(19)

Евразийское патентное ведомство

# (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента 2021.11.24

(51) Int. Cl. *G02F 1/11* (2006.01) *H01S 3/117* (2006.01)

- (21) Номер заявки 202092509
- (22) Дата подачи заявки 2019.09.23

### (54) СПОСОБ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

- (31) 2019106282
- (32) 2019.03.06
- (33) RU

 $\mathbf{\Delta}$ 

- (43) 2021.02.28
- (86) PCT/RU2019/000663
- (87) WO 2020/180205 2020.09.10
- (71)(73) Заявитель и патентовладелец:

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МИСИС" (RU)

- (72) Изобретатель: Молчанов Владимир Яковлевич, Юшков Константин Борисович, Науменко Наталья Федоровна, Чижиков Александр Ильич, Гуров Василий Викторович, Павлюк Анатолий Алексеевич (RU)
- (74) Представитель: Сагитов В.Р. (RU)
- (56) RU-C1-2476916 RU-C1-2448353 RU-C1-2092797 US-A1-20020191264
- (57) Изобретение относится к акустооптике и лазерной технике, в частности, оно может быть отнесено к акустооптическим (АО) устройствам модуляции добротности резонаторов лазеров, к АО-устройствам внерезонаторного управления одномодовым (коллимированным) и многомодовым (неколлимированным) монохроматическим и немонохроматическим лазерным излучением: АО-модуляторам, АО-устройствам сдвига частоты, дисперсионным линиям задержки видимого и среднего ИК-диапазона длин волн (0.4-5.5 мкм). Задачей изобретения является создание такой геометрии АО-взаимодействия в модуляторе добротности резонаторов лазеров, при которой имеет место оптимизация его заданных параметров в соответствии с системными требованиями к режиму работы лазера в зависимости от назначения последнего, а именно пониженная управляющая ВЧ-мощность и возможность работать без дополнительных потерь эффективности с многомодовым или неколлимированным лазерным излучением.

B

Изобретение относится к акустооптике и лазерной технике, в частности оно может быть отнесено к акустооптическим (AO) устройствам модуляции добротности резонаторов лазеров, к AO-устройствам внерезонаторного управления одномодовым (коллимированным) и многомодовым (неколлимированным) монохроматическим и немонохроматическим лазерным излучением: AO-модуляторам, AO-устройствам сдвига частоты, дисперсионным линиям задержки видимого и среднего ИК-диапазона длин волн (0.4-5.5 мкм).

АО-взаимодействие света и ультразвука в кристаллах с высокой акустической и фотоупругой анизотропией представляется наиболее перспективным инструментальным средством для создания акустооптического модулятора добротности.

АО-модуляторы добротности или АО-лазерные затворы широко используются для модуляции потерь в резонаторах лазеров с целью создания лазерных импульсов с высокой энергией. Когда АОмодулятор (затвор) включен, он вносит потери в резонатор, превышающие усиление за проход. Генерация в лазере отсутствует. Уровень потерь определяется эффективностью модулятора, которая должна быть заведомо больше усиления за проход при заданном уровне накачки. Типичное значение необходимой эффективности дифракции (вносимых модулятором потерь) для современных твердотельных импульсных лазеров, работающих в микронном диапазоне длин волн, составляет 75%. Когда АО-модулятор выключается, потери в резонаторе за время, определяемое временем пробега акустического фронта через апертуру лазерного пучка в модуляторе, уменьшаются до статических. В лазере развивается генерация гигантского импульса.

Принцип работы АО-модуляторов следующий. Акустическая волна возбуждается пьезопреобразователем, тем или иным способом присоединенным к акустической грани кристалла или аморфной прозрачной среды. Акустическая волна распространяется в прозрачной среде и создает в ней локальные участки механической деформации материала среды. Вследствие эффекта фотоупругости из-за механических напряжений возникают локальные изменения диэлектрической проницаемости и, следовательно, показателя преломления среды. В среде образуются периодические слои с измененным показателем преломления. Эти слои движутся со скоростью звука. При прохождении света через среду с объемной периодической структурой показателя преломления возникает дифракция света. Как правило, АОмодуляторы работают в режиме дифракции Брэгга. О дифракции Брэгга говорят в том случае, когда дифракционный спектр состоит из двух максимумов: прямо прошедшего нулевого порядка и отклоненного под двойным углом Брэгга первого порядка. Дифракционные максимумы минус первого и высших порядков пренебрежимо малы. Интенсивность первого (так называемого брэгговского) максимума будет наибольшей, если свет падает под углом к волновому фронту акустической волны под углом Брэгга.

