

УЛУЧШЕНИЕ КОНТРАСТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ МАСКИ НА КОМПОНЕНТЫ ЕГО ФУРЬЕ-СПЕКТРА

В.Д. Бобова
А.А. Титенко

vasilina.bobova@bk.ru
toliatitenko@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена задача пространственной фильтрации светового поля в результате воздействия на компоненты его фурье-спектра с помощью фильтрующей маски из алюминиевой фольги в виде «крестика». Описаны установка и методика осуществления данной технологии, приведен использованный математический аппарат. Показаны результаты опыта по воздействию фильтрующей маски, в том числе и на периодических объектах небольших размеров, таких как дифракционная решетка, содержащая 4-4 штриха на миллиметр. Сделаны выводы о влиянии фильтрующей маски полученных размеров и конфигурации на четкость получаемого изображения и о возможности представления светового поля после фильтрации в виде суперпозиции горизонтальных и вертикальных его составляющих.

Ключевые слова

Фурье-оптика, фурье-анализ, фурье-синтез, улучшение контрастности изображения, фильтрация светового поля, фильтрующая маска, оптические системы, пространственный спектр

Поступила в редакцию 26.10.2022
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Введение. Изображение объектов, наблюдаемых при исследовании различных структур в микроскоп, создается благодаря тому, что разные участки объектов неодинаково отклоняют падающий на них свет, а отраженные лучи имеют различную интенсивность. Благодаря этим свойствам появляется отличие распределений интенсивности в исходной и итоговой волнах, которое с уменьшением наблюдаемых предметов усиливается, что напрямую влияет на качество изображения. Это вынуждает подбирать подходящие для исследования методы в зависимости от свойств наблюдаемых объектов [1, 2].

Представленная в работе фильтрующая маска позволяет улучшить разрешающую способность установки, а также реализовать метод, который наравне с методами темного поля и фазового контраста может быть использован в микроскопии для улучшения четкости изображения при наблюдении тонких органических неоднородных структур. Воздействие на фурье-компоненты изображения приводит к результатам, для анализа которых разработан хорошо известный математический аппарат, аналитически описывающий все происходящие процессы [3, 4].

Постановка задачи. Рассмотрим транспарант «Птичка в клетке», представляющий собой часть прозрачной фотопленки с нанесенным непрозрачным изображением (рис. 1). Осветим его плоскопараллельным пучком монохроматического света с длиной волны 534 нм и получим изображение на фотоприемнике (рис. 2).



Рис. 1. Фотография транспаранта

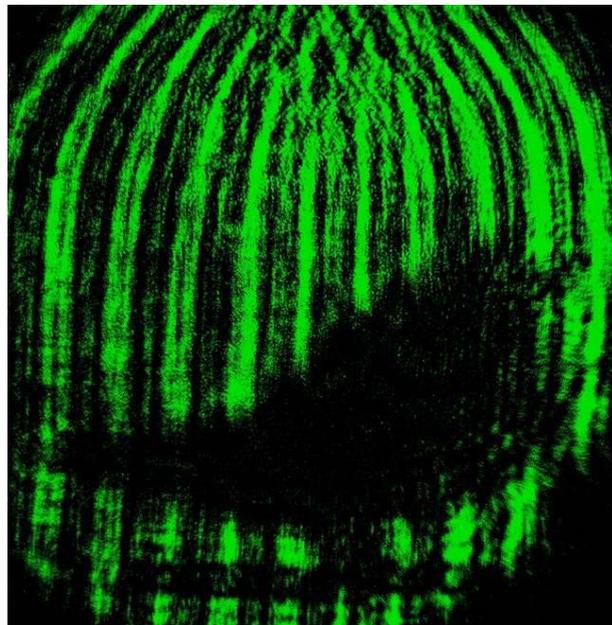


Рис. 2. Изображение транспаранта, полученное фотоприемником

Поле световой волны $\xi_0(x; y)$ может быть описано в общем случае уравнением

$$\xi_0(x; y) = \xi_{01}(x; y) + \xi_{02}(x; y),$$

где $\xi_{01}(x; y)$ и $\xi_{02}(x; y)$ — соответственно горизонтальные и вертикальные составляющие световой волны.

