

Адаптивное управление пространственным профилем излучения в системе когерентного сложения пучков волоконных лазеров*

Е.В. Адамов, В.П. Аксёнов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов, М.Е. Левицкий

В статье представлены теоретические и экспериментальные результаты исследования нового подхода, основанного на когерентном сложении в дальнем оптическом поле излучения решетки волоконных лазеров с управляемыми фазами, когда результирующее распределение интенсивности формируется в результате сложения и интерференции волновых полей субпучков и определяется управляемыми фазовыми соотношениями между субпучками. Рассмотрены возможности формирования заданного пространственного профиля излучения в скалярных и векторных синтезированных пучках, характеризующихся неоднородным локальным распределением интенсивности (структурированный свет) и перспективы дальнейших исследований. Обсуждается концепция универсального «цифрового лазера».

Ключевые слова: когерентное сложение, структурированный свет, поляризация, орбитальный угловой момент, пространственный модулятор света, адаптивное управление.

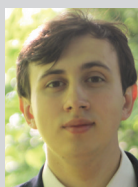
*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20115).

Введение

В последнее время наблюдается заметный рост числа областей, в которых лазерные источники излучения находят практическое применение. В связи с этим возникает необходимость решения задач динамической перестройки спектральных, временных, пространственных и поляризационных характеристик лазерных пучков. Динамическая перестройка распределения интенсивности в дальнем оптическом поле или в фокусе линзы представляется достаточно сложной задачей, в особенности для лазеров высокой мощности, поскольку оптический резонатор формирует ограниченный набор поперечных мод, определяющих итоговое распределение интенсивности в лазерном пучке. Использование стати-

ческих рефракционных или дифракционных внутри- и внерезонаторных элементов для перестройки поля излучения не позволяет осуществлять гибкое управление, а известные пространственные жидкокристаллические модуляторы света ограничивают допустимую мощность излучения. Известный метод когерентного сложения пучков волоконных лазеров характеризуется наличием высокоскоростного фазоуправляющего элемента (фазового модулятора) в каждом канале решетки излучателей, что позволяет управлять распределением фазы в синтезированном пучке, образующимся в результате перекрытия и интерференции отдельных субпучков в дальнем оптическом поле или в фокальной плоскости фокусирующей линзы.

Предложенный нами метод, основанный на когерентном сложении излучения матрицы волоконных излучателей с управляемой фазой, позволяет без ограничения на мощность излучения формировать синтезированный пучок как с гауссовым распределением интенсивности при сложении синфазных субпучков, так и с произвольно заданным распределением интенсивности, вид которого



АДАМОВ
Егор Владимирович
Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН



АКСЁНОВ
Валерий Петрович
Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН



ДУДОРОВ
Вадим Витальевич
Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН



КОЛОСОВ
Валерий Викторович
Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН



ЛЕВИЦКИЙ
Михаил Ефимович
Институт оптики атмосферы
имени В.Е. Зуева СО РАН

определяется соотношениями между фазами, амплитудами и направлением поляризации субпучков. Данный метод теоретически обоснован и экспериментально реализован как для сложения скалярных пучков с однонаправленной линейной поляризацией, так и для векторных пучков, когда каждый субпучок решетки имеет индивидуальное направление линейной поляризации.

Основные результаты

Технология когерентного сложения пучков первоначально развивалась в интересах задач направленной передачи энергии. Возможность применения данной технологии для формирования волн, несущих орбитальный угловой момент (ОУМ), экспериментально была продемонстрирована в [1]. В дальнейшем данная технология нашла свое применение в задачах управления распределением интенсивности в заданной плоскости [2–4]. В [4, 5] нами была предложена схема (рис. 1), которая отличается от традиционной схемы когерентного сложения пучков. Отличие заключается в размещении фазового корректора 8 (жидкокристаллического пространственного модулятора света – SLM или цифрового микрзеркального устройства – DMD) в контуре обратной связи в плоскости, где отдельные субпучки не перекрываются. Важной особенностью такой адаптивной схемы управления пространственным профилем синтезированного пучка является то, что управляющий (фазовый) элемент вынесен из силового канала

ла и не ограничивает мощность генерируемого сигнала.

