

Научная статья
УДК 535.3; 535.36

ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ПАРАТЕЛЛУРИТЕ (TeO_2)

Вячеслав Михайлович Епихин¹✉, Александр Вячеславович Кудрян²

^{1,2} ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия

¹epikvm@mail.ru✉, SPIN-код: 1136-0200, Scopus ID: 6701535550

²kudryan_av@vniiftri.ru

Аннотация. Измерены коэффициенты пропускания светового пучка в монокристаллах парателлурита (TeO_2) российских производителей для спектрального диапазона стандартов частоты на холодных атомах (400–1000 нм). Использовалось наклонное падение световых пучков, чтобы избежать их наложения и интерференции на фотоприёмнике. Предложена и использована методика контроля и коррекции нелинейности фотодетектора при измерениях коэффициента пропускания. По коэффициентам пропускания были рассчитаны показатели ослабления (экстинкции) света. Результаты для различных кристаллов близки и слабо зависят от поляризации света. В исследованном спектральном диапазоне коэффициент рэлеевского рассеяния либо меньше коэффициента поглощения, либо их величины сравнимы.

Ключевые слова: коэффициенты пропускания, ослабления (экстинкции), поглощения, рассеяния; интерференция пучков; нелинейность фотодетектора; рэлеевское рассеяние

Для цитирования: Епихин В.М., Кудрян А.В. Измерение светопропускания в монокристаллическом парателлурите (TeO_2) // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 176–186.

Original article

MEASUREMENT OF LIGHT TRANSMISSION IN MONOCRYSTALLINE PARATELLURITE (TeO_2)

Viacheslav M. Epikhin¹✉, Alexandr V. Kudryan²

^{1,2} FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹epikvm@mail.ru✉, SPIN-code: 1136-0200, Scopus ID: 6701535550

²kudryan_av@vniiftri.ru

Abstract. Light beam transmittances were measured in paratellurite (TeO_2) single crystals from Russian manufacturers for the spectral range of cold atom frequency standards (400–1000 nm). Oblique incidence of the light beams was used to avoid beam overlap and interference at the photodetector. A technique for monitoring and correcting photodetector nonlinearity during transmittance measurements was proposed and applied. Light attenuation (extinction) coefficients were calculated from the transmittances. The results for different crystals are similar and depend weakly on light polarization. In the studied spectral range, the Rayleigh scattering coefficient is either smaller than the absorption coefficient, or their values are comparable.

© Епихин В.М., Кудрян А.В., 2026

Альманах современной метрологии № 2 (46) 2026

Keywords: transmittance, attenuation (extinction), absorption, and scattering coefficients; beam interference; photodetector nonlinearity; Rayleigh scattering

For citation: Epikhin V.M., Kudryan A.V. Measurement of light transmission in monocrystalline paratellurite (TeO_2). *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 176–186.

Введение и постановка задачи

Акустооптические модуляторы/частотосдвигатели (АОМ) широко используются в системах лазерного охлаждения и стабилизации лазерных источников оптических и микроволновых квантовых стандартов частоты [1]–[3], поэтому улучшение конструкции и технологии изготовления АОМ — актуальная техническая задача. В частности, важны современные данные по светопропусканию акустооптических материалов в диапазоне 400–1000 нм для совершенствования стандартов частоты на холодных атомах и ионах цезия, стронция и рубидия.

В данной работе проводилось определение коэффициента ослабления мощности светового пучка в монокристаллах двуокиси теллура — парателлурита (TeO_2). Этот материал имеет уникальное сочетание оптических, акустических и акустооптических свойств [4]. В настоящее время он наиболее перспективен для создания АОМ, работающих в указанном спектральном диапазоне.

Методика измерений

Согласно закону Бугера [5], коэффициент пропускания T для светового пучка, прошедшего слой вещества постоянной толщины l , равен:

$$T = i/i_0 = e^{-\alpha l}, \quad \alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (1)$$

где i , i_0 — интенсивность света на входе и выходе соответственно; α — коэффициент ослабления (экстинкции) света; α_1 — коэффициент поглощения света веществом; α_2 — коэффициент, обусловленный рассеянием в веществе. В наших измерениях мы будем иметь дело с величинами интенсивности, для которых α не зависит от i , тогда в формуле (1) под интенсивностью можно понимать мощность светового пучка.

