

10

## Частотная полоса акустооптического волоконного модулятора с фокусаторами: сравнение экспериментальных данных с расчетными

© В.М. Епихин<sup>1</sup>, П.В. Карнаушкин<sup>2</sup>, М.М. Мазур<sup>1</sup>, Л.И. Мазур<sup>1</sup>, Л.Л. Пальцев<sup>1</sup>,  
В.Н. Шорин<sup>1</sup>, А.В. Апрельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия  
E-mail: epikvm@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2024 г.

В окончательной редакции 5 июля 2024 г.

Принято к публикации 28 июля 2024 г.

Экспериментально исследован ряд акустооптических модуляторов с одномодовыми волоконными выводами-фокусаторами. Длина волны излучения 1550 nm, центральная частота управляющего сигнала  $\simeq 150$  МГц. Переменными параметрами являются скорость акустической волны (использованы различные акустооптические кристаллы), рабочее расстояние фокусаторов, тип фокусирующего элемента (градиентная и асферическая линзы). Во всех случаях измеренные величины рабочей полосы модулятора в пределах погрешностей совпадают с данными, вычисленными в рамках предложенной ранее модели, позволяющей создавать волоконные модуляторы с требуемой частотной полосой до сотен мегагерц.

**Ключевые слова:** частотная полоса модулятора, коэффициент передачи, оптический контраст, скорость ультразвуковой волны, градиентные и асферические линзы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59134.19983

Оптимизация широкополосных акустооптических модуляторов с одномодовыми волоконными световодами (АОМВ) — актуальный вопрос как при конструировании систем лазерного охлаждения и стабилизации лазерных источников [1,2], так и при формировании короткого фронта дифрагировавшего светового импульса в задачах лазерно-волоконной дальнометрии [3,4]. В настоящее время существует потребность создания транспортируемого оптического стандарта частоты с относительной нестабильностью на уровне  $\sim 10^{-16} - 10^{-17}$ , достигнутой в стационарных устройствах. Решение этой задачи предполагает замену открытых (free space) оптических схем на более защищенные физически и информационно, а также менее подверженные внешним воздействиям волоконные оптические линии, в которые интегрированы необходимые оптические узлы, в частности акустооптические модуляторы/частотосдвигатели.

Важный параметр АОМВ — диапазон его рабочих частот (полоса частот)  $\Delta f$ . Например, АОМВ может использоваться для получения управляемого сдвига частоты дифрагировавшего света в пределах рабочей полосы  $\Delta f = (f_0 + \Delta f/2) - (f_0 - \Delta f/2)$ , где  $f_0$  и  $\Delta f$  — постоянная и переменная части сдвига. Согласно данным работы [5], для АОМВ справедливо соотношение

$$\Delta f \simeq \min(\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r), \quad (1)$$

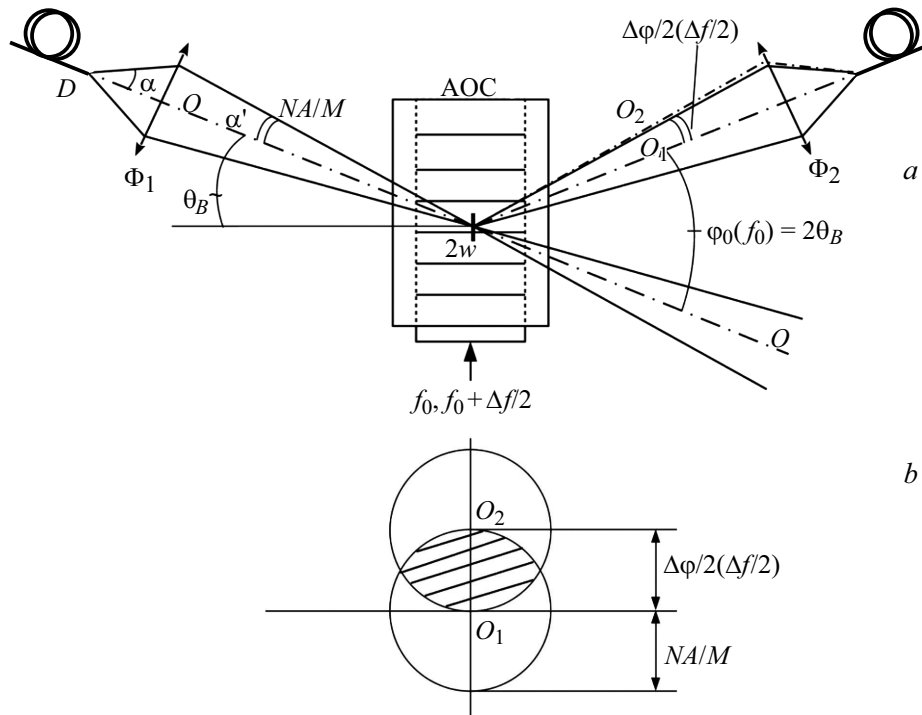
где в скобках перечислены полосовые частотные характеристики реального АОМВ:  $\Delta f_m$  — полоса согласования излучателя ультразвуковых волн (УЗВ) с высокочастотным (ВЧ) трактом управляющего сигнала;

