



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G02B 6/122* (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2017142390, 05.12.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.12.2017

Дата регистрации:  
19.12.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.12.2017

(45) Опубликовано: 19.12.2018 Бюл. № 35

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,  
Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное  
интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Сайгин Михаил Юрьевич (RU),  
Дьяконов Иван Викторович (RU),  
Страупе Станислав Сергеевич (RU),  
Калинкин Александр Александрович (RU),  
Кулик Сергей Павлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ)  
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2617455 C1, 25.04.2017. RU  
2016103433 A, 07.08.2017. US 20170102231 A1,  
13.04.2017. US 5786560 A1, 28.07.1998.

## (54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕЛИТЕЛЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ

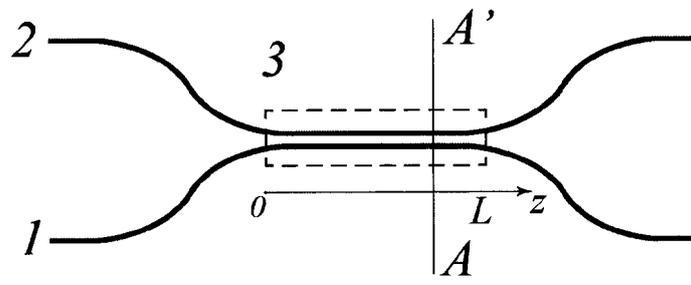
(57) Реферат:

Группа изобретений относится к интегральной оптике, а именно к способам изготовления сбалансированного делителя в схемах на основе волноводов, сформированных в объеме твердотельной заготовки импульсным лазерным излучением. Способ изготовления делителя в интегральной оптической схеме заключается в формировании в диэлектрической заготовке участка взаимодействия сближенных волноводов. Для этого используют заготовку из кварца и формируют в ее объеме волноводы линейным

размером поперечного сечения  $d=1\div 6$  мкм путем фокусировки импульсного лазерного излучения с частотой  $f=2\div 4$  МГц и средней мощностью одиночного импульса  $p=50\div 500$  кВт при перемещении заготовки относительно фокуса излучения со скоростью  $V=0.4\div 0.8$  мм/сек. На участке взаимодействия волноводы сближают на расстояние  $g=1\div 2$  мкм. Технический результат – расширение арсенала технических средств для создания широкодиапазонных интегральных оптических делителей. 2 н. и 1 з.п. ф-лы, 6 ил.

RU 2 675 400 C1

RU 2 675 400 C1



Фиг.1

RU 2675400 C1

RU 2675400 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G02B 6/122 (2018.08)*

(21)(22) Application: **2017142390, 05.12.2017**

(24) Effective date for property rights:  
**05.12.2017**

Registration date:  
**19.12.2018**

Priority:

(22) Date of filing: **05.12.2017**

(45) Date of publication: **19.12.2018 Bull. № 35**

Mail address:

**119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,  
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni  
M.V. Lomonosova, Fond "Natsionalnoe  
intellektualnoe razvitie"**

(72) Inventor(s):

**Sajgin Mikhail Yurevich (RU),  
Dyakonov Ivan Viktorovich (RU),  
Straupe Stanislav Sergeevich (RU),  
Kalinkin Aleksandr Aleksandrovich (RU),  
Kulik Sergej Pavlovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj  
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)  
(RU)**

(54) **METHOD OF MANUFACTURING DIVIDER IN INTEGRAL OPTICAL SCHEME**

(57) Abstract:

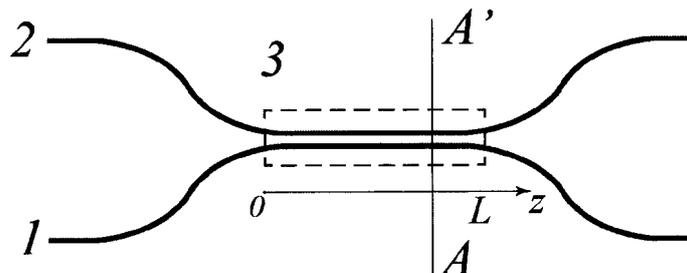
FIELD: optics.

SUBSTANCE: group of inventions relates to integrated optics, and in particular to methods for producing a balanced divider in circuits based on waveguides formed in the volume of a solid-state workpiece by pulsed laser radiation. Method of manufacturing a divider in an integrated optical scheme consists in forming in the dielectric preform a region of interaction between contiguous waveguides. To do this, use a billet of quartz and form a waveguide in its

volume with a linear cross-sectional size  $d=1\div 6$  microns by focusing pulsed laser radiation with a frequency  $f=2\div 4$  MHz and the average power of a single pulse  $p=50\div 500$  kW when moving the workpiece relative to the focus of the radiation with a speed of  $V=0.4\div 0.8$  mm/sec. At the interaction site, the waveguides are brought closer to the distance of  $g=1\div 2$  microns.

EFFECT: expansion of the arsenal of technical tools for creating wide-range integrated optical dividers.

3 cl, 6 dwg



Фиг.1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к интегральной оптике, а именно, к способам изготовления сбалансированного делителя в схемах на основе волноводов, сформированных в объеме твердотельной заготовки импульсным лазерным излучением.

