

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.398

УВЕЛИЧЕНИЕ УГЛОВОГО ДИАПАЗОНА РАЗВЕРТКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В АНИЗОТРОПНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ДЕФЛЕКТОРЕ

Д.А. Бондаренко¹, В.Е. Карасик², В.П. Семенов¹

¹ОАО “ГРПЗ”, Рязань, Российская Федерация

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: bondar_art@mail.ru

Предложен способ увеличения углового диапазона развертки пучка в анизотропном акустооптическом дефлекторе на парателлуристе за счет увеличения угла падения дифрагированного пучка на выходную грань дефлектора. На основе векторных диаграмм изложена методика расчета геометрии акустооптического взаимодействия в кристалле парателлурита для нижней и верхней ветвей дифракции при заданном диапазоне рабочих частот управления. Получены соотношения для расчета конструкции светозвукопровода предлагаемого устройства и линеаризации углов отклонения пучка на выходе дефлектора при условии параллельности падающего и выходящего пучков. Показано, что для лазерного пучка с длиной волны излучения 1,064 мкм максимальный угловой диапазон развертки пучка на выходе дефлектора достигает 5,7° при выполнении условия параллельности падающего и выходящего пучков и 7,5° при отступлении от данного условия, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

Keywords: анизотропный акустооптический дефлектор, парателлурит, геометрия акустооптического взаимодействия, светозвукопровод, угловой диапазон развертки пучка.

INCREASING THE ANGULAR SWEEP RANGE OF LASER BEAM IN THE ANISOTROPIC ACOUSTO-OPTIC DEFLECTOR

Bondarenko D.A.¹, Karasik V.E.², Semenov V.P.¹

¹Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSIE), Ryazan,
Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: bondar_art@mail.ru

Method of increasing the angular sweep range of beam in the anisotropic acousto-optic deflector in paratellurite by increasing the incidence angle of the diffracted beam on the output side of the deflector is proposed. On the basis of vector diagrams the calculation methods of the acousto-optic interaction geometry in an paratellurite crystal for the lower and upper branches of diffraction under specified range of operating frequency of control is presented. The ratio for calculation of light-acoustic line design of the proposed unit and linearization of the beam deflection angles at the deflector output under condition of incident and emerging beams parallelism are obtained. It is shown that for the laser beam with a radiation wavelength 1,064 μm maximum angular sweep range of beam reaches 5.7° at the deflector output under

condition of incident and emerging beams parallelism and 7.5° in case of deviation from this condition, which is confirmed by experimental studies.

Keywords: anisotropic acousto-optic deflector, paratellurite, acousto-optic interaction geometry, light-acoustic line, angular sweep range of beam.

Среди устройств, предназначенных для развертки лазерных пучков в оптико-электронных системах различного назначения, акустооптические дефлекторы (АОД) выделяются рядом преимуществ: высоким быстродействием угловой развертки лазерного пучка [1], гибким программным алгоритмом управления, отсутствием механических узлов, низкой потребляемой мощностью, малыми габаритными размерами и массой. Ряд достигнутых характеристик АОД и их сочетание часто невозможно получить при использовании развертывающих устройств другого типа. Наилучшие характеристики АОД получены при использовании анизотропной дифракции Брэгга [2–4], при которой синхронизм акустооптического взаимодействия существенно шире, чем в случае изотропной дифракции. В видимой и ближней ИК-областях оптического спектра наибольшее применение нашли анизотропные АОД на парателлуристе (TeO_2) — акустооптическом материале, обладающим целым рядом уникальных характеристик [5, 6].

Одним из наиболее серьезных недостатков АОД остается относительно небольшие значения максимальных углов развертки сканирующего пучка (как правило, до 3° для длины волны 1,064 мкм). Использование дополнительной афокальной системы для увеличения угла развертки связано с увеличением расходимости пучка, что не всегда допустимо. Настоящая работа посвящена исследованию возможности создания анизотропного АОД с увеличенным угловым диапазоном развертки, что отчасти компенсирует указанный недостаток.

Рассмотрим основные этапы расчета анизотропного АОД.

При расчете акустооптических устройств используются векторные диаграммы, которые выражают закон сохранения импульса при акустооптическом взаимодействии [1] следующим образом:

$$\vec{k}_i \pm \vec{K} = \vec{k}_d, \quad (1)$$

где $|\vec{k}_i| = 2\pi n_i/\lambda_0$ и $|\vec{k}_d| = 2\pi n_d/\lambda_0$ — волновые векторы падающего и дифрагированного света, n_i и n_d — показатели преломления для падающей и дифрагированной волн, λ_0 — длина волны света в вакууме; $|\vec{K}| = 2\pi f/v_{зв}$ — волновой вектор звука, f и $v_{зв}$ — частота и скорость акустической волны.

