



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015146534/28, 28.10.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.10.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.10.2015

(45) Опубликовано: 10.11.2016 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Sapphire photonic crystal fibers// Neal Preiffenberger, Gary Pickrell, Karen Kokal, Anbo Wang// Optical Engineering, Vol.49, Issue 9. - 02 September 2010. WO 2002101430 19.12.2002. THz-Wave Generation from GaP THz Photonic Crystal Waveguides under Difference-Frequency Mixing// Kyosuke Saito, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama// Optics and Photonics (см. прод.)

Адрес для переписки:

142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул.  
Академика Осипьяна, 2, ИФТТ РАН

(72) Автор(ы):

Курлов Владимир Николаевич (RU),  
Шикунова Ирина Алексеевна (RU),  
Зайцев Кирилл Игоревич (RU),  
Юрченко Станислав Олегович (RU),  
Карасик Валерий Ефимович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

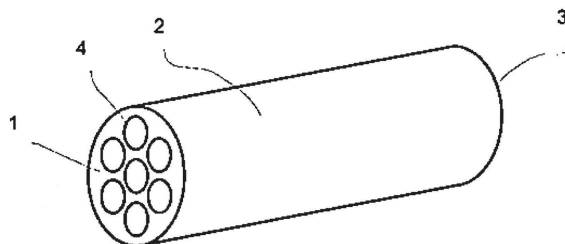
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
твердого тела Российской академии наук  
(ИФТТ РАН) (RU)

## (54) САПФИРОВЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД

(57) Реферат:

Изобретение относится к области элементной базы терагерцовой оплотехники, в частности к волноводам для передачи терагерцового излучения. Сапфировый терагерцовый фотонно-кристаллический волновод представляет собой диэлектрическое тело, в котором имеются параллельные каналы, расположенные в виде гексагональной структуры. При этом ось С монокристаллического сапфира, из которого

выполнен волновод, направлена вдоль каналов, а минимальный размер сечения каналов волновода равен или больше длины волны передаваемого терагерцового излучения. Технический результат состоит в уменьшении удельных потерь энергии передаваемого излучения, а также в возможности получения стабильного спектрального состава передаваемого излучения. 5 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг.1

(56) (продолжение):

Journal. - September 2012. - pp.201-205. Terahertz dielectric waveguides// Shaghi Atakaramians, Shahraam Afshar V., Tanya M. Monro, Derek Abbott// Advantages in Optics and Photonic, Vol. 5, Issue 2. - 2013. - pp.169-215. CN 103412366 A 27.11.2013.

R U 2 6 0 1 7 7 0 C 1

R U 2 6 0 1 7 7 0 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2015146534/28, 28.10.2015**  
 (24) Effective date for property rights:  
**28.10.2015**  
 Priority:  
 (22) Date of filing: **28.10.2015**  
 (45) Date of publication: **10.11.2016** Bull. № 31  
 Mail address:  
**142432, Moskovskaja obl., g. Chernogolovka, ul. Akademika Osipjana, 2, IFTT RAN**

(72) Inventor(s):  
**Kurlov Vladimir Nikolaevich (RU),  
 SHikunova Irina Alekseevna (RU),  
 Zajtsev Kirill Igorevich (RU),  
 JUrchenko Stanislav Olegovich (RU),  
 Karasik Valerij Efimovich (RU)**  
 (73) Proprietor(s):  
**Federalnoe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
 uchrezhdenie nauki Institut fiziki tverdogo tela  
 Rossijskoj akademii nauk (IFTT RAN) (RU)**

(54) **SAPPHIRE TERAHERTZ PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDE**

(57) Abstract:

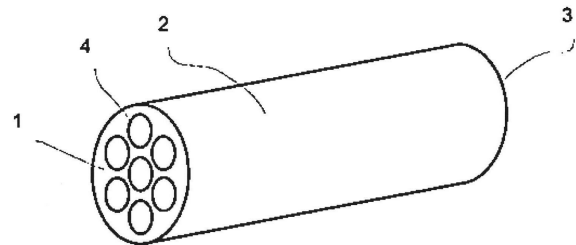
FIELD: machine building.

SUBSTANCE: invention relates to terahertz optical engineering components base, in particular, to terahertz radiation transmission waveguides. Sapphire terahertz photonic crystal waveguide is dielectric body with parallel channels located in form of hexagonal structure. At that, monocrystalline sapphire axis C, of which waveguide is made, is directed along channels, and waveguide channels minimum cross-section size is equal to or greater than transmitted terahertz radiation wavelength.