5 Уровень техники

Делители оптических сигналов находят обширные применения в схемах, которые используют в фундаментальной и прикладной науке и технике (Т. Li, Е. Willner, I.

10 Kaminow, Optical fiber telecommunications VA: Components and subsystems, 5<sup>th</sup> edition, Academic Press, 2008). Возможность делить световые сигналы, распространяющихся по свободному пространству в форме пучков от одного элемента схемы к другому, или в форме мод волноводов, составляющих оптико-волоконные схемы или интегрально-оптические чипы, незаменима для получения, обработки и передачи информации.

15 Интегральная оптика дает возможность создавать устойчивые к внешним воздействиям оптические схемы в компактном объеме интегрального чипа с большим потенциалом для масштабирования и поэтому интегрально-оптические схемы становятся все более популярными (L. Chrostowski, M. Hochberg, Silicon Photonics Design. From Devices to Systems, Cambridge Univ. Press, 2015). Основу интегральных оптических схем составляют волноводные структуры. Через волноводы оптические сигналы  
20 распространяются от одного функционального элемента к другому. Кроме того, большой набор функциональных элементов, осуществляющих преобразования оптических сигналов, может быть получен с помощью волноводных структур. В таких оптических элементах существенную долю составляют делители.

Из уровня техники известен способ изготовления делителя в интегральной оптической схеме, заключающийся в формировании в диэлектрической заготовке участка  
25 взаимодействия сближенных волноводов (см. патент US 2003002127, кл. G02B 6/126, опубл. 02.01.2003). Известный способ относится к разведению компонент поляризации оптического излучения по волноводам, образованным на подложке путем травления в эпитаксиальном слое.

30 Основными недостатками такого решения являются сложность изготовления и ограниченность применения полученного оптического элемента, в частности, узкий диапазон длин волн, в котором характеристики его преобразования изменяются слабо - характеристики преобразования существенно зависят от длин волн преобразуемых сигналов.

35 Также известен способ изготовления делителя, заключающийся в создании сближенных участков волноводов в объеме прозрачной заготовки методом фемтосекундной лазерной печати (А.М. Streltsov, N.F. Borrelli, Optics Letters, v. 26, №1, pp. 42-43 (2001)). Недостатком этого решения, как и в первом примере, является сильная зависимость характеристик делителя от длины волны.

40 Раскрытие изобретения

Технической проблемой является создание широкодиапазонных интегральных оптических делителей в схемах на основе волноводов, сформированных в объеме твердотельной заготовки импульсным лазерным излучением, обеспечивающих  
45 неизменность коэффициента деления по мощности, равного  $\frac{1}{2}$ , с допустимой величиной отклонения от указанного значения до 10% в широком диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 1,6 мкм.

Технический результат заключается в решении данной проблемы с достижением вышеуказанных технических параметров оптических делителей.

Данная проблема решается тем, что оптический делитель, полученный с

использованием метода фемтосекундной лазерной печати, обеспечивает неизменность коэффициента деления по мощности, равного  $\frac{1}{2}$  с допустимой величиной отклонения от указанного значения до 10%, в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 1,6 мкм, представляющий собой размещенные в объеме кварцевой подложки, по меньшей мере, два волновода с поперечным сечением (d)  $1 \div 6$  мкм, расположенные на участке, протяженностью не менее 3 мм на расстоянии друг от друга (g)  $1 \div 2$  мкм. В одном из вариантов осуществления оптического делителя волноводы использованы с одинаковыми поперечными сечениями.

Данная проблема также решается тем, что согласно способу изготовления делителя в интегральной оптической схеме, в диэлектрической заготовке формируют участок взаимодействия сближенных волноводов, при этом используют заготовку из кварца и формируют в ее объеме волноводы линейным размером поперечного сечения  $d=1 \div 6$  мкм путем фокусировки импульсного лазерного излучения с частотой  $f=2 \div 4$  МГц и средней мощностью одиночного импульса  $p=50 \div 500$  кВт при перемещении заготовки относительно фокуса излучения со скоростью  $V=0.4 \div 0.8$  мм/сек, причем на участке взаимодействия волноводы сближают на расстояние  $g=1 \div 2$  мкм.

#### Краткое описание чертежей

Изобретение поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлено расположение волноводов в интегральном оптическом делителе, вид сверху; на фиг. 2 - сечение А-А' по фиг. 1; на фиг. 3 - график зависимости коэффициента деления R от длины волны сигнала  $\lambda$  для делителя, изготовленного согласно традиционному способу; на фиг. 4 - график зависимостей нормированной разности мощностей  $\Delta$  от длины взаимодействия, полученных теоретически для традиционного делителя (одинаковые волноводы) и для делителя, изготовленного согласно предлагаемому способу (волноводы с модуляцией); на фиг. 5 - график зависимости нормированной разности мощностей  $\Delta$  от длины взаимодействия L, полученный экспериментально для делителя, выполненного согласно предлагаемому способу (окружности) с аппроксимацией по формуле, описывающей зависимость в предложенном широкополосном делителе (кривая); на фиг. 6 - график зависимости коэффициента деления R от длины волны сигнала  $\lambda$  для делителя, изготовленного согласно предлагаемому способу, при параметрах делителя, соответствующих случаю фиг. 5 для длины делителя  $L=8$  мм; ромбами отмечены значения, полученные в эксперименте, а кривой - аппроксимация экспериментальных данных теоретической зависимостью (1.7) ( $R=(1+\Delta(z))/2$ ).

