

## Характеристики распространения регулярных амплитудно- и фазово-модулированных оптических полей, полученных с использованием пространственного модулятора света

А.А. Шарков,<sup>\*</sup> В.И. Мохов,<sup>†</sup> О.М. Вохник<sup>‡</sup>

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2*

(Поступила в редакцию 28.06.2024; подписана в печать 16.09.2024)

Экспериментально исследовано изменение пространственного распределения лазерного излучения после прохождения пространственного светового модулятора, вносящего регулярную двумерную амплитудно-фазовую и чисто фазовую модуляцию в поперечной плоскости пучка. Определено расстояние (расстояние Тальбо), на котором происходит воспроизведение двумерной поперечной структуры для обоих режимов модуляции. Проведено сравнение изменения параметров поперечных пространственных распределений для амплитудно-фазово-модулированного и фазово-модулированного пучков по мере их распространения. Показано, что глубина модуляции распределения интенсивности амплитудно-фазово-модулированного излучения значительно выше, чем фазово-модулированного, и это различие контраста сохраняется на всем пути распространения излучения. Полученные результаты могут быть использованы в задачах формирования пространственно-структурированного излучения для бесконтактного манипулирования частицами в различных средах.

PACS: 42.25.Bs; 42.79.-e.

УДК: 535.4.

Ключевые слова: пространственно-модулированные пучки, двумерное световое поле, пространственный световой модулятор, эффект Тальбо.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача о дифракционном распространении световых волн является одной из фундаментальных проблем оптики. К этому типу проблем относятся как вопросы распространения излучения в свободном пространстве, так и задачи, относящиеся к прохождению излучения через периодические структуры [1].

Не менее важен анализ дифракционных явлений и для многих прикладных исследований. К ним, в том числе, относятся вопросы о распространении излучения в атмосфере, распространении света в условиях самовоздействия, а также задачи о распространении излучения в случаях, когда известен первоначальный амплитудно-фазовый профиль излучения. Формирование упорядоченных пространственных массивов оптических полей весьма привлекательно для микроманипуляций в биологии, медицине и материаловедении, двумерного оптического захвата (создания массивов микромасштабных структур атомов в двух и трех измерениях), сортировки и так далее [2]. Отдельно следует указать на широкое использование регулярных оптических массивов в лазерной физике для синфазной генерации лазерных решеток [3, 4].

Существенное значение для наиболее эффективно-го использования структурированных световых полей имеют закономерности их изменения в процессе распространения. Исследования распространения двумер-

ной поперечной световой структуры, модулированной по амплитуде, ранее неоднократно проводились численно и экспериментально [5, 6]. При экспериментальной реализации амплитудно-структурированных поперечных распределений светового пучка в качестве модулятора служили различные амплитудные транспаранты. В настоящее время одним из основных способов получения амплитудно- и фазово-модулированного излучения является применение пространственного светового модулятора (ПСМ). Обычно он используется в качестве отражательного элемента, обеспечивая модуляцию фазы отраженного излучения. Однако, при работе в трансмиссионном режиме ПСМ может осуществлять модуляцию не только фазы, но и амплитуды. В этом случае после модулятора излучение может быть пространственно модулировано как только по фазе, так и по фазе, и по амплитуде. В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование закономерностей изменения при свободном распространении регулярной поперечной пространственной структуры интенсивности лазерного пучка, испытывавшего амплитудно-фазовую и чисто фазовую модуляцию. Проведено сопоставление изменений характеристик поперечной структуры излучения, происходящих в обоих режимах модуляции.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В настоящей работе для преобразования поперечной структуры лазерного излучения использован трансмиссионный пространственный световой модулятор (ПСМ), после прохождения которого поперечная структура излучения может быть как

\* [sharkov.aa20@physics.msu.ru](mailto:sharkov.aa20@physics.msu.ru)

† [mokhov.vi18@physics.msu.ru](mailto:mokhov.vi18@physics.msu.ru)

‡ [vokhnik@rambler.ru](mailto:vokhnik@rambler.ru)

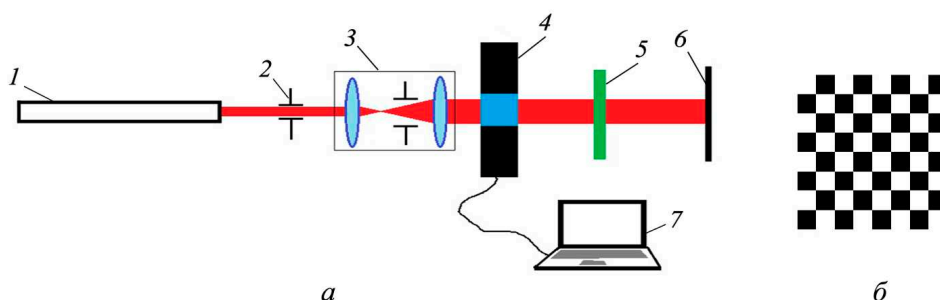


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), пояснения приведены в тексте; двумерная пространственная структура, использованная для модуляции фазы и поляризации в поперечной плоскости (б)

