

полупроводниковых лазеров в малогабаритных ГЗУ для хранения и считывания цифровой информации.

Авторы выражают благодарность Е. Ф. Пену за полезные обсуждения результатов работы, а также В. В. Карманову за большую помощь в проведении экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г., Никитин В. В., Самойлов В. Д., Семенов Г. И. Восстановление голограмм с помощью инжекционных лазеров.— В кн.: Оптические методы обработки информации. Л.: Наука, 1974.
2. Бобринев В. И. и др. Экспериментальные исследования голографического ЗУ на инжекционных лазерах.— Автометрия, 1977, № 5.
3. Калашников С. П., Климов И. И., Никитин В. В., Семенов Г. И. Запись фурье-голограмм излучением импульсных полупроводниковых лазеров.— Квант. электроника, 1977, т. 4, № 8.
4. Воробьев А. В. и др. Запись голограммы излучением полупроводникового лазера с голографическим селектором.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 12.
5. Калашников С. П. Исследование по записи и восстановлению фурье-голограмм излучением инжекционных лазеров: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук.— М.: ФИАН СССР, 1982.
6. Калашников С. П. и др. Запись и считывание информации излучением полупроводниковых лазеров для голографических ЗУ.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 8.
7. Пен Е. Ф. Исследование качества записи и воспроизведения изображений страниц двоичной информации в голографических ЗУ (ГЗУ).— В кн.: Тезисы докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике. Фрунзе: ФПИ, 1981.
8. Бутт В. Е. и др. Фотоматричная система для исследования изображений страниц информации в голограммных ЗУ.— Там же.
9. Аксельрод А. А. и др. Исследование надежности считывания информации опто-электронным каналом ГЗУ.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 5.
10. Троицкий И. И., Устинов И. Д. Статистическая теория голографии.— М.: Радио и связь, 1981.
11. Meier R. W. Magnification and third-order aberrations in holography.— JOSA, 1965, vol. 55, N 8, p. 987—992.

*Поступила в редакцию 23 марта 1983 г.*

УДК 621.3.049.77.002 : 776

**В. Б. ГУРСКИЙ, Р. Е. ПЯТЕЦКИЙ**

*(Минск)*

### **ПОЛУЧЕНИЕ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

Основной тенденцией развития микроэлектроники является уменьшение размера минимального элемента топологии интегральных схем (ИС), ведущее к увеличению быстродействия, снижению рассеиваемой мощности, более плотной упаковке и в конечном итоге — к более высокому уровню интеграции изделий электронной промышленности [1]. Развитие микроэлектроники выдвигает на первый план совершенствование литографии. Задача настоящего времени — получение воспроизводимых элементов субмикронных размеров.

Как известно, литографический процесс принято подразделять на две стадии: 1) генерирование в резисте топологического рисунка ИС, который состоит из бинарных элементов с линейными границами; 2) перенос этого рисунка в лежащую под резистом подложку.

В данной работе на основе скалярной теории дифракции рассматриваются вопросы, связанные с первой стадией литографии, осуществляемой в когерентном свете.

При формировании защитной маски в фоторезисте граница элемента топологии ИС проходит через семейство точек, расположенных в изображении этого элемента, где резист получает определенное пороговое количество освещения (или дозы), равное произведению освещенности в этих точках на время экспонирования. Таким образом, распределение освещенности в изображении элемента и время экспонирования при стабильном литографическом процессе однозначно определяют границу элемента в резисте. Это позволяет свести анализ получения и воспроизводимости микронных и субмикронных элементов на первой стадии литографии к анализу распределения освещенности в изображении этих элементов.

**Распределение освещенности в изображении микронных и субмикронных элементов.** Современные проекционные установки используют оптику, которую можно считать дифракционно ограниченной. Тем более это утверждение справедливо для малопольных объективов, размер поля которых порядка нескольких сотен элементов разрешения. Оптические характеристики таких объективов целиком определяются дифракционными эффектами, связанными с ограниченным размером числовой апертуры.