На рис. 1 приведена векторная диаграмма анизотропного акустооптического взаимодействия в кристалле парателлурита, где система координат определяется кристаллографическими направлениями $\langle 001 \rangle$ и $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ кристалла, θ_i , θ_d — углы падения и дифракции, α — угол среза

кристалла между волновым вектором звука \vec{K} и направлением $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. Выбор угла α на основе соотношения

$$f_d = \frac{v_{зв}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{n_e^2 - n_o^2}{1 + (n_o^2/n_e^2) \cot^2 \alpha}} \quad (2)$$

позволяет вывести частоту двухфотонного рассеяния f_d за пределы рабочей полосы АОД [8]. Из векторной диаграммы может быть получено выражение

$$\left| \vec{K} \right| = \left| \vec{k}_i \right| \cos(\theta_i + \alpha) \pm \sqrt{\left| k_d \right|^2 - \left| k_i \right|^2 \sin^2(\theta_i + \alpha)}, \quad (3)$$

численно описывающее процесс акустооптического взаимодействия и позволяющее определить, учитывая, что $n_d = n_o$, частоту звуковой волны

$$f(\theta_i) = \frac{v_{зв}}{\lambda_0} \left(n_i \cos(\theta_i + \alpha) \pm \sqrt{n_o^2 - n_i^2 \sin^2(\theta_i + \alpha)} \right). \quad (4)$$

Знак \pm в (1), (3) и (4) определяет высокочастотную (ВЧ) и низкочастотную (НЧ) ветви дифракции соответственно (рис. 1).

Из векторной диаграммы, применяя теорему косинусов, получаем выражение

$$\left| \vec{K} \right|^2 = \left| \vec{k}_i \right|^2 + \left| \vec{k}_d \right|^2 - 2 \left| \vec{k}_i \right| \left| \vec{k}_d \right| \cos(\theta_d - \theta_i), \quad (5)$$

которое преобразуем к виду

$$\left(\frac{f \lambda_0}{v_{зв}} \right)^2 = n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o \cos(\theta_d - \theta_i), \quad (6)$$

откуда можно получить зависимость для угла дифракции θ_d от частоты акустической волны:

$$\theta_d(f) = \theta_i + \arccos \left[\frac{1}{2n_i n_o} \left(n_i^2 + n_o^2 - \frac{\lambda_0^2 f^2}{v_{зв}^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) дефлектора, на основе которой оценивается эффективность дифракции η в рабочей полосе

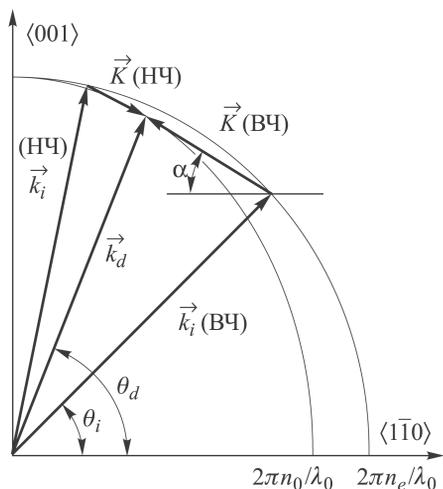


Рис. 1. Векторная диаграмма анизотропного акустооптического взаимодействия в кристалле TeO_2

частот Δf , определяется выражением [9]

$$\eta = 1,21P \frac{L}{H} \left[\frac{\sin \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{1,21P \frac{L}{H} + \left(\frac{2Lf}{v_{зв}} \right)^2 \delta^2} \right]}{\sqrt{1,21P \frac{L}{H} + \left(\frac{2Lf}{v_{зв}} \right)^2 \delta^2}} \right]^2, \quad (8)$$

где L и H — длина и высота пьезопреобразователя, P — мощность акустического сигнала, параметр δ учитывает нарушение брэгговского синхронизма в результате угловой разъюстировки АОД и используется для получения более оптимальной формы АЧХ дефлектора.

Далее рассмотрим расчет геометрии акустооптического взаимодействия в кристалле парателлуриита.

Показатели преломления для обыкновенной n_o и необыкновенной n_e волн в парателлуриите как функция длины волны излучения описываются эмпирическими зависимостями:

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 1 + \frac{2,5844\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0,01801} + \frac{1,1557\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0,06959}, \\ n_e^2 &= 1 + \frac{2,8525\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0,01801} + \frac{1,5141\lambda_0^2}{\lambda_0^2 - 0,06922}. \end{aligned} \quad (9)$$

Показатель преломления падающей волны, имеющей необыкновенную поляризацию, определяется выражением

$$n_i = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_i + n_e^2 \sin^2 \theta_i}}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлен график зависимости $f(\theta_i)$, построенный на основе (4) при $\lambda_0 = 1064$ нм и $\alpha = 6,37^\circ$. Скорость распространения звуковой волны определяется из выражения

$$v_{зв} = 617(1 + 4,895 \alpha^2). \quad (11)$$

Как следует из зависимости для $f(\theta_i)$, вблизи экстремумов ВЧ- и НЧ-ветвей дифракции, обозначенных на рис. 2 окружностями, угол падения светового пучка слабо зависит от частоты звуковой волны, т.е. $\partial \theta_i / \partial f \cong 0$, что позволяет использовать эти области взаимодействия для эффективного сканирования лазерного пучка, а также выбрать значение угла падения $\theta_i = 80, 2^\circ$.

