

Акустооптические модуляторы для волоконно-оптических линий

В.М.Епихин, П.В.Карнаушкин

Рассмотрены особенности эффективного сопряжения акустооптических устройств с одномодовыми световодами для случаев изотропной и анизотропной дифракции. Выбрана геометрия акустооптического взаимодействия, оптимальная для решения задачи модуляции светового пучка произвольной поляризации с возможностью перестройки его частотного сдвига в области до ~ 10 МГц. Разработаны акустооптические модуляторы-частотосдвигатели на парателлурите (TeO_2), состыкованные с поддерживающими и не поддерживающими поляризацию световодами, на длинах волн 1064 и 1550 нм и исследованы их основные технические параметры.

Ключевые слова: акустооптические модуляторы-частотосдвигатели, одномодовые световоды, оптические потери, контраст модуляции, поляризационный контраст, время переключения, полоса рабочих частот.

1. Введение

Актуальность разработки акустооптических (АО) устройств, встраиваемых в волоконно-оптические линии (ВОЛ), обусловлена преимуществами закрытых оптических трактов: высокой степенью физической и информационной защиты от внешнего воздействия, надежностью и стабильностью параметров в отсутствие механических перемещений, высоким быстродействием, гибкой компоновкой оптических узлов в сложных схемах и малыми габаритами, возможностью коммутации оптических сигналов в волоконных линиях связи [1]. Модуляторы-частотосдвигатели с волоконными выводами могут использоваться при создании малогабаритных транспортируемых оптических и микроволновых стандартов частоты [2–4].

При создании волоконных АО приборов с малыми оптическими потерями требуется тщательное согласование ВОЛ, микрообъективов и акустооптической ячейки (АОЯ), а также их прецизионная установка, юстировка и фиксация. Эти операции нуждаются в специальном оборудовании и дополнительных трудозатратах, что увеличивает стоимость приборов. Кроме того, их конструкция принципиально ограничивает некоторые важные технические характеристики.

Цель настоящей работы – создание модуляторов-частотосдвигателей с одномодовыми волоконными световодами (АОМВ) и экспериментальное исследование их параметров.

В.М.Епихин. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; e-mail: epikvm@mail.ru
П.В.Карнаушкин. Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614990 Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: KarnauшкиnPV@pnppk.ru

Поступила в редакцию 2 июня 2020 г., после доработки – 21 июля 2020 г.

2. Особенности АОМВ, ограничивающие его функциональные возможности

Рассмотрим особенности АОМВ при использовании в качестве материала 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.

На рис.1 показана схема АОМВ, где прямыми линиями обозначены оптические оси световых пучков. Поскольку к обеим сторонам АОМВ пристыкованы идентичные волоконно-оптические кабели (ВОК), оптические потери при вводе дифрагировавшего пучка в ВОК будут минимальными в двух случаях: 1) используется коллимированный световой пучок (рэлеевская длина гауссова пучка много больше расстояния между коллиматорами К1 и К2 [6]), коллиматоры применяются в стационарных частотосдвигателях, требования к быстродействию АОМВ не предъявляются; 2) сходящийся световой пучок фокусируется в центре звукового столба (длина которого порядка рэлеевской длины пучка), вместо коллиматоров установлены фокусаторы, возможна быстрая модуляция интенсивности пучка.

В первом случае требования к юстировке элементов АОМВ более мягкие, поскольку оптические потери не критичны к расстоянию от коллиматоров до АОЯ, и поэтому в разработанных нами модуляторах использовалась схема с коллимированными пучками.

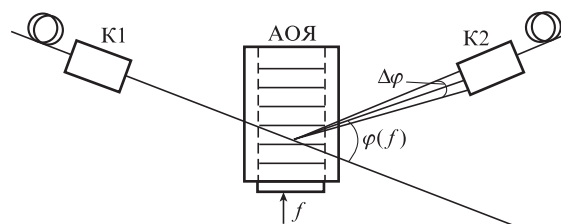


Рис.1. Оптическая схема АОМВ.

