), а ее центр расположен в районе длины волны резонанса. Источник света и/или система оптического анализа могут быть как интегрированы в датчик, так и расположены на некотором расстоянии от активной зоны датчика (если необходимо осуществить дистанционное зондирование). Спектры, измеренные для всех наноструктурированных сенсорных областей в исходном состоянии, будут демонстрировать идентичные узкие резонансы, соответствующие Таммовскому плазмону. При контакте с парами или газами подлежащими детектированию каждая сенсорная область будет способствовать конденсации строго определенного пара/газа из смеси, и резонанс в соответствующем спектре сместится благодаря изменению ПП в наноотверстиях. Величина спектрального сдвига для каждой сенсорной области будет определяться ПП конденсата и степенью его заполнения наноотверстий. На основании активных зон датчика, где обнаружен сдвиг резонанса (т.е. произошла капиллярная конденсация), определяется качественный состав смеси паров и/или газов, а величина сдвига резонанса в каждой зоне позволяет судить о количественном составе паров и/или газов, исходя из известного значения ПП соответствующего конденсата.

Для исключения вариаций характеристик реперного резонанса Таммовских плазмонов в различных наноструктурированных сенсорных областях датчика в отсутствие конденсатов, глубина наноотверстий может быть также изменена путем изменения толщины самой плазмонной пленки, или сделана меньше, чем толщина плазмонной пленки.

При подготовке датчика к новому измерению, конденсат будет испаряться путем нагрева соответствующей сенсорной области датчика. Нагрев может осуществляться как оптически, за счет облучения высокоинтенсивным пучком света, так и электрически, путем пропускания тока через плазмонную пленку в соответствующей области датчика.

Капиллярная конденсация паров/газов может также контролироваться (или дополнительно усиливаться) путем обычного активного охлаждения соответствующей сенсорной области датчика с использованием, например, термоэлектрического преобразователя (элемент Пельтье) или ее пассивного (радиационного) охлаждения. Пассивное охлаждение может быть легко вовлечено, например, путем добавления специального мотива в узор наноструктурированной плазмонной пленки в нужной сенсорной области.

Капиллярная конденсация паров/газов может дополнительно контролироваться путем нагрева требуемой сенсорной области датчика. Нагрев может осуществляться как оптически, например, за счет облучения высокоинтенсивным пучком света, так и электрически, например, путем пропускания тока через плазмонную пленку в соответствующей области датчика.

Предложенный датчик может также использоваться для мониторинга состояния однокомпонентного пара/газа (а не смеси различных паров/газов). В этом случае селективность датчика будет распространяться на такие физические параметры пара/газа как его плотность, температура, давление, которые все влияют на условие капиллярной конденсации, и потому разные комбинации этих параметров будут соответствовать строго определенным наноструктурированным сенсорным областям датчика.

Селективность датчика главным образом определяется наименьшим размером наноотверстий в разных активных зонах, так как он будет задавать условия для капиллярной конденсации определенного компонента пара/газа в соответствующих зонах. Глубина и расстояние между наноотверстиями являются свободными параметрами и подбираются в процессе оптимизации, так чтобы длина волны резонанса и чувствительность во всех наноструктурированных областях, ориентированных на разные компоненты, были одинаковыми в отсутствие конденсата.

Селективность датчика может быть дополнительно повышена за счет комбинирования измерений ПП с измерениями электрического импеданса. Для этого в узор наноструктурированной плазмонной пленки в некоторых или всех сенсорных областях датчика могут быть легко добавлены зондовые электроды для радиочастотных измерений импеданса конденсата, что предоставит дополнительную информацию, позволяющую более точно дифференцировать конденсаты разных субстанций.

Заявленный датчик может работать также и при освещении под углом, а изменение угла падения света также позволит осуществить тонкую подстройку рабочей (резонансной) длины волны.

Заявленный датчик также может работать в проходящем свете. При этом резонанс Таммовского плазмона будет соответствовать узкому пику в спектре пропускания.

Резонанс Таммовского плазмона и его сдвиг из-за конденсации пара/газа может также наблюдаться в спектре поглощения, где резонанс будет соответствовать узкому пику.

