

Перестраиваемые акустооптические фильтры с многократным взаимодействием света и звука

В.Б.Волошинов, Л.Н.Магдич, Г.А.Князев

Исследованы оптические многопроходные схемы взаимодействия света и звука, перспективные для использования в системах фильтрации оптических пучков на основе перестраиваемых акустооптических фильтров. Рассмотрены особенности функционирования акустооптических фильтров в заграждающем и пропускающем режимах работы. Доказано теоретически и подтверждено в экспериментах, что применение многократного взаимодействия позволяет улучшить спектральные и энергетические характеристики акустооптических приборов. Исследованы коллинеарная и поперечная геометрии акустооптического взаимодействия в ячейках на основе кристалла парателлурита в двухпроходном, трехпроходном и многопроходном режимах дифракции.

Ключевые слова: акустооптика, перестраиваемый акустооптический фильтр, спектральная полоса пропускания, эффективность дифракции, кристалл парателлурита.

1. Введение

Известно, что акустооптические устройства находят широкое применение в науке и технике для управления параметрами светового излучения [1, 2]. На основе акустооптического взаимодействия создаются компактные, надежные и быстродействующие устройства для модуляции, сканирования и фильтрации оптического излучения. В последнее время определенный интерес представляет разработка акустооптических фильтров с высоким спектральным разрешением. Это обусловлено быстрым развитием оптоволоконных систем связи со спектральным уплотнением каналов [3–12]. Акустооптические перестраиваемые фильтры, несмотря на относительно низкое спектральное разрешение, обладают более высоким быстродействием, надежностью и широким диапазоном перестройки по сравнению с другими системами фильтрации. Кроме того, акустооптические устройства позволяют работать в многоканальных и многофункциональных режимах, которые не могут быть реализованы в альтернативных системах фильтрации.

На сегодняшний день одно из наиболее высоких значений спектрального разрешения имеют фильтры на кристалле парателлурита (TeO_2), в которых используется близкая к коллинеарной геометрия акустооптического взаимодействия [3–10]. Однако спектральные характеристики даже коллинеарных устройств не всегда удовлетворяют потребностям практики. Поэтому одной из важных задач является совершенствование рабочих параметров акустооптических фильтров. Для этого пред-

лагается использовать многократное прохождение световых пучков через акустический столб (область, в которой возбуждается ультразвуковая волна). В статье рассмотрены четыре относительно простые модификации акустооптических многопроходных фильтров на кристалле TeO_2 . Две из них, т. е. двухпроходный заграждающий фильтр и полосовой фильтр с многократным прохождением света через ультразвуковой столб, позволяют снизить мощность управляющего электрического сигнала. Две другие модификации, к которым относится двухпроходный и трехпроходный полосовые фильтры, обеспечивают более узкую спектральную полосу фильтрации.

2. Однопроходный заграждающий акустооптический фильтр

Известно, что на основе акустооптической ячейки может быть создан заграждающий фильтр, если использовать пучки нулевого порядка дифракции [11–13]. Подобное устройство уменьшает интенсивность только тех спектральных компонент входного оптического сигнала, которые заключены в узком спектральном интервале $\Delta\lambda$, в то время как все остальные компоненты этого сигнала пропускаются прибором. При этом как спектральный интервал, в котором осуществляется подавление сигнала, так и величина коэффициента подавления контролируются управляющим электрическим напряжением.

Основным параметром, характеризующим работу акустооптической ячейки, является эффективность дифракции ξ . Она определяется отношением интенсивности света на выходе ячейки к интенсивности входного оптического излучения I [1, 2]:

$$\xi = \frac{I_1}{I} = 1 - \frac{I_0}{I}, \quad (1)$$

где I_0 и I_1 – интенсивности света на выходе фильтра в нулевом и первом дифракционных порядках. Известно, что коэффициент подавления сигнала – одна из основных

В.Б.Волошинов, Г.А.Князев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: volosh@phys.msu.ru, knyazev@phys.msu.ru
Л.Н.Магдич. ФГУП «НИИ "Полус"» им. М.Ф.Степанаха, Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: lmagdich@mtu-net.ru

Поступила в редакцию 11 июля 2005 г., после доработки – 26 сентября 2005 г.

характеристик заграждающего фильтра [13]. Этот коэффициент зависит от эффективности дифракции следующим образом:

$$\chi = 10 \lg(1 - \xi) = 10 \lg \frac{I_0}{I}. \quad (2)$$

Другой важной характеристикой заграждающих фильтров является спектральная полоса $\Delta\lambda$, в которой происходит подавление сигнала. Эта характеристика соответствует спектральной полосе пропускания полосового фильтра [1–14].