$\Delta f_{af}$  — полоса синхронизма или ширина частотной аппаратной функции акустооптической ячейки (АОЯ), обратно пропорциональная длине акустооптического (АО) взаимодействия;  $\Delta f_r$  — полоса приема, в пределах которой мощность дифрагировавшего светового пучка передается в приемный волоконно-оптический световод (ВОС) с потерями менее 3 dB [4]. Эта характеристика — специфическая особенность АОМВ, так как она отсутствует у классического (free space) акустооптического модулятора. Вследствие (1) в большинстве практически важных случаев член  $\Delta f_r$  является определяющим в формировании  $\Delta f$ .

В работе [5] теоретически и экспериментально показано, что частотная полоса приема АОМВ  $\Delta f_r$  может быть радикально расширена при переходе от коллиматоров к фокусаторам. Представляет интерес дополнительное экспериментальное исследование акустооптических модуляторов с волоконными выводами-фокусаторами (АОМВФ) с целью подтверждения модели формирования  $\Delta f_r$ .

Цель настоящей работы — сравнение измеренных значений частотной полосы для серии АОМВ, изготовленных на базе различных АО-кристаллов и имеющих разные конструктивные особенности, с соответствующими данными, рассчитанными в рамках предложенной модели.

На рисунке показана оптическая схема АОМВ (a) и вид осесимметричных угловых полей дифрагировавшего светового пучка в плоскости, ортогональной оси  $O_1$  (b). Здесь  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — излучающий и приемный фокусаторы;  $2w$  — перетяжка светового пучка в центре АОЯ;



$a$  — оптическая схема АОМВ с фокусировкой светового пучка (АОС — акустооптическая ячейка);  $b$  — расположение оптических осей  $O_1$  и  $O_2$  и угловых полей дифрагировавшего пучка при значениях частоты управляющего сигнала  $f_0$  и  $f_0 + NA \cdot V/(M\lambda)$ .

$\alpha$  — расстояние от линзы до торца волокна ВОС;  $\alpha'$  — рабочее расстояние фокусаторов;  $NA$  — эффективная числовая апертура ВОС;  $V$  — скорость УЗВ;  $\lambda$  — длина волны излучения в воздухе;  $M = 2w/D$  — увеличение оптической системы;  $D$  — диаметр модового пятна ВОС;  $\theta_B$  — угол Брэгга.

Механизм формирования частотной полосы приема  $\Delta f_r$  заключается в ограничении апертуры дифрагировавшего пучка при вводе его в приемный ВОС  $\Phi_2$  вследствие углового дрейфа оптической оси пучка с изменением частоты управляющего сигнала  $f$ . При этом для АОМВ с коллиматорами ограничивается линейная апертура, а для АОМВ с фокусаторами — угловая апертура [4,5].

АОМВФ состоит из корпуса, внутри которого находятся АОЯ, устройство согласования импедансов пьезопреобразователя (ПП) и ВЧ-тракта ( $50 \Omega$ ), а также установленные под нужным углом линзовые или градиентные фокусаторы с волоконно-оптическими кабелями, оканчивающиеся оптическими разъемами FC/APC. На корпусе установлен ВЧ-разъем типа SMA для подачи управляющего сигнала.

Особенности конструкции изготовленных АОМВФ были следующими.

