

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **201991909** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2021.02.05

(51) Int. Cl. *G01N 21/45* (2006.01)
G01N 21/77 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2018.02.20

(54) ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПЛАЗМОННО-ФОТОННЫЙ БИОСЕНСОР И СПОСОБ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

(31) 2017/0100088

(32) 2017.02.17

(33) GR

(86) PCT/GR2018/000007

(87) WO 2018/150205 2018.08.23

(71) Заявитель:

**АРИСТОТЛ ИОНИВЁРСИТИ
ОФ ТЕССАЛОНИКИ-РИСЁЧ
КОММИТТИ, Е.Л.К.Е. (GR);
АМО ГМБХ ГЕЗЕЛЛЬШАФТ
ФЮР АНГЕВАНДТЕ МИКРО-
УНД ОПТОЭЛЕКТРОНИК МИТ
БЕШРЕНКТЕР ХАФТУНГ) (DE)**

(72) Изобретатель:

**Плерос Николаос, Тсиокос
Димитриос, Нтампос Георгиос,
Кетцаки Димитра (GR), Гизеке Анна-
Лена (DE)**

(74) Представитель:

**Хмара М.В., Липатова И.И.,
Новоселова С.В., Осипов К.В.,
Пантелеев А.С., Ильмер Е.Г. (RU)**

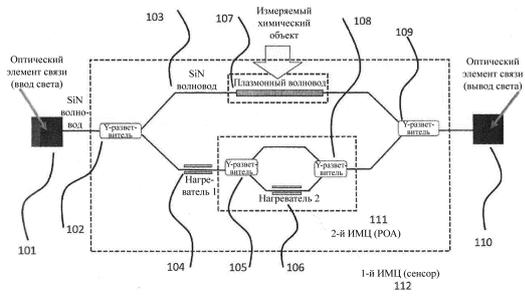
(57) Изобретение относится к устройству, содержащему оптический сенсор на основе первого интерферометра (ИМЦ1) Маха-Цендера с большим свободным спектральным диапазоном, причем предусмотрен плазмонный волновод (107), в частности тонкопленочный или гибридный щелевой волновод, в качестве преобразовательного элемента, планарно интегрированного на фотонных Si₃N₄-волноводах, и второго оптического интерферометра (ИМЦ2) Маха-Цендера, причем оба интерферометра содержат термооптические фазорегуляторы (104, 106) для оптимальной настройки указанного ИМЦ-сенсора (ИМЦ1) и ИМЦ в качестве регулируемого оптического аттенюатора (РОА). Устройство дополнительно содержит общий чип (112), характеризующийся тем, что он содержит набор фотонных волноводов (103) с полосой (303, 603) из нитрида кремния с высоким показателем преломления, который расположен между оксидной подложкой (из SiO₂) с низким показателем преломления и оксидным покрывающим слоем (из низкотемпературного оксида) с низким показателем преломления; оптические структуры (102, 109) связи, расположенные на обоих концах сенсора и действующие в качестве оптических средств ввода/вывода; оптический расщепитель (102) и оптический объединитель (109) для оптического расщепления на первом разветвителе (102) указанного первого сенсора (ИМЦ1) и для оптического объединения на втором разветвителе (109) указанного первого ИМЦ (ИМЦ1); регулируемый оптический аттенюатор (РОА) с указанным дополнительным вторым ИМЦ (ИМЦ2), встроенным в указанный первый ИМЦ-сенсор (ИМЦ1) и выполненный с возможностью использования оптического расщепителя и оптического объединителя для оптического расщепления на первом разветвителе указанного дополнительного второго ИМЦ (ИМЦ2) и для оптического объединения на втором разветвителе указанного второго ИМЦ (ИМЦ2); набор термооптических фазорегуляторов (104, 106) для настройки фазы оптического сигнала в опорном плече (104, 106) каждого из указанных ИМЦ (ИМЦ1, ИМЦ2-РОА), причем термооптические фазорегуляторы сформированы посредством осаждения поверх секции фотонного волновода двух металлических полос, параллельных одна другой и ориентированных вдоль направления распространения света; причем плазмонный волновод (107) сформирован в верхней ветви (103) указанного первого ИМЦ (ИМЦ1) и пространственно ограничивает распространение света посредством его связывания в поверхностные плазмонные поляритоны на границе раздела металл-аналит. Предложен также способ использования данного устройства.

A1

201991909

201991909

A1



ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПЛАЗМОННО-ФОТОННЫЙ БИОСЕНСОР И СПОСОБ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Область техники, к которой относится изобретение

5 Настоящее изобретение относится к устройству для массового производства, с низкими затратами, планарных интегрированных фотонных биосенсоров и, более конкретно, к монолитному коинтегрированию фотонных и плазмонных КМОП-компонентов в оптимально настроенные интерферометры Маха-Цендера (ИМЦ) в качестве средств повышения чувствительности сенсора до беспрецедентных
10 уровней и при низких производственных затратах.

Предшествующий уровень техники

Для решения технических проблем, связанных с высокочувствительными биосенсорами, было предложено несколько решений. Однако широкое
15 коммерческое использование всё еще тормозится вследствие сложности и высокой стоимости требующихся методов производства, больших установочных размеров систем или умеренными чувствительностями. Все эти характеристики должны быть одновременно улучшены в сенсорном устройстве прежде, чем оно выйдет на рынок.

Чувствительность поверхностного плазмонного резонанса (surface plasmon resonance, SPR) к изменению показателя преломления в случае присутствия
20 сильного оптического поля на поверхности металла обусловила разработку сенсорных SPR-систем для детектирования биологических агентов (см. работу Jiří Homola, Sinclair S. Yee, Günter Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review" ("Сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса: Обзор"), Sensors and
25 Actuators B: Chemical, Volume 54, Issues 1-2, 25 January 1999, pp. 3-15). Эти системы, как правило, используют оптическую призму для ввода (закачки) света в поверхностную плазмонную моду на плоской золотой фольге. Однако большие размеры таких систем представляют главное препятствие для их миниатюризации до планарных монолитных чипов с целью их низкозатратного изготовления и
30 использования в местах лечения и в различных портативных приложениях.

Используя недавние достижения в нанопроизводстве, удалось интегрировать плазмонные волноводные устройства, использующие поверхностные плазмонные поляритоны в качестве биосенсоров, однако, при низких сенсорных характеристиках с точки зрения чувствительности. Чтобы улучшить технические характеристики
35 плазмонных сенсоров, плазмонные волноводы были интегрированы в интерферометры Маха-Цендера (сокращенно "ИМЦ") и в другие

интерферометрические конфигурации, чтобы использовать зависимость фазы оптического поля в плазмонном волноводе от изменения показателя преломления тестируемого аналита. Опубликованная в OSA-Optics Express, Vol. 23, Issue 20, pp. 25688-25699 (2015), doi.org/10.1364/OE.23.025688 [Wosinski] работа описывает

5 интерферометр Маха-Цендера с щелевым волноводом на основе золота, интегрированный на кремнии. Однако отсутствие оптимальных настроечных компонентов для оптимизации разностной длины и дисбаланс мощности между

10 верхней и нижней ветвями в сочетании с малым свободным спектральным диапазоном (ССД) ИМЦ привели к оптической чувствительности порядка 1061 нм/RIU (RIU (Refractive Index Unit) – единица показателя преломления). Сходный

15 подход, с использованием гибридных плазмонных щелевых волноводов, был предложен в работе M. Z. Alam, F. Bahrami, J. S. Aitchison and M. Mojahedi, "Analysis and Optimization of Hybrid Plasmonic Waveguide as a Platform for Biosensing" ("Анализ и оптимизация гибридного плазмонного волновода в качестве платформы для

биосенсорики), IEEE-Photonics Journal, Volume: 6, Issue: 4, Aug. 2014, DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2331232. Однако описанная конструкция была сфокусирована на плазмонном волноводе, не имеющем каких-либо балансирующих компонентов на базе ИМЦ и ассоциированных индикаторов характеристик.

В патентном документе US 2005/0018949 A1 описан сенсор на основе ИМЦ, использующий плазмонику лишь в микронном диапазоне размеров (2-20 мкм), но не за его пределами, т. е. обеспечивающий возможность интеграции в пределах микронной шкалы, но не вне её. Кроме того, в указанном документе не раскрыта

20 эффективность связи (взаимодействия) между плазмонным и фотонным волноводами, которая, как можно ожидать, является низкой, что приводит к очень

25 большим потерям в той ветви ИМЦ, в которую интегрирован плазмонный волновод. Ожидается, что это, в сочетании с отсутствием настроечных компонентов в нижней ветви ИМЦ, которая, как следствие, не рассмотрена в указанном документе, приводит к низкому разрешению в процессе сенсорного измерения и поэтому ограничивает чувствительность сенсора и предел детектирования.

В патенте EP 2214049 B1 используется специально разработанный фотонный ИМЦ, работающий с затухающим оптическим полем и, тем не менее, требующий очень длинных взаимодействующих плеч в сенсорной ветви ИМЦ. Это, в сочетании с использованием материалов, несовместимых с КМОП (таких как полимеры), препятствует дальнейшей миниатюризации этого прибора до микро- или

30 наномасштаба и массовому изготовлению на предприятиях-изготовителях КМОП. Подобно вышеупомянутым приборам, этот сенсор также не использует

35

балансировочный компонент, требующийся для полной балансировки ИМЦ-сенсора, тогда как для обеспечения требований по чувствительности необходим крупноразмерный сенсор, что ограничивает массовое производство и, следовательно, снижение стоимости изготовления сенсорного чипа.

5 Интерферометр нового типа, названный бимодальным интерферометром (BiModal Interferometer) и описанный в работе Yongkang Gao, Qiaoqiang Gan, Zheming Xin, Xuanhong Cheng, Filbert J Bartoli, "Plasmonic Mach-Zehnder Interferometer for Ultrasensitive on-chip Biosensing" ("Плазмонный интерферометр Маха-Цендера для сверхчувствительной биосенсорики на чипе"), ACS Nano 2011
10 Dec 18; 5(12): 9836-44, Epub 2011 Nov 18, и в работе Kirill E. Zinoviev; Ana Belen Gonzalez-Guerrero; Carlos Dominguez; Laura M. Lechuga, "Integrated Bimodal Waveguide Interferometric Biosensor for Label-Free Analysis" ("Интегрированный бимодальный интерферометрический биосенсор для безмаркерного анализа"), Journal of Lightwave Technology: 2011, Volume 29, Issue 13, pp. 1926-1930, DOI:
15 10.1109/JLT.2011.2150734, также был исследован с использованием как фотонных, так и плазмонных структур с целью улучшенной тепловой стабильности и/или отклонения от идеальных пропорций светоделения 50:50. Хотя эти авторы предлагают компактные решения, требование бимодального функционирования препятствует увеличению длины сенсорной области и точной балансировке двух
20 ветвей ИМЦ для оптимизации разрешения.

Сенсор показателя преломления на основе микроволокна, использующий конфигурацию ИМЦ, был описан в работе Jianghai Wo et al, "Refractive index sensor using microfiber-based Mach-Zehnder interferometer" (Сенсор показателя преломления, использующий интерферометр Маха-Цендера на основе
25 микроволокна), OSA-Optics Letters, Vol. 37, Issue 1, pp. 67-69 (2012), doi.org/10.1364/OL.37.000067. Предложенная схема использует оптические волокна, имеющиеся на рынке оптическую линию задержки с ручным управлением и аттенуаторные компоненты, чтобы оптимизировать функционирование ИМЦ-сенсора, а также оптическое микроволокно длиной 6 см. В этой работе не раскрыт
30 способ реализации предложенной схемы в виде планарного интегрированного чипа и осуществления аттенуатора и линии задержки в интегрированном формате. Кроме того, использование, в качестве преобразователя для сенсора, микроволокна длиной 6 см препятствует дальнейшей миниатюризации (до миллиметрового или микрометрического масштаба) и массовому производству.

35 В работе Stewart A. Clark, Brian Culshaw, Emma J.C. Dawnay, Ian E. Day, "Thermo-optic phase modulators in SIMOX material" ("Термооптические

фазомодуляторы в материалах, изготовленных по технологии разделения слоев подложки ионной имплантацией с насыщением кислородом (SIMOX-материалах)"), Proc. SPIE 3936, Integrated Optics Devices IV, (24 March 2000); doi: 10.1117/12.379940, описан способ использования планарных термооптических фазорегуляторов с электрическим управлением в качестве фазомодулирующих элементов в ИМЦ-конфигурациях. Аналогичный подход, комбинирующий фазомодуляторы с электрическим управлением во вложенной конфигурации ИМЦ, раскрыт также в патентном документе WO 00/73848 A2 (JDS UNIPHASE CORP [US]; McBrien Gregory J [US]; Kissa Karl M [US]; Hal), 7.12.2000. Однако ни в одной из этих схем не предложены ни какие-либо сенсорные элементы, ни какие-либо сенсорные функциональности.

В патентном документе WO 00/73848 A2 раскрыто (в частности, на фиг. 3) вложенная конфигурация Маха-Цендера (МЦ) с электродами, управляющими фазой и балансировкой поля в плечах интерферометра. Однако описанное устройство является модулятором, а не сенсором и, кроме того, не содержит термооптических фазорегуляторов.