Пусть имеется слой диэлектрика (в данном случае TeO_2) с полированными плоскопараллельными гранями, для которого потери света на границах слоя пренебрежимо малы, то есть сумма долей мощности светового пучка, возвращённого назад в результате отражения от границ, пучка, поглощённого и рассеянного веществом, а также пучка, прошедшего через слой, равна единице. В этом случае коэффициент пропускания светового пучка есть сумма членов ряда бесконечной убывающей геометрической прогрессии с первым членом T_0 и знаменателем q , и она равна:

$$T = T_0 (1 - q)^{-1}, \quad (2)$$

где $T_0 = (1 - r)^2 e^{-\alpha l}$, $q = r^2 e^{-2\alpha l}$, $r = (n - 1)^2 / (n + 1)^2$,

$n = n_{o,e}$ — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле соответственно.

Значения n_o и n_e парателлурита вычислялись по формулам Селмеера:

$$n_o = \left[1 + 143,536 / (55,526 - 10^6 / \lambda^2) + 16,607 / (14,370 - 10^6 / \lambda^2) \right]^{1/2};$$

$$n_e = \left[1 + 156,810 / (55,526 - 10^6 / \lambda^2) + 22,256 / (14,446 - 10^6 / \lambda^2) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где λ — длина волны, нм. Отличие измеренных для ряда длин волн значений n_o и n_e [4] от вычисленных по формулам (3) не превышает 0,01 %.

Зная экспериментальное значение T , получаем выражение для коэффициента ослабления света [6], [7]:

$$\alpha = -\frac{1}{l} \cdot \ln \left\{ -(1-r)^2 + \left[(1-r)^4 + 4T^2 r^2 \right]^{1/2} / 2Tr^2 \right\}. \quad (4)$$

Оптический стенд

На рис. 1 показана схема стенда для измерения коэффициента пропускания T . Использовались следующие лазерные источники (ЛИ) с длинами волн λ_i (таблица 1).

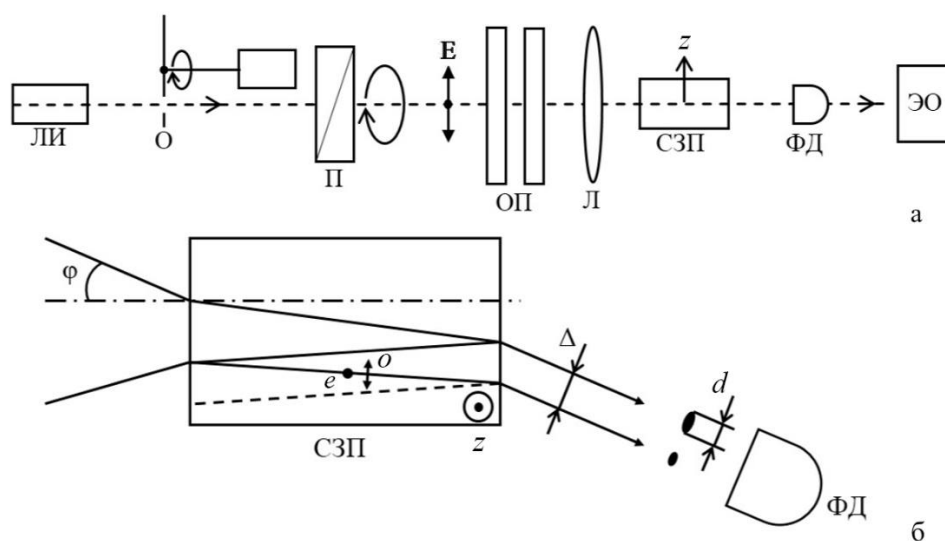


Рис. 1. Оптический стенд:

- а — схема стенда для измерения коэффициента пропускания света в образцах из монокристаллического TeO_2 (вид сбоку): ЛИ — лазерный источник; О — obtюратор пучка; П — поляризатор; $\mathbf{E}$ — вектор поляризации света; ОП — ослабитель пучка; Л — линза; СЗП — светозвукопровод из TeO_2 ; z — оптическая ось TeO_2 ; ФД — фотодетектор; ЭО — электронный осциллограф;
- б — ход световых лучей в образце (вид сверху). Стрелками показаны направления вектора поляризации света $\mathbf{E}$: e — необыкновенный луч; o — обыкновенный луч;
- $\varphi \simeq 2^\circ$; $\Delta \simeq 1$ мм; $d < \Delta$

