

Численное моделирование методом конечных разностей во временной области компактных акустооптических фильтров на основе многоотражательного расширения пучка

А.В.Царев

Обсуждаются результаты численного моделирования нового типа акустооптических (АО) перестраиваемых фильтров, основанных на эффекте многоотражательного расширения пучка в волноводных структурах. Рассмотрена реализация фильтров в планарных волноводах на основе тонких покрытий халькогенидного стекла (As_2S_3) на ниобате лития ($LiNbO_3$). Анализ работы устройств основывался на численных экспериментах методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием лицензионного программного обеспечения FullWAVE от компании RSoft Design Group, Inc. Показано, что предлагаемые оптические элементы обладают очень высокими дисперсионными свойствами, позволяющими при предельно малых габаритах самого АО фильтра обеспечить узкую линию фильтрации в полосе перестройки более 100 нм (на длине волны 1.54 мкм). Важно, что удельная ширина линии (в единицах обратной длины устройства) на порядок меньше теоретического предела для существующих типов АО фильтров, реализованных в том же материале обычным путем, без многоотражательного расширения пучка.

Ключевые слова: интегральная оптика, оптические волноводы, акустооптический перестраиваемый фильтр, поверхностная акустическая волна, многоотражательный расширитель пучка.

1. Введение

Чтобы обеспечить растущие потребности в широкополосной и высокоскоростной передаче данных в таких областях, как Интернет, видео-по-требованию (VoD), телеметрия и т. д., необходимы перестраиваемые оптические фильтры и мультиплексоры ввода-вывода (ROADM) с высокими техническими параметрами. Они позволяют эффективно использовать широкие полосы пропускания оптического волокна, а также обеспечивают большую гибкость и возможность работы коммутирующих модулей без промежуточного преобразования из оптического сигнала в электрический и обратно. Увеличение производительности современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), работающих на основе спектрального уплотнения (WDM), достигается увеличением как скорости передачи по отдельному спектральному каналу, так и числа одновременно используемых спектральных каналов [1].

Увеличение скорости передачи (с 2.5 Гб/с до 10, 40 или даже 160 Гб/с) требует уменьшения длительности передаваемого оптического импульса до пикосекунд, а также увеличения его пиковой мощности. В свою очередь это приводит к росту влияния дисперсии и нелинейных эффектов при распространении короткого импульса по протяженному оптическому волокну. Для подавления этих эффектов или снижения их влияния необходимо применять дорогие оптические волокна с ненулевой смещен-

ной дисперсией (типа G-655) совместно с дополнительными компенсаторами дисперсии. Следует отметить, что в большей части волоконных сетей в мире (включая Россию) используются относительно дешевые стандартные одномодовые оптические волокна (типа G-652), доля которых в общем мировом объеме продаж превышает 90%. Однако их дисперсия в 4 раза выше, чем у более дорогого волокна G-655, объем продаж которого составляет всего 3.5% [2]. Следовательно, дальнейшее повышение пропускной способности ВОЛС за счет увеличения скорости передачи данных для большинства ВОЛС в настоящее время трудно реализуемо и приводит к увеличению затрат.

Хорошо известным и более экономичным альтернативным решением является значительное (более чем в 200 раз) увеличение числа спектральных каналов в действующих линиях связи на основе спектрального уплотнения [1]. Дополнительный аргумент в пользу такого решения был выдвинут руководителями компании Фуджицу (Япония) [3]. Проведенный ими анализ мировой потребности в передаче информации (подчиняющейся закону Муора) показал, что из-за чрезмерных энергетических затрат на управление все возрастающими потоками данных, передаваемых по волоконным сетям, существующие технологии недостаточны для их успешного развития (даже исходя из экономических соображений). Решение этой проблемы потребует кардинального изменения архитектуры ВОЛС, например на основе виртуальных гибких маршрутизаторов [3], в которых в перспективе будут использоваться до 1000 разных длин волн в одном волокне.

Несмотря на то что для построения перестраиваемых оптических элементов ВОЛС было предложено огромное количество различных технологий и концепций [1], ни

А.В.Царев. Институт физики полупроводников СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13; e-mail: tsarev@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 6 июля 2006 г., после доработки – 7 сентября 2006 г.