Сущность изобретения

Изобретение направлено на одновременное решение различных рассмотренных выше проблем посредством разработки сверхчувствительного биосенсорного устройства, которое может быть интегрировано в конфигурации на базе чипа микрометрического масштаба посредством осуществления простых и недорогих способов изготовления.

Сенсорные технологии, которые будут способны точно – вплоть до молекулярного уровня – определять в реальном времени интересующие вещества, будут способствовать ранней диагностике и предотвращению болезней, применениям в местах лечения и точному мониторингу окружающей среды. Плазмоника – это технология с громадным потенциалом применения в сенсорах, которая, благодаря ее способности заключать свет в объемах нанометрического масштаба, позволяет обеспечить отличное отношение чувствительности к длине взаимодействия. Предлагаемые плазмоникой беспрецедентные чувствительности на единицу длины, в сочетании со способностью гармонично сосуществовать с фотоникой при низком уровне потерь, с наноэлектроникой на базе металлов и с биохимическими механизмами (биосовместимостью), откроют новые возможности в биосенсорных системах с точки зрения технических характеристик, мультифункциональности и компактности.

Параллельно этому, селективно комбинируя плазмонные волноводы с фотоникой на базе Si_3N_4 , можно использовать процессы конечного изготовления КМОП, применяемые на предприятиях-изготовителях электронных интегральных схем, чтобы приблизить интегрированные фотонные сенсоры к дешевому и массовому производству. Хотя добавленная стоимость, обеспечиваемая плазмоникой, получила практическое подтверждение, пока незаметны организованные усилия по трансформированию интегрированных плазмонных сенсоров из сложной технологии с большими потерями в высокоценные практические КМОП-совместимые устройства. Конкретно, ожидается, что гармоничная и сбалансированная смесь КМОП-совместимой плазмоники с фотоникой в интегрированных планарных чипах трансформирует плазмонно-фотонные сенсоры из дорогостоящей и сложной технологии в настоящую технологическую революцию применительно к сенсорам на базе фотонных интегральных схем, позволяющую получить беспрецедентные технические характеристики и функциональности в большом масштабе и применительно к широкому набору потребностей промышленности.

Таким образом, изобретение направлено на удовлетворение потребности в интегрированном, т. е. в компактном, сенсорном приборе (чипе) с беспрецедентной оптической чувствительностью, ориентировочно порядка 150000 нм/RIU, использующем плазмонные волноводы в оптимально сбалансированных фотонных ИМЦ с большим ССД по длинам волн, составляющим, в частности, от десятков нанометров до многих сотен нанометров, причем данный прибор может быть изготовлено при малых затратах посредством массового производства с привлечением КМОП-изготовителей, в частности, используя монолитную интеграцию, обычно применяемую в электронных интегральных схемах. В этой перспективе в изобретении предложена конструкция сенсора, методология изготовления компонентов и, соответственно, сенсорное устройство и способ его использования.

В дополнение, в изобретении предложен оптический биосенсор на основе интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), который использует фотонные Si_3N_4 -волноводы нанометрического масштаба и плазмонные волноводы нанометрического масштаба, планарно интегрированные на КМОП-чипе. Изобретение направлено на детектирование химических и/или физических величин посредством использования хорошо известного изменения показателя преломления, имеющего место в секции интерферометра, соответствующей плазмонному волноводу, когда тестируемый аналит или газ покрывает плазмонный

волновод. Дополнительный (т. е. второй) интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ) используется, вместе с оптическими фазорегуляторами, в качестве регулируемого оптического аттенюатора (POA), причем автономные фазорегуляторы включены в одну, в частности в нижнюю, ветвь интерферометра, чтобы получить оптимально сбалансированный сенсор и достичь чувствительности измерений, значительно превосходящей чувствительность, достижимую в рамках уровня техники. Конструкция сенсора сочетается с недорогими материалами и процессами изготовления, делая возможным массовое производство.

Изобретение направлено на разработку способа массового производства, с низкими затратами, сверхчувствительных биосенсорных чипов, используемых для детектирования химических, биохимических или других физических агентов, присутствующих в жидкостях или газах.

Таким образом, в изобретении предложен сверхчувствительный биосенсорный прибор, использующий фотонные и плазмонные волноводы, расположенные согласно специально разработанной конфигурации ИМЦ, которая может быть изготовлена при низких затратах на предприятиях, осуществляющих массовое производство. В частности, согласно изобретению предложен прибор, содержащий фотонные и новые плазмонные компоненты для интеграции на наноуровне.

Согласно основному варианту осуществления устройства согласно изобретению, оно содержит оптический интерферометрический сенсор на основе интерферометра Маха-Цендера с большим ССД по длинам волн, состоящим от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, причем предусмотрен плазмонный волновод, в частности тонкопленочный или гибридный щелевой волновод, в качестве преобразовательного элемента, планарно интегрированного на фотонных Si_3N_4 -волноводах. Устройство дополнительно содержит:

- набор фотонных волноводов на основе полосы из нитрида кремния с высоким показателем преломления, расположенный между оксидной подложкой из SiO_2 с низким показателем преломления и оксидным покрывающим слоем из низкотемпературного оксида (low temperature oxide, LTO) с низким показателем преломления;

- оптические структуры связи, расположенные на обоих концах сенсора и действующие в качестве оптических средств ввода/вывода;

- оптический расщепитель и оптический объединитель для оптического расщепления на первом разветвителе указанного ИМЦ-сенсора и для оптического объединения на втором разветвителе указанного первого ИМЦ-сенсора, в частности

Y-разветвителе, направленном разветвителе или многомодовом интерференционном разветвителе,

5 - причем плазмонный волновод сформирован в верхней ветви указанного сенсора и пространственно ограничивает распространение света посредством его связывания в поверхностные плазмонные поляритоны (ППП) на границе раздела металл-аналит.

Важной особенностью данного устройства является то, что оно дополнительно содержит: оптический (причем именно интерферометрический) элемент типа интерферометра Маха-Цендера, расположенный в опорном плече 10 ИМЦ-сенсора, причем оба указанных ИМЦ-элемента содержат термооптические нагреватели для оптимальной настройки обоих интерферометров; общий чип; регулируемый оптический аттенюатор (РОА) с дополнительным ИМЦ, выполненный с возможностью использования оптического расщепителя и оптического объединителя для оптического расщепления на первом разветвителе указанного 15 дополнительного ИМЦ и для оптического объединения на втором разветвителе указанного дополнительного ИМЦ, и

20 - набор термооптических фазорегуляторов для настройки фазы оптического сигнала в опорном плече каждого из указанных ИМЦ; при этом указанные термооптические фазорегуляторы сформированы посредством осаждения поверх секции фотонного волновода двух металлических полос, параллельных одна другой и ориентированных вдоль направления распространения света.

Таким образом, устройство согласно изобретению отличается от ближайшего решения, известного из уровня техники, тем, что обладает признаками, отмеченными выше как важные, т. е. тем, что содержит: дополнительный 25 оптический интерферометр типа Маха-Цендера в качестве РОА (причем оба интерферометра содержат термооптические нагреватели в качестве своих настроечных компонентов); причем указанный РОА содержит указанный дополнительный ИМЦ2, встроенный в сенсор ИМЦ1; и набор термооптических фазорегуляторов.

30 Эти признаки обеспечивают технический результат, состоящий в том, что дополнительный интерферометр ИМЦ2, встроенный в первый сенсор и имеющий термооптический фазорегулятор в своем опорном плече, функционирует в качестве регулируемого оптического аттенюатора (РОА), управляемого посредством 35 управляющего сигнала от термооптического фазорегулятора. Данный РОА управляет интенсивностью сигнала в опорном плече первого интерферометрического сенсора. Дополнительный термооптический фазорегулятор

в опорном плече первого интерферометрического сенсора позволяет управлять фазой пучка в этом опорном плече. Таким образом, становится возможным управлять и фазой, и амплитудой поля в опорном плече интерферометра ИМЦ1, так что ИМЦ1 может быть сбалансирован и настроен посредством электрических
5 сигналов для работы в требуемой рабочей точке.

Таким образом, подлежащая решению проблема, по сравнению с ближайшим аналогом ХР011552586, состоита в управлении балансом и рабочей точкой интерферометрического сенсора. Особенность решения, достигнутого посредством устройства согласно изобретению, состоит в том, что РОА и
10 фазорегулятор в опорном плече, служащие для управления рабочей точкой интерферометрического сенсора, раскрыты в патентном документе ХР001572448 (авторы JIANGHAI WO et al.) и именуются далее "настраиваемой оптической линией задержки" (ОЛЗ) и аттенюатором (см. фиг. 1 в данном документе и относящейся к ней текст). Однако этот документ не описывает ни настраиваемую ОЛЗ как
15 содержащую термооптический фазорегулятор, ни аттенюатор, выполненный в виде интерферометра Маха-Цендера и дополнительно содержащий термооптический элемент. Таким образом, данный документ предлагает решение технической проблемы, однако, без использования отмеченных выше признаков, присущих основному варианту изобретения. Действительно, в отличие от планарной
20 технологии, использованной в указанном аналоге ХР011552586, интерферометр из патентного документа ХР001572448 основан на использовании оптических волокон. Таким образом, в данном документе не раскрывается, как осуществлять регулируемую задержку и аттенюатор, описанные в этом документе, в планарный волноводный сенсор указанного аналога. Выполнение фазорегуляторов по
25 волноводной планарной технологии, использующей термооптические элементы, раскрыта в патентном документе ХР55414114, вместе с регулируемыми оптическими аттенюаторами в конфигурации Маха-Цендера, содержащими вышеупомянутые термооптические элементы. Следовательно, чтобы реализовать изобретение, следует осуществить в указанном аналоге ХР011552586 функции
30 оптоволоконных компонентов, раскрытых в данном документе, с использованием планарной волноводной технологии из патентного документа ХР55414114.

Одним из аспектов изобретения является способность обеспечить оптические чувствительности, например сдвиг оптического резонанса на единицу изменения показателя преломления упомянутого плазмонного волновода,
35 превосходящие чувствительности известных устройств, за счет использования сильного взаимодействия между светом и веществом в ППП-волноводе с большим

свободным спектральным диапазоном (ССД) (от десятков нанометров до многих сотен нанометров) и с оптимально настроенными интерферометрическими конфигурациями типа Маха-Цендера. Чем меньше разность оптических путей между измерительным и опорным плечами интерферометра, тем большим становится

5 ССД, что приводит к более высокой чувствительности интерферометра к показателю преломления тестируемого анализа, находящегося на плазмонном волноводе. Изобретение предлагает общую конфигурацию и оптимальный способ настройки.

Другой аспект изобретения относится к способу монолитной интеграции ППП-волноводов нанометрического масштаба (тонкопленочных или гибридных фотонных целевых), фотонных волноводов из нитрида кремния и термооптических фазорегуляторов, реализованных в виде металлических нагревателей, во вложенной интерферометрической МЦ-конфигурации, чтобы достичь рекордно

10 высокой чувствительности одновременно с низкой стоимостью изготовления.

Еще один аспект изобретения относится к монолитной интеграции ППП-волноводов нанометрического масштаба (тонкопленочных или гибридных фотонных целевых), фотонных волноводов нанометрического масштаба из нитрида кремния и термооптических фазорегуляторов в компактных ИМЦ-конфигурациях, использующих КМОП-совместимые материалы (оксиды, металлы диэлектрики), и

15 способы, обеспечивающие возможность массового производства сенсорного чипа при низкой стоимости.

Настоящее изобретение относится также к устройству; в частности другой аспект изобретения состоит в разработке фотонного и плазмонного волновода, в частности для случая использования гибридного целевого ППП-волновода, что

25 делает возможным одновременное осаждение плазмонного целевого волновода и металлических контактов термооптического фазорегулятора посредством единственного процесса с применением маски и обратной литографии и с использованием одного и того же металла, что также снижает общую стоимость изготовления.

Еще один аспект изобретения относится к получению сверхчувствительного прибора с массивом биосенсоров с помощью технологии мультиплексирования по

30 длинам волн (МПДВ) и фотонных и плазмонных волноводов, расположенных в массивах специально разработанных ИМЦ-конфигураций, которые могут быть изготовлены при низкой стоимости и на заводах массового производства. Такие массивы будут способны одновременно детектировать различные количества

35

тестируемого аналита или газа с одинаковой чувствительностью и иметь стоимость изготовления такую же, как и одиночный биосенсорный прибор.