#### Осуществление изобретения

Заявляемый оптический делитель изготавливают методом фемтосекундной лазерной печати, например, по аналогии со способом, который описан в материалах патента US 7568365 В2, с использованием импульсного лазерного излучения с частотой следования импульсов  $f=2 \div 4$  МГц и средней мощностью одиночного импульса  $p=50 \div 500$  кВт. При этом два волновода с поперечным сечением (d)  $1 \div 6$  мкм формируют лазерным излучением посредством перемещения подложки относительно фокуса излучения со скоростью  $V=0.4 \div 0.8$  мм/сек с обеспечением области связи между волноводами на участке, протяженностью не менее 3 мм на расстоянии друг от друга (g)  $1 \div 2$  мкм.

В традиционных интегральных делителях, которые образованы сближением волноводов, изготовленных всевозможными методами оптической литографии или лазерной модификацией показателя преломления в прозрачной заготовке, частотная характеристика коэффициента деления R по мощности имеет колоколообразный характер, т.е. при заданной длине сбалансированный (с распределением мощности 50/50) делитель эффективно работает только для узкополосного излучения определенной

длины волны (фиг. 3).

Экспериментальным путем было обнаружено, что при изготовлении сближенных волноводов 1 и 2 в кварцевой заготовке путем фокусировки импульсного лазерного излучения проявляется неожиданный эффект: полученный делитель остается сбалансированным для широкого диапазона частот распространяющегося сигнала от 0,3 мкм до 1,6 мкм, т.е. на графике зависимости коэффициента деления  $R$  по мощности от длины волны  $\lambda$  сигнала присутствует обширное плато (фиг. 6). Экспериментальное исследование динамики поля между волноводами в области взаимодействия делителя показало, что, по-видимому, в процессе печати волноводов под воздействием высокоомощного импульсного лазерного излучения образовалось нерегулярное напряжение. Это значит, что на участке взаимодействия постоянные распространения сформированных волноводов подвержены нерегулярной (случайной) мелкомасштабной модуляции. На основе этого предположения были рассчитаны диапазоны геометрических параметров пары волноводов, при которых происходит эффективное перераспределение мощности, и экспериментально определены диапазоны рабочих параметров воздействия лазерного излучения, при которых наблюдается описанный эффект формирования мелкомасштабной модуляции. Ниже приведены полученные значения:

- линейные размеры поперечного сечения волноводов  $d=1\div 6$  мкм (при меньших и больших значениях резко увеличиваются потери при распространении излучения по волноводу);
- расстояние между волноводами на участке взаимодействия  $g=1\div 2$  мкм (при меньших значениях нарушается целостность промежуточной стенки и резко растет рассеяние, при больших - волноводы практически не взаимодействуют и передачи мощности не происходит);
- частота импульсного лазерного излучения  $f=2\div 4$  МГц (при меньших значениях стенки формируемых волноводов не прямые даже за пределами участка взаимодействия, а при больших - из-за общего разогрева заготовки образуются неконтролируемые дефекты по всему объему кристалла) при перемещении заготовки относительно фокуса излучения со скоростью  $V=0.4\div 0.8$  мм/сек (при меньших значениях неоправданно растет время изготовления делителя, а при больших - неоднородность формируемых волноводов);
- средняя мощность одиночного импульса  $p=50\div 500$  кВт (при меньших значениях не наблюдается вышеописанный эффект формирования мелкомасштабной модуляции постоянной распространения, а при больших - образующиеся дефекты слишком велики и резко растут потери на рассеяние).

На фиг. 1 схематически изображен дизайн традиционного типа волноводных делителей, основанного на перекрестной связи между волноводами. Этот элемент составлен из пары волноводов (1 и 2), которые приближаясь друг к другу, образуют область перекрестного взаимодействия (3) за счет частичного перекрытия профилей собственных мод с сердцевинами соседних волноводов (А. Снайдер, Дж. Лав, «Теория оптических волноводов», Радио и Связь, 1987). Вне области взаимодействия 3 перекрытие собственных мод волноводов отсутствует и связи нет. Таким образом, требуемые характеристики преобразования делителя определяются геометрией области взаимодействия - ее длиной, расстоянием между волноводами, а также профилями показателя преломления сердцевины волноводов  $n_1(\vec{\rho}, z)$  и  $n_2(\vec{\rho}, z)$  (см. фиг. 2), где введены обозначения -  $\vec{\rho}$  для вектора в поперечной плоскости, отсчитываемого от центра соответствующего волновода (для  $n_1(\vec{\rho}, z)$   $\vec{\rho}$  отсчитывается от центра волновода 1 -

точки  $O_1$  для  $n_2(\vec{\rho}, z)$   $\vec{\rho}$  отсчитывается от центра волновода 2 - точки  $O_2$ ,  $z$  для продольной координаты, обозначающей расположение плоскости сечения, в которой рассматриваются профили. Следовательно, варьирование этих параметров на этапе изготовления дает возможность создавать делители с разными параметрами преобразования. После области эффективного взаимодействия волновода разводят для распределения трансформированных сигналов между другими элементами оптической схемы или для ввода/вывода сигналов.

