

IV. Акустооптические измерительные приборы

УДК 534-16; 535.4

**АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ-
ЧАСТОТОСДВИГАТЕЛИ С ВОЛОКОННЫМИ ВЫВОДАМИ****В.М. Епихин¹, М.М. Мазур¹, А.В. Рябинин¹, П.В. Карнаушкин²,
Л.И. Мазур¹, Л.Л. Пальцев¹, В.Н. Шорин¹**¹ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия,
epikvm@mail.ru

Аннотация. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы акустооптические модуляторы-частотосдвигатели на кристаллах TeO_2 с одномодовыми световодами, поддерживающими и не поддерживающими поляризацию для коллимированных и фокусированных световых пучков на длинах волн излучения 785, 1064, 1550 нм. Определены механизмы формирования и способы расширения рабочей полосы модулятора. Создан двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с рабочей полосой ≈ 40 МГц. Рассмотрены однокристалльные модуляторы на коллимированных пучках с частотной полосой ≈ 10 МГц. Исследован однокристалльный модулятор с фокусированным световым пучком с временем переключения ≈ 18 нс и расширенной полосой приёма ≈ 40 МГц. Показано, что фокусировка светового пучка даёт возможность реализовать модулятор с минимальным временем переключения $\approx 2-3$ нс. Это значение ограничено электрическим пробоем излучателя ультразвуковой волны.

Ключевые слова: акустооптика, акустооптический, модулятор, оптическое волокно.

**ACOUSTO-OPTIC MODULATORS-FREQUENCY SHIFTERS
WITH FIBER LEADS****V.M. Epikhin¹, M.M. Mazur¹, A.V. Ryabinin¹, P.V. Karnaushkin²,
L.I. Mazur¹, L.L. Paltsev¹, V. N. Shorin¹**¹FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,²Perm State University, Perm, Russia,
epikvm@mail.ru

Annotatuon. Acousto-optic modulators-frequency shifters based on TeO crystals with single-mode optical fibers supporting and not supporting polarization for collimated and focused light beams at radiation wavelengths of 785, 1064, 1550 nm have been developed, produced and experimentally investigated. The mechanisms of formation and methods of expanding the working band of the modulator are determined. A double-crystal acousto-optic laser emission frequency shifter with an working bandwidth of ≈ 40 MHz has been created. Single-crystal modulators based on collimated beams with a frequency band of ≈ 10 MHz are considered. A single-crystal modulator with a focused light beam with a switching time of ≈ 18 ns and an extended reception band of ≈ 40 MHz is investigated. It is shown that a light beam focusing makes it possible to implement a modulator with a minimum switching time of $\approx 2-3$ ns. This value is limited by electrical breakdown of the ultrasonic wave transmitte.

Альманах современной метрологии, 2021, № 3 (27)

Key words: hydrophone phase calibration, minimum-phase frequency response, Hilbert transform, complex fractional-rational approximation.

Введение

Актуальность разработки акустооптических (АО) устройств, встраиваемых в волоконно-оптические линии (ВОЛ), обусловлена преимуществами закрытых оптических трактов: высокая степень физической и информационной защиты от внешнего воздействия, надёжность и стабильность параметров в отсутствие механических перемещений, высокое быстродействие, гибкая компоновка оптических узлов в сложных схемах и малые габариты, возможность коммутации оптических сигналов в волоконных линиях связи [1]. В частности, модуляторы-частотосдвигатели с волоконными выводами будут востребованы при создании малогабаритных транспортируемых оптических и микроволновых стандартов частоты [2–4]. Акустооптические модуляторы-частотосдвигатели с одномодовыми волоконными выводами для краткости далее будем называть волоконными (АОМВ).

Создание волоконных АОМВ с малыми оптическими потерями включает тщательное согласование ВОЛ, микрообъективов и акустооптической ячейки (АОЯ), а также их прецизионную установку, юстировку и фиксацию. Эти операции требуют специального оборудования и дополнительных трудозатрат, что увеличивает стоимость приборов. Кроме того, их конструкция принципиально ограничивает некоторые важные технические характеристики.

Цель данной работы — разработка и создание модуляторов-частотосдвигателей с одномодовыми волоконными выводами (АОМВ) и экспериментальное исследование их параметров; изучение механизмов формирования и способов расширения рабочей полосы частот; определение эффектов, ограничивающих минимальное время переключения АОМВ и оценка его значения.