Высокочастотная ветвь дифракции является более широкополосной и для $\lambda_0 = 1064$ нм и угла $\alpha = 6,37^\circ$ позволяет получить дефлектор, работающий на центральной частоте 80 МГц в полосе частот управления 32 МГц. При этом частота двухфононного рассеяния, исходя из (2), равна $f_d = 58,7$ МГц и находится вне рабочей полосы дефлектора (64...96 МГц). Зависимость эффективности дифракции от

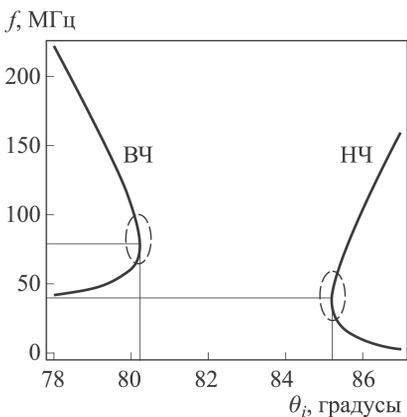


Рис. 2. Высоко- и низкочастотные ветви дифракции для $\lambda_0 = 1064$ нм

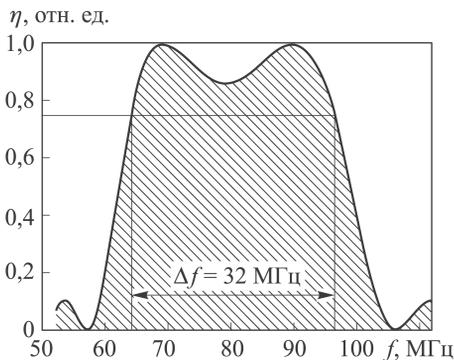


Рис. 3. Эффективность дифракции АОД в полосе рабочих частот

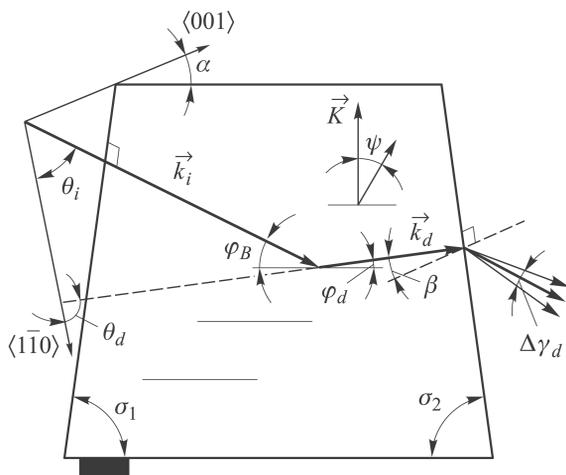


Рис. 4. Конструкция светозвукопровода АОД

частоты звуковой волны, вычисленная на основе (8) при $L = 2$ мм, $H = 9$ мм и $P = 4$ Вт, приведена на рис. 3, из зависимости следует, что эффективность дифракции в полосе рабочих составляет не менее 75%.

Использование НЧ-ветви дифракции менее предпочтительно, поскольку центральная частота для НЧ ветви составляет около 40 МГц, что не позволяет обеспечить согласование импеданса пьезопреобразователя в приемлемом диапазоне рабочих частот, и как следствие, углы отклонения на выходе дефлектора получаются существенно меньше, чем в случае использования ВЧ ветви.

Рассмотрим расчет конструкции АОД (углов σ_1 и σ_2 при основании призмы) для данной геометрии акустооптического взаимодействия на основе рис. 4, из которого следует, что

$$\sigma_1 = 90 - \varphi_B = \theta_i + \alpha, \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \theta_d + \alpha - \beta = 90 - \beta - \varphi_d, \quad (13)$$

где β — угол падения дифрагированного пучка на выходную грань.