1. Для всех изготовленных образцов АОМВФ выполнялось неравенство  $\Delta f \simeq \Delta f_r < (\Delta f_{af}, \Delta f_m)$ , т.е. рабочая полоса АОМВФ  $\Delta f$  определялась полосой приема  $\Delta f_r$ . Все указанные частотные полосовые характеристики определены по уровню  $-3$  дБ. В нашем случае

согласно [5]:

$$\Delta f_r \approx 1.6 NA \cdot V/(M\lambda). \quad (2)$$

Величины  $\lambda$ ,  $NA$  и  $M$  оставались постоянными для всех образцов АОМВ, так как они определяются типом использованного ВОС и активной поперечной апертурой АОЯ  $h \simeq 2w = 0.12$  мм, которые фиксировались конкретными условиями дальнейшего использования образцов АОМВФ. При этом  $\lambda = 1550$  нм,  $NA = 0.094$ ,  $M = 11.5$ . Напротив, параметр  $V$  изменялся. Для этого мы использовали два типа АО-кристаллов с различными значениями скорости УЗВ  $V$ :  $\text{TeO}_2$  с  $V = 4.3 \cdot 10^3$  м/с [6] и  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  с  $V = 3.46 \cdot 10^3$  м/с [7]. Это позволило всесторонне проверить формулу (1).

2. Для всех вариантов АОМВФ использовалась изотропная дифракция на продольной УЗВ, распространяющейся по оси  $Z$  кристалла. Размеры пьезопреобразователя  $h \times l = 0.12 \times 3.5$  мм для кристалла  $\text{TeO}_2$  и  $0.12 \times 3.0$  мм для кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , где  $l$  — длина ПП вдоль направления светового пучка. Режим дифракции был близок к брэгговскому:  $Q = l\lambda f^2/(nV^2) > 2$  [8]. Отношение величин дифракционной расходимости света и звука в плоскости дифракции  $a \simeq 1$ , при этом максимально достижимая эффективность дифракции  $\simeq 80\%$  [8].

3. В рассмотренной модели источником дифрагировавшего излучения является перетяжка гауссового пучка, расположенная посередине звукового столба в ближней зоне ПП. Реальный источник является протяженным, и

Основные параметры исследованных АОМВФ

Номер АОМВФ	АО-кристалл	Тип фокусатора	$f$ , MHz	$\sigma$ , dB	$\Delta f_{af}^{calc}$ , MHz	$\Delta f_m^{exp}$ , MHz	$\Delta f_r^{calc}$ , MHz	$\Delta f_r^{exp}$ , MHz	$K$ , dB	$P$ , W
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	TeO <sub>2</sub>	LPF-01-1550-9/125-S-12-22-1.81GR-55-3A-1-1	152.2	-2.5	88 ± 6	76 ± 1	37 ± 3	38.0 ± 0.5	≤ -59	2.3
2	TeO <sub>2</sub>	LPF-01-1550-9/125-S-11-23-2AS-60-3A-1-1	147.8	-2.4	88 ± 6	100 ± 1	37 ± 3	36.0 ± 0.5	≤ -58	2.0
3	TeO <sub>2</sub>	LPF-01-1550-9/125-S-12-17-1.4AS-60-3A-1-1	149.7	-2.5	88 ± 6	100 ± 1	37 ± 3	35.0 ± 0.5	≤ -59	2.3
4	LiBi(MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	LPF-01-1550-9/125-S-12-10-1.01GR-55-3A-1-1	148.2	-3.6	66 ± 5	100 ± 1	29 ± 2	30.0 ± 0.5	≤ -58	2.9
5	LiBi(MoO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	LPF-01-1550-9/125-S-11-23-2AS-60-3A-1-1	163.6	-2.3	66 ± 5	68 ± 1	29 ± 2	30.0 ± 0.5	≤ -59	3.1

его границы расположены на расстоянии  $\pm l/2$  от перетяжки вдоль направления светового пучка. Потери при введении в волокно излучения от граничных участков источника будут малы при выполнении условия [9]:

$$l \ll b = 2z_r = (2w)^2 \pi n / (2\lambda), \quad (3)$$

где  $z_r$  — рэлеевская длина,  $n$  — показатель преломления АО-среды. Оценки для исследованных нами АОМВФ дают  $l/b \approx 0.05 \ll 1$ . Заметим, что в (3) не входит рабочее расстояние фокусатора  $\alpha'$ . Это означает, что основные параметры АОМВФ не должны зависеть от  $\alpha'$ .