Подводя итоги, можно отметить, что благодаря изобретению создан прибор, содержащий фотонные и новые плазмонные компоненты, пригодные для
5 интегрирования в нанометрическом масштабе, в отличие от решения из патентного документа US 2005/0018949 A1, допускающего интеграцию только в микрометрическом масштабе и не более. Кроме того, хотя эффективность связи между плазмонным и фотонным волноводами в данном документе не раскрыта, ожидается, что она является низкой, т. е. приводит к очень высоким потерям в той
10 ветви ИМЦ, в которую интегрирован плазмонный волновод. Это сопровождается отсутствием настроечных компонентов в нижней ветви ИМЦ, которые не раскрыты в указанном документе (но которые, однако, предусмотрены изобретением). Ожидается, что такое выполнение приведет к низкому разрешению при сенсорных измерениях и, следовательно, ограничит чувствительность сенсора и предел
15 детектирования. Данные трудности должны быть на практике преодолены за счет использования монолитной интеграции и соответствующих геометрий в нанометрическом масштабе, чтобы сделать возможным изготовление миниатюризованных сенсорных чипов с низкой стоимостью. Эти проблемы решены благодаря изобретению, указывающему, как идеально сбалансировать ИМЦ-сенсор,
20 содержащий плазмонные сенсорные элементы, дополнительный фотонный ИМЦ и фазорегуляторы для обеспечения сверхчувствительных измерений при низкой стоимости изготовления за счет использования монолитной интеграции.

Введенный в опорное плечо ИМЦ¹ дополнительный ИМЦ и фазорегуляторы (металлические нагреватели) используются для обеспечения идеально
25 сбалансированной интерференции на выходе перед началом сенсорных измерений, что максимизирует коэффициент поглощения и улучшает предел детектирования. Согласно предпочтительному варианту осуществления изобретения указанные признаки скомбинированы с конфигурацией, обеспечивающей для ИМЦ большой ССД (составляющий от десятков нанометров до многих сотен нанометров) с целью
30 достичь сверхвысоких чувствительностей и сенсорных характеристик, отвечающих текущим и будущим потребностям.

Кроме того, предлагаются, согласно дополнительным вариантам осуществления изобретения, конкретные компоненты, которые снижают общую стоимость изготовления, требуя меньшее число операций травления и обратной
35 литографии, точнее единственную операцию травления фотонного волновода (полосы) в сочетании с единственной операцией обратной литографии для

плазмонных волноводов. Кроме того, предлагается способ конструирования интегрированного плазмонно-фотонного сенсорного ИМЦ, который, при низкой стоимости изготовления способен повысить уровни чувствительности по сравнению с достигнутыми ранее.

5 Согласно конкретным вариантам осуществления устройства согласно настоящему изобретению плазмонные волноводы выполнены с использованием благородных металлов, таких как золото (Au) или серебро (Ag). Возможно также использование недорогих металлов, таких как медь (Cu), алюминий (Al), нитрид титана (TiN) или другой КМОП-совместимый металл.

10 Согласно другим вариантам осуществления устройства согласно настоящему изобретению плазмонные волноводы выполнены в соответствии с одним из следующих двух вариантов волновода:

- "тонкопленочный волновод" (ТПВ), который состоит из тонкой металлической полосы, осажденной непосредственно на оксидный покрывающий
15 слой с использованием полости, сформированной травлением верхней оксидной оболочки, и сердечника фотонного волновода из нитрида кремния только в соответствующей секции, или

- "гибридный щелевой плазмонно-фотонный волновод" (ГЩПФВ), который содержит два параллельных металлических проводника, осажденных
20 непосредственно поверх предварительно заданной секции волновода без необходимости в полости или в дополнительных операциях обработки, причем в фотонном волноводе под металлическими полосами создан разрыв в процессе литографии без применения дополнительной маски или дополнительных операций обработки. При этом плазмонный щелевой волновод и фазорегуляторы осаждены
25 непосредственно поверх фотонных волноводов посредством единственной операции осаждения единственного слоя металла без травления фотонного волновода. Кроме того, значения расстояния (W_{slot}) между металлическими полосами, как и длина и ширина металлических полос заданы при разработке маски для изготовления сенсора, чтобы сформировать, с использованием единственной
30 маски, ГЩПФВ и термооптический фазорегулятор в виде нагревателя. Кроме того, для закачки света из фотонного волновода в плазмонный щелевой волновод и обратно в фотонный волновод используется направленная связь, а для повышения эффективности указанной связи используется сужение на переднем и заднем концах плазмонного щелевого волновода.

35 Настоящее изобретение относится также к прибору, содержащему массивы устройств типа предложенных выше и обеспечивающего возможность

параллельного детектирования нескольких веществ на одном и том же чипе. Данный прибор содержит несколько верхних ветвей с плазмонными волноводами и такие же копии нижних ветвей с нагревателями и регулируемым оптическим аттенюаторами (POA). При этом на входе и выходе чипа расположены общий
5 оптический расщепитель и общий объединитель, соответственно, для всех ИМЦ, а каждый ИМЦ-сенсор использует отдельную длину волны из равного количества длин волн, которые одновременно введены в биосенсор через оптический расщепитель. Каждый ИМЦ также содержит оптические фильтры на входе своих ветвей и за входным расщепителем для выбора своей рабочей длины волны из
10 входных оптических сигналов. При этом указанные оптические фильтры или другие оптические фильтры со схожей функциональностью, например решетки на основе массива волноводов (arrayed waveguide gratings, AWG), являются кольцевыми резонаторами.

Согласно конкретным вариантам осуществления, устройство согласно
15 настоящему изобретению выполнено с использованием других КМОП-совместимых фотонных материалов, таких как Si и SOI (кремний на изоляторе, от англ. silicon-on-insulator), TiO₂, или других КМОП-совместимых металлических материалов, таких как Al, Cu, TiN, или их соединений.

Согласно дополнительным вариантам осуществления, устройство согласно
20 настоящему изобретению содержит двунаправленные вертикальные оптические решеточные элементы связи, расположенные вместо других оптических средств ввода/вывода и расщепителя-объединителя указанного первого сенсора (ИМЦ1) для одновременного функционирования в качестве вертикальных средств ввода/вывода и расщепителя-объединителя указанного первого сенсора (ИМЦ1).

Согласно конкретным вариантам осуществления устройства согласно
25 настоящему изобретению, интегрированные оптические источники, в частности поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSEL), светодиоды (СД), широкополосные источники или другие оптические источники, и оптические фотодетекторы расположены на входах
30 и выходах приборов, соответственно. При этом оптический источник и фотодетекторы интегрированы с использованием монтажа методом перевернутого кристалла (flip-chip) или сращивания пластин (wafer bonding), или присоединения кристалла к подложке выводами вверх (die bonding), или эпитаксиального роста, над решеточным элементом связи или на одном уровне с фотонным волноводом.

Согласно другим вариантам осуществления устройства согласно настоящему
35 изобретению, на входах и выходах приборов расположены массивы

интегрированных оптических источников и оптических детекторов, при этом оптический источник и фотодетекторы предпочтительно интегрированы, с использованием монтажа методом перевернутого кристалла или сращивания пластин, или присоединения кристалла к подложке выводами вверх, или
5 эпитаксиального роста, над решеточным элементом связи или на одном уровне с фотонным волноводом.

Согласно важному варианту осуществления устройства согласно изобретению, оно содержит вертикальные электрические связи, известные также как связи сквозь кремний (through silicon vias, TSV), которые подсоединены к
10 термооптическим фазорегуляторам и обеспечивают возможность электрического управления ими посредством электронного контура, пространственно интегрированного на том же чипе.

Согласно следующему важному варианту осуществления устройства согласно настоящему изобретению, оно содержит дополнительный жидкостный
15 канал, который закреплен на поверхности плазмонного волновода для обеспечения возможности протекания предварительного заданного раствора/аналита на плазмонном преобразовательном элементе.

Согласно особенно важному варианту осуществления устройства согласно настоящему изобретению, на поверхности плазмонного преобразователя
20 сформированы дополнительные слои захвата для детектирования конкретных биологических и/или химических веществ, и/или молекул.

Настоящее изобретение относится также к монолитной коинтеграции фотонных и плазмонных КМОП-компонентов в оптимально настроенные интерферометры ИМЦ, в качестве средства повышения чувствительности сенсора
25 до беспрецедентных уровней и при низкой стоимости изготовления.

Настоящее изобретение относится также к способу использования устройства, которое рассмотрено выше и в котором в нижней ветви указанного сенсора или его эквивалента в соответствующем массиве ИМЦ предпочтительно формируют дополнительные нефункционализованные плазмонные волноводы
30 одинаковых размеров, причем интересующий анализ направляют так, чтобы он протекал по этому дополнительному волноводу аналогично функционализованному волноводу в верхней ветви указанного сенсора, за счет чего устраняют нежелательные связывание или шум.

В отношении основного варианта осуществления способа использования
35 устройства согласно настоящему изобретению важно отметить, что он дополнительно включает следующие шаги:

- оптимально настраивают указанные ИМЦ в качестве регулируемого оптического аттенюатора посредством указанных термооптических нагревателей, содержащихся в обоих указанных интерферометрах типа Маха-Цендера;

5 - используют оптический расщепитель и оптический объединитель для оптического расщепления на первом разветвителе указанного дополнительного второго интерферометра посредством регулируемого оптического аттенюатора (РОА) с указанным дополнительным вторым интерферометром, встроенным в указанный первый сенсор, и для оптического объединения на втором разветвителе второго интерферометра;

10 - настраивают фазу оптического сигнала в опорном плече каждого из указанных интерферометров (ИМЦ1, ИМЦ2-РОА) посредством указанных термооптических фазорегуляторов; поверх секции фотонного волновода осаждают две металлические полосы, параллельные одна другой и ориентированные вдоль направления распространения света, формируя тем самым термооптические фазорегуляторы;

15 - причем указанный дополнительный оптический интерферометр, встроенный в указанный первый оптический интерферометрический сенсор и имеющий в своем опорном плече термооптический фазорегулятор, функционирует в качестве РОА, которым управляют посредством управляющего сигнала термооптического фазорегулятора, причем

20 - при этом указанный регулируемый оптический аттенюатор (РОА) управляет интенсивностью сигнала в указанном опорном плече первого интерферометрического сенсора, тогда как указанный дополнительный термооптический фазорегулятор в опорном плече первого интерферометрического сенсора обеспечивает возможность управления фазой пучка в указанном опорном плече, обеспечивая тем самым возможность управления амплитудой и фазой поля в опорном плече указанного первого интерферометрического сенсора, который в результате может быть сбалансирован и настроен посредством электрических сигналов на требуемую рабочую точку.

30 Согласно следующему варианту осуществления способа согласно настоящему изобретению в нижней ветви указанного первого сенсора или его эквивалента в указанном массиве ИМЦ формируют дополнительные нефункционализованные плазмонные волноводы одинаковых размеров, причем обеспечивают возможность протекания интересующего анализа по

35 дополнительному волноводу аналогично функционализированному волноводу в

верхней ветви указанного первого сенсора (ИМЦ1), за счет чего устраняются нежелательные связывание или шум.

Таким образом, в изобретении предложен способ, пригодный для массового производства, с низкими затратами, интегрированного плазмонно-фотонного биосенсора с сверхвысокой чувствительностью, и соответствующее устройство.

Прочие признаки изобретения определены в соответствующих зависимых пунктах прилагаемой формулы.

Некоторые варианты осуществления изобретения раскрыты далее более подробно, в качестве примеров, со ссылками на прилагаемые чертежи. Следует отметить, что варианты осуществления изобретения и их признаки можно комбинировать друг с другом в границах объема изобретения.

Перечень чертежей

На фиг. 1 представлена схема биосенсорного контура на базе плазмонно-фотонного ИМЦ.

На фиг. 2, 3 и 4 представлены вид в аксонометрии, разрез и вид сбоку, соответственно, гибридного щелевого плазмонно-фотонного волновода (ГЦПФВ), используемого в плазмонной секции сенсора, и термооптические фазорегуляторы (нагреватели).

На фиг. 5 и 6 показаны вид в аксонометрии и схематичный вид сбоку, соответственно, тонкопленочного интерфейса между фотонным волноводом и тонкопленочным плазмонным волноводом (ТППВ), используемым в плазмонной секции сенсора.

На фиг. 7 показан спектральный сдвиг резонансного пика ИМЦ-сенсора, имеющего ССД 1164 нм, тогда как на фиг. 8 и 9 изображен первый и второй коэффициенты (множители) уравнения (1), используемого для измерения оптической чувствительности биосенсора.

На фиг. 10 представлено схематичное изображение конфигурации многоканального биосенсора, использующего мультиплексированные ИМЦ-сенсоры, оптические фильтры и МПДВ для параллелизации оптических сигналов (длин волн). Каждая оптическая длина волны используется единственным ИМЦ-сенсором.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения

Далее будет более подробно описан вариант осуществления контура. Устройство согласно изобретению содержит оптический интерферометрический

биосенсор, в частности типа интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), который использует фотонные Si_3N_4 -волноводы и плазмонные волноводы нанометрического масштаба, планарно интегрированные на КМОП-чипе. Способ согласно изобретению включает в себя детектирование химических и/или физических величин посредством использования известного изменения показателя преломления, имеющего место в секции интерферометра, соответствующей плазмонному волноводу, когда на нем фиксируется тестируемый аналит или газ. Дополнительный ИМЦ, например второй оптический интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ2), используется, вместе с оптическими фазорегуляторами, в качестве регулируемого оптического аттенюатора (POA), а автономные фазорегуляторы включены в одну, в частности в нижнюю, ветвь интерферометра, чтобы оптимальным образом сбалансировать сенсор и достичь требуемой чувствительности измерений. Конструкция сенсора сочетается с недорогими материалами и процессами изготовления, делая возможным массовое производство.