Вместо широкополосного источника света и анализатора спектра можно оснастить датчик фотоприемником и узкополосным источником света с длиной волны, перестраиваемой в пределах ширины резонанса Таммовского плазмона.

Вместо широкополосного источника света и анализатора спектра можно оснастить датчик фотоприемником и узкополосным источником света с фиксированной длиной волны, изначально совпадающей с положением резонанса Таммовского плазмона. Сдвиг резонанса из-за конденсации пара/газа в сенсорной области приведет к изменению интенсивности света, измеряемой фотоприемником. А изменение интенсивности связано с величиной сдвига через априори известный спектральный профиль резонанса.

По сравнению с известным уровнем техники, заявленный оптический датчик обладает улучшенной и контролируемой селективностью, т.к. предлагаемый механизм детектирования паров/газов на базе капиллярной конденсации позволяет по отдельности определять каждый компонент паров/газа в соответствующих наноструктурированных областях по изменяющемуся там ПП. Эффект капиллярной конденсации описывается уравнением Келвина, которое задает, в частности, связь между условием конденсации пара/газа, его свойствами и шириной капилляра (наименьшим размером наноотверстия). Таким образом, для конкретного пара/газа его конденсация будет определяться наименьшим размером наноотверстия, который может быть сделан разным под разные вещества. Механизм дискриминации может быть дополнительно улучшен за счет комбинирования оптических измерений с измерением электрического импеданса, что легко воплотить, выделив в узоре наноструктуры области, работающие как зонды для таких измерений.

Заявленное изобретение позволяет упростить конструкцию датчика и анализ измерений, т.к. заявленное изобретение позволяет для разных наименьших размеров наноотверстий избежать вариации резонансной длины волны плазмона Тамма и его чувствительности к заполнению наноотверстий конденсатом. Как показали эксперименты (для нанощелей), для решеток (наноструктурированные области) с разными нанощелями можно получить резонансы плазмона Тамма на той же самой длине волны и с той же чувствительностью, если нужным образом подобрать не только периоды, но и глубину щелей у разных решеток. Например, для золотой пленки толщиной 50 нм, 4 решетки нанощелей со следующими комбинациями параметров (ширина, период, глубина): (40 нм, 300 нм, 50 нм), (56 нм, 373 нм, 61 нм), (75 нм, 427 нм, 76 нм) и (83 нм, 430 нм, 66 нм) будут все создавать резонанс плазмона Тамма на длине волны 1405 нм.

Кроме того, заявленное изобретение по сравнению с существующими оптическими датчиками обладает рядом преимуществ:

Полностью обратимое функционирование: поскольку селективность заявленного датчика не основывается на химических связях/реакциях, то активная зона датчика всегда может быть полностью приведена в исходное состояние, исключаяющее остатки паров/газов на поверхности активной зоны после предыдущего измерения.

Простота сбрасывания состояния датчика между измерениями: Датчик может быть приведен в исходное состояние просто за счет использования его активной зоны как локальный нагреватель, что будет способствовать испарению сконденсированных паров/газов перед следующим измерением.

Быстрый отклик: поскольку селективность заявленного датчика не основывается на химических связях/реакциях, то энергии, требуемые для десорбции молекул газа с поверхности активной зоны много меньше, что позволит гораздо быстрее вернуть состояние датчика в исходное состояние и обеспечит мониторинг почти в реальном времени.

Отсутствие деградации: отсутствие процессов, вовлекающих химические связи/реакции, обеспечивает долгосрочную стабильность и воспроизводимость показаний датчика (особенно, когда активная зона изготовлена из такого стабильного и химически инертного плазмонного металла, как золото), что критически важно для задач непрерывного мониторинга.

Дистанционное зондирование: принцип измерения ПП позволяет опрашивать состояние активной зоны датчика с некоторого расстояния. В этом случае и источник света, и система детектирования света и его анализа физически не являются частью структуры датчика, будучи расположенными на некотором удалении от активной зоны.

Функционирование без источника питания: в отличие от других датчиков, обладающих селективностью, заявленный датчик при удаленном зондировании не требует встроенного источника питания (даже сброс состояния активной зоны перед следующим измерением может быть осуществлено удаленно, посредством оптического нагрева).

