

Квазиколлинеарные перестраиваемые акустооптические фильтры на основе кристалла парателлурита для систем спектрального уплотнения и селекции оптических каналов

В.Я.Молчанов, В.Б.Волошинов, О.Ю.Макаров

Исследуется близкое к коллинеарному акустооптическое взаимодействие в акустически и оптически анизотропных кристаллах парателлурита, и обсуждается возможность применения этого типа взаимодействия в акустооптических перестраиваемых фильтрах с высоким спектральным разрешением. Сравниваются различные модификации приборов, и рассматриваются варианты построения устройств, предназначенных для обработки световых пучков и селекции световых сигналов в волоконно-оптических системах связи со спектральным уплотнением каналов на длине волны излучения $\lambda \simeq 1550$ нм.

Ключевые слова: акустооптика, волоконно-оптические системы связи, WDM-системы, акустическая и оптическая анизотропия, квазиколлинеарное взаимодействие, перестраиваемые акустооптические фильтры, спектральное разрешение, парателлурит.

1. Введение

Малые потери света и относительно широкие оптические полосы пропускания одномодовых волокон позволяют сформировать ряд независимых спектральных каналов передачи информации. Пропускная способность оптических линий связи может быть увеличена в несколько сотен раз при использовании мультиспектрального метода передачи данных, получившего название «технология WDM» [1]. Важнейшими элементами WDM-системы связи являются спектральные селекторы сигналов, выделяющие световые потоки на заданных длинах волн света и направляющие световые пучки в те или иные волоконно-оптические каналы.

Известно, что селекторами оптических сигналов могут служить акустооптические (АО) перестраиваемые фильтры [2, 3]. Более того, АО взаимодействие и устройства на его основе представляются чрезвычайно перспективными для использования в мультиспектральных информационных каналах оптоволоконных систем связи и в устройствах коммутации телекоммуникационных сетей [1–3], поскольку перестраиваемые АО устройства обладают широкими функциональными возможностями: малыми оптическими потерями, значительным числом переключаемых спектральных каналов и высоким быстродействием. Эти устройства осуществляют прямое преобразование свет–свет, а не косвенное по схеме свет–электрический сигнал–электрический сигнал–свет, что является несомненным их достоинством.

В.Я.Молчанов, О.Ю.Макаров. Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов», Научно-технологический центр акустооптики, Россия, 119049 Москва, Ленинский просп., 4; e-mail: v_molchanov@smtp.ru

В.Б.Волошинов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 22 сентября 2008 г., после доработки – 20 января 2009 г.

Перестраиваемые АО фильтры – это уникальные электронно-управляемые устройства, способные одновременно и независимо управлять значительным числом близко расположенных спектральных каналов и направлять передаваемые по этим каналам оптические сигналы в один из двух выходных портов. Очевидно, что при использовании фильтрующих устройств в многоканальных сетях оптической связи к характеристикам таких устройств предъявляются особые требования. В частности, вносимые потери, управляющая мощность, а также межканальные перекрестные помехи фильтра должны быть низкими. Для применения в телекоммуникационных сетях со значительным числом спектральных каналов и спектральным разделением несущих лазерных частот 50–200 ГГц необходимо иметь приборы с высокой спектральной разрешающей силой $R = \lambda/\Delta\lambda \simeq 10^3 - 10^4$, где λ – длина волны и $\Delta\lambda$ – полоса пропускания прибора.

2. Акустооптические фильтры на кристалле парателлурита

В АО фильтрах, в принципе, могут быть использованы различные режимы дифракции света на ультразвуке [2, 3]. Однако на сегодняшний день оптимальной для реализации вышеописанных задач представляется коллинеарная или квазиколлинеарная геометрия АО взаимодействия [4–18].

Целью настоящей работы является исследование квазиколлинеарной геометрии АО взаимодействия в кристалле парателлурита TeO_2 . Этот материал характеризуется ярко выраженной анизотропией оптических и акустических свойств. Поэтому создание на его основе семейства спектральных АО перестраиваемых фильтров представляется важной прикладной задачей. В теоретической части работы основное внимание уделяется рассмотрению конкретных схем квазиколлинеарного взаимодействия в парателлурите с использованием явления отражения акустической волны от входной оптической грани фильтра.

Для анализа выбрана дифракция в монокристалле TeO_2 на медленной сдвиговой волне, распространяющейся в плоскости $(1\bar{1}0)$ и поляризованной ортогонально этой плоскости. В плоскости $(1\bar{1}0)$ взаимодействие света со сдвиговой звуковой волной происходит более эффективно по сравнению с другими случаями взаимодействия в парателлурите. Высокая эффективность взаимодействия особенно важна в случае использования фильтра в многоканальном режиме в ИК диапазоне, где упреждающие мощности велики.

Коллинеарное взаимодействие с коллинеарными фазовыми и групповыми скоростями света и звука впервые наблюдалось в монокристаллах ниобата лития и молибдата кальция [3–5]. Другой тип коллинеарного взаимодействия с коллинеарными групповыми скоростями света и звука и неколлинеарными фазовыми скоростями был детально рассмотрен в [6–8]. Авторы этих публикаций использовали акустическую анизотропию кристалла SiO_2 и применили отражение акустической волны от входной оптической грани кристалла. Этим была обеспечена возможность относительно простого ввода светового луча в звуковой столб коллинеарно с групповой скоростью звука. Впоследствии было создано несколько модификаций коллинеарных фильтров, получивших широкое распространение в АО спектрометрах [9, 10].

К сожалению, коллинеарное взаимодействие с совпадающими направлениями фазовых или групповых скоростей пучков из-за ограничений, налагаемых симметрией материала, не может быть реализовано в высокоэффективном кристалле парателлурита. Однако в этом материале удалось осуществить квазиколлинеарное взаимодействие света и звука [11–18], которое наблюдалось как в случае, когда падающая световая волна отражалась от плоскости пьезопреобразователя, так и при неизменном направлении распространения света в ячейке и отражении звуковой волны от входной оптической грани кристалла.

