

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК: 535-45, 535.016, 535.518.8

РОТАТОР ПОЛЯРИЗАЦИИ МОЩНЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

© 2025 г. Д. С. Моисеев^{a, b}, М. В. Рожко^b, Я. О. Романовский^{a, b, c}, Г. Ю. Левкин^{a, b},
А. В. Митрофанов^{a, b, c, *}, Д. А. Сидоров–Бирюков^{a, b, c}

^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

^b Российский квантовый центр

Россия, 143026, Москва, территория инновационного центра “Сколково”, Большой бул., 30, стр. 1

^c Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: mitralex@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.10.2024 г.

После доработки 26.11.2024 г.

Принята к публикации 19.12.2024 г.

Рассчитана оптическая схема ротатора поляризации электромагнитного излучения, состоящего только из отражающих элементов. Определены потери и степень деполяризации, вносимые данной схемой для лазерного излучения видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазонов. Показана возможность применения прибора в терагерцевом диапазоне частот. Численный анализ проводился с использованием экспериментально измеренных комплексных коэффициентов отражения для излучения на длинах волн 532, 808, 3900 нм для золотых зеркал с защитным покрытием. Экспериментально показана возможность использования ротатора для непрерывного вращения поляризации фемтосекундных лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона. Получено, что для фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм (диапазон 3600–4200 нм) потери, вносимые ротатором, составляют менее 8%, а степень поляризации при этом изменяется от 0.95 до 0.985 в зависимости от положения ротатора.

DOI: 10.31857/S0032816225020157, EDN: GKVGDB

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается применение источников интенсивных фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны, лежащей в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне [1]. Использование таких источников позволило впервые продемонстрировать фильтрацию импульсов среднего ИК-излучения в атмосфере [2], генерацию высоких гармоник в газовых струях с энергией фотонов вплоть до нескольких кэВ [3], генерацию гармоник до 51-го порядка от поверхности твердотельной мишени [4], а также эффективную генерацию терагерцевого (ТГц) [5–7] и СВЧ-излучения [8] в газе в режиме ионизации. При исследовании

нелинейно-оптических процессов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, в том числе с использованием многочастотной накачки с компонентами в ТГц-диапазоне частот, необходимо контролировать энергию и состояние поляризации отдельных компонент накачки. Первое, как правило, делается за счет вращения поляризации с последующим пропусканием импульса через поляризатор. Управление энергией лазерных импульсов за счет изменения энергии накачки в усилителе является нежелательным, так как это приводит к изменению временных и пространственных свойств выходного излучения. Вращение поляризации мощных фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК-диапазона с помощью

полуволновых пластинок (ПВП) затруднено небольшим выбором широкополосных двулучепреломляющих материалов. Одним из возможных материалов для изготовления ПВП для широкополосных лазерных импульсов в этом диапазоне длин волн является CdGa_2S_4 . Сложность и дороговизна изготовления качественной ПВП из данного материала ограничивают доступную апертуру ПВП. Коэффициент преломления данного материала составляет около $n = 2.34$ на длине волны 4 мкм, что приводит к френелевским потерям на отражение на двух поверхностях раздела около 30%. Необходимость нанесения антиотражающего покрытия еще больше увеличивает конечную стоимость ПВП и дополнительно ограничивает ее лучевую стойкость в пучках высокой интенсивности.

В работах [9–11] были предложены схемы ротатора поляризации, основанные на отражающей оптике. Данные схемы состоят из системы трех или четырех зеркал и позволяют вращать плоскость поляризации входного линейно-поляризованного излучения без изменения направления распространения пучка. В работах [12, 13] экспериментально продемонстрирована возможность использования схемы из трех зеркал с диэлектрическим широкополосным покрытием для вращения поляризации импульсов длительностью 10 фс, генерируемых лазерной системой на основе титаната сапфира на центральной длине волны 800 нм. Применение в данном диапазоне длин волн металлических зеркал приводит к существенным потерям и ярко выраженной деполяризации лазерного излучения накачки. В среднем и дальнем ИК-диапазонах зеркала с металлическим покрытием не будут ухудшать степень поляризации излучения, так как при отражении от них фаза p -компоненты не меняется, а фаза s -компоненты меняется на 180° . Однако реальные зеркала часто имеют защитное покрытие, которое способно по-разному менять коэффициент отражения и фазу p - и s -компонент поляризации, что может приводить к деполяризации.

