

УДК 519.6

## НАНООПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ 2D ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. Гончарский<sup>1</sup>, С. Р. Дурлевич<sup>1</sup>

Статья посвящена математическому моделированию синтеза нанооптических элементов. Подробно исследованы возможности киноформных фазовых элементов. Показано, что в задачах формирования изображений киноформы имеют целый ряд преимуществ по сравнению с классическими плоскими дифракционными оптическими элементами.

**Ключевые слова:** киноформ, плоский оптический элемент, дифракционная решетка, нанооптический элемент, делитель пучка.

Задача формирования двумерных (2D) изображений хорошо изучена как в оптическом, так и в инфракрасном диапазоне. Широкие возможности для формирования 2D изображений открывает плоская оптика [1]. Оптический элемент называется плоским, если преобразование волнового фронта имеет место на глубинах порядка длины волны. Обратная задача [2] синтеза элементов плоской оптики состоит в расчете и изготовлении микрорельефа, формирующего заданное 2D изображение. Среди математических моделей наиболее часто используется геометрическая оптика и приближения Кирхгофа и Френеля. Для формирования микрорельефа элементов плоской оптики в оптическом диапазоне используется технология электронной литографии [1].

В настоящей статье рассматривается специальная задача синтеза 2D изображений, представляющих собой набор одинаковых ярких точек или светящихся областей. В оптической литературе эта проблема широко обсуждается и получила название *делителя пучка* (beam splitter). Технологии изготовления таких оптических элементов значительно различаются и зависят прежде всего от длины волны лазерного излучения [3–6]. Делители пучка широко используются в различных прикладных задачах, таких как точное перфорирование, контроль формы поверхности

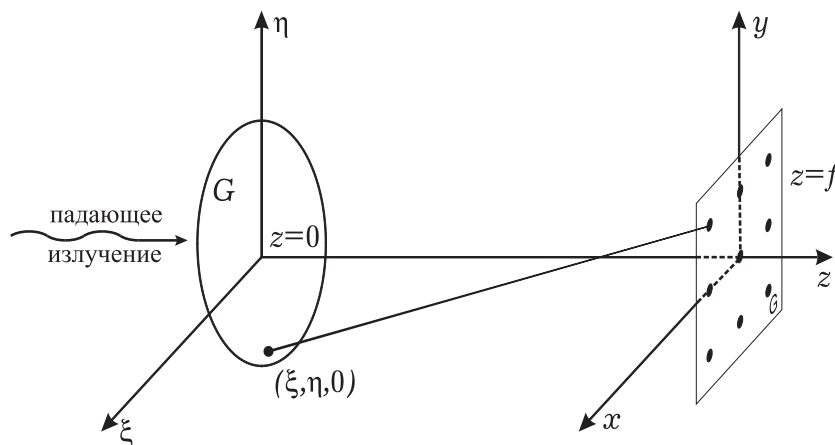


Рис. 1

трехмерных тел, параллельный процессинг, обработка поверхностей, автоматический контроль подлинности оптических защитных элементов [7] и др. Ниже обсуждаются проблемы синтеза плоских фазовых оптических элементов — делителей пучка в применении к проблеме оптической защиты документов, банкнот и т. п.

Рассмотрим классическую задачу формирования изображения с помощью плоского фазового оптического элемента (рис. 1).

Лазерное излучение (плоская электромагнитная волна) падает на плоский оптический элемент, расположенный в плоскости  $z = 0$ , так, что в плоскости  $z = f$  формируется заданное изображение. Хорошо известно [1], что волновые поля  $u(x, y, f)$  в плоскости  $z = f$  и  $u(\xi, \eta, 0 + 0)$  в плоскости  $z = 0$  связаны соотношением

$$u(x, y, f) = \frac{k \exp(ikf)}{2\pi i f} \iint_G u(\xi, \eta, 0 + 0) \exp\left(ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right) d\xi d\eta. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, стр. 4, 119991, Москва; А. А. Гончарский, науч. сотр., e-mail: gonchar@srcc.msu.ru; С. Р. Дурлевич, вед. программист, e-mail: sdurlevich@yandex.ru

В рамках простейшей модели можно описать действие плоского фазового оптического элемента как трансформацию волнового фронта в плоскости  $z = 0$ :  $u(\xi, \eta, 0 + 0) = u(\xi, \eta, 0 - 0)e^{ik\varphi(\xi, \eta)}$ . Здесь  $\varphi(\xi, \eta)$  — фазовая функция, определяющая микрорельеф оптического элемента в точке  $(\xi, \eta)$  [2].