Известно, что интенсивность света в нулевом порядке дифракции определяется выражением [2]

$$\frac{I_0}{I} = 1 - \frac{q^2}{q^2 + \eta^2} \sin^2 \left[(q^2 + \eta^2)^{1/2} \frac{l}{2} \right], \quad (3)$$

где l – длина взаимодействия света и звука; η – коэффициент фазового синхронизма; q – коэффициент связи, зависящий от мощности акустической волны P_s по закону $q \sim P_s^{1/2}$. Как правило, мощность ультразвука близка к мощности электрического управляющего сигнала, подаваемого на ячейку. Коэффициент фазового синхронизма показывает, насколько нарушается условие Брэгга при изменении длины волны света, частоты ультразвука или угла падения оптического пучка на акустический волновой фронт. Очевидно, что узкая спектральная полоса $\Delta\lambda$ фильтра, а также высокий коэффициент подавления сигнала χ достигаются при большой длине взаимодействия света и звука l , т. е. с ростом длины возрастает произведение ηl , что сказывается на эффективности дифракции [1–6]. Это означает, что наиболее удобной для построения заграждающего фильтра является коллинеарная или близкая к ней геометрия акустооптического взаимодействия [3–10]. Известно, что максимальная эффективность дифракции $\xi = 1$ в акустооптических устройствах никогда не может быть достигнута из-за того, что ультразвуковой и световой пучки не являются плоскими волнами. Поэтому коэффициент подавления сигнала в заграждающем фильтре всегда имеет конечное значение: $-\infty < \chi < 0$.

Экспериментальное исследование фильтрации было проведено с использованием квазиколлинеарного фильтра на основе кристалла парателлурита на длине волны света $\lambda = 633$ нм. Фазовая скорость акустических волн в кристалле была направлена под углом $\alpha = 2^\circ$ относительно оси [110], а длина акустооптического взаимодействия $l = 2.5$ см. При электрической мощности $P = 310$ мВт в ячейке достигалась достаточно высокая эффективность дифракции $\xi = 0.97$, соответствующая коэффициенту подавления $\chi = -15$ дБ. Измерения показали, что на длине волны $\lambda = 633$ нм спектральная полоса фильтра $\Delta\lambda = 1.2 \pm 0.1$ Å. Это означает, что на длине волны $\lambda = 1550$ нм, характерной для оптических линий связи со спектральным уплотнением каналов, полоса подавления сигнала достигает 7.2 Å.

3. Двухпроходный заграждающий фильтр

Известно, что требования, предъявляемые к коэффициенту подавления сигнала χ в большинстве заграждающих фильтров, применяемых в современных оптоволоконных линиях связи, очень высоки [9–12]. Поэтому ко-

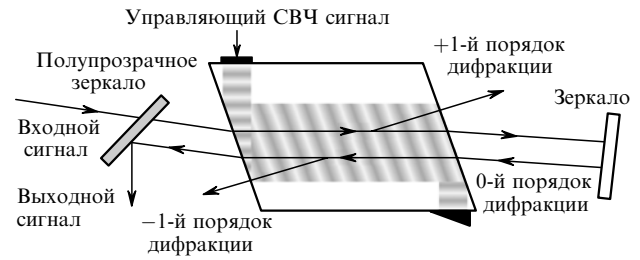


Рис.1. Схема двухпроходного заграждающего фильтра.

эффициент подавления сигнала в исследуемом фильтре $\chi = -15$ дБ является недостаточным. Однако оказалось, что этот коэффициент можно увеличить при использовании оптической двухпроходной схемы фильтрации.

Двухпроходная схема акустооптического фильтра может быть реализована несколькими способами. Вариант фильтра, выбранный для исследования, показан на рис.1. Особенность схемы заключается в том, что излучение нулевого дифракционного порядка направляется в фильтр повторно, причем навстречу падающему излучению. Лучи света, прошедшего через ячейку в прямом и обратном направлениях, разделяются при помощи полупрозрачного зеркала, после чего световой пучок, дважды прошедший через ячейку, поступает в приемник. Расчет показал, что интенсивность света на выходе фильтра в двухпроходном режиме определяется выражением

$$\frac{I_0}{I} = \left\{ 1 - \frac{q^2}{q^2 + \eta^2} \sin^2 \left[(q^2 + \eta^2)^{1/2} \frac{l}{2} \right] \right\}^2. \quad (4)$$

Анализ выражений (3) и (4) показывает, что полоса $\Delta\lambda$ подавления сигнала фильтром в двухпроходном режиме оказывается шире, чем у аналогичного однопроходного устройства. Из выражений (2) и (4) следует также, что применение двухпроходной схемы фильтрации в общем случае приводит к увеличению коэффициента подавления в два раза. Это означает, что заданный коэффициент подавления в двухпроходном фильтре может быть достигнут при меньшей, чем в однопроходном фильтре, мощности управляющего электрического сигнала.