Ограничение ширины полосы рабочих частот АОМВ. Специфическая особенность разработанных АОМВ – наличие приемного микрообъектива с узким угловым полем, за пределами которого потери дифрагировавшего светового пучка при вводе в ВОК резко растут. Нетрудно показать [7, 8], что для любого типа дифракции справедливо выражение

$$\Delta\varphi \approx \frac{\lambda\Delta f}{V}, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – изменение угла между волновыми векторами нулевого и 1-го порядков дифракции в воздухе с изменением частоты Δf ; λ – длина волны излучения в вакууме; V – фазовая скорость ультразвуковой волны (УЗВ). Угловое поле коллиматора К2 $\beta = D/A$ (D – диаметр сердцевины волокна, A – расстояние от центра линзы коллиматора до торца волокна). Для коллимированного пучка A приблизительно равно F – фокусному расстоянию коллиматора. Поскольку $\Delta\varphi = \beta$, обусловленная угловым дрейфом дифрагировавшего пучка частотная полоса приема АОМВ

$$\Delta f_r \approx \frac{DV}{\lambda F}. \quad (2)$$

В крайних точках этой полосы центры окружностей, изображающих торец сердцевины ВОК диаметром D и перетяжку пучка диаметром $2w \approx D$, разнесены на расстояние w . Легко видеть, что при этом относительное перекрытие площадей соответствующих кругов составляет $0.39 \approx -4$ дБ. Из (2) следует, что полоса частот Δf_r для изотропной дифракции на продольной УЗВ в TeO_2 существенно шире, чем при анизотропной дифракции на поперечной УЗВ, поскольку отношение их продольной (V_{lg}) и поперечной (V_s) скоростей варьируется от 5 до 7 [5].

В [4] показано, что для решения задач, требующих максимальной ширины рабочей полосы, при использовании коллимированных пучков в TeO_2 оптимальным является вариант применения продольной волны с волновым вектором вдоль оси Z кристалла. В этом случае $V_{lg} = 4260$ м/с, что близко к максимальной скорости продольной волны в TeO_2 (4600 м/с). Эта геометрия АО взаимодействия уникальна тем, что при эффективности дифракции, близкой к единице, ее величина практически не зависит от состояния поляризации излучения. Кроме того, дифрагировавшие пучки со взаимно ортогональной поляризацией распространяются на выходе АОЯ параллельно друг другу и, следовательно, имеют одинаковые оптические потери при вводе в ВОК.

Особенности анизотропной дифракции в TeO_2 с использованием поперечной рабочей УЗВ (применительно к АОМВ) заключаются в существенном (почти на порядок) сужении полосы приема Δf_r , радикальном (более чем на порядок) увеличении коэффициента акустооптического качества M_2 , а также в необходимости работы только с плоскополяризованным излучением.

С учетом этих особенностей в разработанных АОМВ была использована изотропная дифракция на продольной УЗВ с волновым вектором, параллельным оси Z кристалла TeO_2 .

К частотным полосовым характеристикам реального АО устройства относятся также полоса согласования пьезопреобразователя (ПП) Δf_m [7] и ширина частотной аппаратной функции АОЯ Δf_{af} [9, 10]. Согласно оценкам и экспериментальным данным, для выбранной геометрии

АОЯ при $f > 50$ МГц [4] $\Delta f_r \ll \Delta f_m \approx \Delta f_{af}$, причем последние два параметра составляют десятки МГц. Таким образом, полоса рабочих частот разработанных АОМВ Δf определяется описанным геометрическим фактором: $\Delta f = \Delta f_r$.

Значительно увеличить полосу Δf_r можно с использованием более сложного двухкристального АОМВ, состоящего из двух идентичных АОЯ, повернутых на 180° [11]. В этом случае углочастотный дрейф коллимированного светового пучка после первой АОЯ компенсируется во второй АОЯ. В итоге угловое смещение $\Delta\varphi$ преобразуется в параллельное смещение оптической оси выходного пучка Δl перед выходным коллиматором.

Увеличить полосу Δf_r можно также, используя схему АОМВ со сходящимися пучками, при этом световой пучок фокусируется в центре звукового столба и изображение перетяжки пучка формируется на торце сердцевины волокна выходного световода. Простые оценки в этом случае затруднены, поэтому требуются экспериментальные исследования.