EFFECT: technical result consists in reduction of

transmitted radiation specific energy losses, as well as obtaining stable spectral composition of transmitted radiation.

6 cl, 4 dwg



Фиг. 1

RU 2 601 770 C1

RU 2 601 770 C1

Изобретение относится к области элементной базы терагерцовой оптики, а именно к волноводам для передачи излучения терагерцового (ТГц) диапазона электромагнитного спектра, расположенного между инфракрасной и микроволновой областями шкалы электромагнитных волн от 0,1 до 10,0 ТГц, и может быть, в частности, применено в ТГц спектроскопии для характеристики конденсированных сред и газов, для неразрушающего технологического и эксплуатационного контроля конструкционных материалов, неразрушающего исследования объектов искусства, анализа химического состава газовых смесей, контроля качества фармацевтической продукции, а также для целей медицинской диагностики.

Основными требованиями, предъявляемыми к ТГц волноводам для спектроскопии, являются низкие удельные потери ТГц излучения, минимальная дисперсия ТГц импульса на выходе волновода в широком спектральном диапазоне.

Излучение терагерцового диапазона сильно поглощается большинством сред из-за наличия вибрационных, ротационных и либрационных степеней свободы молекулы вещества. Передача излучения с использованием металлического волокна, пучка волокон или металлических пластин за счет плазмонного возбуждения характеризуется довольно большими потерями мощности передаваемого излучения (0,1 дБ/см) и низкой эффективностью ввода излучения в волновод. Полые металлические трубки, применяемые для передачи ТГц излучения, практически не имеют поглощения в волноводной сердцевине (0,01 дБ/см), но обладают значительной дисперсией, что приводит к существенному уширению импульсов излучения. Наличие сильного поглощения или большой дисперсии не позволяют получить относительно длинный волновод, пригодный для использования в устройствах импульсной спектроскопии.

Известны альтернативные волноводные структуры, в которых одновременно получают низкий уровень потерь и минимальную дисперсию - фотонно-кристаллические волноводы (ФКВ). ФКВ представляют собой стержень (волокно) с регулярной системой протяженных полостей или каналов, в совокупности формирующих двумерную дифракционную решетку Брегга в поперечном сечении волновода (волокна). Рассеяние излучения на данной двумерной дифракционной решетке позволяет сформировать локализованные моды излучения в области сердцевины или в оболочке волновода (волокна) и обеспечить распространение электромагнитного излучения в единственно возможном разрешенном направлении - вдоль оси волновода - с минимальной дисперсией и потерями в широком спектральном диапазоне.

Для передачи излучения ТГц диапазона перспективны различные ФКВ с полый волноводной центральной частью, так как данное излучение сильно поглощается большинством сред, в том числе стеклами и полимерными средами, широко используемыми для создания ФКВ волноводов и волокон в других областях шкалы электромагнитных волн.

Так, известны фотонно-кристаллические ТГц волноводы с передачей ТГц излучения по полый сердцевине, окруженной многослойной оболочкой из слоев полимеров с чередующимся различным показателем преломления (патент США US 2009/0097809 A1, опубл. 16.04.2009). Недостатком данного волновода является наличие потерь мощности ТГц излучения за счет его сильного поглощения в полимерах (полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиэтилен, полиметилметакрилат (ПММА), фторопласт, тефлон, полиметилпентен (TPX), циклоолефиновый сополимер (COC)), используемых в качестве материала таких волноводов, а также потери, возникающие при изгибах/деформации волновода в процессе его эксплуатации. Кроме того, спектральные характеристики полимерных ФКВ претерпевают существенную трансформацию при

случайных изгибах или деформациях, что не позволяет применять их в интересах абсорбционной или диэлектрической спектроскопии.

