

Акустооптические модуляторы с расширенной частотной полосой для волоконно-оптических линий

© В.М. Епихин, А.В. Рябинин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
141570 Менделеево, Московская обл., Россия
e-mail: epikvm@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 21 декабря 2020 г.

Принято к публикации 23 декабря 2020 г.

Разработан и изготовлен модулятор-частотосдвигатель с одномодовыми волоконными световодами на длину волны излучения 1064 nm. Световой пучок фокусировался в центре звукового столба. Время переключения модулятора $\simeq 18$ ns. Режим работы: импульсный, непрерывный. Общие оптические потери на центральной частоте -3.2 dB. Получено выражение для частотной полосы приема модулятора. Оценки дают хорошее согласие с данными эксперимента $\simeq 40$ MHz. Показано, что использование схемы с фокусированным пучком дает возможность реализовать модулятор с минимальным временем переключения $\simeq 2-3$ ns и частотной полосой приема $\simeq 200-300$ MHz.

Ключевые слова: акустооптические модуляторы, одномодовые волоконные световоды, время переключения, частотная полоса модулятора, частотная полоса переключения, частотная полоса согласования излучателя акустической волны, частотная полоса приема, ширина частотной аппаратной функции.

DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50874.330-20

Введение

Акустооптические устройства с одномодовыми волоконными световодами активно используются в оптических системах, содержащих волоконные линии, для коммутации оптических каналов связи (дефлекторы); изменения спектрального состава (фильтры), модуляции частоты и интенсивности оптических сигналов (модуляторы-частотосдвигатели) [1–3]. Акустооптические модуляторы-частотосдвигатели с одномодовыми волоконными выводами для краткости далее будем называть волоконными (АОМВ).

В [3] сообщается о создании АОМВ с коллимированным световым пучком, малыми оптическими потерями $\sigma < 2$ dB и полосой рабочих частот $\Delta f \approx \Delta f_r \sim 10$ MHz, где Δf_r — полоса приема, обусловленная уменьшением пространственной апертуры дифрагировавшего пучка с изменением частоты f при его введении в приемный волоконно-оптический световод (ВОС). В качестве развития этих исследований представляют интерес АОМВ с расширенной частотной полосой и малым временем переключения.

Целью настоящей работы являлось создание АОМВ со световым пучком, фокусированным в центре звукового столба, и его экспериментальное исследование, а также определение механизма формирования рабочей полосы частот и оценка возможности реализации АОМВ с минимальным временем переключения $\tau_{\min} \simeq 2-3$ ns, значение которого ограничено напряжением пробоя излучателя ультразвуковой волны (УЗВ) [3].

1. Время переключения и частотная полоса АОМВ с фокусированным световым пучком

На рис. 1, а показана оптическая схема АОМВ с малым временем переключения. Микрообъектив с фокусирующей асферической линзой (далее для краткости — фокусатор) Φ_1 обеспечивает сходящийся гауссов пучок с перетяжкой в центре звукового столба акустооптической ячейки (АОС), причем ось падающего пучка O направлена под углом Брэгга θ_B к фронту УЗВ. Фокусатор Φ_2 , идентичный Φ_1 , предназначен для приема и передачи дифрагировавшего пучка в ВОС с минимальными потерями. Длина звукового столба вдоль светового пучка L не должна превышать рэлеевской длины пучка Z_R [4]: $L \leq Z_R$, тогда диаметр пучка принимается равным диаметру перетяжки $2w$. Для получения максимальной интенсивности дифрагировавшего пучка при минимальной мощности УЗВ ширина звукового столба H в ближней зоне излучателя УЗВ должна быть не меньше диаметра перетяжки $2w$: $H \geq 2w$. Быстродействие модулятора характеризуют временем переключения τ , т.е. временем возрастания мощности дифрагировавшего пучка по уровню от 0.1 до 0.9.