В качестве акустооптического материала в модуляторах добротности применяется плавленый кварц и реже кристаллический кварц. Эти материалы обладают высокой стойкостью к лазерному излучению, но низким АО-качеством (эффективностью).

Известно (патент US 6563844 В1, опубл. 13.05.2003), что типичный АО-модулятор добротности на основе кварца для длины волны 1,06 мкм создает в резонаторе типичного Nd:YAG-лазера референтный уровень потерь 75% при управляющей ВЧ-мощности 30 Вт. Стандартным техническим решением является либо водяное охлаждение лазерных затворов, либо термоэлектрическое с применением элементов Пельтье. Эксплуатация модуляторов добротности показывает, что принудительное охлаждение эффективно работает до значений ВЧ-мощности 50-60 Вт, при большей мощности перегрев модулятора добротности скомпенсировать невозможно.

В последние годы интенсивно развиваются новые мощные лазеры среднего ИК-диапазона (2-5,5 мкм), использующие модуляторы добротности или лазерную накачку с применением модуляторов добротности. Например: импульсные лазеры на кристаллах, активированных ионами эрбия  $Er^{3+}$  (трехмикронный диапазон длин волн), ионами гольмия  $Ho^{3+}$  (двухмикронный диапазон), работающие в режиме модуляции добротности; лазеры на основе полупроводниковых кристаллов  $A^{II}B^{VI}$ , легированных двухвалентными ионами переходных металлов  $Cr^{2+}$  и  $Fe^{2+}$ . Они широко используются в спектроскопии, дистанционном зондировании атмосферы, медицине и т.д. В этих лазерах для модуляции добротности резонаторов применяют механические затворы, полигональные зеркала, затворы на основе полного внутреннего отражения и т.д. АО-затворы на основе кварца в лазерах среднего ИК-диапазона (2-5,5 мкм) не применяются. Причина связана с тем, что эффективность (уровень вносимых потерь) акустооптического модулятора в линейном приближении обратно пропорциональна квадрату лазерной длины волны. В связи с этим для достижения стандартного уровня потерь 75% с типичным модулятором добротности на основе кварца для  $Er^{3+}$ : YAG-лазера (2.94 мкм) теоретически потребуется ВЧ-мощность 270 Вт, что исключено на практике.

Известно, что все кристаллы обладают анизотропией акустических свойств (К.Н. Баранский, "Физическая акустика кристаллов", М.: МГУ, 1991) и анизотропией фотоупругих свойств (Дж. Най, "Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц (Пер. с англ. под ред. Л.А. Шувалова)", М.: ИЛ, 1967).

Анизотропия акустических свойств проявляется в том, что в общем случае в произвольном направлении в монокристалле могут распространяться три упругие волны с разными скоростями и поляриза-

циями, причем направления волнового вектора К и вектора потока энергии S каждой из волн не совпадают. Если угол между волновым вектором К и вектором потока энергии S равняется  $\psi$ , то групповая скорость V<sub>g</sub> для данного направления вектора К связана с фазовой скоростью V<sub>p</sub> для этого же направления соотношением V<sub>g</sub>=V<sub>p</sub>/cos  $\psi$ . Таким образом, групповая скорость волны в анизотропной среде всегда не меньше фазовой скорости этой волны. В частном случае, в кристалле существуют направления, в которых направления волнового вектора и вектора потока энергии совпадают. В этом случае  $\psi$ =0 и групповая скорость равна фазовой скорости. Такими направлениями являются оси симметрии кристалла, и локальные максимумы и минимумы фазовой скорости V<sub>p</sub>.