Ограничение быстродействия АОМВ. Согласно [12], эффективность дифракции гауссова светового пучка на УЗВ, излучаемой однородным ограниченным в пространстве преобразователем, зависит от коэффициента a – отношения расходимостей пучков света ψ_{lgt} (по уровню $1/e^2$) и звука ψ_{snd} (по уровню примерно -4 дБ) в плоскости дифракции:

$$a = \frac{\psi_{lgt}}{\psi_{snd}}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) $\psi_{lgt} = 4\lambda/(\pi n 2w)$ и $\psi_{snd} = V/(Lf)$, где n – показатель преломления TeO_2 , L – длина ПП (вдоль направления распространения света), и полагая $2w = H/k$, где H – ширина ПП, $k > 1$ – коэффициент «запаса» для облегчения юстировки, получаем

$$a = \frac{4k\lambda f L}{\pi n V H}. \quad (4)$$

Далее для оценки используем формулу для плотности акустической мощности ρ , необходимой для достижения максимума эффективности дифракции плоской волны $T = 1$ [7]:

$$\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{\rho L^2 M_2}{2} \right)^{1/2} = \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Тогда получаем

$$a = \frac{4k f \lambda^2}{\pi n H V (2\rho M_2)^{1/2}}. \quad (6)$$

Используем также формулу для времени нарастания светового импульса продифрагировавшего света по уровню интенсивности 0.1–0.9 (время переключения) [7]:

$$\tau = 0.64 \frac{2w}{V} = 0.64 \frac{H}{kV}. \quad (7)$$

С учетом (6)

$$\tau = \frac{0.58 f \lambda^2}{a n V^2 (\rho M_2)^{1/2}}. \quad (8)$$

Как и следовало ожидать, величина k не влияет на τ , при этом мощность, необходимая для получения плотности акустической мощности ρ , пропорциональна k . Формулы (7), (8) корректны при условии $f \gg 1/\tau$, которое позволяет обеспечить необходимую крутизну фронта акустического импульса. Для оценки τ_{\min} примем $f \approx 1/\tau_{\min}$. Окончательно получим

$$\tau_{\min} \approx \frac{0.76\lambda}{V(an)^{1/2}(\rho_p M_1)^{1/4}}, \tag{9}$$

где ρ_p – максимальная (пороговая) плотность акустической мощности. В импульсном режиме при неизменной средней по времени пороговой плотности $\langle \rho_{\text{imp}} \rangle = \rho_p$ пиковая импульсная плотность ρ_{imp} увеличивается в m раз: $\rho_{\text{imp}} = m\rho_p$, где m – скважность импульсной последовательности. При этом время усреднения должно быть меньше времени установления стационарного теплового режима АОМ, которое, по оценкам, в данном случае составляет сотни микросекунд. Важно, что именно средняя величина плотности определяет перегрев ПП и его термическое разрушение.

Максимальное значение импульсной плотности ρ_{imp} ограничивается электрическим пробоем ПП. При этом справедливо соотношение

$$\rho_{\text{imp}} = \frac{U_{\text{br}}^2}{RLH}, \tag{10}$$

где U_{br} – напряжение электрического пробоя; R – активное сопротивление ПП.

В работе [4] получено экспериментальное значение пороговой плотности акустической мощности без деструкции ПП для непрерывного режима ВЧ сигнала: $\rho_p \approx 2 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $L = 2.5 \text{ мм}$, $H = 0.2 \text{ мм}$, $R \approx 5 \text{ Ом}$. Использовался ПП в виде полированной с двух сторон пластинки ниобата лития (LiNbO_3) $Y + 36^\circ$ -среза, присоединенной к кристаллу TeO_2 . Из опыта работы с подобными ПП известно, что напряжение пробоя для них составляет десятка вольт. Примем для определенности $U_{\text{br}} \approx 30 \text{ В}$. Подставив эти параметры в формулу (10), получим $\rho_{\text{imp}} \approx 360 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$. Отметим, что такая плотность достигается при вполне реалистичных условиях: средняя акустическая мощность $\langle P \rangle = 1 \text{ Вт}$, $m = 180$.

