

акустооптической шкалы. Расстояние от зеркала до шкалы 1 м. Выход оптического канала подключается к фазовому детектору, а с выхода фазового детектора снимается сигнал, линейно повторяющий закон колебаний луча по шкале. Полоса частот регистрации составляет в узкополосном режиме 10 Гц — 1 кГц, в широкополосном режиме — 10 Гц — 40 кГц и ограничивается шириной полосы фильтра после фазового детектора. Уровень шумов в полосе 10 Гц — 1 кГц позволяет регистрировать вибрации с амплитудой колебаний пучка 2 мкм, что соответствует колебанию зеркала на 10^{-6} рад. При расширении полосы до 40 кГц чувствительность снижается до 8—10 мкм. Повышение разрешающей способности данной схемы достигается за счет повышения частоты модуляции F_M при одновременном повышении несущей частоты F_A . В практической схеме предусматривается собирающая линза в отраженном пучке, установленная так, чтобы при смещении пучка по шкале нулевой порядок дифракции не уходил с площадки фотодетектора. Возможные области применения описанного устройства: измерение неустойчивости диаграммы направленности лазерного излучения как в видимом, так и в ИК-диапазоне; бесконтактное исследование вибраций объектов в широком диапазоне частот (до сотен килогерц); измерение деформаций и перемещений в пространстве различных объектов; измерение рефракции луча в прозрачных веществах под внешним воздействием; измерение формы отражающих тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1413422 СССР. Акустооптическое устройство для измерения перемещений / А. Ф. Бессонов, В. А. Комоцкий, М. В. Котюков.—Опубл. 1988, Бюл. № 28.
2. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Анализ взаимодействия световой волны с системой пространственно разнесенных периодических структур при оптическом зондировании поверхностных акустических волн // Оптика и спектроскопия.—1984.—56, вып. 6.
3. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Плавная раздельная регулировка групповой задержки и фазы несущей частоты сигнала в акустической линии задержки // Радиотехника.—1982.—37, № 9.
4. Komot'skii V. A., Black T. D. Analysis and application of stationary reference grating method for optical detection of surface acoustic waves // J. Appl. Phys.—1981.—52, N 1.—P. 129.
5. Комоцкий В. А. О новой методике измерения групповой скорости ПАВ с применением метода оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой: Тез. докл. III конф. Научно-учебного центра УДН «Применение физико-химических методов исследования в науке и технике», 20—23 февраля 1990 г.—Ч. 1.

Поступило в редакцию 7 сентября 1990 г.

УДК 535.4 : 519.28

И. Г. Пальчикова

(Новосибирск)

ФУНКЦИЯ ЗРАЧКА, ЧИСЛО ШТРЕЛЯ И ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФАЗОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ

Рассмотрено влияние ошибок совмещения фотошаблонов на число Штреля и дифракционную эффективность фазовой зонной пластинки. Проведено математическое моделирование статистического процесса совмещения. Приводятся зависимости среднего значения, дисперсии числа Штреля и дифракционной эффективности от величины среднеквадратичного отклонения нормированных ошибок совмещения при равноглубинном и неравноглубинном травлении для различного количества ступеней в фазовом профиле зоны.

Форма волнового фронта, формируемого зонными пластинками в любом из порядков дифракции, не зависит от дифракционной эффективности, но свет, отклоненный в нерабочие порядки, частично попадает в плоскость изображения и искажает его. Поэтому важно обеспечить максимальную эффективность в рабочем порядке при одновременном максимально возможном снижении интенсивности фоновой засветки. Дифракционная эффективность зонных пластинок зависит от методов изготовления. В настоящее время общепринятой является фотолитографическая технология, позволяющая создать ступенчатый фазовый профиль в пределах одной киноформной зоны. Процесс изготовления киноформного фазового профиля подробно описан в ряде работ [1—3] и состоит из технологических этапов, в каждом из которых неизбежны ошибки, приводящие к искажению волнового фронта, формируемого элементом, и к снижению дифракционной эффективности. При создании многоступенчатого рельефа основными являются ошибки в глубине травления $\mu, \gamma, \Delta, \delta, \epsilon$ влекущие за собой направление каждой ошибки, причем их действие взаимосвязано, то дать единой формулы для любого числа фотошаблонов невозможно. Анализ осложняется также тем, что совмещение выполняется оператором, который допускает в каждой операции независимые ошибки, малые, но конечные, примерно равные по величине и с равной вероятностью принимающие как положительные, так и отрицательные значения. Ошибка совмещения — это случайная величина с гауссовой функцией распределения. Поэтому практический интерес представляют ответы на следующие вопросы. Какова должна быть допустимая погрешность совмещения, задаваемая оператору? Каков при этом будет выход готовых изделий?

