

УДК 535+535.4+620.3+519.658

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ И КОРРЕКЦИИ КАЧЕСТВА ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ СУБВОЛНОВЫХ РАЗМЕРОВ

© 2010 г. М. В. Борисов, В. А. Боровиков, А. А. Гавриков, Д. Ю. Князьков, В. И. Раховский, Д. А. Челюбеев, А. С. Шамаев

Представлено академиком Ф.Л. Черноусько 16.03.2010 г.

Поступило 07.04.2010 г.

Хорошо известен метод Габора [1, 2], позволяющий синтезировать так называемую “серую” голограмму заданного излучающего светового объекта. Пусть в плоскости $O\xi\eta$ определен (совокупностью точечных источников) излучающий объект \odot (рис. 1). Найдем поле этой совокупности источников с плотностью $V(\xi, \eta)$ с помощью интегральной формулы

$$u(x, y, z) = \iint_{\odot} V(\xi, \eta) G(x - \xi, y - \eta, z) d\xi d\eta, \quad (1)$$

где $G(x, y, z) = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{e^{ikr}}{2\pi r} \right)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Далее в плоскости $\{z = d\}$, параллельной плоскости объекта \odot (рис. 1), определим неотрицательную функцию

$$T(x, y) = \frac{1}{A_0(x, y)} (CA_0(x, y) + 2A(x, y) \cos[k(\Phi(x, y) - \Phi_0(x, y))]), \quad (2)$$

где $u(x, y, z) = A(x, y)e^{ik\Phi(x, y)}$, а $A_0(x, y)$ и $\Phi_0(x, y)$ – амплитуда и фаза волны $W = A_0 e^{-ik\Phi_0}$, которая называется восстанавливающей, $C > 2 \max \frac{A(x, y)}{A_0(x, y)}$ –

постоянная. Согласно методу Габора при облучении части Γ плоскости $\{z = d\}$ (голограммы) с функцией “пропускания” $T(x, y)$ восстанавливающей волной $W = A_0 e^{-ik\Phi_0}$ в плоскости объекта $O\xi\eta$ должно возникнуть близкое к заданному объекту световое изображение, а также центрально-симметричное “паразитное” изображение и “крестовое” изображение от дифракции на краях голограммы (если она имеет конечные размеры) (рис. 1). Функцию $T(x, y)$ мы называем функцией пропускания, понимая под этим, что при прохождении восстанавливающей волны W через плоскость голограммы

Γ прошедшая волна сохраняет фазу, а амплитуда умножается в точке (x, y) голограммы Γ на коэффициент пропускания $T(x, y)$. Хорошо известно [2], что погрешность созданного таким образом изображения оценивается величиной $\frac{\lambda}{2\sin\alpha}$, где

λ – длина световой волны, а α – половина угла, под которым видна голограмма Γ из центра объекта \odot . Практически создать голограмму с непрерывной функцией пропускания затруднительно и обычно в качестве приближения рассматривается так называемая “бинаризованная” голограмма, функция пропускания которой принимает только значения 0 и 1. Ее можно изготовить, приближая функцию $T(x, y)$ дискретными значениями в каждом достаточно малом квадрате на плоскости Oxy голограммы и перфорируя непрозрачную голографическую пластинку отверстиями, количество которых пропорционально дискретному значению этого приближения в каждом из указанных малых квадратов (ячеек).

Целью настоящей работы является: а) изучение погрешности создаваемого голографического изображения для простых геометрических объектов, характерные размеры которых соизмеримы с длиной световой волны; б) разработка методов уменьшения погрешности создаваемого изображения с помощью вариаций функции пропускания $T(x, y)$, осуществляемых на основе методов оптимизации (таких как метод локальных вариаций и метод градиентного спуска); в) изучение величины погрешности, возникающей при замене непрерывной функции пропускания бинаризованной голограммой; г) изучение возможности цифрового синтеза изображения, состоящего из очень большого количества простых геометрических элементов, по своей структуре аналогичного интегральной микросхеме.