Чтобы проверить выводы теории, на основе однопроходного устройства был создан двухпроходный заграждающий фильтр. Как показало экспериментальное исследование прибора, применение двухпроходной системы фильтрации действительно привело к повышению коэффициента подавления сигнала. Однако он был увеличен с -15 до -22 дБ, а не до -30 дБ, как это следует из соотношения (4). Различие теоретических и экспериментальных данных объясняется тем, что и акустические, и световые волны не являются плоскими, а обладают определенной расходимостью. Несмотря на конечную расходимость световых пучков, при низкой мощности управляющего сигнала ($P < 150$ мВт) наблюдалось хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Это видно из рис.2, на котором показана зависимость коэффициента подавления χ от управляющей мощности P в однопроходном и двухпроходном фильтрах. На рис.2 кривая 1 построена на основе экспериментальных данных с использованием метода наименьших квадратов. Из полученной зависимости с помощью формул (2), (4) была построена кривая 2, определяющая коэффициент подавления сигнала в двухпроходном устройстве фильтрации.

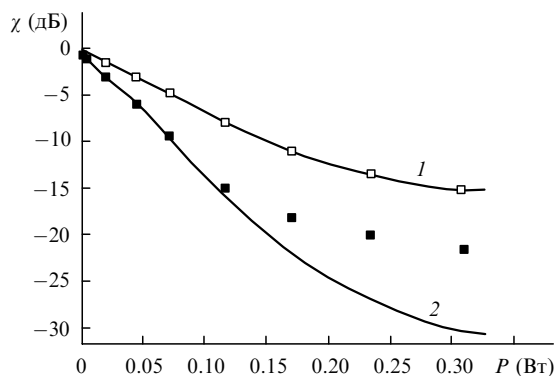


Рис.2. Коэффициент подавления сигнала однопроходным (1, □) и двухпроходным (2, ■) фильтрами. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

Эксперимент показал, что спектральная полоса подавления сигнала в двухпроходном фильтре оказывается шире, чем в однопроходном. На рис.3 приведена зависимость спектральной полосы подавления сигнала $\Delta\lambda$ в двухпроходном и однопроходном приборах от мощности управляющего сигнала P . Видно, что двухпроходная система не дает выигрыша в спектральном разрешении по сравнению с однопроходной (в отличие от выигрыша в коэффициенте подавления).

Практически важными характеристиками акустооптического устройства являются расходимость излучения и пространственная структура оптического пучка на выходе прибора. Очевидно, что расходимость светового и звукового пучков, а также сложное и неравномерное распределение энергии в сечении акустического столба, как правило, приводят к возникновению искажений волнового фронта и размыванию границ сечений оптических пучков на выходе фильтров. На рис.4 представлены фотографии распределений интенсивности света на выходной грани кристалла парателлуриата в однопроходном и двухпроходном режимах работы устройства. На каждой из фотографий видны поперечные размеры кристалла TeO_2 (1.0×1.5 см). Для этого кристалл освещался широким коллимированным пучком монохроматического света. Очевидно, что темные пятна в центре выходной грани кристалла возникли в результате дифракции света на акустической волне. В процессе акустооптического взаимодействия излучение частично удаляется из падающего светового пучка и отклоняется в направлении первого дифракционного порядка. Чем выше эффективность ди-

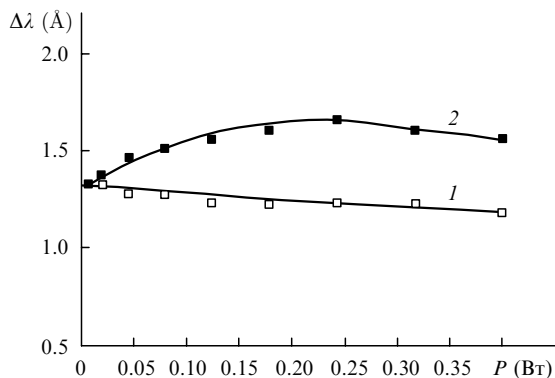


Рис.3. Спектральная полоса подавления сигнала однопроходным (1, □) и двухпроходным (2, ■) фильтрами. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