Наиболее близким к заявляемому изобретению решением является пористый терагерцовый ФКВ [А. Hassani, A. Dupuis, M. Skorobogatiy. Low loss porous terahertz fibers containing multiple subwavelength holes. - Applied physics letters 92, 071101 (2008)], который представляет собой полимерное тело с гексагональным массивом продольных отверстий. Оболочкой служит воздух, окружающий полимерное тело. Размер отверстий и толщина перемычек волноводной части меньше длины волны излучения, а диаметр волноводной части сравним с длиной волны передаваемого излучения. При такой геометрии энергия моды распределена по всем каналам волновода (результатирующий эффективный показатель преломления позволяет соответствующим ему модам проникать через перемычки) и, таким образом, используется максимально весь «воздушный» бездисперсионный и не поглощающий объем волновода и одновременно «фокусирующее» действие ФК структуры. Несмотря на заявленные пониженные потери при передаче ТГц излучения (0,1 дБ/см), пропускание данного волновода ограничено поглощением в полимере, из которого он изготовлен. Кроме того, существование поля в крайних каналах и за пределами волновода обуславливает повышенную вероятность потерь излучения при изгибах, а также при наличии дефектов структуры и загрязнениях. Несмотря на увеличение пропускания такого волновода в несколько десятков раз по сравнению с монолитным ТГц волноводом из того же материала, указанные недостатки не позволяют создать волновод с действительно эффективной передачей излучения рассматриваемого диапазона длин волн, в том числе для импульсной спектроскопии.

В настоящем изобретении предлагается принципиально новый подход к созданию ТГц ФКВ для целей спектроскопии, основанный на использовании кристаллического сапфира. По сравнению с полимерными средами сапфир обладает низким собственным поглощением в ТГц области электромагнитного спектра, что позволяет достигнуть качественно новой эффективности передачи ТГц излучения по волноводу. Сапфир имеет очень высокую твердость, температуру плавления, теплопроводность, прочность и сопротивление термоудару, что чрезвычайно расширяет круг задач, в которых может быть применен сапфировый ТГц ФКВ.

Задачей, которую решает изобретение, является создание волновода длиной несколько десятков сантиметров с низкими потерями и управляемой дисперсией при передаче ТГц излучения в широком спектральном диапазоне.

Технический результат состоит в получении терагерцового волновода длиной до нескольких десятков сантиметров с существенно уменьшенными удельными потерями энергии передаваемого излучения, при этом низкий уровень потерь ТГц излучения сохраняется во всем широком рабочем спектральном диапазоне волновода; в получении волновода со стабильным спектральным составом передаваемого излучения, достаточным для характеристики сред при импульсной ТГц спектроскопии.

Технический результат достигается за счет того, что в сапфировом терагерцовом фотонно-кристаллическом волноводe, представляющем собой диэлектрическое тело, в котором имеются параллельные каналы, расположенные в виде гексагональной структуры, материалом волновода является монокристаллический сапфир, ориентация оси С в котором расположена вдоль каналов, а минимальный размер сечения каналов волновода равен или больше длины волны передаваемого ТГц излучения.

Применение монокристаллического сапфира в качестве материала волновода для передачи ТГц излучения позволяет снизить потери мощности передаваемого ТГц излучения, так как сапфир, являясь монокристаллом, обладает существенно более

низким поглощением ТГц электромагнитного излучения в сравнении с полимерными средами и стеклами. Направление главной оси сапфира («С»-ось) вдоль оптической оси волновода позволяет минимизировать влияние анизотропии кристалла на оптические свойства волновода для ряда задач. Выполнение сапфирового ТГц ФКВ с диаметром каналов (периодом решетки) соизмеримым или большим, чем длина волны передаваемого ТГц излучения, позволяет получать эффективную дифракцию ТГц излучения в радиальном направлении (высокую волноводную эффективность устройства) в случае, когда ТГц излучение вводится нормально к входной грани ФКВ и в пределах некоторой апертуры, соответственно.

Кроме того, для сапфирового ТГц волновода не характерны изгибные потери даже в случае больших боковых усилий; волновод может работать в широком диапазоне температур. Волновод по данному изобретению может использоваться при работе, включающей контакт с агрессивными средами и стерилизацию любыми средствами и методами. Возможность эксплуатации волновода в широком диапазоне температур и в агрессивных средах позволяет существенно расширить спектр приложений методов ТГц спектроскопических исследований и ТГц технологий в целом.

Кроме того, в частном случае реализации изобретения, каналы волновода имеют цилиндрическую форму и могут быть одного диаметра.

Кроме того, в частном случае реализации изобретения, по крайней мере, один канал отсутствует.

Кроме того, в частном случае реализации изобретения, на поверхность, по крайней мере, одного канала волновода нанесено диэлектрическое или металлическое покрытие.

Кроме того, в частном случае реализации изобретения, один или несколько каналов волновода заполнены жидкостью (газом), показатель преломления которой отличается от показателя преломления материала волновода.