Коллективом авторов был создан комплекс программ для синтеза голограмм, оптимизации качества изображений, восстановления изображений с “серой” и “бинаризованной” голограмм,

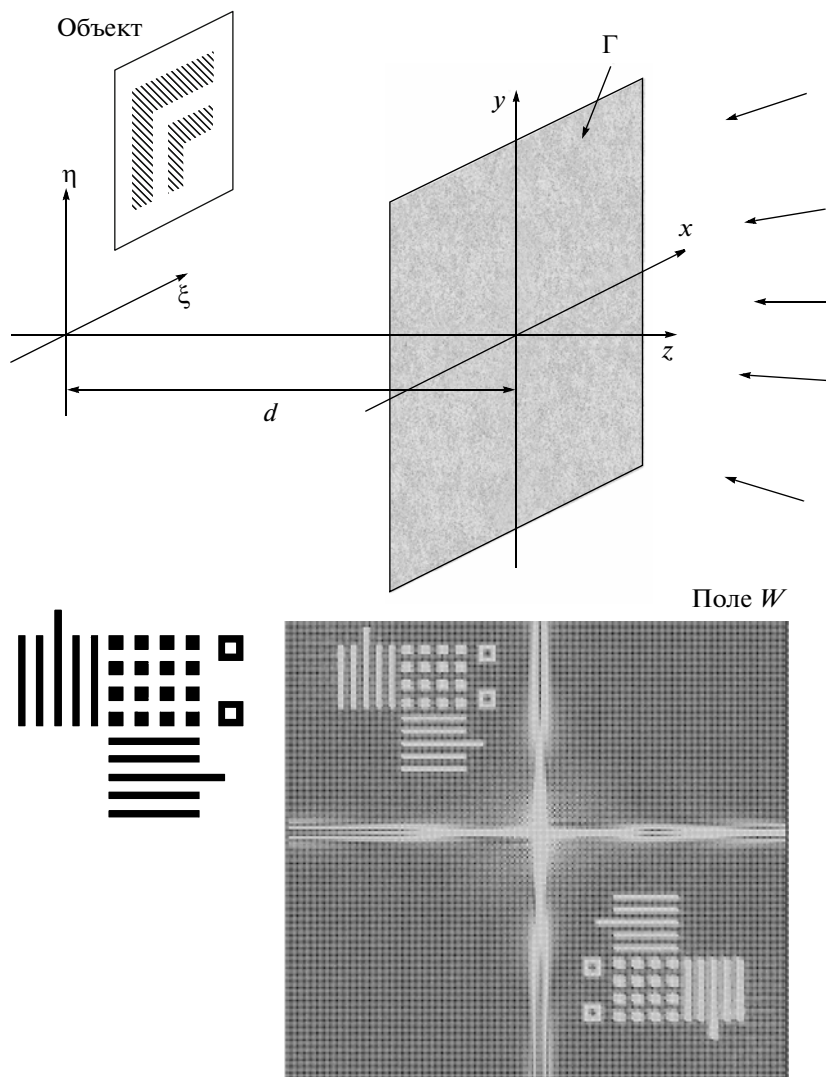


Рис. 1. Метод Габора.

а также для синтеза голограмм объектов сложной структуры, аналогичных интегральным микросхемам. Этот пакет был адаптирован к вычислительному комплексу МВС-100К, расположенному в Межотраслевом суперкомпьютерном центре РАН. С помощью этого пакета программ были получены следующие результаты.

1. Показано, что при создании световых голографических изображений простых геометрических объектов (квадрат, прямоугольник, уголок и пр.), характерные размеры которых соизмеримы с длиной волны λ , погрешность (т.е. максимум абсолютной величины отклонения полученной яркости от заданной) составляет 10–12% от максимального значения яркости. На границе светового потока возникают колебания яркости, аналогичные явлениям Гиббса в теории рядов Фурье. (См. рис. 2, где слева представлен график яркости изображения полоски шириной порядка 2λ .)

2. Применение методов оптимизации (градиентный спуск, метод локальных вариаций [3, 4]) позволяет уменьшить погрешность до 3–5% (рис. 2, правое изображение). На основе указанных методов осуществляется варьирование функции пропускания $T(x, y)$ на сетке в плоскости голограммы Г, что и дает указанные результаты.

