

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-80-88

УДК 621.3.095.14, 681.7.068

Оптическая система для эффективной перестраиваемой акустооптической фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума

Антон Андреевич Сударев¹, Ольга Валерьевна Польщикова^{2✉},
Кирилл Вячеславович Зотов³

^{1, 2}Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Солитон Фотоникс, Москва, Троицк, Россия

¹sudarev.aa@ntcup.ru <https://orcid.org/0009-0008-0481-2467>

²polschikova@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2777-9467>

³kirill.v.zotov@gmail.com <https://orcid.org/0009-0007-1825-9925>

Аннотация

Предмет исследования. Пропускание и мощность излучения на выходе системы перестраиваемой акустооптической фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума. **Цель работы.** Разработка компактной высокоэффективной оптической системы для объединения ± 1 -х порядков дифракции перестраиваемого акустооптического фильтра для фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума. **Метод.** Предложен способ объединения двух порядков дифракции акустооптического фильтра на основе разветвленного многомодового оптического волокна, используемого в системах накачки волоконных лазеров, и клиньев-компенсаторов хроматического сдвига. Оптическая система смоделирована и экспериментально апробирована. В ходе эксперимента минимизирована вероятность влияния нестабильности излучения и засветки на результат измерений. **Основные результаты.** Исследована эффективность предложенной оптической системы фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума в широком спектральном диапазоне. Она позволяет увеличить мощность излучения на выходе акустооптического фильтра в 2,2 раза по сравнению с использованием одного порядка дифракции в схеме с линейным поляризатором. Пропускание оптической системы для объединения дифракционных порядков фильтра составило 78%. **Практическая значимость.** Представленная оптическая система может быть использована в качестве осветительной в различных приложениях, где требуется перестраиваемая спектральная фильтрация излучения в широком диапазоне с минимально допустимыми потерями мощности и поляризационного состава излучения. Оптическая система является компактной и простой в юстировке. Она может быть использована совместно с мультисигментным режимом работы акустооптического фильтра для фильтрации излучения сложного спектрального состава, например, для задач колориметрии.

Ключевые слова: акустооптический перестраиваемый фильтр, неполяризованное излучение, генератор суперконтинуума

Благодарность: работа выполнена в рамках государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Ссылка для цитирования: Сударев А.А., Польщикова О.В., Зотов К.В. Оптическая система для эффективной перестраиваемой акустооптической фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 80–88. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-80-88>

Коды OCIS: 230.1040, 260.5430

Optical system for efficient tunable acousto-optic filtering of unpolarized supercontinuum radiation

ANTON A. SUDAREV¹, OLGA V. POLSCHIKOVA²✉, KIRILL V. ZOTOV³

^{1, 2}Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³Soliton Photonics LLC, Moscow, Troitsk, Russia

¹sudarev.aa@ntcup.ru <https://orcid.org/0009-0008-0481-2467>

²polschikova@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-2777-9467>

³kirill.v.zotov@gmail.com <https://orcid.org/0009-0007-1825-9925>

Abstract

Subject of study. Transmission and radiation power at the output of a tunable acousto-optical filtering system for unpolarized supercontinuum radiation. **Aim of study.** Development of a compact, highly efficient optical system for combining ± 1 diffraction orders of a tunable acousto-optical filter for filtering unpolarized supercontinuum radiation. **Method.** A method is proposed for combining two diffraction orders of an acousto-optical filter based on a fiber-optic pump combiner and chromatic shift compensator wedges. The optical system has been modeled and experimentally tested. During the experiment, the influence of radiation instability and stray light on the measurement result was minimized. **Main results.** The efficiency of the proposed optical system for filtering unpolarized supercontinuum radiation in a wide spectral range has been studied. The optical power at the output of the system increased by 2.2 times compared to using one diffraction order with a linear polarizer. The transmittance of the optical system for combining the diffraction orders of the acousto-optical filter equals to 78%. **Practical significance.** The presented optical setup can be used as an illumination system in various applications that require tunable spectral filtering of radiation over a wide spectrum range with decreased losses in power and polarization. The optical system is compact and easy to adjust. It can be used in conjunction with the multi-frequency operating mode of an acousto-optical filter to transmit more complex spectral composition, which can be used, for example, in colorimetry.

Keywords: acousto-optical tunable filter, unpolarized radiation, supercontinuum generator

Acknowledgment: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FFNS-2022-0010). The results were partly obtained on the base of the Center for Collective Use of Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Sudarev A.A., Polschikova O.V., Zotov K.V. Optical system for efficient tunable acousto-optic filtering of unpolarized supercontinuum radiation [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 80–88. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-80-88>

OCIS codes: 230.1040, 260.5430

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) представляют собой электронно-перестраиваемые спектральные устройства, осно-

ванные на явлении дифракции Брэгга в двулучепреломляющем кристалле и отличающиеся широким рабочим спектральным диапазоном, высокой скоростью перестройки

центральной длины волны пропускания, возможностью управления аппаратной функцией и достижения близкой к 100% дифракционной эффективности [1].