Регистрируемый фотоприемником пространственный спектр представляет собой распределение интенсивности:

$$I = \xi \cdot \xi^* = (\text{Re } \xi)^2 + (\text{Im } \xi)^2;$$

$$\xi_{01} = A_1 e^{i\varphi_1}; \quad \xi_{02} = A_2 e^{i\varphi_2},$$

где φ_1 и φ_2 — фаза волны горизонтальной и вертикальной ее составляющих; A_1 и A_2 — амплитуда горизонтальной и вертикальной составляющих волны соответственно.

Для суммарного поля волны справедливо:

$$\begin{aligned} I &= |\xi|^2 = (\xi_{01} + \xi_{02})(\xi_{01}^* + \xi_{02}^*) = \xi_{01}\xi_{01}^* + \xi_{02}\xi_{02}^* + \xi_{01}\xi_{02}^* + \xi_{02}\xi_{01}^* = \\ &= A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + A_1 A_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi, \end{aligned}$$

где I_1, I_2 — интенсивности горизонтальной и вертикальной составляющих волны, а $\Delta\varphi$ — разница фаз.

Записывая выражение для суммарной интенсивности пространственного спектра, можно заметить, что оно содержит в себе не только образующие его горизонтальные и вертикальные составляющие I_1 и I_2 , но также и паразитные интенсивности $I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$, которые в общем случае образуют побочную засветку изображения, которая не несет полезной информации и создает «шум» [5–7]:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}.$$

В данной работе поставлена цель улучшить качество изображения, убрав паразитное свечение воздействием фильтрующей маски на пространственный спектр изображения. Конфигурация маски в виде «крестика» была выбрана исходя из геометрических соображений распределения интенсивностей светового поля в фокальной плоскости собирающей линзы так, что он пропускает лишь главные гармоники светового поля, отвечающие за формирование изображения [2].

Экспериментальная установка. На основе схемы установки (рис. 3) опишем методику проведения эксперимента. В представленном опыте лазер L испускает монохроматический луч видимого света с длиной волны 534 нм. Далее короткофокусная линза 2 с фокусным расстоянием равным 20 мм создает точечный источник излучения в своей фокальной плоскости, где установлена

диафрагма 3 диаметром 50 мкм с целью фильтрации светового потока от шумов в виде областей затемнения. Линза 4 расположена на фокусном расстоянии 250 мм от пинхола, создавая таким образом плоскопараллельный волновой фронт. Диафрагма 5 позволяет выделить из полученного светового пучка центральную часть с наиболее равномерным распределением интенсивности, который освещает транспарант 6, создавая световое поле соответствующее данному изображению.

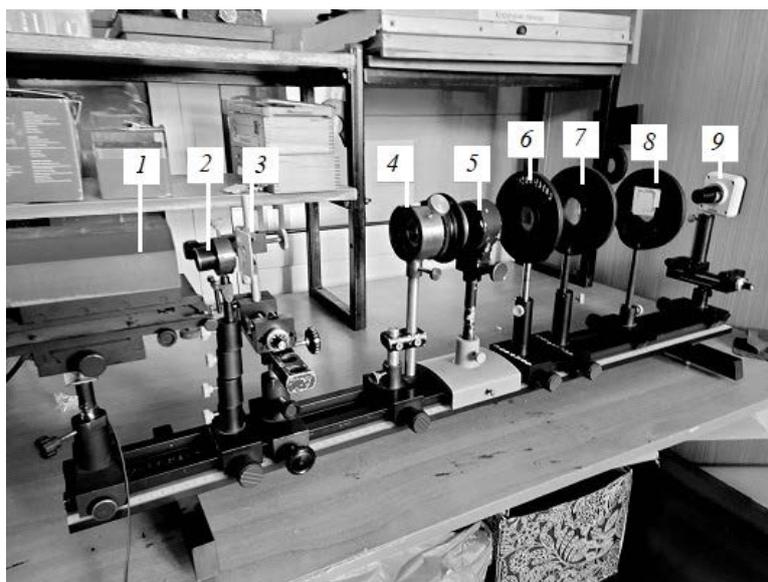


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Произвольное световое поле можно представить как совокупность множества пучков, падающих на линзу под разными углами. В фокальной плоскости линза 7 с фокусным расстоянием 200 мм собирает параллельный пучок света в точку, в которой образуется распределение поля. Таким образом, формирование изображения можно разбить на два этапа: фурье-анализ волнового поля (выполняется тонкой линзой 7 так, что в фокальной плоскости, где мы и располагаем фильтрующую маску 8, наблюдается пространственный спектр объекта) и фурье-синтез изображения (восстановление изображения, которое можно наблюдать на фотоприемнике 9) [8, 9].