В данной работе на основе экспериментально измеренных комплексных коэффициентов отражения золотых зеркал с защитным покрытием на длинах волн 532, 808, 3900 нм нами были рассчитаны и измерены потери и деполяризация, вносимые предлагаемой схемой ротатора на основе трех таких зеркал. Проведено сравнение экспериментальных результатов с рас-

четными значениями для трех диапазонов (видимого, ближнего и среднего ИК). Показана возможность применения данной схемы в ТГц-диапазоне частот. Экспериментально продемонстрирована возможность использования данной схемы для вращения поляризации мощных фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм. Схема легко масштабируется по апертуре, не изменяет направления хода луча при аккуратной юстировке и позволяет избежать использования дисперсионных элементов в лазерном пучке высокой интенсивности.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ РОТАТОРА ПОЛЯРИЗАЦИИ

Устройство состоит из трех зеркал, расположенных так, что нормали к ним лежат в одной плоскости (рис. 1). Прямая OO' является осью вращения ротатора. Если входной луч идет вдоль прямой OO' , то, отражаясь от зеркал, он всегда остается в плоскости ротатора, и выходной луч также лежит на оси OO' , являясь продолжением

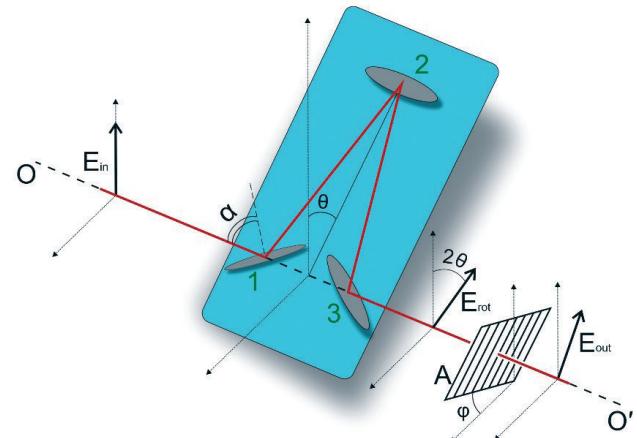


Рис. 1. Оптическая схема ротатора поляризации: 1, 2, 3 – золотые зеркала с защитным покрытием, θ – угол между направлением поляризации падающего излучения и плоскостью ротатора, 2θ – угол поворота поляризации лазерного излучения, α – угол падения лазерного излучения на первое зеркало, A – анализатор лазерного излучения, плоскость пропускания которого показана направлением вектора E_{out} , ϕ – угол между направлением поляризации падающего излучения и плоскостью пропускания анализатора. Направления поляризации излучения E_{in} на входе и E_{rot} на выходе из ротатора показаны стрелками.

входного луча. Такое устройство позволяет быстро изменить поляризацию излучения во время проведения эксперимента, не меняя при этом времени распространения и оптического пути излучения.

Прохождение излучения через ротатор и анализатор поляризации можно описать с помощью математического анализа Джонса. Оптическая схема, приведенная на рис. 1, описывается оператором

$$M = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ \cos \varphi \cdot \sin \varphi & \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} r_{p3} & 0 \\ 0 & r_{s3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{p2} & 0 \\ 0 & r_{s2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{p1} & 0 \\ 0 & r_{s1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

где θ – угол поворота ротатора поляризации, φ – угол поворота анализатора, r_{si} и r_{pi} – комплексные коэффициенты отражения s - и p -компонент поля i -го зеркала соответственно.