Углы Брэгга φ_B и дифракции φ_d определяются выражениями

$$\varphi_B = 90 - \alpha - \theta_i, \quad (14)$$

$$\varphi_d = 90 - \alpha - \theta_d. \quad (15)$$

Для более удобного использования АОД в составе системы развертки, как правило, задается условие параллельности падающего на АОД и выходящего пучков, что обеспечивается выбором угла $\beta = \beta_0$, который находится из условия

$$\arcsin(n_o \sin \beta_0) = 180 - \theta_i - \theta_d - 2\alpha + \beta_0. \quad (16)$$

Как следует из (16), при $\beta_0 < 3^\circ$ полный угол развертки пучка на выходе АОД будет определяться типичной зависимостью

$$\Delta\theta_d = \lambda_0 \Delta f / v_{зв}. \quad (17)$$

В работе [10] предложен способ повышения числа разрешимых положений дефлектора, при котором угол падения пучка на входную грань призмы дефлектора выбирается равным углу Брюстера, в результате чего апертура падающего пучка в плоскости дифракции увеличивается в n_i раз. Выполнение условия параллельности падающего и выходящего пучков приводит к увеличению углов σ_2 и β , что, как показывает дальнейший анализ, вызывает увеличение углового диапазона развертки пучка на выходе АОД.

Дополнительным преимуществом такой конструкции АОД является отсутствие френелевых потерь на входной грани для пучка с p -поляризацией.

Рассмотрим подробнее конструкцию АОД с расширенным угловым диапазоном развертки (рис. 5). Поскольку геометрия акустооптического взаимодействия не изменялась, то углы Брэгга φ_B и дифракции φ_d будут по-прежнему описываться выражениями (14), (15), но углы σ_1 и σ_2 при основании призмы изменятся и будут определяться выражениями

$$\sigma_1 = \theta_{Br} - \varphi_B = \theta_{Br} - 90 + \alpha + \theta_i, \quad (18)$$

$$\sigma_2 = 90 + \beta - \varphi_d = \theta_d + \alpha + \beta, \quad (19)$$

где $\theta_{Br} = \arctg n_i = 65,6^\circ$ — угол Брюстера, а значение угла β выбирается для центральной частоты. Угол $\beta = \beta_0$, обеспечивающий выполнение условия параллельности для АОД с брюстеровской гранью, будет определяться выражением

$$\arcsin(n_o \sin \beta_0) = 2\theta_{Br} - 270 + \theta_i + \theta_d + 2\alpha + \beta_0. \quad (20)$$

Сравнение (16) и (20) показывает, что в последнем случае $\beta_0 > 23^\circ$ и

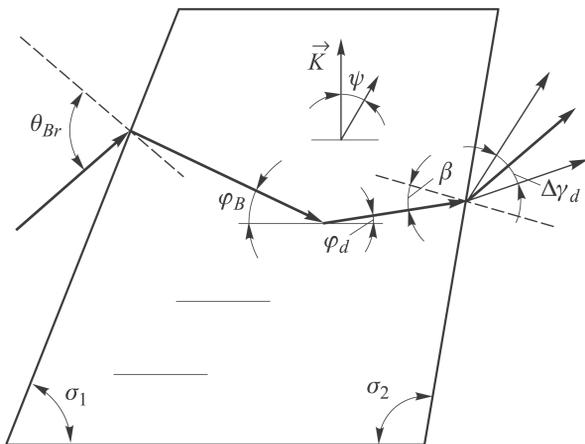


Рис. 5. Конструкция светозвукопровода АОД с расширенным угловым диапазоном развертки

можно ожидать значительного увеличения диапазона углов развертки пучка на выходе АОД (см. рис. 5).

Действительно, угол отклонения на выходе АОД как функция частоты управления будет определяться зависимостью

$$\gamma(f) = \arcsin \left[n_o \sin \left(\beta + \frac{(f - f_0) \lambda_0}{v_{зв} n_o} \right) \right], \quad (21)$$

и выражение для полного углового диапазона развертки пучка на выходе АОД может быть представлено в виде

$$\Delta\gamma_d(\beta) = \arcsin[n_o \sin(\beta + 0,5\Delta\theta_d)] - \arcsin[n_o \sin(\beta - 0,5\Delta\theta_d)], \quad (22)$$

где $\Delta\theta_d = \lambda_0 \Delta f / (n_o v_{зв})$ — полный угловой диапазон развертки пучка внутри АОД, Δf — рабочая полоса частот управления АОД.

Как следует из выражения (22) (рис. 6), при $\beta \leq 5^\circ$, как это имеет место в АОД с типичной конструкцией светозвукопровода (см. рис. 4), величина β практически не влияет на угловой диапазон развертки $\Delta\gamma_d$, но при значениях $15^\circ \geq \beta \geq 20^\circ$, это влияние может быть значительным, что позволяет существенно расширить угловой диапазон развертки пучка при использовании конструкции светозвукопровода, изображенной на рис. 5.

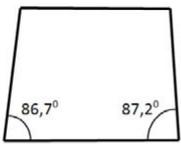
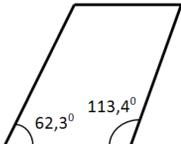
Наличие при этом некоторой нелинейности в отклонении пучка на выходе АОД вследствие нелинейного характера (22), сильно возрастающей при приближении β к углу полного внутреннего отражения, нельзя считать серьезным недостатком, поскольку зависимость для угла дифракции может быть линеаризована подстройкой управляющей частоты f , особенно при использовании цифровых синтезаторов частот, имеющих до 32 разрядов кода управления.