Анизотропия фотоупругих свойств проявляется в том, что эффективная фотоупругая константа акустооптического взаимодействия зависит от направлений распространения и поляризаций оптической и акустической волн в кристалле. Таким образом, направление распространения акустической волны для заданного направления распространения лазерного излучения определяет значение АО-качества М<sub>2</sub>.

Кристаллы калий-редкоземельных вольфраматов KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, где RE=Y, Yb, Gd, Lu являются новым малоисследованным кристаллическим материалом для приборов фотоники. Кристаллы группы КRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> относятся к группе симметрии 2/m моноклинной сингонии. Их лазерная стойкость в несколько раз превосходит стойкость акустооптического материала парателлурита. Кристаллы оптически двуосные, одна из осей симметрии эллипсоида показателей преломления N<sub>p</sub>, соответствующая минимальному собственному значению тензора диэлектрической проницаемости, совпадает с кристаллографической осью [010], две другие оси симметрии эллипсоида показателей преломления N<sub>m</sub> и N<sub>g</sub>, соответствующие максимальному собственному значению тензора диэлектрической проницаемости, лежат в кристаллографической плоскости (010) и образуют декартову систему координат. Упругие и фотоупругие свойства KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> частично исследованы в работе (М.М. Mazur, D.Yu. Velikovskiy, L.I. Mazur, A.A. Pavluk, V.E. Pozhar, and V.I. Pustovoit, "Elastic and photo-elastic characteristics of laser crystals potassium rare-earth tungstates KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, where RE=Y, Yb, Gd and Lu", Ultrasonics 54 (2014) 1311-1317). По данным этой работы АО-качество кристаллов группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> в отдельных срезах в несколько раз может превышать АО-качество плавленого кварца, что перспективно для практического применения в АО-устройствах среднего ИК-диапазона. Кристаллы группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> обладают сильной анизотропией упругих, фотоупругих и оптических свойств.

Наиболее близким по технической сущности (прототипом) заявленного способа является способ модуляции лазерного излучения акустической волной, когда направления волнового вектора и вектора потока энергии (вектора Умова-Пойнтинга) совпадают. Способ описан в R.V. Johnson "Design of Acosito-Optic Modilators", Ch. 3 in "Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices", A.P. Goutzoulis and D.R. Pape Eds., New York: Marcel Dekker, 1994. При этом способе ширина акустического столба в кристалле равна ширине пьезопреобразователя. Такой способ модуляции реализуется как в изотропных материалах, например стеклах, плавленом кварце, так и в монокристаллах, когда акустическая волна распространяется вдоль оси симметрии, например в кристаллическом кварце, парателлурите, молибдате свинца. Недостат-ком данного прототипа является высокая плотность мощности электрического и акустического поля на пьезопреобразователе. АО-модуляторы добротности, как правило, потребляют ВЧ-мощность 20-40 Вт и работают с внешним принудительным охлаждением. Высокая плотность мощности приводит к интенсивному локальному тепловыделению в пьезопреобразователе АО-модулятора добротности. Сильный локальный нагрев пьезопластинки может приводить к ее разрушению или к разрушению светозвукопровода, к которому она присоединена, из-за разности и анизотропии коэффициентов теплового расширения между материалами пьезопластинки и светозвукопровода.

Наиболее близким по технической сущности (прототипом) заявляемого устройства является АОмодулятор (патент RU 2476916 C1, опубл. 30.11.2011). АО-модулятор использует кристаллы группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> в режиме неколлинеарной дифракции на квазипродольной акустической волне, при том что направление распространения ультразвука происходит параллельно оси симметрии эллипсоида показателей преломления кристалла N<sub>g</sub>. Недостатком прототипа является относительно низкое значение величины АО-качества M<sub>2</sub> и, соответственно, высокая управляющая ВЧ-мощность. Другим недостатком прототипа является пониженная эффективность дифракции при работе с многомодовым или неколлимированным лазерным излучением. Причиной, препятствующей достижения прототипом требуемого технического результата, является применение в модуляторе квазипродольной (QL) акустической волны и соответствующей геометрии АО-взаимодействия.