Fig. 1. Optical stand:

a — diagram of the setup for measuring the light transmittance in single-crystal TeO_2 samples (side view); ЛИ — laser source; О — beam obturator; П — polarizer, $\mathbf{E}$ — the light polarization vector; ОП — beam attenuator; Л — lens; СЗП — light-sound guide made of TeO_2 ; z — optical axis of TeO_2 ; ФД — photodetector; ЭО — electronic oscilloscope; б — the path of light rays in the sample (top view). The arrows show the directions of the light polarization vector $\mathbf{E}$: e — extraordinary ray; o — ordinary ray; $\varphi \approx 2^\circ$; $\Delta \approx 1$ mm; $d < \Delta$

Таблица 1

Использованные лазерные источники

Номер источника i	1	2	3	4
Длина волны λ_i , нм	405	532	785	1064
Марка лазера	Q-line 405-20-1342-XL	SLM-417	LP785-SAV50	LCS-T-12

Все лазеры имели стабилизацию выходной мощности светового пучка, которая за время измерения была постоянной с точностью 0,5 %. Механический obturator (прерыватель пучка, О) обеспечивал импульсную последовательность меандра фотосигналов с частотой следования 1 кГц. Использование obturatorа давало возможность автоматического вычитания из общего фотосигнала сигнала от внешней засветки фотодетектора (ФД). Поляризатор Глана — Тейлора (П) с воздушным промежутком и поляризационным контрастом $\geq 10^4$ имел возможность поворота вокруг направления распространения светового пучка. Это позволяло устанавливать нужное состояние поляризации излучения в образце. Ослабитель пучка (ОП) служил для уменьшения мощности света до уровня, когда нелинейностью фотодетектора можно пренебречь. Сферическая линза (Л) служила для формирования нужного размера перетяжки светового пучка. ФД PDA100A2 содержит кремниевый диод с диаметром чувствительной площадки 9,8 мм, а также предусилитель с выходом на электронный осциллограф. Полоса частот ФД ≈ 10 МГц. Пространственная неравномерность чувствительности ФД не превышала $\pm 0,5$ %. Электронный осциллограф (ЭО) С1-83 с полосой частот 5 МГц служил для измерения напряжения фотоимпульсов, величина которого прямо пропорциональна мощности света.

Исследуемыми образцами были светозвукопроводы (СЗП) из монокристаллического TeO_2 , используемые в серийно выпускаемых АОМ. СЗП имел вид прямоугольной призмы длиной $l = 29$ мм вдоль направления светового пучка. Плоскопараллельные оптические грани размером $\approx 6 \times 6$ мм были отполированы с чистотой обработки $R_z = 0,05$. Оптическая ось z кристалла лежала в плоскости оптической грани призмы. СЗП устанавливался на оптическом столике так, что ось z всегда была ортогональна направлению лазерного пучка. Столик имел возможность поперечного перемещения, при этом

СЗП оказывался на пути пучка либо выводился за его пределы. Стенд позволял проводить измерения отдельно для оптических мод кристалла TeO_2 (o - и e -лучей). Длина l кристаллов измерялась цифровым штангенциркулем Mitutoyo CD-15APXR с погрешностью $\pm 0,01$ мм.

Особенности методики

Первая методическая особенность связана с учётом и коррекцией возможной нелинейности ФД. При экспериментальном определении коэффициента пропускания T используют тот факт, что напряжение фотосигнала U прямо пропорционально мощности светового пучка: $U = ai$, где a — коэффициент. Если a не зависит от i (то есть фотодетектор линейный), формулу (1) можно переписать в виде:

$$T = U/U_0, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение фотосигнала в отсутствие образца.

В общем случае это не так, поэтому для точных измерений нелинейность ФД контролировалась и корректировалась согласно предложенной авторами методике, описанной ниже.