3. С помощью математического моделирования показано, что бинаризация отверстиями диаметром от $\frac{\lambda}{2}$ до λ позволяет с высокой степенью точности передать изображение, получаемое восстановлением с голограммы с непрерывной функцией пропускания $T(x, y)$. Значения диаметров вне указанного интервала приводят к существенным погрешностям. На рис. 3 показаны графики яркости изображения, восстановленного с

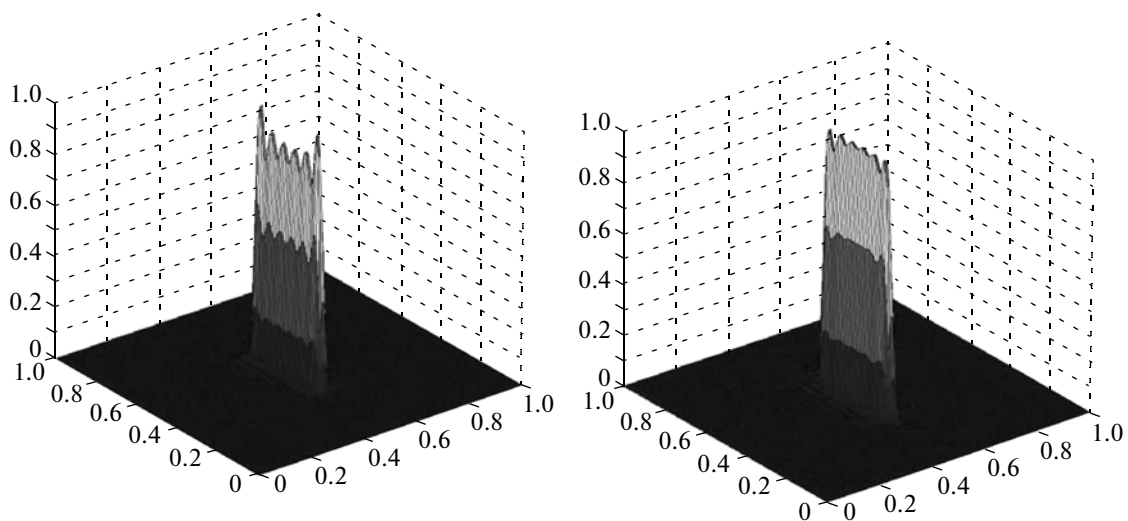


Рис. 2. Оптимизация голограммы.