Преобразование произвольного делителя описывается соотношением между амплитудами на его выходе,  $a_1^{(out)}$  и  $a_2^{(out)}$ , с амплитудами на его входе,  $a_1^{(in)}$  и  $a_2^{(in)}$ , и может быть записано в матричной форме

$$\begin{pmatrix} a_1^{(out)} \\ a_2^{(out)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & e^{i\varphi} \sin \theta \\ -e^{-i\varphi} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1^{(in)} \\ a_2^{(in)} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где параметр  $\theta$  характеризует смещение мощностей входных сигналов  $a_1^{(in)}$  и  $a_2^{(in)}$ , а параметр  $\varphi$  - разность фаз между амплитудами на выходе. Фазовым параметром  $\varphi$  можно управлять независимо от преобразования смещения вне делителя, и он несущественен в настоящем изобретении, поэтому без ограничения общности полагаем  $\varphi=0$ .

В традиционных волноводных делителях профили показателей преломления сердцевин одинаковы, т.е. в любом сечении AA' секущем область взаимодействия в координате  $z$  -  $n_1(\vec{\rho}, z) = n_2(\vec{\rho}, z) = n(\vec{\rho})$ . В таком случае, полагая спектр длин волн сигналов узким и сконцентрированным около несущей длины волны  $\lambda$ , уравнения для амплитуд поля в волноводах 1 и 2 -  $a_1$  и  $a_2$  - принимают вид:

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dz} = -iCa_2, \\ \frac{da_2}{dz} = -iCa_1, \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $C=C(\lambda)$  - коэффициент перекрестной связи между волноводами, который зависит от расстояния между волноводами  $g$  и от профилей показателя преломления сердцевин волноводов  $n(\vec{\rho}, z)$ , а также является функцией длины волны сигнала  $\lambda$ . На фиг. 2 схематически представлено сечение делителя в области взаимодействия с обозначениями геометрических параметров. Если на вход традиционного делителя подаются амплитуды сигналов  $a_{10}$  и  $a_{20}$ , то решая (1.2), находим распределение амплитуд по области взаимодействия:

$$\begin{aligned} a_1(z) &= a_{10} \cos(Cz) + a_{20} \sin(Cz), \\ a_2(z) &= -a_{10} \sin(Cz) + a_{20} \cos(Cz). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Таким образом, параметр  $\theta$  из (1.1):  $\theta=Cz$ . Далее используют квадратичные по амплитудам поля величины - нормированную разность мощностей:  $\Delta(z)=(|a_1(z)|^2 - |a_2(z)|^2) / (|a_1(z)|^2 + |a_2(z)|^2)$  и нормированный коэффициент деления мощности  $R(z)=(1-\Delta(z))/2$ . Интерес представляют только дисперсионные свойства, поэтому достаточно ограничить рассмотрение случаем сигнала только на одном входе ( $a_{20}=0$ ). В этом случае, используя (1.3), находят  $\Delta(z)=\cos(2Cz)$ ,  $R(z)=\sin^2(Cz)$ .

В оптических схемах используют делители с разным значением коэффициента деления по мощности  $R$ , однако сбалансированные делители с  $R=1/2$  ( $\Delta=0$ ) встречаются наиболее

часто. Стоит особо отметить интерферометры, состоящие из двух соединенных последовательно сбалансированных делителей, которые применяют, например, для измерений. Помимо этого, способность варьировать фазу между волноводами интерферометра дает возможность реконфигурировать интерферометры таким образом, что они могут рассматриваться как реконфигурируемые делители (D.A.V. Miller, Perfect optics with imperfect components, Optics, v. 2, No 8, 747 (2015)). По этой причине реконфигурируемые интерферометры являются основным функциональным элементом интегрально-оптических чипов.

Отметим, что коэффициент связи  $C$  тем больше, чем меньше расстояние между волноводами  $g$  (А. Снайдер, Дж. Лав, «Теория оптических волноводов», Радио и Связь, 1987) и он быстро спадает с ростом  $g$ . В настоящем изобретении рассматривается технология лазерной трехмерной печати волноводов, в которой волноводы изготавливают с помощью фокусирования мощного импульсного излучения лазера в объем прозрачной заготовки с одновременным транслированием этой заготовки для формирования кривой волновода (I.V. Dyakonov et al. Optics Letters, v. 42, №20, p. 4231 (2017)). Расстояние между волноводами  $g$  существенно при изготовлении волноводных делителей - оно должно быть достаточно малым, чтобы обеспечить достаточно большое значение коэффициента  $C$  или, что эквивалентно, небольшую длину области взаимодействия  $L$ , чтобы элемент делителя или сложный элемент, составленный из нескольких делителей, умещался в заготовке. Вместе с тем, минимальное расстояние ограничено возможностью создания однородных профилей в области взаимодействия; при сильном сближении наблюдается снижение качества волноводов и рост потерь в них. По этой причине, типичные значения расстояний между волноводами, изготовленные методом лазерной трехмерной печати, лежат в диапазоне от 8 до 15 мкм (G.D. Marshall et al., Laser written waveguide photonic quantum circuits, Optics Express, v. 17, No 15, 12546 (2009)). После выбора расстояния  $g$  и задания длины волны сигнала  $\lambda$ , для которой нужно изготовить элемент с требуемым коэффициентом деления мощности  $R$ , подбирают длину взаимодействия таким образом, чтобы