В первом объекте предложенного изобретения технический результат заключается в целенаправленном использовании свойств акустической анизотропии кристалла, а именно в увеличении площади пьезопреобразователя за счет того, что акустический пучок распространяется в кристалле в направлении, не являющимся осью симметрии кристалла или локальным экстремумом скорости акустической волны. При этом ширина акустического столба в кристалле всегда меньше ширины пьезопреобразователя и эффективность АО-взаимодействия увеличивается, что позволяет увеличить площадь пьезопреобразователе и, соответля и тем самым уменьшить плотность ВЧ электрической мощности на пьезопреобразователе и, соответственно, его нагрев.

Дополнительно при разнице направлений волнового вектора К и вектора потока энергии S акустической волны при заявляемом способе повышается быстродействие АО-модулятора, так как оно определяется временем пересечения фронтом акустического цуга сечения лазерного пучка. В данном случае это время уменьшается, поскольку вследствие акустической анизотропии определяется величиной групповой скоростью V<sub>g</sub>, а не фазовой скоростью V<sub>p</sub>, то есть большей из этих двух величин.

Указанный технический результат в первом объекте изобретения достигается следующим образом.

Способ модуляции лазерного излучения, включающий возбуждение в монокристалле группы КRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> амплитудно-модулированной бегущей квазисдвиговой акустической волны, поляризованной ортогонально оси N<sub>p</sub> и распространяющуюся в плоскости N<sub>m</sub>N<sub>g</sub> кристалла, при этом лазерный пучок имеет поляризацию собственной волны в данном кристалле и распространяется под углом Брэгга от 0,15 до 8° к волновому фронту акустической волны, а частота акустической волны в светозвукопроводе обеспечивает выполнение условия фазового синхронизма для дифракции лазерного пучка.

Во втором объекте предложенного изобретения технический результат заключается в целенаправленном создании такой геометрии АО-взаимодействия в модуляторе добротности резонаторов лазеров, при которой реализуются пониженная управляющая ВЧ-мощность и возможность работать без дополнительных потерь эффективности с многомодовым или неколлимированным лазерным излучением.

Указанный технический результат во втором объекте изобретения достигается следующим образом.

Акустооптический модулятор состоит из светозвукопровода, изготовленного из монокристалла группы  $KRE(WO_4)_2$ , имеющего акустическую грань, параллельную оси  $N_p$  кристалла и составляющую угол от 0° до (-40)° с осью  $N_m$ , противоположную грань, наклоненную на произвольный угол в акустической грани, с присоединенным к ней акустическим поглотителем, входную оптическую грань с антиотражающим покрытием, выходную оптическую грань с антиотражающим покрытием, сдвиговый пьезопреобразователь на основе пластинки ниобата лития толщиной от 15 до 200 мкм, присоединенный к акустической грани.

Кроме того, монокристалл группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> является кристаллом калий-гадолиниевого вольфрамата KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калий-иттриевого вольфрамата KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калийлютециевого вольфрамата KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калий-иттербиевого вольфрамата KYb(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

В частном случае пьезоэлектрический преобразователь присоединен к светозвукопроводу методом склейки или методом прямой сварки диэлектриков или методом вакуумной диффузионной сварки с образованием двойных сплавов или методом атомной диффузионной сварки одноименных металлов.

Изобретение поясняется чертежами.

Фиг. 1 - полярная проекция АО-качества неколлинеарной геометрии изотропной АО-дифракции на квазисдвиговой (QS) акустической волне, распространяющейся в плоскости N<sub>m</sub>N<sub>g</sub> калий-иттриевого вольфрамата.

Фиг. 2 - АО-качество изотропной АО-дифракции на квазипродольной (QL) и квазисдвиговой (QS) акустических волнах в плоскости N<sub>m</sub>N<sub>g</sub> калий-иттриевого вольфрамата.

Фиг. 3 - векторная диаграмма дифракции в АО-модуляторе.

Фиг. 4 - фазовая скорость ультразвука и угол сноса в плоскости  $N_m N_g$  калий-иттриевого вольфрама-

Фиг. 5 - ориентация светозвукопровода относительно осей симметрии кристалла.

Фиг. 6 - конструкция АО-модулятора.

Фиг. 7 - фотография экспериментального АО-модулятора на кристалле КҮ(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

На фиг. 5 и 6 обозначены:

та.