Для неполяризованного излучения в отсутствие в схеме поляризаторов на выходе АОПФ будут наблюдаться два порядка дифракции (+1-й и -1-й), оси поляризации которых ортогональны. Как правило, используется лишь один порядок, для которого параметры АОПФ оптимизируются при расчете и изготовлении. Второй порядок устраняется с помощью поляризаторов, блокируется экраном или выводится из схемы за счет отклонения при дифракции, что приводит к потере около 50% входной мощности излучения [2–4]. В задачах, где применяется излучение низкой интенсивности и предъявляются повышенные требования к светопропусканию фильтра, это может привести к необходимости использования чрезмерно большого времени экспонирования и ухудшению качества изображения. Поэтому интерес представляют использование одновременно двух порядков дифракции и спектральная фильтрация неполяризованного излучения. И наоборот, поскольку поляризационный контраст между порядками дифракции может превышать 10^4 [5], АОПФ является отличным инструментом для изучения свойств поляризованного излучения. Так, одни из первых работ, в которых использовались оба порядка акустооптической (АО) дифракции, были посвящены спектрополяриметрии для решения задач астрофизики и дистанционного зондирования [5–7]. Разработка и использование спектрополяриметров на основе АОПФ остается актуальным направлением и в настоящее время [8–10].

Для одновременной регистрации +1-го и -1-го порядков дифракции АОПФ были предложены зеркальные [6, 7, 9, 11] и линзовые [5, 10, 12–15] системы, направляющие излучение на один [2, 5, 7, 9, 11, 15, 16] или два [6, 8, 10, 12–14] приемника излучения. Отдельно стоит выделить подходы, использующие поляризационные светоделители для разделения пучка на две ортогонально поляризованные составляющие до поступления его в АОПФ. В одном случае за счет выбора угла падения излучения на входную грань АОПФ это позволяет объединить пучки с ортогональными осями поляризации на выходе АОПФ [2],

а в другом — позволяет изменить состояние поляризации одного из пучков в дополнительной ветви до АОПФ за счет полуволновой пластинки, направить оба пучка с одной поляризацией на АОПФ под небольшим углом и обеспечить компактность системы [16]. Для объединения пучков было также предложено использовать разветвленное оптическое волокно [17]. Представленные системы можно разделить на изображающие [2, 5, 7, 9, 12, 13, 15, 16] и неизображающие [8, 10, 11, 14, 17]. Как правило, для фильтрации произвольно поляризованного света используются неколлинеарные АОПФ, но были проведены исследования и коллинеарного АО взаимодействия [18].

Кроме увеличения мощности излучения и возможности анализа состояния поляризации использование двух порядков дифракции может также способствовать стабилизации мощности в выходном канале фильтра в случае, если на его вход подается излучение с изменяющимся во времени состоянием поляризации. Таким свойством обладает излучение генератора суперконтинуума — источника света, в котором импульс лазера накачки уширяется за счет нелинейных эффектов в фотонно-кристаллическом волокне, а результирующий спектр охватывает ближний инфракрасный, видимый и часть ближнего ультрафиолетового диапазонов спектра. Зашумленность затравочных импульсов [19], тепловые и микроизгибные напряжения в фотонно-кристаллическом волокне будут приводить к заметному изменению поляризации на выходе генератора суперконтинуума. Задача фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума с помощью АОПФ является актуальной, поскольку оба устройства часто используются совместно, и данный подход позволит уменьшить колебания выходной мощности, обусловленные изменяющимся состоянием поляризации излучения.

Целью данной работы является разработка компактной высокоэффективной оптической системы (ОС) для объединения ± 1 -х порядков дифракции АОПФ для фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума.

Предлагается новое техническое решение объединения двух порядков дифракции АОПФ на основе волоконного объединителя, используемого в системах накачки волоконных лазеров, и клиннев-компенсаторов хроматического

сдвига, исследуется эффективность предложенной ОС фильтрации неполяризованного излучения в широком спектральном диапазоне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение генератора суперконтинуума (*Rock 400 2, Leukos*, подаваемый ток 6 А) коллимируется первой линзой, проходит через коротковолновый фильтр (длина волны отсечки 750 нм) и апертурную диафрагму и поступает в АОПФ (НТЦ УП РАН, ячейка из парателлурита, угол среза 7°). В результате дифракции Брэгга формируются три пучка: +1-й и -1-й порядки дифракции с обыкновенно и необыкновенно поляризованным излучением соответственно и 0-й порядок недифрагированного неполяризованного излучения.