Частотная полоса АОМВ. Общие соотношения

Рассмотрим АОМВ для случая использования в качестве материала акустооптической ячейки (АОЯ) монокристаллического парателлурита (TeO_2), обладающего уникальным сочетанием акустических, оптических и акустооптических свойств [5] и позволяющего осуществлять эффективную дифракцию как изотропного, так и анизотропного типа.

Ниже на рис. 1 приведены схемы разработанных волоконных АО модуляторов: К — коллиматоры (фокусаторы); АОЯ — акустооптическая ячейка; П — поляризатор.

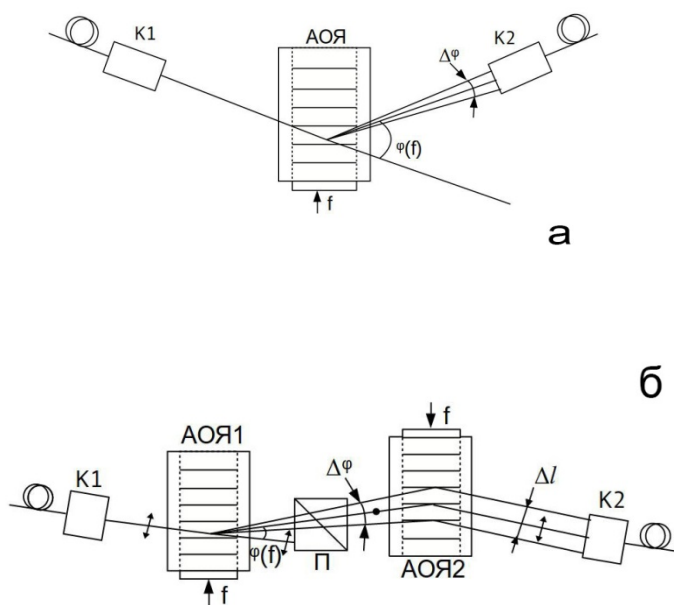


Рис. 1. Схемы разработанных волоконных АО модуляторов: а — однокристалльный АОМВ с коллимированным или фокусированным световым пучком; б — двухкристалльный АОМВ

На рис. 1а показана схема однокристалльного АОМВ, где прямыми линиями обозначены оптические оси световых пучков. Поскольку с обеих сторон АОМВ применяются идентичные волоконно-оптические световоды (ВОС), оптические потери при вводе дифрагировавшего пучка в ВОС будут минимальными в двух случаях:

- используется коллимированный световой пучок (рэлеевская длина гауссовского пучка много больше дистанции пучка между коллиматорами К1 и К2 [6]). Применяют для стационарных частотосдвигателей, требования к быстродействию АОМВ не предъявляют;
- сходящийся световой пучок фокусируется в центре звукового столба (рэлеевская длина порядка длины звукового столба). Вместо коллиматоров устанавливают фокусаторы. В этом случае требования к юстировке элементов АОМВ более жёсткие, так как оптические потери критичны к расстоянию от фокусаторов до АОЯ, зато имеется возможность быстрой модуляции интенсивности пучка.

Для получения максимальной интенсивности дифрагировавшего пучка при минимальной мощности УЗВ ширина звукового столба в ближней зоне излучателя ультразвуковой волны (УЗВ) H должна быть не меньше диаметра

перетяжки $2w$: $H \geq 2w$. Быстродействие модулятора характеризуют временем переключения τ , то есть временем возрастания мощности дифрагировавшего пучка по уровню от 0,1 до 0,9.

Практический интерес представляют АОМВ в режиме Брэгга при $a = \frac{\Psi_{lgh}}{\Psi_{snd}} \leq 1$, где Ψ_{lgh} и Ψ_{snd} — расходимости пучков света и звука соответственно, когда формируется единственный порядок дифракции и максимально достижимое значение эффективности дифракции $\approx 0,8$ [7]. В этом случае минимальное время переключения пропорционально времени пересечения перетяжки светового гауссова пучка волновым фронтом УЗВ [7, 8]:

$$\tau_{cr} = 0,64 \cdot 2w / V, \quad (1)$$

где V — скорость УЗВ. $\tau \approx \tau_{cr}$ при условии:

$$(\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r) \gtrsim \Delta f_{cr} \approx 0,5 / \tau_{cr}, \quad (2)$$