фазово-модулированной, так и амплитудно-фазово-модулированной. Такое воздействие на пучок позволяет провести экспериментальное рассмотрение основных закономерностей, определяющих его распространение при различных режимах модуляции и провести их сравнение.

Схема экспериментальной установки приведена на (рис. 1, а). Вертикально поляризованное излучение гелий-неонового лазера ЛГН-207А 1 направлялось на диафрагму 2 диаметром 0.25 мм. Однородный пучок с гауссовым поперечным распределением интенсивности телескопической системой 3, состоящей из микрообъектива с фокусным расстоянием 8 мм и длиннофокусной линзы с фокусным расстоянием 20 см, преобразовывался в гауссов пучок диаметром ~6 мм. Модуляция фазы пучка осуществлялась с помощью пространственного светового модулятора UPO Labs RSLM 1023V 4 с разрешением 1024×768 пикселей. Управление поперечной модулирующей структурой производилось с помощью компьютера 7. Установка после пространственного светового модулятора поляризационного фильтра-анализатора 5, выделявшего горизонтальную поляризацию, обеспечивала модуляцию излучения по амплитуде. Регистрация поперечного распределения интенсивности производилась с помощью светочувствительной КМОП-матрицы 6 фотокамеры Nikon D3200 с физическим размером 23.2 мм×15.4 мм и числом эффективных пикселей 24.2 млн.

В основе действия ПСМ [7, 8] лежит изменение в каждом пикселе жидкокристаллической матрицы формы поляризации падающего поляризованного излучения.

Приложенное к пикселю электрическое поле  $\mathbf{E}$  вызывает вращение ориентации молекул, которое, в свою очередь, изменяет показатель преломления в соответствии с поляризацией входного света. В общем случае вносимый этим пикселем толщиной  $d$  набег фазы  $\Delta\phi$  в падающем световом поле дается выражением

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d \Delta n_e(z) dz,$$

и пространственное распределение светового поля за модулятором оказывается промодулировано по форме

поляризации и фазе.

Установка в прошедшем пучке поляризационного фильтра-анализатора 5, собственный вектор которого ортогонален форме поляризации излучения, падающего на ПСМ, приводит к изменению амплитуды светового поля в каждом элементе поперечного распределения. Это изменение зависит от наведенной формы поляризации излучения в пикселе и разности между ее азимутальным углом и азимутальным углом направления пропускания поляризатора. Фазовая модуляция в поперечном сечении излучения, прошедшего анализатор, сохраняется, и пучок оказывается промодулированным и по амплитуде, и по фазе.

В экспериментальной установке, используемой в настоящей работе, максимальный набег фазы в пикселе был несколько меньше  $2\pi$ , а именно —  $1.7\pi$ , поскольку рабочая длина волны  $\lambda$ -излучения — 633 нм — больше той, которая использовалась для калибровки ПСМ.

Пространственный световой модулятор управлялся с помощью установленного в компьютере 7 программного обеспечения MagicHolo®. В качестве структуры, задаваемой в поперечном сечении, было выбрано регулярное пространственное распределение, представлявшее собой чередование светлых и темных квадратов одинакового размера (рис. 1, б), так называемая «шахматная доска». Ее период составлял 540 мкм.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поперечные распределения интенсивности амплитудно-фазово-модулированного излучения регистрировались на различных расстояниях  $z$  от плоскости, в которой установлен анализатор, являющийся выходным элементом системы (анализатор + модулятор). Минимальное расстояние от регистрирующей матрицы до анализатора составляло 7 см, шаг изменения расстояния — 5 см. В случае фазово-модулированного оптического сигнала начальной плоскостью  $z = 0$  полагалась плоскость, в которой размещен модулятор.