$R(L) = \sin^2(C(\lambda)L)$ , причем вследствие периодичности решения выбирают

наименьшее значение  $L$ , отвечающее первому периоду перекачки мощности из одного волновода в другой. Недостатком такого подхода является узкая полоса длин волн, в которой может работать делитель с постоянным коэффициентом деления. Вследствие зависимости коэффициента деления от длины волны  $R$  проявляет дисперсию.

Ниже представлено количественное определение дисперсии, которую проявляет традиционный волноводный делитель. Для конкретного примера в теоретических расчетах были рассмотрены волноводы со ступенчатым круглым профилем показателя преломления. Параметры волноводов следующие: показатель преломления окружения соответствует материалу плавленого кварца, разница показателя преломления между сердцевинной волновода и окружением -  $4 \cdot 10^{-4}$ , диаметр сердцевины волновода  $d=6$  мкм, расстояние между центрами волноводов в области взаимодействия  $g+d=11$  мкм. Рассматриваемые значения типичны для структур, изготовленных методом лазерной печати (G.D. Marshall et al, Laser written waveguide photonic quantum circuits, Optics Express, v. 17, No 15, 12546 (2009)). Хотя рассматриваемый диапазон длин волн от 0.2 мкм до 1 мкм достаточно широк, изменение показателя преломления материала вносит пренебрежимо малый вклад в отклонение преобразования поля делителем - дисперсия делителя определяется структурной зависимостью профилей собственных мод.

На Фиг. 3 представлен график зависимости коэффициента деления мощности  $R$ , длина которого  $L$  подобрана таким образом, чтобы при длине волны сигнала  $\lambda_{\max}$  (540 нм) он был сбалансированным, т.е.  $R(\lambda_{\max}) = 1/2$ . Как видно из рисунка, отклонения в

5 длине волны приводят к отклонениям в коэффициенте деления, что ограничивает спектральный диапазон, в котором может функционировать рассмотренный волноводный делитель как сбалансированный.

Для увеличения полосы длин волн, в которой параметры преобразования делителя изменяются пренебрежимо мало, можно использовать другую конфигурацию волноводного делителя. Как было сказано выше, волноводы в области взаимодействия стараются изготавливать таким образом, чтобы их профили были идентичны как друг

10 другу и не изменялись с продольной координатой. С этим, в частности, связано ограничение на минимальное расстояние между волноводами - если изготавливать волноводы очень близко друг к другу, то условие идентичности профилей волноводов не выполняется из-за неравновесных процессов, происходящих при печати второго

15 волновода вблизи к первому. Ниже представлено описание варианта, когда поперечные размеры и/или показатель преломления сердцевин волноводов 1 и 2 варьируется в зависимости от продольной координаты  $z$ . В результате такой модуляции индексы показателя преломления сердцевин мод волноводов 1 и 2 в области взаимодействия 3

20 зависят от координаты  $z$ :  $n_1(\vec{\rho}, z) = n(\vec{\rho}) + \delta n_1(\vec{\rho}, z)$ , и  $n_2(\vec{\rho}, z) = n(\vec{\rho}) + \delta n_2(\vec{\rho}, z)$ . Тогда уравнения для связанных амплитуд мод принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dz} = -i\delta_1(z)a_1 - iCa_2, \\ \frac{da_2}{dz} = -iCa_1 - i\delta_2(z)a_2, \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $\delta_1(z)$  и  $\delta_2(z)$  - функции, описывающие модуляция постоянных распространения и которые появляются в результате появления добавок  $\delta n_1(\vec{\rho}, z) \neq \delta n_2(\vec{\rho}, z)$ . Уравнения (1.4) включают в себя (1.2) как частный случай при  $\delta_1(z) = \delta_2(z) = 0$ .

Для достижения широкополосной работы сбалансированного делителя, переменные составляющие  $\delta_j(z)$  должны удовлетворять определенным условиям. Во-первых, характерный масштаб изменения  $\delta_j(z)$  (далее обозначаем как  $l_0$ ) в зависимости от  $z$  должен быть намного меньше, чем характерная длина  $L_0$ , на которой происходит

35 существенная перекачка мощности из волновода в волновод при отсутствии модуляции, т.е.  $l_0 \ll L_0 = \pi / 2C$ . Другими словами, это означает, что  $\delta_j(z)$  являются быстро осциллирующими функциями в сравнении с зависимостью с функцией перекачки мощности между волноводами. Во-вторых, спектр  $\delta_j(z)$  должен содержать множество