Простой дизайн и изготовление: в отличие от существующих датчиков использующих резонанс поверхностных плазмонов и полное внутренне отражение (что требует особых способов возбуждения, таких как использование призм и дифракционных решеток), заявленный датчик вовлекает резонанс Таммовских плазмонов и, поэтому, работает эффективно даже при освещении под нормальным углом. Такое упрощение не только облегчает дизайн датчика, но также и уменьшает трудности при изготовлении датчика, делая процесс изготовления более простым и экономичным.

Миниатюризация и интегрируемость: гибридная структура заявленного датчика - комбинация одномерного фотонного кристалла (например, распределенного Брэгговского зеркала) и наноструктурированной тонкой плазмонной пленки - является по своей сути масштабируемой. Такая компактная архитектура способствует интеграции датчика в портативные устройства и позволяет его использование в таких задачах и приложениях, где занимаемое место и вес являются критически важными параметрами.

Экономически эффективное производство: за счет использования стандартных технологий нанопроизводства и широкодоступных материалов, изготовление предлагаемого оптического датчика ПП может быть осуществлено при меньших затратах. Это открывает путь к крупномасштабной коммерциализации и широкому промышленному применению датчика в таких областях, как мониторинг окружающей среды, диагностика в здравоохранении и управление промышленными процессами.

Изобретение было раскрыто выше со ссылкой на конкретный вариант его осуществления. Для специалистов могут быть очевидны и иные варианты осуществления изобретения, не меняющие его сущности, как она раскрыта в настоящем описании. Соответственно, изобретение следует считать ограниченным по объему только ниже следующей формулой изобретения.

Формула изобретения

1. Оптический датчик для детектирования паров и газов, содержащий брэгговское зеркало, выполненное из N пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку, при этом в плазмонной пленке выполнены по крайней мере две активные зоны в виде наноструктурированной области с множеством наноотверстий, имеющих наименьший размер 1-200 нм и расположенных на среднем расстоянии друг от друга 1-10 их наименьшего размера и имеющих глубину 0,1-3 толщины плазмонной пленки.

2. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что брэгговское зеркало нанесено на подложку.

3. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что плазмонная пленка выполнена из металла, выбранного из группы: золото, серебро, медь, алюминий, сплавов указанных

металлов самих с собой или с другими металлами, проводящих оксидов и нитридов переходных металлов.

4. Датчик по любому из пп. 1 или 3, отличающийся тем, что толщина плазмонной плёнки составляет 3-500 нм.

5. Датчик по любому из пп. 1 или 2, отличающийся тем, что ширина наноструктурированных областей выполнена 0,001-1 ширины брэгговского зеркала, длина наноструктурированных областей выполнена 0,001-1 длины брэгговского зеркала.

6. Датчик по любому из пп. 1 или 3, отличающийся тем, что плазмонная пленка в смежных наноструктурированных областях выполнена из разных или одинаковых материалов.

7. Датчик по любому из пп. 1 или 3, отличающийся тем, что плазмонная пленка в смежных наноструктурированных областях имеет одинаковую или разную толщину.

8. Датчик по любому из пп. 1 или 2, отличающийся тем, что между плазмонной пленкой и брэгговским зеркалом нанесен слой непоглощающего или слабопоглощающего материала толщиной 0,1-2 толщины плазмонной плёнки.

9. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что в смежных наноструктурированных областях наноотверстия выполнены одинаковой или разной формы, выбранной из группы: щелевидной, круглой, овальной, прямоугольной, крестовидной формы и/или одинаковой или разной глубины и/или одинакового или разного наименьшего размера и/или имеют периодичное, и/или квазипериодичное, и/или хаотичное расположение относительно друг друга.

10. Датчик по п. 9, отличающийся тем, что наноотверстия щелевидной, овальной, прямоугольной, крестообразной формы выполнены разной и/или одинаковой длины.

11. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что в одной и той же наноструктурированной области наноотверстия выполнены одинаковой или разной формы, выбранной из группы: щелевидной, круглой, овальной формы и/или одинаковой или разной глубины и/или имеют периодичное, и/или квазипериодичное, и/или хаотичное расположение относительно друг друга.