На (рис. 2, а) приведен вид поперечной структуры исходного пучка, направляемого на ПСМ, представ-

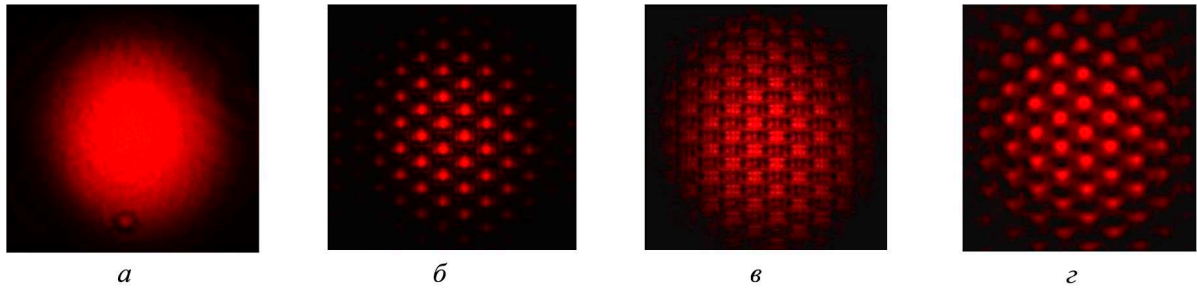


Рис. 2. Поперечные распределения интенсивности на разном расстоянии от системы (модулятор + анализатор) при амплитудно-фазовой модуляции.

ляющей собой однородное распределение с гауссовой огибающей диаметром  $\sim 6$  мм. Поперечная структура амплитудно-фазово-модулированного пучка после прохождения модулятора и анализатора представлена на (рис. 2, б) на минимальном расстоянии  $z$ , равном 7 см и далее, по мере распространения пучка, на расстояниях  $z = 97$  см (в) и  $z = 222$  см (г).

Хорошо видно, как первоначально четкое в начальной плоскости  $z = 7$  см (б) изображение двумерной структуры испытывает заметное дифракционное расплывание (рис. 2, в), а затем вновь становится четким (рис. 2, г), практически воспроизводя исходную картину (рис. 2, б). Это проявление эффекта Тальбо — самовоспроизведения периодической структуры когерентных источников на определенном расстоянии — длине Тальбо. Экспериментально определенное значение длины Тальбо  $Z_T$  оказалось равным 222 см. Некоторое различие в линейных размерах (рис. 2, б) и (рис. 2, г) связано с небольшой непараллельностью модулируемого пучка.

Расчетное значение расстояния Тальбо  $Z_T$  для двумерной структуры, как известно [3], определяется из условия кратности  $2\pi$  дифракционного набега фазы для всех гармоник пространственного Фурье-спектра исходного распределения. В нашем случае исходное распределение интенсивности представляет собой правильную треугольную конфигурацию (рис. 2, б) с углом  $\theta = \pi/6$  между горизонтальной осью и направлением наклона стороны треугольника. В соответствии с расчетом, проведенным в [3], это дает для  $Z_T$  двумерной структуры выражение

$$Z_T = \frac{Z_T}{4}, \tag{1}$$

где

$$Z_T = \frac{2a^2}{\lambda} \tag{2}$$

— расстояние Тальбо для одномерной структуры с периодом  $a$ . Величина  $a$  в нашем эксперименте составляет 1.68 мм, соответственно  $Z_T = 892$  см, и  $Z_T = 223$  см. Это расчетное значение хорошо согласуется с определенным экспериментально. При дальнейшем увеличении расстояния от начальной плоскости

(максимальное удаление составляло 530 см), изменения в распределении интенсивности происходят аналогично, однако, сопровождаются некоторым ухудшением качества изображения, что может быть связано с неплоскостностью ПСМ.

Из объяснения эффекта самовоспроизведения поля, данного Рэлеем, следует, что периодическая структура с периодом  $a$  может также создавать изображения структуры с дробным периодом  $a/m$ , где  $m$  — целое число на расстояниях  $Z_T/m$  [9]. Экспериментальное подтверждение дробного эффекта Тальбо также было получено в настоящей работе для  $m = 2$ . На (рис. 3) представлены поперечные распределения интенсивности в начальной плоскости (рис. 3, а) и на расстоянии  $Z_T/2$  (рис. 3, б). Как известно, на расстоянии  $Z_T/2$  изображение сдвигается относительно первоначального на половину периода, сравнение пространственных распределений на (рис. 3, а) и (рис. 3, б) хорошо это подтверждает.