Математически это описывается прямым и обратным преобразованием Фурье:

1) прямое

$$\varepsilon(x, y, z) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(k_x, k_y, z) \exp[-i(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y;$$

2) обратное

$$\varepsilon_0(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_0(x, y) \exp[i(k_x x + k_y y)] dx dy,$$

где k_x и k_y — проекции волнового вектора на оси координат.

В результате в плоскости изображения формируется распределение интенсивности света, подобное распределению в исходной волне, которое и называется оптическим изображением объекта. На этапе фурье-анализа ту часть интенсивностей, которая создает паразитное свечение (интенсивность I_{12}), убирают с помощью фильтрующей маски 8, представляющей собой крестик шириной порядка 120 мкм, вырезанный в алюминиевой фольге. Схема фильтрующей маски представлена на рис. 4 без соблюдения пропорций.

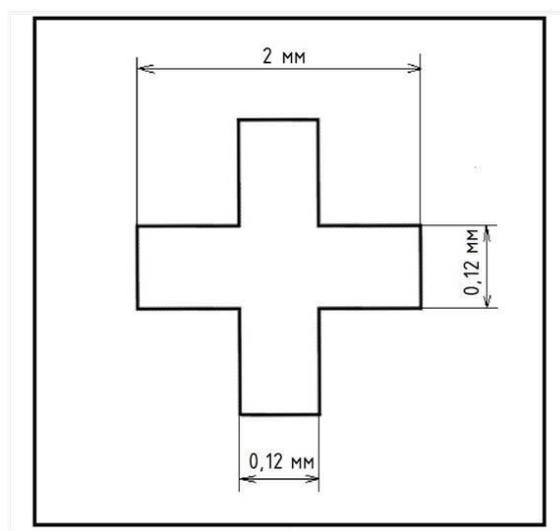


Рис. 4. Схема фильтрующей маски

Параметры крестика были подобраны с помощью регулируемой щели. Такой размер обусловлен тем, что при меньших размерах зазора изображение расплывается из-за происходящей на щели дифракции, при больших же размерах фильтрующая маска не воздействует должным образом на фурье-спектр, пропуская паразитное излучение.

Полученное решение. На представленных ниже изображениях (рис. 5) видно, что пространственный спектр объекта сформирован компонентами, расположенными на главной горизонтали и вертикали. При их наложении появляются слабые, расположенные по бокам, это и есть I_{12} .

Фильтрующая маска закрывает эти участки спектра, оставляя только необходимую для получения изображения часть светового поля (рис. 6).