где Δf_{cr} — частотная полоса переключения по уровню -3 дБ (полоса модулирующих частот [7]), а в скобках перечислены все полосовые характеристики реального АОМВ: Δf_m — частотная полоса согласования излучателя УЗВ с ВЧ трактом (50 Ом), в пределах которой мощность управляющего сигнала от ВЧ генератора передаётся в излучатель УЗВ с потерями ≤ 3 дБ [8, 9]; Δf_{af} — ширина частотной аппаратной функции (полоса частот АО взаимодействия), обратно пропорциональная длине АО взаимодействия, в пределах которой эффективность дифракции составляет не менее 0,5 от максимального значения [9, 10]; Δf_r — частотная полоса приёма, в пределах которой мощность дифрагировавшего светового пучка передаётся в приёмный ВОК с потерями ≤ 3 дБ [11, 12].

Если неравенство (2) не выполняется, $\tau > \tau_{cr}$. Грубую оценку τ можно сделать по формуле:

$$\tau \approx 0,5 / \Delta f; \quad \Delta f = \min(\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r, \Delta f_{cr}), \quad (3)$$

где Δf — частотная полоса реального АОМВ в режиме формирователя временного фронта интенсивности дифрагировавшего света, поскольку коэффициент передачи системы равен произведению коэффициентов передачи её составных частей, а длительность фронта импульса τ и полоса частот гармоник Δf , необходимая для его формирования, связаны соотношением: $\tau \cdot \Delta f \approx 0,5$ [9].

Пусть АОМВ используется в режиме стационарного частотосдвигателя для получения сдвига частоты дифрагировавшего света в пределах рабочей полосы $\Delta f = (f_0 + \Delta f / 2) - (f_0 - \Delta f / 2)$ [4]. В этом случае Δf_{cr} не является ограничивающим фактором, и справедливо соотношение:

$$\Delta f = \min (\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r). \quad (4)$$

Отметим, что для классического АОМ со свободными световыми пучками отсутствуют элементы с узким угловым полем (кроме самой АОЯ), поэтому Δf_r также не является ограничивающим фактором, и (4) переходит в

$$\Delta f = \min (\Delta f_m, \Delta f_{af}).$$

На рис. 1б приведена схема двухкристального АОМВ (ДАОМВ) [13] в качестве широкополосного стационарного частотосдвигателя, состоящего из двух идентичных АОЯ, повернутых на 180° . В этом случае углочастотный дрейф светового пучка после первой АОЯ компенсируется во второй АОЯ. В итоге угловое смещение $\Delta\varphi$ преобразуется в линейное Δl , причём направление распространения и состояние поляризации дважды продифрагировавшего пучка совпадают с направлением и поляризацией входного пучка при изменении частоты управляющего ВЧ сигнала [14]. В ДАОМВ использована «дефлекторная» геометрия АО взаимодействия, когда волновой вектор УЗВ касается поверхности волновых векторов продифрагировавшего излучения. В этом случае Δf_{af} имеет максимум для анизотропной дифракции при прочих равных условиях [8, 10].

Полоса согласования пьезопреобразователя (ПП) Δf_m определяется значениями акустических импедансов материалов ПП из LiNbO_3 и светозвукопровода из TeO_2 [9]. Для использованных нами конфигураций АОЯ на продольной УЗВ в режиме изотропной дифракции эти значения близки, что даёт возможность получить приблизительно октавную полосу согласования ПП: $\Delta f_m \approx 2f_0/3$, то есть при $f_0 = 100$ МГц $\Delta f_m \approx 66$ МГц. Для АОЯ на поперечной УЗВ в режиме анизотропной дифракции значения импедансов отличаются в несколько раз, и достижение октавной полосы Δf_m сопряжено с технологическими сложностями: необходимо либо создавать «просветляющие» слои в промежутке между ПП и светозвукопроводом [8, 9], либо использовать конверсию первоначально возбуждаемой продольной УЗВ в «рабочую» поперечную на специально скошенной грани кристалла [15].