одна из них не может считаться идеальной и имеющей потенциал для замещения других в ближайшем будущем. Поэтому разработка новых типов перестраиваемых оптических устройств, способных управлять многими сотнями частотных каналов, является по-прежнему актуальной.

Некоторые разработчики [4–6] строят свою стратегию на основе использования акустооптических (АО) перестраиваемых фильтров и мультиплексоров, которые имеют ряд естественных конкурентных преимуществ, таких как очень широкая полоса перестройки и высокое быстродействие (единицы микросекунд), большая гибкость и уникальная способность динамически фильтровать и перенаправлять одновременно несколько спектральных каналов в одиночное волокно за счет использования акустических волн сразу на нескольких частотах, различных для разных спектральных каналов.

Однако известные типы АО фильтров имеют ограничения по ширине линии фильтрации (обычно 1.6 нм), которые обусловлены как объективными физическими ограничениями (дисперсионные свойства и размеры АО элементов), так и конструктивными особенностями самих фильтров. Поэтому необходимость увеличения количества спектральных каналов неизбежно приводит к усложнению конструкции устройств, т.к. стандартные АО элементы уже сейчас работают вблизи своего теоретического предела, а улучшение частотного разрешения достигается лишь применением дополнительных интерливеров [5] либо путем каскадирования (объединения нескольких секций) отдельных АО элементов [4, 6]. В частности, на фирме Фуджицу по уникально сложной технологии были последовательно объединены три АО элемента в один и создан акустооптический перестраиваемый фильтр/мультиплексор на полосковых волноводах ниобата лития длиной 7 см с рекордно узкой шириной линии (0.37 нм) на длине волны 1.54 мкм [6]. Это обеспечивает работу мультиплексора с 32 частотными каналами с шагом 0.8 нм.

В настоящей работе обсуждается новый тип АО фильтров [7, 8], основанных на применении многоотражательных расширителей пучка (МОРП) [9, 10]; эти фильтры в перспективе позволяют на порядок снизить рабочую ширину линии [11, 12] при одновременном уменьшении размеров и увеличении быстродействия устройств. Приведены результаты численного моделирования АО устройств в планарных волноводах на основе тонких пленок халькогенидного стекла (As_2S_3) на ниобате лития ($LiNbO_3$). Анализ их работы проводится на основе численных экспериментов методом конечных разностей во временной области (методом FDTD) с использованием лицензионного программного обеспечения от компании RSoft Design Group Inc.

Интерес к исследованию данного типа оптических элементов на многоотражательных расширителях пучка основан на том, что при предельно малых габаритах (менее 1 см) они обладают настолько выраженными дисперсионными свойствами, что обеспечивает рекордно узкую (0.1 нм) линию фильтрации [11, 12] при длине волны света 1.54 мкм в полосе перестройки свыше 40 нм и скорости переключения менее 2 мкс. Тем самым они претендуют на пока свободную вакансию базовой конструкции для сверхузкополосных перестраиваемых фильтров и мультиплексоров, недорогих и пригодных для широкого использования.

2. Моделирование АО фильтров методом FDTD

Перестраиваемые оптические фильтры на основе МОРП являются новыми и неочевидными оптическими элементами, теоретическое описание которых еще не завершено, а методы численного моделирования недостаточно развиты. Предварительный анализ [11, 12], выполненный нами на основе спектрального приближения, показал, что данные устройства обладают уникальными фильтрующими свойствами. Альтернативный подход заключается в проведении модельных численных экспериментов на основе метода конечных разностей во временной области. Такое моделирование методом FDTD оптических фильтров и мультиплексоров, содержащих несколько близкорасположенных МОРП [13], подтвердило правильность новой идеи фильтрации и мультиплексирования. Однако результаты данного расчета не позволяют сделать вывод о том, как поведет себя устройство в условиях акустооптического управления длиной волны фильтрации. Ниже впервые обсуждаются результаты численного FDTD-моделирования перестраиваемых АО фильтров на основе МОРП.