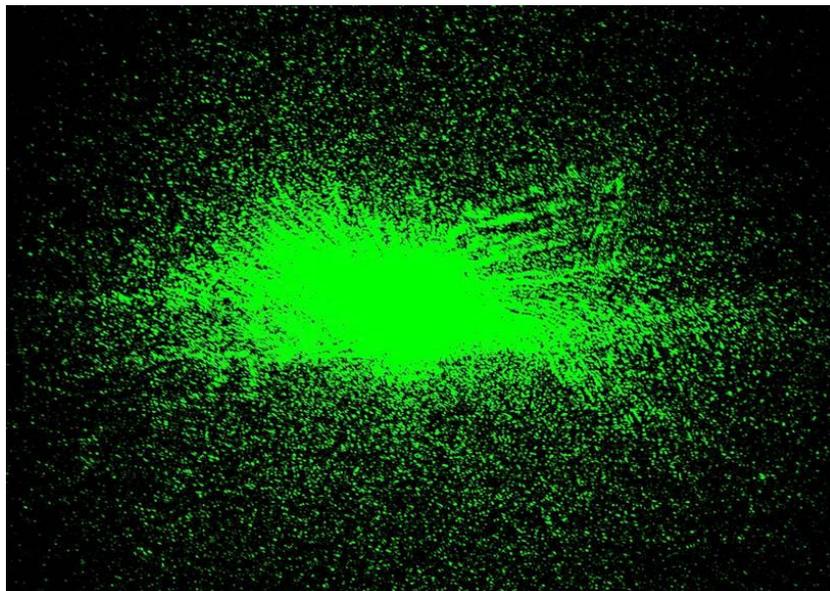


Рис. 5. Пространственный спектр данного аperiodического объекта

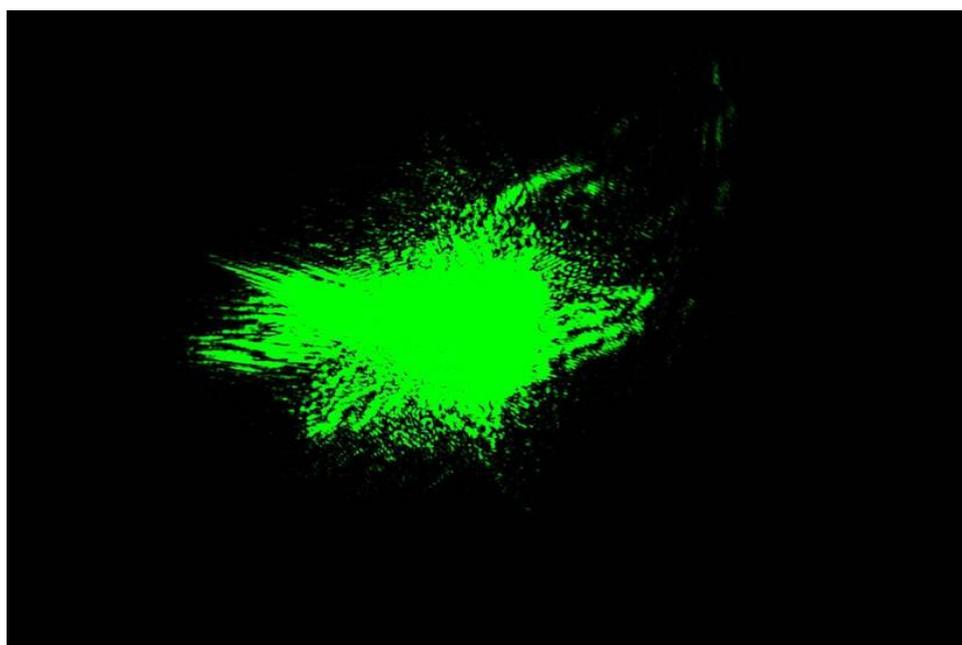


Рис. 6. Воздействие фильтрующей маски на фурье-образ объекта

В результате использования фильтрующей маски было получено изображение транспаранта (рис. 8), которое заметно контрастнее исходного (рис. 7). Без потери интенсивности становятся заметнее контуры и уменьшается количество вкраплений засветки на получаемом изображении.