1 - светозвукопровод из кристалла калий-иттриевого вольфрамата;

- 2 акустическая грань кристалла;
- 3 противоположная акустической грань кристалла;
- 4 входная оптическая грань кристалла;
- 5 выходная оптическая грань кристалла;
- 6 сдвиговый пьезопреобразователь;
- 7 акустический поглотитель;
- 8 входной лазерный пучок;
- 9 вектор поляризации входного пучка;
- 10 квазисдвиговая упругая волна в кристалле.

Технический результат в первом объекте изобретения достигается за счет того, что в монокристалле со значительной акустической анизотропией возбуждается амплитудно-модулированная бегущая акустическая волна в направлении, не являющемся осью симметрии данного кристалла. Благодаря этому направление фазовой и групповой скорости акустической волны различны и сечение акустического пучка становится меньше площади пьезопреобразователя, при этом быстродействие АО-модулятора повышается. Лазерный пучок имеет поляризацию собственной волны в данном кристалле и распространяется под углом Брэгга, а частота акустической волны обеспечивает выполнение условия фазового синхронизма. Монокристалл принадлежит группе KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, акустическая волна является квазисдвиговой распространяющейся в плоскости N<sub>m</sub>N<sub>g</sub> кристалла и поляризованной ортогонально оси N<sub>p</sub>, направление лазерного пучка, поляризованного параллельно оси N<sub>g</sub> кристалла, составляет угол Брэгга от 0,15 до 8° к волновому фронту акустической волны.

Технический результат во втором объекте изобретения достигается за счет того, что в модуляторе применяется квазисдвиговая акустическая волна, распространяющаяся в плоскости симметрии кристалла. Здесь N<sub>m</sub>, N<sub>g</sub> - декартова система координат, связанная с диэлектрическими осями кристалла. Ось симметрии второго порядка N<sub>p</sub> направлена перпендикулярно плоскости чертежа. АО-качество M<sub>2</sub> кристалла для квазисдвиговой акустической волны показано сплошной линией для двух собственных поляризаций световой волны в кристалле (сплошная линия: поляризация по N<sub>m</sub>, пунктирная: поляризация по N<sub>g</sub>). Значения упругих, фотоупругих и оптических констант кристаллов из группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> близки между собой. Здесь и далее расчеты выполнены для калий-иттриевого вольфрамата KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

Из фиг. 1 и 2 следует, что при использовании поляризации света вдоль оси  $N_g$  величина АОкачества  $M_2$  достигает значения  $22 \times 10^{-15}$  с/кг при угле распространения квазисдвиговой акустической волны (-12)° относительно оси  $N_m$ , что всего на 35% меньше АО-качества  $M_2$  классической ориентации АО-модулятора на быстрой продольной волне в парателлурите, применяемой более 50 лет в промышленных АО-модуляторах. В диапазоне углов от 0° до (-28)° величина АО-качества превышает  $15 \times 10^{-15}$ с/кг, то есть более чем в 10 раз превосходит максимальное АО-качество плавленого кварца. В прототипе величина АО-качества  $M_2$  при распространении квазипродольной ультразвуковой волны вдоль оси  $N_g$  не превышает значения  $10 \times 10^{-15}$  с/кг. Тем самым в изобретении устраняется первый недостаток прототипа: относительно высокая управляющая ВЧ-мощность.

На фиг. 3 схематически показана разработанная в изобретении геометрия АО-взаимодействия в изометрической проекции. Величина двулучепреломления и угол Брэгга для наглядности преувеличены. Пунктирными линиями обозначены сечения поверхности волновых нормалей света плоскостями N<sub>m</sub>N<sub>g</sub>, N<sub>p</sub>N<sub>g</sub> и плоскостью дифракции, параллельной оси N<sub>p</sub> и составляющей угол (-12)° осью N<sub>m</sub>.

Частным существенным признаком является то, что пластина пьезопреобразователя из кристалла ниобата лития присоединена к акустической грани светозвукопровода из кристалла KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> методом оригинальной вакуумной нанотехнологии с образованием двойных сплавов (патент RU 2646517C1, 05.03.2018), что уменьшает потери на преобразование электрической ВЧ-мощности в акустическую по сравнению с другими технологиями соединения.