С точки зрения формирования изображения малопольный проекционный объектив представляет собой линейную инвариантную систему. Формирование изображения таким объективом в математическом виде описывается сверткой в пространственной области функции предмета с импульсной реакцией объектива. Для когерентного света распределение освещенности в изображении элемента с прямоугольным амплитудно-фазовым распределением по предмету представляется следующим выражением [2]:

$$E(x, y) = \left| \int_{x-x_0}^{x+x_0} \int_{y-y_0}^{y+y_0} K_0(u, v) dudv \right|^2, \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты в плоскости изображения;  $2x_0, 2y_0$  — размеры предмета, приведенные к плоскости изображения;  $K_0$  — импульсная реакция объектива.

Воспользовавшись выражением для нормированной импульсной реакции круглого зрачка [2], перепишем (1) в каноническом виде

$$E(\alpha, \beta) = \left| 2,34 \int_{\alpha-\alpha_0}^{\alpha+\alpha_0} \int_{\beta-\beta_0}^{\beta+\beta_0} \frac{J_1(1,22\pi\sqrt{u^2+v^2})}{1,22\pi\sqrt{u^2+v^2}} dudv \right|^2, \quad (2)$$

где  $\alpha = x/R_0$ ,  $\beta = y/R_0$ ,  $\alpha_0 = x_0/R_0$ ,  $\beta_0 = y_0/R_0$ ,  $R_0$  — радиус диска Эйри, равный  $0,61 \lambda/A$ ;  $\lambda$  — длина волны;  $A$  — числовая апертура объектива;  $J_1$  — бесселева функция первого рода первого порядка.

Исследование влияния дефокусировки на распределение освещенности в изображении удобнее анализировать в области пространственных частот, пользуясь аппаратом преобразования Фурье. Этот подход позволяет, зная функцию зрачка, получить распределение освещенности в изображении через два преобразования Фурье (прямое и обратное). Как известно, дефокусированная функция зрачка дифракционно ограниченной системы записывается в следующем виде [2]:

$$W(u, v) = K(\pi z/\lambda)(u^2 + v^2). \quad (3)$$

Здесь  $u, v$  — переменные в области пространственных частот;  $z$  — величина дефокусировки;  $K$  — нормировочный коэффициент, учитывающий, что при дефокусировке, равной глубине резкости объектива  $z = \lambda/2A^2$ , пространственные частоты на границе полосы пропускания объектива испытывают фазовый сдвиг, равный  $\pi$ .

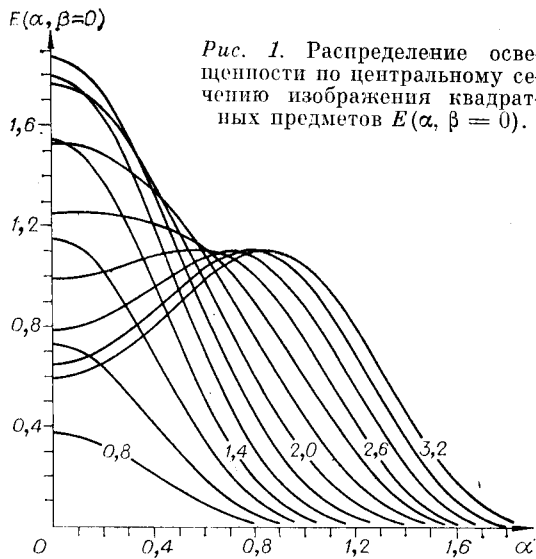


Рис. 1. Распределение освещенности по центральному сечению изображения квадратных предметов  $E(\alpha, \beta = 0)$ .

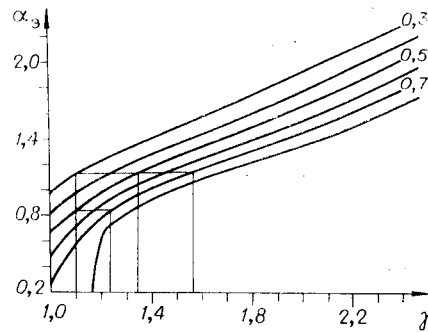


Рис. 2. Зависимость размера изображения от размера предмета для набора изофоты  $E = 0,3 \dots 0,8$ .

Тогда распределение освещенности  $E(\alpha, \beta)$  определяется выражением

$$E(\alpha, \beta) = \Phi^{-1}\{W(u, v)\Phi[f(x, y)]\}, \quad (4)$$

где  $\Phi, \Phi^{-1}$  — соответственно выполнение прямого и обратного преобразований Фурье;  $f(x, y)$  — комплексная функция предмета, которая в нашем случае является прямоугольной.