Работа контура обратной связи, управляемого многоканальным оптимизирующим процессором 15, реализующим алгоритм стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD) [6], сводится к формированию в плоскости II распределения интенсивности, обладающего глобальным максимумом на оси синтезированного пучка. Математическая модель, особенности использования фазовых корректоров различных типов, схема эксперимента (рис. 1) и результаты подробно рассмотрены в работах [4, 5]. Показано, что при изменении распределения сдвигов фаз на фазовом корректоре работа оптимизирующего процессора обеспечивает сохранение максимума интенсивности на оси в плоскости II, но при этом изменяется распределение в плоскости I.

Первоначально нами были получены результаты при когерентном сложении скалярных пучков, когда все поляризации субпучков имеют общее направление. На рис. 2 представлены результаты формирования синтезированных пучков с различными значениями ОУМ ($l=0, 1, 2$). Распределения интенсивности данных пучков обладают вращательной симметрией.

Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что данная технология позволяет формировать пучки более сложной формы. Более того, появляется возможность осуществлять вращение распределения интенсивности, управляя распределением фаз на корректоре.

Когерентное сложение пучков, обладающих разными направлениями линейной поляризации (векторных пучков), обеспечивает дополнительную степень свободы для формирования пучков с различными распределениями интенсивности [5]. На рис. 4 представлены численные и экспериментальные результаты по формированию распределения интенсивности синтезированного пучка в дальнем оптическом поле путем управления фазой 6 субпучков, образующих синтезированную апертуру в начальной плоскости,

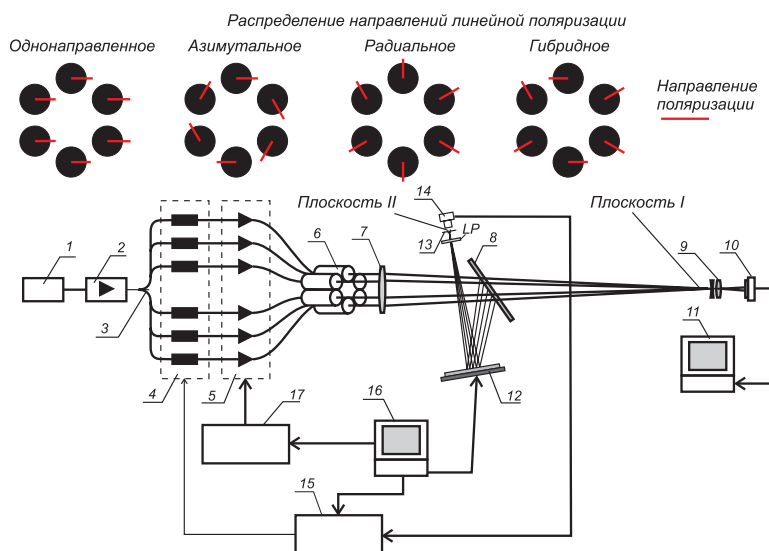


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – узкополосный лазер, 2 – волоконно-оптический усилитель, 3 – волоконный разветвитель 1x8, 4 – фазовые модуляторы, 5 – усилители мощности, 6 – волоконные коллиматоры, 7 – длиннофокусная линза, 8 – светораспределительная пластина, 9 – микрообъектив 5x, 10 – измеритель пространственных характеристик пучка, 11 – компьютер, 12 – фазовый корректор (DMD или SLM), 13 – малая диафрагма, 14 – широкополосный фотоприемник, 15 – многоканальный оптимизирующий SPGD-процессор, 16 – управляющий компьютер, 17 – контроллер амплитуды, LP – линейный поляризатор. В верхней части рисунка – вид синтезированной апертуры для однонаправленного, азимутального, радиального и гибридного направлений поляризации субпучков.

при сложении в дальнем оптическом поле векторных пучков с азимутальным и радиальным распределением направлений линейной поляризации в начальной плоскости.

Сравнение результатов, представленных на рис. 4, указывает на хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных, что демонстрирует корректность построенной математической модели. Увеличение числа субпучков повышает число степеней свободы и, соответственно, расширяет возможности метода. Однако увеличение числа субпучков экспериментальной установки связано с существенными затратами. Поэтому определение потенциальных возможностей предложенного метода было выполнено методом численного моделирования, получившего экспериментальное подтверждение. На рис. 5 на примере формирования плосковершинного распределения интенсивности прямоугольной формы демонстрируется потенциал метода по формированию сложных распределений интенсивности в зависимости от количества субпучков в схеме когерентного сложения.