Под нелинейностью ФД понимается совокупная нелинейность измерительного тракта ФД от преобразователя «свет — фототок» до системы индикации величины фотосигнала. Суть коррекции состоит в том, что мощность светового пучка уменьшается до уровня, когда погрешность измерения T , обусловленная нелинейностью ФД, становится много меньше погрешности измерения U .

Пусть функция величины регистрируемого ФД напряжения фотосигнала U от мощности падающего света i имеет вид: $U(i) = ai - bi^2$, где b — коэффициент, а второе слагаемое много меньше первого. Контроль нелинейности состоит в определении коэффициента нелинейности $\eta = bi^2/ai = bi/a$ для заданного значения i . Для решения этой задачи необходимо иметь два ослабителя интенсивности светового пучка с коэффициентами ослабления $K = I_0/I$: $K_1 \geq 10$, $K_2 \geq 10$, причём не нужно точного знания значений K_1 и K_2 . Для нашего спектрального диапазона удобно взять стёкла типа НС (нейтральное стекло) из стандартного набора образцов оптических цветных стёкол ГОСТ 9411-91¹.

Для определения η необходимо проделать четыре измерения фотосигнала:

- 1) $U_0 = ai - bi^2$ — без ослабителей;
- 2) $U_1 = ai/K_1 - b(i/K_1)^2$ — с первым ослабителем;
- 3) $U_2 = ai/K_2 - b(i/K_2)^2$ — со вторым ослабителем;
- 4) $U_3 = ai/(K_1 K_2) - b(i/K_1 K_2)^2$ — с двумя ослабителями одновременно.

¹ ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное: технические условия. М.: Издательство стандартов, 1992. 49 с.

Далее составляется комбинация значений напряжения фотосигнала A : $A = U_1 U_2 / U_0 U_3 - 1$.

Для простоты положим $K_1 \approx K_2 \approx K$ (можно взять два одинаковых образца из набора). Подставляя в A выражения для U_0, U_1, U_2, U_3 , выполняя умножение и пренебрегая членами, пропорциональными $(bi/a)^2, (bi/a K_1), (bi/a K_2), (bi/a K_1 K_2)$, малыми по сравнению с членами $\sim bi/a$, получаем: $bi/a = \eta \approx A\sigma$, где $\sigma = K^2 / (K-1)^2$. При $K \geq 10$ $A \approx \eta$.

Для коррекции нелинейности следует использовать дополнительный ослабитель пучка с коэффициентом ослабления K_4 . Нелинейность ФД не будет вносить вклад в погрешность T при выполнении неравенства: $\eta/K_4 \ll \delta$, где $\delta = \Delta U/U$ — требуемая относительная погрешность измерения напряжения фотосигнала. Отсюда получаем условие, налагаемое на K_4 : $K_4 \gg \eta/\delta$, причём точного значения K_4 не требуется.

Вторая методическая особенность связана с использованием когерентных лазерных источников света, что может приводить к интерференции пучков и модуляции фотосигналов при малых изменениях ориентации СЗП. В формуле (2) суммируются интенсивности пучков, отражённых от оптических поверхностей плоскопараллельного слоя. Поэтому для её корректного применения необходимо обеспечить такое взаимное расположение пучков, при котором пятна от отражённых пучков на чувствительной площадке ФД не перекрываются. Это достигалось тем, что пучок направлялся на оптическую грань образца не ортогонально, как в работе [7], а под малым $\approx 2^\circ$ углом к нормали (рис. 1б). При таком наклоне расстояние Δ между центрами световых пятен на ФД составляло ≈ 1 мм. Таким образом, на приёмник попадало не менее пяти пятен от последовательно отражённых световых пучков. Диаметр перетяжки пятен d формировался с помощью линзы (Л) так, чтобы выполнялось неравенство $d < \Delta$, то есть чтобы пятна не пересекались. Анализ формулы (2) для TeO_2 позволяет сделать следующие выводы:

- доля мощности первого пучка, прошедшего через СЗП, составляет $\approx 0,97$ от суммарной мощности всех прошедших пучков;
- доля мощности второго пучка, прошедшего через СЗП, — $\approx 0,03$;
- совокупный доленой вклад всех пучков, следующих за вторым, — $\leq 0,001$.