На основе полученных соотношений был выполнен расчет конструкции светозвукопроводов для типичного АОД (типа А) и дефлек-

тора с увеличенным угловым диапазоном развертки (типа Б), сравнительная характеристика которых представлена в таблице, из которой следует, что угловой диапазон развертки АОД типа Б почти в 2 раза больше, чем диапазон углов развертки АОД типа А.

Отметим, что входные и выходные грани дефлектора типа А должны быть просветлены на рабочую длину волны лазерного излучения, в данном случае $\lambda_0 = 1064$ нм, при нормальном падении на грани. Для дефлектора типа В входная грань просветления не требует, так как она образует угол Брюстера с падающим пучком p -поляризации. Выходная грань должна быть просветлена для s -поляризации дифрагированного пучка с углом падения β_0 для центральной частоты управления.

Сравнение параметров АОД

Параметр	Тип А	Тип Б
Конструкция АОД		
Длина волны	1064 нм	
Диапазон частот управления	64. . . 96 МГц	
n_i	2,2077	
n_o	2,204	
Угол среза α	6,37°	
Угол Брэгга φ_B	3,317°	
Угол дифракции φ_d	0,047°	
β_0	2,8°	23,5°
σ_1	86,7°	62,3°
σ_2	87,2°	113,4°
Угол развертки $\Delta\gamma_d$	2,97°	5,71°

Как следует из рис. 6, если отказаться от условия параллельности входящего и выходящего пучков, далее увеличивая σ_2 и β , то угловой диапазон развертки $\Delta\gamma_d$ может быть еще увеличен. Практическим ограничением здесь является приближение угла σ_2 к критическому значению $\sigma_2 = \sigma_{\text{ПВО}}$, соответствующему углу полного внутреннего отражения $\beta_{\text{ПВО}}$, а также сложностью получения эффективного просветляющего покрытия на выходной грани дефлектора. На рис. 7 на основе соотношений (21) и (22) построена зависимость изменения углового диапазона развертки пучка $\Delta\gamma_d$ как функция угла σ_2 при $n_o = 2,204$, $\beta_{\text{ПВО}} = 27^\circ$, $\sigma_{\text{ПВО}} \cong 117^\circ$.

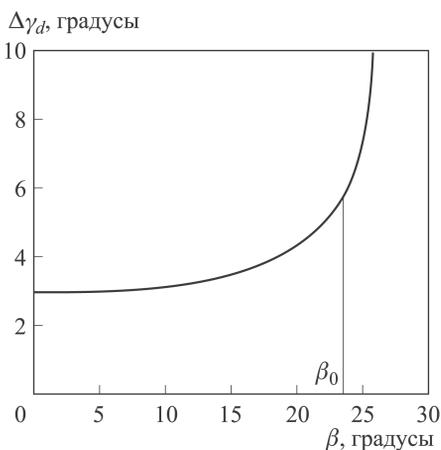


Рис. 6. Зависимость углового диапазона развертки $\Delta\gamma_d$ АОД от угла падения пучка на выходную грань дефлектора β

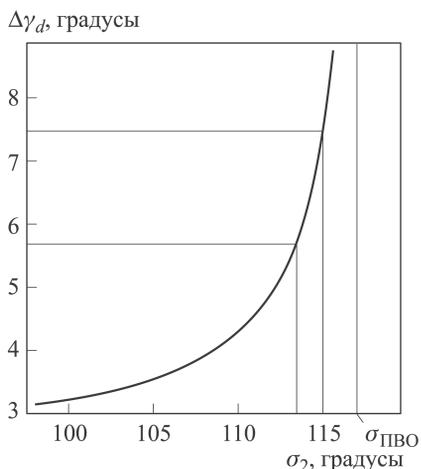


Рис. 7. Зависимость углового диапазона развертки $\Delta\gamma_d$ АОД от угла наклона выходной грани σ_2

Из полученной зависимости следует, например, что при $\sigma_2 = 115^\circ$ диапазон углов развертки пучка может быть увеличен до $\Delta\gamma_d = 7,5^\circ$.

В экспериментальной части работы исследовалась зависимость угла отклонения пучка на выходе АОД типа Б с $\sigma_2 = 113,4^\circ$ от частоты управляющего сигнала. Схема установки, использованной при экспериментальных исследованиях, приведена на рис. 8. В экспериментах применялся твердотельный лазер с диодной накачкой мощностью 1 Вт с апертурой пучка 3 мм и расходимостью 2 мрад, излучение которого падало на входную грань АОД под углом Брюстера. Высокочастотный управляющий сигнал вырабатывался цифровым синтезатором частоты, формирующим сигнал в диапазоне частот 64...96 МГц, с мощностью 4 Вт и встроенным ПЗУ, содержащим программное обеспечение, обеспечивающее последовательную смену частот управления с определенным шагом.