Представленные результаты показывают, что управление фазой и амплитудой пучков в начальной плоскости позволяет добиться удовлетворительного результата для формирования требуемого плосковершинного распределения интенсивности (правый верхний угол рисунков) уже при $N \geq 19$. На рис. 6 представлены результаты формирования плосковершинного распределения интенсивности квадратной, круглой и треугольной форм для 37 субпучков в схеме когерентного сложения.

Видно, что во всех случаях использование синтезированной апертуры с числом субпучков $N_{sub}=37$ позволяет достигнуть удовлетворительного результата.

Итоги и перспективы исследований

В результате выполнения проекта разработан новый метод адаптивного управления распределением интенсивности излучения в системе когерент-

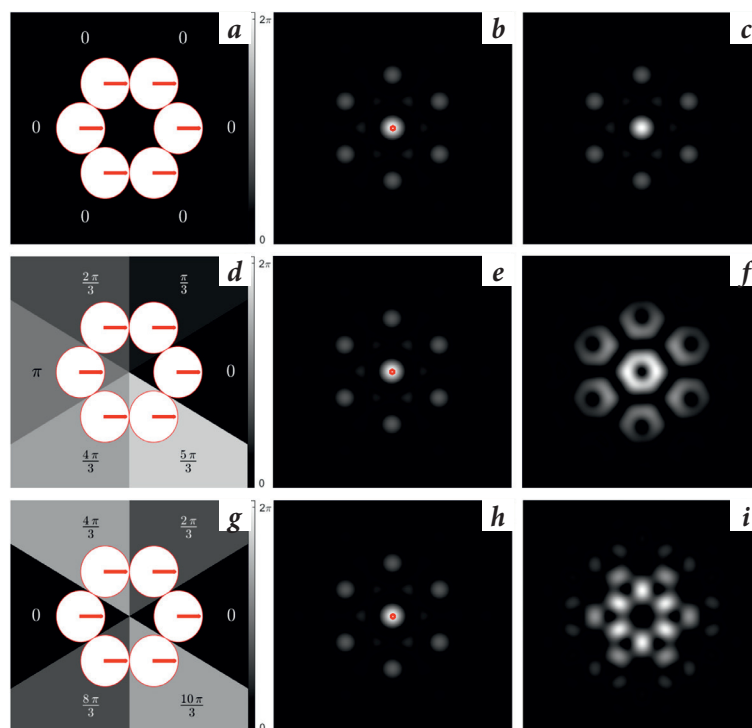


Рис. 2. Результаты численного моделирования формирования поля в результате скалярного сложения пучков. ОУМ=0 (a, b, c); ОУМ=1 (d, e, f); ОУМ=2 (g, h, i). Сдвиги фаз фазового корректора (a, d, g); распределение интенсивности в плоскости II (b, e, h); распределение интенсивности в плоскости I (c, f, i).



Рис. 3. Вращение распределения интенсивности.

ного сложения пучков волоконных лазеров, защищенный патентом Российской Федерации [7]. Разработана математическая модель процесса управления распределением интенсивности синтезированного пучка путем задания распределений фаз, амплитуд и направлений поляризации субпучков. Эффективность метода подтверждена экспериментально.

Целью наших дальнейших работ является исследование изменения поляризационной структуры синтезированных пучков в результате управления фазовыми соотношениями и разработка новых методов управления начальным распределением направлений линейной поляризации субпучков решетки. В последнее десятилетие ведущими специалистами [8, 9] были высказаны предложения о создании «цифрового лазера». Под этим термином подразумевалась лазерная система, в которой структура пучка изменялась электронным способом. Однако предложенные авторами системы осу-