На фиг. 1 показан интегрированный сенсорный контур, который содержит фотонные волноводы, использующие полосу 303 (фиг. 3), 603 (фиг. 6) из нитрида кремния с высоким показателем преломления, расположенную между оксидной подложкой 302 (фиг. 3), 602 (фиг. 6) из SiO_2 с низким показателем преломления и оксидным покрывающим слоем 304 (фиг. 3), 606 (фиг. 6) из низкотемпературного оксида с низким показателем преломления. Указанный контур дополнительно содержит оптические структуры 101, 110 связи, расположенные на обоих концах указанного сенсора и действующие в качестве оптических средств ввода/вывода. Он также содержит оптический расщепитель и оптический объединитель для оптического расщепления на первом разветвителе 102 первого ИМЦ-сенсора и оптического объединения на втором разветвителе 109 первого ИМЦ-сенсора 112. Можно использовать для этой цели Y-разветвитель или многомодовый интерференционный разветвитель.

Указанный контур дополнительно содержит POA 111, в качестве которого используется дополнительный (фактически второй) ИМЦ, встроенный в первый ИМЦ и использующий оптический расщепитель 105 и оптический объединитель 108 для оптического расщепления на первом разветвителе второго ИМЦ и оптического объединения на втором разветвителе второго ИМЦ.

Контур содержит, кроме того, термооптические фазорегуляторы 104, 106 для настройки фазы оптического сигнала в опорном плече каждого ИМЦ, т. е. первого сенсора 112 и второго POA 111. Термооптические фазорегуляторы сформированы

посредством осаждения поверх секции фотонного волновода двух металлических полос, параллельных одна другой и ориентированных вдоль направления распространения света.

В контуре имеется также плазмонный волновод 107, который сформирован в
5 верхней ветви 103 указанного первого ИМЦ и который пространственно ограничивает распространение света посредством его связывания в поверхностные плазмонные поляритоны (ППП) на границе раздела металл-аналит. Плазмонные волноводы могут быть выполнены с использованием благородных металлов, таких как золото (Au) или серебро (Ag), и недорогих металлов, таких как медь (Cu),
10 алюминий (Al), нитрид титана (TiN) или другой КМОП-совместимый металл. Плазмонные волноводы могут быть реализованы применением волноводов любого из двух следующих типов. Первым является так называемый тонкопленочный волновод, ТПВ, который содержит тонкую металлическую полосу, осажденную непосредственно на оксидный покрывающий слой с использованием полости,
15 сформированной посредством травления верхней оксидной оболочки и сердечника фотонного волновода из нитрида кремния только в этой секции, как показано на фиг. 5. Альтернативно, волновод может представлять собой так называемый "гибридный щелевой плазмонно-фотонный волновод" (ГЩПФВ), который содержит два параллельных металлических проводника, осажденных непосредственно
20 поверх предварительно заданной секции волновода без необходимости, как это проиллюстрировано фиг. 2, в полости или в дополнительных операциях обработки. В этом случае в процессе литографии в фотонном волноводе под металлическими полосами, создается разрыв, что не требует применения дополнительной маски или дополнительных операций обработки. Плазмонный щелевой волновод и фазорегуляторы могут быть осаждены непосредственно поверх фотонных
25 волноводов посредством единственной операции, , что даст еще более дешевую версию сенсора. Как следствие, отпадает травление фотонного волновода и требуется единственная операция осаждения единственного слоя металла, как это иллюстрируется фиг. 4. Значения расстояния между металлическими полосами, обозначенного, как W_{slot} (см. фиг. 3), а также длины и ширины металлических полос
30 могут быть заданы при разработке маски для изготовления сенсора, чтобы формировать ГЩПФВ и термооптический фазорегулятор (нагреватель) с использованием единственной маски. Для закачки света из фотонного волновода в щелевой плазмонный волновод и обратно в фотонный волновод используется
35 направленное взаимодействие (directional coupling). Для повышения эффективности

связи (взаимодействия) может также использоваться сужение на переднем и заднем концах щелевого плазмонного волновода по фиг. 2.

Таблица

| | | | | |
|--|-------------|--------------|--------------|---------------|
| | ССД: 100 нм | ССД: 200 нм | ССД: 300 | ССД: 1164 нм |
| Чувствительность (тонкопленочный) | 6392 нм/RIU | 12701 нм/RIU | 22133 нм/RIU | 162000 нм/RIU |
| | ССД: 110 нм | ССД: 210 нм | ССД: 330 | ССД: 1070 нм |
| Чувствительность (гибридн. щелевой) | 552 нм/RIU | 1037 нм/RIU | 1658 нм/RIU | 11792 нм/RIU |

5

Таблица показывает, насколько повысились чувствительности с увеличением ССД, измеренных для ТППВ и ГЦПФВ в оптимально настроенных ИМЦ (если не учитывать дисперсию материала).

Далее будут описаны фотонные и плазмонные волноводные компоненты.

10 Используемый в изобретении фотонный волновод, основанный на стехиометрической технологии Si_3N_4 , имеет в сечении размеры 360x800 нм и поддерживает две представляющие интерес волноводные фотонные моды на длине волны 1550 нм с ТМ поляризацией и с ТЕ поляризацией. Однако могут использоваться и другие размеры фотонного волновода, которые способны
15 поддерживать переход оптических мод в плазмонные волноводы.

Согласно двум аспектам настоящего изобретения используются интерфейсы фотоника/плазмоника, основанные на этой волноводной структуре и на указанных двух типах плазмонных волноводах. Первый соответствует переходу от фотонной к плазмонной моде на основе сценария сопряжения встык для тонкопленочных
20 плазмонных волноводах (ТПВ), как это проиллюстрировано фиг. 5 и 6, причем для него требуется свет с поляризацией ТМ. Второй интерфейс соответствует переходу, основанному на схеме направленного взаимодействия для гибридных щелевых плазмонных волноводах (ГЦПФВ) (см. фиг. 2, 3 и 4), для которых требуется свет с поляризацией ТЕ. В обоих случаях фотонная структура является прямоугольным
25 Si_3N_4 -волноводом с размерами, тщательно подобранными таким образом, чтобы одновременно обеспечить необходимый механизм взаимодействия и согласованность с ограничениями в отношении изготовления

Применительно к гибриднему щелевому волноводу используется механизм направленного взаимодействия, учитывающий гибридный характер применяемого
30 волновода. Этот гибридный волновод способен поддерживать моды, особенно

моды с распределениями поля как в его плазмонной, так и фотонной частях, которые, при правильной конструкции, способны проявлять квазичетную или квазинечетную симметрию. Тогда обмен мощностью может рассматриваться как результат биения этих двух мод. На фиг. 3 представлен разрез волновода этой конфигурации, который состоит из Si_3N_4 -волновода в форме шины (фотонная часть) и щелевого волновода на основе металла (плазмонная часть), расположенного над Si_3N_4 -волноводом. Между двумя волноводами (фотонным и плазмонным) имеется слой низкотемпературного оксида (LTO), действующий как оболочка фотонных волноводов и как разделитель для гибридного щелевого волновода.

Гибридный волновод способен поддерживать моды с распределением поля и в его плазмонной, и в его фотонной частях. Двумерный анализ собственных значений выдал все возможные комбинации геометрических параметров, при которых могут поддерживаться гибридные моды с четной и нечетной симметрией. После детального исследования была выбрана подходящая геометрическая схема (например, при $W_{\text{slot}} = 200$ нм, ширине Si_3N_4 : $w_{\text{SiN}} = 700$ нм и суммарной толщине LTO: $h_{\text{LTO}} = 660$ нм), при которой не только интересующие моды обладают необходимой симметрией, но и обеспечивается также малая длина взаимодействия. В этом контексте оценка приближенной длины взаимодействия, необходимой для эффективной закачки мощности из плазмонной в фотонную часть, составила около 7 мкм. Размеры могут варьироваться в зависимости от используемых средств моделирования и параметров.

Трехмерные (3D) электромагнитные моделирования методом конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD) были использованы с целью верификации результатов тонкой настройки геометрической схемы с одновременной минимизацией длины биений – и, следовательно, области наложения для взаимодействия – и максимизацией закачки мощности из фотонной в плазмонную часть и обратно. В этой геометрической 3D-модели интересующий гибридный волновод возбуждается фотонной TE модой, а Si_3N_4 -волновод прерывается при длине (L_c) 7 мкм. Этот разрыв, соответствующий плоскости А на фиг. 4, оказался полезным с точки зрения эффективности связи (взаимодействия), поскольку он предотвращает любую небольшую утечку мощности к фотонной части. Согласно FDTD-моделированиям, такая гибридная конфигурация способна эффективно закачивать свет из фотонной в плазмонную часть и обратно, причем при использовании в качестве металла золота эффективность закачки может достигать 68 %. Для согласования фотонной моды оптического волновода с модой плазмонного волновода используются постепенные сужения в фотонной части.

Тот же конструктивный подход может быть реализован при использовании КМОП-металлов для компонента, образующего гибридный щелевой волновод. Поскольку единственной частью, которая была модифицирована для этой цели, является металлический щелевой волновод, был повторен представленный выше

5 двухступенчатый анализ: 2D-гибридная структура, сходная со структурой, проиллюстрированной на фиг. 2, была проанализирована методом анализа собственных мод. Были детектированы две моды с четной и нечетной симметрией, и была вычислена необходимая длина взаимодействия. Затем, с использованием

10 трехмерной FDTD-модели, была промоделирована волноводная структура в целом, чтобы оценить эффективность закачки из фотонной в плазмонную часть и обратно. Как и ожидалось, при возбуждении фотонной части этой гибридной структуры интересующей модой Si_3N_4 с TE поляризацией и прерывании Si_3N_4 -волновода при

15 достижении длины $L_c = 6$ мкм, свет может эффективно закачиваться из фотонной в плазмонную часть с эффективностями по мощности, составляющими по меньшей мере 60 % при использовании Al и 74 % при использовании Cu.

Согласно одному аспекту изобретения, в котором в качестве сенсорного плазмонного волновода используется ГЩПФВ, плазмонный волновод и нагреватели в сенсорном чипе могут быть одновременно осаждены на одном и том же уровне

20 стопки материалов в чипе в качестве последней стадии процесса изготовления в единственном слое металла, упростив, тем самым, изготовление сенсора и понизив его стоимость. Следует отметить, что разделяющий оксидный слой остается одинаковым для ГЩПФВ и структур нагревателей.

В этой конфигурации интерфейса фотоника/плазманика для тонкопленочного волновода, показанного на фиг. 5 и 6, механизм связи (взаимодействия) между

25 фотонным и плазмонным волноводами основан на пространственном согласовании двух интересующих мод. С этой целью была принята схема сопряжения встык применительно к фотонному Si_3N_4 -волноводу и плазмонной тонкопленочной структуре на базе Au. Две волноводные структуры локализуют таким образом, что уровень входа одной из них совпадает с уровнем выхода другой. Процесс

30 разработки направлен на определение точных геометрических параметров каждого волновода, чтобы свет мог эффективно проходить из фотонной в плазмонную часть, и наоборот. С этой целью сначала два волновода были проанализированы по отдельности в рамках 2D-анализа собственных значений. После выбора двух собственных мод, представляющих интерес, посредством их взаимного

35 согласования с точки зрения поляризации (для чего требуется ТМ поляризация) и распределения поля, был использован параметрический анализ, основанный на

вычислении интегралов перекрытия мощностей, чтобы получить первую индикативную оценку возможности этой конфигурации по зачке мощности. Эта оценка была верифицирована на втором этапе посредством 3D FDTD-моделирований.

5 Тонкопленочный плазмонный волновод содержит тонкую металлическую пленку, помещенную над слоем SiO_2 , и воду в качестве верхнего материала-оболочки, чтобы оптимально имитировать среду для биосенсорных приложений. Исследование было начато с 2D-анализа собственных значений этого плазмонного компонента. Данная конфигурация способна поддерживать плазмонную моду, сконцентрированную, в основном, на границе раздела металл-оболочка, 10 характеристики которой сильно зависят от геометрии металлической полосы и материала оболочки. На фиг. 5 и 6 иллюстрируется геометрия этого волновода на виде в аксонометрии и на виде сбоку.

Применительно к интерфейсу фотоника/плазмоника фотонный Si_3N_4 - 15 волновод был проанализирован отдельно, чтобы исследовать характеристики интересующей фотонной ТМ моды, а именно ее поляризацию и профиль поля. Затем, с учетом обоих анализов собственных значений – применительно к Si_3N_4 - и к тонкопленочному волноводам, – геометрические конфигурации для обоих компонентов были тщательно подобраны так, чтобы обеспечить согласование мод, 20 как пространственно, так и с точки зрения поляризации. На следующем этапе эти две волноводные структуры были скомбинированы в конфигурацию с сопряжением встык подобно конфигурации по фиг. 5 и 6. 3D-модель единственного перехода от фотонного к плазмонному компоненту была проанализирована посредством 3D FDTD-моделирований. Было показано, что при правильном подборе размеров двух 25 волноводов можно максимизировать передачу мощности из фотонной в плазмонную моду, и наоборот. Более конкретно, после проведения детального исследования с точки зрения вычисления интегралов перекрытия мощностей размеры поперечных сечений двух интересующих волноводов были выбраны составляющими 360 нм x 7,5 мкм и 100 нм x 7 мкм для Si_3N_4 и металлической 30 пленки, соответственно. Затем, чтобы максимизировать эффективность связи (взаимодействия), была исследована их точная локализация в зоне интерфейса при вертикальном смещении h_{offset} и поперечном смещении L_{offset} (см. фиг. 6). Численные моделирования показали, что для вертикального смещения порядка 400 нм в случае использования золота в качестве тонкопленочного металла может быть достигнута 35 максимальная эффективность связи около 64 %.