На выходе АОД устанавливалась линза, вблизи фокальной плоскости которой размещалась измерительная ПЗС-камера, формирующая изображение, которое далее анализировалось ПЭВМ со специальным

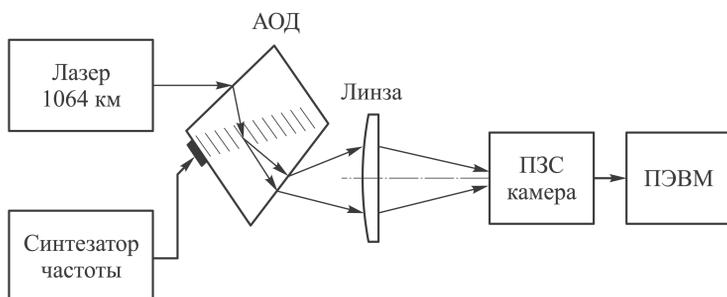


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

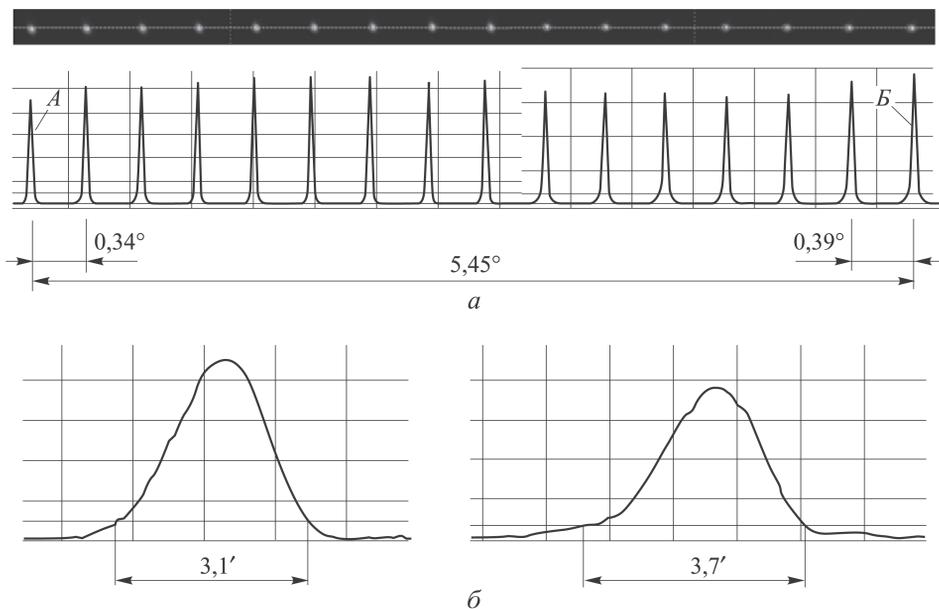


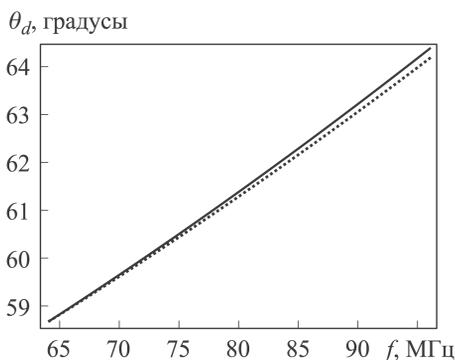
Рис. 9. Изображение с измерительной ПЗС-камеры и соответствующее распределение интенсивности дифрагированного пучка на выходе АОД (*а*) и его расходимость в распределениях А и Б (*б*)

программным обеспечением для исследования сечений интенсивности лазерных пучков.

В процессе проведения измерений синтезатор частот вырабатывал ВЧ-сигнал в рабочей полосе частот с шагом $2,13$ МГц. В результате в фокальной плоскости линзы на чувствительной площадке ПЗС-камеры формировалась строка из 16 дифрагированных максимумов (рис. 9, *а*) с соответствующими распределениями в сечениях интенсивности. В полосе рабочих частот 32 МГц был измерен диапазон углов отклонения, составивший $5,45^\circ$, что незначительно отличается от расчетного значения $5,7^\circ$. Также было показано, что угловой интервал между дифракционными максимумами при постоянном частотном шаге ($2,13$ МГц) увеличивается по мере увеличения угла падения пучка на выходную грань АОД от $0,34^\circ$ до $0,39^\circ$. На рис. 9, *б* приведены сечения интенсивности для распределений А и Б, где также наблюдается соответствующее увеличение расходимости пучка в дифракционных максимумах на краях рабочего диапазона частот от $3,1$ угл. мин до $3,7$ угл. мин.