Для оценки τ_{\min} примем следующие значения параметров: $a = 1$ (максимальная эффективность дифракции $T_{\max} \approx 0.8$ [12]), $M_2 \approx 30 \times 10^5 \text{ с}^3/\text{кг}$ [5], $n \approx 2.2$ [5], $\rho_{\text{imp}} \approx 360 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$. Подставив эти значения в (9), получим нижнюю оценку времени переключения АОМ: $\tau_{\min}(1064 \text{ нм}) \approx 2 \text{ нс}$, $\tau_{\min}(1550 \text{ нм}) \approx 3 \text{ нс}$. Как видно из (5) и (8), меньшие значения τ_{\min} при неизменной плотности ρ_p можно получить только ценой уменьшения T_{\max} , что ограничивает область практических применений.

Полученные минимальные значения времени переключения достижимы при условии, что все остальные частотные полосовые характеристики АОМВ ($\Delta f_m, \Delta f_{\text{af}}$,

Δf_r) не ограничены величиной $\sim 0.5/\tau_{\min}$ [13]. В противном случае фактическое время переключения τ_{real} можно оценить по следующей формуле: $\tau_{\text{real}} \approx 0.5/\Delta f_{\min}$, где Δf_{\min} – наименьшая из перечисленных полосовых характеристик.

3. Конструкция АОМВ

Параметры АОМВ. В обоих изготовленных вариантах АОМВ использовалась изотропная дифракция на продольной УЗВ, распространяющейся по оси Z . Расчетные параметры вариантов сведены в табл.1. Здесь P_{\max} – мощность ВЧ сигнала, необходимая для достижения максимальной эффективности дифракции T_{\max} , Q – параметр Клейна–Кука, определяющий режим дифракции [14]. Представлены также расчетные значения полосы приема Δf_r^{calc} (по уровню -4 дБ) для коллиматоров с $F = 4.2 \text{ мм}$. Отметим, что Δf_r можно увеличить вдвое, если использовать серийно выпускаемые коллиматоры с минимальным фокусным расстоянием 2 мм [15].

АОМВ состоит из корпуса с размерами $122 \times 33 \times 13.5 \text{ мм}$, внутри которого находятся АОЯ, устройство согласования импедансов ПП и ВЧ тракта (50 Ом) и асферические линзовые коллиматоры с волоконно-оптическими кабелями, оканчивающиеся оптическими разъемами FC/APC. На корпусе установлен ВЧ разъем типа SMA для подачи управляющего сигнала.

На АОМВ Фотон-6200 были установлены коллиматоры с диаметром линзы 2.5 мм и одномодовым волокном, не поддерживающим состояние поляризации, а на Фотон-6201 – коллиматоры с диаметром линзы 8 мм и поддерживающим поляризацию волокном типа «Панда» для измерения максимально достижимого поляризационного контраста.

Оптическая стыковка узлов АОМВ. Стыковка коллиматоров с АОЯ проводилась с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК), включающего в себя виброизолирующее основание, позиционный позиционер с шестью степенями свободы, вспомогательный позиционер, источники оптического излучения с длинами волн $635, 1081$ и 1539.0 нм , измеритель оптической мощности, генератор и персональный компьютер. Схема АПК показана на рис.2.

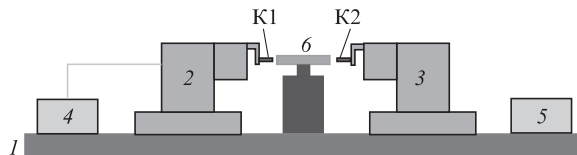


Рис.2. Схема АПК для стыковки АОМВ: 1 – виброизолирующее основание; 2 – прецизионный позиционер с шестью степенями свободы; 3 – вспомогательный позиционер; 4 – источник оптического излучения; 5 – измеритель оптической мощности; 6 – АОМВ.

Табл.1. Расчетные параметры АОМВ.