Ширина частотной аппаратной функции для изотропной дифракции по уровню -3 дБ равна [9]:

$$\Delta f_{af} \approx 1,77nV^2 / (L\lambda f_0), \quad (5)$$

где n — показатель преломления кристалла; L — длина ПП вдоль распространения света; λ — длина волны света в вакууме. Ширина частотной аппаратной функции анизотропного неаксиального дефлектора равна [16]:

$$\Delta f_{af} \approx 2V \left[\frac{n}{\lambda L} \left(\frac{\Delta\Phi_e}{\pi} + \frac{\Delta\Phi_c}{\pi} \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\Delta\Phi_{e,c}$ — допустимая максимальная фазовая расстройка на краях аппаратной функции и в её центре. Например, при $\Delta\Phi \approx 0,799\pi$ относительное значение аппаратной функции составляет $T \approx 0,5$, а при $\Delta\Phi \approx 0,580\pi$ $T \approx 0,7$.

Величины Δf_m , Δf_{af} — суть характеристики АОЯ, они не зависят от конструкции АОМВ. Напротив, Δf_r зависит как от деталей АО взаимодействия, так и от устройства АОМВ. Рассмотрим эту характеристику более подробно.

Особенности конструкции АОМВ, ограничивающие частотную полосу

Специфическая особенность представленных на рисунках АОМВ — наличие приёмного микрообъектива с узким угловым полем, за пределами которого потери интенсивности продифрагировавшего светового пучка при вводе в ВОС резко растут. Механизм формирования полосы приёма модулятора заключается в ограничении апертуры дифрагировавшего пучка при вводе его в приёмный ВОС. При этом для АОМВ с коллиматорами ограничивается линейная апертура, а для АОМВ с фокусаторами — угловая апертура [11, 12]. Получены следующие выражения для частотной полосы приёма по уровню –3 дБ:

- для однокристалльного АОМВ с коллиматорами:

$$\Delta f_r \approx 0,8 \cdot V \cdot D / (\lambda \cdot F); \quad (7)$$

- для однокристалльного АОМВ с фокусаторами:

$$\Delta f_r \approx 1,6 \cdot NA \cdot V / (M \cdot \lambda); \quad (8)$$

- используя модели и рассуждения, приведённые в [11, 12], можно получить аналогичную формулу для полосы ДАОМВ с коллиматорами:

$$\Delta f_r \approx 1,6 \cdot NA \cdot V \cdot F / (\lambda \cdot l^*). \quad (9)$$

Здесь D — диаметр модового пятна; F — фокусное расстояние коллиматора; NA — числовая апертура ВОС; M — увеличение оптической системы АОМВ; $l^* = (l_1/n_1 + l_2/n_2 + l_3)$, $l_{1,2,3}$ — длина пути дважды продифрагировавшего пучка в кристалле TeO_2 , в поляризаторе и в воздухе соответственно; $n_{1,2}$ — показатели преломления TeO_2 и материала поляризатора соответственно.

Первое, что следует отметить: для всех трёх вариантов полоса приёма пропорциональна V . Следовательно, целесообразно использовать изотропную дифракцию на продольной УЗВ, где скорость V значительно выше. Для решения задач, требующих максимально широкой рабочей полосы, оптимальным для однокристалльного АОМВ является вариант применения продольной волны с волновым вектором вдоль оси Z кристалла. В этом случае $V_{1g} = 4260$ м/с, что близко к максимальной скорости продольной волны в TeO_2 (4600 м/с). Эта геометрия АО взаимодействия уникальна тем, что эффективность дифракции для значений, близких к единице, не зависит от состояния поляризации излучения. Кроме того, дифрагировавшие пучки с взаимно-ортогональной поляризацией распространяются на выходе АОЯ параллельно и имеют одинаковые оптические потери при вводе в ВОС [4].

Отличительной особенностью ДАОМВ является тот факт, что при двукратной дифракции результирующий сдвиг частоты света удваивается. Следовательно, Δf_m и Δf_{af} для одиночной АОЯ увеличиваются приблизительно вдвое для ДАОМВ. В этом случае можно использовать анизотропную дифракцию на поперечной волне. Особенности анизотропной дифракции в TeO_2 наблюдается радикальное (более, чем на порядок) увеличение коэффициента акустооптического качества M_2 [8], а также необходимость работы только с плоскополяризованным излучением. Согласно (9), Δf_r ДАОМВ можно значительно увеличить за счёт уменьшения l^* , используя тонкоплёночный поляризатор вместо кристаллического.