Выражение (4) рассчитывалось с помощью ЭВМ на основе разработанной программы, использующей метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) [3].

Сопоставление профилей освещенности, полученных на основе программы для выражения (2) и программы, применяющей БПФ при  $z = 0$ , показало соответствие в пределах 5%. Это является подтверждением применимости БПФ в оптических расчетах, позволяющего резко сократить требуемое машинное время. Так, в нашем случае время расчета одного изображения в среднем меньше в 8 раз по сравнению с расчетом по заданной импульсной реакции.

На рис. 1 приведены рассчитанные распределения нормированной по отношению к предмету освещенности  $E(\alpha, \beta = 0)$  по центральному сечению изображения для набора квадратных предметов. Поскольку поверхность  $E(\alpha, \beta)$  симметрична относительно осей  $\alpha, \beta$ , сечения  $E(\alpha, \beta = 0)$  показаны только для положительных значений  $\alpha$ . Реально возможным в настоящее время значениям длины волны УФ-излучения  $\lambda = 0,35$  мкм и числовой апертуры проекционного объектива  $A = 0,4$  соответствует радиус диска Эйри  $R_0 = 0,53$  мкм, поэтому, с точки зрения данной работы, посвященной воспроизводимости микронных и субмикронных элементов, естественно ограничиться верхним пределом для диапазона размеров рассматриваемых предметов  $\gamma = 2\alpha_0 \sim 2,4$ . Из рис. 1 следует, что при  $\gamma < 1,2$  происходят резкие уменьшения интенсивности в центре изображения и краевого градиента, поэтому в качестве нижнего предела размеров можно взять величину  $\gamma \sim 1,1$ .

Семейство кривых (рис. 2) для набора изофот, полученное из рис. 1, показывает, как изменяется размер изображения  $\alpha_0$  на уровне каждой из выбранных изофот в зависимости от размера предмета для рассматриваемого диапазона предметов  $1,1 \leq \gamma \leq 2,4$ . Как видно из этих кривых, наиболее точное соответствие размеров предмета и изображения существует вблизи изофоты  $E = 0,3$ , и с увеличением уровня это соответствие все более нарушается. Рис. 2 позволяет определить размер генерированного в резисте элемента, соответствующий конкретному предмету и уровню изофоты. Семейство кривых рис. 2 может использоваться с учетом коэффициента передачи объектива при разработке микронных и субмикронных элементов топологии ИС. Выбор изофоты оказывает серъ-

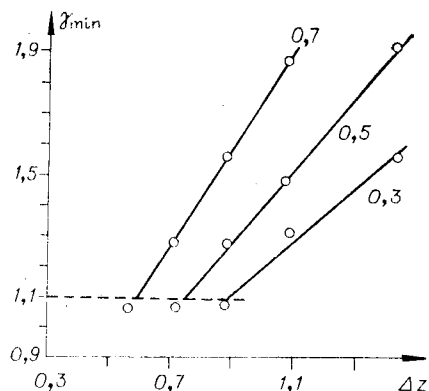


Рис. 3. Зависимость размера минимального воспроизводимого предмета от допуска на дефокусировку для трех изофот  $E = 0,3; 0,5; 0,7$ .

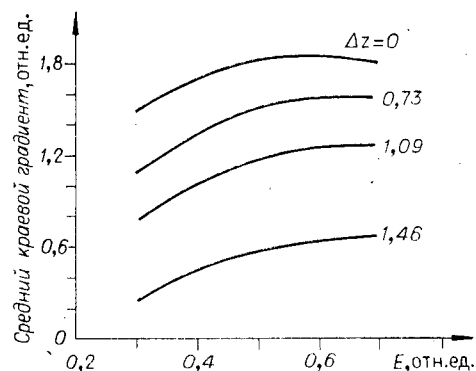


Рис. 4. Зависимость краевого градиента, усредненного по рассматриваемому диапазону размеров предметов, от уровня изофоты для  $\Delta z = 0; 0,73; 1,09; 1,46$ .