Вектор поля \mathbf{E}_{out} на выходе из системы получается действием оператора M на вектор падающего поля \mathbf{E}_{in} , координаты векторов задаются в лабораторной системе отсчета:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = M \mathbf{E}_{\text{in}}.$$

Для выбора углов установки зеркал в схеме ротатора были выполнены расчеты зависимости степени поляризации излучения $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ на выходе из ротатора от угла падения лазерного излучения на первое зеркало α . На рис. 2 пред-

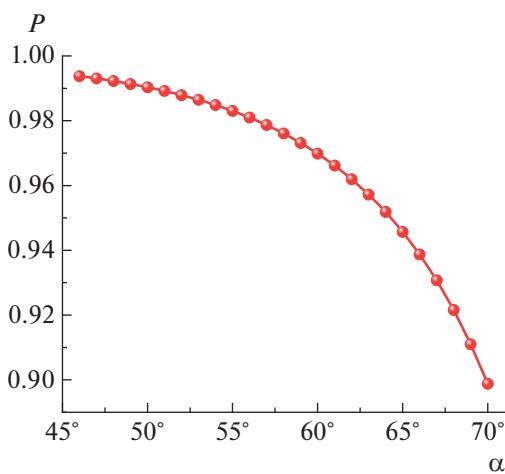


Рис. 2. Зависимость степени поляризации P излучения на выходе из ротатора от угла падения на первое зеркало \pm , рассчитанная для золотых зеркал без защитного покрытия. Длина волны излучения 3900 нм, угол поворота ротатора $\theta = 45^\circ$. Комплексные коэффициенты отражения вычислены по формулам Френеля на основе данных, взятых из работы [15].

ставлены результаты расчета для длины волны излучения 3900 нм и золотых зеркал без защитного покрытия при положении ротатора $\theta = 45^\circ$. Данный угол поворота ротатора выбран потому, что для него наблюдается минимальная степень поляризации P выходного излучения (см. далее рис. 3). Степень поляризации растет при приближении угла падения на первое зеркало к углу 45° , однако при этом также растут и габаритные размеры устройства. Нами был выбран угол падения 49° . Тогда угол падения на второе зеркало равен 8° , на третье ввиду симметрии составляет 49° . Степень поляризации на выходе ротатора при такой геометрии зеркал без защитного покрытия будет не хуже $P = 0.99$.

Наличие защитного покрытия на поверхности золотых зеркал приводит к отклонению комплексных показателей отражения для p - и s -компонент поляризации для разных углов падения и длин волн от табличных значений, представленных для чистой металлической поверхности. Этим обусловлено отличие экспериментально измеренных потерь и деполяризации, вносимых реальным ротатором, от теоретических расчетов, выполненных на основе табличных значений.

3. ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОТРАЖЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ

Для выбранных углов установки зеркал в ротаторе нами было выполнено измерение комплексного показателя отражения каждого зеркала для p - и s -компонент поляризации падающего лазерного излучения на длинах волн 532, 808, 3900 нм. Использовалась методика, изложенная в работе [14]. Экспериментально измерялась зависимость мощности прошедшего через анализатор излучения после отражения от исследуемого зеркала. Зависимость снималась для поворота анализатора на 360° через каждые 10° и затем аппроксимировалась уравнением эллипса по методу наименьших квадратов. Полученные значения эллиптичности (отношения полуосей эллипса) и угла наклона главной оси определяли комплексные показатели отражения компонент $r = \rho e^{i\psi}$ и вносимую разность фаз $\delta = \psi_p - \psi_s$ между p - и s -компонентами.

В табл. 1 приведено сравнение табличных [15] и экспериментально полученных модулей комплексных коэффициентов отражения от каждого

Таблица 1. Сравнение табличных и экспериментально полученных модулей ρ комплексных коэффициентов отражения $r = \rho e^{i\psi}$ и вносимой при отражении разности фаз между p - и s -компонентами $\delta = \psi_p - \psi_s$