Отсюда следует, что если относительная погрешность измерения T составляет $\sim 1\%$, то достаточно, чтобы на ФД попадало не менее двух последовательно прошедших пучков.

Отметим также, что оценки дают относительное изменение коэффициента ослабления $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-2}$ при изменении угла падения светового пучка на оптическую грань СЗП на 2° .

Достигнутая погрешность измерения T на оптическом стенде не превышала $\approx 1\%$. В основном она определялась инструментальной погрешностью, причём случайная погрешность была много меньше инструментальной. Для повышения точности измерений необходимо увеличивать разрядность измерителя и время усреднения.

Результаты и их обсуждение

Для измерений использовались по три образца от двух отечественных производителей монокристаллического TeO_2 :

1. Тверской государственный университет (ТУ), кафедра прикладной физики.
2. ООО «ВПГ Лазеруан», Фрязино (ЛФ), преемник фрязинского отделения международной группы компаний IPG Photonics Corporation.

Изготовление СЗП проводили собственные специалисты предприятий-изготовителей по единым требованиям и чертежам. На каждом из СЗП на каждой из длин волн ($\lambda_1 \div \lambda_4$) измерялся коэффициент T для каждой из двух собственных оптических мод TeO_2 : o - и e -лучей.

В таблице 2 приведены значения α^o и α^e , рассчитанные по формуле (4) и усреднённые по трём образцам для каждого из производителей ТУ и ЛФ.

Таблица 2

Значения коэффициентов ослабления света в TeO_2

Длина волны, нм	n_o	n_e	ТУ		ЛФ	
			$\alpha^o \cdot 10^3, \text{см}^{-1}$	$\alpha^e \cdot 10^3, \text{см}^{-1}$	$\alpha^o \cdot 10^3, \text{см}^{-1}$	$\alpha^e \cdot 10^3, \text{см}^{-1}$
405	2,4313	2,6151	21 ± 4	21 ± 4	20 ± 4	22 ± 4
532	2,3007	2,4609	12 ± 4	12 ± 4	14 ± 4	13 ± 4
785	2,2284	2,3760	7 ± 3	7 ± 3	8 ± 3	6 ± 3
1064	2,2041	2,3476	7 ± 3	9 ± 3	9 ± 3	9 ± 3

Видно, что значения α мало отличаются для разных образцов, производителей и состояний поляризации. На рис. 2 показаны измеренные значения коэффициентов ослабления, усреднённые по производителям и состояниям поляризации $\langle \alpha_i \rangle$ для каждой из использованных длин волн.

Для интерпретации данных предположим, что в формуле (1) α_1 не зависит от λ и $\alpha_2 = (k/\lambda)^4$ — член, обусловленный рэлеевским рассеянием, где $[\lambda] = \text{нм}$. Тогда:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_1 + (k/\lambda)^4. \quad (6)$$

В пользу этой модели можно привести экспериментальный факт: при освещении кристаллов мощным лазерным пучком траектория пучка пространственно однородна, что характерно для размеров рассеивающих неоднородностей, много меньших длины волны излучения.

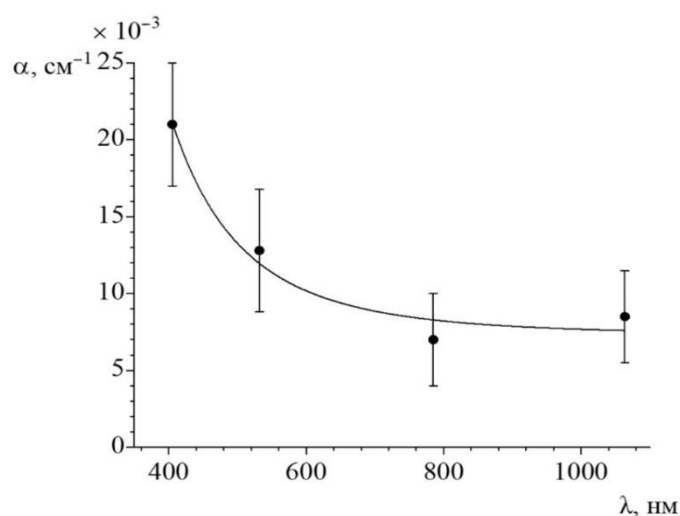


Рис. 2. Экспериментальные значения $\langle \alpha_i \rangle$ с погрешностями измерения и кривая $\alpha(\lambda)$, приближенная к этим значениям

Fig. 2. Experimental values of $\langle \alpha_i \rangle$ with measurement errors and the $\alpha(\lambda)$ curve approximated to these values

На рис. 2 показана кривая (6), проведённая по методу наименьших квадратов вблизи экспериментальных точек. Найдены значения параметров кривой: $\alpha_1 \approx 7,3$; $k \approx 781,3$. Значения $\langle \alpha_i \rangle$ и α_i приведены в таблице 3.