На рис. 10 показана экспериментальная зависимость угла отклонения пучка на выходе АОД от частоты сигнала и соответствующая теоретическая зависимость (сплошная линия), построенная на основе (21). Отклонения экспериментальных и расчетных данных не превосходят 4% и вызваны неточностью установки ПЗС-камеры в фокальной плоскости линзы.

Рис. 10. Зависимость угла отклонения пучка на выходе АОД от частоты сигнала (сплошная линия — расчет, точки — эксперимент)



В сканирующих системах, как правило, требуется осуществлять линейное во времени угловое смещение пучка на выходе АОД. При нелинейной зависимости угла отклонения от частоты управления АОД необходимо в каждый момент времени вычислять новое значение шага частоты, обеспечивающее линейный угловой шаг на выходе АОД. Для расчета текущей частоты продифференцируем (21):

$$\frac{d}{df} \gamma_d(f) = \frac{\lambda_0}{v_{зв}} \frac{\cos \left(\beta + \frac{(f - f_0) \lambda_0}{v_{зв} n_o} \right)}{\sqrt{1 - n_o^2 \sin^2 \left(\beta + \frac{(f - f_0) \lambda_0}{v_{зв} n_o} \right)}}. \quad (23)$$

Если за скорость изменения угла на выходе АОД принять значение производной (23) на центральной частоте управления f_0 , то угловая расстройка, которую нужно скомпенсировать для линеаризации угла сканирования, составит

$$\Delta \gamma(f) = (f - f_0) \frac{d}{df} [\gamma_d(f - f_0)], \quad (24)$$

откуда можно получить выражение для расчета частотной поправки, обеспечивающей линеаризацию, в виде

$$\Delta f_c(\Delta \gamma) = (f - f_0) - \frac{v_{зв} n_o}{\lambda_0} \left\{ \arcsin \left[\frac{1}{n_o} \sin(\gamma_d + \Delta \gamma) \right] - \beta \right\}. \quad (25)$$

Для АОД с расширенным диапазоном развертки углов зависимость производной (23) от частоты управления f приведена на рис. 11, а (сплошная кривая), где также штриховой прямой показана требуемая линеаризованная производная, а на рис. 11, б приведена частотная поправка Δf_c , обеспечивающая линеаризацию.

На рис. 12 показан внешний вид конструкции АОД с $\sigma_2 = 115^\circ$ и брюстеровой входной гранью, световой апертурой 9 мм и углом развертки $7,5^\circ$.

В работе предложен способ увеличения диапазона углов развертки пучка в анизотропном АОД на парателлурите за счет увеличения угла

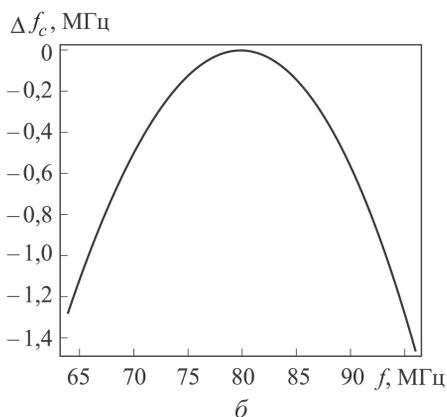
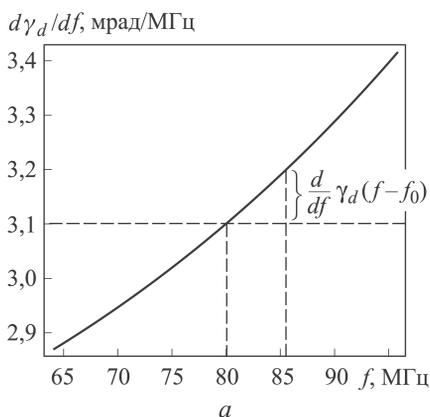


Рис. 11. Производная угла отклонения (а) и частотная поправка Δf_c (б) – функции частоты управления АОД



Рис. 12. Внешний вид АОД с увеличенным угловым диапазоном развертки пучка

падения дифрагированного пучка на выходную грань дефлектора до $5,45^\circ$ в сравнение с типичной конструкцией светозвукопровода АОД, в которой это значение не превышает 3° . Получено выражение для расчета шага частоты, линеаризующего зависимость угла отклонения пучка на выходе АОД от частоты управляющего сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Д.А., Карасик В.Е., Семенов В.П. Исследование режима дифракции лазерного пучка на линейно частотно-модулированной акустической волне в анизотропном акустооптическом дефлекторе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. вып. “Современные проблемы оптотехники”. 2011.
2. Dixon R.W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media // IEEE Journ. Quant. Electr., 1967. Vol. QE-3. No. 2. P. 85–93.
3. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.
4. Корнел А. Акустооптика / пер. с англ. М.: Мир, 1993. 240 с.
5. Семенов В.П. Анизотропный акустооптический дефлектор на одноосных кристаллах с оптической активностью // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 10. С. 2090–2095.
6. Warner A.W., White D.L., Bonner W.A. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite // Appl. Phys. Letters. 1972. Vol. 43. No. 11.
7. Балакишиев В.И. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.

