

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

✉ П. В. Жуланова, И. В. Громов

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

✉ p.zhulanova@g.nsu.ru

Формирование лазерных пучков с заданным профилем интенсивности и волновым фронтом является одной из важных задач оптики и находит применение в таких областях, как оптическая микроскопия, биофотоника, нанофотоника, лазерная обработка материалов, оптические пинцеты. Для преобразования лазерного пучка часто применяются оптические схемы на основе рефракционных оптических элементов со свободной поверхностью [1], которые можно создавать с помощью таких методов, как 3D-печать или литография (например, литография в грациях серого). Стоит отметить, что для решения задачи одновременного формирования желаемого профиля интенсивности и волнового фронта необходимы как минимум две таких поверхности. В стандартных методах проектирования расчет формы данных оптических элементов сводится к сложной математической задаче, поскольку необходимо решение нелинейного уравнения в частных производных типа Монжа — Ампера [2].

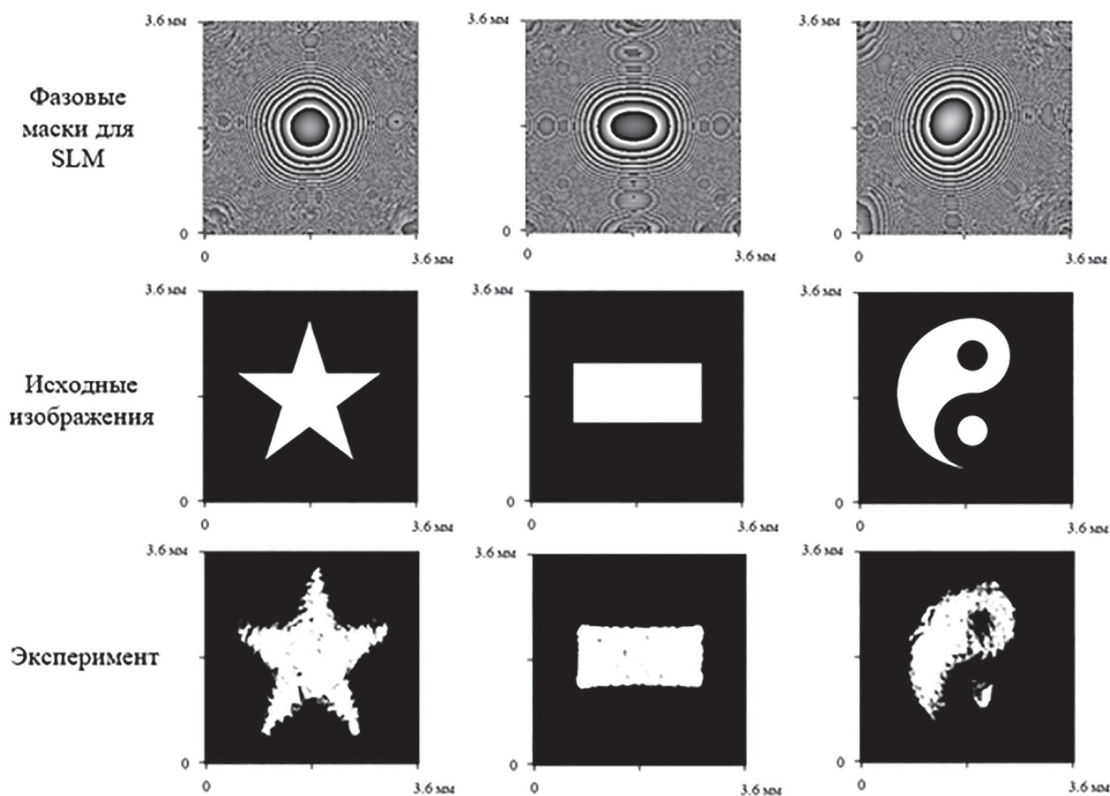
Целью данной работы была разработка численного метода проектирования линз со свободной поверхностью, основанная на применении процедуры разворачивания фазы к фазовым маскам, рассчитанным при помощи итерационных алгоритмов восстановления фазы волнового фронта. Одним из таких алгоритмов является алгоритм Герхберга — Сакстона [3], основанный на прямом и обратном преобразовании Фурье для моделирования прямого и обратного распространения света. Одним из недостатков данного подхода является то, что получаемые решения для фазовой маски обычно имеют дифракционный характер и их использование приводит к большому уровню оптических потерь. Другой итерационный алгоритм, рассмотренный в данной работе, основан на физической модели распространения волнового фронта [4], что позволяет избежать преобразования Фурье в расчетах и, следовательно, линз в оптической системе.

Особенностью нового подхода также является использование метода морфинга, то есть «плавного изменения», целевого распределения интенсивности на основе решения уравнения диффузии. Уникальность данного подхода, в отличие от классической реализации итерационных алгоритмов по восстановлению фазы, заключается в том, что удается получить решения для волнового фронта в виде гладкой функции, что необходимо для создания рефракционных оптических элементов со свободной поверхностью (линз или зеркал) и позволяет формировать пучки с гладким профилем интенсивности.

Для практической демонстрации метода была выбрана задача формирования изображения при помощи чисто фазовой маски, для создания которой использовался пространственный модулятор света (SLM) [5], работающий в режиме фазовой модуляции. Схема экспериментальной установки включала в себя волоконный лазер с длиной волны 1560 нм, излучение которого по одномодовому оптоволокну подавалось на коллиматор, после чего полученный гауссов пучок с радиусом 1,7 мм падал на поверхность SLM (Pluto 2.1 Holoeye Photonocs AG). На рассто-

янии 150 мм от поверхности SLM располагалась камера, которая детектировала отраженный от SLM луч, поэтому в данной схеме для расчета фазовых масок использовался итерационный алгоритм, основанный на физической модели распространения света.

Результаты экспериментальной проверки рассчитанных фазовых масок приведены на рисунке: первая строчка представляет собой рассчитанные фазовые маски, отображаемые на SLM, вторая строчка — исходные растровые изображения, последняя строка — измеренные профили интенсивности генерируемых пучков. На рисунках видно, что итеративные алгоритмы, использующие метод морфинга, позволяют с высокой точностью рассчитывать фазовые маски для формирования изображений на выбранной целевой плоскости.



Результаты экспериментальной проверки, выполненной с помощью SLM

В заключение отметим, что представленная методология расчета фазовых масок может использоваться при моделировании рефракционных оптических элементов для преобразования выходных пучков диодных лазеров.

### Литература

1. Fang F. Z. et al. Manufacturing and measurement of freeform optics // *Cirp Annals*. 2013. Vol. 62 (2). P. 823–846.
2. Harald R., Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces // *JOSA A*. 2002. Vol. 19 (3). P. 590–595.
3. Zhao T., Chi Y. Modified Gerchberg–Saxton (GS) algorithm and its application // *Entropy*. 2020. Vol. 22 (12). P. 1354.
4. Radnatarov D., Kobtsev S. Phase front reconstruction by optical phase conjugation // *Proc. SPIE 12768, Holography, Diffractive Optics, and Applications XIII*. 2023. P. 1276827.
5. Martínez. J. L., Moreno I., Ahouzi E. Diffraction and signal processing experiments with a liquid crystal microdisplay // *Eur. J. Phys.* 2006. Vol. 27 (5). P. 1221.