12. Датчик по п. 11, отличающийся тем, что наноотверстия щелевидной, овальной, прямоугольной, крестообразной формы выполнены разной и/или одинаковой длины.

13. Датчик по п. 1, отличающийся тем, что по крайней мере в одной активной зоне расположены зондовые электроды для радиочастотных измерений импеданса конденсата.

14. Способ детектирования паров и газов с использованием оптического датчика, содержащего брэгговское зеркало, выполненное из N пар чередующихся диэлектрических или полупроводниковых слоев с высоким и низким показателем преломления, и плазмонную пленку, при этом в плазмонной пленке выполнены по крайней мере две активные зоны в виде наноструктурированной области в виде множества наноотверстий, причем способ включает следующие этапы:

а) взаимодействие по крайней мере двух активных областей оптического датчика со средой детектируемой смеси газа и/или пара, с последующей селективной капиллярной конденсацией каждого газа и/или пара из смеси в наноотверстиях в соответствующих активных зонах оптического датчика;

б) освещение по крайней мере двух активных зон оптического датчика с конденсированным в наноотверстиях газом и/или паром источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса таммовского плазмона и центром, расположенным в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в каждой активной зоне оптического датчика с помощью системы оптического анализа и регистрацией резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика, соответствующего резонансу таммовского плазмона;

с) определение количественного и качественного состава смеси газов и/или паров на основании величины сдвига резонанса в спектральном отклике для каждой активной зоны оптического датчика между зарегистрированным резонансом в спектральном отклике и реперным резонансом в спектральном отклике.

15. Способ по п. 14, отличающийся тем, что реперный резонанс в спектральном отклике получают при предварительном нагреве активной области датчика с последующим освещением по крайней мере одной активной зоны оптического датчика источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса таммовского плазмона и центром, расположенным в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в активной зоне оптического датчика с помощью системы оптического анализа и регистрацией

реперного резонанса в спектральном отклике активной зоны оптического датчика, соответствующего таммовскому плазмону.

16. Способ по п. 14, отличающийся тем, что реперный резонанс в спектральном отклике получают при освещении неструктурированной области плазмонной пленки оптического датчика источником света с шириной спектральной полосы не менее ширины резонанса таммовского плазмона и центром, расположенным в районе длины волны резонанса, с последующим измерением спектрального отклика в неструктурированной области оптического датчика с помощью системы оптического анализа и регистрацией реперного резонанса в спектральном отклике неструктурированной области оптического датчика, соответствующего таммовскому плазмону.

17. Способ по п. 14, отличающийся тем, что активные зоны датчика освещаются источником света по нормали к активной зоне датчика или под углом не более 90° к нормали.

18. Способ по п. 14, отличающийся тем, что используют широкополосный источник света с системой оптического анализа в виде анализатора спектра или узкополосный источник света с системой оптического анализа в виде фотоприемника, при этом узкополосный источник света выполнен с длиной волны, перестраиваемой в пределах ширины резонанса таммовского плазмона или с фиксированной длиной волны, изначально совпадающей с положением резонанса таммовского плазмона.

19. Способ по п. 14, отличающийся тем, что спектральный отклик представляет собой спектр поглощения, спектр пропускания или спектр отражения.

20. Способ по п. 14, отличающийся тем, что в процессе капиллярной конденсации осуществляют нагрев по крайней мере одной активной зоны оптического датчика.

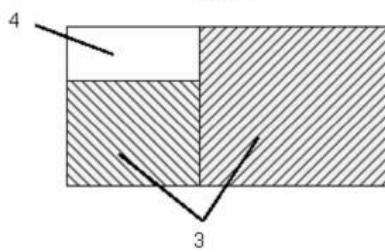
21. Способ по п. 14, отличающийся тем, что в процессе капиллярной конденсации осуществляют охлаждение по крайней мере одной активной зоны оптического датчика.

22. Способ по п. 14, отличающийся тем, что дополнительно осуществляют радиочастотные измерения импеданса сконденсированного газа и/или пара по крайней мере в одной активной зоне оптического датчика.