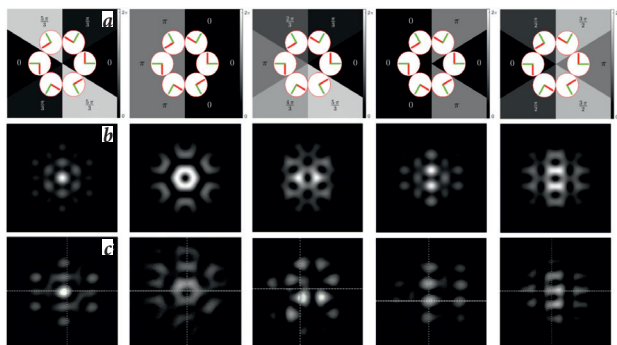


Рис. 4. Формирование интенсивности при фазовом управлении решеткой из 6 пучков с азимутальным и радиальным начальным распределением направлений линейной поляризации: а – распределение направлений линейной поляризации (линии) и соответствующие им сдвиги фаз фазового корректора (численные значения и величины в градациях серого); б – результаты численного моделирования; с – результаты эксперимента.

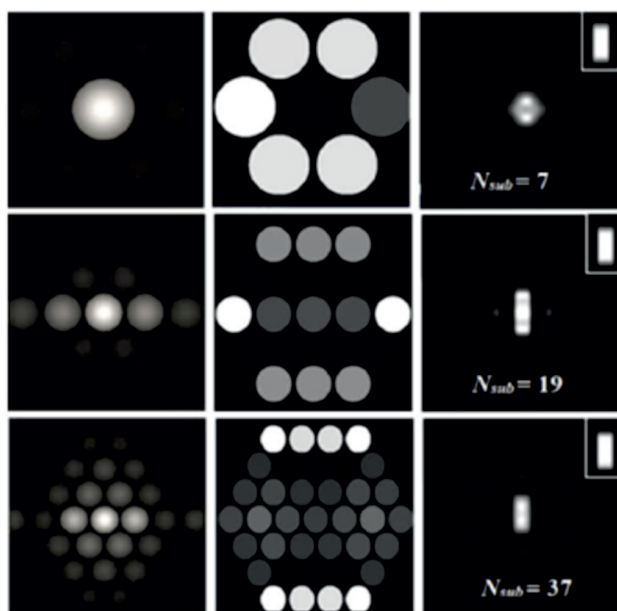


Рис. 5. Результаты решения обратной задачи по формированию плоско-вершинного распределения интенсивности с помощью фазоуправляемой решетки волоконных лазеров. Начальные распределения фазы (слева), амплитуды субпучков (в центре) и сформированное распределение интенсивности (справа) для решетки из N_{sub} пучков. Требуемое распределение интенсивности изображено в верхнем правом углу.

ществляли управление только величиной орбитально-го углового момента излучения. Результаты, представленные на рис. 7, показывают, что вследствие фазового управления субпучками с различными направлениями линейной поляризации можно создавать пучки структурированного света, обладающие не только неоднородным распределением интенсивности и фазы, но и неоднородным распределением поляризации.

Таким образом, развитие нашего подхода позволит заложить основу новой концепции полностью «цифрового лазера» с возможностью управления распределением интенсивности генерируемого пучка, его пространственной когерентностью и неоднородным

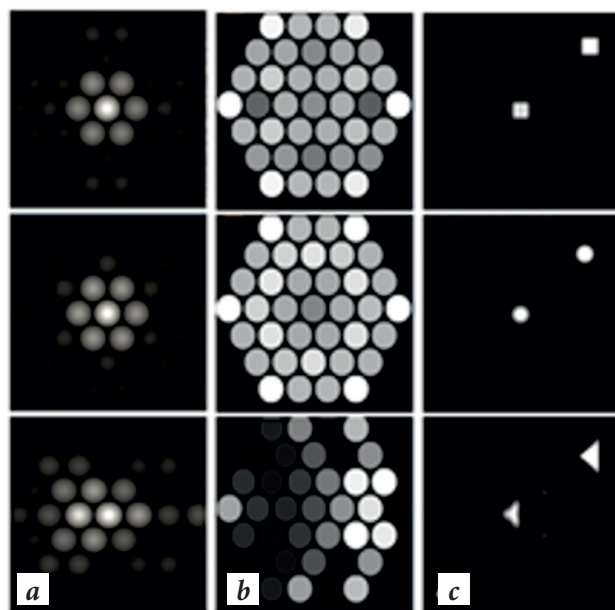


Рис. 6. Результаты решения обратной задачи по формированию плоско-вершинного распределения интенсивности с помощью фазоуправляемой решетки волоконных лазеров. Начальные распределения фазы (а), амплитуды субпучков (б) и сформированное распределение интенсивности (с) для решетки из $N_{sub}=37$ пучков. Требуемое распределение интенсивности изображено в верхнем правом углу.