Практический интерес представляют АОМВ в режиме Брэгга при $a = \psi_{lgh}/\psi_{snd} \leq 1$, где ψ_{lgh} и ψ_{snd} — расходимости пучков света и звука соответственно, когда формируется единственный порядок дифракции, и максимально достижимое значение эффективности дифракции $\gtrsim 0.8$ [5]. В этом случае минимальное время переключения пропорционально времени пересечения

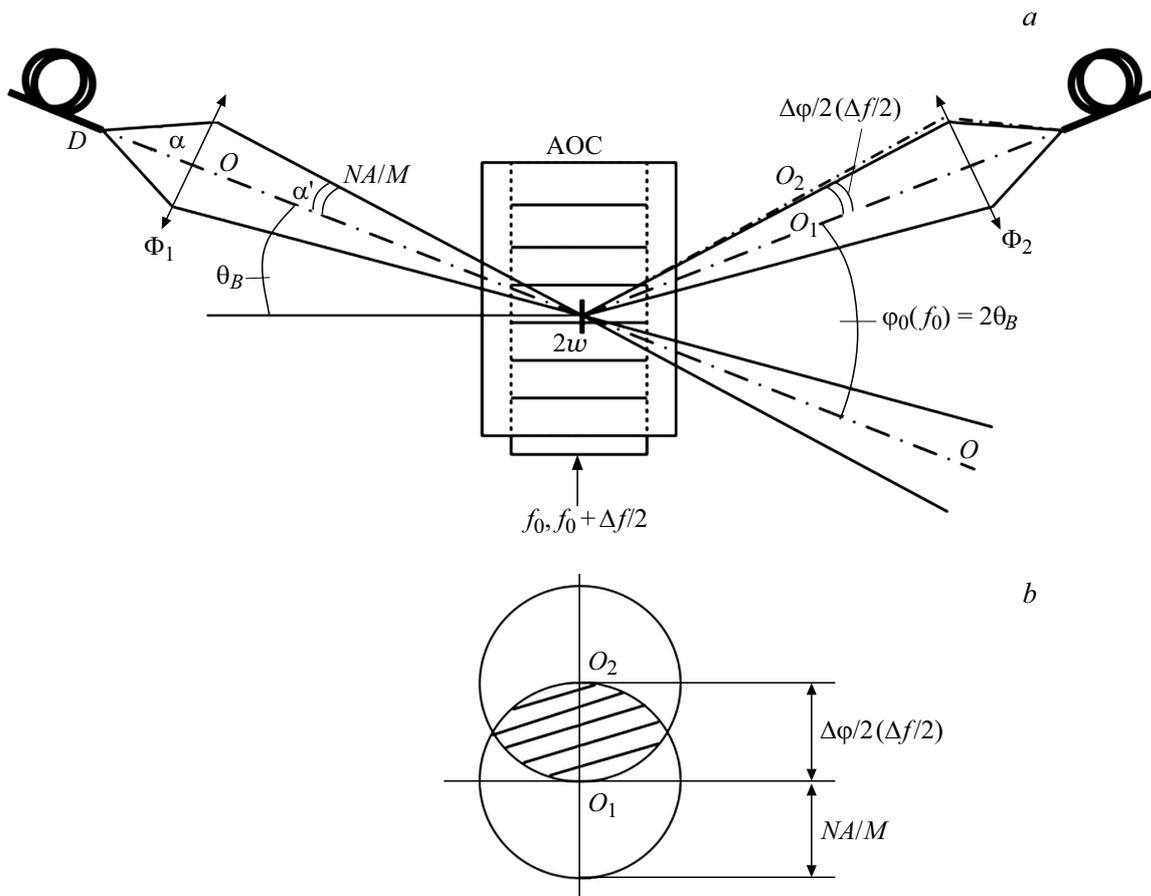


Рис. 1. *a* — оптическая схема АОМВ с фокусировкой светового пучка; *b* — расположение оптических осей O_1 и O_2 и угловых полей дифрагировавшего пучка при значениях частоты управляющего сигнала f_0 и $f_0 + NAV/(M\lambda)$.

перетяжки светового гауссова пучка волновым фронтом УЗВ [5,6]:

$$\tau_{cr} = 0.64(2w/V), \tag{1}$$

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

$$(\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r) \gtrsim \Delta f_{cr} \simeq 0.5/\tau_{cr}, \tag{2}$$

где Δf_{cr} — частотная полоса переключения по уровню -3 dB (полоса модулирующих частот [5]), а в скобках перечислены все полосовые характеристики реального АОМВ: Δf_m — частотная полоса согласования излучателя УЗВ с ВЧ-трактом (50Ω), в пределах которой мощность управляющего сигнала от ВЧ-генератора передается в излучатель УЗВ с потерями ≤ 3 dB [6,7]; 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 [7,8]; Δf_r — частотная полоса приема, в пределах которой мощность дифрагировавшего светового пучка передается в приемный ВОК с потерями ≤ 3 dB [3].