Известные публикации по квазиколлинеарному взаимодействию в парателлурите можно разделить на две основные группы. В первую входят работы, в которых рассмотрены вопросы практического создания фильтров [14–16, 18]. Вторая группа работ посвящена исследованию закономерностей квазиколлинеарного взаимодействия в зависимости от анизотропных оптических и акустических свойств кристалла парателлурита [11–13, 17]. Однако эти исследования не были подтверждены должными экспериментальными исследованиями.

Другой целью настоящей работе было практическое создание семейства квазиколлинеарных АО фильтров с совершенными оптическими и электрическими характеристиками. Главной задачей являлась оптимизация конструкции приборов с учетом требований, предъявляемых WDM-системами связи. Предложенный нами метод анализа характеристик приборов отличается универсальностью и простотой, причем эффективность использованного метода расчета подтверждается экспериментально на примере созданных образцов АО фильтров.

3. Теоретическое рассмотрение проблемы

Первым этапом создания АО устройства является построение векторных диаграмм, устанавливающих в приближении плоских световых и звуковых волн соответствие между волновыми векторами взаимодействующи-

щих пучков [3]. Из диаграмм находится связь между углами падения света и звука относительно кристаллографических осей материала, а также частотой ультразвука, обеспечивающей дифракцию. Данное соответствие является необходимым условием эффективного взаимодействия света и звука, однако дифракция может и отсутствовать, если эффективная фотоупругая константа кристалла в заданном направлении взаимодействия равна нулю.

При квазиколлинеарном взаимодействии угол падения света в кристалле, найденный из векторных диаграмм, должен определять угол ориентации групповой скорости звуковой волны, которая распространяется в кристалле вдоль светового пучка. Кристаллы являются акустически анизотропной средой, поэтому направления фазовой и групповой скоростей акустической волны в общем случае не совпадают между собой. Известно, что акустические скорости определяются из поверхности медленностей, общий вид которой задается конкретной группой симметрии кристалла и коэффициентами жесткости материала [19]. Таким образом, в кристалле любой группы симметрии можно установить однозначное соответствие между углом падения света и направлением фазовой скорости звуковой волны, при котором реализуется квазиколлинеарное взаимодействие. Очевидно, что степень этого взаимодействия определяется эффективной фотоупругой константой, действующей в направлении распространения света, а также такими параметрами, как показатели преломления падающей и дифрагированной волн, скорость звука и плотность материала.

Поскольку АО фильтры в WDM-системах связи работают с мультиспектральными лазерными сигналами, то для устранения нежелательного влияния дисперсии показателей преломления кристалла на характеристики фильтра входная оптическая грань фильтра выбирается ортогональной падающему свету. Это условие определяет ориентацию входной грани кристалла относительно кристаллографических осей материала.

Для реализации квазиколлинеарного взаимодействия в кристалле необходимо создать акустический столб малого сечения и большой протяженности. Важно также без потерь ввести в акустический столб световое излучение. В данной работе для формирования звукового поля используется отражение акустической волны от входной оптической грани кристалла. Этот метод формирования звукового столба является наиболее удачным и перспективным [8, 12, 15, 16].

На первом этапе рассмотрения однозначно определяется ориентация акустического волнового вектора в звуковом столбе, а также ориентация входной оптической грани кристалла относительно кристаллографических осей, на втором этапе находится направление распространения акустической волны, падающей на входную грань АО ячейки. Эта акустическая волна генерируется пьезоэлектрическим преобразователем и после отражения от входной грани кристалла преобразуется в звуковую волну, обеспечивающую квазиколлинеарное взаимодействие [14–21]. Для определения направления исходной акустической волны необходимо использовать известные законы отражения акустических волн от границы раздела [22]. Направление фазовой скорости исходной акустической волны однозначно определяет ориентацию той грани кристалла, на которой располагается пьезопреобразователь.

Для решения задачи необходимо в выбранной плоскости дифракции построить векторную диаграмму АО взаимодействия и одновременно с этим – поверхности акустических медленностей кристалла, чтобы взаимно сориентировать их относительно кристаллографических осей. В рассматриваемом кристалле парателлурита медленная сдвиговая акустическая волна распространяется в плоскости (110) и имеет поляризацию, ортогональную этой плоскости. Если угол α измеряется между фазовой скоростью звука V_{ph} и осью [110], то выражение для фазовой скорости звуковой волны в парателлурите имеет вид [22]

$$V_{ph}(\alpha) = \left[\frac{1}{\rho} \left(c_{44} \sin^2 \alpha + \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \cos^2 \alpha \right) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, а c_{ij} – упругие коэффициенты. Анализ показывает, что угол сноса акустической волны ψ , т.е. угол между фазовой V_{ph} и групповой V_g скоростями ультразвука определяется следующим выражением:

$$\psi(\alpha) = \arctan \left[\frac{(2c_{44} - c_{11} + c_{12}) \tan \alpha}{c_{11} - c_{12} + 2c_{44} \tan^2 \alpha} \right]. \quad (2)$$

По определению, при квазиколлинеарном взаимодействии волновой вектор падающего света k_i коллинеарен вектору групповой скорости V_{g1} акустической волны. На рис.1 представлена схема, определяющая направления световой и звуковой волн, а также ориентацию входной оптической грани кристалла относительно кристаллографических осей. Звуковая волна отражается от входной грани кристалла. На схеме приняты следующие стандартные для акустооптики обозначения: k_d и K – векторы дифрагированного света и звука соответственно. Полярный угол φ на векторной диаграмме определяет частоту АО взаимодействия. На рис.1 также показана входная оптическая грань кристалла, на которую под прямым

углом падает необыкновенно поляризованное лазерное мультиспектральное излучение.