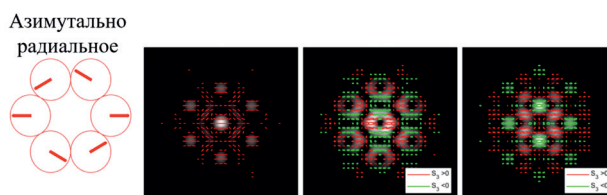


Рис. 7. Распределения линейной и эллиптической поляризаций для гибридного азимутально-радиального распределения наклонов линейной поляризации субпучков. Зеленые эллипсы соответствуют левой поляризации, красные – правой.

распределением поляризации в режиме реального времени. Возможность оперировать параметрами структурированных световых пучков способна, по нашему мнению, существенно расширить возможности научных исследований и будет востребована в задачах передачи энергии и информации через атмосферу, а также для технологических применений.

Предложенный подход, по нашему мнению, может быть использован не только применительно к решеткам непрерывных волоконных лазеров, но и для импульсно-периодических лазеров с частотой повторения импульсов более 10 кГц. Актуальность когерентного сложения пучков фемтосекундных лазеров обсуждалась в работах [10–12].

Литература

1. В.П. Аксенов, В.В. Дудоров, В.В. Колосов, М.Е. Левицкий, Т.Д. Петухов, А.П. Ростов
В Мат. XXIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (РФ, Иркутск, 3–7 июля 2017 г.), РФ, Томск, Издательство ИОА СО РАН, 2017, с. В345–В348. ([https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/B\(1\).pdf](https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/B(1).pdf)).
2. V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky, T.D. Petukhov, A.P. Rostov
Proc. SPIE, 2018, 10787. DOI: 10.1117/12.2502158.
3. V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky, T.D. Petukhov
Proc. SPIE, 2019, 11322. DOI: 10.1117/12.2550555.
4. E.V. Adamov, V.P. Aksenov, V.V. Atuchin, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky
OSA Cont. 2021, 4(1), 182. DOI: 10.1364/OSAC.423956.
5. E.V. Adamov, V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky
Opt. Laser Technol., 2022, 154, 108351. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108351.
6. M. Voronov, G. Cerhart, J. Ricklin
Opt. Lett., 1997, 20(12), 907. DOI: 10.1364/OL.22.000907.
7. В.В. Колосов, М.Е. Левицкий, В.П. Аксенов, В.В. Дудоров
Пат. РФ, 2716887, 2019.
8. S. Ngcobo, I. Litvin, L. Burger, A. Forbes
Nat. Commun., 2013, 4, 2289. DOI: 10.1038/ncomms3289.
9. J.-C. Chanteloup, S. Belanger, L. Daniault, I. Fsaïfes, M. Vienhardt, J. Bourderionnet, C. Larat, E. Lallier, A. Brignon
Laser Focus World, 2021, 57(6), 27. DOI: 10.1117/12.2576606.
10. S.N. Bagayev, V.I. Trunov, E.V. Pestryakov, V.E. Leschenko, S.A. Frolov, V.A. Vasiliev
Opt. Spectrosc., 2013, 115(3), 311. DOI: 10.1134/S0030400X13090051.
11. A. Andrianov, N. Kalinin, T. Anashkina, G. Leuchs
Opt. Lett., 2020, 45(17), 4774. DOI: 10.1364/OL.391259.
12. I. Fsaïfes, C.-A. Ranély-Vergé-Dépré, M. Veinhard, S. Belanger, J.-C. Chanteloup
Opt. Express, 2023, 31(5), 8217. DOI: 10.1364/OE.474607.