4. Использовались волоконные фокусаторы фирмы OZ Optics [10]. Фокусатор — это волоконный кабель SMF-28, на концах которого находятся микрообъектив и оптический разъем FC/APC. Формулы фокусаторов приведены в таблице (столбец 3) и содержат следующую последовательную информацию: наименование (коллиматор, фокусатор), код конструкции микрообъектива, центр рабочего интервала длин волн (в nm), диаметры центральной и внешней жил ВОС (в  $\mu\text{m}$ ), тип ВОС (S — не поддерживающий поляризацию), увеличение оптической системы  $M$ , рабочее расстояние фокусатора  $\alpha'$  (в mm), фокусное расстояние фокусатора  $F$  (в mm) и тип линзы (GR — градиентная, AS — асферическая), уровень отраженной оптической мощности (в dB), тип обработки торца центральной жилы ВОС — 3A (APC), тип и диаметр защитной оболочки ВОС (в mm), длина ВОС (в m).

Для сравнения качества фокусировки светового пучка в перетяжку в центре АОЯ использовались фокусирующие элементы различных типов: асферические и градиентные линзы. О качестве фокусировки можно было судить по значениям коэффициента передачи  $\sigma$  и частотной полосы  $\Delta f_r$ .

5. Стыковка АОЯ с фокусаторами проводилась с помощью высокоточного аппаратно-программного комплекса, описанного в работе [4] для коллиматоров, с тем отличием, что подбор рабочего расстояния  $\alpha'$  требовал дополнительной юстировки, что усложняло стыковку. Отметим, что погрешности пространственного и углового позиционирования использованного аппаратно-программного комплекса составляли  $0.1 \mu\text{m}$  и  $3.6''$ .

Измерение параметров проводилось в режиме стационарного частотосдвигающего при изменении частоты гармонического управляющего сигнала  $f$  [4], как это имеет место при использовании АОМВ в системах лазерного охлаждения. Здесь стационарность означает выполнение неравенства  $\tau \gg 2w/V$  ( $\tau$  — время перестройки частоты в диапазоне  $\Delta f$ ).

В таблице приведены результаты исследования основных параметров АОМВФ. В столбце 3, как отмечалось выше, указана формула фокусатора в формате изготовителя [10]. В столбце 4 приведены значения центра  $f$  измеренной частотной полосы. В столбце 5 содержатся значения коэффициента передачи АОМВФ  $\sigma$ , полученные при значениях мощности управляющего сигнала  $P$  (столбец 11). Коэффициент  $\sigma$  вычислялся по формуле  $\sigma = \lg(I/I_0)$ , где  $I$  — максимально достижимое (при изменении  $P$ ) значение мощности излучения, измеренное в схеме излучатель–АОМВФ–приемник;  $I_0$  — значение, измеренное в схеме излучатель–ВОС–приемник. Излучатель — лазер LP 1550-SAD2, имеющий выходной волоконный кабель SMF-28 с оптическим разъемом FC/APC; приемник — измеритель мощности излучения PM20C; ВОС — отрезок кабеля SMF-28, оканчивающийся разъемами FC/APC. В столбце 6 отражены значения полосы АО-синхронизма (по уровню -3 dB), вычисленные по формуле [11]:  $\Delta f_{af}^{calc} = 1.77V^2 n / (lf\lambda)$ . В столбце 7 представлены значения полосы согласова-

ния ПП  $\Delta f_m^{exp}$ , измеренные для коэффициента стоячей волны, равного 5.6 (при этом в АОЯ проходит мощность на уровне  $-3$  dB от подаваемой с генератора ВЧ-мощности) [11]. В столбце 8 приведены значения частотной полосы приема  $\Delta f_r^{calc}$  по уровню  $-3$  dB, вычисленные по формуле (2). Погрешность расчета определялась точностью значений параметров  $NA$ ,  $V$  и  $M$ . В столбце 9 представлены измеренные значения частотной полосы приема  $\Delta f_r^{exp}$  по уровню  $-3$  dB. В столбце 10 указаны значения оптического контраста, вычисленные по формуле  $K = 10 \lg(I_{P=0}/I)$ , где  $I_{P=0}$  — значение мощности излучения при отсутствии ВЧ-сигнала.