Из рис.1 видно, что ориентация входной оптической грани кристалла определяется углом $\pi/2 - (\alpha_1 + \psi_1)$, отсчитываемым от оси [110]. В последнем соотношении угол α_1 – это угол между направлением фазовой скорости звука V_{ph1} и осью [110], а угол ψ_1 измеряется между фазовой V_{ph1} и групповой V_{g1} скоростями ультразвуковой волны. Акустическая волна с фазовой V_{ph2} и групповой V_{g2} скоростями, отражаясь от входной оптической грани, преобразуется в звуковую волну с фазовой скоростью V_{ph1} и групповой скоростью V_{g1} . Очевидно, что именно на этой волне ультразвука и дифрагирует световой пучок. Геометрическое построение, иллюстрирующее акустическое отражение от входной грани кристалла, представлено на рис.2, из которого следует, что угол α_2 лежит между фазовой скоростью звука V_{ph2} и осью [110], а угол ψ_2 – между фазовой V_{ph2} и групповой V_{g2} скоростями акустической волны, излучаемой пьезопреобразователем.

Условие отражения звуковой волны от границы раздела определяется известным правилом равенства проекций обратных скоростей падающей и отраженной волн на границу раздела [22] и в данном случае записывается в виде

$$\frac{1}{V_{ph1}(\alpha_1)} \sin \psi_1 = \frac{1}{V_{ph2}(\alpha_2)} \sin(\alpha_1 + \psi_1 + \alpha_2). \quad (3)$$

Из рис.2 следует, что ориентация грани кристалла, на которой располагается пьезопреобразователь, относительно кристаллографических осей определяется углом $\pi/2 - \alpha_2$. Угол α_2 образован осью [110] и плоскостью пьезопреобразователя ячейки и может быть найден из условия равенства проекций обратных скоростей (3). Оказалось, что уравнение (3) не имеет аналитического решения, поэтому при проведении исследований оно решалось численно. Из (3) следует, что существует два отличных

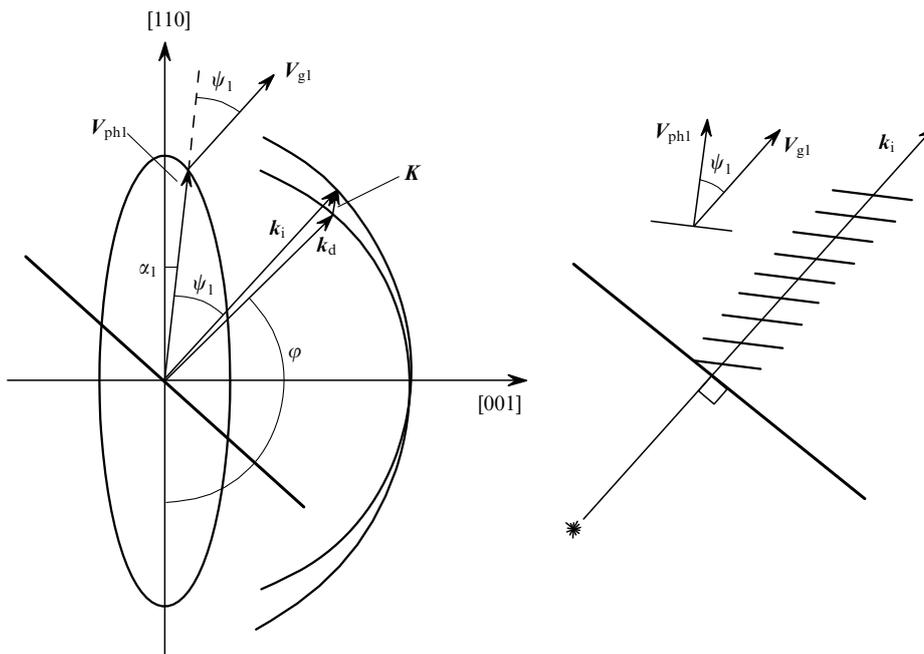


Рис.1. Использование векторной диаграммы и поверхности акустической медленности кристалла парателлурита для построения геометрии квазиколлинеарного взаимодействия.

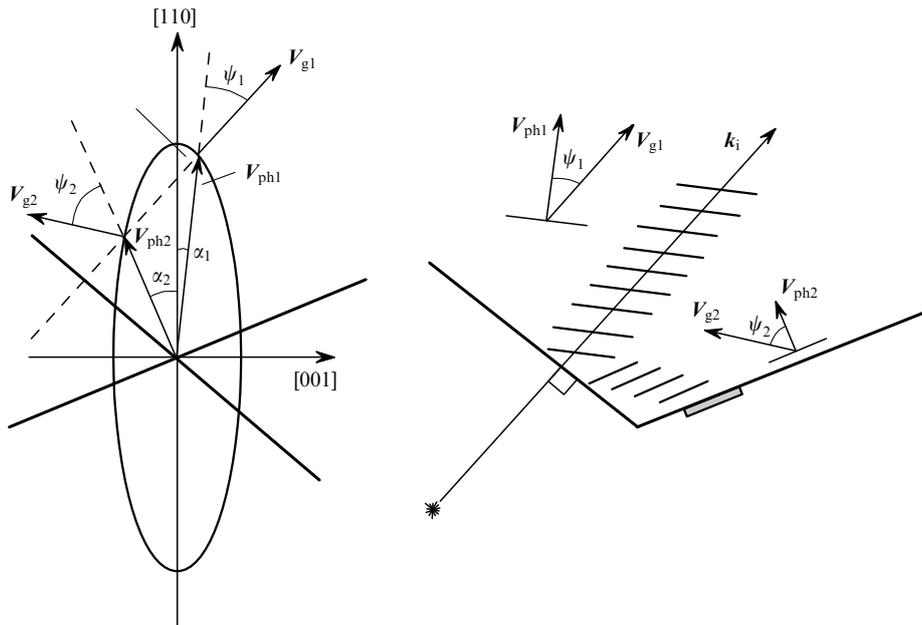


Рис.2. Анализ отражения звуковой волны от входной оптической грани кристалла с использованием поверхности акустической медленности кристалла параллелурита.