Принцип работы АО фильтров на базе МОРП основан на эффектах многолучевой интерференции и дифракции на поверхностной акустической волне (ПАВ) в оптических волноводах. Его можно проиллюстрировать на примере устройства, представленного на рис.1. Основу устройства составляет тонкий (~ 1.5 мкм) волноводный слой халькогенидного стекла, который нанесен на поверхность пьезоэлектрической подложки из ниобата лития, необходимой для эффективного возбуждения ПАВ с помощью встречно-штыревого преобразователя. В пленке халькогенидного стекла изготовлены полосковые волноводы шириной W , геометрически расположенные таким образом, что оптические моды полосковых волноводов не связаны с областью планарного волновода. Для создания МОРП в полосковых волноводах электронным пучком формируются наклонные полупрозрачные полоски (элементарные отражатели) толщиной D с шагом d . Их оптические свойства слегка изменены таким образом, чтобы слабо отраженный оптический пучок с малыми потерями мог отклоняться вбок – из полоскового волновода в планарный.

Расширитель пучка действует по принципу мультиплексирования оптического поля волноводной моды на большом числе полупрозрачных наклонных элементарных отражателей [9, 10]. Для этого узкий оптический пучок вводится в полосковый оптический волновод первого расширителя пучка и на каждом из элементарных отражателей разветвляется на два пучка. Один из них (значительно меньший по интенсивности) после отражения перенаправляется из полоскового оптического волновода в планарный оптический волновод, а другой (основной по интенсивности) проходит по полосковому оптическому волноводу до следующего элементарного отражателя, на котором снова делится на два пучка, и так процесс повторяется многократно. Все отраженные пучки когерентно суммируются с учетом оптического сдвига фаз, обусловленного задержкой светового пучка на длине промежутка между соседними отражателями. Результирующий световой пучок на выходе МОРП имеет широкую апертуру (в сотни и тысячи раз больше входной) и низкую расходимость. Кроме того, направление излу-

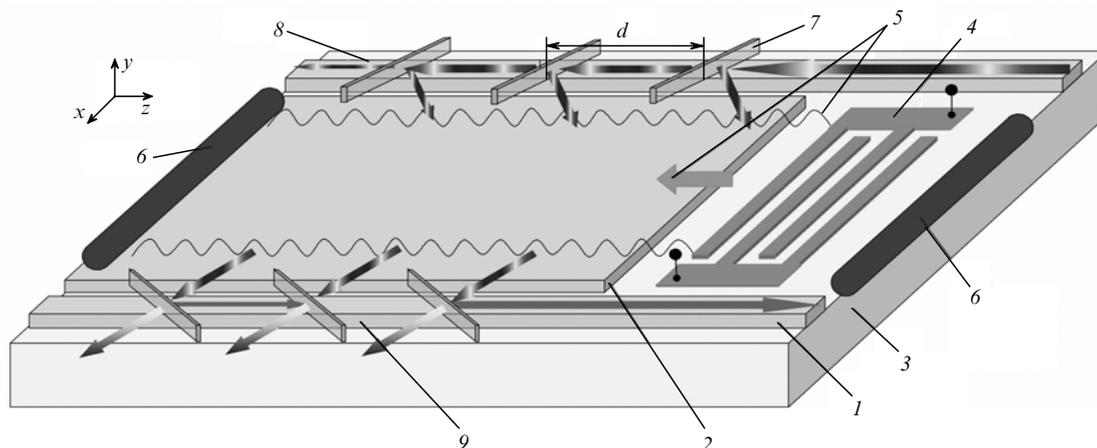


Рис. 1. Неколлинеарный АО фильтр на основе многоотражательных расширителей пучка:

1 – полосковый волновод; 2 – планарный волновод; 3 – пьезоэлектрическая подложка; 4 – встречно-штыревой преобразователь; 5 – ПАВ; 6 – поглотитель ПАВ; 7 – элементарный отражатель; 8 – первый расширитель пучка; 9 – второй расширитель пучка.

ния этого пучка плавно меняется при монотонном изменении длины волны оптического излучения, т. е. предлагаемый расширитель пучка обладает сильными дисперсионными свойствами.