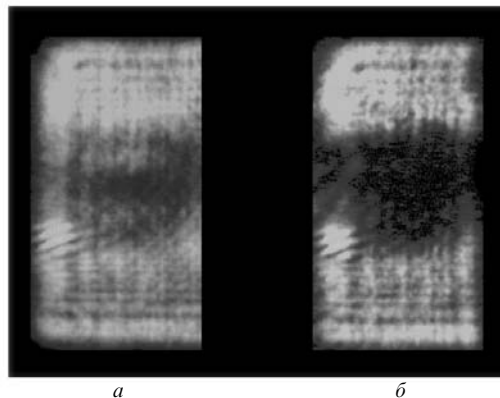


Рис.4. Распределения интенсивности света на выходе заграждающих однопроходного (а) и двухпроходного (б) фильтров.

фракции в кристалле, тем ниже интенсивность проходящего света и тем более темным выглядит пятно в центре кристалла. Из рис.4 видно, что структура пятна в нулевом порядке дифракции весьма неоднородна и при однократном, и при двукратном прохождении света через ячейку. Однако в случае двухпроходного фильтра размер пятна оказывается больше, а само пятно становится темнее, чем в случае однопроходного устройства. Это свидетельствует о том, что при использовании двухпроходной системы фильтрации коэффициент подавления сигнала повышается.

Эксперименты также показали, что в кристалле происходит заметное изменение сечения и структуры светового пучка в нулевом порядке дифракции по сравнению с сечением и структурой падающего на фильтр пучка. Если фильтр используется в волоконно-оптических линиях связи, то с практической точки зрения эти изменения нежелательны, т. к. могут привести к увеличению потерь при вводе оптического излучения в волокно. Однако подтвержденное в экспериментах заметное увеличение коэффициента подавления сигнала в заграждающем фильтре делает применение двухпроходных акустооптических устройств целесообразным.

4. Полосовой фильтр с многократным прохождением света

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что применение двухпроходной системы позволяет обеспечить максимальную эффективность дифракции при меньшей мощности управляющего электрического сигнала. Поэтому справедливо предположение о том, что мощность может быть снижена значительно сильнее, чем в двухпроходной схеме, если оптический пучок пропускать через фильтр несколько раз [2]. Можно также ожидать, что наилучший результат будет достигнут в том случае, когда акустооптическая ячейка помещена в оптический резонатор. На этом основывается принцип работы многопроходного полосового фильтра.

Очевидно, что при создании многопроходных полосовых систем фильтрации наиболее удобно использовать кольцевые резонаторы, в которых свет распространяется не в двух, как в обычном фильтре, а только в одном направлении. Преимущество предложенной схемы состоит в том, что дифрагировавший свет после каждого взаимодействия со звуком распространяется в одном и том же направлении.

Известно, что в резонаторе существует ограниченный набор длин волн света, соответствующих различным модам резонатора. Спектральная ширина отдельной моды определяется оптическими потерями в системе. Из-за того, что акустооптическая ячейка вносит в резонатор значительные потери и расстояние между модами резонатора гораздо меньше спектральной полосы акустооптического фильтра $\Delta\lambda$, при анализе работы многопроходного акустооптического устройства можно пренебречь резонансными эффектами.

При исследовании многопроходной системы фильтрации было установлено, что если за один проход света через звуковой столб мощность акустической волны P_s обеспечивает эффективность дифракции ξ , то в многопроходном режиме эффективность взаимодействия

$$\xi_m = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \xi)^n (1 - R)^n, \quad (5)$$

где n – индекс суммирования, равный числу проходов света через звуковой столб; R – коэффициент потерь в системе. Потери световой мощности возникают из-за потерь света в зеркалах, а также из-за его отражений от входной и выходной граней кристалла парателлурита. Как следует из выражения (5), в идеальном случае отсутствия потерь эффективность дифракции оказывается максимальной, т. е. $\xi_m = 1$ при любых отличных от нуля значениях управляющей мощности P . С другой стороны, очевидно, что если управляющая мощность обеспечивает эффективность дифракции за один проход, близкую к единице, то повторные прохождения света через ячейку приводят лишь к небольшому увеличению общей эффективности дифракции ξ_m по сравнению с ξ . Поэтому применение многопроходной системы фильтрации не дает выигрыша в коэффициенте пропускания устройства, если управляющая мощность велика. Что же касается спектральной полосы пропускания, то из формул (4) и (5) непосредственно следует, что в многопроходных системах при высокой эффективности дифракции происходит уширение полосы пропускания фильтра.