Как правило, в задачах формирования 2D изображений задается функция  $|u(x, y, f)| = F(x, y)$ .

Обратную задачу синтеза плоских оптических элементов можно сформулировать следующим образом:

$$A\varphi(\xi, \eta) = \left| \gamma \iint_G u(\xi, \eta, 0 - 0) \exp\left(ik \frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2f}\right) \exp(ik\varphi(\xi, \eta)) d\xi d\eta \right| = F(x, y). \quad (2)$$

Здесь  $F(x, y)$  — заданная функция.

Обратная задача заключается в расчете фазовой функции  $\varphi(\xi, \eta)$  из уравнения (2) при заданной функции  $F(x, y)$ . Задачу поиска приближенного решения (2) можно свести к минимизации функционала  $\|A\varphi - F\|^2$  по  $\varphi$ . Существуют различные методы приближенного решения этой задачи, которая, как известно, относится к некорректно поставленным задачам [2]. Регуляризирующие алгоритмы как методы решения некорректно поставленных задач позволяют строить гладкие приближения решений уравнений типа (2) [8, 9].

Однако в случае задач плоской оптики оказывается, что с таким же успехом можно использовать и алгоритмы, не обладающие свойствами устойчивости. Основной проблемой в оптике является то, что приближенное воспроизведение полученного решения должно быть сделано с очень высокой точностью, которая в оптическом диапазоне составляет порядка 20 нанометров [10].

Один из традиционных итерационных алгоритмов решения задачи (2) был предложен Лиземом [11]. Этот очень простой в реализации итерационный алгоритм позволяет по достаточно простой схеме вычислять последовательность  $\varphi_n(\xi, \eta)$ , которая минимизирует функционал  $\|A\varphi - F\|^2$ . Подробное описание алгоритма можно найти в [1].

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу возможностей киноформных элементов и классических элементов, таких как дифракционные решетки, в задачах формирования 2D изображений.

К очевидным преимуществам классических технологий можно отнести простоту синтеза оптических элементов, состоящих из дифракционных решеток. Обратная задача в этом случае сводится к определению конечного числа параметров решеток. В простейшем случае, когда периоды решеток одинаковы, определению подлежат углы наклона решеток.