Далее расширенный пучок дифрагирует в плоскости планарного волновода на поверхностной акустической волне, причем согласно условиям Брэгга угол дифрагировавшего излучения синхронно меняется в широком диапазоне при изменении частоты ПАВ. Покинув область акустооптического взаимодействия, дифрагировавший и недифрагировавший оптические пучки пересекают второй расширитель пучка, представляющий собой полосковый волновод с набором аналогичных элементарных отражателей, который по отношению ко входному расширителю пучка работает как обратимый оптический элемент. А именно, оптические микропотоки только определенной длины волны и направления, собираемые элементарными отражателями второго волновода, складываются когерентным образом друг с другом и выходят из полоскового оптического волновода в виде интенсивного узкополосного сигнала. Для всех остальных длин волн условие когерентной интерференции будет нарушено, и результирующее поле от разных отражателей на выходе полоскового оптического волновода будет близко к нулю. Причем при изменении частоты ПАВ меняется направление падающего пучка на второй расширитель пучка и, следовательно, легко перестраивается та длина световой волны, для которой осуществляется эффективная фильтрация. При этом высокие дисперсионные свойства расширителя пучка позволяют получать аномально узкую, недостижимую ранее ширину линии фильтрации при малой (менее 1 см^2) площади самого фильтрующего элемента [11, 12].

Известно, что трехмерное численное моделирование распространения света требует огромных вычислительных ресурсов. Даже несмотря на малые размеры ($\sim 1 \text{ см}$) оптических фильтров, в них присутствуют и взаимно интерферируют сотни световых микропотоков, что не позволяет проводить анализ больших трехмерных структур. В данной работе для ускорения вычислений реальные трехмерные волноводные структуры заменяются их двумерными аналогами с использованием метода эффективного показателя преломления [14]. При этом ТМ-мода полоскового волновода соответствует ТЕ-моду эквивалентного планарного волновода. Такой подход при-

меним, когда элементарные отражатели полностью перекрывают апертуру волноводной моды в поперечном направлении (в глубь волновода). В данной работе моделирование АО фильтров проведено методом FDTD с использованием коммерческого пакета FullWAVE, специально разработанного компанией RSoft Design Group Inc. [15] для нужд интегральной оптики и фотоники. В ходе анализа воздействие ПАВ моделировалось эквивалентной стационарной дифракционной решеткой показателя преломления.

На первом предварительном этапе методом FDTD моделировалась классическая задача распространения и дифракции оптического пучка на синусоидальной дифракционной решетке показателя преломления. При этом численно находились полное поле внутри оптического элемента и спектральное распределение в дальней зоне. Эффективность дифракции определялась по относительной величине максимума интенсивности спектра прошедшей волны по отношению к случаю без дифракционной решетки. Известно, что для брэгговской дифракции в условиях фазового синхронизма (свет падает под углом Брэгга θ) максимум эффективности дифракции должен наблюдаться при глубине модуляции показателя преломления dn , определяемой из выражения

$$dn = \lambda_0 \cos \theta / (2L). \quad (1)$$

Результаты расчета на длине волны $\lambda_0 = 1.5486 \text{ мкм}$ при апертуре $L = 50 \text{ мкм}$ и периоде решетки $\Lambda = 1.3 \text{ мкм}$ дали $dn = 0.0147$, отличающееся от (1) на 3%. Тем самым проверена применимость метода FDTD для решения задач брэгговской дифракции при крупном (0.05 мкм) шаге сетки вычислений. Это очень важно для дальнейшего анализа, т. к. уменьшение шага приводит к значительным вычислительным трудностям, поскольку для двумерных задач затраты оперативной памяти и времени счета растут примерно как кубическая степень отношения характерного размера структуры к шагу сетки.

Следующий предварительный этап заключается в исследовании прохождения волноводных ТЕ- и ТМ-мод через наклонный отражатель при различных углах падения, а также толщины и показателя преломления отражательной полоски, формирующей элементарный отражатель. Типичные зависимости коэффициента отражения R как функция толщины отражателя D приведены на

рис.2. Здесь и далее все численные результаты относятся к случаю распространения фундаментальной волноводной моды ТЕ-поляризации в планарном волноводе.

Успешное выполнение предварительных этапов вычислений позволило приступить к моделированию реальных фильтров с расширителями пучка. Исходя из наших вычислительных возможностей и из соображений целесообразности, мы выбрали для анализа оптический фильтр с расширителями пучка, содержащими по 32 идентичных элементарных отражателя с шагом 4.6 мкм (рис.3). Следует подчеркнуть, что размеры устройства вполне достаточны для того, чтобы в явном виде проявились основные свойства исследуемых оптических элементов. В частности, принципиально важно, что параметры дифракционной решетки соответствуют брэгговскому режиму, который обеспечивает высокую эффективность дифракции (99.2%), а также наличие только одного дифракционного максимума.