English

Adaptive Control of the Spatial Profile of Radiation in the System of Coherent Beam Combining of Fiber Laser Beams*

Egor V. Adamov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS
1 Academician Zuev Sqr.,
Tomsk, 634055, Russia
adamov@iao.ru

Valerii P. Aksenov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS
1 Academician Zuev Sqr.,
Tomsk, 634055, Russia
avp@iao.ru

Vadim V. Dudorov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS
1 Academician Zuev Sqr.,
Tomsk, 634055, Russia
dvv@iao.ru

Valeriy V. Kolosov

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS
1 Academician Zuev Sqr.,
Tomsk, 634055, Russia
kvv@iao.ru

Mikhail E. Levitskii

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS
1 Academician Zuev Sqr.,
Tomsk, 634055, Russia
top@iao.ru

Abstract

A new approach based on coherent beam combining of radiation emitted by an array of phase controlled fiber lasers in the far optical field is studied theoretically and experimentally. In this case, the resultant intensity distribution is formed as a result of combining and interference of wave fields of subbeams and determined by controlled phase relations between subbeams. The feasibility of forming a preset spatial profile of radiation in scalar and vector synthesized beams characterized by the inhomogeneous local intensity distribution (structured radiation) is considered, and promises for further investigations are outlined. The concept of a versatile “digital laser” is formulated.

Keywords: coherent beam combining, structured radiation, polarization, orbital angular momentum, spatial light modulator, adaptive control.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-20115).

Images & Tables

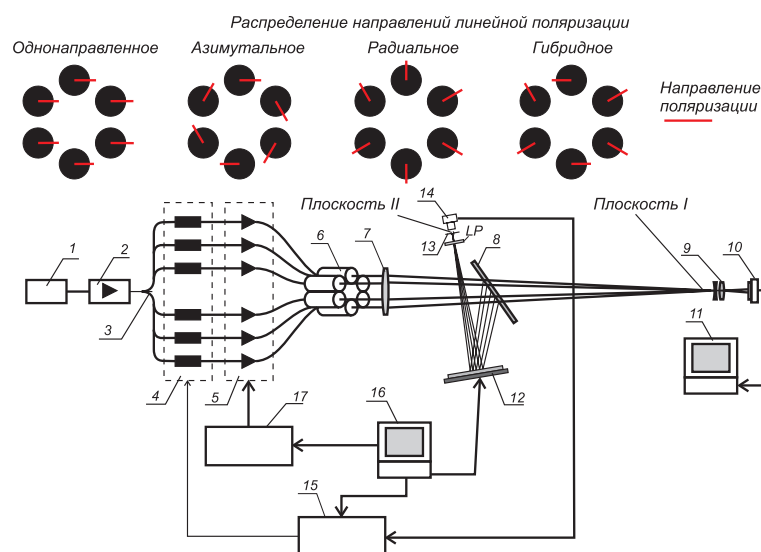


Fig. 1. Block diagram of the experiment: narrowband laser 1, fiber optic amplifier 2, 1x8 fiber splitter 3, phase modulators 4, power amplifiers 5, fiber collimators 6, long-focus lens 7, beam-splitting plate 8, 5x micro-objective 9, meter of spatial characteristics of the beam 10, computer 11, phase corrector (DMD or SLM) 12, small diaphragm 13, broadband photodetector 14, multichannel optimizing SPGD processor 15, control computer 16, amplitude controller 17, linear polarizer LP. Top panel: synthesized aperture for unidirectional, azimuthal, radial and hybrid subbeam polarization directions.