Чтобы облегчить массовое производство биосенсорного чипа, вместо золота можно использовать КМОП-металлы. Результаты показали, что эффективность связи (доля света, закачиваемого из фотонной в плазмонную часть) может достигать 60 % и 68 % при использовании Al и Cu, соответственно. Вместо них могут использоваться TiN или другие КМОП-совместимые соединения металлов.

Аналогично гибриднему волноводу и в качестве завершения этого интерфейса фотоника/плазмоника, был разработан, с применением известной технологии, сужающийся участок фотонной части, чтобы перестроить ширину Si₃N₄ с 800 нм до 7,5 мкм.

Другими примерами оксидных материалов для верхней оболочки фотонного волновода для всех аспектов настоящего изобретения являются LTO, SiO₂, SU8 или другие оксиды со схожими оптическими свойствами.

Весь сенсор со всеми рассмотренными компонентами может быть монолитно интегрирован на единственном чипе посредством использования больших КМОП-пластин и специализированных установок по производству интегральных схем, чтобы понизить стоимость каждого сенсорного чипа при обеспечении прорывного уровня чувствительности. Альтернативно, согласно одному аспекту изобретения, предусматривающему использование для плазмонных волноводов золота или серебра, необходим дополнительный процесс осаждения металла за пределами КМОП-производств или в специально образованных секциях КМОП-производств, которые могут осуществлять процессы осаждения золота или серебра.

Что касается методологии конструирования сенсора, в соответствии с изобретением индекс эффективности плазмонного волновода зависит от концентрации в тестируемой жидкости или тестируемом газе интересующих веществ, которые связываются с плазмонным волноводом с помощью известных методов функционализации поверхности. Изменение индекса эффективности плазмонного волновода приводит к смещению спектральных резонансов ИМЦ-сенсора. Смещение резонанса в зависимости от изменения показателя преломления жидкости определяет чувствительность биосенсора. Объемная чувствительность сенсора рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{bulk} = \frac{d\lambda}{dn_{liq}} = \frac{d\lambda}{dn_{eff}} \cdot \frac{dn_{eff}}{dn_{liq}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны оптического сигнала, n_{liq} – показатель преломления поданной жидкости, а n_{eff} – индекс эффективности моды в плазмонном волноводе (см. работу Xu Sun et al. "High Sensitivity liquid refractive index sensor based on a Mach-Zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide" ("Высокочувствительный

жидкостный сенсор показателя преломления на основе интерферометра Маха-Цендера с двухщелевым гибридным плазмонным волноводом"), OSA Optics Express, Vol. 3, No 20, 2015).

5 Плазмонные волноводы максимизируют второй множитель, поскольку основная часть электрического поля оптической моды распространяется на границе раздела вода-металл плазмонного волновода, тогда как в сенсорных фотонных волноводах пространственное перекрытие между затухающим полем оптической моды и тестируемым аналитом намного меньше.

10 Первый множитель уравнения (1) максимизируется посредством оптимальной настройки интерферометра за счет использования вариантов осуществления, содержащих все рассмотренные выше компоненты. Конкретно, поскольку оптические пути между ветвями ИМЦ задаются для определенного ССД, оптимизация настройки сенсора достигается, как показано на фиг. 1, использованием нагревателя 1 (обозначенного, как 104) и нагревателя 2
15 (обозначенного, как 106) в ИМЦ2 111.

Нагреватель 1 (см. фиг. 1) введен, чтобы оптимизировать оптический путь в нижней ветви таким образом, чтобы относительное изменение фазы между светом в верхней и нижней ветвях было кратно 2π радианам для определенной рабочей длины волны. Одновременно нагреватель 1 используется для настройки разности
20 оптических путей с учетом погрешностей, возникающих в процессе изготовления. Настройка нагревателя обеспечивается подачей электрической мощности (например, постоянного напряжения) на обе металлические полосы нагревателя 1. Как это известно специалисту в данной области, требуется также измеритель оптической мощности для мониторинга разности оптических путей между верхней и
25 нижней ветвями ИМЦ.

Нагреватель 1 (см. фиг. 1) введен в ИМЦ 2, чтобы оптимизировать оптическую мощность в нижней ветви таким образом, чтобы оптические потери в этой ветви были равны оптическим потерям в верхней ветви. ИМЦ 2 функционирует в качестве регулируемого оптического аттенюатора (POA), который используется,
30 чтобы сбалансировать оптические мощности в двух ветвях ИМЦ. Это достигается подачей электрической мощности (например, постоянного напряжения) на обе металлические полосы нагревателя 2. Равные потери в обеих ветвях приводят к максимальному коэффициенту поглощения интерферометра (как это известно специалисту в данной области), что эффективно повышает чувствительность
35 (разрешение) сенсорных измерений.

После того как главные составляющие постоянных напряжений нагревателя 1 и нагревателя 2 для балансирования интерферометра будут идентифицированы, должна быть проведена тонкая настройка этих двух постоянных напряжений итеративным методом, чтобы полностью оптимизировать настройку интерферометра. Когда это будет выполнено, на выходе 110 ИМЦ1 будет получена резонансная длина 701 волны. Затем способами, известными из уровня техники, например с помощью жидкостных камер или вручную, с плазмонными волноводами 107 связывают тестируемый аналит и измеряют на выходе сенсора резонанс интерферометра и сдвиг резонанса по оптическому спектру (показанный на фиг. 7). Сдвиг 702-705 резонанса зависит от изменения показателя преломления тестируемого аналита. Применительно к таким измерениям на фиг. 8 и 9 построены первый и второй множители уравнения (1), соответственно, чтобы получить значения суммарной чувствительности сенсорного устройства.

С применением данного способа и уравнения (1) для сенсорного контура с ССД 1164 нм была достигнута, за счет привлечения средств численного моделирования, чувствительность, равная 162000 нм/RIU при использовании ТПВ и 11792 нм/RIU при использовании ГЦПФВ. Меньшие или даже большие значения ССД, т. е. меньшие или большие чувствительности могут быть достигнуты посредством обеспечения соответствующих разностей оптических путей и осуществления того же способа оптимизации раскрытого сенсора.

В дополнение, также предложен способ измерений с использованием сенсора. Чтобы измерить изменение показателя преломления в раскрытом устройстве можно использовать три различных варианта измерений.

Первый вариант состоит в измерении спектрального сдвига резонанса в первом ИМЦ с использованием перестраиваемого лазера и измерителя мощности: перестраиваемый лазер требуется в качестве оптического источника на входе сенсора, а измеритель мощности требуется на выходе сенсора. Изменение спектрального отклика сенсора после подачи аналита на плазмонный волновод будет выявлять спектральный сдвиг резонанса, как это известно специалисту в данной области.

Другой вариант состоит в измерении спектрального сдвига резонанса в первом ИМЦ с использованием широкополосного оптического источника и анализатора оптического спектра: широкополосный оптический источник, такой как источник белого света, СД или массивы СД, или широкополосный источник любого другого типа необходим в качестве оптического источника на входе сенсора, а спектроанализатор требуется установить на выходе сенсора. Изменение

спектрального отклика сенсора после подачи аналита на плазмонный волновод будет выявлять спектральный сдвиг резонанса, как это известно специалисту в данной области.

5 Следующий вариант состоит в измерении фазового сдвига в плазмонном волноводе с использованием источника одной длины волны. Для тех же значений ССД, что и указанные выше, можно непосредственно скоррелировать изменение показателя преломления с фазовым сдвигом посредством ввода света с единственной длиной волны через вход сенсора и измерения оптической мощности на выходе первого ИМЦ с помощью измерителя мощности. Синусоидальные
10 флуктуации мощности во времени определяют фазовый сдвиг в радианах, как это известно специалисту в данной области.

Другой аспект изобретения предусматривает мультиплексную конфигурацию ИМЦ и оптические фильтры, селективные по длинам волн, чтобы обеспечить
15 одновременное детектирование ряда веществ, используя один и тот же чип. Такой подход именуется также многоканальным детектированием. Как показано на фиг. 10, чтобы осуществлять детектирование трех веществ одновременно, формируется комбинация на основе описанного варианта.

Как видно из фиг. 10, три вложенных ИМЦ-сенсора, использующие описанные выше варианты осуществления, содержат три верхних ветви с
20 плазмонными волноводами 1007 и три копии нижних ветвей с нагревателями 1005 и с РОА 1008, как это описано применительно к предыдущим вариантам. Общий оптический расщепитель и общий оптический объединитель на входе и выходе чипа соответственно обслуживают все три ИМЦ. Каждый ИМЦ-сенсор использует отдельную длину волны из трех длин волн, которые одновременно вводятся в
25 биосенсор через оптический расщепитель 1003. Каждый ИМЦ содержит также оптические фильтры 1006 на входе его ветвей и за входным расщепителем, чтобы выбирать из входных оптических сигналов свою рабочую длину волны. В качестве оптических фильтров можно использовать кольцевые резонаторы, известные из уровня техники, или другие оптические фильтры со схожей функциональностью.

30 Другой аспект этого варианта осуществления состоит в использовании, вместо общего входного расщепителя, МПДВ-мультиплексора и таких оптических фильтров, как решетка на основе массива волноводов, мультиплексоры на базе брэгговской решетки, или другого МПДВ-мультиплексора со схожей функциональностью.

35 С учетом требований пользователей и площади чипа на единственном чипе может быть интегрировано большее количество сенсорных каналов.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство, содержащее по меньшей мере один оптический интерферометрический сенсор, в частности сенсор (ИМЦ1) на основе первого интерферометра (211) Маха-Цендера с большим свободным спектральным диапазоном (ССД), составляющим от десятков нанометров до многих сотен нанометров, причем предусмотрен плазмонный волновод (107), в частности тонкопленочный или гибридный щелевой волновод, в качестве преобразовательного элемента, планарно интегрированного на фотонных Si₃N₄-волноводах, причем устройство дополнительно содержит:

- набор фотонных волноводов (103) на основе полосы (303, 603) из нитрида кремния с высоким показателем преломления, расположенный между оксидной подложкой с низким показателем преломления, например из SiO₂, и оксидным покрывающим слоем с низким показателем преломления, например из низкотемпературного оксида;

- оптические структуры (102, 109) связи, расположенные на обоих концах сенсора и действующие в качестве оптических средств ввода/вывода;

- оптический расщепитель (102) и оптический объединитель (109) для оптического расщепления на первом разветвителе (102) указанного сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера и для оптического объединения на втором разветвителе (109) указанного сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера, в частности Y-разветвителе, направленном разветвителе или многомодовом интерференционном разветвителе, и

- причем плазмонный волновод (107) сформирован в верхней ветви (103) указанного сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера и пространственно ограничивает распространение света посредством его связывания в поверхностные плазмонные поляритоны на границе раздела металл-аналит;

отличающееся тем, что содержит:

- дополнительный оптический интерферометрический элемент, в частности второй интерферометр (ИМЦ2) типа Маха-Цендера, расположенный в опорном плече указанного первого сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера, причем оба указанных интерферометра (ИМЦ1, ИМЦ2) Маха-Цендера содержат термооптические нагреватели (104, 106) для оптимальной настройки указанных интерферометров (ИМЦ1, ИМЦ2) в качестве регулируемого оптического аттенюатора;

- общий чип (112),

- регулируемый оптический аттенюатор (POA) с указанным дополнительным интерферометром (ИМЦ2) Маха-Цендера, выполненный с возможностью использования указанного оптического расщепителя и оптического объединителя для оптического расщепления на первом разветвителе указанного дополнительного интерферометра (ИМЦ2) Маха-Цендера и для оптического объединения на втором разветвителе указанного дополнительного интерферометра (ИМЦ2) Маха-Цендера;

5

- набор термооптических фазорегуляторов (104, 106) для настройки фазы оптического сигнала в опорном плече каждого из указанных интерферометров (ИМЦ1, ИМЦ2-POA) Маха-Цендера; при этом указанные термооптические фазорегуляторы сформированы посредством осаждения поверх секции фотонного волновода двух металлических полос, параллельных одна другой и ориентированных вдоль направления распространения света.

10

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что указанный один оптический интерферометрический сенсор состоит из сенсора (ИМЦ1) на основе первого интерферометра (211) Маха-Цендера с большим ССД, составляющим от десятков нанометров до многих сотен нанометров, причем указанный дополнительный оптический интерферометрический элемент состоит из второго интерферометра (ИМЦ2) типа Маха-Цендера, расположенного в указанном опорном плече указанного сенсора (ИМЦ1) на основе первого интерферометра.