Приведенное выше качественное описание работы акустооптического перестраиваемого фильтра с многоотражательными расширителями пучка позволяет сформулировать общие требования, которые помогают обеспечить правильную работу устройства. Угловой спектр выходного излучения содержит, кроме основной спектральной компоненты, боковые спутники меньшей амплитуды (рис.4), которые могут приводить к появлению паразитных сигналов на выходе АО фильтра. Таким образом, оптимальными для работы устройства будут такие комбинации его параметров (период и угол наклона расположения отражателей, длина волны ПАВ и т. д.), при которых, с одной стороны, нет просачивания паразитного сигнала, т. е. исключается соосность диаграмм направленности спектральных компонент каждого из расширителей пучков, а с другой – обеспечивается эффективная фильтрация на акустической волне. Причем эти требования должны выполняться во всем диапазоне перестройки оптического фильтра в пределах так называемого свободного спектрального диапазона. Далее будет показано, что при периоде отражателей $d = 4.6$ мкм легко обеспечить работу фильтра в стандартном диапазоне (С-полоса) длин волн (1.528 – 1.565 мкм).

FDTD-моделирование углового спектра устройства в присутствии и при отсутствии дифракционной решетки, обусловленной ПАВ, приведено на рис.4. Без ПАВ (dn

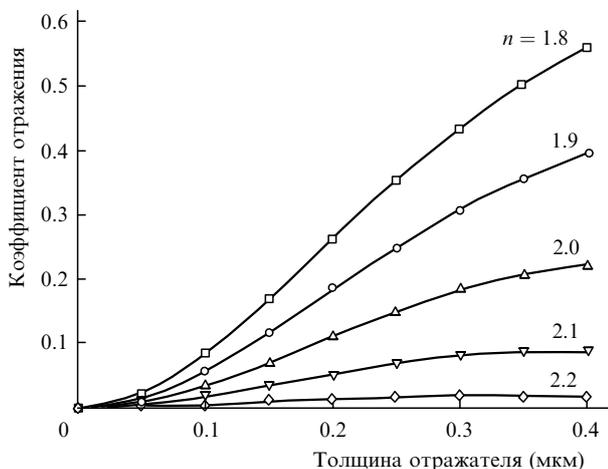


Рис.2. Зависимости коэффициента отражения по мощности от толщины отражателя при разных значениях показателя преломления n отражающей полоски и угле падения 52.5° .

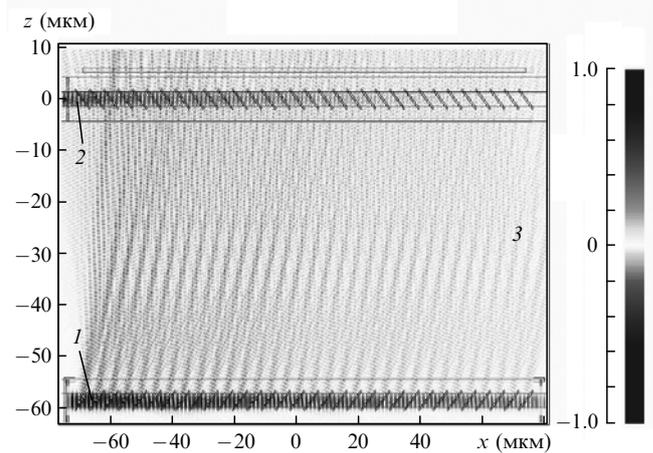


Рис.3. Распространение оптических волн в оптическом фильтре с дифракционной решеткой и двумя расширителями пучка с 32 элементарными отражателями. Расчет FullWAVE [15] с шагом 0.06 мкм при $L = 50$ мкм, $A = 1.3$ мкм, $W = 3.8$ мкм, $d = 4.6$ мкм, $D = 0.39$ мкм и $\lambda_0 = 1.5486$ мкм (1 – вход первого расширителя пучка, 2 – выход второго расширителя пучка, 3 – дифракционная решетка, обусловленная ПАВ).