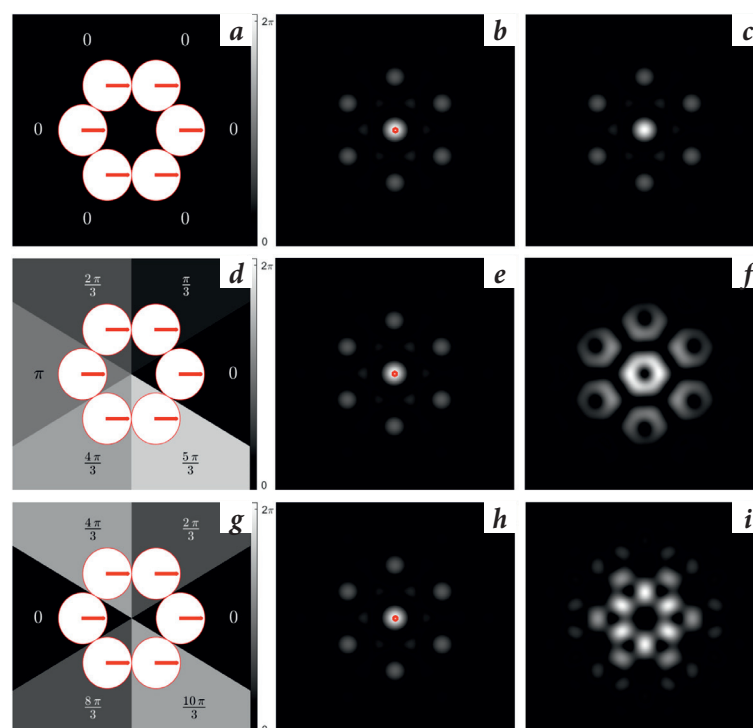


Fig. 2. Results of numerical simulation of field formation as a result of scalar beam combining. OAM = 0 (a, b, c); 1 (d, e, f); 2 (g, h, i). Phase shifts of the phase corrector (a, d, g); intensity distribution in plane II (b, e, h); intensity distribution in plane I (c, f, i).



Fig. 3. Rotation of the intensity distribution.

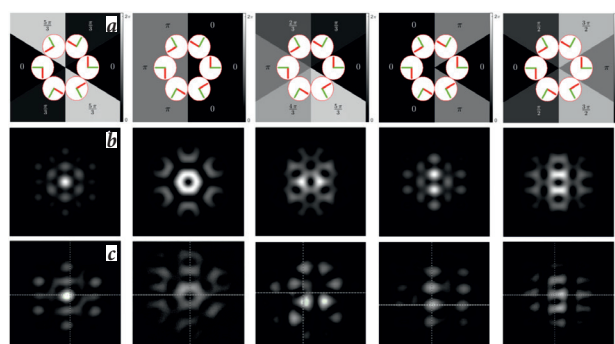


Fig. 4. Formation of intensity at phase control of an array of six beams with the azimuthal and radial initial distribution of directions of linear polarization: a – distribution of directions of linear polarization (lines) and corresponding phase shifts of the phase corrector (numerical and grayscale values); b – results of numerical simulation; c – experimental results.

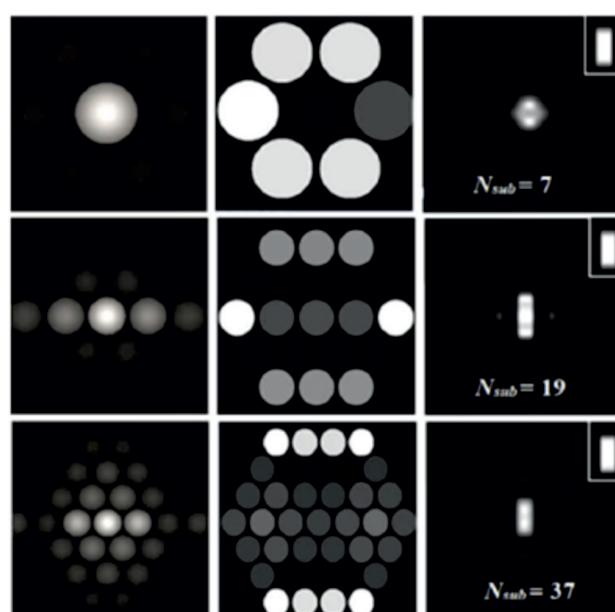


Fig. 5. Results of solution of the inverse problem on formation of the flat-top intensity distribution using a phase-controlled array of fiber lasers: (on the left) initial phase distributions, (in the centre) subbeam amplitudes, and (on the right) resultant intensity distribution for the array of N_{sub} subbeams. The desired intensity distribution is shown in the inset in the top right corner.