Далее излучение ±1-х порядков необходимо ввести в разветвленное многомодовое волокно с помощью волоконных коллиматоров. Однако угловой хроматический сдвиг, сопровождающий спектральную фильтрацию в неколлинеарном АОПФ, будет уменьшать эффективность ввода излучения в волокно. Хроматический сдвиг принято компенсировать в одном из порядков дифракции за счет небольшого угла наклона задней грани [1, 20]. Используемая ячейка с углом задней грани 2,3° изначально была рассчитана для работы с +1-м порядком в конфокальной схеме (со сфокусированным внутри ячейки пучком лучей), где эффект хроматического сдвига может

быть минимизирован [21, 22], в то время как в настоящей работе используются оба порядка в коллимирующей схеме (с параллельным пучком лучей), поэтому хроматический сдвиг необходимо компенсировать в обоих порядках. Поскольку в данной схеме хроматический сдвиг в ±1-х порядках дифракции различен, компенсирующие призмы и клинья [13, 23] должны иметь разные параметры.

Таким образом, на пути ±1-х порядков АОПФ были установлены два клина, материал и угол при вершине которых были рассчитаны и оптимизированы в программе ZEMAX. В работе, проведенной авторами ранее [24], было показано, что клин увеличивает эффективность ввода излучения в волокно в широком диапазоне длин волн. Один из клиньев помимо компенсации хроматизма также служит для отклонения 0-го порядка в сторону экрана и вывода его из схемы. Следует располагать клинья как можно ближе к АОПФ, чтобы остаточный хроматический сдвиг был минимален.

После прохождения через клинья излучение с помощью волоконных коллиматоров вводится в разветвленное многомодовое волокно, представляющее собой объединитель накачки 2×1 для волоконных лазеров [25, 26]. Сердцевина волокна выполнена из кварца, а оболочка — из кварца, легированного фтором. Диаметры сердцевины и оболочки составляют 105/125 мкм на входе и 200/220 мкм на выходе, числовая апертура — 0,22. Объединители накачки данного типа обладают рядом преимуществ: подходят для излучения высокой мощности, нечувствительны к длине волны

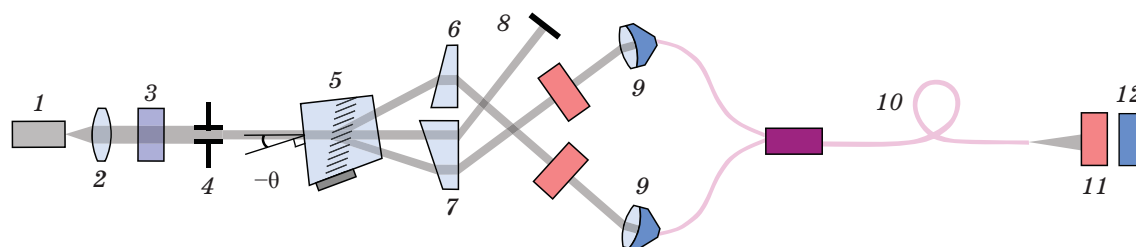


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — генератор суперконтинуума, 2 — линза-дублет, 3 — коротковолновый фильтр, 4 — апертурная диафрагма, 5 — АОПФ, 6, 7 — клинья, 8 — экран, 9 — волоконные коллиматоры, 10 — волоконный объединитель, 11 — измеритель мощности излучения, 12 — спектрометр, θ — угол поворота АОПФ

Fig. 1. Layout of the experimental setup. (1) Supercontinuum laser, (2) doublet lens, (3) shortpass filter, (4) diaphragm, (5) acousto-optical tunable filter, (6) and (7) are wedges, (8) beam block, (9) are fiber collimators, (10) fiber-optic pump combiner, (11) radiation power meter, (12) spectrometer, θ indicates acousto-optical tunable filter rotation angle