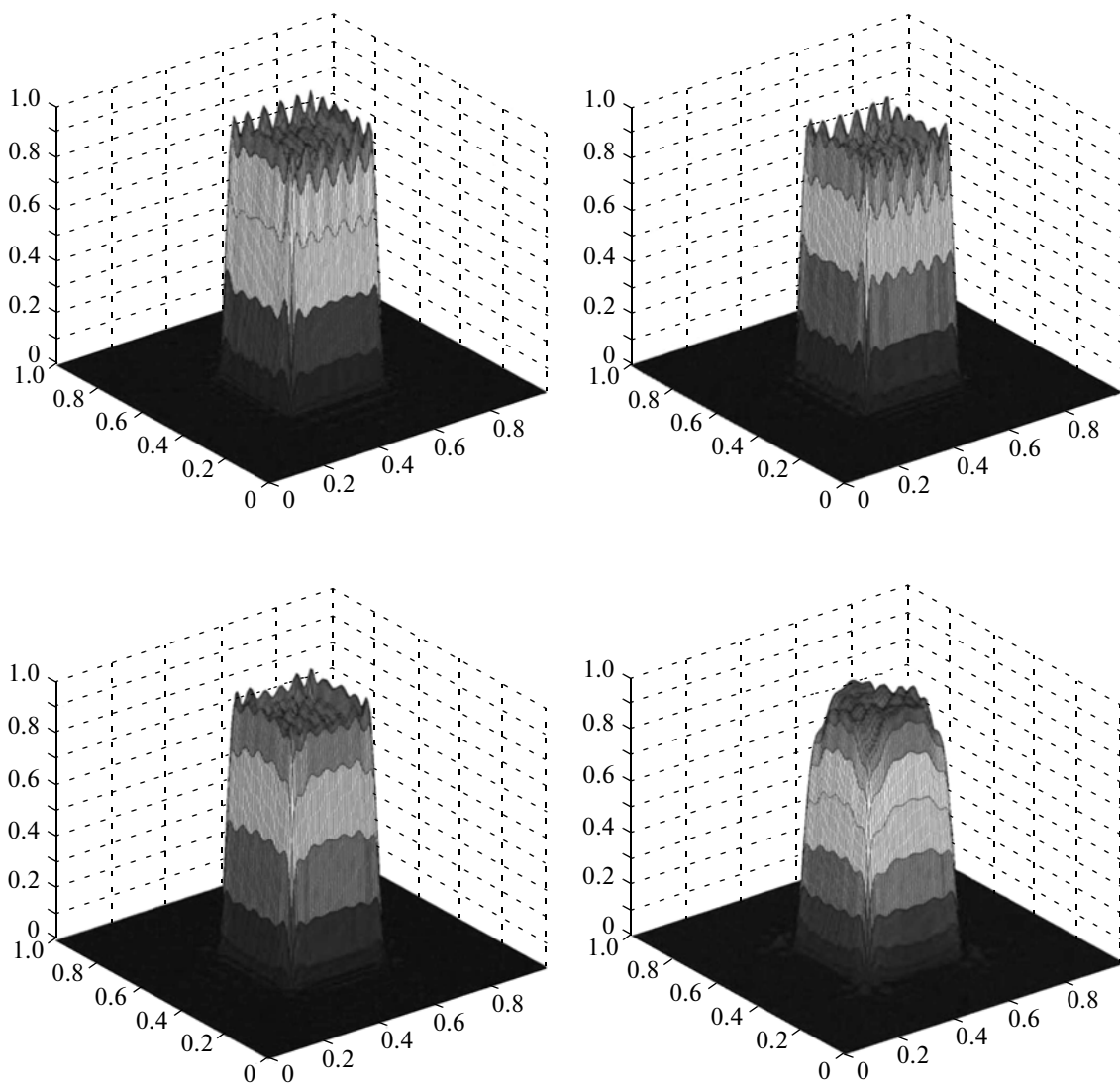


Рис. 3. Бинаризация отверстиями разного размера.

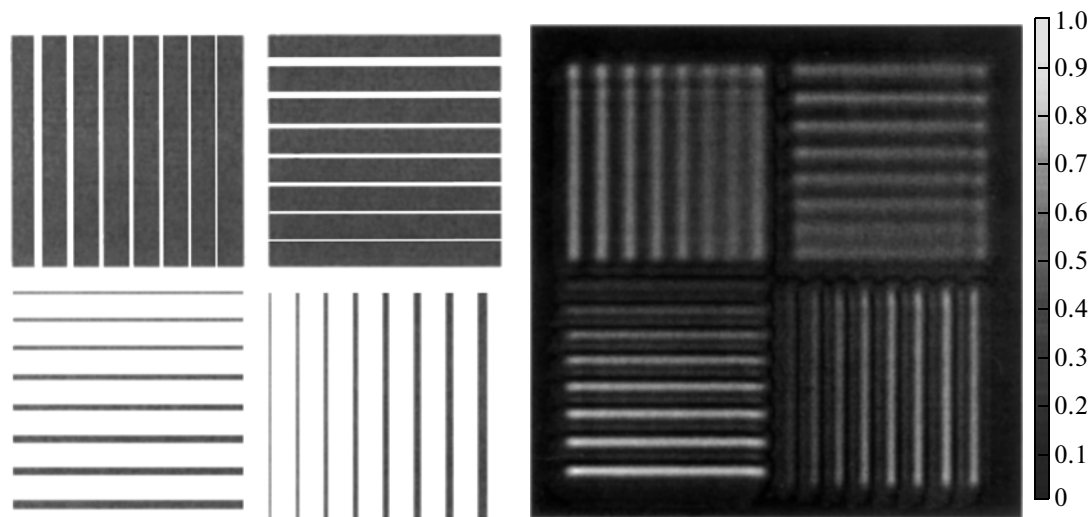


Рис. 4. Изображение тестовой топологии для $\lambda = 193$ нм.