АОМВ	Длина волны λ (нм)	Поляризация	Апертура H (мм)	Центральная частота f (МГц)	φ (град)	a	$Q/4\pi$	T_{\max}	P_{\max} (Вт)	Δf_r^{calc} (МГц)
Фотон-6200	1064	произвольная	1.2	70	1.02	0.36	2.2	0.93	1.4	5.7
Фотон-6201	1550	плоская	1.1	75	1.59	0.53	3.2	0.90	2.7	5.6

Характеристики прецизионного позиционера: шаг по осям X, Y, Z – 0.1 мкм, шаг по угловым осям $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ – 3.6°.

Оптическая стыковка состояла из следующих стадий: подготовка, предварительная юстировка, финальная юстировка, фиксация соединения. На стадии подготовки жестко связанная с корпусом АОЯ фиксировалась на столике, а коллиматоры К1 и К2 закреплялись в пневматических держателях, жестко связанных с позиционерами. АОМВ подключался к генератору, а коллиматоры К1 и К2 – к источнику оптического излучения и к измерителю оптической мощности соответственно. В ходе предварительной юстировки К1 и К2 юстировались относительно АОЯ на максимум интенсивности прошедшего пучка, при этом на АОМВ подавался ВЧ сигнал. Сначала происходила юстировка на длине волны 635 нм, а затем на рабочих длинах волн АОМВ. Во время финальной юстировки происходил поиск дифрагировавшего пучка, прошедшего через оптическую систему. Далее осуществлялась поправка положений коллиматоров К1 и К2 вдоль линейных и угловых осей для получения максимальной интенсивности дифрагировавшего пучка. На стадии фиксации соединения коллиматоры К1 и К2 склеивались с проставками, предварительно смонтированными в корпусе. Использовался эпоксидный клей с малой усадкой, его полимеризация осуществлялась излучением УФ диода с фокусирующей линзой на длине волны 365 нм. Затем коллиматоры К1 и К2 освобождались из держателей.

Для оценки качества оптической стыковки коллиматоров проводилась предварительная юстировка (без фиксации узлов) и осуществлялось измерение пассивных оптических потерь при выключенном ВЧ сигнале в конфигурациях К1 → АОЯ → К2, а также К1 → воздушный зазор → К2, причем воздушный промежуток был той же толщины, что и АОЯ. Измеренные потери, включая потери на двух оптических розетках, в варианте с воздушным зазором и при наличии АОЯ для Фотона-6200 составили 2.3 и 3.5 дБ, для Фотона-6201 – 1.0 и 1.4 дБ.

4. Экспериментальное исследование АОМВ

Экспериментальные параметры разработанных и изготовленных АОМВ приведены в табл.2. Для длины волны излучения указан спектральный диапазон, в котором коэффициент отражения просветляющего покрытия менее 0.2%.

В качестве источников излучения использовались лазер LCS-T-12 (1064 нм) и лазер LP1550-SAD2 (1550 нм), а в качестве приемника лазерного излучения – измеритель мощности PM20C с входным оптическим разъемом FC/PC(APC). Источником ВЧ сигнала служил генератор Г4-107 с усилителем мощности ZHL-1-2WX+. Частота ВЧ сигнала контролировалась электронным частотомером ЧЗ-63. Для соединения лазерных источников с из-

мерителем мощности использовались отрезки ВОК P3-980A-FC-1 и P3-1550PM-FC-1 длиной 1 м.

Общие оптические потери вычислялись по формуле $\sigma = 10 \lg(I_{\max}^+ / I_0)$, где I_{\max}^+ – максимальное значение фотосигнала в +1-м порядке дифракции, I_0 – величина фотосигнала при соединении лазера с измерителем мощности волоконно-оптическим кабелем. Контраст модуляции K вычислялся по формуле $K = 10 \lg(I_{P=0}^+ / I_{\max}^+)$, где $I_{P=0}^+$ – значение фотосигнала в +1-м порядке дифракции в отсутствие ($P = 0$) ВЧ сигнала, поляризационный контраст – по формуле $K_{\text{pol}} = 10 \lg(I_{\perp}^+ / I_{\max}^+)$, где I_{\perp}^+ – максимальное значение фотосигнала в +1-м порядке дифракции для излучения с поляризацией, ортогональной поляризации падающего излучения. Время переключения (rise time) $\tau = 0.64(2w/V_{\text{lg}})$.