40 пространственных частот, чтобы эффект высокочастотной модуляции можно было рассматривать как воздействие случайных флуктуаций. Данное обстоятельство позволяет свести анализ к рассмотрению усредненных величин:

$$K_j(z, \Delta z) = \frac{1}{l} \int_z^{z+l} \delta \beta_i(\theta) \delta \beta_j(\theta + \Delta z) d\theta, \quad (1.5)$$

45 где интервал  $[z, z + l]$ , на котором происходит усреднение, должен быть много больше, чем характерный масштаб  $l_0$  изменения  $\delta_j(z)$ , чтобы гарантировать обоснованность усреднения флуктуаций. Названные условия вместе с определенной формой проведения усреднения по флуктуациям (1.4) позволяют использовать язык

случайных процессов, в терминах которого сформулированы следующие условия для модуляции постоянных распространения. Согласно следующему - третьему условию, необходимо, чтобы  $\delta_1(z)$  и  $\delta_2(z)$  не коррелировали друг с другом, т.е.

5  $K_{12}(z, \Delta z) \ll \sqrt{K_{11}(z, \Delta z)K_{22}(z, \Delta z)}$ . В противном случае идеальной корреляции, когда  $\delta_1(z) = \delta_2(z)$ , предыдущее неравенство превращается в равенство, эффект модуляции никак не влияет на динамику поля, т.к. только разность  $\delta_1(z) - \delta_2(z)$  оказывает влияние на динамику поля (см. формулу (1.6) ниже). В добавок к перечисленным условиям для простоты анализа можно рассматривать  $\delta_j(z)$  удовлетворяющими условию  
10 стационарности:  $K_{ij}(z, \Delta z) = K_{ij}(\Delta z)$ .

Можно рассматривать корреляционные функции вида:  $K_{ij}(\Delta z) = D_{ij} \exp(-|\Delta z|/l_0)/l_0$ , где  $D_{ij}$  имеет смысл мощности («силы») флуктуаций, а  $l_0$  - длина когерентности. Из  
15 условия  $l_0 \ll L_0 = \pi/2C$  следуют уравнения для квадратичных величин:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta}{dz} = 2iC(\sigma - \sigma^*), \\ \frac{d\sigma}{dz} = iC\Delta + i\eta(z)\sigma, \end{cases} \quad (1.6)$$

20 с граничными условиями:  $\Delta(0)=1, \sigma(0)=1$ , где  $\eta(z)=\delta_2(z)-\delta_1(z)$ . Уравнения (1.6) можно преобразовать с помощью соотношения:  $\eta(z)\sigma(z)=iD \cdot \sigma(z)$ , где  $D=D_{11}+D_{22}-2D_{12}$ , что позволяет записать аналитическое решение для  $\Delta(z)$  (С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин, «Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в  
25 линейных системах», ФИЗМАТЛИТ, 2010). Из уравнений (1.6) приходим к уравнению для нормированной разности мощностей:  $\frac{d^2\Delta}{dz^2} + D\frac{d\Delta}{dz} + 4C^2\Delta = 0$ , решение которого имеет вид затухающих осцилляций:

$$30 \quad \Delta(z) = \exp\left(-\frac{1}{2}Dz\right) \cos\left[2C\sqrt{1-\left(\frac{D}{4C}\right)^2}z + \Phi\right]. \quad (1.7)$$

Здесь параметр  $D$  задает скорость затухания осцилляций разности мощности. Фазовый параметр  $\Phi$  введен, чтобы описать имеющую место перекачку мощности между близко  
35 расположенными изгибами, примыкающими ко входу и выходу из прямолинейной области взаимодействия (см. фиг. 1); даже при  $z=0$  имеется перекрестное взаимодействие и на входе в области прямолинейных взаимодействующих волноводов  $\Delta(0)<1$ . На фиг. 4 представлены кривые зависимости  $\Delta(z)$  для случая традиционного делителя и для делителя с нерегулярной модуляцией, описываемого зависимостью разности мощности (1.7). Очевидно, что разность мощности не превышает по абсолютному значению  $\exp(-Dz/2)$ , поэтому при достаточно большой длине взаимодействия  $L$ :  $\Delta(L) = \exp(-DL/2) \simeq 0$ ,  
40 т.е. делитель сбалансирован с высокой степенью точности. Отличительной особенностью такого делителя является его независимость стремления к нулю характеристики  $\Delta(L)$  от коэффициента деления  $C$  - этот коэффициент может изменяться  
45 из-за дисперсии, что приводит к ограничениям на длины волн в традиционном делителе (см. фиг. 3). Отметим, что параметр  $D$  также может зависеть от длины волны, однако эта зависимость определяется дисперсией материалов, из которых изготовлена заготовка, но и это не мешает экспоненциальному затуханию (1.7).

Для реализации широкополосного делителя необходим способ создания нерегулярной модуляции  $\delta_j(z)$ , удовлетворяющей описанным выше условиям. В технологии создания интегральных оптических устройств методом фемтосекундной лазерной печати модуляцию эффективных показателей преломления можно реализовать варьированием скорости передвижения заготовки относительно области фокуса излучения лазера или изменяя среднюю мощность лазера при постоянной скорости перемещения или одновременно варьируя скорость перемещения и мощность лазера (D.N. Biggerstaff et al., Nature Communications, v. 7, 11282 (2016)). Ранее такое искусственное создание модуляции варьированием скорости передвижения подвижки было выполнено для создания ступенчатой модуляции, при которой  $\delta_j(z)$  имели постоянные значения на отрезках фиксированной длины, а изменения осуществлялось скачками. Однако характерный пространственный масштаб этих изменений было достаточно велик и составлял  $l_0 \sim 1$  см, что было сравнимо с характерной длиной перекачки мощности из одного волновода в другой  $L_0 = \pi/2C$ . Авторам неизвестны практические примеры искусственного создания модуляции постоянных распространения  $\delta_j(z)$ , удовлетворяющим необходимым условиям.