Так как коэффициент передачи ДАОМВ равен произведению коэффициентов передачи отдельных АОЯ, для получения максимальной полосы важным является совмещение центров полос Δf_m и Δf_{af} , достигаемое ориентацией АОЯ1 и АОЯ2 относительно падающего светового пучка.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Были изготовлены и экспериментально исследованы акустооптические модуляторы-частотосдвигатели на кристаллах TeO_2 с ВОС, поддерживающими и не поддерживающими поляризацию, для коллимированных и фокусированных световых пучков на длинах волн излучения 785, 1064, 1550 нм. В первых трёх вариантах АОМВ использовалась изотропная дифракция на продольной УЗВ, распространяющейся вдоль оси Z в режиме Брэгга [11, 12]. Для ДАОМВ была использована анизотропная дифракция с геометрией АО взаимодействия для неаксиального анизотропного дефлектора [14]. Результаты измерения основных параметров АОМВ сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Экспериментальные параметры АОМВ

Наименование АОМВ, конструкция, тип ВОС	Длина волны λ , нм	Активная апертура H , мм	Общие оптические потери σ , дБ	Контраст модуляции K , дБ	Поляризационный контраст K_p , дБ	Диапазон $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$ частот, МГц	Время переключения τ , нс	ВЧ мощность P , Вт
Фотон-6201 О, К, <i>PM</i>	1550 ± 60	1,6	-1,8	-56	-27	80 ± 2,6	240	2,9
Фотон-6202 О, К, <i>SM</i>	1550 ± 60	1,0	-2,0	-56	—	110 ± 2,7	150	1,9
Фотон-6203 О, Ф, <i>SM</i>	1064 ± 50	0,12	-3,2	-63	—	200 ± 20	18	0,95
Фотон-7201 Д, К, <i>PM</i>	780 ± 40	<i>PM</i>	-4,0	-33	—	176 ± 20	1930	0,25

В первом столбце указаны особенности конструкции АОМВ: О — однокристалльный; Д — двухкристалльный; К — с коллимированным пучком; Ф — с фокусировкой пучка в центре звукового столба; *PM* — волокно, сохраняющее состояние поляризации («Панда»); *SM* — волокно, не сохраняющее состояние поляризации. Во втором столбце для длины волны излучения дан спектральный диапазон, в котором коэффициент отражения просветляющего покрытия < 0,2 %.

Общие оптические потери вычислялись по формуле: $\sigma = 10 \lg(I_{\max}^{+1} / I_0)$, где I_{\max}^{+1} — максимальное значение фотосигнала в «+1» порядке дифракции; I_0 — значение фотосигнала при соединении лазера с измерителем мощности волоконно-оптическим кабелем. Оптический контраст вычислялся по формуле: $K = 10 \lg(I_{p=0}^{+1} / I_{\max}^{+1})$, где $I_{p=0}^{+1}$ — значение фотосигнала в «+1» порядке дифракции в отсутствие ВЧ сигнала. Поляризационный контраст (для изотропной дифракции) вычислялся по формуле: $K_p = 10 \lg(I_{\perp}^{+1} / I_{\max}^{+1})$, где I_{\perp}^{+1} — максимальное значение фотосигнала в «+1» порядке дифракции для излучения с поляризацией, ортогональной поляризации падающего излучения. Время переключения (rise time) τ вычислялось по формуле (1). P — мощность управляющего ВЧ сигнала, при которой значение σ минимально.

В таблице 2 приведены значения полосовых частотных характеристик АОМВ.

Таблица 2

Частотные характеристики АОМВ

Наименование АОМВ	Δf_m^{exp} , МГц	$\Delta f_{af}^{\text{calc}}$, МГц	$\Delta f_{af}^{\text{exp}}$, МГц	Δf_r^{calc} , МГц	$\Delta f_{cr}^{\text{calc}}$, МГц	Δf^{exp} , МГц
Фотон-6201	40	44	45	5,8	2	5,2
Фотон-6202	55	32	—	5,8	3,3	5,4
Фотон-6203	80	95	97	36	28	41
Фотон-7201	40	88	—	78	0,3	≈ 40