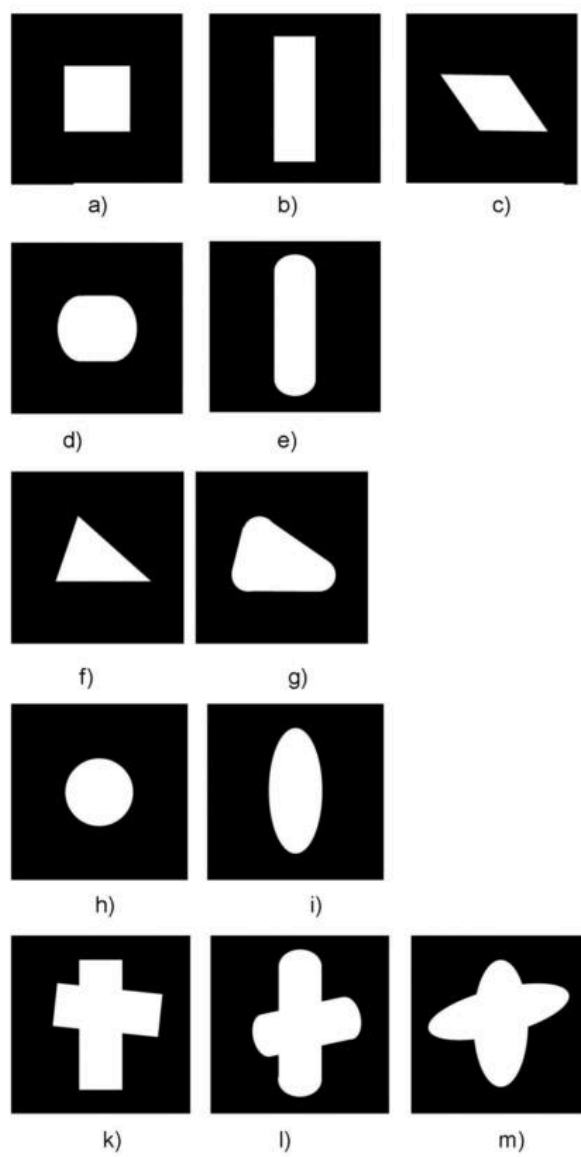
23. Способ по п. 14, отличающийся тем, что источник света и/или система оптического анализа могут быть встроены в датчик или расположены на удалении от активной зоны датчика.