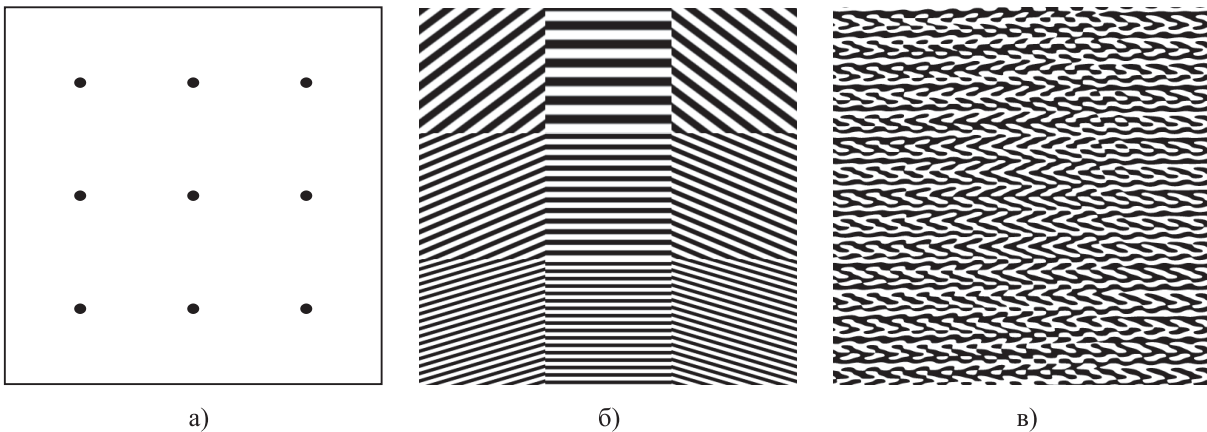


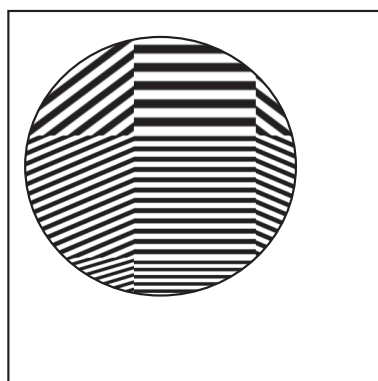
Рис. 2

На рис. 2а представлено 2D изображение, синтезируемое в области  $G$ . Эта задача легко может быть решена с помощью дифракционных решеток. На рис. 2б приведен фрагмент бинарного плоского оптического элемента, состоящего из дифракционных решеток и решающего поставленную задачу формирования 2D изображения. На рис. 2в приведен фрагмент киноформа, формирующего то же самое изображение. На рис. 2б и 2в глубина микрорельефа бинарного оптического элемента в каждой точке  $(\xi, \eta)$  пропорциональна потемнению.

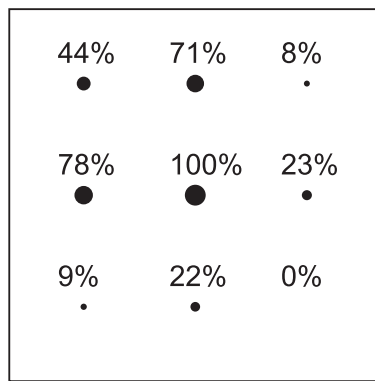
В рамках математического моделирования сравним характеристики киноформных элементов и элементов, состоящих из дифракционных решеток.

Рассмотрим ситуацию, когда апертура пучка лазерного излучения, падающего на оптический элемент, покрывает его не полностью, а только частично. В этом случае работает только та часть поверхности эле-

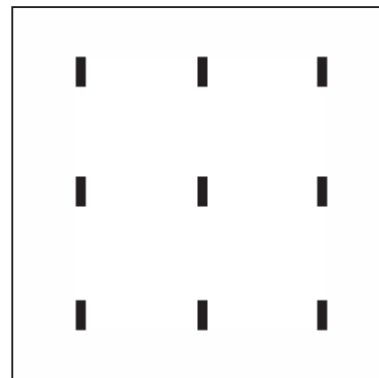
мента, которая освещена лазером (рис. 3). Такая ситуация является типичной в реальных устройствах, использующих подобные оптические элементы (делители пучка), так как в условиях серийного производства идеальная точность юстировки освещающего луча трудно достижима. Если же освещающий пучок имеет ширину, превышающую размер элемента, то возникает значительная потеря энергетической эффективности делителя.



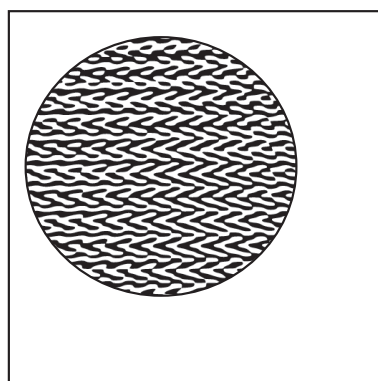
а)



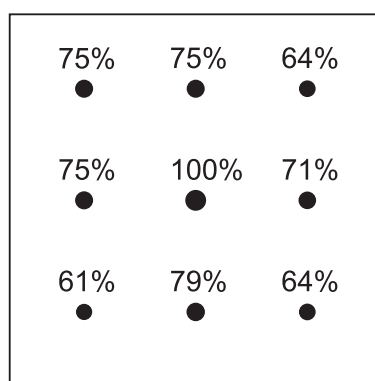
а)