Отметим, что общие оптические потери для Фотона-6200 оказались меньше предварительно измеренных пассивных, что можно объяснить более тщательной окончательной юстировкой. Большой контраст модуляции у Фотона-6200, чем у Фотона-6201, вероятно, обусловлен меньшим внешним диаметром линзы коллиматора и более эффективной пространственной селекцией пучков нулевого и первого порядков. Измеренные значения полосы Δf_r^{exp} больше соответствующих расчетных значений Δf_r^{calc} , что можно объяснить увеличением фактического диаметра перетяжки светового пучка на торце приемного ВОК (соответственно $2w > D$) вследствие неидеальности оптической системы АОМВ.

Как следует из [16], параметры разработанных нами АОМВ и соответствующих аналогов ведущих фирм-производителей сопоставимы.

5. Выводы

1. Рассмотрены особенности и ограничения, возникающие при сопряжении АО устройств с одномодовыми световодами для случаев изотропной и анизотропной дифракций в TeO_2 . Получены формулы и сделаны оценки полосы частот и минимального времени переключения АОМВ.

2. Выбрана геометрия акустооптического взаимодействия, оптимальная для задачи модуляции интенсивности и частоты светового пучка произвольной поляризации с полосой рабочих частот ~ 10 МГц.

3. Изготовлены АОМВ Фотон-6200 и Фотон-6201, состыкованные с оптическими кабелями, поддерживающими ($\lambda = 1550$ нм) и не поддерживающими ($\lambda = 1064$ нм) состояние поляризации излучения.

4. Определены основные технические параметры АОМВ: эффективность дифракции, рабочая полоса, управляющая мощность, оптические потери, время переключения, контраст модуляции, поляризационный контраст.

5. Разработанные АОМВ не уступают по параметрам аналогам ведущих фирм-производителей АО приборов с оптическими световодами.

Табл.2. Экспериментальные параметры АОМВ.

АОМВ	Длина волны λ (нм)	Общие оптические потери σ (дБ)	Контраст модуляции K (дБ)	Поляризационный контраст K_{pol} (дБ)	Время переключения τ (нс)	Мощность ВЧ сигнала P_{\max} (Вт)	Центральная частота f (МГц)	Полоса рабочих частот Δf_r^{exp} (МГц)
Фотон-6200	1064±50	-1.9	-68	-	112	1.4	70	6.5
Фотон-6201	1550±60	-1.8	-56	-27	112	2.9	75	6.5

1. Антонов С.Н. *ЖТФ*, **89**, 274 (2019) [*J. Techn. Phys.*, **64**, 242 (2019)].
2. Бердасов О.И., Грибов А.Ю., Стрелкин С.А., Слюсарев С.Н. *Альманах современной метрологии*, **11**, 81 (2017).
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. *Альманах современной метрологии*, **11**, 95 (2017).
4. Епихин В.М., Барышев В.Н., Слюсарев С.Н., Апрелев А.В., Блинов И.Ю. *Квантовая электроника*, **49**, 857 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 857 (2019)].
5. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Шаскольская М.П. *Акустические кристаллы* (М.: Наука, 1982, с. 242).
6. Айхлер Ю., Айхлер Г.И. *Лазеры. Исполнение, управление, применение* (М.: Техносфера, 2012, с. 238).
7. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение* (М.: Сов. радио, 1978, с. 10).
8. Епихин В.М. *Оптика и спектроскопия*, **119**, 287 (2015) [*Opt. Spectrosc.*, **119**, 273 (2015)].
9. Балакший В.Н., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985, с. 119).
10. Gazalet M.G., Waxin G., Rouvaen J.M., Torguet R., Bridoux E. *Appl. Opt.*, **23**, 674 (1984).
11. Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н., Рябинин А.В. Патент РФ 2703930, 10.22.2019.
12. Maydan D. *IEEE J.*, **QE-6** (1), 15 (1970).
13. Дьелесан Э., Руайе Д. *Упругие волны в твердых телах* (М.: Наука, 1982, с. 42).
14. Klein W.R., Cook D.D. *IEEE Trans.*, **SU-14** (3), 123 (1967).
15. www.thorlabs.com.
16. www.isomet.com; www.brimrose.com; www.gandh.com.