Второй недостаток прототипа, затрудняющий работу АО-модулятора с многомодовым лазерным излучением, связан с эффектом уменьшения эффективности дифракции АО-модулятора при работе с расходящимся излучением, расходимость которого соизмерима или превышает дифракционную расходимость акустической волны, излучаемой пьезопреобразователем.

Физически этот эффект объясняется тем, что в этом случае для высокочастотных компонент углового спектра световой волны не выполняется брэгговский синхронизм с угловым спектром акустической волны и они в процессе дифракции практически не участвуют. Дифракционная расходимость акустической волны, излучаемой однородным пьезопреобразователем, определяется формулой: v/Lf, где v - скорость акустической волны, L - длина пьезопреобразователя, f - частота.

Рассмотрим фиг. 4. Технический результат в изобретении достигается тем, что скорость квазисдивиговой акустической волны, соответствующая максимуму АО-качества  $M_2$ , достигается при угле (-12)° и равна  $2,4\times10^3$  м/с; скорость квазипродольной акустической волны в прототипе при угле (-90)° равна  $4,8\times10^3$  м/с. Таким образом акустический угловой спектр при прочих равных условиях в изобретении в 2 раза шире, чем у прототипа. Следовательно при прочих равных условиях разработанный АО-модулятор в отличие от прототипа может работать с лазерным многомодовым или неколлимированным излучением, расходимость которого в 2 раза больше расходимости коллимированного излучения без уменьшения эффективности.

Акустическая анизотропия кристалла проявляется, в частности, в том, что угол  $\psi$  между направлением волнового вектора К и групповой скоростью S квазисдвиговой акустической волны в кристаллографической плоскости  $N_m N_g$  кристалла калий-иттриевого вольфрамата, поляризованной ортогонально оси  $N_p$  может превышать по абсолютному значению величину 30°, как показано на фиг. 4. В частности, в направлении (-12)° к оси  $N_m$ , в котором имеет место максимум величины АО-качества  $M_2$ , для световой волны, поляризованной параллельно оси  $N_g$ , величина угла  $\psi$  составляет приблизительно (-23)°.

Кристаллы группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> характеризуются высокой стойкостью к воздействию лазерного излучения, достаточно сильным AO-эффектом, который делает их наиболее перспективным материалом для акустооптических модуляторов добротности, дисперсионных линий задержки, AO-устройств сдвига частоты видимого и среднего ИК-диапазона длин волн. Так, для кристалла KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> минимальное значение лазерной стойкости составляет величину 50 ГВт/см<sup>2</sup> для импульсов длительностью 20 нс на длине волны 1064 нм (I.V. Mochalov, "Laser and nonlinear properties of the potassium gadolinium tungstate laser crystal KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Nd<sup>3+</sup>-(KGW:Nd)", Optical Engineering 36 (1997) 1660-1669). Материалы группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> обладают высокой оптической и акустической анизотропией, существенно зависящей от

ориентации кристалла относительно кристаллографических осей.

Изобретение реализуется следующим образом. Акустооптический модулятор состоит из светозвукопровода 1, изготовленного из монокристалла группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, имеющего акустическую грань 2, параллельную оси N<sub>p</sub> кристалла светозвукопровода 1, и нормаль к которой составляет угол от 0° до (-30)° с осью N<sub>m</sub>, противоположную грань 3, входную оптическую грань 4, ортогональную оси N<sub>p</sub>, выходную оптическую грань 5, ортогональную оси N<sub>p</sub>, пьезопреобразователь 6, присоединенный к акустической грани 2, акустический поглотитель 7, присоединенный к грани 3. Пьезопреобразователь 6 на основе пластинки ниобата лития толщиной от 15 до 200 мкм возбуждает в светозвукопроводе 1 квазисдвиговую акустическую волну 10, поляризованную ортогонально оси N<sub>p</sub> светозвукопровода 1. Акустический поглотитель 7 расположен на грани 6 светозвукопровода 1, наклоненной на произвольный угол к акустической грани 2, что обеспечивает режим бегущей акустической волны в светозвукопроводе 1. Входной лазерный пучок 8 имеет поляризацию 9, параллельную оси N<sub>g</sub> кристалла и распространяется под углом от Брэгга 0,5 до 1,5° к нормали в плоскости дифракции, образованной осью N<sub>p</sub> кристалла и нормалью к акустической грани 2 светозвукопровода 1.