Здесь Δf_m^{exp} — полоса согласования ПП, измеренная по уровню КСВН = 3; $\Delta f_{af}^{\text{calc}}$ — ширина частотной аппаратной функции, вычисленная по формулам (5), (6); $\Delta f_{af}^{\text{exp}}$ — ширина частотной аппаратной функции, измеренная при установленном входном фокусаторе Ф1 (коллиматоре К1) без приёмного фокусатора Ф2 (коллиматора К2). В этом случае непосредственно за АОЯ устанавливался широкоапертурный фотоприёмник с угловой апертурой $\Delta\alpha \gg 2NA/M \approx 0,7^\circ$ [12]; Δf_r^{calc} — ширина частотной полосы приёма, вычисленной по формулам (7)–(9); $\Delta f_{cr}^{\text{calc}}$ — частотная полоса переключения, вычисленная по формулам (1)–(2); Δf^{exp} — полоса рабочих частот, измеренная при установленных фокусаторах Ф1, Ф2 (коллиматорах К1, К2).

Из анализа данных таблицы следует:

- При работе АОМВ в качестве амплитудного модулятора выполняется неравенство (2).
- При работе АОМВ в режиме стационарного частотосдвигателя выполняется неравенство (4).
- Схема с фокусированным световым пучком даёт радикальное расширение полосы приёма [12].

- Для АОМВ Фотон-6201, 6203 наблюдается хорошее согласие вычисленных Δf_r^{calc} и измеренных значений полосы приёма $\Delta f_r^{\text{exp}} \approx \Delta f_r^{\text{calc}}$, что свидетельствует об адекватности принятых моделей механизмов формирования полосы приёма АОМВ [11, 12].
- Экспериментальные данные для ДАОМВ Фотон-7201 не позволяют оценить полосу Δf_r^{exp} , так как Δf_r^{exp} в данном случае ограничено соотношением:

$$\Delta f_r^{\text{exp}} \leq \min \left\{ \Delta f_{af}^{(1)\text{calc}} \approx 51 \text{ МГц}, \Delta f_r^{\text{calc}} \approx 78 \text{ МГц}, \Delta f_m^{(1)\text{exp}} \approx 40 \text{ МГц} \right\} \approx 40 \text{ МГц},$$
 где $\Delta f_{af}^{(1)\text{calc}}$ и $\Delta f_m^{(1)\text{exp}}$ относятся к одиночной АОЯ. Вместе с тем видно, что значение Δf_r^{calc} для ДАОМВ значительно превышает соответствующие значения для однокристалльных АОМВ.

Возможность реализации АОМВ с минимальным временем переключения

Возникает вопрос: чем ограничено минимальное время переключения в АОМВ? В работах [11, 12] сделаны оценки минимальных значений времени переключения АОМВ τ_{min} , исходя из максимального значения плотности акустической мощности, ограниченной электрическим пробоем ПП. В таблицу 3 сведены параметры, вычисленные по формулам (1)–(8) с учётом данных [11] и исходя из значений пороговой плотности акустической мощности без деструкции ПП в импульсном режиме $\rho_{\text{imp}} \approx 360 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Полоса согласования ПП полагалась равной октаве, то есть $\Delta f_m = 2f_0/3$. В последнем столбце таблицы 3 приведены минимальные значения скажности импульсной последовательности управляющего ВЧ сигнала m , при которой средняя по времени мощность $\langle P_a \rangle$ не превышает «безопасного» для теплового режима ПП уровня 1 Вт.

Таблица 3

Расчётные параметры АОМВ с минимальным временем переключения

λ , нм	L , мкм	H , мкм	f_0 , МГц	τ_{min} , нс	Δf_{cr} , МГц	Δf_m , МГц	Δf_r , МГц	Δf_{af} , МГц	P_a , Вт	m
1064	225	14,6	455	2,2	227	303	300	650	1,2	1,2
1550	323	21,2	313	3,2	156	209	205	451	2,5	2,5

Из таблицы 3 видно, что неравенство (2) выполняется для обеих длин волн излучения 1064 и 1550 нм. Это позволяет утверждать, что схема с фокусированным пучком даёт возможность реализовать АОМВ с τ , близким к предельным значениям τ_{\min} , ограниченным напряжением пробоя используемого ПП.

Разработанные устройства могут использоваться: для увеличения диапазона амплитудной и частотной модуляций лазеров с оптоволоконными выводами; в качестве селектора импульсов в волоконных системах с высокой частотой повторения для увеличения диапазона частоты повторения; при создании транспортируемых оптических и микроволновых стандартов частоты [4] для уменьшения их габаритов; в волоконно-оптических датчиках и дальномерах для увеличения пространственного разрешения [17].