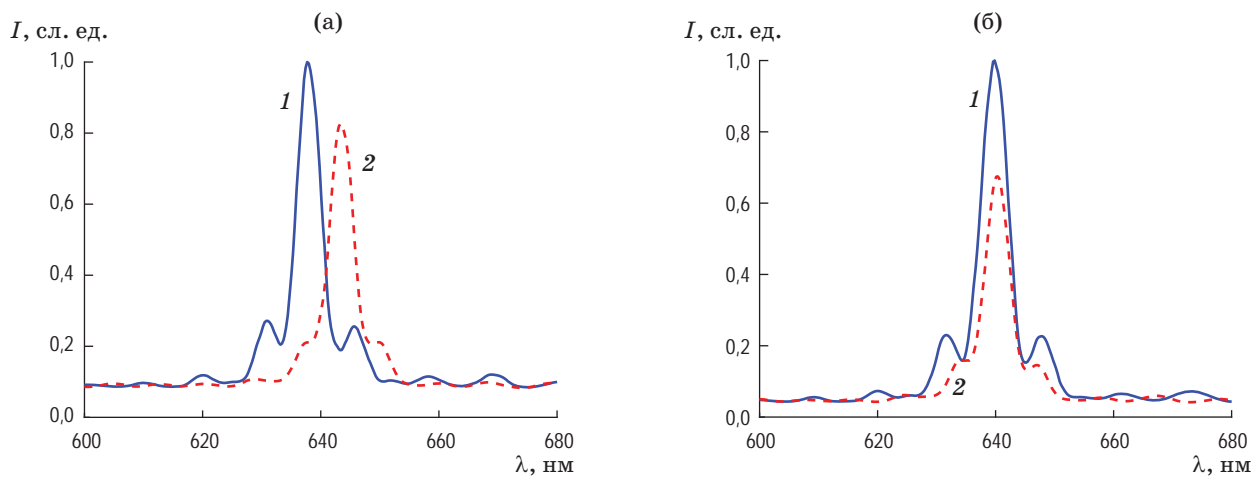


Рис. 2. Спектры пропускания +1-го (1) и -1-го (2) порядков дифракции при угле поворота АОПФ 0° (а) и -2° (б), частота ультразвука 79 МГц, λ — длина волны излучения

Fig. 2. (a) Transmission spectra of the (1) +1st and (2) -1st diffraction orders at the acousto-optic tunable filter rotation angle (a) 0° and (б) -2° , ultrasound frequency 79 MHz, λ denotes the radiation wavelength

излучения в широком спектральном диапазоне, имеют достаточно большую сердцевину, что упрощает ввод излучения, характеризуются малыми потерями. К возможным недостаткам использования данного волокна в представленной системе можно отнести его многомодовость, что влечет потерю бесконечно одномодового режима — важного для некоторых задач свойства излучения, генерируемого в фотонно-кристаллическом волокне [27]. Однако последние исследования показали возможность восстановления исходного модового состава и изображений после прохождения излучения через многомодовое волокно [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При решении задачи эффективного объединения порядков дифракции АОПФ необходимо добиться одинакового спектрального состава в них. В номинальном положении АОПФ (при нормальном падении пучка лучей на его входную грань) центральные длины волн ± 1 -х порядков будут отличаться друг от друга (рис. 2а). Известно, что поворот АОПФ на небольшой угол θ (рис. 1) в плоскости дифракции позволяет получить равенство центральных длин волн пропускания на одной частоте ультразвука в диапазоне нескольких сотен нанометров [5, 7]. Для использованного в экспериментах АОПФ был рассчитан и экспериментально подтвержден угол его поворота $\theta = -2^\circ$

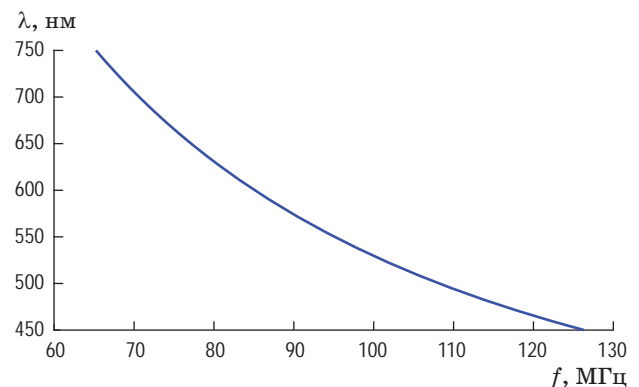


Рис. 3. Совмещенная перестроенная характеристика $\lambda(f)$ для ± 1 -х порядков дифракции при угле поворота АОПФ -2° . f — частота ультразвука, λ — длина волны излучения

Fig. 3. Matched tuning curve $\lambda(f)$ for ± 1 st diffraction orders at acousto-optic tunable filter rotation angle -2° . f denotes ultrasound frequency, λ denotes the radiation wavelength

(рис. 2б). Относительно малая интенсивность в спектре -1-го порядка дифракции обусловлена точным выполнением условия синхронизма лишь для +1-го порядка [1]. Совмещенная расчетная перестроенная кривая $\lambda(f)$ ± 1 -х порядков дифракции представлена на рис. 3.

Для оценки эффективности предлагаемой схемы было проведено измерение мощности излучения на входах и выходе ОС и вычислено ее пропускание. Мощность излучения определялась с помощью измерителя мощности

(кремниевый фотодиод S121C с консолью PM100D, Thorlabs), который последовательно переставлялся в отмеченные на рис. 1 положения.

Перед измерениями была проведена оценка стабильности излучения генератора суперконтинуума. При времени выхода на режим, равном 1 ч, размах значений мощности в течение одного цикла измерений (20–30 мин) составил всего 4–5% от средних значений мощности излучения на каждой частоте ультразвука, что позволяет сделать вывод о стабильности излучения [24].

Измерение пропускания ОС проводилось на длинах волн λ в диапазоне 450–750 нм с шагом 5 нм. При каждой смене положения измерителя мощности осуществлялась юстировка системы по максимальному сигналу мощности излучения на частоте ультразвука $f = 100$ МГц [24]. Полезный сигнал мощности излучения P определялся вычитанием сигнала засветки P_{str} (при выключенном АОПФ) из общего сигнала P_{full} , $P = P_{full} - P_{str}$. Поскольку в целях минимизации хроматического сдвига клиньев были установлены близко к АОПФ, мощность на входе исследуемой ОС P_{in} определялась как отношение полезного сигнала мощности после клиньев P_w к спектральному коэффициенту пропускания клиньев τ , $P_{in} = P_w/\tau$. Входные и выходные грани клиньев были просветлены, средний коэффициент пропускания составил $\tau_{ave} = 0,97$.