Одна из наиболее простых схем построения многопроходного фильтра показана на рис.5, откуда видно, что оптический резонатор образован тремя зеркалами. Одно из зеркал используется в качестве делителя пучка, направляющего входной оптический пучок в резонатор. К сожалению, применение частично прозрачного зеркала приводит к дополнительным потерям оптической мощности в системе. Однако предложенная схема наиболее проста и удобна для исследования многопроходных систем фильтрации.

Для фильтра, работающего по предложенной схеме, зависимость эффективности дифракции от мощности уп-

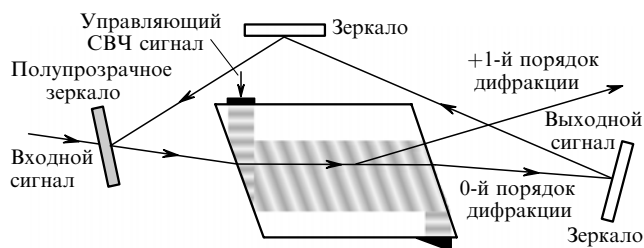


Рис.5. Схема полосового фильтра с многократным прохождением света.

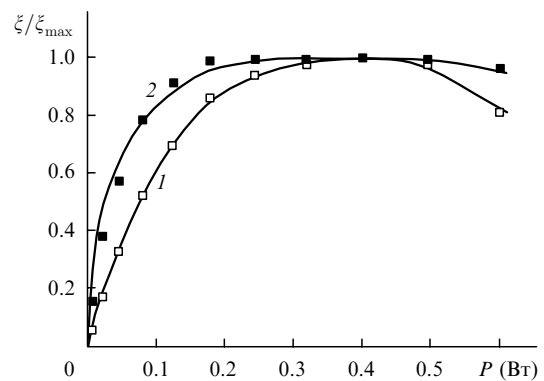


Рис.6. Эффективность дифракции света в однопроходном (1, □) и многопроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

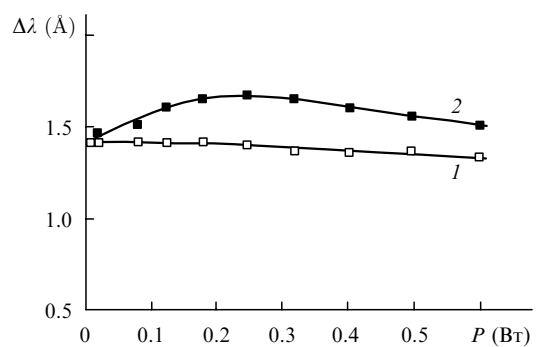


Рис.7. Спектральная полоса пропускания сигнала в однопроходном (1, □) и двухпроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

равляющего сигнала оказывается такой, как показано на рис.6. Видно, что наиболее заметное увеличение эффективности дифракции происходит при малых значениях мощности P . Например, при $P \approx 20$ мВт эффективность увеличилась в три раза, при этом она сама была ограничена значением 0.3. Поэтому, если кристалл, используемый в фильтре, имеет низкое акустооптическое качество [1, 2] или фильтр используется в многоканальном режиме работы, применение многопроходной схемы фильтрации становится оправданным, несмотря на небольшое уширение спектральной полосы пропускания прибора (рис.7).

5. Двухпроходный полосовой фильтр

Известно, что главной проблемой в системах волоконно-оптической связи является не столько повышение эффективности дифракции, сколько получение высокого спектрального разрешения и сужение спектральной полосы пропускания фильтра $\Delta\lambda$. Оказалось, что существуют схемы фильтрации, обеспечивающие некоторое сужение полосы пропускания акустооптического устройства. Одна из возможных схем построения фильтра показана на рис.8.

При исследовании было показано, что если свет первого дифракционного порядка направить в ячейку в обратном направлении, то происходит его повторная дифракция на ультразвуковой волне при выполнении условия брэгговского синхронизма для оптических лучей, распространяющихся в прямом и обратном направлениях. Свет, который взаимодействовал с ультразвуком дважды, распространяется навстречу входному светово-

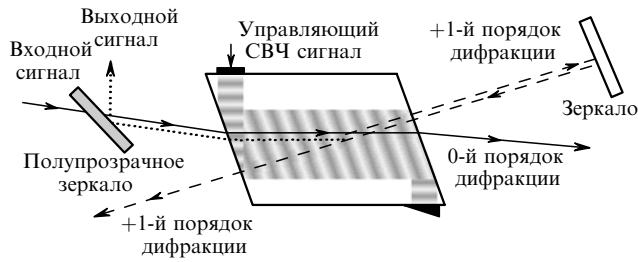


Рис.8. Схема двухпроходного полосового фильтра.