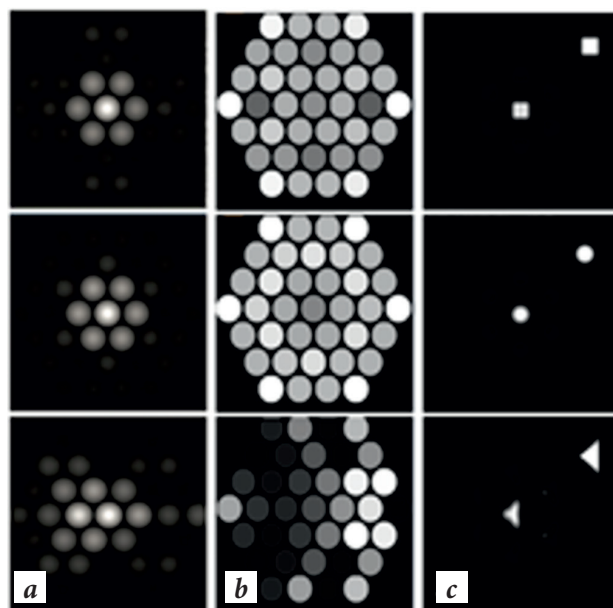


Fig. 6. Results of solution of the inverse problem on formation of the flat-top intensity distribution using a phase-controlled array of fiber lasers: *a* – initial phase distributions; *b* – subbeam amplitudes, and *c* – resultant intensity distribution for the array of $N_{\text{sub}}=37$ subbeams. The desired intensity distribution is shown in the inset in the top right corner.

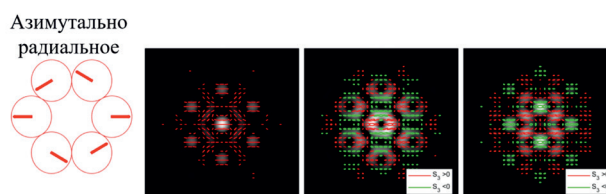


Fig. 7. Distributions of linear and elliptical polarization for the hybrid azimuthal-radial distribution of slopes of linear polarization of the subbeams. Green ellipses are for the left polarization, and red ones are for the right polarization.

References

1. V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitskii, T.D. Petukhov, A.P. Rostov
In Proc. XXIII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" (RF, Irkutsk, 3–7 July, 2017), RF, Tomsk, IAO SB RAS Publ. House, 2017, pp. B345–B348 (in Russian). ([https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/B\(1\).pdf](https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/23/B(1).pdf)).
2. V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky, T.D. Petukhov, A.P. Rostov
Proc. SPIE, 2018, 10787. DOI: 10.1117/12.2502158.
3. V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky, T.D. Petukhov
Proc. SPIE, 2019, 11322. DOI: 10.1117/12.2550555.
4. E.V. Adamov, V.P. Aksenov, V.V. Atuchin, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitsky
OSA Cont. 2021, 4(1), 182. DOI: 10.1364/OSAC.423956.
5. E.V. Adamov, V.P. Aksenov, V.V. Dudorov, V.V. Kolosov, M.E. Levitskii
Opt. Laser Technol., 2022, 154, 108351. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108351.
6. M. Voronov, G. Cerhart, J. Ricklin
Opt. Lett., 1997, 20(12), 907. DOI: 10.1364/OL.22.000907.
7. V.V. Kolosov, M.E. Levitskii, V.P. Aksenov, V.V. Dudorov
Pat. RU, 2716887, 2019 (in Russian).
8. S. Ngcobo, I. Litvin, L. Burger, A. Forbes
Nat. Commun., 2013, 4, 2289. DOI: 10.1038/ncomms3289.
9. J.-C. Chanteloup, S. Belanger, L. Daniault, I. Fsaïfes, M. Vienhardt, J. Bourderionnet, C. Larat, E. Lallier, A. Brignon
Laser Focus World, 2021, 57(6), 27. DOI: 10.1117/12.2576606.
10. S.N. Bagayev, V.I. Trunov, E.V. Pestryakov, V.E. Leschenko, S.A. Frolov, V.A. Vasiliev
Opt. Spectrosc., 2013, 115(3), 311. DOI: 10.1134/S0030400X13090051.
11. A. Andrianov, N. Kalinin, T. Anashkina, G. Leuchs
Opt. Lett., 2020, 45(17), 4774. DOI: 10.1364/OL.391259.
12. I. Fsaïfes, C.-A. Ranély-Vergé-Dépré, M. Veinhard, S. Belanger, J.-C. Chanteloup
Opt. Express, 2023, 31(5), 8217. DOI: 10.1364/OE.474607.