езное влияние на размер минимального элемента. Так, например, предельному разрешению системы «объектив — резист», достигаемому на уровне  $E = 0,7$ , соответствует минимальный элемент  $\alpha_{э\text{ min}} = 0,55$ , в то время как изофоте  $E = 0,3$  — элемент  $\alpha_{э\text{ min}} = 1,12$ . Кроме того, получение элементов, соответствующих  $E = 0,7$ , требует при прочих равных параметрах в 2—3 раза меньшую экспозицию по сравнению с уровнем  $E = 0,3$ , что является важным фактором с точки зрения производительности экспонирующего оборудования. Кроме того, следует отметить тот очевидный факт, что невозможно получение желаемых элементов для широкого диапазона размеров предметов при неправильном выборе изофоты. Так, например, изображения предметов с размерами  $2,8 \leq \gamma \leq 3,6$  имеют в центре провал, достигающий 0,6. Это исключает возможность использования высоких уровней изофот для генерирования изображений таких предметов. Для получения полного заключения о правильном выборе уровня изофоты необходимо исследовать вопросы, связанные с воспроизводимостью размеров предельных элементов.

**Воспроизводимость размеров предельных элементов.** На первой стадии литографии существуют только два источника нестабильности элементов с размерами вблизи дифракционных пределов, связанной с оптико-механическим оборудованием: ошибка фокусировки и нестабильность дозы экспозиции. Ошибка фокусировки — главный параметр, поскольку именно она определяет отклонение распределения освещенности в изображении от идеального и величину краевого градиента на уровне выбранной изофоты. Все остальные параметры, включая технологические колебания чувствительности резиста (условия его нанесения, сушки и т. д.) и условия его проявления, влияют на изменение размера элемента через краевой градиент. Для удобства дальнейшего рассмотрения при определении допуска на размер будем рассчитывать отклонение размера элементов, соответствующее 10%-ному отклонению дозы, подразумевая под этим вклад всех перечисленных факторов, которые сказываются на отклонении размера через величину краевого градиента.

С помощью выражения (4) для изофот  $E = 0,7; 0,5; 0,3$  были рассчитаны кривые максимального отклонения размера дефокусированного изображения от сфокусированного в зависимости от размера предмета. На основании таких кривых, рассчитанных для  $\Delta z = 0,55; 0,73; 0,88; 1,09; 1,46$  (величина дефокусировки  $\Delta z$  измеряется в нормированных по отношению к глубине резкости объектива единицах), были получены зависимости, показывающие, как влияет  $\Delta z$  на размер минимального воспроизводимого предмета (рис. 3). Под минимальным воспроизводимым предметом  $\gamma_{\text{ min}}$  понимается такой предмет, изменение размеров изображения которого на уровне выбранной изофоты, происходящее в диапа-

Допуск на дефокусировку, мкм	Числовая апертура, $\Delta$	Уровень изофоты, отн. ед.	Минимальный элемент, мкм	Отклонение размера вследствие дефокусировки, мкм	Отклонение размера вследствие изменения дозы, мкм	Среднеквадратичное отклонение размера, мкм
0	0,45	0,7	0,36	0	0,053	0,053
0,6	0,45	0,5	0,44	0,044	0,06	0,074
0,8	0,4	0,5	0,50	0,05	0,07	0,086
1,0	0,45	0,5	0,62	0,062	0,08	0,1
1,0	0,4	0,5	0,60	0,06	0,085	0,1
1,0	0,35	0,5	0,57	0,057	0,08	0,098
1,0	0,3	0,5	0,64	0,064	0,09	0,11
1,5	0,35	0,5	0,73	0,073	0,1	0,123
1,5	0,3	0,5	0,68	0,068	0,1	0,121

жании фокуса с точностью  $\Delta z \leq 0,6$  на изофотах  $E = 0,7; 0,5; 0,3$  возможны предельные элементы  $\alpha_{\min} = 0,55; 0,83; 1,12$  соответственно. Из рис. 2, 3 видно, что уровень  $E = 0,7$  в диапазоне предметов  $1,1 \leq \gamma_{\min} \leq 1,24$  ( $\Delta z \leq 0,68$ ) предпочтителен по отношению к другим уровням с точки зрения получения минимального воспроизводимого элемента в резисте. Для  $1,23 \leq \gamma_{\min} \leq 1,35$  ( $0,68 \leq \Delta z \leq 0,95$ ) предпочтительным является уровень  $E = 0,5$ . И наконец, для минимальных воспроизводимых предметов  $\gamma_{\min} > 1,35$  ( $\Delta z > 0,95$ ) с целью получения максимального разрешения системы «объектив — резист» при такой точности фокусировки необходим переход на уровень  $E = 0,3$ .