Наиболее удобными мерами качества ЗП являются нормированная дифракционная эффективность η' / η_0 и число Штреля i , которые, согласно [4, 6 и 8] находятся путем интегрирования функции зрачка:

$$\frac{\eta'}{\eta_0} = \frac{1}{\pi C_1^2} \int_0^{1/2\pi} \int_0^{1/2\pi} |C_1'(\rho, \theta)|^2 \rho d\rho d\theta; \quad (1)$$

$$i = \frac{1}{\pi^2 C_1^2} \left| \int_0^{1/2\pi} \int_0^{1/2\pi} C_1'(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right|^2. \quad (2)$$

Здесь и далее используются методология, формулы и обозначения, принятые в [6]: (ρ, θ) или (x, y) — нормированные координаты выходного зрачка; C_1 и C_1' — коэффициенты ряда Фурье для комплексной прозрачности в одной точке зонной пластинки без искажений и с искажениями топологии.

Указанные меры качества — это аналитические функции от случайных величин ошибок совмещения, а значит, и сами суть величины случайные, для характеристики которых обычно используются гистограмма, а также среднее значение и среднеквадратичное отклонение, содержащие ответы на поставленные вопросы.

Пусть для изготовления зонной пластинки с киноформным фазовым профилем требуется M_0 фотолитографий. При выполнении операций совмещения допускается M_0 ошибок совмещения $\{\delta_i\}$ и комплексная

прозрачность киноформа принимает вид, аналогичный выражениям (4) и (5) из [6]:

$$F_1(x, y) = \prod_{l=1}^{M_0} \exp\{jP_l[\varphi(x, y) + \varepsilon_l(x, y)]\}, \quad (3)$$

где по-прежнему $\varphi(x, y)$ — фазовая функция зонной пластинки; функция P_l описывает изменение оптической толщины подложки после обработки ее с помощью l -го шаблона; ε_l — ошибка совмещения, выраженная в фазовой мере и связанная с координатами выходного зрачка (x, y) , нормированными на его радиус a , и величиной случайного сдвига фотошаблона δ_l равенством

$$\varepsilon_l = \frac{2\pi a}{\lambda f} (\delta_{l,x}x + \delta_{l,y}y),$$

где $(\delta_{l,x}; \delta_{l,y})$ — координаты вектора сдвига; λ — длина световой волны; f — фокусное расстояние зонной пластинки. Набор M_0 векторов сдвига представляет собой статистическую выборку из нормально распределенной совокупности со средним значением, равным нулю (идеальное совмещение), и наперед заданным среднеквадратичным отклонением $\sqrt{\langle \delta_l^2 \rangle}$ (вероятность того, что ошибка, допускаемая при совмещении, меньше $\sqrt{\langle \delta_l^2 \rangle}$, составляет 0,68). Поскольку сдвиги по x - и y -направлениям не коррелированы и равновероятны, то их среднеквадратичные отклонения связаны с $\sqrt{\langle \delta_l^2 \rangle}$ следующим образом:

$$\langle \delta_l^2 \rangle = \langle \delta_{l,x}^2 \rangle + \langle \delta_{l,y}^2 \rangle = 2\langle \delta_{l,x}^2 \rangle = 2\langle \delta_{l,y}^2 \rangle; \quad (4)$$

коэффициент C_1 ряда Фурье получаем аналогично (5) и (8) из [6]:

$$C_1(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_1(\varphi, \varepsilon) e^{j\varphi} d\varphi. \quad (5)$$

Интервал интегрирования $(0 \div 2\pi)$ разбивается на подынтервалы, в пределах которых функция $F_1(\varphi)$ остается постоянной. Границы подынтервалов задаются величинами M_0 и $\varepsilon_l(x, y)$ и соответствуют точкам, где аргумент функции $F_1(x, y)$ испытывает скачки, после чего интегрирование (5) становится тривиальным и требуемое отношение $C_1(x, y)/C_1$ находится с учетом того, что

$$C_1 = N\pi^{-1} \sin(\pi/N) e^{-j\pi/N},$$

где N — количество ступеней в фазовом профиле зоны. Решая уравнение (5) для различных заданных точек выходного зрачка, можно определить подынтегральные функции выражений (1) и (2) и после численного интегрирования получить одно выборочное значение дифракционной эффективности и числа Штреля.

При заданной допустимой погрешности совмещения путем многократного повторения вычислений для различных выборок $\{\delta_{l,x}\}$ и $\{\delta_{l,y}\}$ определяются последовательности значений $\{\eta_l/\eta_0\}$ и $\{i_l\}$, по которым строятся гистограммы, находят выборочные средние значения и дисперсии.

Описанная процедура расчетов реализована в виде программ на языке Фортран для двух способов травления — равноглубинного и неравноглубинного, описанных в [6].

Комплекс программ предназначен для вычисления выборочных средних значений и среднеквадратичных отклонений для числа Штреля и дифракционной эффективности, а также для вычисления массива, содержащего количество зонных пластинок с числом Штреля, попадающим в соответствующий бин гистограммы, при равноглубинном и неравноглубинном способах травления. Входными данными для комплекса программ являются: количество ступеней фазового профиля; среднеквадратичное отклонение функции распределения нормированных величин сдвига шаблона (допустимая погрешность совмещения); длина выборок значений числа Штреля и дифракционной эффективности (количество элементов, изготавливаемых в одном технологическом процессе); количество бинов на гистограмме.