№ зеркала	Угол падения	Экспериментальные значения *								
		Длина волны, нм								
		532			808			3900		
		ρ_s	ρ_p	δ	ρ_s	ρ_p	δ	ρ_s	ρ_p	δ
1	49°	0.77 ± 0.02	0.77 ± 0.02	(182 ± 2)°	0.97 ± 0.01	0.96 ± 0.01	(217 ± 14)°	0.995 ± 0.012	0.981 ± 0.013	(189.6 ± 1.7)°
2	8°	0.85 ± 0.02	0.83 ± 0.02	(180 ± 2)°	0.985 ± 0.008	0.97 ± 0.01	(181.9 ± 1.1)°	0.984 ± 0.015	0.98 ± 0.01	(182.2 ± 1.6)°
3	49°	0.78 ± 0.03	0.77 ± 0.02	(183 ± 2)°	0.98 ± 0.01	0.97 ± 0.01	(223 ± 9)°	0.995 ± 0.012	0.981 ± 0.013	(189.6 ± 1.7)°

Угол падения	Табличные значения **								
	Длина волны, нм								
	532			808			3900		
	ρ_s	ρ_p	δ	ρ_s	ρ_p	δ	ρ_s	ρ_p	δ
8°	0.874	0.871	181.0°	0.994	0.994	180.5°	0.998	0.997	180.1°
49°	0.919	0.826	221.3°	0.996	0.991	199.9°	0.998	0.996	183.7°

* Для экспериментальных значений приведены данные для всех трех зеркал, использованных для сборки ротатора.

** Табличные значения взяты из работы [15].

зеркала и вносимых при отражении разностей фаз между p - и s -компонентами в зависимости от угла падения на зеркало для различных длин волн. Отличие экспериментальных значений как для модуля коэффициентов отражения, так и для вносимой разности фаз от табличных мы связываем с наличием защитного диэлектрического слоя на поверхности зеркал с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \neq 1$, влияние которого велико

при длине волны излучения, сопоставимой с толщиной слоя, и уменьшается с увеличением длины волны.

Используя табличные и экспериментально полученные комплексные показатели преломления, мы рассчитали степень поляризации излучения P на выходе ротатора с золотыми зеркалами в зависимости от угла поворота θ для различных длин волн (рис. 3). Голубые сплошные

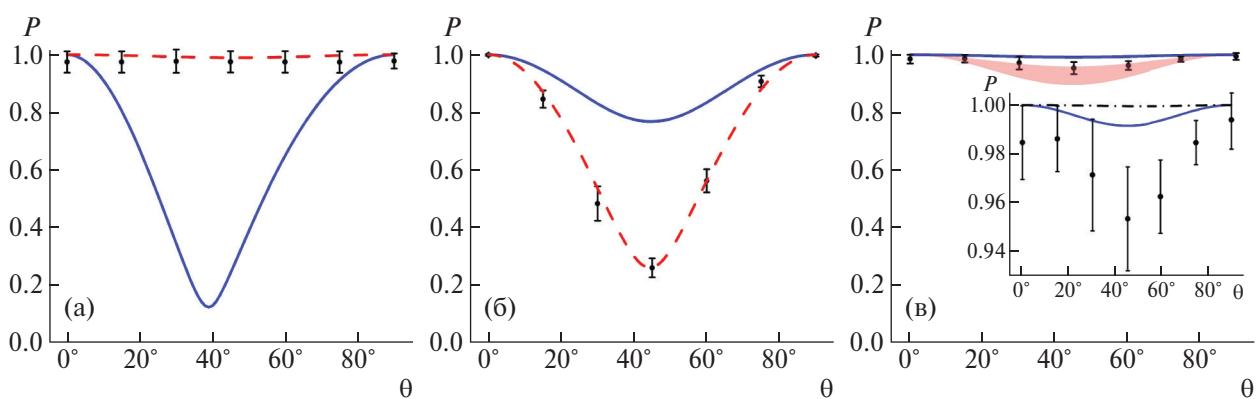


Рис. 3. Степень поляризации излучения P на выходе из ротатора в зависимости от угла поворота θ для длины волны 532 (а), 808 (б), 3900 нм (в). Линии – численный расчет: синяя кривая получена с использованием табличных коэффициентов отражения [15], красная – с использованием экспериментально определенных коэффициентов отражения. Точки – экспериментальные значения степени поляризации излучения на выходе ротатора. На панели (в) красной заливкой показан диапазон значений степени поляризации с учетом погрешности измерения коэффициентов отражения. На вставке (в) приведена степень поляризации в узком диапазоне значений для большей наглядности, тут же показан расчет степени поляризации излучения на выходе ротатора для терагерцевого излучения на длине волны 100 мкм (черная штрихпунктирная кривая) с использованием табличных коэффициентов отражения [15].