Представленное изобретение решает задачу получения модуляций  $\delta_j(z)$  ( $j=1,2$ ), обладающую малым характерным масштабом  $l_0 \ll \pi/2C$  и широким пространственным спектром гармоник - необходимые требования для получения нужного функционала широкополосного сбалансированного делителя.

Для изготовления структур методом лазерной печати использовалась установка, схема и описание которой приведены в работе (I.V. Dyakonov et al. Applied Physics B 122: 245 (2016)). Основные элементы установки - 1) волоконный лазер Menlo Systems BlueCut, который генерирует последовательности импульсов длительностью 400 фс на несущей длине волны 1030 нм с частотой следования до 1 МГц. Частоту следования импульсов и среднюю мощность лазера можно плавно изменять вплоть до мощности 3 Вт - этого более чем достаточно, чтобы реализовать требуемый режим печати; 2) нелинейный кристалл ВВО, удваивающий частоту излучения перед поступлением в заготовку, т.е. в заготовку фокусируются импульсы на длине волны 515 нм; 3) прецизионная подвижка AerotechFiberGlide 3D, которая позволяет передвигать закрепленную на нее заготовку с точностью позиционирования на уровне нескольких нм - этого более чем достаточно для печати интегрально-оптических делителей. В качестве заготовки использовались бруски плавного кварца размером 10 см\*5 см\*5 мм; излучение от удвоителя частоты на длине волны 515 нм фокусировалось через грань заготовки наибольшей площади таким образом, что точка фокуса располагалась на глубине от этой грани 50 мкм.

Была изготовлена серия из 20 делителей с различной длиной области взаимодействия и измерения проведены для каждого из них. Для печати использовались следующие параметры лазерного излучения - частота следования  $f=4$  МГц, средняя мощность лазер  $W=0.1$  Вт; скорость подвижки  $V=0.6$  мм/с. В таком режиме получают волноводы с шириной в плоскости делителя  $d=5$  мкм, а расстояние между волноводами в области взаимодействия, выбираемое передвижением подвижки, равнялось  $g=2$  мкм (программирование подвижки позволяет выбирать расстояние между центрами волноводов  $O_1$  и  $O_2$ ). Для измерений полученных делителей использовался лазерный диод на длине волны  $\lambda = 800$  нм, поляризованный в плоскости делителя, излучение которого подавалась на один из входов каждого делителя серии. На выходе из каждого делителя проводилось измерение с помощью камеры, изображение с которой позволяло

рассчитать нормированную разность мощности. Результаты измерений представлены на фиг. 5, где точками обозначены измеренные значения нормированной разности мощности в случае. Кривая является аппроксимацией экспоненциально затухающей зависимости (1.7), в которой параметры С и D подобраны, чтобы максимально соответствовать эксперименту (проведена минимизация разности квадратов отклонений параметризованной кривой и экспериментальных точек):  $C=4.02 \text{ мм}^{-1}$ ,  $D=2.15 \text{ мм}^{-1}$ ,  $\Phi=-1.84$ .

При этих же параметрах записи был изготовлен другой делитель с длиной области взаимодействия  $L=8 \text{ мм}$  - этот делитель был изготовлен за тот же цикл печати, что и серия из 20 делителей, таким образом, все параметры лазерной печати оставались такими одинаковыми - изменилась только длина, которая стала существенно больше. Для изготовленного делителя проведены измерения нормированной разности мощности для разных длин волн сигнала. Для измерений использовалось несколько лазерных источников, работающих в разных диапазонах длин волн: от перестраиваемого телекоммуникационного лазера в районе  $\lambda=1500 \text{ нм}$  до гелий-кадмиевого лазера для  $\lambda=325 \text{ нм}$ . На фиг. 6 приведен график зависимости коэффициента деления мощности широкополосного сбалансированного делителя от длины волны сигнала при параметрах. Точки отвечают экспериментально измеренным значениям, кривая - их аппроксимация (1.7) с учетом дисперсионной зависимости коэффициента связи  $C(\lambda)$ , где в качестве варьируемых параметров использовался контраст показателя преломления  $\text{Li}$  между сердцевиной волновода и его окружением.

Появление нерегулярной модуляции можно объяснить случайными механическими напряжениями, которые возникают при печати второго волновода вблизи первого. В свою очередь, эти напряжения приводят к нерегулярной модуляции показателей преломления сердцевины волноводов (I. V. Dyakonov et al. Optics Letters, v. 42, №20, p. 4231 (2017)).

По вышеописанным причинам реализация предлагаемого способа позволяет путем простой технологической операции создать высокоэффективный сбалансированный широкодиапазонный интегральный оптический делитель.