Из таблицы следует, что: 1) значения коэффициента передачи  $\sigma$  не превышают типичных значений для АОМВ с коллиматорами [4]; 2) измеренные и расчетные значения полосы частот совпадают в пределах соответствующих погрешностей; 3) значения  $\Delta f$  и  $\sigma$  практически не зависят от рабочего расстояния фокусатора  $\alpha'$ ; 4) не обнаружено заметного влияния конструкции фокусирующего элемента (градиентная или асферическая линза) на параметры  $\Delta f$ ,  $\sigma$ ,  $K$ .

На основе результатов настоящей работы можно сделать следующие выводы.

1. Методика стыковки АОЯ с ВОС [4] может равно эффективно использоваться как для коллиматоров, так и для фокусаторов.

2. Для всех изготовленных АОМВФ измеренные значения частотной полосы совпадают с расчетными в пределах погрешностей (данные [5] и настоящей работы). Заметим, что в [5] использованы следующие значения параметров:  $\lambda = 1064$  nm,  $NA = 0.11$ ,  $M = 19.4$ . Таким образом, в совокупном исследовании варьировались все параметры, входящие в формулу (2).

3. Независимость основных параметров АОМВФ от  $\alpha'$  и типа фокусирующего элемента позволяет создавать малогабаритные АОМВФ, а также использовать наиболее стабильные, устойчивые к внешним воздействиям и дешевые градиентные фокусаторы. Например, в случае АОМВФ № 4 габаритные размеры корпуса составляли  $44 \times 36 \times 14$  mm.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.В. Семенко, Г.С. Белотелов, Д.В. Сутырин, С.Н. Слюсарев, В.И. Юдин, А.В. Тайченачев, В.Д. Овсянников, В.Г. Пальчиков, Квантовая электроника, **51** (6), 484 (2021). [A.V. Semenko, G.S. Belotelov, D.V. Sutyryn, S.N. Slyusarev, V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, V.D. Ovsianikov, V.G. Pal'chikov, Quantum Electron., **51** (6), 484 (2021). DOI: 10.1070/QEL17585].
- [2] Д.В. Сутырин, А.Ю. Грибов, Р.И. Балаев, А.А. Горохина, В.Г. Пальчиков, А.Н. Малимон, С.Н. Слюсарев, Квантовая электроника, **52** (6), 498 (2022). [D.V. Sutyryn, A.Yu. Gribov, R.I. Balaev, A.A. Gorokhina, V.G. Pal'chikov, A.N. Malimon, S.N. Slyusarev, Quantum Electron., **52** (6), 498 (2022). DOI: 10.1070/QEL18058].
- [3] Т.О. Лукашова, О.Е. Наний, С.П. Никитин, В.Н. Трещиков, Квантовая электроника, **50** (9), 882 (2020). [T.O. Lukashova, O.E. Nanii, S.P. Nikitin, V.N. Treshchikov, Quantum Electron., **50** (9), 882 (2020). DOI: 10.1070/QEL17225].
- [4] В.М. Епихин, П.В. Карнаушкин, Квантовая электроника, **50** (10), 962 (2020). [V.M. Epikhin, P.V. Karnaushkin, Quantum Electron., **50** (10), 962 (2020). DOI: 10.1070/QEL17378].
- [5] В.М. Епихин, А.В. Рябинин, ЖТФ, **91** (6), 1023 (2021). DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59134.19983 [V.M. Epikhin, A.V. Ryabinin, Tech. Phys., **66**, 864 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221060062].
- [6] А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, Н.В. Переломова, М.П. Шаскольская, *Акустические кристаллы* (Наука, М., 1982), с. 251.
- [7] М.М. Мазур, Л.И. Мазур, В.Н. Шорин, А.А. Павлюк, Л.Л. Пальцев, Альманах современной метрологии, № 1 (37), 162 (2024).
- [8] Л.Н. Магдич, И.Я. Молчанов, *Акустооптические устройства и их применение* (Сов. радио, М., 1978), с. 26.
- [9] Ю. Айхлер, Г.И. Айхлер, *Лазеры. Исполнение, управление, применение* (Техносфера, М., 2012), с. 241.
- [10] *OZ Optics Ltd*. [Электронный ресурс]. www.ozsoptics.com
- [11] Э. Дьелесан, В. Руайе, *Упругие волны в твердых телах* (Наука, М., 1982), с. 338.