На рис. 4 для четырех допусков на дефокусировку показано, как изменяется в зависимости от уровня изофоты величина краевого градиента, усредненного по диапазону рассматриваемых предметов.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, 4, позволяет оптимизировать выбор числовой апертуры объектива и уровня изофоты с точки зрения предельного воспроизводимого элемента и производительности экспонирующего облучения. Результаты анализа сведены в таблицу, по которой можно выбрать оптимальную числовую апертуру объектива и уровень изофоты в зависимости от допуска на точность фокусировки для экспонирующего излучения  $\lambda = 0,35$  мкм.

Из таблицы видно, что высокая разрешающая способность высокоапертурных объективов может быть реализована только при условии точной фокусировки ( $\Delta z$  не хуже  $0,6 \dots 0,8$  мкм). При низкой точности фокусировки может оказаться, что объективам с меньшей числовой апертурой соответствует меньший минимальный воспроизводимый элемент. Так, например, при допуске на ошибку фокусировки  $\Delta z = 1,5$  мкм увеличение числовой апертуры от 0,3 до 0,35 не дает уменьшения минимального элемента, наоборот, минимальный воспроизводимый элемент увеличивается от 0,68 до 0,73 мкм.

Как показано в [4], распределения освещенности проекционных изображений, рассчитанные на основе скалярной и электромагнитной теорий дифракции, отличаются пренебрежимо мало, если пространство изображений расположено в гомогенной среде. Поэтому полученные результаты моделирования формирования изображения применимы только для случая генерирования изображения в многослойных резистах [5], в которых отсутствуют отражения экспонирующего света от подложки и других границ раздела пленочной системы, расположенной на подложке, в фоточувствительный слой.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показывает, что важная роль для полной реализации возможностей проекционной фотолитографии в направлении миниатюризации отведена моделированию процессов фотолитографии.

2. В субмикронной и микронной областях возможны как точная передача размеров предметов, заложенных в топологию ИС, на низких уровнях изофот, так и управление размерами элемента на стадии проектирования топологии ИС по заранее рассчитанным зависимостям размера изображения, соответствующего выбранному уровню изофоты, от размера предмета.

3. Правильный выбор численной апертуры объектива и уровня изофоты играет главную роль в оптимизации важнейших параметров оптико-механического оборудования, таких как минимальный воспроизводимый элемент и производительность.

4. Генерирование воспроизводимых микронных и субмикронных элементов накладывает жесткие требования к точности фокусировки и дозировки экспонирующей энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глазков И. М., Райхман Я. А. Тенденции развития методов литографии в микроэлектронике.— Электрон. пром-сть, 1980, вып. 6.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1970.
3. Coley J. W., Tukey J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series.— Math. Comput., 1965, vol. 19, N 4, p. 297—301.
4. Van den Berg H. A. M., van den Berg P. M. Optical lithography: The implications of the electromagnetic field theory.— IEEE Trans. on Electron Dev., 1981, vol. ED-28, N 12, p. 1535—1543.
5. O'Toole M. M., Lin E. D., Chang M. S. Linewidth control in projection lithography using a multilayer resist process.— IEEE Trans. on Electron Dev., 1981, vol. ED-28, N 11, p. 1405—1409.

*Поступила в редакцию 7 июля 1982 г.*

УДК 535.8 : 535.411

**В. А. ЗУБОВ, А. В. КРАЙСКИЙ, Т. Т. СУЛТАНОВ,  
А. Г. ХЛЕБНИКОВ**  
(Москва)

## КОРРЕЛЯТОР НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ ЭВМ

Оптическая обработка двумерной информации представляет большой интерес при решении ряда задач коррекции оптических изображений, выполнении различных интегральных преобразований, опознавании изображений и выделении сигналов на фоне помех [1, 2]. При этом приходится иметь дело с большими объемами входной информации, описывающими обрабатываемое изображение и фильтр. Это обстоятельство приводит к применению на первом этапе методов оптической обработки информации, выполняемой параллельно для всего изображения, а на следующих этапах (при существенно меньших объемах информации) — методов электронной техники.

В данной работе рассмотрена система сочетания оптической и электронной обработок информации [3] применительно к задачам получения корреляционных функций. В качестве оптической части устройства использован коррелятор на основе модифицированного двухлучевого ин-