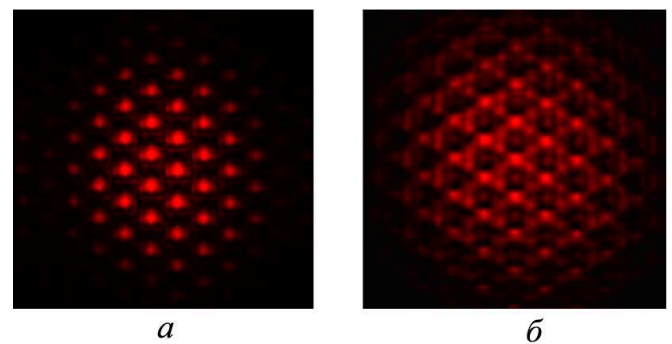


Рис. 3. Экспериментальное подтверждение дробного эффекта Тальбо для амплитудно-фазово-модулированного пучка

Изменение распределений интенсивности при распространении фазово-модулированного пучка (поляризаторный фильтр-анализатор  $\beta$  не установлен) приведено на рис. 4. Минимальное расстояние  $z$  от начальной плоскости, где размещен модулятор, до плоскости регистрации в этом случае составляет 18.5 см (рис. 4, а), далее представлены распределения интенсивности на удалении 108.5 см (рис. 4, б) и 228.5 см (рис. 4, в).

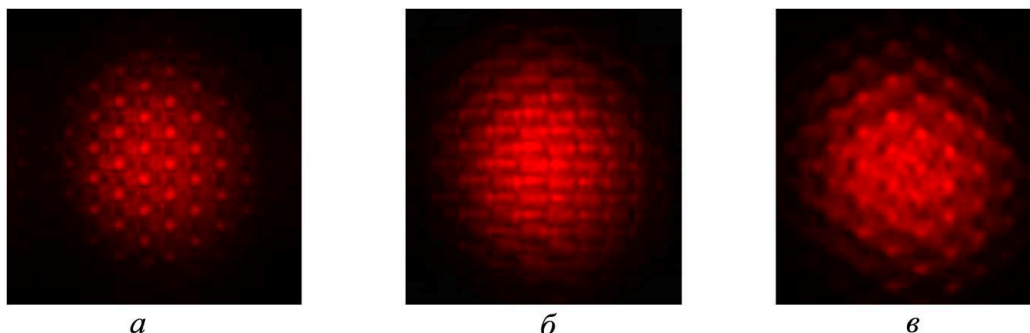


Рис. 4. Распределения интенсивности в поперечном сечении фазово-модулированного пучка на различном удалении от начальной плоскости

Как видно из приведенных распределений интенсивности поперечных сечений фазово-модулированного пучка они имеют гораздо меньший контраст по сравнению со случаем амплитудно-фазовой модуляции. Это обусловлено тем, что при модуляции фазы интенсивность в поперечной плоскости изменяется не непосредственно, как при амплитудно-фазовой модуляции, а является результатом интерференции дифрагировавших пучков. Воспроизведение начального поперечного распределения интенсивности наблюдалось на расстоянии 228 см, что хорошо согласуется с расчетным значением расстояния Тальбо 223 см.

### 3. ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения количественных данных по глубине модуляции интенсивности и определения ее периода полученные распределения переносились в программу математического пакета MATCAD. После воспроизведения распределений интенсивности в виде двумерных матриц появляется возможность анализа одномерных траекторий, представляющих собой зависимости интенсивности от какой-либо поперечной координаты.

На рис. 5 приведены типичные одномерные зависимости интенсивности от вертикальной координаты в поперечной плоскости для амплитудно-фазово-модулированного пучка (кривая 1) и фазово-модулированного пучка (кривая 2).

Кривые 1 и 2 (рис. 5) получены из двумерных распределений интенсивности в одной и той же поперечной плоскости, минимально отстоящей от пространственного светового модулятора (рис. 2, б) и (рис. 4, а). Эти данные позволяют количественно оценить различие глубины модуляции для двух различных режимов пространственной модуляции, составляющее приблизительно 2 раза. Сходным образом выглядят одномерные зависимости интенсивности от поперечной координаты амплитудно-фазово-модулированного пучка и фазово-модулированного пучков на расстоянии Тальбо.

На промежуточных расстояниях в случае амплитудно-фазовой модуляции имеет место ди-

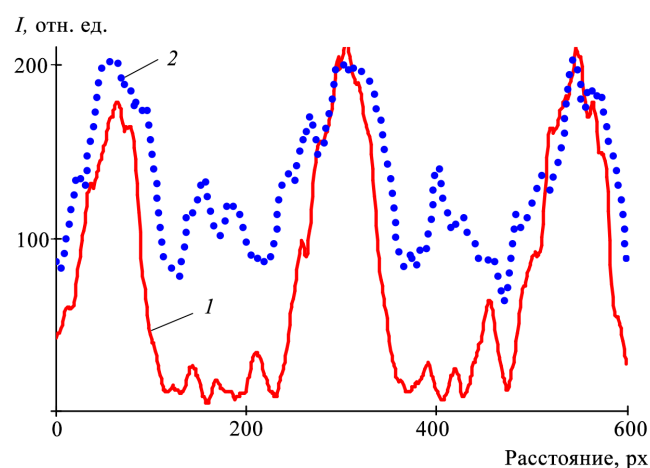


Рис. 5. Одномерные траектории интенсивности в зависимости от поперечной координаты для двух различных режимов пространственной модуляции