15

20

3. Устройство по п. 1 или п. 2, отличающееся тем, что плазмонные волноводы выполнены с использованием благородных металлов, а именно золота (Au) или серебра (Ag).

25

4. Устройство по п. 1 или п. 2, отличающееся тем, что плазмонные волноводы выполнены с использованием металлов низкой стоимости, таких как медь (Cu), алюминий (Al), или таких соединений, как нитрид титана (TiN) или другой КМОП-совместимый металл.

30

5. Устройство по одному из предыдущих пунктов, отличающееся тем, что указанный плазмонный волновод (107) представляет собой тонкопленочный или гибридный щелевой волновод.

35

6. Устройство по п. 5, отличающееся тем, что каждый из плазмонных волноводов выполнен в виде волновода, состоящего из так называемого

тонкопленочного волновода, который содержит тонкую металлическую полосу, осажденную непосредственно на оксидный покрывающий слой с использованием полости, сформированной травлением верхней оксидной оболочки и сердечника фотонного волновода из нитрида кремния только в соответствующей секции.

5

7. Устройство по п. 5, отличающееся тем, что каждый из плазмонных волноводов выполнен в виде так называемого гибридного щелевого плазмонно-фотонного волновода (ГЩПФВ), который содержит два параллельных металлических проводника (202, 305), осажденных непосредственно поверх предварительно заданной секции (405) волновода без необходимости в полости или в дополнительных операциях обработки, причем в фотонном волноводе (303, 403) под металлическими полосами создан разрыв в процессе литографии без применения дополнительной маски или дополнительных операций обработки, при этом плазмонный щелевой волновод (202, 107) и фазорегуляторы (104) осаждены непосредственно поверх фотонных волноводов (103, 303, 403) посредством единственной операции осаждения единственного слоя металла без травления фотонного волновода, причем значения расстояния (W_{slot}) между металлическими полосами (305), как и длина и ширина металлических полос заданы при разработке маски для изготовления сенсора, чтобы сформировать ГЩПФВ и термооптический фазорегулятор в виде нагревателя (104) с использованием единственной маски, при этом для закачки света из фотонного волновода (101, 303, 403) в плазмонный щелевой волновод (202, 305, 405) и обратно в фотонный волновод (103, 303, 403) предусмотрена направленная связь, при этом для повышения эффективности указанной связи предусмотрено сужение на переднем и заднем концах плазмонного щелевого волновода (202, 305, 405).

8. Устройство по одному из предыдущих пунктов, отличающееся тем, что указанная полоса (303, 603) плазмонных волноводов из нитрида кремния с высоким показателем преломления расположена между подложкой из SiO_2 , представляющей собой оксидную подложку с низким показателем преломления, и подложкой из низкотемпературного оксида, представляющей собой оксидный покрывающий слой с низким показателем преломления.

9. Устройство по п. 1 с учетом п. 8, отличающееся тем, что указанная полоса (303, 603) из нитрида кремния с высоким показателем преломления расположена

35

между соответствующими подложками, выполненными из других оксидов, имеющих схожий показатель преломления и процесс изготовления.

10. Устройство по одному из предыдущих пунктов, отличающееся тем, что оно выполнено с использованием других КМОП-совместимых фотонных материалов, таких как Si и SOI (кремний на изоляторе), TiO_2 .

11. Устройство по одному из п.п. 1-9, отличающееся тем, что оно выполнено с использованием других КМОП-совместимых металлических материалов, таких как Al, Cu, TiN, или их соединений.

12. Устройство по одному из п.п. 1-6, отличающееся тем, что оно содержит двунаправленные вертикальные оптические решеточные элементы связи, расположенные вместо других оптических средств ввода/вывода и расщепителя-объединителя указанного первого сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера для одновременного функционирования в качестве вертикальных средств ввода/вывода и расщепителя-объединителя указанного первого сенсора (ИМЦ1) на основе интерферометра Маха-Цендера.

13. Прибор, содержащий массивы устройств по любому из предыдущих п.п. 1-7, для параллельного детектирования нескольких веществ на одном и том же чипе, отличающийся тем, что содержит несколько верхних ветвей с плазмонными волноводами и такие же копии нижних ветвей с нагревателями и регулируемые оптическими аттенюаторами (POA), причем на входе и выходе чипа расположены общий оптический расщепитель и общий объединитель, соответственно, для всех указанных интерферометров (ИМЦ) Маха-Цендера, причем каждый из интерферометров (ИМЦ) Маха-Цендера использует отдельную длину волны из равного количества длин волн, которые одновременно введены в биосенсор через оптический расщепитель, при этом каждый из интерферометров (ИМЦ) Маха-Цендера также содержит оптические фильтры на входе своих ветвей и за входным расщепителем для выбора своей рабочей длины волны из входных оптических сигналов, причем указанные оптические фильтры или другие оптические фильтры со схожей функциональностью, например решетки на основе массива волноводов, являются кольцевыми резонаторами.

14. Прибор по п. 13, отличающийся тем, что интегрированные оптические источники, в частности лазеры поверхностного излучения с вертикальным резонатором, светодиоды, широкополосные источники или другие оптические источники, и оптические фотодетекторы расположены на входах и выходах устройств, соответственно, при этом оптический источник и фотодетекторы интегрированы с использованием монтажа методом перевернутого кристалла или сращивания пластин, или присоединения кристалла к подложке выводами вверх, или эпитаксиального роста, над решеточным элементом связи или на одном уровне с фотонным волноводом.

10

15. Прибор по п. 13 или п. 14, отличающийся тем, что на входах и выходах устройств расположены массивы интегрированных оптических источников и оптических детекторов, при этом оптический источник и фотодетекторы интегрированы с использованием монтажа методом перевернутого кристалла или сращивания пластин, или присоединения кристалла к подложке выводами вверх, или эпитаксиального роста, над решеточным элементом связи или на одном уровне с фотонным волноводом.

15

16. Прибор по одному из предыдущих п.п. 13-15, отличающийся тем, что содержит вертикальные электрические связи, известные также как сквозные каналы в кремнии (through-silicon vias), которые подсоединены к термооптическим фазорегуляторам и обеспечивают возможность электрического управления ими посредством электронного контура, пространственно интегрированного на том же чипе.

20

17. Прибор по одному из предыдущих п.п. 13-16, отличающийся тем, что содержит дополнительный жидкостный канал, который закреплен на поверхности плазмонного волновода для обеспечения возможности протекания предварительно заданного раствора/аналита на плазмонном преобразовательном элементе.

25

18. Прибор по одному из предыдущих п.п. 7-11, отличающийся тем, что на поверхности плазмонного преобразователя сформированы дополнительные слои захвата для детектирования конкретных биологических и/или химических веществ и/или молекул.

30

35

19. Способ использования устройства или прибора по одному из предыдущих п.п. 1-12 или 13-18, соответственно, в котором в нижней ветви указанного сенсора (ИМЦ1) или его эквивалента в указанном массиве интерферометров (ИМЦ) Маха-Цендера формируют дополнительные нефункционализованные плазмонные волноводы одинаковых размеров, причем интересующий анализ направляют так, чтобы он протекал по этому дополнительному волноводу аналогично функционализированному волноводу в верхней ветви указанного сенсора (ИМЦ1), за счет чего устраняют нежелательные связывание или шум.

20. Способ использования устройства или прибора по одному из п.п. 1-12 или 13-18, соответственно, отличающийся тем, что дополнительно содержит шаги:

- оптимально настраивают указанные интерферометры (ИМЦ) в качестве регулируемого оптического аттенюатора посредством указанных термооптических нагревателей, входящих в состав обоих указанных интерферометров типа Маха-Цендера,

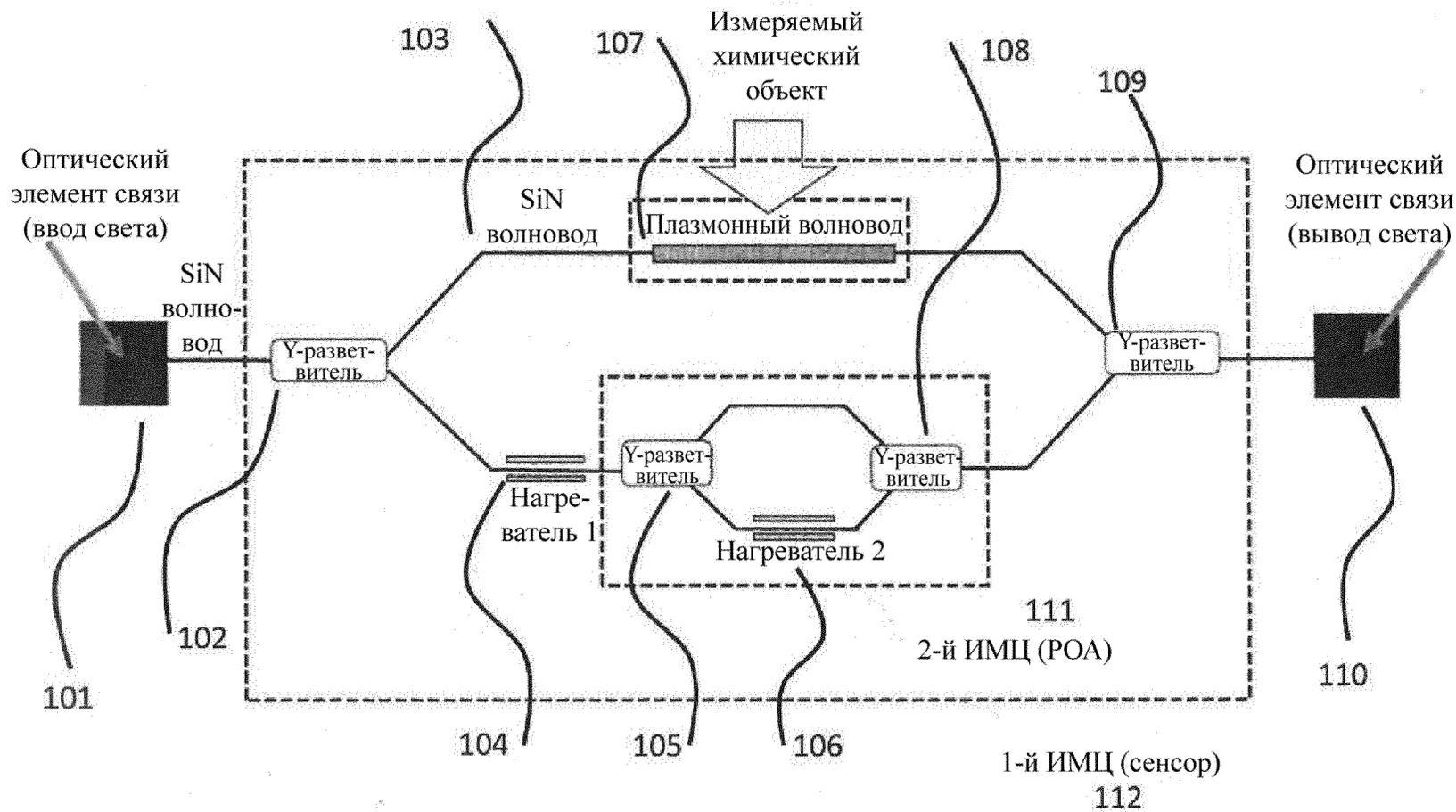
- используют оптический расщепитель и оптический объединитель для оптического расщепления на первом разветвителе указанного дополнительного второго интерферометра (ИМЦ2) Маха-Цендера посредством регулируемого оптического аттенюатора (РОА) с указанным дополнительным вторым интерферометром (ИМЦ2) Маха-Цендера, встроенным в указанный первый сенсор (ИМЦ1), и для оптического объединения на втором разветвителе указанного второго интерферометра (ИМЦ2) Маха-Цендера,

- настраивают фазу оптического сигнала в опорном плече каждого из указанных интерферометров (ИМЦ1, ИМЦ2-РОА) Маха-Цендера посредством указанных термооптических фазорегуляторов; поверх секции фотонного волновода осаждают две металлические полосы, параллельные одна другой и ориентированные вдоль направления распространения света, формируя тем самым термооптические фазорегуляторы;

- причем указанный дополнительный оптический интерферометр (ИМЦ2), встроенный в указанный первый оптический интерферометрический сенсор и имеющий в своем опорном плече термооптический фазорегулятор, функционирует в качестве регулируемого оптического аттенюатора (РОА), которым управляют посредством управляющего сигнала термооптического фазорегулятора,