от нуля решения, одно из которых является тривиальным ($\alpha_2 = -\alpha_1$) и соответствует коллинеарному направлению векторов V_{g1} и V_{g2} групповых скоростей звуковых волн. Очевидно, что тривиальное решение соответствует конфигурации фильтра, непригодной для реализации квази-коллинеарного взаимодействия. Поэтому при проведении настоящего исследования использовалось второе решение для угла α_2 .

4. Конструирование квазиколлинеарных фильтров для лазерных систем связи

Как следует из теоретического рассмотрения, исходным параметром, определяющим оптическую и акустическую конфигурацию АО фильтра относительно кристаллографических осей, является угол α_1 , который задает ориентацию волнового вектора звука. Выбор угла α_1 осуществляется с учетом оптических, энергетических и конструктивных соображений. Как известно, к фильтрам для использования в WDM-системах связи предъявляются повышенные требования по ширине спектральной полосы пропускания. Кроме того, управляющая мощность прибора должна быть минимальной, что особенно существенно при многоканальном режиме работы прибора [1].

Конструктивные особенности фильтров обусловлены различными вариантами ориентации граней кристалла относительно кристаллографических осей. Расчет углов, определяющих ориентацию граней ячеек, показывает, что в зависимости от величины угла α_1 существует несколько возможных конфигураций ячеек (представлены на рис.3). Так, при увеличении α_1 от 0 до 1.78° угол между входной оптической гранью фильтра и гранью, на которой расположен пьезопреобразователь, является острым. Если же α_1 лежит в диапазоне $1.78^\circ < \alpha_1 < 13.31^\circ$, то угол между входной гранью и гранью пьезопреобразователя тупой, а при $\alpha_1 > 13.31^\circ$ этот угол снова становится острым. Двум значениям угла α_1 (1.78° и 13.31°) соответствуют две конфигурации ячеек, при которых грани фильтра ортогональны. При этом ориентация кристал-

лографических осей является различной для каждой из этих ячеек.

Рис.3,а соответствует варианту, когда фазовая скорость звука V_{ph2} направлена в сторону входной оптиче-

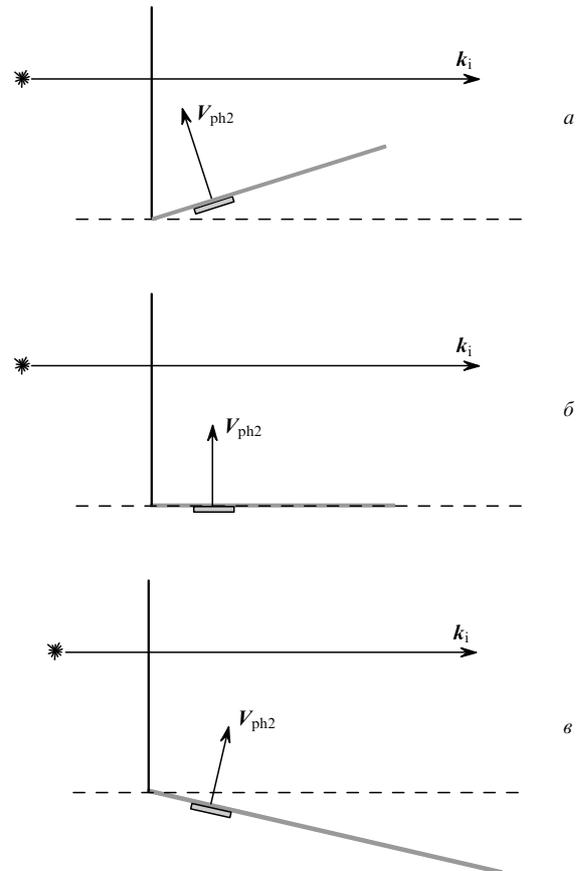


Рис.3. Различные варианты взаимной ориентации граней фильтра: при $0 < \alpha_1 < 1.77^\circ$ и $\alpha_1 > 13.31^\circ$ угол между гранями фильтра острый (а), при $\alpha_1 = 1.77^\circ$ и $\alpha_1 = 13.31^\circ$ грани фильтра перпендикулярны друг другу (б), при $1.77^\circ < \alpha_1 < 13.31^\circ$ угол между гранями фильтра тупой (в).

ской грани фильтра. Направление падающего на кристалл света дано волновым вектором k_i . В случае, представленном на рис.3,б, направление фазовой скорости V_{ph2} параллельно оптической грани, что соответствует скользящему падению акустического пучка на грань [20]. Наконец, на рис.3,в фазовая скорость V_{ph2} направлена в противоположную сторону от входной оптической грани. В двух последних модификациях фильтров возбуждаемая пьезопреобразователем акустическая волна падает на входную оптическую грань вследствие акустической анизотропии кристалла парателлуриата.

При расчетах скорости акустических волн в кристалле были использованы следующие значения упругих констант материала, соответствующие температуре 20 °С [23]: $c_{11} = (5.612 \pm 0.020) \times 10^{10}$ дин·см², $c_{12} = (5.155 \pm 0.025) \times 10^{10}$ дин·см², $c_{13} = (2.303 \pm 0.030) \times 10^{10}$ дин·см², $c_{33} = (10.571 \pm 0.025) \times 10^{10}$ дин·см², $c_{44} = (2.668 \pm 0.005) \times 10^{10}$ дин·см² и $c_{66} = (6.614 \pm 0.015) \times 10^{10}$ дин·см². Плотность парателлуриата была принята равной 6.00 г/см³.