кривые соответствуют табличным значениям коэффициента отражения зеркал без покрытий, а красные штриховые кривые построены для коэффициентов отражения, определенных экспериментально.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ротатор поляризации был собран на плите, которая могла вращаться вокруг направления распространения лазерного излучения. Механизм вращения был изготовлен по разработанным в лаборатории чертежам, он позволял изменять угол ротатора в пределах от -10° до 90° , при этом поляризация лазерного излучения поворачивалась в диапазоне от -20° до 180° . Тщательная юстировка входного луча относительно оси вращения ротатора необходима для того, чтобы избежать сноса выходного луча при вращении плоскости ротатора.

В экспериментах использовалось лазерное излучение на длинах волн 532, 808, 3900 нм. Источником лазерного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов служили непрерывные лазеры малой мощности. В среднем ИК-диапазоне использовалась мощная фемтосекундная лазерная система, генерирующая импульсы длительностью 80 фс с энергией до 20 мДж на центральной длине волны 3900 нм. Исследовался эллипс поляризации излучения после прохождения ротатора при помощи анализатора и фотодетектора. В качестве анализатора в видимом и ближнем ИК-диапазонах использовался поляризационный куб, в среднем ИК-диапазоне – поляризатор на основе периодической решетки из металлических волосков на кремниевой подложке. В качестве фотодетектора в видимом и ближнем ИК-диапазонах использовался кремниевый фотодиод, а в среднем ИК-диапазоне – чувствительный болометрический детектор. Для повышения чистоты поляризации входного излучения перед ротатором устанавливался дополнительный поляризатор для соответствующей длины волны. Измеренный экспериментально эллипс поляризации выходного излучения аппроксимировался функцией

$$I(\phi) = I_a \cos^2(\phi - \phi_0) + I_b \sin^2(\phi - \phi_0),$$

где ϕ – угол поворота анализатора A, I_a и I_b – интенсивности вдоль главных осей эллипса поляризации, ϕ_0 – угол наклона главной оси эллипса поляризации в лабораторной системе отсчета.

На основании данных, полученных из аппроксимации, вычислялась степень поляризации излучения на выходе из ротатора в зависимости от его угла поворота θ , эта степень поляризации сравнивалась с величиной, полученной при численном расчете.

При длине волны 532 нм поляризация оставалась линейной при любом угле поворота ротатора (рис. 3а), однако из-за малого коэффициента отражения применение ротатора поляризации с золотыми зеркалами в видимом диапазоне нецелесообразно. Эффективность пропускания ротатора на данной длине волны составила 23%. В экспериментах с излучением на длине волны 808 нм наблюдалась существенная деполяризация (рис. 3б), что говорит о невозможности применять такое устройство на основе золотых зеркал с диэлектрическим покрытием для вращения поляризации в ближнем ИК-диапазоне.

С увеличением длины волны вносимая при отражении разность фаз между s - и p -компонентами приближается к 180° (табл. 1), вследствие чего уменьшается деполяризация излучения. Степень поляризации лазерных импульсов на центральной длине волны 3900 нм, генерируемых лазерной системой, составляет 0.985 ± 0.017 . Степень поляризации на выходе ротатора составила 0.985 ± 0.017 при угле поворота ротатора $\theta = 0$ и 0.95 ± 0.02 при $\theta = 45^\circ$, причем при $\theta = 45^\circ$ степень поляризации достигает минимума. Для излучения на центральной длине волны 3900 нм экспериментальные точки близки к численному расчету (рис. 3в), в котором использовались табличные коэффициенты отражения для случая отражения от поверхности золота на границе воздух–золото. Эффективность пропускания ротатора по энергии слабо зависит от угла поворота ротатора и составляет $(92 \pm 1)\%$.