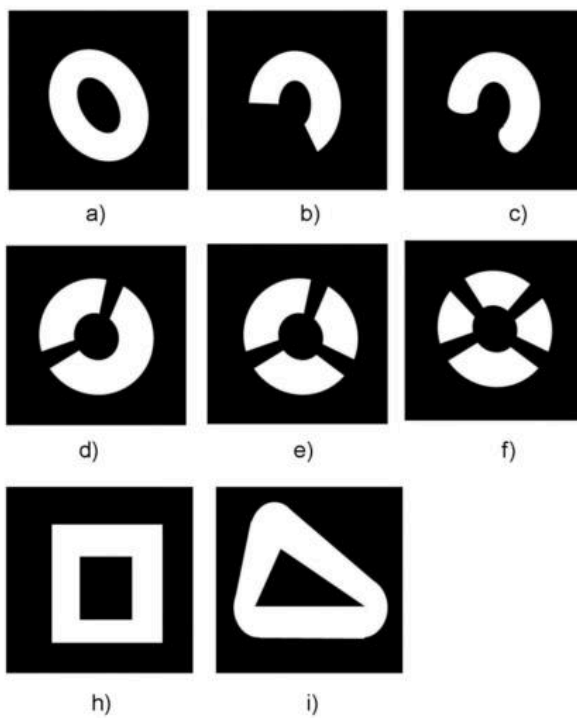
Фиг. 1



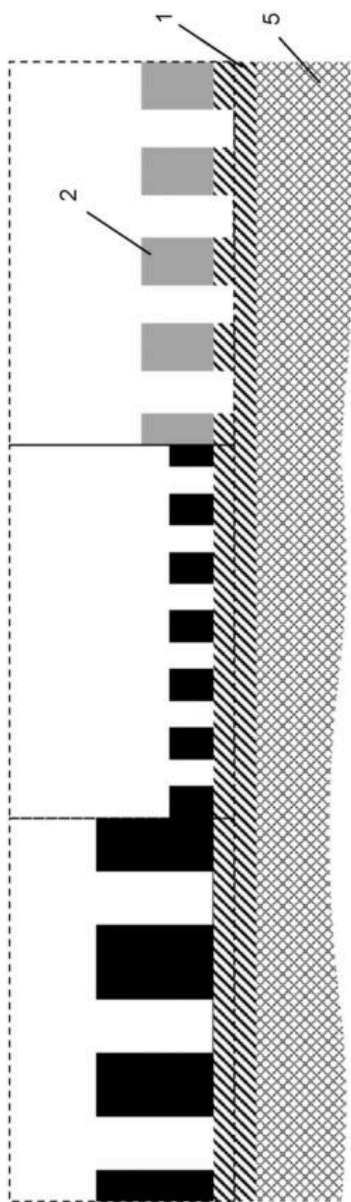
Фиг. 2



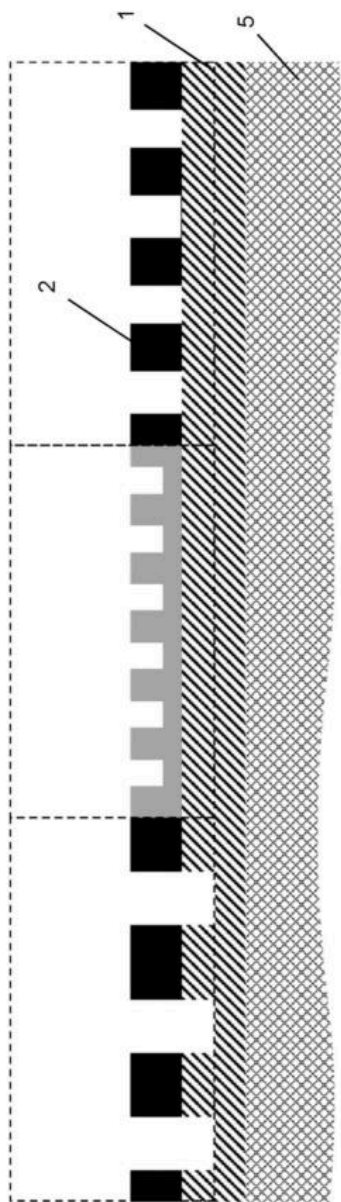
Фиг. 3



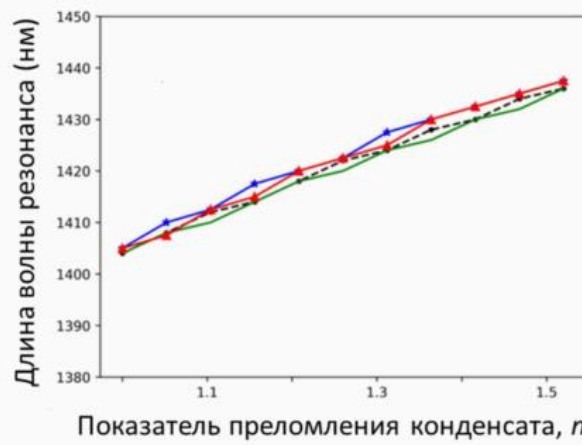
Фиг. 4