Таблица 3

Усреднённые экспериментальные значения $\langle \alpha_i \rangle$ и значения α_i , вычисленные по формуле (6)

Длина волны, нм	405	532	785	1064
$\langle \alpha_i \rangle \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$	21 ± 4	$12,8 \pm 4$	7 ± 3	$8,5 \pm 3$
$\alpha_i \cdot 10^3, \text{ см}^{-1}$	21,2	12,0	8,3	7,6

Из таблицы 3 видно, что погрешность приближения кривой (6) к экспериментальным точкам существенно меньше погрешностей эксперимента, то есть модель вполне адекватна эксперименту.

Светопропускание TeO_2 исследовалось также в [7] и [8]. В работе [7] определяли коэффициенты ослабления света монокристаллами парателлурита на двух длинах волн — 488 и 633 нм. Авторы делают вывод, что ослабление в основном обусловлено рэлеевским рассеянием, то есть $\alpha_2 \gg \alpha_1$. Напротив, по результатам данной работы в спектральном диапазоне 400–1000 нм либо

коэффициент рэлеевского рассеяния меньше коэффициента поглощения, либо их величины сравнимы. Отметим, что рэлеевское рассеяние в СЗП ограничивает величину максимально достижимого контраста модуляции АОМ.

По наблюдениям последних лет можно отметить заметный прогресс отечественных технологий роста слабо рассеивающих монокристаллов парателлуриата. Это дало возможность создать акустооптические модуляторы инфракрасного излучения с контрастом модуляции ≈ 60 дБ [9], [10].

Выводы

1. По измеренным коэффициентам пропускания определены коэффициенты ослабления (экстинкции) света в монокристаллах TeO_2 отечественных производителей в диапазоне 400–1000 нм. Для корректности измерений использовались наклонное падение пучка на образец, а также контроль и коррекция нелинейности фотодетектора.
2. Результаты близки для разных производителей, не зависят от состояния поляризации и существенно зависят от длины волны излучения.
3. Модель, в которой коэффициент экстинкции представлен двумя членами, отражающими поглощение и рэлеевское рассеяние света, хорошо описывает экспериментальные данные. В исследованном диапазоне коэффициент рэлеевского рассеяния либо меньше коэффициента поглощения, либо сравним с ним по величине.
4. Следует отметить прогресс отечественных технологий получения слабо-рассеивающих монокристаллов парателлуриата: отдельные образцы пригодны для исследования возможности получения акустооптических устройств с контрастом модуляции больше 60 дБ.

Финансирование. Авторы заявляют, что для проведения исследований и подготовки статьи гранты или другие источники внешнего финансирования не использовались.

Вклад авторов. В.М. Епихин: руководство, получение экспериментальных результатов, написание статьи; А.В. Кудрян: участие в измерениях, оформление результатов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Благодарности. Авторы благодарят М.М. Мазура за помощь в работе.

Funding. The authors declare that no grants or other external sources of funding were used to conduct the research reported in this article.

Contributions of the authors. V.M. Epikhin: supervision, obtaining experimental results, writing the article; A.V. Kudryan: participation in measurements, presentation of results.

Conflict of interests. The authors declare that they have no conflict of interest related to the research presented in this article.

Acknowledgments. The authors thank M.M. Mazur for his assistance in this work.