Известно, что создание фильтров с высоким разрешением требует синтеза больших монокристаллов TeO₂, что является достаточно сложной задачей кристаллофизики. С этой точки зрения случай, когда грани акустооптического фильтра перпендикулярны друг другу, предпочтителен, т. к. кристаллический материал используется более рационально. А в случае, когда тупой угол между оптической и акустической гранями велик (в максимуме он превышает 120°), преимущества предложенной квазиколлинеарной геометрии АО взаимодействия уже становятся неочевидными. Более простой и рациональной может оказаться традиционная схема ввода-вывода светового излучения при отражении света от грани пьезопреобразователя [1, 11].

Оптимальное значение угла α_1 выбирается с учетом комплекса системных требований к энергетическим и оптическим параметрам АО фильтра. Оценить эти параметры можно с помощью данных на рис.4 и 5, на которых приведены зависимость акустооптического качества M_2

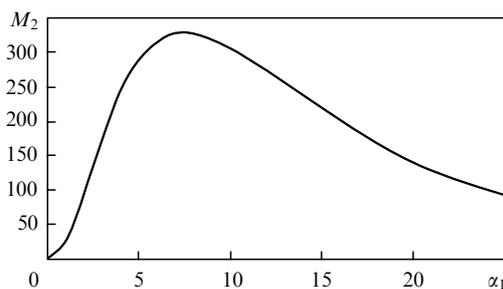


Рис.4. Зависимость акустооптического качества парателлуриата от угла среза акустической грани.

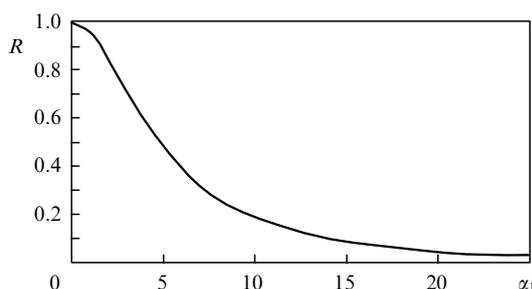


Рис.5. Зависимость нормированного разрешения фильтра от угла среза акустической грани.

кристалла парателлуриата от угла α_1 и нормированная зависимость разрешения фильтра R от угла α_1 [11]. Из рис.4 и 5 следует, что невозможно создать оптимальный квазиколлинеарный фильтр на парателлуриате, имеющий одновременно максимальные характеристики разрешения и минимальную управляющую мощность. Поэтому выбор угла α_1 определяется конкретными системными требованиями к фильтру.

5. Экспериментальные исследования фильтров

Было изготовлено семейство квазиколлинеарных АО приборов, соответствующих трем основным конфигурациям ячеек, приведенным на рис.3. На рис.6,а представлена схема фильтра с углом среза $\alpha_1 = 1.58^\circ$, и показана ориентация граней АО ячейки относительно кристаллографических осей. Особенностью устройства является то, что акустические волны распространяются в кристалле строго вдоль оси [110], когда угол сноса акустической волны, генерируемой преобразователем, $\psi_2 = 0$. Фотография фильтра приведена на рис.6,б. Две другие типичные конструктивные конфигурации АО фильтров показаны на рис.7. Для устранения стоячей акустической волны в фильтрах применялся поглотитель из индия.

На основе данных расчета ориентации граней фильтра относительно кристаллографических осей и углов сноса ψ_2 акустических волн, излучаемых пьезопреобразователем, определяются габариты фильтра, а также геометрические размеры пьезопреобразователя и место его расположения на акустической грани кристалла в зависимости от требований к оптической апертуре прибора.

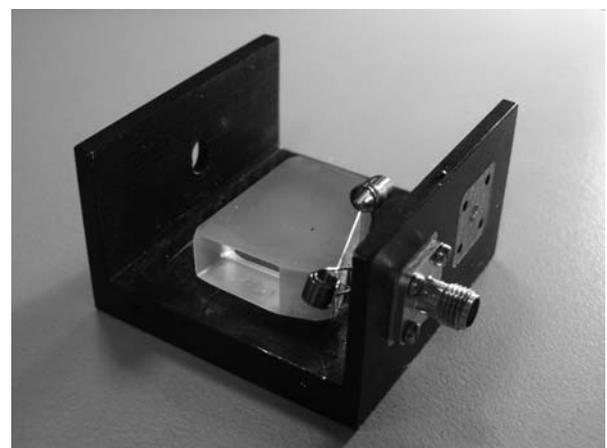
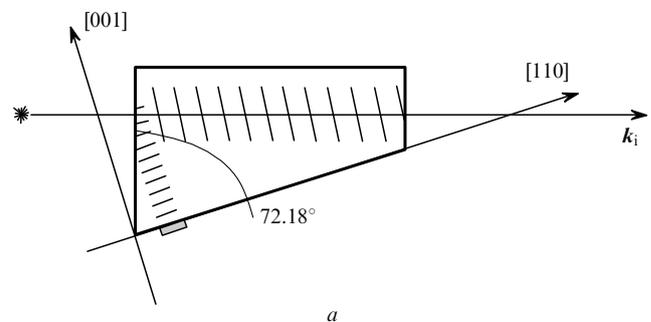


Рис.6. Квазиколлинеарный АО фильтр с углом $\alpha_1 = 1.58^\circ$: ориентация граней относительно кристаллографических осей (а) и вид прибора со снятой крышкой (б).