Выводы

1. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы акустооптические модуляторы-частотосдвигатели на кристаллах TeO_2 с одномодовыми световодами, поддерживающими и не поддерживающими поляризацию, для коллимированных и фокусированных световых пучков на длинах волн излучения 785, 1064, 1550 нм.
2. Определены механизмы формирования и способы расширения рабочей полосы модуляторов. Получены выражения для частотной полосы приёма АОМВ различных конструкций.
3. Изготовлен АОМВ с фокусировкой пучка и временем переключения ≈ 18 нс, и исследованы его экспериментальные параметры. Расчётное и измеренное значения частотной полосы приёма находятся в хорошем согласии. Создан двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с рабочей полосой ≈ 40 МГц. Экспериментально исследованы однокристалльные модуляторы на коллимированных пучках с частотной полосой ≈ 10 МГц.
4. Показано, что фокусировка светового пучка в центре звукового столба даёт возможность реализовать модулятор с минимальным временем переключения $\approx 2\text{--}3$ нс. Это значение ограничено электрическим пробоем излучателя ультразвуковой волны.

Список литературы

1. Антонов С.Н. Акустооптическая коммутация волоконно-оптических каналов // ЖТФ. — 2019. — Т. 89. — № 2. — С. 274–279.
2. Бердасов О. И., Грибов А. Ю., Стрелкин С. А., Слюсарев С. Н. Оптический стандарт частоты на холодных атомах стронция // Альманах современной метрологии. — 2017. — № 11. — С. 81–94.
3. Купалов Д. С., Барышев В. Н., Блинов И. Ю., Бойко А. И., Домнин Ю. С., Копылов Л. Н., Купалова Л. Н., Новоселов А. В., Хромов М. Н. Репер частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия. Первые результаты // Альманах современной метрологии. — 2017. — № 11. — С. 95–103.
4. Епихин В.М., Барышев В.Н., Слюсарев С.Н., Апрелев А.В., Блинов И.Ю. Акустооптические модуляторы для управляемого сдвига частоты световых пучков в оптических и микроволновых стандартах частоты на холодных атомах // Квантовая электроника. — 2019. — Т. 49. — № 9. — С. 857–862.
5. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. — М.: Наука, 1982. — 632 с.
6. Айхлер Ю., Айхлер Г.И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. — М.: Техносфера, 2012. — 495 с.
7. Maydan, D. Acoustooptical pulse modulators // IEEE J. — 1970. — V. QE-6. — No. 1. — P. 15–18.
8. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — М.: Сов. Радио, 1978. — 110 с.
9. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твёрдых телах. Применение для обработки сигналов. — М.: Наука, 1982. — 424 с.
10. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985. — 279 с.
11. Епихин В.М., Карнаушкин П.В. // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50. — № 10. — С. 962–966.
12. Епихин В.М., Рябинин А.В. Акустооптические модуляторы с расширением частотной полосой для волоконно-оптических линий // ЖТФ. — 2021. — Т. 91. — № 6. — С. 1021–1025.
13. Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н. Двухкристальный акустооптический сдвигатель частоты: патент на изобретение РФ. — № 2648567 24.05.2017.
14. Мазур М. М., Мазур Л. И., Рябинин А. В., Шорин В. Н. Широкополосный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с волоконными вводами // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50. — № 10. — С. 954–965.

15. Гусев О.Б., Клудзин В.В. Акустооптические измерения. — Л.: Издательство ЛГУ, 1987. — 149 с.
16. Gazalet M.G., Carlier S., Picault J.P., Waxin G., Bruneel C. Multifrequency paratellurite acoustooptic modulators // Appl. Opt. — 1985. — V. 24. — No. 24. — P. 4435–4438.
17. Лукашова Т.О., Наний О.Е., Никитин С.П., Трешиков В.Н. Точность измерения и пространственная разрешающая способность распределённого температурного датчика на основе двухимпульсного дифференциального когерентного рефлектометра // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50. — № 9. — С. 882–887.

Статья поступила в редакцию: 14.05.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 15.06.2021 г.

Статья принята в работу: 01.07.2021 г.