Для уменьшения управляющей ВЧ-мощности пьезопреобразователь может быть присоединен по оригинальной вакуумной технологии с образованием двойных сплавов к акустической грани 3 светозвукопровода 1. Пьезопреобразователь также может быть присоединен к акустической грани светозвукопровода склейкой методом атомной диффузионной сварки одноименных металлов (Т. Shimatsu and M. Uomoto, "Atomic diffusion bonding of wafers with thin nanocrystalline metal films", J. Vac. Sci. Technol. В 28 (2010) 706-704), или методом прямой сварки (К. Eda, K. Onishi, H. Sato, Y. Taguchi, and M. Tomita, "Direct Bonding of Piezoelectric Materials and Its Applications", Proc. 2000 IEEE Ultrasonics Symposium (2000) 299-309), обеспечивающим акустический контакт соединяемых поверхностей.

Поглотитель акустической волны 7 может быть изготовлен по оригинальной вакуумной технологии на основе двойного сплава с избытком индия с целью эффективного поглощения бегущей сдвиговой акустической волны.

Изобретение было проверено экспериментально. На основе кристалла калий-иттриевого вольфрамата был изготовлен вариант экспериментального АО-модулятора, работающий с горизонтальной поляризацией входного лазерного излучения, который подтвердил расчетные данные. На фиг. 7 приведена фотография изготовленного экспериментального АО-модулятора. Активная апертура АО-модулятора составляла 2,0 мм, длина пьезопреобразователя 14,0 мм, рабочая частота ультразвука 100 МГц. Измерения проводились на длине волны 532 нм. Максимальная эффективность дифракции составила 96% при управляющей мощности 1,5 Вт. Основные параметры АО-модулятора в пересчете на длину волны 1064 нм следующие: эффективность более 95% при управляющей мощности 2,0 Вт и длине пьезопреобразователя 40 мм.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ модуляции лазерного излучения, включающий возбуждение в монокристалле группы  $KRE(WO_4)_2$  амплитудно-модулированной бегущей квазисдвиговой акустической волны, поляризованной ортогонально оси  $N_p$  и распространяющуюся в плоскости  $N_mN_g$  кристалла, при этом лазерный пучок имеет поляризацию собственной волны в данном кристалле и распространяется под углом Брэгга от 0,15 до 8° к волновому фронту акустической волны, а частота акустической волны в светозвукопроводе обеспечивает выполнение условия фазового синхронизма для дифракции лазерного пучка.

2. Акустооптический модулятор для осуществления способа по п.1, состоящий из светозвукопровода, изготовленного из монокристалла группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, имеющего акустическую грань, параллельную оси N<sub>p</sub> кристалла и составляющую угол от 0° до (-40)° с осью N<sub>m</sub>, противоположную грань, наклоненную на произвольный угол в акустической грани с присоединенным к ней акустическим поглотителем, входную оптическую грань с антиотражающим покрытием, выходную оптическую грань с антиотражающим покрытием и сдвиговый пьезопреобразователь на основе пластинки ниобата лития толщиной от 15 до 200 мкм, присоединенный к акустической грани.

3. Акустооптический модулятор по п.3, в котором монокристалл группы KRE(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> является кристаллом калий-гадолиниевого вольфрамата KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калий-иттриевого вольфрамата KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калий-лютециевого вольфрамата KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> или кристаллом калийиттербиевого вольфрамата KYb(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.

4. Акустооптический модулятор по п.3, в котором пьезоэлектрический преобразователь присоединен к светозвукопроводу методом склейки или методом прямой сварки диэлектриков или методом вакуумной диффузионной сварки с образованием двойных сплавов или методом атомной диффузионной сварки одноименных металлов.









Фиг. 3





Фиг. 7



С Евразийская патентная организация, ЕАПВ Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2