8. Yano T. TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without midband degeneracy // *Appl. Phys. Letters*. 1975. Vol. 26. No. 12. P. 689–691.
9. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. К теории акустооптического взаимодействия в сильном поле // *Оптика и спектроскопия*. 1980. Т. 48. Вып. 1. С. 159.
10. Патент 2462739 РФ, МПК G02F 1/33. Акустооптический анизотропный дефлектор / Семенов В.П., Магдич Л.Н., Бондаренко Д.А. Оpubл. 27.09.2012.

REFERENCES

- [1] Bondarenko D.A., Karasik V.E., Semenov V.P. Research regime of the laser beam diffraction using a linearly frequency-modulated acoustic waves in an anisotropic acousto-optic deflector. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr., Spetsvyp.* “*Sovremennye problemy optotekhniki*” [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., Spec. Issue “Modern optical engineering problems”], 2011 (in Russ.).
- [2] Dixon R.W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media. *IEEE Journ. Quant. Electr.*, 1967, vol. QE-3, no. 2, pp. 85–93.
- [3] Magdich L.N., Molchanov V.Ya. Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye [Acousto-optic devices and their application]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1978. 112 p.
- [4] Korpel A. Acousto-optics. N.Y. and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1988. 265 p. (Russ. ed.: Korpel A. Akustooptika, per. s angl. Moscow, Mir Publ., 1993. 240 p.)
- [5] Semenov V.P. The anisotropic acousto-optic deflector for uniaxial crystals with optical activity. *Zh. Tekh. Fiz.* [Tech. Phys. The Russ. J. Appl. Phys.], 1981, vol. 51, no. 10, pp. 2090–2095 (in Russ.).
- [6] Warner A.W., White D.L., Bonner W.A. Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite. *Appl. Phys. Letters*, 1972, vol. 43, no. 11.
- [7] Balakshiy V.I. Fizicheskie osnovy akustooptiki. [Physical basis of optoacoustics]. Moscow, Radio i Svyaz’ Publ., 1985. 280 p.
- [8] Yano T. TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without midband degeneracy. *Appl. Phys. Letters*, 1975, vol. 26, no. 12, pp. 689–691.
- [9] Magdich L.N., Molchanov V.Ya. About the theory of acousto-optical interaction in a strong field. *Opt. Spektrosk.* [Optics and Spectroscopy], 1980, vol. 48, no. 1, pp. 159–159.
- [10] Semenov V.P., Magdich L.N., Bondarenko D.A. Akustoopticheskiy anizotropnyy deflektor [Acousto-optic anisotropic deflector]. Patent RF, no. 2462739, 2012.

Статья поступила в редакцию 24.02.2014

Бондаренко Дмитрий Анатольевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории ОАО “Государственный Рязанский приборный завод” (ОАО “ГРПЗ”). Автор более 20 научных работ и патентов в области лазерных оптико-электронных приборов и систем управления.

ОАО “ГРПЗ”, Российская Федерация, 390000, г. Рязань, Семинарская ул., д. 32.

Bondarenko D.A. — Cand. Sci. (Eng.), head of laboratory of the Federal State Unitary Enterprise “Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSTE)”. Author of more than 20 publications and patents in the field of laser optical-electronic devices and control systems. Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSTE), Seminarskaya ul. 32, Ryazan, 390000 Russian Federation.

Карасик Валерий Ефимович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы”, директор НОЦ “Фотоника и ИК-техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 190 научных работ в области лазерных систем видения, терагерцовых изображающих систем.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Karasik V.E. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Laser and Optoelectronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Head of Research and Educational Centre “Photonics and IR-Technology” at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 190 publications in the field of laser vision systems, terahertz displaying systems.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Семенков Виктор Прович — канд. техн. наук, главный конструктор ОАО “Государственный Рязанский приборный завод” (ОАО “ГРПЗ”). Автор более 100 научных работ и патентов в области лазерных систем управления и акустооптики.

ОАО “ГРПЗ”, Российская Федерация, 390000, Рязань, Семинарская ул., д. 32.

Semenkov V.P. — Cand. Sci. (Eng.), chief design engineer of the Federal State Unitary Enterprise “Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSTE)”. Author of more than 100 publications and patents in the field of laser systems control and acoustic-optics.

Ryazan State Instrument-making Enterprise (RSTE), Seminarskaya ul. 32, Ryazan, 390000 Russian Federation.