му пучку, в то время как входящие в ячейку и выходящие из нее оптические пучки разделяются при помощи полупрозрачного зеркала.

Интенсивность света I_2 на выходе фильтра в простейшем случае отсутствия потерь оптической мощности в системе определяется выражением

$$\frac{I_2}{I} = \frac{q^4}{(q^2 + \eta^2)^2} \sin^4 \left[(q^2 + \eta^2)^{1/2} \frac{l}{2} \right]. \quad (6)$$

Как видно из соотношения (6), применение двухпроходной системы фильтрации приводит к сужению спектральной полосы прибора. Однако анализ формулы (6) показывает, что практически всегда, кроме случая $ql = \pi$, эффективность дифракции в двухпроходной системе ниже, чем в однопроходной.

Для проверки этих предположений была реализована двухпроходная схема фильтрации. В эксперименте измерялись зависимости эффективности дифракции и спектральной полосы пропускания $\Delta\lambda$ от мощности управляющего электрического сигнала. Эти зависимости показаны на рис.9 и 10 соответственно. Видно, что для двухпроходного фильтра результаты эксперимента хорошо согласуются с результатами расчетов. Как и ожидалось, спектральная полоса двухпроходного устройства уменьшилась приблизительно в 1.4 раза и на длине волны $\lambda = 633$ нм достигла 0.7 ± 0.06 Å. Подобное спектральное разрешение соответствует полосе пропускания $\Delta\lambda = 4.2$ Å, если прибор настроен на длину волны излучения $\lambda = 1550$ нм. Дополнительным преимуществом, которым обладает двухпроходная схема фильтрации, является уменьшение величины боковых максимумов передаточной функции акустооптической ячейки [14–17]. Так, например, в эксперименте получено трехкратное подавление интенсивности боковых максимумов аппаратной функции фильтра. Отметим, что двухпроходная система

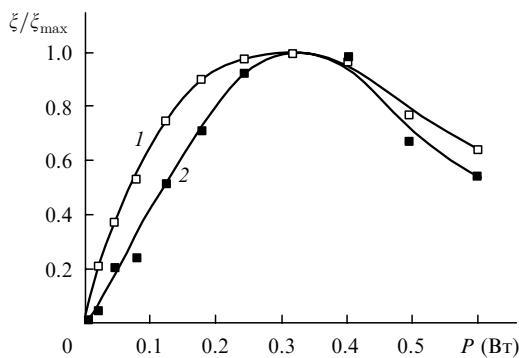


Рис.9. Эффективность дифракции света в однопроходном (1, □) и двухпроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

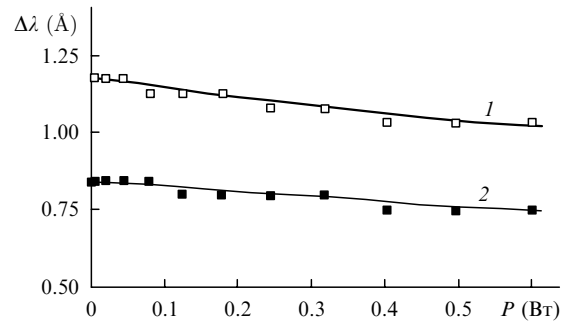


Рис.10. Спектральная полоса пропускания сигнала в однопроходном (1, □) и двухпроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

оказывается более простой по сравнению с известными системами фильтрации, например теми, в которых используются две акустооптические ячейки, установленные одна непосредственно за другой [14–17].

Следует отметить, что практически все результаты, представленные в настоящей работе и полученные с помощью ячейки квазиколинерного фильтра, были проверены при работе с неколлинеарным устройством на кристалле TeO_2 , в котором используется поперечная, т. е. широкоугольная, геометрия акустооптического взаимодействия [1–3]. Результаты экспериментов с устройствами двух типов хорошо согласуются как между собой, так и с теоретическими выводами.