Пропускание всей ОС объединения порядков дифракции вычислялось по формуле $T(\lambda) = (P_{out}/P_{in})100\%$, где P_{out} — полезный сигнал мощности излучения на выходе ОС. На рис. 4а представлены полученные кривые пропускания $T(\lambda)$ при двух значениях мощности управляющего сигнала АОПФ. При меньшем значении мощности управляющего сигнала, равном 0,1–0,3 Вт, значение пропускания стабильно во всем спектральном диапазоне (кривая 1). Оно соответствует 21%-й дифракционной эффективности (ДЭ), измеренной при угле поворота АОПФ 0° с помощью излучения гелий-неонового лазера. Кривая 2 соответствует мощности управляющего сигнала 1 Вт, при этом ДЭ составляет 68%. Увеличение мощности управляющего сигнала приводит не только к росту ДЭ, но и к росту влияния на аппаратную функцию АОПФ коэффициента стоячей волны, который для данного АОПФ имеет повышенные значения в диапазоне 550–600 нм. Происходящее при этом искажение спектра, выражающееся в перераспределении энергии из главного максимума функции пропускания в побочные максимумы, может являться причиной локального падения пропускания на кривой 2 (рис. 4а).

Графики выходной мощности излучения P_{out} при двух значениях мощности управляющего сигнала представлены на рис. 4б.

В среднем по спектру пропускание предложенной ОС объединения дифракционных

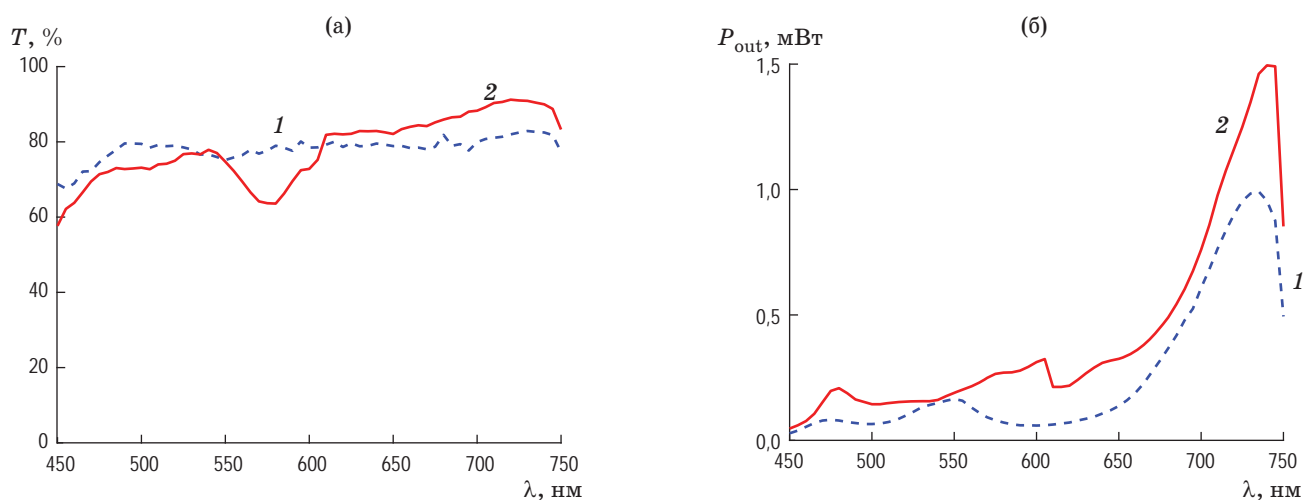


Рис. 4. Коэффициент пропускания $T(\lambda)$ (а) и суммарная выходная мощность излучения $P_{out}(\lambda)$ (б) на выходе ОС при мощности управляющего сигнала 0,1–0,3 (1) и 1 (2) Вт

Fig. 4. (a) Transmission $T(\lambda)$ and (б) total output radiation power $P_{out}(\lambda)$ in the case of driving power equal to (1) 0,1–0,3 and (2) 1 W