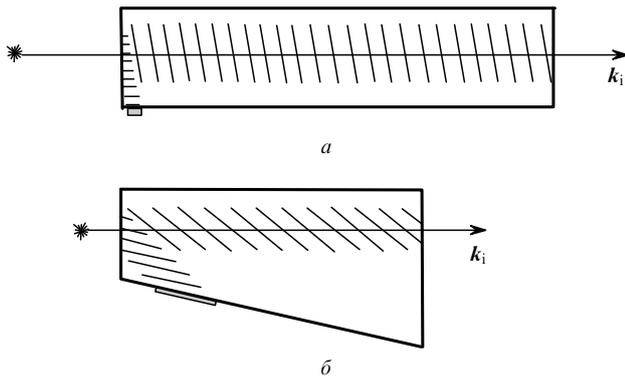


Рис.7. Схемы квазилинейных АО фильтров: оптимизированного по спектральному разрешению (а) и оптимизированного по управляющей мощности (б).

В соответствии с данными рис.4 и 5 следует ожидать, что фильтр, изображенный на рис.7,а, будет иметь высокое спектральное разрешение, но не оптимальную величину управляющей электрической мощности. С другой стороны, фильтр на рис.7,б может иметь значение управляющей мощности, близкое к минимальному, однако при прочих равных условиях он будет иметь худшее спектральное разрешение. Очевидно, что максимальное спектральное разрешение фильтра теоретически реализуется при угле среза $\alpha_1 = 0$, когда акустическая волна распространяется строго вдоль оси [110]. Однако при этом соответствующая эффективная фотоупругая константа и акустооптическое качество в парателлурите равны нулю [1, 2].

Экспериментальное исследование разработанных АО приборов проводилось в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы WDM-систем связи. В экспериментах в одномодовое волокно с диаметром сердцевинки 9 мкм вводилось излучение с непрерывным спектром в диапазоне 1400–1600 нм или излучение лазера с длиной волны 1550 нм. После световода излучение с помощью коллиматора направлялось на исследуемый АО фильтр. Приемный коллиматор на выходе фильтра настраивался либо на прошедшее излучение (нулевой порядок дифракции), либо на отфильтрованное излучение (–1-ый порядок), после чего оптический сигнал поступал на вход анализатора спектра.

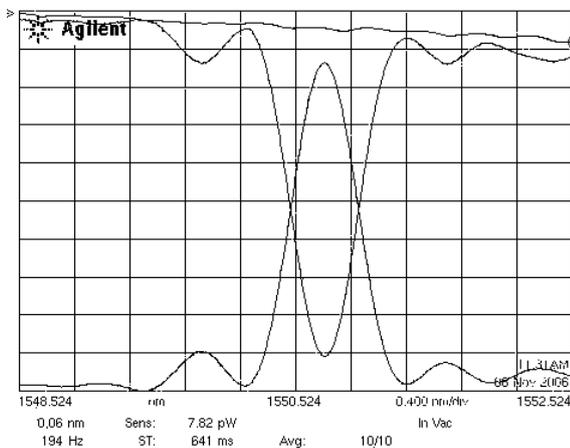


Рис.8. Спектральная функция пропускания квазилинейного АО фильтра с углом среза $\alpha_1 = 1.58^\circ$.

На рис.8 представлена спектральная функция пропускания фильтра, показанного на рис.6. Эта характеристика была получена при использовании источника непрерывного оптического спектра, излучение которого было линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции. Ширина спектральной полосы пропускания прибора, оцениваемая по уровню 0.5, составила 0.48 нм. Эффективность дифракции 90 % света с $\lambda = 1550$ нм достигалась при управляющей мощности 90 мВт. Длина акустического столба в ячейке была равна 28 мм, а его поперечное сечение составляло 3.5×3.5 мм. Частота АО взаимодействия при выполнении условия синхронизма на $\lambda = 1550.7$ нм равнялась 54.9 МГц.

Спектральная функция пропускания квазилинейного АО фильтра с углом среза $\alpha_1 = 1.78^\circ$, схема которого изображена на рис.7,а, представлена на рис.9. Длина акустического столба составила 67 мм, что определило чрезвычайно узкую спектральную полосу пропускания прибора: 0.24 нм по уровню 0.5. Эффективность дифракции до 90 % на $\lambda = 1537$ нм обеспечивалась при управляющей мощности 60 мВт. Поперечное сечение акустического столба было равно 3.5×3.5 мм, частота дифракции составляла 52.2 МГц. Управляющая мощность оказалась несколько выше расчетной, что объясняется неоднородностью акустического поля в столь длинном кристалле.

Возможность работы данного прибора в WDM-системе связи демонстрируется на рис.10. Коллиматор на выходе фильтра в этих экспериментах был расположен в нулевом порядке дифракции. Источником излучения служил лазер с длиной волны 1550 нм. Спектр излучения лазера, показанный на рис.10,а, представлял собой типичный спектр многочастотного лазера с эквидистантно расположенными линиями, соответствующими большому числу продольных мод. Межмодовое расстояние в спектре лазера равнялось 0.55 нм, что незначительно превышало стандартный интервал разделения несущих частот WDM-системы связи 0.4 нм (50 ГГц), но было заведомо меньше спектрального интервала 0.8 нм (100 ГГц) типовой оптоволоконной WDM-системы. Фильтр настраивался на частоту одной из продольных мод лазера, а управляющая мощность выбиралась отвечающей максимальной эффективности дифракции. На рис.10,б показано подавление фильтром в нулевом порядке и перенесе-

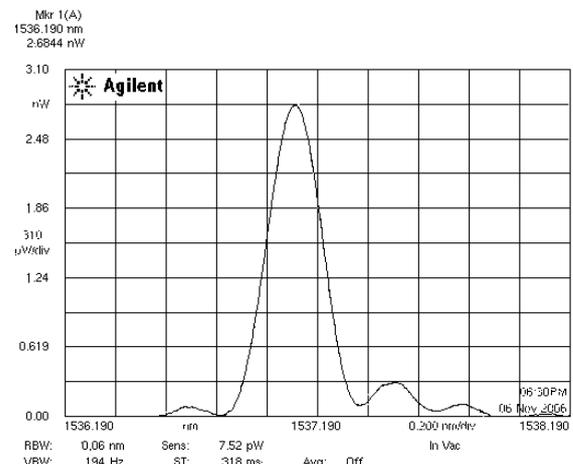


Рис.9. Спектральная функция пропускания квазилинейного АО фильтра с углом среза $\alpha_1 = 1.78^\circ$.