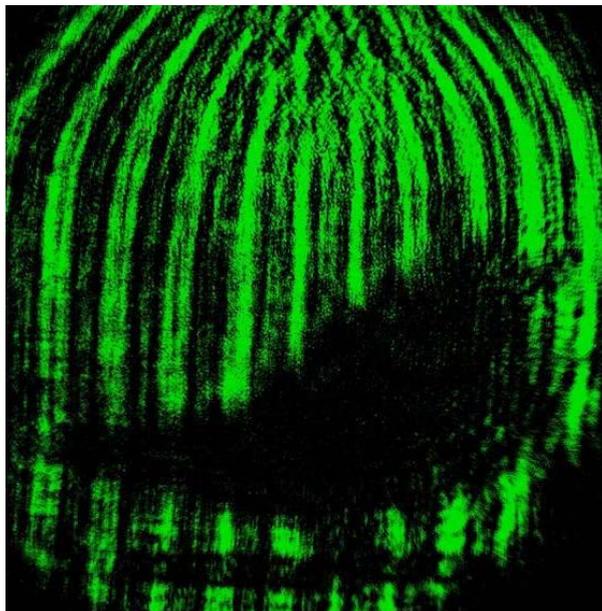


Рис. 7. Изображение транспаранта, полученное фотоприемником

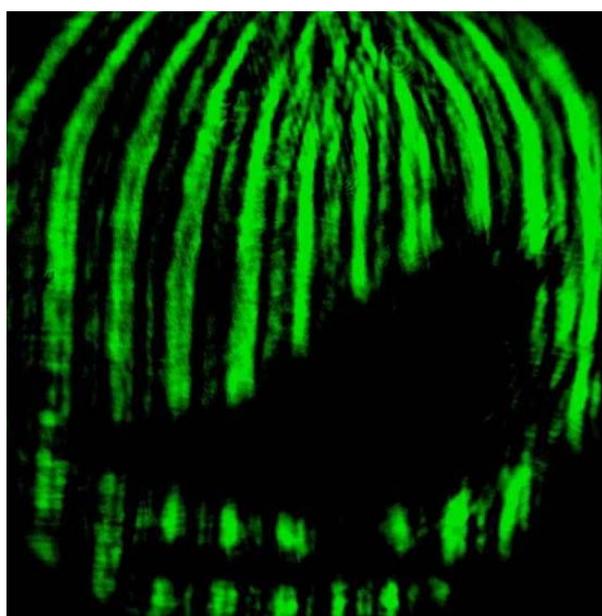


Рис. 8. Изображение транспаранта, полученное после фильтрации

Исследование периодических объектов. В дополнение к полученному решению были проведены исследования с периодическими объектами представляющую из себя решетку с размерами ячейки около 2,5·2,5 мм (рис. 9). При этом был получен результат, аналогичный аperiodическому объекту, это видно из

сравнения двух изображений: полученного до фильтрации изображение (рис. 10) и после (рис. 11). Также это заметно по воздействию маски на фурье-спектр решетки (рис. 12 и 13).