Список литературы

1. 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. EDN: YPNRUY.
2. Купалов Д.С., Барышев В.Н., Блинов И.Ю., Бойко А.И., Домнин Ю.С., Копылов Л.Н., Купалова О.В., 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. EDN: YPNRVH.
3. 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. EDN: SQTQWF.
4. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В., Стрижевская Ф.Н., Чкалова В.В., Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982. 632 с.
5. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. Теория и практика современной акустооптики. М.: Издательский дом МИСиС, 2015. 459 с.
6. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. 368 с.
7. Колесников А.И., Шелопаев А.В., Каплунов И.А., Талызин И.В., Воронцова Е.Ю. Ослабление света монокристаллами парателлуриата // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2009. № 4. С. 27–30. EDN: LDFNRF.
8. Кропотов Г.И., Рогалин В.Е., Каплунов И.А., Шахмин А.А., Третьяков С.А., Гук А.С. Применение и оптические характеристики монокристаллического парателлуриата для акустооптики диапазонов 0,355–5 μm и ТГц // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. № 4. С. 454–464. EDN: DHDDL. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.04.58226.5519-24>.
9. Епихин В.М., Карнаушкин П.В. Акустооптические модуляторы для волоконно-оптических линий // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 10. С. 962–966. EDN: WXXXLA.
10. Епихин В.М., Рябинин А.В. Акустооптические модуляторы с расширенной частотной полосой для волоконно-оптических линий // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 6. С. 1023–1027. EDN: RDLVAL. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.06.50874.330-20>.

References

1. Berdasov O.I., Gribov A.Yu., Strelkin S.A., Slyusarev S.N. Optical frequency standard based on cold strontium atoms. *Almanac of Modern Metrology*. 2017; 11: 81–94. EDN: YPNRUY. (In Russ.)
2. Kupalov D.S., Baryshev V.N., Blinov I.Yu., Boyko A.I., Domnin Yu.S., Kopylov L.N., Kupalova O.V., Novoselov A.V., Khromov M.N. Fountain-type frequency reference based on cold rubidium atoms. First results. *Almanac of Modern Metrology*. 2017; 11: 95–103. EDN: YPNRVH. (In Russ.)

3. Epikhin V.M., Baryshev V.N., Slyusarev S.N., Aprelev A.V., Blinov I.Yu. Acousto-optic modulators for a controlled frequency shift of light beams in optical and microwave cold-atom frequency standards. *Quantum Electronics*. 2019; 49 (9): 857–862. <https://doi.org/10.1070/QEL16943>.
4. Blistanov A.A., Bondarenko V.S., Perelomova N.S., Strizhevskaya F.N., Chkalova V.V., Shaskolskaya M.P. Acoustic crystals. Moscow: Nauka; 1982. 632 p. (In Russ.)
5. Molchanov V.Ya., Kitayev Yu.I., Kolesnikov A.I., Narver V.N., Rozenshtein A.Z., Solodovnikov N.P., Shapovalenko K.G. Theory and Practice of Modern Acousto-Optics. Moscow: MISiS; 2015. 459 p. (In Russ.)
6. Ukhonov Yu.I. Optical Properties of Semiconductors. Moscow: Nauka; 1977. 368 p. (In Russ.)
7. Kolesnikov A.I., Shelopaev A.V., Kaplunov I.A., Talyzin I.V., Vorontsova E.Yu. Light attenuation by paratellurite single crystals. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Materials of Electronic Engineering*. 2009; 4: 27–30. EDN: LDFNRF. (In Russ.)
8. Kropotov G.I., Rogalin V.E., Kaplunov I.A., Shakhmin A.A., Tretyakov S.A., Guk A.S. Application and optical characteristics of single-crystal paratellurite in acousto-optics on the 0.355–5 μm and terahertz ranges. *Optics and Spectroscopy*. 2024; 132 (4): 454–464. EDN: DHDDL1. <https://doi.org/10.61011/OS.2024.04.58226.5519-24>. (In Russ.)
9. Epikhin V.M., Karnaushkin P.V. Acousto-optic modulators for fibre-optic lines. *Quantum Electronics*. 2020; 50 (10): 962–966. EDN: PLTNSB. <https://doi.org/10.1070/QEL17378>.
10. Epikhin V.M., Ryabinin A.V. Acousto-optic modulators with extended frequency band for fiber-optic lines. *Technical Physics*. 2021; 91 (6): 1023–1027. EDN: RDLVAL. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.06.50874.330-20>. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 24.02.2026; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 19.03.2026.

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 27.02.2026; accepted for publication 19.03.2026.