Расчет данной системы для ТГц-излучения на центральной длине волны 100 мкм с использованием табличных значений [15], приведенный на вставке рис. 3в (черная штрихпунктирная линия), показал, что во всем диапазоне углов поворота ротатора степень поляризации остается на уровне 0.99.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена экспериментальная схема ротатора поляризации, состоящего только из отражающих элементов. В качестве зеркал использовались широкодоступные зеркала с золотым

напылением и защитным диэлектрическим покрытием. Показана возможность непрерывного вращения поляризации субтераваттных фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3900 нм, причем угол поворота поляризации оказывается равным удвоенному углу поворота ротатора θ . Наиболее заметное уменьшение степени поляризации излучения на выходе ротатора до $P = 0.95$ с исходного значения $P = 0.985$ наблюдается при угле поворота ротатора $\theta = 45^\circ$, что соответствует повороту входной поляризации на 90° . Эффективность пропускания ротатора по энергии слабо зависит от угла поворота ротатора и составляет $(92 \pm 1)\%$. При увеличении длины волны лазерного излучения возрастает как эффективность пропускания по энергии, так и степень поляризации излучения на выходе.

Оптическая схема ротатора не изменяет направления распространения луча, что позволяет легко внедрять ротатор в уже имеющиеся экспериментальные схемы. Схема легко масштабируется по апертуре и может быть применена для высокоэнергетических лазерных пучков с длинами волн в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Также такой ротатор является удобным средством для вращения поляризации терагерцевых импульсов, доступным в каждой оптической лаборатории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00425). Один из соавторов (Я.О.Р.) является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andriukaitis G., Balčiūnas T., Ališauskas S. et al.* // Opt. Lett. 2011. V. 36. № 15. P. 2755. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002755>
2. *Mitrofanov A.V., Voronin A.A., Sidorov-Biryukov D.A. et al.* // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 8368. <https://doi.org/10.1038/srep08368>
3. *Popmintchev T., Chen M.-C., Popmintchev D. et al.* // Science. 2012. V. 336. P. 1287. <https://doi.org/10.1126/science.1218497>
4. *Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Rozhko M.V. et al.* // Opt. Lett. 2018. V. 43. № 22. P. 5571. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005571>
5. *Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Nazarov M.M. et al.* // Optica. 2020. V. 7. P. 15. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.7.000015>
6. *Koulouklidis A.D., Gollner C., Shumakova V. et al.* // Nat. Commun. 2020. V. 11. P. 292. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14206-x>
7. *Jang D., Schwartz R.M., Woodbury D. et al.* // Optica. 2019. V. 6. № 10. P. 1338. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.001338>
8. *Mitrofanov A.V., Voronin A.A., Rozhko M.V. et al.* // ACS Photonics. 2021. V. 8. № 7. P. 1988. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.0c01966>
9. *Johnston L.H.* // Appl. Opt. 1977. V. 16. № 4. P. 1082. <https://doi.org/10.1364/AO.16.001082>
10. *Greninger C.E.* // Appl. Opt. 1988. V. 27. № 4. P. 774. <https://doi.org/10.1364/AO.27.000774>
11. *Galvez E.J., Koch P.M.* // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V. 14. № 12. P. 3410. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.003410>
12. *Keppler S., Hornung M., Bödefeld R., Kahle M., Hein J., Kaluza M.C.* // Opt. Express. 2012. V. 20 № 18. P. 20742. <https://doi.org/10.1364/OE.20.020742>
13. *Bohus J., Budai J., Kalashnikov M., Osvay K.* // Proc. SPIE. 2017. V. 10238. P. 102381B. <https://doi.org/10.1117/12.2264913>
14. *Jerrard H.G.* // J. Opt. Soc. Am. 1954. V. 44. P. 634. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000634>
15. *Polyanskiy M.N.* // Sci. Data. 2024. V. 11. P. 94. <http://dx.doi.org/10.1038/s41597-023-02898-2>