непрерывной (вверху слева) и бинаризованной отверстиями диаметром $\frac{\lambda}{2}$, λ , 2λ голограмм.

4. Авторами разработаны методы синтеза голограммы светового изображения объекта, состоящего из нескольких сотен миллионов прямоугольников, аналогичных “проводникам” в интегральной микросхеме. Прямое вычисление по формулам (1) и (2) приводит к необходимости выполнения около 10^{24} арифметических операций. Столь большое число операций связано с очень малым (примерно 0.1λ) шагом интегрирования, дающим необходимую точность при прямом методе вычисления интегрированием квадратуры (1) для различных значений x , y . Такое количество операций не осуществимо ни на одном компьютере. Авторам удалось (используя специфику ядра G в квадратуре (1)) понизить требуемый объем операций до 10^{17} , что вполне реализуемо на суперкомпьютере РАН МВС-100К, производительность которого составляет примерно 10^{14} операций в секунду при условии одновременного использования всех 7920 процессорных ядер комплекса.

5. Авторами был осуществлен синтез голограммы (с использованием коррекции фазы и амплитуды излучения исходного изображения) и последующее компьютерное восстановление голографического изображения тестового объекта, характерные размеры которого в несколько раз меньше длины световой волны. Идеальное изображение и полученный голографический образ приведены на рис. 4. На идеальном изображении сверху расстояние между полосками составляют 70, 60, 50, 40, 30, 20 и 10 нм, снизу расстояние между полосками одинаково и равно 250 нм, а ширина полосок составляет 10, 20, 30, 40, 50, 60,

70, 80 нм. Численный эксперимент проводился для длины волны $\lambda = 193$ нм. Таким образом, характерные размеры создаваемого изображения на порядок меньше длины волны. Приведенный тестовый пример показывает, что для некоторых геометрических структур при создании их голографических изображений разрешение существенно превосходит классическую оценку $\frac{\lambda}{2\sin\alpha}$, приведенную выше.

Указанные результаты могут найти применение для совершенствования и даже кардинального изменения технологии создания микросхем. По сравнению с традиционными методами проекционной литографии [5–11], основанными на изготовлении так называемых проекционных масок, голографические маски обладают рядом радикальных преимуществ. К ним относятся чрезвычайно высокая устойчивость голограмм к локальным дефектам, а также возможность использования максимально простых оптических схем и недорогих объективов при подсветке голограмм когерентными лазерными световыми пучками. Численные эксперименты авторского коллектива показали, что при затенении даже 7% площади голограммы на соответствующем изображении не возникает локальных дефектов, приводящих к “коротким замыканиям” расположенных рядом прямоугольников или полосок. Простые оптические схемы могут быть использованы в силу возможности “исправлять” aberrации объектива путем внесения коррекций в расположение отверстий на бинаризованной голограмме, которые рассчитываются на ЭВМ еще до изготовления голограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gabor D.* // Nature. 1948. V. 161. P. 777–778.
2. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics. Oxford: Pergamon Press, 1980. 808 p.
3. *Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В.* Вариационные задачи механики и управления. Численные методы. М.: Наука, 1973. 240 с.
4. *Мусеев Н.Н., Иванюков Ю.П., Столярова Е.М.* Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 352 с.
5. *Borodovsky Y., Cheng W.-H., Schenker R., Singh V.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240E–69240E-14.
6. *Singh V., Hu B., Bollepalli S., Wagner S., Borodovsky Y.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240S–69240S-12.
7. *Daivids S.P., Bollepalli S.B.* // Proc. SPIE. 2008. V. 6924. P. 69240X–69240X-11.
8. *Poonawala A., Milanfar P.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6154. P. 1159–1172.
9. *Poonawala A., Milanfar P.* // IEEE Trans. Image Processing. 2007. V. 16. № 3. P. 774–788.
10. *Liu Y., Zakhora A.* // Proc. SPIE. 1991. V. 1463. P. 382–399.
11. *Granik Y.* // Proc. SPIE. 2005. V. 5754. P. 506–526.