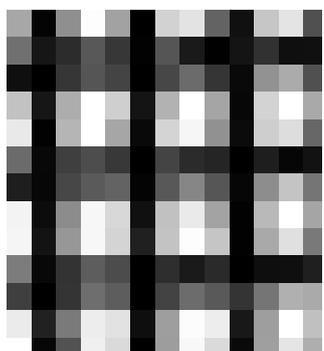


Рис. 9. Фотография решетки с размерами ячейки около 2,5·2,5 мм

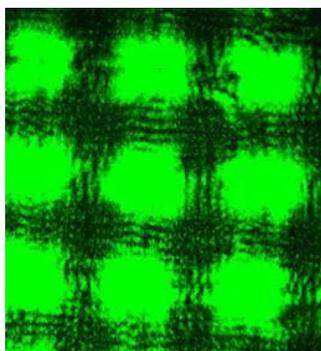


Рис. 10. Изображение решетки, полученное фото-приемником

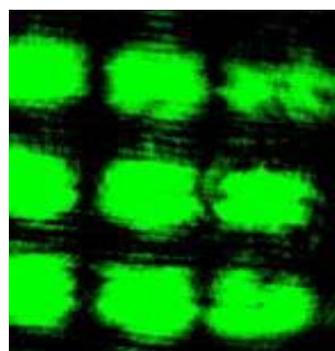


Рис. 11. Воздействие фильтрующей маски на периодический объект

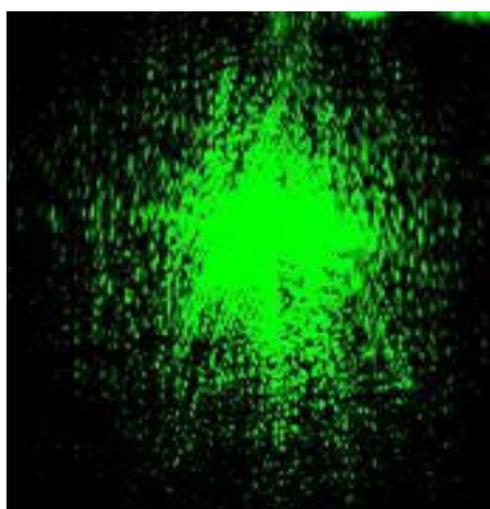


Рис. 12. Пространственный спектр периодического объекта

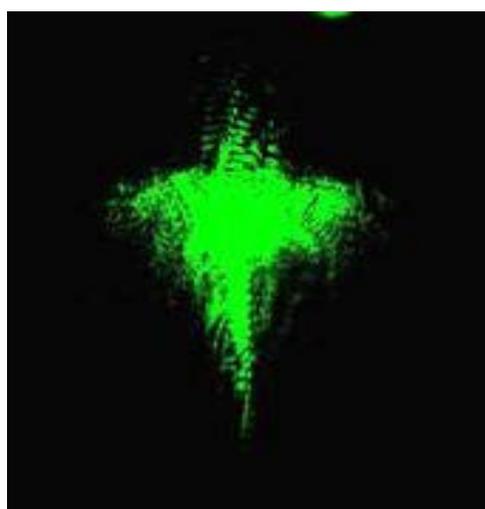


Рис. 13. Воздействие фильтрующей маски на фурье-спектр периодического объекта

Представленный способ фильтрации работает и на объектах с меньшими размерами. Для исследования была взята двумерная дифракционная решетка с параметрами: 4·4 штриха на миллиметр, исходное изображение и фурье-спектр которой были получены фотоприемником (рис. 14 и 16). Результаты воздействия маски на получаемое изображение объекта (рис. 15) и его фурье-спектр (рис. 17) представлены ниже.