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

$$\tau \approx 0.5/\Delta f, \quad \Delta f = \min(\Delta f_m, \Delta f_{af}, \Delta f_r, \Delta f_{cr}), \tag{3}$$

где Δf — частотная полоса реального АОМВ в режиме формирователя временного фронта интенсивности дифрагировавшего света, поскольку коэффициент передачи системы равен произведению коэффициентов передачи ее составных частей, а длительность фронта импульса τ и полоса частот гармоник Δf , необходимая для его формирования, связаны соотношением $\tau \Delta f \simeq 0.5$ [8].

АОМВ может также использоваться в режиме стационарного частотосдвигателя для получения сдвига частоты дифрагировавшего света в пределах рабочей полосы $\Delta f = (f_0 + \Delta f/2) - (f_0 - \Delta f/2)$ [9]. В этом случае Δf_{cr} не является ограничивающим фактором, и справедливо соотношение

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

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

Таблица 1. Расчетные параметры АОМВ

АОМВ	Длина волны λ , nm	Апертура H , μm	Частота f_0 , MHz	a	τ , ns	Δf_{cr}^{calc} , MHz	Δf_r^{calc} , MHz	Δf_{af}^{calc} , MHz	$Q/4\pi$	T_M	P_M^a , W
Фотон-6203	1064	120	200	1	18	28	36	95	1.9	0.8	0.65

Рассмотрим более подробно важную характеристику АОМВ — частотную полосу приема Δf_r , поскольку этот параметр часто является определяющим при формировании Δf в (3). На рис. 1, *a* показана упрощенная модель АО-дифракции в АОМВ. Здесь источником дифрагировавшего излучения служит перетяжка падающего пучка диаметром $2w$ в центре АОЯ, которая является увеличенным изображением перетяжки исходного пучка на торце ВОС фокусатора Φ_1 с диаметром D , равным диаметру модового пятна [4,10]. Увеличение оптической системы $M = 2w/D$. Изображение перетяжки $2w$ симметрично переносится на торец приемного ВОС с помощью Φ_2 . Угол расходимости светового пучка (по уровню $1/e^2$) до и после линзы фокусатора равен NA и NA/M соответственно, где NA — эффективная числовая апертура ВОС [10].

При частоте управляющего сигнала f_0 угол φ_0 между нулевым (ось O) и первым (ось O_1) порядками дифракции равен

$$\varphi_0(f_0) = 2\theta_B \approx \lambda f/V, \tag{5}$$

а ось O_1 и угловое поле дифрагировавшего пучка совпадают с осью и угловым полем приемного ВОС. При перестройке частоты f от f_0 до $(f_0 + \Delta f/2)$ расположение перетяжек остается прежним, однако угловая структура поля изменяется, и ось пучка O_1 занимает положение O_2 под углом $\Delta\varphi/2$. Связь между Δf и $\Delta\varphi$ получается дифференцированием обеих частей формулы (5), и ее можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi/2 = \lambda\Delta f/(2V). \tag{6}$$

При угле $\Delta\varphi/2 = NA/M$ угловые поля дифрагировавших пучков с осями O_1 и O_2 будут иметь вид, показанный на рис. 1, *b*. Окружности изображают границы углового распределения по уровню интенсивности $1/e^2$. Для элементарных оценок примем: 1) угловые поля ограничены указанными окружностями, а распределение интенсивности пучка в пределах окружности равномерное; 2) угловые поля дифрагировавших пучков и приемного ВОС идентичны; 3) оптическая система идеально съюстирована для $f = f_0$. Тогда доля интенсивности света, переданная в ВОС Φ_2 приблизительно равна отношению заштрихованной площади к площади круга, и она составляет 0.39 (≈ -4 dB) [3]. В результате получаем формулу для частотной полосы приема по указанному уровню:

$$\Delta f_r \approx 2NAV/(M\lambda). \tag{7}$$

Как и в случае коллимированного пучка, полоса приема пропорциональна V , поэтому целесообразно использовать изотропную дифракцию на продольной УЗВ,

где скорость V значительно выше [3]. Итак, механизм формирования полосы приема модулятора заключается в ограничении апертуры дифрагировавшего пучка при вводе его в приемный ВОС. При этом для АОМВ с коллиматорами ограничивается линейная апертура, а для АОМВ с фокусаторами — угловая апертура.