6. Полосовой фильтр с трехкратным прохождением света

Как показано в предыдущем разделе, применение двухпроходной системы фильтрации приводит к сужению спектральной полосы света в 1.4 раза. Однако из расчетов следует, что создание фильтров, в которых дифрагировавший свет пропускается через ячейку большее число раз, неоправданно. Например, шестикратное пропускание светового пучка через звуковой столб приводит лишь к двукратному сужению спектральной полосы устройства. Следует заметить, что в рассматриваемых системах неизбежно присутствуют потери света из-за его отражений от граней кристалла и применения полупрозрачных зеркал. В связи с этим для достижения более заметного сужения спектральной полосы пропускания и уменьшения потерь оптической мощности необходима схема многопроходного взаимодействия, отличающаяся от той, в которой используется простое увеличение числа прохождений света через звуковой столб.

В настоящей работе исследована одна из подобных схем фильтрации света, показанная на рис.11. В этой схеме свет проходит через кристалл три раза. Особенностью схемы является определенный выбор направлений распространения световых лучей. Из рис.11 видно, что вначале падающий свет распространяется в ячейке под углом Брэгга, соответствующим длине волны λ_1 , как это происходит в обычном фильтре. Поэтому спектр отфильтрованного после первого прохождения света заключен в интервале оптических длин волн от $\lambda_1 - \Delta\lambda/2$ до $\lambda_1 + \Delta\lambda/2$, где $\Delta\lambda$ – спектральная полоса пропускания фильтра при однократном взаимодействии. После первого взаимодействия дифрагировавший световой пучок повторно направляется в кристалл с помощью зеркала. Однако при этом он распространяется под иным углом от-

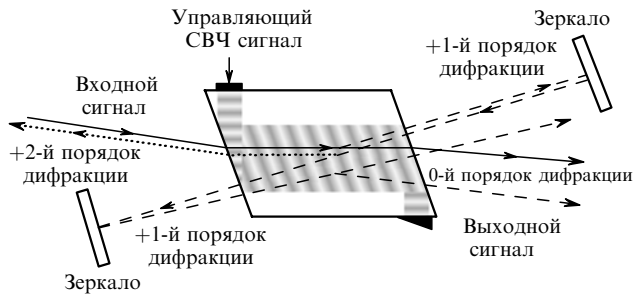


Рис.11. Схема трехпроходного полосового фильтра.

носителем акустического волнового фронта по сравнению с первым взаимодействием. Условие синхронизма при вторичном прохождении выполняется на длине волны λ_2 , также находящейся внутри интервала $\lambda_1 \pm \Delta\lambda/2$. Анализ показал, что спектр излучения, которое не дифрагировало на звуковой волне при повторном прохождении, состоит из двух основных максимумов. Ширина каждого из них приблизительно равна $\Delta\lambda/2$.

Очевидно, что одновременное существование двух максимумов в передаточной характеристике фильтра является неприемлемым. Поэтому для подавления одного из двух максимумов в спектре дважды прошедшего через ячейку излучения необходимо в третий раз пропустить это излучение через ультразвуковой столб. При третьем прохождении условие Брэгга выполняется для длины волны света λ_3 , которая соответствует одному из этих максимумов. Очевидно, что третье прохождение света через звуковой столб приводит к дополнительному сужению полосы пропускания устройства, а также к подавлению побочных максимумов передаточной характеристики.

Можно показать, что интенсивность света I_3 на выходе подобного фильтра описывается формулой

$$\frac{I_3}{I} = \xi(\lambda_1)\xi(\lambda_2)[1 - \xi(\lambda_3)], \quad (7)$$

где $\xi(\lambda_1)$, $\xi(\lambda_2)$ и $\xi(\lambda_3)$ – эффективности дифракции на соответствующих длинах волн. Из формулы (7) следует, что в трехпроходной схеме фильтрации неизбежно происходят потери мощности фильтруемого оптического сигнала. Однако отсутствие в схеме фильтра полупрозрачного зеркала является ее достоинством.

Для проверки результатов теоретического анализа были проведены соответствующие эксперименты. Изменялись зависимости эффективности дифракции от мощности электрического сигнала, представленные на рис.12. Видно, что трехпроходное устройство, как и двухпроходное, не обеспечивает выигрыша в эффективности дифракции, причем максимальная эффективность дифракции в трехпроходной системе достигается при несколько большей мощности звука, чем в однопроходной. Эта особенность непосредственно следует из формулы (7). Измерения показали, что общий вид рассчитанной зависимости спектральной полосы пропускания от мощности ультразвука достаточно хорошо совпадает с характеристикой реального устройства. Как следует из данных рис.13, наиболее узкая полоса пропускания фильтра $\Delta\lambda = 0.6 \pm 0.05 \text{ \AA}$ достигается при максимальной эффективности дифракции, в то время как тот же фильтр в однопроходном варианте характеризуется полосой пропускания $\Delta\lambda = 1.2 \pm 0.1 \text{ \AA}$.