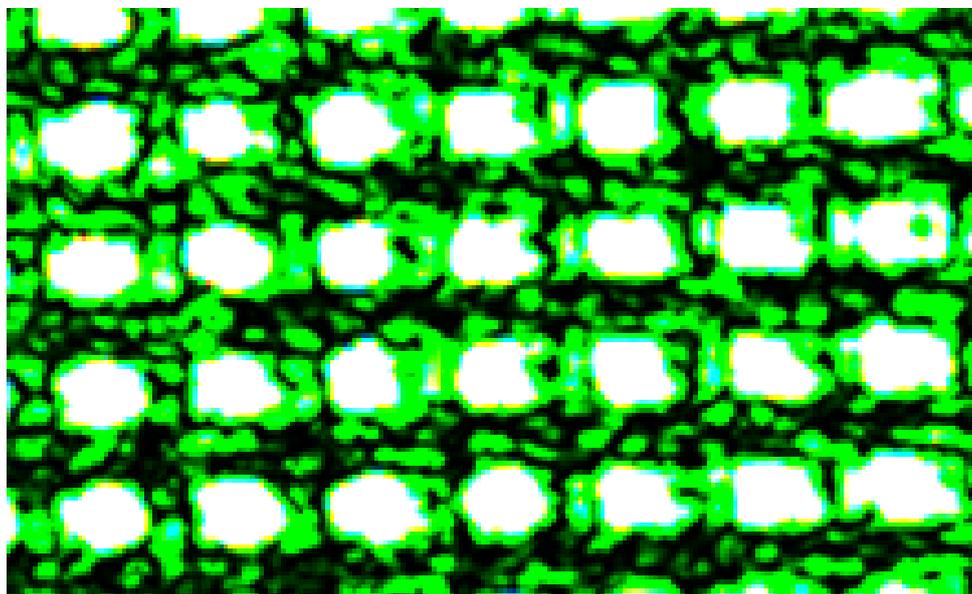


Рис. 14. Изображение дифракционной решетки, полученное фотоприемником

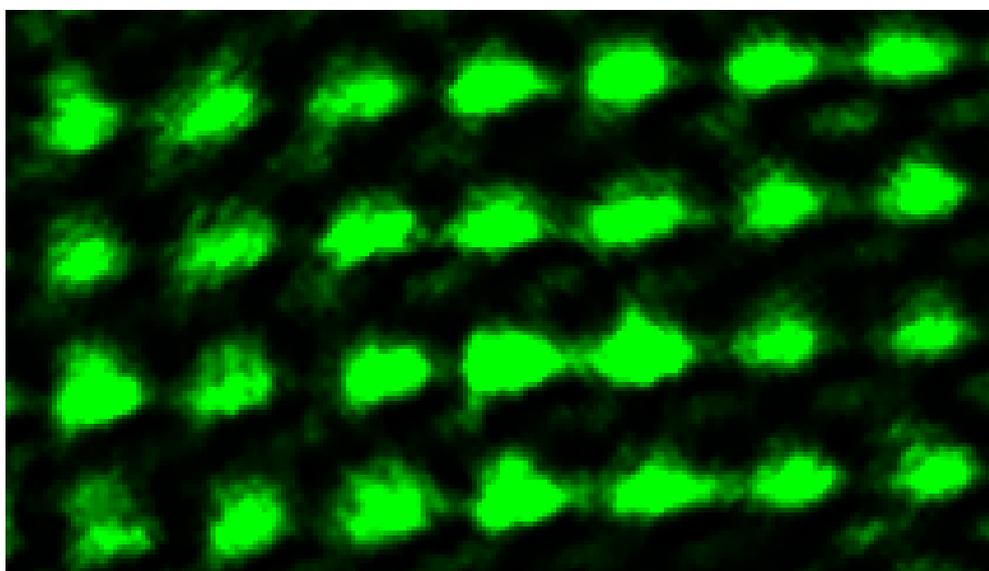


Рис. 15. Воздействие фильтрующей маски на дифракционную решетку

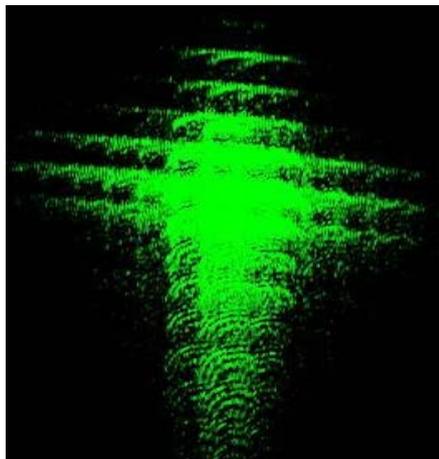


Рис. 16. Пространственный спектр дифракционной решетки

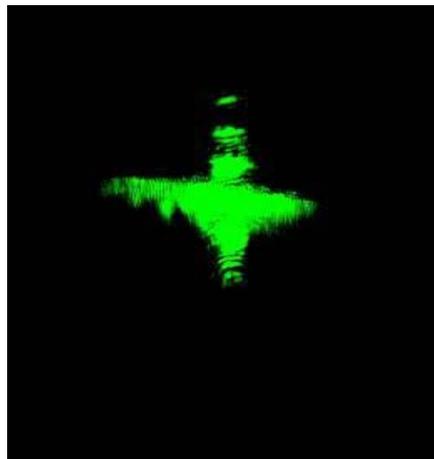


Рис. 17. Воздействие фильтрующей маски на фурье-спектр дифракционной решетки

При увеличении размеров ширины горизонтальной и вертикальной щелей, составляющих «крестик» в фильтрующей маске, до 200 мкм фильтрующая маска не воздействует должным образом на фурье-спектр, пропуская паразитное излучение (рис. 18). При меньших размерах щелей изображение расплывается из-за происходящей на щели дифракции.

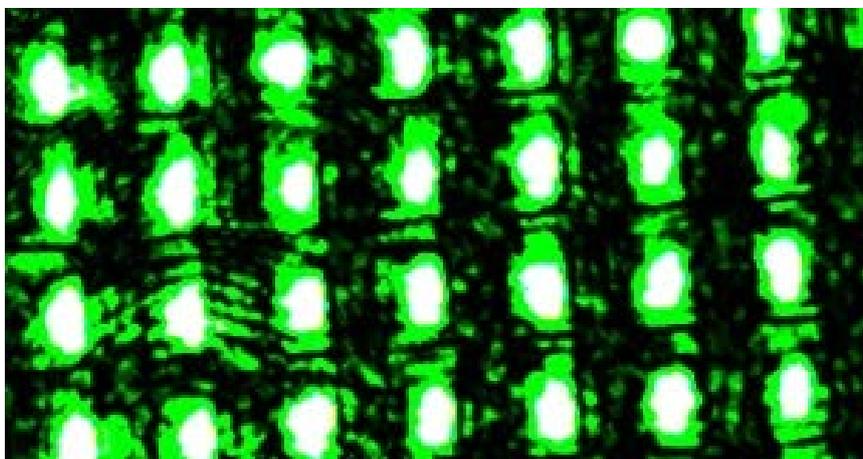


Рис. 18. Воздействие фильтрующей маски больших размеров на дифракционную решетку

Данные результаты еще раз доказывают, что представленные в работе размеры фильтрующей маски являются оптимальными.

Заключение. В результате проведенного эксперимента получено отфильтрованное световое поле, которое, в отличие от исходного, можно представить

как сумму горизонтальных и вертикальных его составляющих, применяя принцип суперпозиции. Такое поле сохраняет всю необходимую информацию об изображении, делая более различимыми границы освещенной и неосвещенной части изображения, а также делая его более целостным, убирая вкрапления за светки. Опытным путем выяснили оптимальные размеры фильтрующей маски.

Описанный метод был использован для фильтрации предметов более маленьких размеров таких, как дифракционная решетка, содержащая 4·4 штриха на миллиметр.