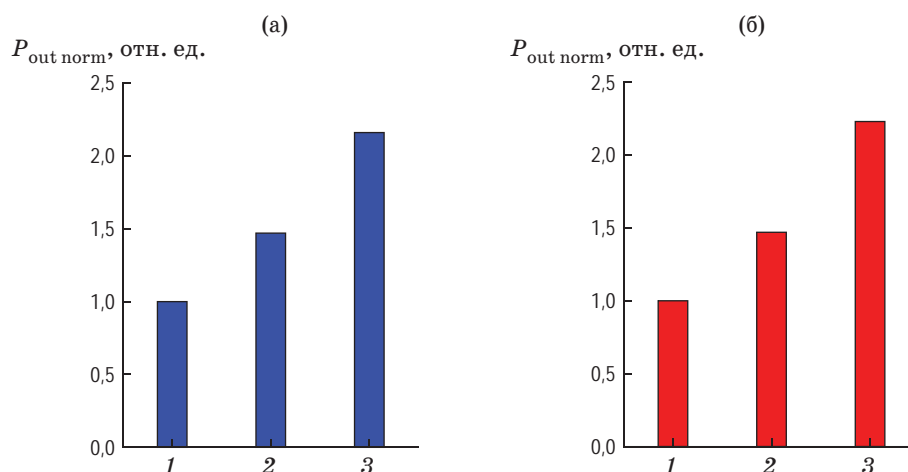


Рис. 5. Нормированная выходная мощность излучения в случае установки линейного поляризатора на входе АОПФ и измерения мощности излучения в +1-м порядке дифракции при $\theta = 0^\circ$ (1), неполяризованного излучения и измерения мощности в +1-м порядке дифракции на входе АОФ при $\theta = 0^\circ$ (2) и на выходе предложенной ОС (3) при мощности управляющего сигнала 0,1–0,3 (а) и 1 Вт (б)

Fig. 5. Normalized output radiation power in the case of (1) presence of a linear polarizer in front of the acousto-optical tunable filter and measurement in the +1st diffraction order, (2) unpolarized light and measurement in the +1st diffraction order and (3) measurement at the exit of the suggested optical system for driving power equal to (a) 0,1–0,3 and (b) 1 W

порядков АОПФ составило 78%. Полученный результат сопоставим с данными коммерчески доступных АОПФ с выводом неполяризованного излучения, коэффициент пропускания которых равен 70–90% [29, 30].

Также было проведено сравнение выходной мощности излучения предложенной системы с выходной мощностью классических конфигураций АОПФ (рис. 5). За единицу мощности излучения было принято значение в +1-м порядке дифракции в случае установки линейного поляризатора на входе АОПФ и $\theta = 0^\circ$ (1) [16]. Как видно из графика, наш подход позволяет увеличить сигнал в спектральном канале в 2,2 раза по сравнению с АОПФ с линейным поляризатором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема перестраиваемой АО фильтрации неполяризованного излучения суперконтинуума на основе разветвленного многомодового волокна-объединителя накачки и компенсирующих хроматический сдвиг клиньев позволила увеличить мощность из-

лучения на выходе АОПФ до 2,2 раз по сравнению с использованием одного порядка дифракции в схеме с линейным поляризатором. Пропускание ОС объединения дифракционных порядков АОПФ составило 78%.

Возможность экспериментального определения хроматического сдвига и изготовления индивидуальных компенсационных клиньев позволяет применять предложенный подход для АОПФ произвольной конфигурации. Представленная ОС может быть использована в качестве осветительной в различных задачах, где требуется перестраиваемая спектральная фильтрация излучения с минимально допустимыми потерями мощности излучения и поляризационного состава.