В качестве примера оценим относительное увеличение полосы k для $\lambda = 1064$ nm при переходе от коллимированного пучка к фокусированному при прочих равных условиях:

$$k = f_{foc}/f_{col} = \left(\frac{2NAV}{M\lambda}\right) / \left(\frac{DV}{F\lambda}\right) = 2NAF/(MD) = NAF/w.$$

Подставляя $NA = 0.11$ [10], $F = 4$ mm [3], $w = H/2 = 0.1-0.01$ mm, получаем $k \approx 4-40$. Следовательно, схема с фокусированным пучком дает радикальное расширение полосы приема.

2. Расчетные параметры и конструкция АОМВ

По аналогии с [3] в настоящей работе использовалась изотропная дифракция на продольной УЗВ, распространяющейся по оси Z в кристалле TeO_2 со скоростью $V = 4260$ m/s. Ширина звукового столба (активная апертура) $H = 120$ μm . При $H = 2w$ получаем время переключения $\tau \approx 18$ ns, что соответствует частотной полосе переключения $\Delta f_{cr} \approx 28$ MHz. Поскольку для близких значений акустических импедансов материалов АО-кристалла и пьезопреобразователя (ПП) $\Delta f_m \sim f_0$ и может достигать октавы [8], для облегчения согласования ПП с ВЧ-трактом и обеспечения неравенства $\Delta f_m > \Delta f_{cr}$ была выбрана центральная частота $f_0 = 200$ MHz. Длина ПП вдоль пучка света выбиралась из равенства $a = 1$. В табл. 1 представлены расчетные параметры АОМВ Фотон-6203.

Частотные полосовые характеристики по уровню -3 dB вычислялись по формулам: $\Delta f_r^{calc} = 1.6NAV/(M\lambda)$, где $NA=0.11$, $M = 2w/D = 120 \mu\text{m}/6.2 \mu\text{m} \approx 19.4$ [10], $\Delta f_{af}^{calc} = 1.77V^2n/(f_0L\lambda)$ [8], где $n \approx 2.3$ — показатель преломления TeO_2 , вычисленный по формулам Селмейера, экстраполированным в ИК-диапазон [11], Q — параметр Кляйна–Кука [12], T_M — максимально достижимая эффективность дифракции [5], P_M^a — мощность УЗВ, необходимая для получения T_M [6].

Таблица 2. Экспериментальные параметры АОМВ

АОМВ	Длина волны λ , nm	Общие оптические потери σ , dB	Контраст модуляции K , dB	Δf_m^{exp} , MHz	$\Delta f_{af}^{\text{exp}}$, MHz	Δf_r^{exp} , MHz	P_M^{HF} , W
Фотон-6203	1064 ± 40	-3.2	63	80	97	41	0.95

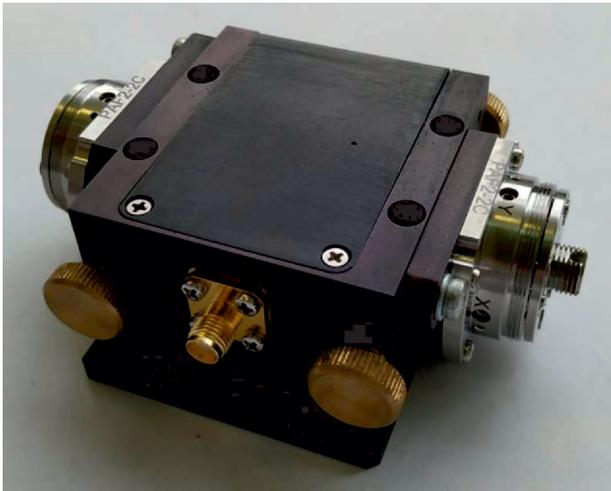


Рис. 2. Фото АОМВ Фотон-6203 с фокусировкой светового пучка.