В восстановленном волновом фронте наблюдается неоднородное распределение интенсивности в виде концентрических колец, которое представляет собой абберации, связанные с техническими вопросами постановки эксперимента и не несущие никакого физического смысла [9].

Литература

- [1] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М., Машиностроение, 1992.
- [2] Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М., МГУ, Наука, 2004.
- [3] Ландсберг Г.С. Оптика. М., Наука, 1976.
- [4] Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М., Мир, 1970.
- [5] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.
- [6] Chang S., Lee S.I. First-order aberration of a misfocused self-imaging system. *Optik*, 2008, vol. 119, no. 15, pp. 742–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2007.05.004>
- [7] Литвинов О.С., Горелик В.С. Электромагнитные волны и оптика. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [8] Montgomery W.D. Self-imaging objects of infinite aperture. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, vol. 57, no. 6, pp. 772–778. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.57.000772>
- [9] Васильева Н.М., Куракин В.В. Плоские волны в опытах Аббе-Портера и Тальбота. *Тр. Десятой Всерос. конф. Необратимые процессы в природе и технике*. Ч. 1. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 191–194.

Бобова Василина Дмитриевна — студентка кафедры «Радиоэлектроника и лазерная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Титенко Анатолий Анатольевич — студент кафедры «Радиоэлектроника и лазерная техника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Скуйбин Борис Георгиевич кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бобова В.Д., Титенко А.А. Улучшение контрастности изображения в результате воздействия фильтрующей маски на компоненты его фурье-спектра. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 12(77). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-12-77>

IMAGE CONTRAST ENHANCEMENT AS A RESULT OF THE FILTERING MASK'S EFFECT ON ITS FOURIER SPECTRUM COMPONENTS

V.D. Bobova

vasilina.bobova@bk.ru

A.A. Titenko

toliatitenko@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The problem of spatial filtering of a light field as a result of influence on components of its Fourier spectrum by means of a filtering mask made of aluminum foil in the form of "cross" is considered. Installation and technique of realization of this technology are described, the used mathematical apparatus is given. The results of the experiment concerning the influence of the filtering mask on periodic objects of small dimensions such as a diffraction grating containing 4·4 lines per millimeter are shown. The conclusions about influence of the filtering mask of the obtained sizes and configuration on the sharpness of the obtained image and about possibility of representation of the light field after filtration in the form of superposition of its horizontal and vertical components are made.

Keywords

Fourier optics, Fourier analysis, Fourier synthesis, image contrast enhancement, light field filtering, filtering mask, optical systems, spatial spectrum

Received 26.10.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

References

- [1] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh system [Theory of optical systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992 (in Russ.).
- [2] Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. Fizicheskaya optika [Physical optics]. Moscow, MGU Publ., Nauka Publ., 2004 (in Russ.).
- [3] Landsberg G.S. Optika [Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1976 (in Russ.).
- [4] Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. McGraw-Hill, 1968 (Russ. ed.: Vvedenie v Fyrye-optiku. Moscow, Mir Publ., 1970.)
- [5] Born M., Wolf E. Principles of optics. Pergamon Press, 1959. (Russ. ed.: Osnovy optiki. Moscow, Nauka Publ., 1973.)
- [6] Chang S., Lee S.I. First-order aberration of a misfocused self-imaging system. *Optik*, 2008, vol. 119, no. 15, pp. 742–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2007.05.004>
- [7] Litvinov O.S., Gorelik V.S. Elektromagnitnye volny i optika [Electromagnetic waves and optics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [8] Montgomery W.D. Self-imaging objects of infinite aperture. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, vol. 57, no. 6, pp. 772–778. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSA.57.000772>
- [9] Vasilyeva N.M., Kurakin V.V. [Plane wave in experiments of Abbe-Porter and Talbot]. Tr. Desyatoy Vseros. konf. Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike. Ch. 1 [Proc. 10th Russ. Conf. Irreversible Processes in Nature and Optics. P. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., pp. 191–194 (in Russ.).

Bobova V.D. — Student, Department of Radio Electronics and Laser Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Titenko A.A. — Student, Department of Radio Electronics and Laser Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Skuybin B.G., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Bobova V.D., Titenko A.A. Image contrast enhancement as a result of the filtering mask's effect on its fourier spectrum components. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 12(77). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-12-847.html> (in Russ.).