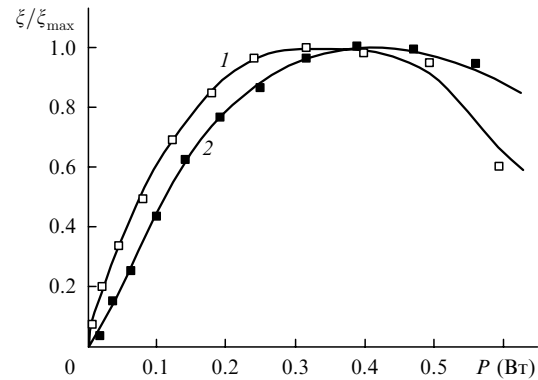


Рис.12. Эффективность дифракции света в однопроходном (1, □) и трехпроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

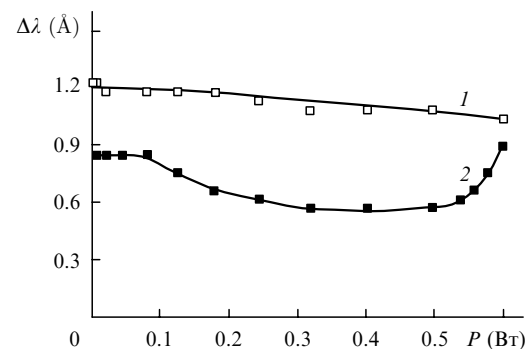


Рис.13. Спектральная полоса пропускания сигнала в однопроходном (1, □) и трехпроходном (2, ■) фильтрах. Кривые – расчет, точки – эксперимент.

Таким образом, трехпроходная схема фильтрации позволяет получить уменьшение полосы фильтрации в два раза. Подобное сужение полосы несомненно говорит о перспективности применения этой схемы в акустооптических фильтрах. Однако трехпроходная система фильтрации световых пучков требует исключительно тонкой юстировки оптической схемы прибора, причем сложность настройки системы возрастает с увеличением спектрального разрешения фильтра. Так, например, эксперимент показал, что поворот одного из зеркал в трехпроходной системе на угол около $10'$ приводил к уменьшению эффективности дифракции от максимального значения практически до нуля. Тем не менее указанный недостаток не является определяющим, поэтому трехпроходную схему можно рекомендовать для использования в акустооптических системах фильтрации световых сигналов.

7. Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что применение в загряздающих и полосовых акустооптических устройствах схем фильтрации с многократным взаимодействием света и звука оказывается весьма перспективным. Исследованные многопроходные фильтры характеризуются более совершенными характеристиками (спектральное разрешение, эффективность дифракции и потребляемая электрическая мощность), чем традиционные однопроходные акустооптические приборы.

1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение* (М.: Сов. Радио, 1978).
2. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
3. Voloshinov V.B., Mishin D.D., Uskov A.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1731**, 297 (1991).
4. Волошинов В.Б., Мишин Д.Д., Молчанов В.Я. и др. *Письма в ЖТФ*, **18**, 33 (1992).
5. Voloshinov V.B. *Opt. Eng.*, **31** (10), 2089 (1992).
6. Chang I.C. *Electron. Lett.*, **28**, 1255 (1992).
7. Qin C.S., Huang G.C., Chan K.T., et al. *Electron. Lett.*, **31**, 1237 (1995).
8. Tran C.D., Huang G.G. *Opt. Eng.*, **38** (7), 1143 (1999).
9. Sapriel J., Charissoux D., Voloshinov V.B., et al. *J. Lightwave Technol.*, **20** (5), 864 (2002).
10. Zaitsev A.K., Kludzin V.V. *Opt. Commun.*, **219**, 277 (2003).
11. Riza N.A., Yakoob Z. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (7), 693 (2001).
12. Mughai M.J., Riza N.A. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **14** (4), 510 (2002).
13. Волошинов В.Б., Магдич Л.Н., Князев Г.А. *Вестник Моск. ун-та. Сер. Физика, астрономия*, № 4, 36 (2005).
14. Мазур М.М., Шорин В.Н., Абрамов А.Ю. и др. *Оптика и спектроскопия*, **67**, 563 (1989).
15. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. *Квантовая электроника*, **12**, 2180 (1985).
16. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. *Радиотехника и электроника*, **43** (1), 121 (1998).
17. Захаров В.Г., Парыгин В.Н. *Радиотехника и электроника*, **35** (1), 175 (1990).