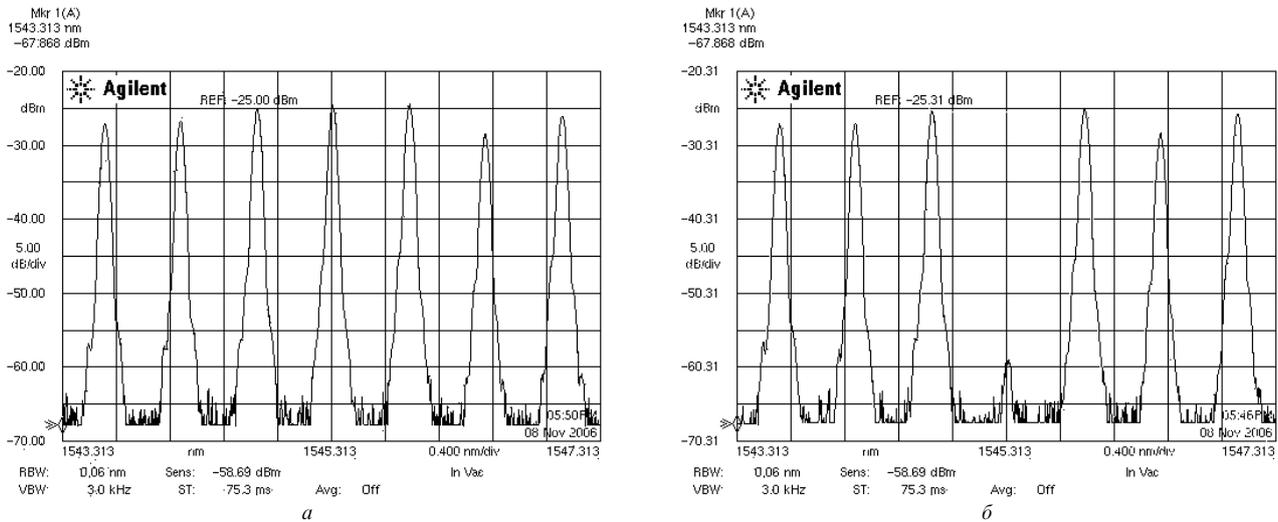


Рис.10. Подавление АО фильтром спектральной компоненты многочастотного лазера с межмодовым расстоянием 0.55 нм: спектр в отсутствие ВЧ мощности (а) и спектр при включенной ВЧ мощности (б).

ние в -1 -ый порядок одной из спектральных составляющих исходного сигнала до уровня свыше -30 дБ, при этом влияние АО фильтра на соседние спектральные составляющие составило не более 1 дБ. Проведенные эксперименты показывают, что разработанные приборы могут быть успешно применены для работы в WDM-системах связи со спектральным разделением частот сигналов 100 ГГц и более.

Экспериментальное исследование фильтра, представленного на рис.7,б, показало, что, как и следовало ожидать, фильтр имеет умеренное спектральное разрешение. Однако рабочая мощность управляющих сигналов такого прибора оказалась весьма низкой, что может быть определяющим фактором для ряда применений. Например, в устройстве с углом среза $\alpha_1 = 5^\circ$ и длиной кристалла 21 мм управляющая мощность, соответствующая эффективности дифракции 90 %, составляла 63 мВт, что хорошо совпадает с расчетным значением. Ширина полосы пропускания фильтра при этом не превышала 1.4 нм.

Основными факторами, которые определяют спектральную полосу пропускания фильтра $\delta\lambda$, являются расходимость световых и звуковых волн, а также спектральное уширение акустического пуга волн, заполняющего кристалл ограниченных размеров. На практике обычно пользуются оценочным соотношением [1, 11]:

$$\delta\lambda = \sqrt{\delta\lambda_\phi^2 + \delta\lambda_\alpha^2 + \delta\lambda_L^2}, \quad (4)$$

где $\delta\lambda_\phi$, $\delta\lambda_\alpha$, $\delta\lambda_L$ – спектральные полосы пропускания, обусловленные расходимостями светового ($\delta\phi$) и акустического ($\delta\alpha$) пучков и спектральным уширением заполняющего кристалл длиной L акустического пуга [11]. Оценки, проведенные для конструктивных параметров фильтра с $\alpha = 1.78^\circ$, показали, что вкладом $\delta\lambda_\alpha$ в полосу пропускания $\delta\lambda$ можно пренебречь вследствие слабой зависимости углочастотной характеристики фильтра от α [11]. Для коллимированного лазерного пучка с перетяжкой 2 мм влияние его дифракционной расходимости существенно: $\delta\lambda_\phi = 0.17$ нм по причине линейной зависимости акустической частоты от угла падения света [1–3]. Наконец, значение $\delta\lambda_L$, определяемое для коллинеарного случая выражением $\delta\lambda_L = 0.8\lambda V_{ph}/(Lf \cos \psi)$, где f – частота АО взаимодействия, составляет 0.24 нм [11].

Таким образом, пользуясь выражением (4), легко найти спектральную полосу пропускания квазиколлинеарного фильтра с углом среза $\alpha = 1.78^\circ$: $\delta\lambda = 0.29$ нм. Незначительное расхождение этой цифры с экспериментальным значением 0.24 нм обусловлено тем, что призматический коллиматор выполняет функцию фильтра пространственных частот, что приводит к сужению ширины аппаратной функции в данном эксперименте.