Использование волноводов с каналами, имеющими цилиндрическую форму, в том числе равного диаметра, использование волноводов с нарушением периодичности за счет отсутствия, по крайней мере, одного канала, с диэлектрическим или металлическим покрытием одного или нескольких каналов, а также выполнение волновода с каналами, наполненными жидкостями и газами с отличающимся показателем преломления позволяет расширить возможности управления в волноводе оптическими свойствами волноводной структуры, ее дисперсией и потерями.

Кроме того, в частном случае реализации изобретения, у волновода имеются входная и выходная грани, которые являются перпендикулярными или наклонными к оптической оси волновода и/или имеют неплоскую форму, что позволяет повысить эффективность ввода ТГц излучения в волновод, снизить потери излучения на входе и выходе.

Устройство и его работа поясняется рисунками, представленными на фиг. 1-4.

Фиг. 1. Схематичное изображение частного случая изобретения - терагерцовый фотонно-кристаллический волновод, имеющий гексагональный массив каналов равного диаметра.

Фиг. 2. Фотография сапфирового ТГц ФКВ длиной 200 мм с гексагональным массивом каналов диаметром 2,5 мм по данному изобретению (частный случай).

Фиг. 3. Поперечные моды электромагнитного поля в фотонно-кристаллическом волноводе из сапфира (Фиг. 1, 2) с диаметром каналов 2,5 мм для различных спектральных областей.

Фиг. 4. Графики экспериментально полученного эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff}}$  (вверху) и коэффициента затухания  $\alpha$  (внизу) в зависимости от длины волны электромагнитного излучения для ТГц ФКВ, показанного на Фиг. 2.

Волновод работает следующим образом. Широкополосное импульсное ТГц излучение фокусируется оптической системой на входной торец 1 сапфирового ТГц ФКВ 2 (Фиг. 1). В волноводе формируются устойчивые моды ТГц излучения, структура которых определяется структурой фотонно-кристаллического сечения волновода 2, причем особенность модовой структуры такова, что за счет совокупного устойчивого состояния мод энергия электромагнитного ТГц излучения передается с входного торца 1 на выходной торец 3 волновода 2 в широком спектральном диапазоне (Фиг. 3, 4). ТГц излучение, распространяющееся в волноводе 2, сконцентрировано (локализовано) в каналах 4 волновода: как в центральном канале, так и в боковых каналах (Фиг. 3).

Для приведенного в качестве примера сапфирового фотонно-кристаллического волновода были продемонстрированы рекордно низкие удельные потери на распространение - 0,02 дБ/см в широком спектральном диапазоне (как минимум от 0,5 до 1,0 ТГц) (Фиг. 4). Таким образом, по данному изобретению возможно создание сапфировых ТГц ФК волноводов длиной до нескольких десятков сантиметров с бездисперсионным распространением ТГц импульса в широком спектральном диапазоне. Использование сапфировых ФК ТГц волноводов позволит существенно расширить возможности ТГц диагностических систем, в том числе создать на их основе ТГц эндоскопы различного назначения.

#### Формула изобретения

1. Терагерцовый фотонно-кристаллический волновод, представляющий собой диэлектрическое тело, в котором имеются параллельные каналы, расположенные в виде гексагональной структуры, отличающийся тем, что материалом волновода является монокристаллический сапфир, ориентация оси С в котором расположена вдоль каналов, минимальный размер сечения каналов волновода равен или больше длины волны передаваемого ТГц излучения.

2. Волновод по п. 1, отличающийся тем, что каналы имеют цилиндрическую форму.

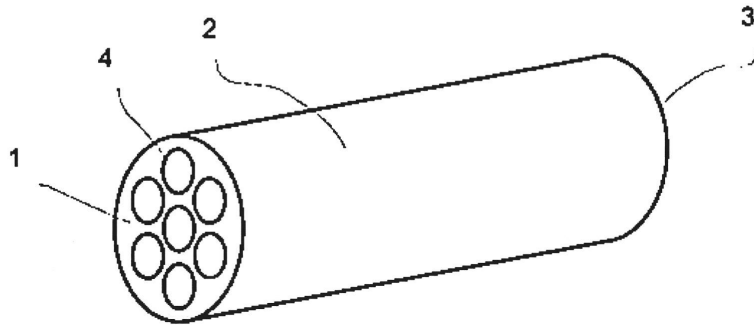
3. Волновод по п. 2, отличающийся тем, что каналы имеют одинаковый диаметр.