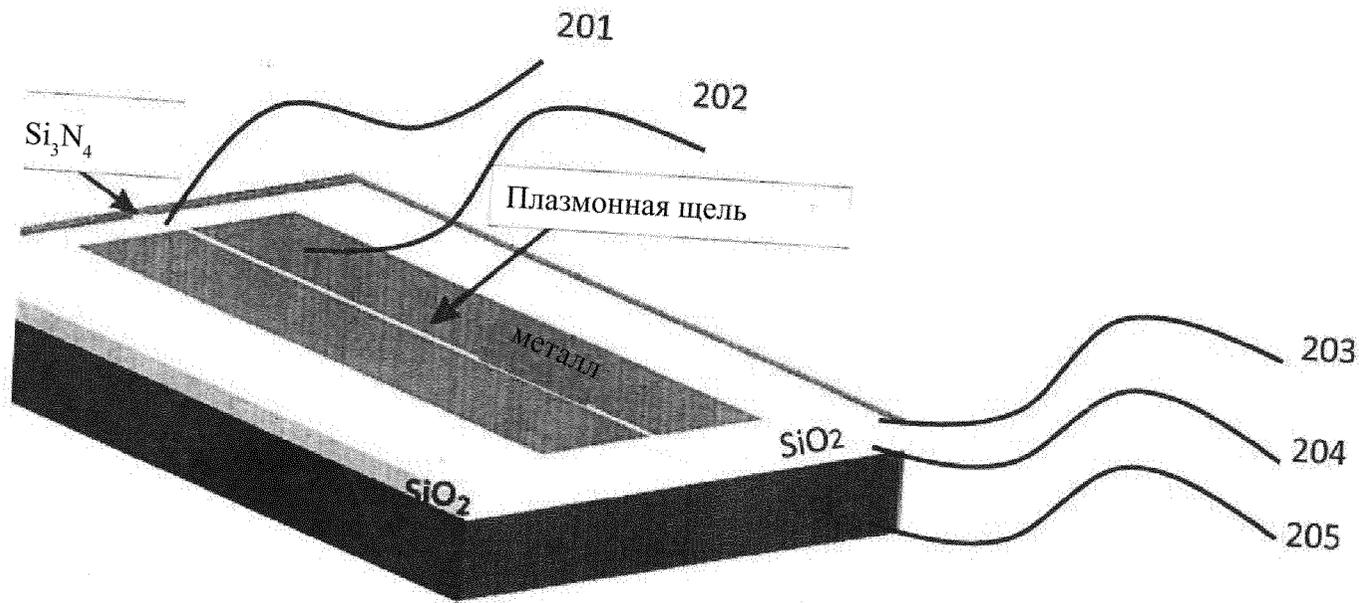
- при этом указанный регулируемый оптический аттенюатор (РОА) управляет интенсивностью сигнала в указанном опорном плече первого интерферометрического сенсора, тогда как указанный дополнительный

термооптический фазорегулятор в опорном плече первого интерферометрического сенсора обеспечивает возможность управления фазой пучка в указанном опорном плече, обеспечивая тем самым возможность управления фазой и амплитудой поля в опорном плече интерферометра (ИМЦ1), так что указанный
5 интерферометрический сенсор (ИМЦ1) может быть сбалансирован и настроен посредством электрических сигналов на требуемую рабочую точку.

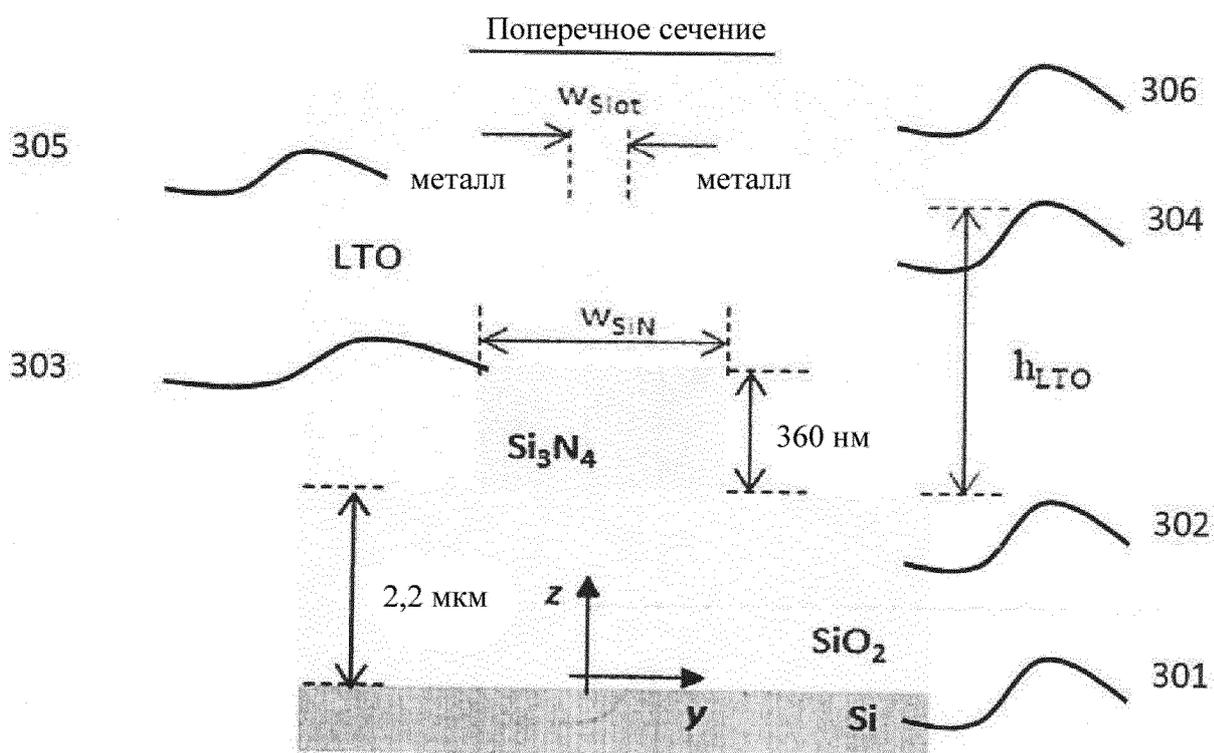


ФИГ. 1

1

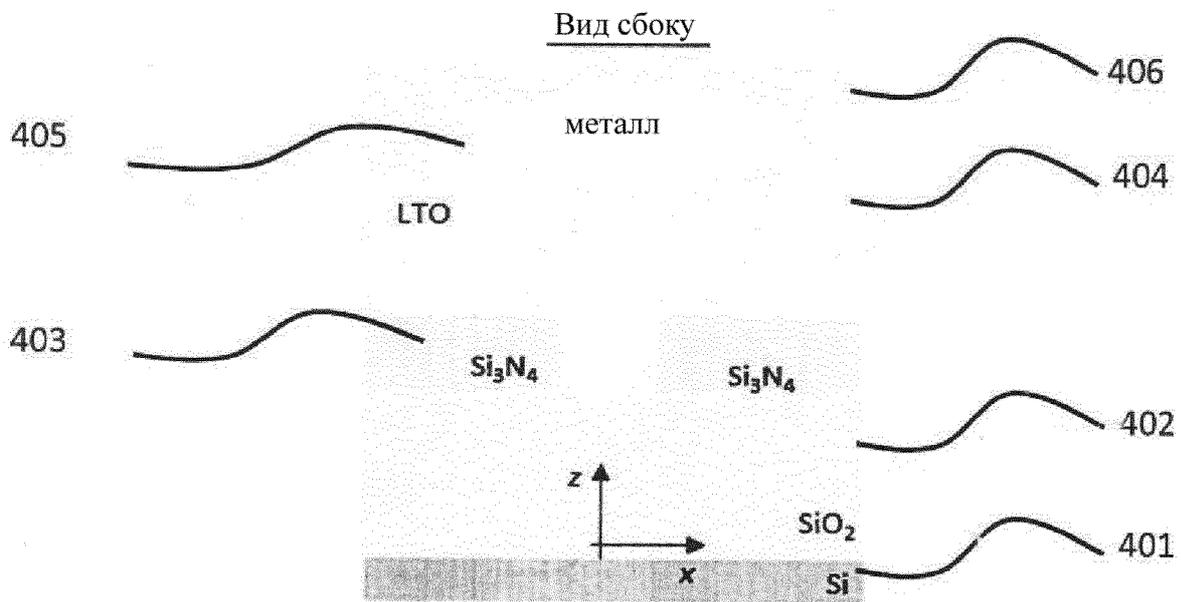


ФИГ. 2

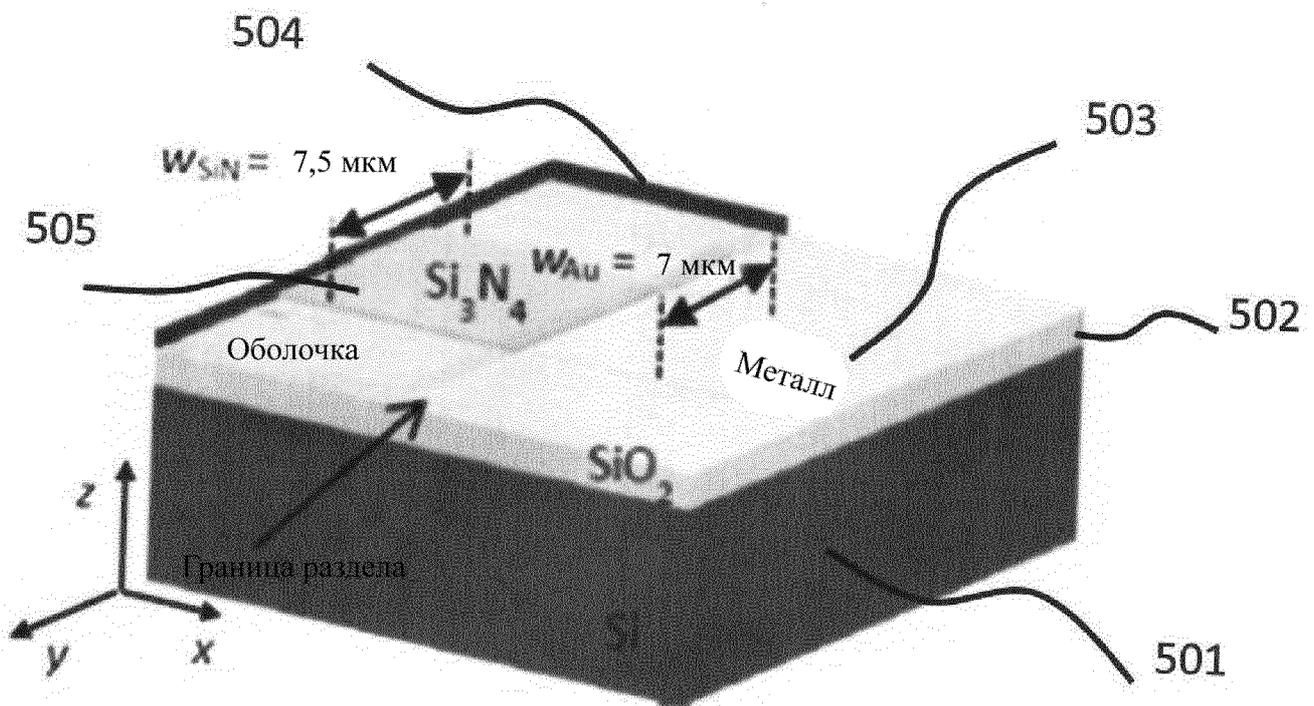


ФИГ. 3

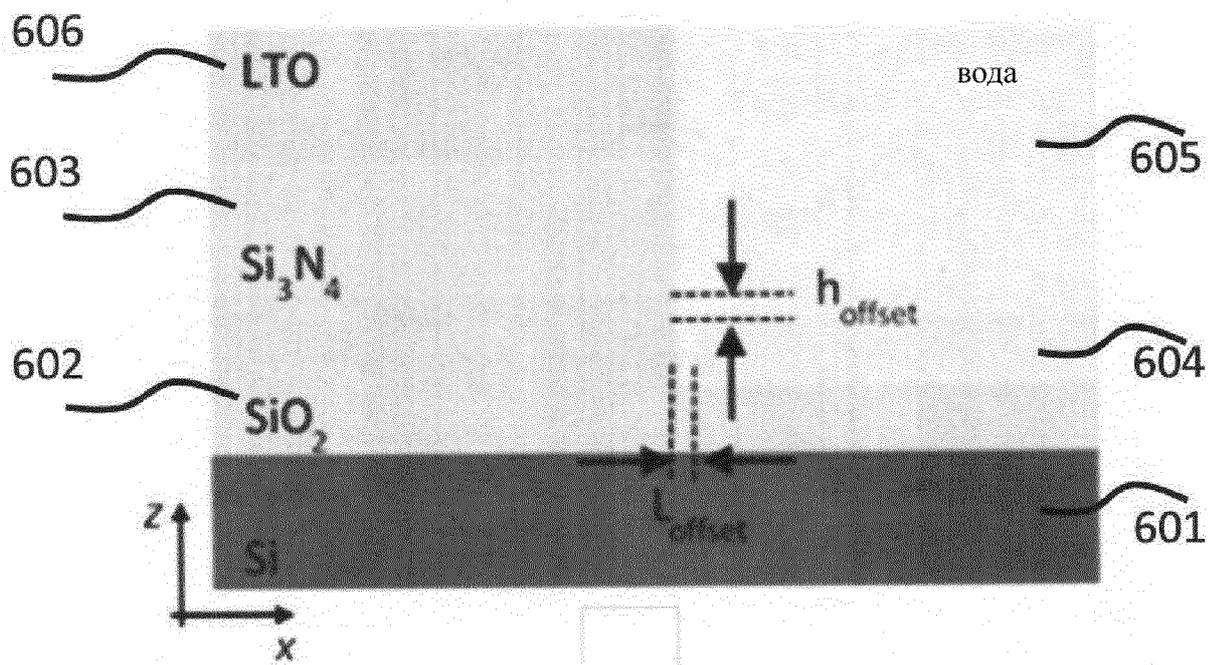
ЗАМЕНЯЮЩИЙ ЛИСТ ЧЕРТЕЖЕЙ В ОТВЕТ
НА УВЕДОМЛЕНИЕ ОТ 22.01.2020