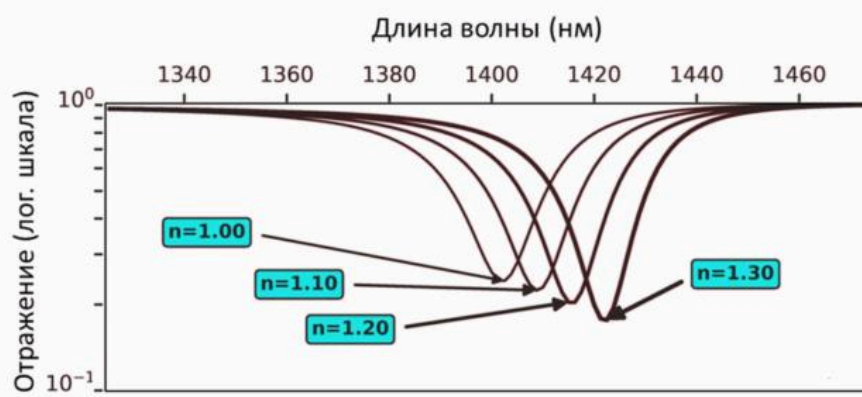
Фиг. 5



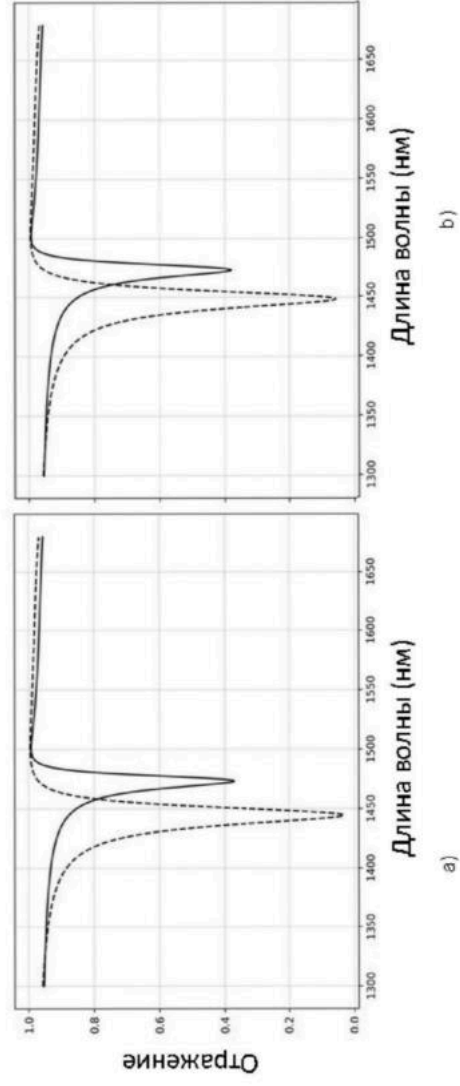
Фиг. 6



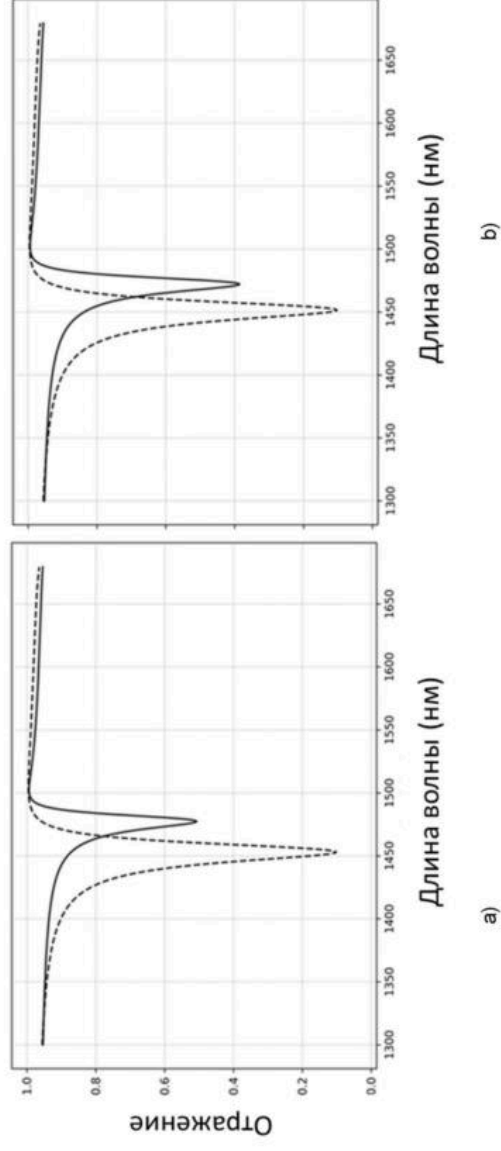
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10