фракционное расплывание центральных пятен, изображение становится сложно-структурированным, что хорошо видно из (рис. 2, в). При этом глубина модуляции и контраст распределения интенсивности уменьшаются, в то время как для фазово-модулированного пучка они остаются примерно одинаковыми на всем пути распространения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено экспериментальное исследование распространения амплитудно-фазово-модулированного излучения в свободном пространстве на примере пучка, в поперечную структуру которого внесен двумерный регулярный амплитудно-фазовый транспарант. Экспериментально показано, что самовоспроизведение исходного двумерного пространственного распределения интенсивности имеет место как для амплитудно-фазово-модулированного, так и для

чисто фазово-модулированного пучков. Установлено, что глубина модуляции распределения интенсивности амплитудно-фазово-модулированного излучения значительно больше, чем фазово-модулированного. Полу-

ченные результаты могут быть использованы в задачах формирования пространственно-структурированного излучения для бесконтактного манипулирования частицами в различных средах.

- 
- [1] Wen J., Zhang Y. and Xiao M. // *Advances in Optics and Photonics*. **5**. 83 (2013).
- [2] Dholakia K., Cihmar T. // *Nat. Photonics*. **5**. 335 (2011).
- [3] Кандидов В.П., Кондратьев А.В., Суровицкий М.Б. // *Квантовая электроника*. **25**, № 8. 712 (1998). (*Quantum Electron.* **28**, N 8. 692 (1998)).
- [4] Wen C., Li W., Dai J., Ma S., Wang Z. // *Photonics*. **10**. 115 (2023).
- [5] Qu W., Liu L., Liu D. et al. // *Proceedings of SPIE*. **5867**. 586712 (2005).
- [6] Ikonnikov D.A., Myslivets S.A., Volochev M.N et al. // *Scientific Reports*. **10**. 20315 (2020).
- [7] Wernicke G.U., Krtiger S., Kamps J. et al. // *J. of Optical Communications*. **25**, N 4. 141 (2004).
- [8] Yang Y., Forbes A., Cao L. // *Opto-Electron Sci.* **2**. 230026 (2023).
- [9] Морозов А.Н., Салбиева Л.Р., Скуйбин Б.Г., Смирнов Е.В. // *Письма в ЖЭТФ*. **107**. № 6. 368 (2018). (*JETP Letters*. **107**, N 6. 355 (2018).)

## Characteristics of propagation of regular amplitude- and phase-modulated optical fields obtained using a spatial light modulator

A.A. Sharkov<sup>a</sup>, V.I. Mokhov<sup>b</sup>, O.M. Vokhnik<sup>c</sup>

<sup>1</sup>*Department of optics, spectroscopy and physics of nanosystems, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>sharkov.aa20@physics.msu.ru, <sup>b</sup>mokhov.vi18@physics.msu.ru, <sup>c</sup>vokhnik@rambler.ru*

The change in the spatial distribution of laser radiation after passing through a spatial light modulator introducing regular two-dimensional amplitude-phase and pure phase modulation in the transverse plane of the beam was experimentally studied. The distance (Talbot distance) at which the two-dimensional transverse structure is reproduced for both modulation modes is determined. A comparison has been made of changes in the parameters of transverse spatial distributions for amplitude-phase-modulated and phase-modulated beams as they propagate. It is shown that the depth of modulation of the intensity distribution of amplitude-phase-modulated radiation is significantly higher than that of phase-modulated radiation, and this difference in contrast is maintained during radiation propagation. The results obtained can be used in problems of generating spatially structured radiation for contactless manipulation of particles in various media. PACS: 42.25.Bs; 42.79.-e.

*Keywords:* spatially modulated beams, two-dimensional light field, spatial light modulator, Talbot effect

*Received 28 June 2024.*

### Сведения об авторах

1. Шарков Алексей Александрович — студент 4 курса физического факультета; e-mail: sharkov.aa20@physics.msu.ru.
2. Мохов Владимир Игоревич — студент-выпускник 2 курса магистратуры физического факультета; e-mail: mokhov.vi18@physics.msu.ru,
3. Вохник Ольга Михайловна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-36-59, e-mail: vokhnik@rambler.ru.