Изобретение позволяет расширить арсенал технических средств для создания широкодиапазонных интегральных оптических делителей.

#### (57) Формула изобретения

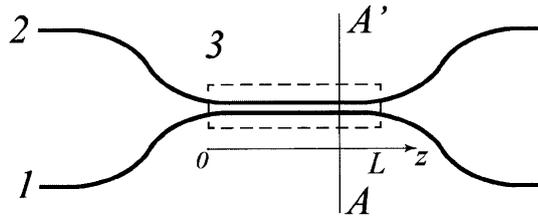
1. Оптический делитель, полученный с использованием метода фемтосекундной лазерной печати, обеспечивающий неизменность коэффициента деления по мощности, равного  $\frac{1}{2}$  с допустимой величиной отклонения от указанного значения до 10%, в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 1,6 мкм, представляющий собой размещенные в объеме кварцевой подложки по меньшей мере два волновода с поперечным сечением (d)  $1 \div 6 \text{ мкм}$ , расположенные на участке протяженностью не менее 3 мм на расстоянии друг от друга (g)  $1 \div 2 \text{ мкм}$ .

2. Оптический делитель по п. 1, характеризующийся тем, что волноводы использованы с одинаковыми поперечными сечениями.

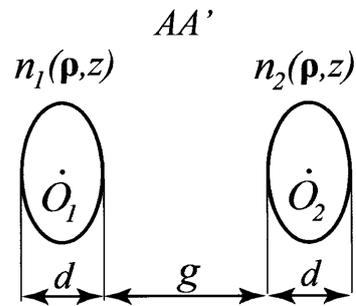
3. Способ изготовления оптического делителя по п. 1, включающий формирование в кварцевой подложке по меньшей мере двух волноводов путем фокусировки импульсного лазерного излучения с частотой следования импульсов  $f=2 \div 4 \text{ МГц}$  и средней мощностью одиночного импульса  $p=50 \div 500 \text{ кВт}$  при перемещении подложки относительно фокуса излучения со скоростью  $V=0.4 \div 0.8 \text{ мм/сек}$ .

1

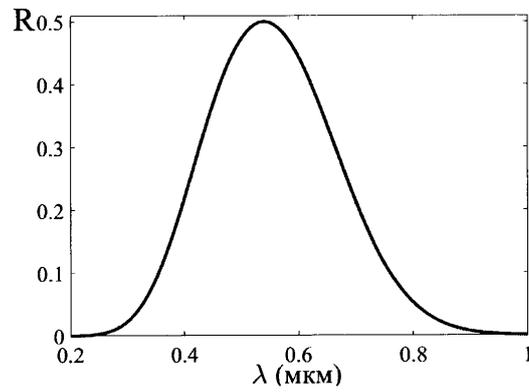
СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕЛИТЕЛЯ  
В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ



Фиг.1



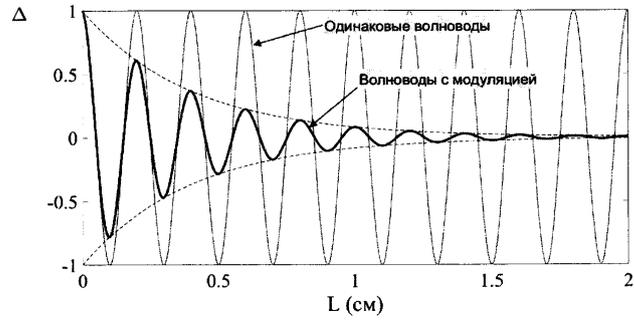
Фиг.2



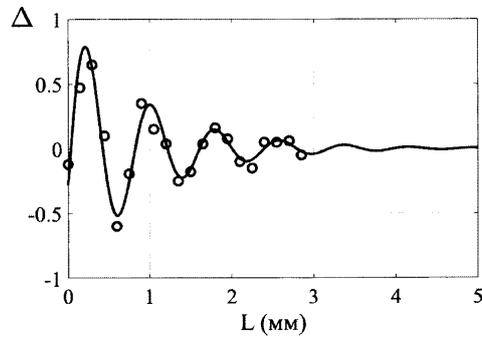
Фиг.3

2

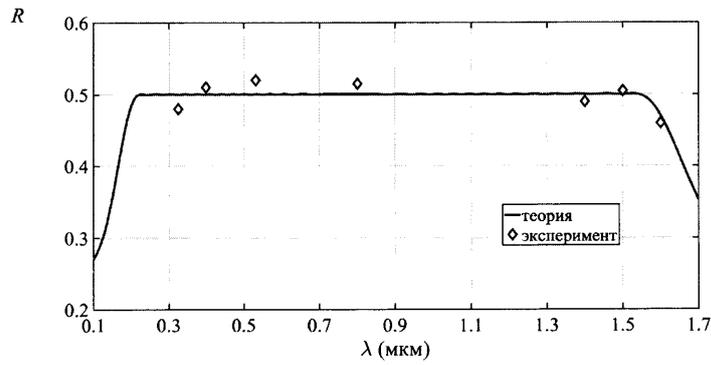
СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕЛИТЕЛЯ  
В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6