На рис. 2 представлено фото АОМВ Фотон-6202. АОМВ состоит из корпуса размерами $95 \times 70 \times 37$ mm, внутри которого находятся АОЯ, устройство согласования импедансов ПП и ВЧ-тракта (50Ω) и асферические линзовые входной и выходной настраиваемые объективы Fiberport PAF2-2C с тремя линейными и тремя угловыми степенями свободы, имеющие оптическими разъемы FC/APC [13]. Объективы служили фокусаторами с изменяемыми расстояниями a и a' .

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты экспериментального исследования изготовленного АОМВ Фотон-6203 с фокусированным пучком.

Для длины волны излучения указан спектральный диапазон, в котором коэффициент отражения не превышает 0.2%. Определение σ и K дано в [3], их значения указаны в табл. 2 для $f_0 = 200$ MHz. Полоса согласования ПП Δf_m^{exp} измерялась по уровню КСВН ≤ 1.3 , что соответствует уровню отраженной ВЧ мощности $\leq 2\%$. Ширина частотной аппаратной функции $\Delta f_{af}^{\text{exp}}$ измерялась при установленном входном фокусаторе Φ_1 без приемного фокусатора Φ_2 . В этом случае непосредственно за АОЯ устанавливался широкоапертурный фотоприемник с угловой апертурой $\Delta\alpha \gg 2NA/M \simeq 0.7^\circ$. Приемная полоса Δf_r^{exp} измерялась при установленных

фокусаторах Φ_1 и Φ_2 . P_M^{HF} — мощность управляющего ВЧ-сигнала, при которой значение σ минимально. Источником излучения служил лазер LCS-T-12, а приемником — измеритель мощности PM20C. Для соединения источника и приемника с АОМВ использовались отрезки ВОС P3-980A-FC-1 длиной 1 m.

АОМВ Фотон-6203 был испытан как в импульсном, так и в непрерывном режимах без изменения его параметров. Это согласуется с данными [9], где для АОМ Фотон-3208 с близкими размерами ПП была экспериментально определена максимальная средняя по времени мощность УЗВ без деструкции ПП: $\langle P_M^a \rangle \simeq 1$ W.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Неравенство (2), как необходимое и достаточное условие получения расчетного времени переключения $\tau \simeq 18$ ns, в данном случае выполняется.

2. Несмотря на упрощающие допущения, сделанные при выводе формулы (7) для Δf_r , расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии. Это относится к результатам, полученным как в [3], так и в настоящей работе.

3. При использовании АОМВ в качестве стационарного частотосдвигателя его рабочая полоса определяется частотой полосы приема $\Delta f \simeq \Delta f_r \simeq 40$ MHz. На краях этой полосы общие оптические потери составляют $\sigma(f_0 \pm \Delta f/2) \simeq 3$ dB + 3.2 dB = 6.2 dB. Согласно данным табл. 2, значение полосы частот АО-взаимодействия $\Delta f_{af}^{\text{exp}}$ значительно превышает Δf_r . Следовательно, основная доля потерь на краях рабочей полосы обусловлена потерями ввода дифрагировавшего светового пучка в приемный ВОС.

4. Возможность реализации АОМВ с минимальным временем переключения

В работе [3] сделаны оценки минимальных значений времени переключения АОМВ τ_{min} , исходя из максимального значения плотности акустической мощности, ограниченной электрическим пробоем ПП. Интересно рассмотреть возможность практической реализации данных [3] с учетом результатов, полученных в настоящей работе.

В табл. 3 сведены параметры, вычисленные по формулам (1)–(5), с учетом [3] и исходя из значений пороговой плотности акустической мощности без деструкции ПП в импульсном режиме $\rho_{\text{imp}} \approx 360 \cdot 10^6$ W/m².

Таблица 3. Расчетные параметры АОМВ с минимальным временем переключения

λ , nm	L , μm	H , μm	f_0 , MHz	τ_{min} , ns	Δf_{cr} , MHz	Δf_m , MHz	Δf_r , MHz	Δf_{af} , MHz	P_a , W	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

Полоса согласования ПП полагалась равной октаве, т.е. $\Delta f_m = 2f_0/3$. Осуществить такое значение возможно вследствие близости значений акустических импедансов ПП (LiNbO_3 + 36° -среза) и светозвукопровода (TeO_2 z-среза): $34.3 \cdot 10^6 \text{ kgm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ и $25.2 \cdot 10^6 \text{ kgm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ соответственно [8]. В последнем столбце табл. 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 W.