= 0) главные компоненты углового спектра расширителя пучка представляют собой основной пик, составляющий угол $\theta = 14.9^\circ$ со штрихами дифракционной решетки, а также два боковых пика меньшей амплитуды под углами $\theta = 6.5^\circ$ и 23.9° . Данный спектр типичен для фазовой дифракционной решетки типа эшелона Майкельсона и представляет собой результат перемножения двух сомножителей. Первый из них описывает угловой спектр ограниченного источника света, сформированного при частичном отражении направляемой моды плоского оптического волновода. Спектр имеет широкое ($\sim 10^\circ$) угловое распределение с максимумом, соответствующим зеркально отраженному пучку ($\theta = 14.9^\circ$). Второй сомножитель описывает узкий линейчатый спектр с угловой расходимостью $\sim 0.25^\circ$ и описывает результат интерференции оптических волн, отраженных от различных элементарных отражателей. Положение максимумов линейчатого спектра определяется условием конструктивной интерференции в соответствующих поряд-

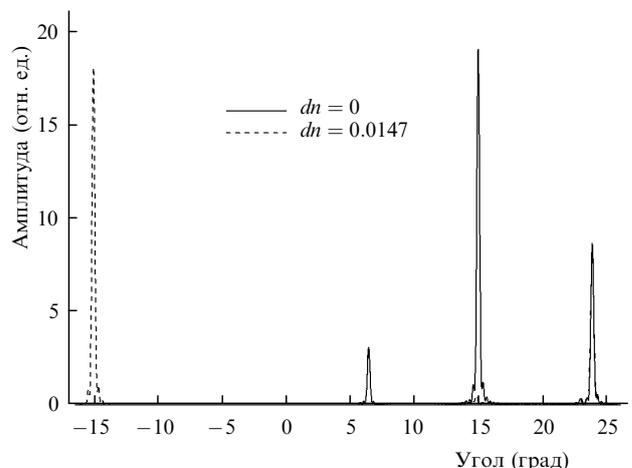


Рис.4. Угловой спектр оптического пучка, сформированного расширителем пучка, после прохождения брэгговской решетки с разной глубиной модуляции dn . Расчет FullWAVE [15] с шагом 0.05 мкм при $L = 50$ мкм, $L = 1.3$ мкм, $W = 3.8$ мкм, $d = 4.6$ мкм, $D = 0.39$ мкм, $\lambda_0 = 1.55$ мкм, $\theta = 14.87^\circ$.

ках дифракции, которые располагаются с угловым шагом около 9° . В нашем случае наклон отражателей выбран из условия, что зеркально отраженные пучки распространяются под углами, близкими к брэгговскому углу (на центральной частоте АО фильтра), поэтому на рис.4. наблюдается только один основной и два боковых дифракционных порядка.

В присутствии индуцированной ПАВ дифракционной решетки с оптимальной амплитудой ($dn = 0.0147$) и периодом $\Lambda = 1.3$ мкм брэгговские условия удовлетворяются только для основного пика, и большая часть его энергии перебрасывается в диапазон углов $\theta = -14.9^\circ$, чтобы в дальнейшем быть эффективно отфильтрованной вторым (см. рис.1) расширителем пучка. При этом два боковых сателлита практически не изменяют своих амплитуд и без изменения пройдут через второй расширитель пучка; их угловое положение также не изменится. Если, изменив частоту ПАВ, перестроить длину волны Λ (т.е. период дифракционной решетки), то брэгговские условия будут удовлетворяться тоже только для основного пика, но уже для другой длины волны света, на которой и будет наблюдаться его эффективная фильтрация.

Все сказанное иллюстрирует рис.5, на котором показана эффективность фильтрации, т.е. отношение интенсивностей сигнала на выходе второго расширителя пучка к сигналу на входе первого расширителя пучка, для разных длин волн ПАВ. Видно, что устройство с размерами 150×70 мкм обеспечивает перестройку длины волны фильтруемого излучения в области 100 нм с шириной линии 4.5 нм при изменении длины волны ПАВ от 1.1 до 1.4 мкм. Отметим, что при $\Lambda = 1.5$ мкм устройство тоже эффективно фильтрует оптическое излучение, однако при этом наблюдается паразитный сигнал в пределах полосы перестройки оптического фильтра. Следовательно, не имеет смысла изменять длину волны ПАВ больше, чем это необходимо для обеспечения перестройки в пределах свободной спектральной зоны. В нашем случае при $d = 4.6$ мкм свободный спектральный диапазон равен 109 нм; здесь он определяется как разность длин волн, соответствующих прохождению полезного и паразитных сигналов в полосе перестройки оптического фильтра.