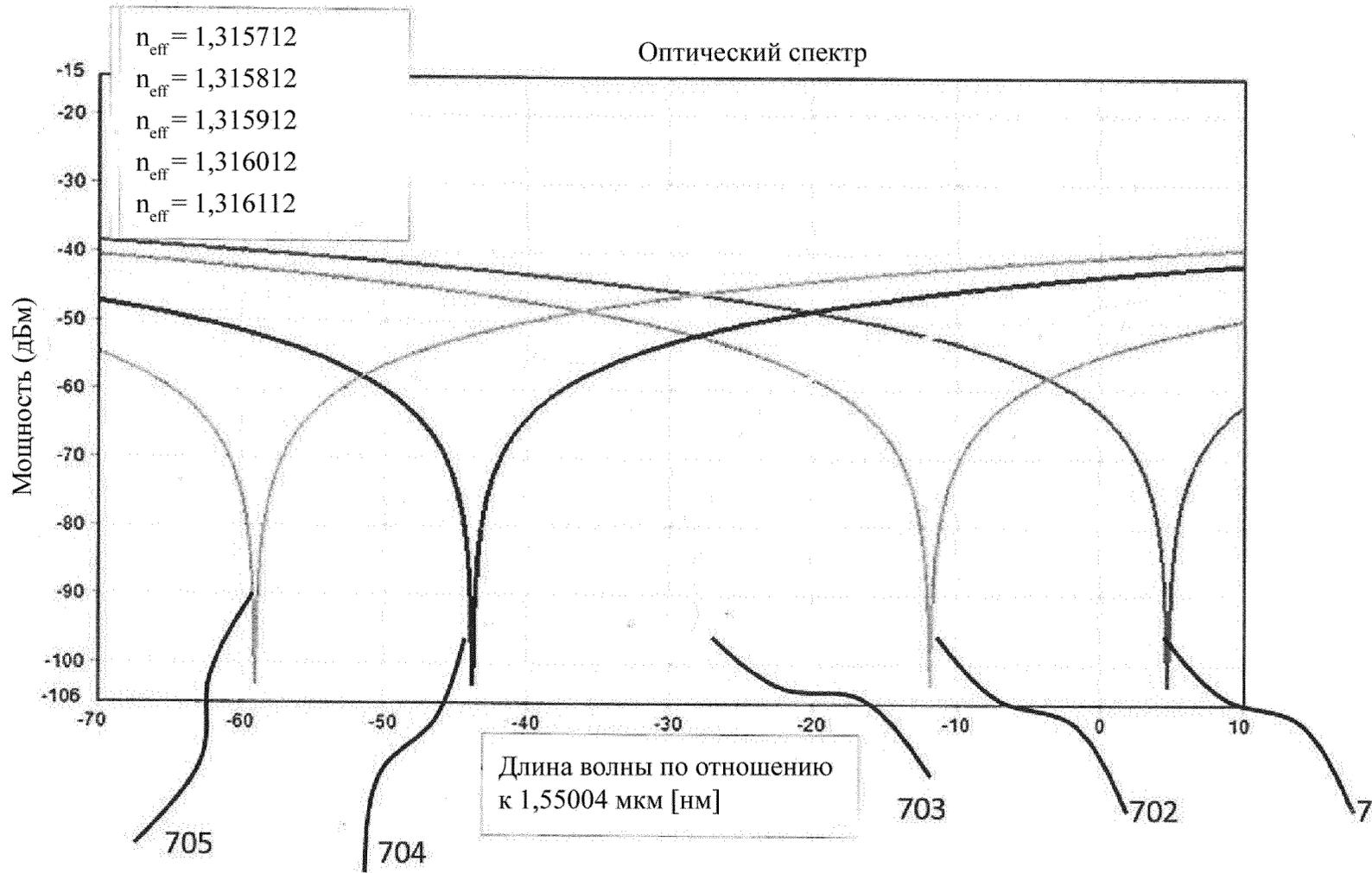
ФИГ. 4



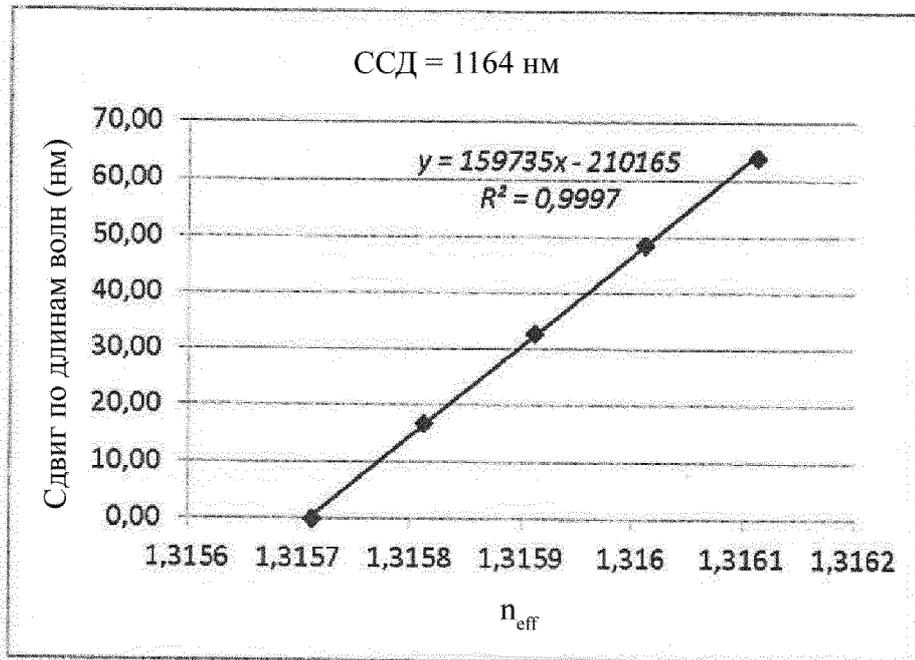
ФИГ. 5



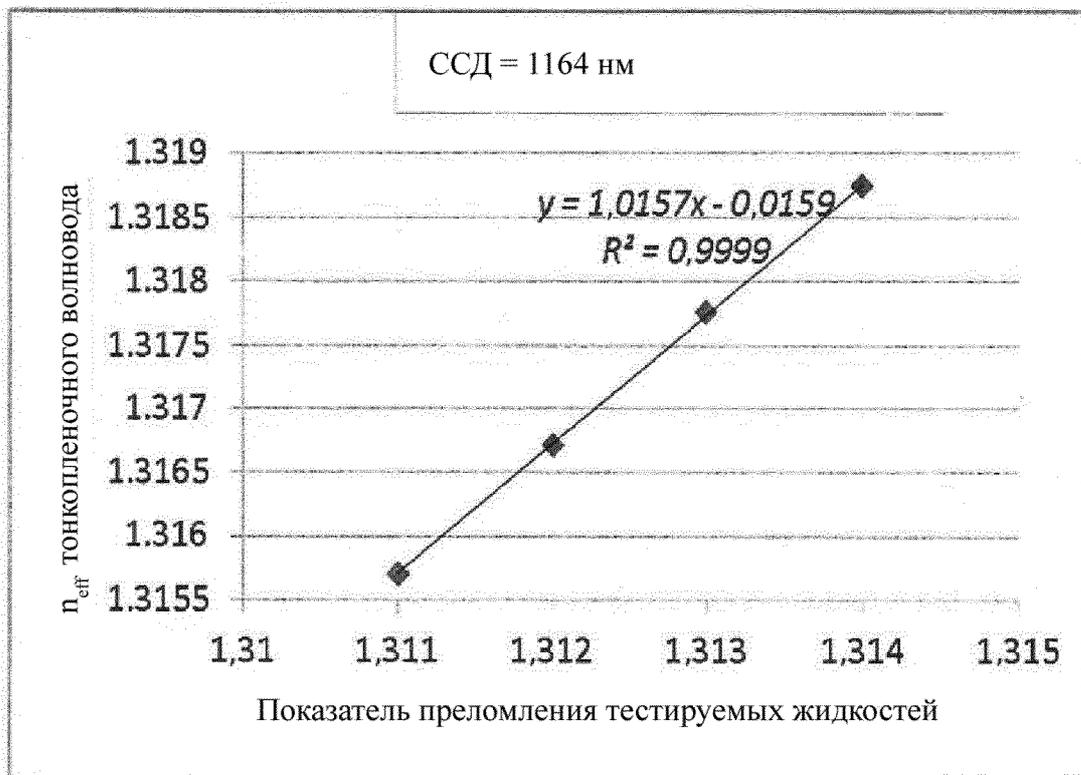
ФИГ. 6



ФИГ. 7

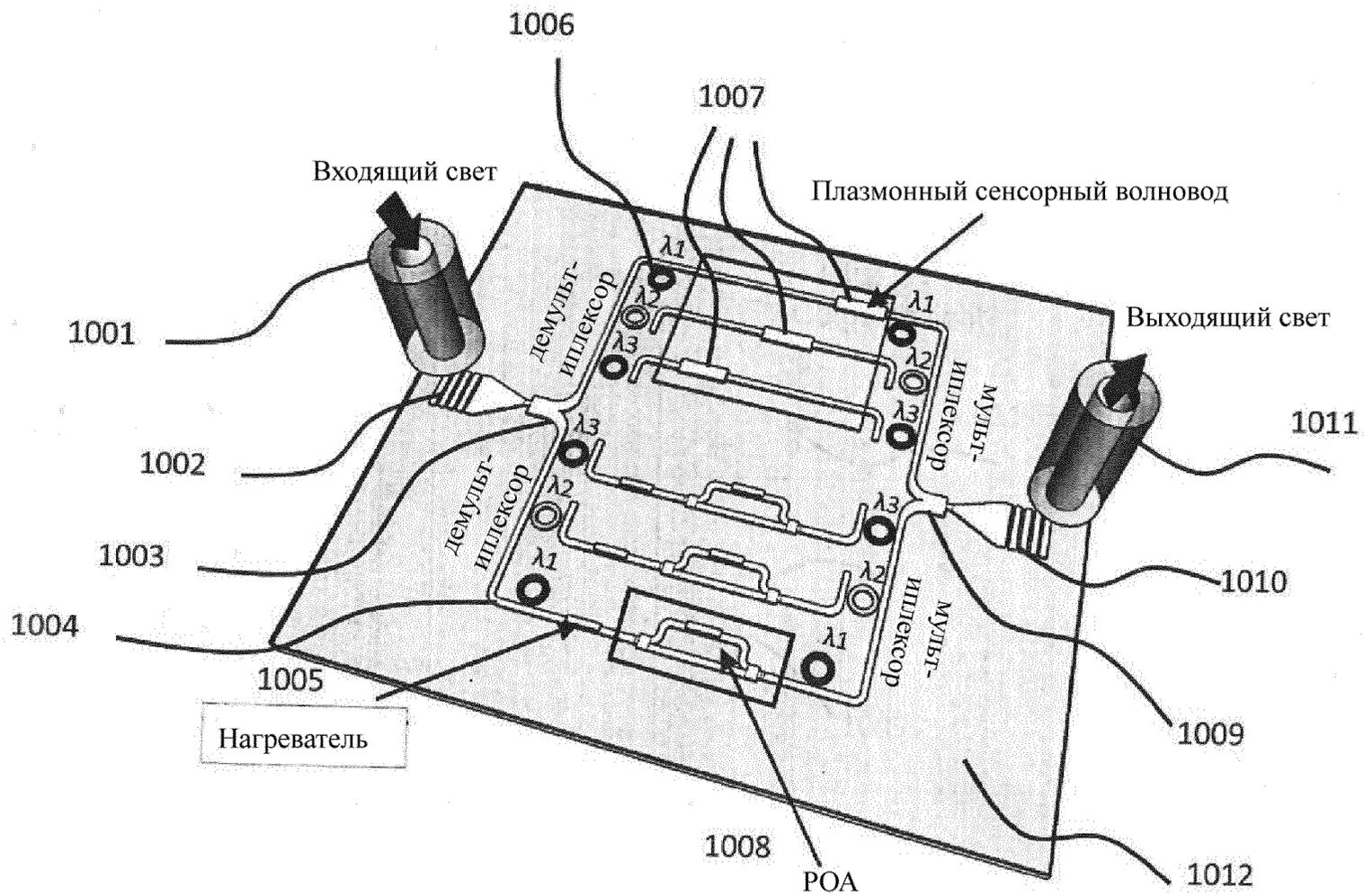


ФИГ. 8



ФИГ. 9

ЗАМЕНЯЮЩИЙ ЛИСТ ЧЕРТЕЖЕЙ В ОТВЕТ
НА УВЕДОМЛЕНИЕ ОТ 22.01.2020



ФИГ. 10