Направление дальнейших исследований включает проведение экспериментов в мультичастотном режиме работы АОПФ, когда фильтрация проходит на нескольких произвольных длинах волн одновременно. Это позволит применять предложенную ОС в широком круге задач, в том числе в задачах воспроизведения цвета, например в колориметрии [31, 32].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Goutzoulis A.P. Design and fabrication of acousto-optic devices. N.Y.: CRC Press, 1994. 520 p.
- Волошинов В.Б., Молчанов В.Я., Бабкина Т.М. Акустооптический фильтр неполяризованного электромагнитного излучения // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 9. С. 93–98.
Voloshinov V.B., Molchanov V.Y., Babkina T.M. Acousto-optical filter of nonpolarized electromagnetic radiation // Technical Physics. 2000. V. 70. № 9. P. 1186–1191.
- Электронный ресурс URL: <https://yslphotonics.com/Home/Index/Product/details/id/22.html> (YSL Photonics / AOTF) (дата обращения 06.12.2023).
Electronic resource URL: <https://yslphotonics.com/Home/Index/Product/details/id/22.html> (YSL Photonics / AOTF) (accessed 12/06/2023).
- Электронный ресурс URL: <https://yslphotonics.com/Home/Index/Product/details/id/31.html> (YSL Photonics / AOTF-PRO) (дата обращения 06.12.2023).
Electronic resource URL: <https://yslphotonics.com/Home/Index/Product/details/id/31.html> (YSL Photonics / AOTF-PRO) (accessed 12/06/2023).
- Hayden Smith Wm., Smith K.M. A polarimetric spectral imager using acousto-optic tunable filters // Exp. Astron. 1990. V. 1. № 5. P. 329–343. <https://doi.org/10.1007/BF00454329>
- Cheng L.-J., Hamilton M., Mahoney C., et al. Field observations using an AOTF polarimetric imaging spectrometer // Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. V. 1: AVIRIS Workshop. 1993. P. 19–22.
- Glenar D.A., Hillman J.J., Saif B., et al. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 31. P. 7412–7424. <http://doi.org/10.1364/AO.33.007412>
- Rossi L., Marcq E., Montmessin F., et al. Preliminary study of Venus cloud layers with polarimetric data from SPICAV/VEX // Planetary and Space Sci. 2015. V. 113–114. P. 159–168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2014.11.011>
- Belyaev D.A., Yushkov K.B., Anikin S.P., et al. Compact acousto-optic imaging spectro-polarimeter for mineralogical investigations in the near infrared // Opt. Exp. 2017. V. 25. № 21. P. 25980. <https://doi.org/10.1364/OE.25.025980>
- Jaiswal B., Singh S., Jain A., et al. AOTF based spectro-polarimeter for observing Earth as an Exoplanet. 2023. 23 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2302.10712>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.10.2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.10712>
Jaiswal B., Singh S., Jain A., et al. AOTF based spectro-polarimeter for observing Earth as an Exoplanet. 2023. 23 p. [Electronic resource]. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2302.10712>, free. (accessed 10/20/2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.10712>
- Yuan Y., Hwang J.Y., Krishnamoorthy M., et al. High-throughput acousto-optic-tunable-filter-based time-resolved fluorescence spectrometer for optical biopsy // Opt. Lett. 2009. V. 34. № 7. P. 1132–1134. <http://doi.org/10.1364/ol.34.001132>
- Anchutkin V.S., Belsky A.B., Voloshinov V.B., et al. Hyperspectral optical system with spatial separation of images possessing different polarization direction // Proc. SPIE. 2008. V. 7100. P. 71001D. <https://doi.org/10.1117/12.797729>
- Ryu S.Y., You J.-W., Kwak Y., et al. Design of a prism to compensate the angular-shift error of the acousto-optic tunable filter // Opt. Exp. 2008. V. 16. № 22. P. 17138–17147. <https://doi.org/10.1364/OE.16.017138>
- Vanhamel J., Dekemper E., Berkenbosch S., et al. Novel acousto-optical tunable filter (AOTF) based spectropolarimeter for the characterization of auroral emission // Instrumentation Sci. & Technol. 2021. V. 49. № 3. P. 245–257. <https://doi.org/10.1080/10739149.2020.1814809>
- Zhang H., Zhao H., Guo Q., et al. Polarization-multiplexed high-throughput AOTF-based spectral imaging system // Materials. 2023. V. 16. № 12. P. 4243. <http://doi.org/10.3390/ma16124243>
- Abdlaty R., Orepoulos J., Sinclair P., et al. High throughput AOTF hyperspectral imager for randomly polarized light // Photonics. 2018. V. 5. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.3390/photonics5010003>
- Романова Г.Э., Батшев В.И., Беляева А.С. Проектирование оптической осветительной системы для перестраиваемого источника на акустооптической фильтрации // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 2. С. 12–19. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-02-12-19>
Romanova G.E., Batshev V.I., and Beliaeva A.S. Design of an optical illumination system for a tunable source with acousto-optical filtering // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. № 2. P. 66–71. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000066>
- Балакший В.И., Манцевич С.Н. Акустооптическая коллинеарная дифракция произвольно поляризованного света // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 11. С. 106–111.
Balakshy V.I., Mantsevich S.N. Acousto-optic collinear diffraction of arbitrarily polarized light // Tech. Phys. 2011. V. 56. № 11. P. 1646–1651. <https://doi.org/10.1134/S1063784211110041>
- Zhu Z., Brown T.G. Polarization properties of supercontinuum spectra generated in birefringent photonic crystal fibers // JOSA. B. 2004. V. 21. № 2. P. 249–257. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.21.000249>
- Епихин В.М., Калинников Ю.К. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции в неколлинеарном акустооптическом фильтре // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 2. С. 160–163.
Epikhin V.M., Kalinnikov Y.K. Compensation for spectral drift of the diffraction angle in a non-collinear acousto-optic filter [in Russian] // Technical Physics. 1989. V. 59. № 2. P. 160–163.
- Батшев В.И., Мачихин А.С., Козлов А.Б. и др. Перестраиваемый акустооптический фильтр для спектральных диапазонов 450...900 нм и 900...1700 нм // Радиотехн. и электрон. 2020. Т. 65. № 7. С. 667–673. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070025>
Batshev V.I., Machikhin A.S., Kozlov A.B., et al. Tunable acousto-optic filter for the 450–900 and 900–1700 nm spectral range // J. Commun. Technol. Electron. 2020. V. 65. № 7. P. 800–805. <https://doi.org/10.1134/S1064226920070025>
- Batshev V., Machikhin A., Gorevoy A., et al. Spectral imaging experiments with various optical schemes based on the same AOTF // Materials. 2021. V. 14. № 11. P. 2984. <https://doi.org/10.3390/ma14112984>
- Польщикова О.В., Горевой А.В., Мачихин А.С. Экспериментальное исследование влияния функции пропускания перестраиваемого акустооптического фильтра на характеристики интерференционной