4. Волновод по п. 1, отличающийся тем, что на поверхность по крайней мере одного канала нанесено диэлектрическое или металлическое покрытие.

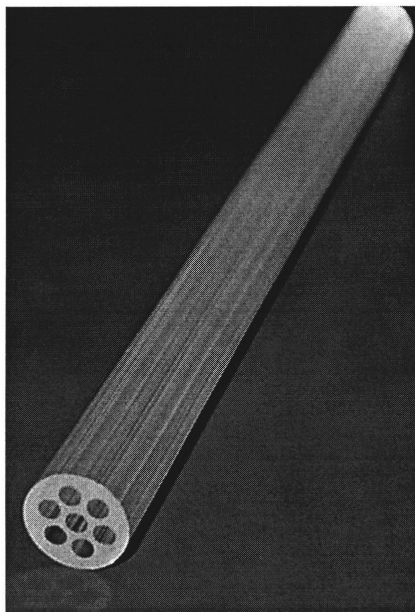
5. Волновод по п. 1, отличающийся тем, что один или несколько каналов заполнены жидкостью (газом), показатель преломления которой отличается от показателя преломления материала волновода.

6. Волновод по п. 1, отличающийся тем, что имеются входная и выходная грань волновода, которые являются перпендикулярными или наклонными к оптической оси волновода и/или имеют не плоскую форму.

Сапфировый терагерцовый фотонно-кристаллический волновод



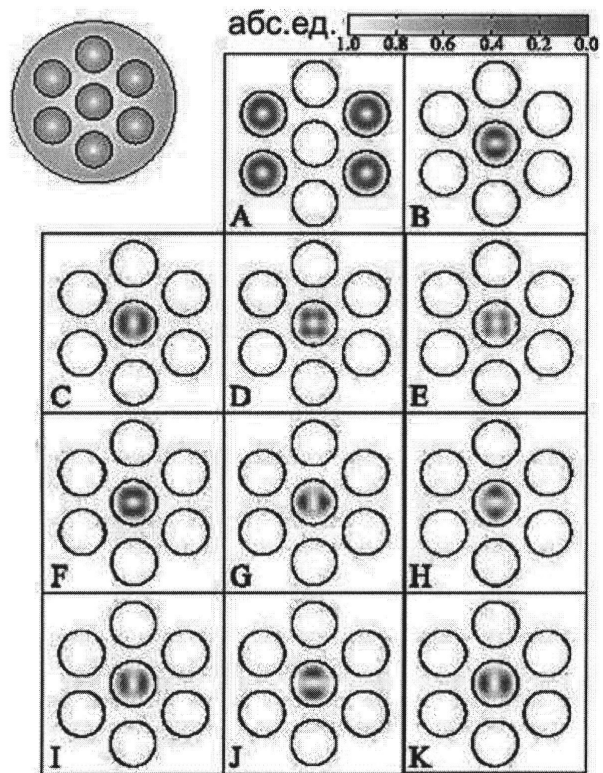
Фиг.1



Фиг.2

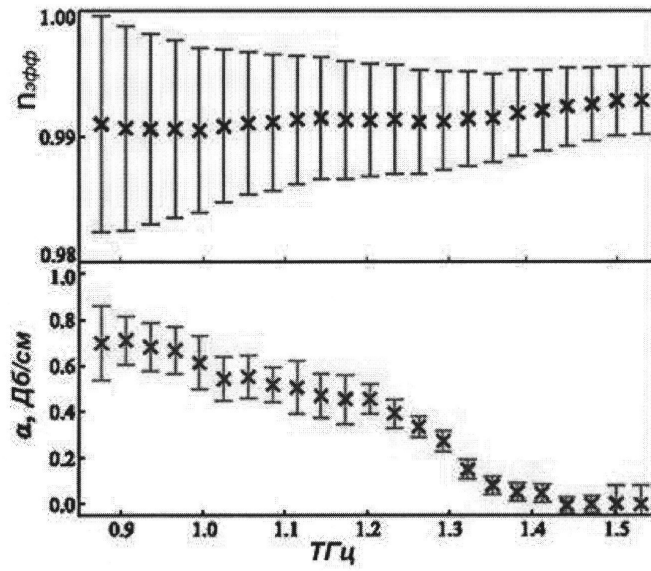


Сапфировый терагерцовый фотонно-кристаллический волновод



Фиг.3

Сапфировый терагерцовый фотонно-кристаллический волновод



Фиг.4