Моделирование, проведенное методом конечных разностей во временной области, убедительно доказывает правильность выбранной идеи построения перестраиваемых

АО фильтров на основе многоотражательных расширителей пучка. Эти расчеты дают достаточно информации, которой можно воспользоваться при дальнейшем анализе аналогичных АО элементов в спектральном приближении [12], в частности они позволяют количественно описывать свойства наклонных элементарных отражателей при изменении их параметров.

Наш анализ позволяет отметить ряд существенных моментов, касающихся работы АО фильтров на основе многоотражательных расширителей пучка. Эффективность дифракции на ПАВ множества пучков, сформированных расширителем пучка, очень похожа на классическую дифракцию одиночного пучка света с эквивалентной суммарной апертурой и характеризуется тем же оптимальным значением глубины модуляции показателя преломления dn . В целом работа АО фильтра хорошо описывается через поведение углового спектра расширителей пучка.

С целью сокращения требуемых вычислительных ресурсов моделирование устройств проведено для малого периода расположения отражателей ($d = 4.6$ мкм). Это обеспечивает диапазон перестройки АО фильтра свыше 100 нм. Для большинства практических целей достаточно иметь свободный спектральный диапазон всего 40 нм. Следовательно, можно увеличить значения d и Λ в 2.5 раза при сохранении всех положительно значимых функций устройства. Тогда АО фильтр размером 600×300 мкм с теми же 32 отражателями обеспечит ширину линии фильтрации 1.8 нм и перестройку оптической длины волны в районе 40 нм при изменении длины волны ПАВ от 2.75 до 3.5 мкм.

Известно, что частотное разрешение АО фильтра улучшается с увеличением его размера. Поэтому сравнительный анализ возможностей разных АО технологий удобно проводить в терминах удельной ширины линии, измеренной в единицах обратной длины устройств. Предлагаемый АО фильтр обладает уникально узкой удельной шириной линии 0.7 мкм^2 ($0.07 \text{ нм}\cdot\text{см}$). Это позволяет конструировать АО фильтры с шириной линии 0.1 нм и менее, принципиально недостижимой для других типов АО устройств [4, 6], которые имеют гораздо большие размеры, а следовательно, худшее быстродействие, определяемое временем пробега акустической волны через область АО взаимодействия.

Однако параметры устройства, показанного на рис.1, сильно зависят от поляризации падающего излучения. Это связано как с различием коэффициентов отражения от элементарных отражателей для ТЕ- и ТМ-волн оптического волновода, так и с анизотропией эффективности дифракции света на ПАВ. Для большинства практических приложений требуется поляризационная независимость устройств. Для достижения этой цели можно использовать два одинаковых АО фильтра совместно с двумя делителями и вращателями (ТЕ \leftrightarrow ТМ) поляризации (рис.6). А именно, входной оптический сигнал делится на две поляризации (ТЕ и ТМ), далее ТЕ-поляризация преобразуется в ТМ-поляризацию и оба канала одновременно обрабатываются двумя идентичными АО фильтрами. На выходе устройства один из оптических пучков претерпевает вращение поляризации (из ТМ в ТЕ), и все отфильтрованные сигналы снова объединяются в один пучок на аналогичном делителе поляризации, который выполняет функцию поляризационного смесителя. Важно, что все эти элементы могут быть

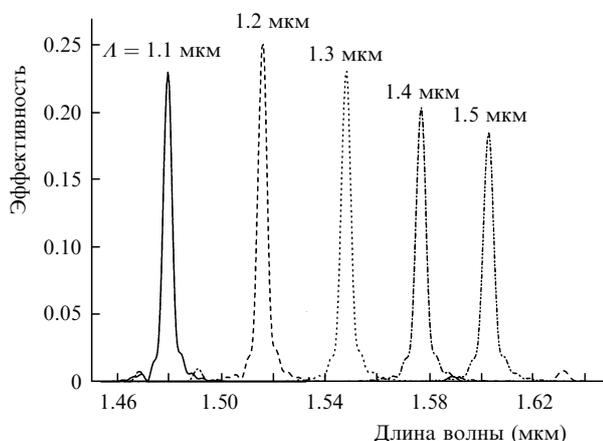


Рис.5. Эффективность фильтрации оптического фильтра с дифракционной решеткой и двумя расширителями пучка с 32 элементарными отражателями. Расчет FullWAVE [15] с шагом 0.05 мкм при $L = 50$ мкм, $W = 3.8$ мкм, $d = 4.6$ мкм, $D = 0.39$ мкм, $\Delta\lambda = 4.5$ нм.