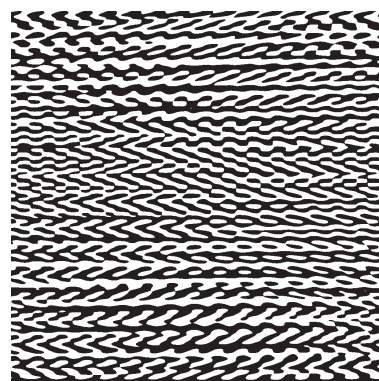
а)



б)



б)



б)

Рис. 3

Рис. 4

Рис. 5

На рис. 4а и 4б приведены результаты математического моделирования 2D изображений, формируемых такими оптическими элементами. Площадь кружков на иллюстрации пропорциональна интенсивности соответствующего пучка. За 100% здесь принята максимальная интенсивность пучка в каждом из решений.

Расчет изображений проводился по формуле (1) (приближение Френеля). Видно, что изображение, формируемое элементом, состоящим из дифракционных решеток, просто потеряло один из пучков в нижнем правом углу (рис. 4а). В то же время, изображение, формируемое киноформным элементом (рис. 4б), сохранило все элементарные изображения, несмотря на существенное уменьшение рабочей площади, составляющее порядка 60%.

Киноформные элементы имеют и другие преимущества. Основное из них заключается в том, что с помощью киноформов можно создавать 2D изображения, состоящие из любых элементарных изображений. Можно, например, синтезировать 2D изображение, состоящее из квадратов, прямоугольников, кольцевых секторов, треугольников и т.п.

На рис. 5а представлено 2D изображение, состоящее из прямоугольников. На рис. 5б представлен киноформ, формирующий это изображение.

Плоская оптика открывает широкие перспективы в задаче синтеза 2D изображения. Киноформные элементы имеют целый ряд преимуществ. Технология синтеза таких элементов включает в себя решение обратной задачи и формирование рассчитанного микрорельефа с высокой точностью, составляющей для оптического диапазона порядка 20 нанометров. Последняя задача может быть успешно решена с помощью технологии электронной литографии [1].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goncharsky A.V., Goncharsky A.A.* Computer optics & computer holography. M.: Moscow University Press, 2004.
2. *Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.* Numerical methods for the solution of ill-posed problems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
3. *Feng J., Zhou C., Cao H., Lv P.* Deep-etched sinusoidal polarizing beam splitter grating // *Appl. Opt.* 2010. **49**. 1739–1743.
4. *Homes C.C., Carr G.L., Lobo R.P.S.M., LaVeigne J.D., Tanner D.B.* Silicon beam splitter for far-infrared and terahertz spectroscopy // *Appl. Opt.* 2007. **46**. 7884–7888.
5. *Borghi R., Cincotti G., Santarsiero M.* Diffractive variable beam splitter: optimal design // *J. Opt. Soc. Am.* 2000. **A 17**. 63–67.
6. *Hermerschmidt A., Krüger S., Wernicke G.* Binary diffractive beam splitters with arbitrary diffraction angles // *Opt. Lett.* 2007. **32**. 448–450.
7. *Goncharsky A.A., Goncharsky A.V.* E-beam technology: current state and development prospects // *Holography News*. 2004. **18**, N 11. 6–7.
8. *Goncharsky A.V., Stepanov V.V.* Inverse problems in synthesis of optical elements // *Ill-Posed Problems in Natural Sciences*. M.: Mir Publisher, 1987. 318–340.
9. *Гончарский А.А., Туницкий Д.В.* Об обратной задаче синтеза оптических элементов для лазерного излучения // *Вычислительные методы и программирование*. 2006. **7**, № 2. 13–37.
10. *Гончарский А.А.* Об одной задаче синтеза нанооптических элементов // *Вычислительные методы и программирование*. 2008. **9**, № 2. 219–222.
11. *Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A.* The kinoform: a new wave-front reconstruction device // *IBM J. Res. Dev.* 1969. **13**. 105–155.

Поступила в редакцию  
30.08.2010

---