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

В [14–17] подробно представлена информация ведущих фирм-производителей об акустооптических приборах с оптоволоконными выводами. Из анализа этих данных следует: 1) отечественные производители отсутствуют; 2) разработанный АОМВ Фотон-6203 не уступает аналогам фирм-лидеров по основным параметрам: времени переключения, частоте модуляции, мощности управляющего ВЧ-сигнала, оптическим потерям и режимам работы; 3) рассмотренные в настоящей работе АОМВ с минимальным временем переключения $\approx 2\text{--}3 \text{ ns}$ не имеют аналогов.

Разработанное устройство может использоваться для увеличения диапазона амплитудной и частотной модуляции 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 [9] для уменьшения их габаритов; в волоконно-оптических датчиках и дальномерах для увеличения пространственного разрешения [18].

Выводы

1. Рассмотрена и экспериментально исследована схема АОМВ со световым пучком, сфокусированным в центре звукового столба АОЯ. Определены условия, необходимые и достаточные для получения времени переключения, определяемого размером перетяжки светового пучка и скоростью акустической волны.

2. Получено выражение для частотной полосы приема АОМВ. Показано, что схема с фокусировкой пучка дает радикальное расширение частотной полосы приема.

3. Изготовлен АОМВ с фокусировкой пучка и временем переключения $\approx 18 \text{ ns}$ и исследованы его экспериментальные параметры. Расчетное и измеренное значения частотной полосы приема находятся в хорошем согласии.

4. Сделаны оценки параметров АОМВ с минимально возможным временем переключения, определяемым электрическим пробоем пьезопреобразователя. Показано, что схема с фокусированным световым пучком позволяет реализовать модуляторы с временем переключения, близким к минимальным значениям $\tau_{\text{min}} \approx 2\text{--}3 \text{ ns}$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев, А.И. Колесников, В.Н. Нарвер, А.З. Розенштейн, Н.П. Солодовников, К.Г. Шаповаленко. *Теория и практика современной акустооптики* (Изд. Дом МИСиС, М., 2015), с. 77.
- [2] С.Н. Антонов. ЖТФ, **89** (2), 274 (2019).
- [3] В.М. Епихин, П.В. Карнаушкин. Квант. электрон., **50** (10), 962 (2020).
- [4] Ю. Айхлер, Г.И. Айхлер. *Лазеры. Исполнение, управление, применение* (Техносфера, М., 2012), с. 240.
- [5] D. Maydan. IEEE J., **QE-6** (1), 15 (1970).
- [6] Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов. *Акустооптические устройства и их применение* (Сов. радио, М., 1978), с. 31.
- [7] В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. *Физические основы акустооптики* (Радио и связь, М., 1985), с. 45.
- [8] Э. Дьелесан, Д. Руайе. *Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов* (Наука, М., 1982), с. 338.
- [9] В.М. Епихин, В.Н. Барышев, С.Н. Слюсарев, А.В. Апрельев, И.Ю. Блинов. Квант. электрони., **49** (9), 857 (2019).
- [10] OZ Optics Ltd. [Электронный ресурс] Режим доступа: www.ozoptics.com
- [11] N. Uchida. Phys. Rev. B, **4** (10), 3736 (1971).
- [12] W.R. Klein, D.D. Cook. IEEE Trans., **SU-14** (3), 123 (1967).
- [13] Thorlabs, Inc. [Электронный ресурс] Режим доступа: www.thorlabs.com
- [14] Акустооптические модуляторы с оптоволоконком [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://sphotonics.ru/catalog/sm-aom/>
- [15] Isomet Corporation [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.isomet.com>
- [16] Brimrose Corporation of America [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.brimrose.com>
- [17] G & H [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.gandh.com>
- [18] Т.О. Лукашова, О.Е. Наний, С.П. Никитин, В.Н. Трешиков. Квант. электрон., **50** (9), 882 (2020).