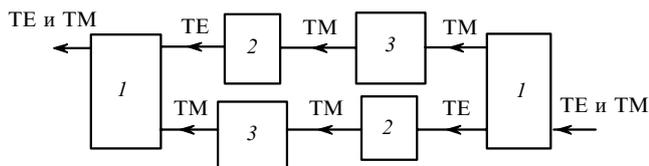


Рис.6. Структура поляризационно-независимого акустооптического фильтра:
1 – делитель поляризации; 2 – вращатель поляризации; 3 – акустооптический фильтр.

реализованы на единой подложке ниобата лития, а следовательно, само устройство будет не только компактным, но и стабильным по своим свойствам.

3. Выводы

В работе впервые выполнено численное моделирование методом конечных разностей многоотражательных расширителей пучка и основанных на них новых типов перестраиваемых АО фильтров. В качестве модели для расчета выбрана волноводная структура, состоящая из тонкой пленки халькогенидного стекла на поверхности ниобата лития. Она интересна тем, что предлагаемые оптические элементы могут быть сравнительно просто изготовлены методом прямого рисования электронным пучком. Для ускорения вычислений трехмерные волноводные структуры были заменены их двумерными аналогами, а влияние акустической волны моделировалось с помощью эквивалентной стационарной дифракционной решетки показателя преломления.

Результаты численных (FDTD) экспериментов АО устройств позволили выявить основные закономерности их работы и подтвердить правильность общей идеи построения АО фильтров с применением многоотражательных расширителей пучка. В частности продемонстрирована перестройка длины волны в области 100 нм при

ширине линии 4.5 нм для АО фильтра размером всего 70×150 мкм. Уникально узкая удельная ширина линии 0.7 мкм^2 ($0.07 \text{ нм}\cdot\text{см}$) позволяет конструировать АО фильтры с разрешением 0.1 нм и менее, недостижимым для АО элементов других типов.

Автор выражает благодарность М.Н.Арменисе (Politecnico di Bari, Италия), давшему толчок к началу этой работы, Е.М.Дианову и С.В.Богданову за дружескую поддержку данных исследований, а также Е.А.Колосовскому за полезные обсуждения. Автор благодарен компании RSoft Design Group Inc. за предоставление лицензии и осуществление поддержки к программному пакету Rsoft Photonic CAD Suite 6.0 (включая FullWAVE).

Работа выполнена при поддержке инновационного гранта РФФИ № 05-02-08118-офи_а.

1. Наний О.Е. *Lightwave Rus. Ed.*, **2**, 47 (2004).
2. Пичугин Д. *Lightwave Rus. Ed.*, **3**, 16 (2004).
3. Tsuda T., Ohta K., Takeichi H. *FUJITSU Sci. Tech. J.*, **37**, 3 (2001).
4. Herrmann H., Schafer K., Schmidt Ch. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 120 (1998).
5. Barozzi G. et al. *Proc. ECOC*, **4**, 57 (2000).
6. Nakazawa T., Taniguchi Sh., Seino M. *FUJITSU Sci. Tech. J.*, **35**, 107 (1999).
7. Царев А.В. *Акустооптический перестраиваемый фильтр*. Патент РФ № 2182347 от 10 мая 2002 г. Приоритет от 4 августа 2000 г.
8. Tsarev A.V. *Acousto-optical variable filter*. U.S. Patent No. 7,092,139, August 15, 2006, Foreign Application Priority Data August 04, 2000.
9. Царев А.В. *Расширитель пучка*. Патент РФ № 2183337 от 10 июня 2002 г. Приоритет от 19 июля 2000 г.
10. Tsarev A.V. *Beam-expanding device*. U.S. Patent No. 6,836,601, December, 28, 2004. Foreign Application Priority Data July 19, 2000.
11. Tsarev A.V. *Appl. Phys. B*, **73**, 495 (2001).
12. Tsarev A., Kolosovsky E. *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* (Montreal, Canada, 2004, Vol. 1, p. 64).
13. Passaro V.M. N., Magno F., Tsarev A.V. *Opt. Express*, **13**, 3429 (2005).
14. Chiang K.S. *Appl. Opt.*, **25**, 2169 (1986).
15. www.rsoftdesign.com.