В заключение следует отметить важную особенность работы созданных квазиколлинеарных фильтров на кристалле парателлуриата. В экспериментах с фильтрами использовались коллимированные оптические пучки относительно большого диаметра (1.5–2.0 мм), в то время как типичное сечение звукового столба в АО приборах составляет 3.5×3.5 мм. В общем случае дифрагированный свет распространяется в ячейках не строго коллинеарно с падающим светом и с потоком звуковой энергии. Тем не менее, АО взаимодействие в разработанных фильтрах происходило по всей длине акустического столба даже в случае использования самого длинного кристалла.

Главная причина локализации дифрагированного светового пучка в пределах звукового столба заключалась в следующем. Угол разведения волновых векторов падающего и дифрагированного световых пучков в результате АО взаимодействия в исследованных фильтрах составлял $2.0^\circ - 3.5^\circ$. Однако этот угол частично компенсировался отклонением на $1.5^\circ - 2.3^\circ$ необыкновенно поляризованного дифрагированного в обратном направлении пучка света благодаря сильной оптической анизотропии парателлуриата. В итоге, потоки энергии световых падающего и дифрагированного пучков в фильтрах были практически параллельны как друг другу, так и потоку энергии звуковой волны. Последнее обстоятельство доказывает возможность успешной реализации в практических конструкциях фильтров именно близкого к коллинеарному режиму АО взаимодействия.

6. Заключение

Разработанная методика определения оптических, электрических и конструктивных характеристик квазиколлинеарных АО фильтров на основе парателлуриата яв-

ляется эффективной, универсальной и легко осуществимой на практике. Рассчитан и изготовлен ряд АО фильтров с различными оптическими и конструктивными особенностями. Проведены экспериментальные исследования созданных устройств в спектральном диапазоне 1550 нм. Достигнуто рекордное спектральное разрешение для устройств подобного типа: 0.24 нм по уровню 0.5 на длине волны 1537 нм. Коэффициент пропускания в окне прозрачности фильтра при линейной поляризации входного излучения достигал 90 % при управляющей мощности 60 мВт. Установлена высокая степень соответствия между расчетными и экспериментальными характеристиками. Проведен ряд экспериментальных исследований АО фильтров в условиях, имитирующих работу в мультиспектральных WDM-системах связи. Результаты эксперимента показывают, что созданные фильтры являются современным электронно-управляемым инструментальным средством для спектрального уплотнения и разделения лазерных сигналов в сетях оптической связи со спектральным разделением каналов 100 ГГц с малыми перекрестными помехами. Разработанные устройства фильтрации допускают дальнейшее улучшение характеристик, например при использовании двухкристальных [24] или многопроходных [25] схем фильтрации.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 08-07-00498, № 08-07-12073, № 09-07-00365 и № 09-07-00190).

- Sapriel J., Charissoux D., Voloshinov V.B., Molchanov V.Ya. *J. Lightwave Tech.*, **20** (5), 892 (2002).
- Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение* (М.: Сов. Радио, 1978).
- Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
- Harris S.E., Wallace R.W. *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (6), 774 (1969).
- Harris S.E., Nieh S.T.K., Feigelson R.S. *Appl. Phys. Lett.*, **17** (5), 223 (1970).
- Kusters J.A. US Patent 3,687,521 Aug.29, 1972.
- Hammond D.L., Kusters J.A. US Patent 3,756,689 Sept.4, 1973.
- Kusters J.A., Wilson D.A., Hammond D.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (4), 434 (1974).
- Копылов С.М., Лысой Б.Г., Михайлов Л.К., Соловьев А.А., Чередниченко О.Б. *Лазерная техника и электроника*, № 1–2, 54 (1993).
- Копылов С.М., Лысой Б.Г., Михайлов Л.К., Михайлова К.В., Чередниченко О.Б. *Лазерные новости*, № 4, 3 (1993).
- Voloshinov V.B. *Opt. Eng.*, **31** (10), 2089 (1992).
- Волошинов В.Б., Мишин Д.Д., Молчанов В.Я., Тупица В.С. *Письма в ЖТФ*, **18** (2), 33 (1992).
- Волошинов В.Б., Мишин Д.Д. *Радиотехника и электроника*, **37** (10), 1847 (1992).
- Chang I.-C. US Patent 5,329,397 July 12,1994.
- Chang I.-C. *Electron. Lett.*, **28** (13), 1255 (1992).
- Qin C.S., Huang G.C., Chan K.T., Cheung K.W. *Electron. Lett.*, **31** (15), 1237 (1995).
- Voloshinov V.B., Polikarpova N.V. *Acustica – Acta Acustica*, **89** (6), 930 (2003).
- Kludzin V.V., Zaitsev A.K. *Opt. Commun.*, **219**, 277 (2003).
- Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В., Можаяв В.Г. *Акустический журнал*, **52** (3), 287 (2006).
- Polikarpova N.V., Voloshinov V.B. *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5828**, 25 (2004).
- Волошинов В.Б., Макаров О.Ю., Поликарпова Н.В. *Письма в ЖТФ*, **31** (4), 352 (2005).
- Auld A.B. *Acoustic fields and waves in solids* (N.Y.: Robert Krieger Publ. Comp., 1990).
- Silvestrova I.M., Pisarevskii Y.V., Senyushenkov P.A., et al. *Phys. Stat. Sol. A*, **101**, 437 (1987).
- Мазур М.М., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Шорин В.Н. *Успехи современной радиоэлектроники*, № 10, 19 (2006).
- Волошинов В.Б., Магдич Л.Н., Князев Г.А. *Квантовая электроника*, **35** (11), 1057 (2005).