- картины во внеосевой схеме цифровой голографии // Светотехника. 2022. № 5. С. 38–43.
- Polschikova O.V., Gorevoy A.V., Machikhin A.S. Experimental study of the influence of the transmission function of acousto-optic tuneable filter on the interference pattern in off-axis digital holography // Light & Eng. 2022. V. 30. № 6. P. 43–50. <https://doi.org/10.33383/2022-083>
24. Польщикова О.В., Сударев А.А., Зотов К.В. и др. Перестраиваемая акустооптическая фильтрация неполяризованного излучения суперконтинуума // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Тр. XVI Междунар. научно-техн. конф. Суздаль, Россия. 09–12 октября 2023. ISBN 978-5-6051133-3-1. М.: НТЦ УП РАН, 2023. С. 81–86. <https://doi.org/10.25210/armimp-2023-DHZLRW>
- Polschikova O.V., Sudarev A.A., Zotov K.V., et al. Tunable acousto-optic filtering of unpolarized supercontinuum radiation [in Russian] // Acousto-optic and radar methods for information measurements and processing: Proceedings of the XVI International scientific and technical conference. Suzdal, Russia. October 09–12, 2023. ISBN 978-5-6051133-3-1. Moscow: STC UI RAS, 2023. P. 81–86. <https://doi.org/10.25210/armimp-2023-DHZLRW>
25. Буров Н.В., Лин Дж., Ромашова В.Б. Высокомощные волоконные объединители // Фотоника. 2018. Т. 12. № 1(69). С. 16–28. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.69.1.16.28>
- Burov N.V., Lin J., Romashova V.B. High-power fiber combiners // Photonics Russia. 2018. V. 12. № 1(69). P. 16–28. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.69.1.16.28>
26. Paschotta R. Fiber-optic pump combiners // RP Photonics Encyclopedia. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.61835/tyd>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.12.2023).
- Paschotta R. Fiber-optic pump combiners // RP Photonics Encyclopedia. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.61835/tyd>, free (accessed 12/15/2023).
27. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber // Opt. Lett. 1997. V. 22. № 13. P. 961–963. <https://doi.org/10.1364/OL.22.000961>
28. Kupianskyi H., Horsley S.A.R., Phillips D.B. All-optically untangling light propagation through multimode fibers // Optica. 2024. V. 11. № 1. P. 101–112. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.502144>
29. Электронный ресурс URL: <https://www.leukos-laser.com/our-products/bebop/> (Leukos / Bebop — Leukos laser) (дата обращения 06.12.2023). Electronic resource URL: <https://www.leukos-laser.com/our-products/bebop/> (Leukos / Bebop — Leukos laser) (accessed 12/06/2023).
30. Электронный ресурс URL: <https://www.nktphotonics.com/products/supercontinuum-white-light-lasers/superk-varia/> (NKT Photonics / SuperK VARIA) (дата обращения 06.12.2023). Electronic resource URL: <https://www.nktphotonics.com/products/supercontinuum-white-light-lasers/superk-varia/> (NKT Photonics / SuperK VARIA) (accessed 12/06/2023).
31. Беляева А.С., Романова Г.Э., Шарикова М.О. Оценка точности воспроизведения цвета перестраиваемым источником на базе акустооптического фильтра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 39–49. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-39-49>
- Beliaeva A.S., Romanova G.E., Sharikova M.O. Estimation of color reproduction accuracy by a tunable source based on an acousto-optical tunable filter // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 11. P. 00–00. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000000>
32. Machikhin A., Beliaeva A., Romanova G., et al. Color reproduction by multi-wavelength Bragg diffraction of white light // Materials. 2023. V. 16. № 12. P. 4382. <https://doi.org/10.3390/ma16124382>

АВТОРЫ

Антон Андреевич Сударев — студент бакалавриата МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; стажер-исследователь, Центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0008-0481-2467>; sudarev.aa@ntcup.ru

Ольга Валерьевна Польщикова — младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 56941913700; <https://orcid.org/0000-0003-2777-9467>; polschikova@ntcup.ru

Кирилл Вячеславович Зотов — генеральный директор ООО «Солитон Фотоникс», Москва, Троицк, 108842, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-1825-9925>; kirill.v.zotov@gmail.com

AUTHORS

Anton A. Sudarev — Undergraduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Research Assistant, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0008-0481-2467>; sudarev.aa@ntcup.ru

Olga V. Polschikova — Junior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 56941913700; <https://orcid.org/0000-0003-2777-9467>; polschikova@ntcup.ru

Kirill V. Zotov — CEO of Soliton Photonics LLC, Moscow, Troitsk, 108842, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-1825-9925>; kirill.v.zotov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.01.2024
Одобрена после рецензирования 11.03.2024
Принята к печати 30.05.2024

The article was submitted to the editorial office 31.01.2024
Approved after review 11.03.2024
Accepted for publication 30.05.2024