Вычислительный эксперимент проводится с терминала ЭВМ СМ-4. Входные параметры задаются в диалоговом режиме с дисплея, результаты расчетов выводятся на дисплей и при необходимости на АЦПУ.

Расчеты выполнялись для различного количества фазовых ступеней, длина выборок задавалась достаточно большой (> 100 элементов). Результаты расчетов представлены в виде графиков и гистограмм на рис. 1—6.

Графики зависимости среднего значения числа Штреля $\langle i_l \rangle$ от величины среднеквадратичного отклонения нормированных ошибок совмещения $\Delta = \sqrt{\langle (\Delta l / \lambda f)^2 \rangle}$ для различного количества ступеней рельефа даны на рис. 1, а; 2, а при равноглубинном травлении и на рис. 3, а; 4, а — при неравноглубинном. Точки соответствуют среднему значению. Среднеквадратичное отклонение указано знаком $\bar{\Delta}$. Соответствующие гистограммы даны на рис. 1, б — 4, б. Площадь прямоугольника над каждым бином равна доле от общего числа киноформов, у которых величина числа Штреля попадает в этот бин. На рис. 5, 6 представлены аналогичные графики для нормированной дифракционной эффективности при равноглубинном и неравноглубинном травлениях соответственно. Дифракционная эффективность ухудшается значительно больше, чем

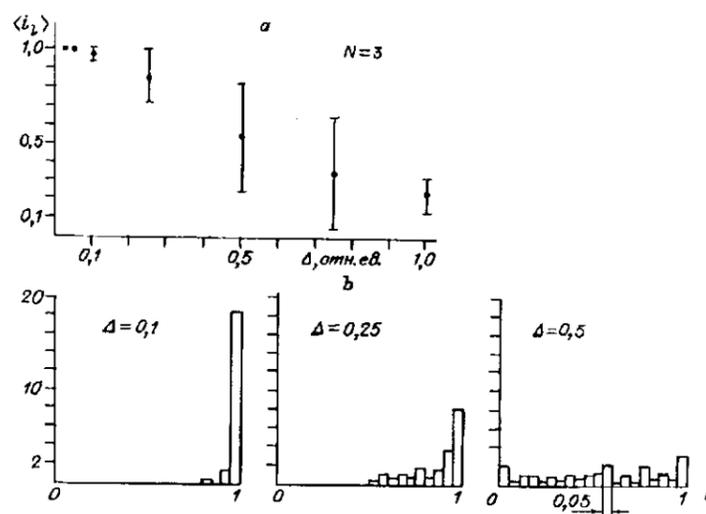


Рис. 1

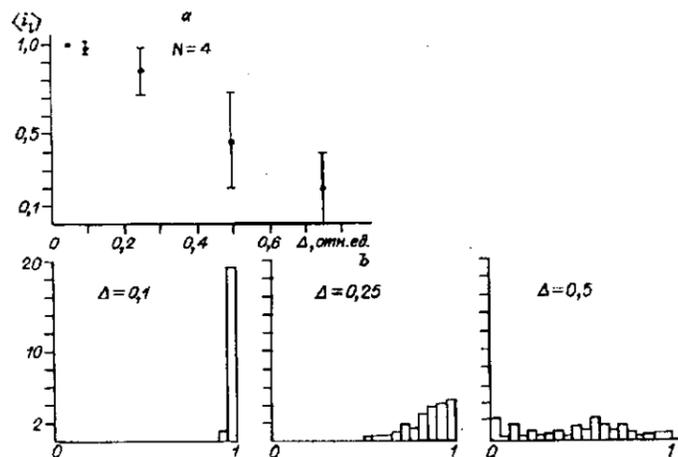


Рис. 2

число Штреля при равных ошибках совмещения, что следует из сравнения рис. 1, а и 5, а, 2, а и 5, б, 3, а и 6, а, а также 4, а и 6, б.

Приведенные данные необходимо использовать при расчете киноформных элементов, чтобы учитывать технологические ограничения. Качество изображения киноформов и дифракционная эффективность резко ухудшаются при снижении требований на точность совмещения (увеличении среднеквадратичного отклонения). По критерию Маршала допустимо уменьшение числа Штреля до 0,8. Сравнивая графики 2, а и 3, а ($N = 4$), легко видеть, что технология неравноглубинного травления существенно более чувствительна к ошибкам совмещения. Если $\Delta = 0,1$ (или 0,25), то все (или 76 %) киноформы удовлетворяют критерию качества ($i \geq 0,8$) при равноглубинном травлении (см. рис. 2, а) и лишь 94 % (или 46 %) при неравноглубинном травлении (см. рис. 3, а).

Точность совмещения зависит от типа установки, на которой оно осуществляется, и является основным параметром этой установки, типичные значения составляют 0,2—2 мкм. Характеристики некоторых типов установок контактного совмещения приведены в [9]. Установки ЭМ-521 и ЭМ-520, изготавливаемые в СССР, имеют точность совмещения 0,5 и 2 мкм, что соответствует нормированному среднеквадратичному отклонению ошибок совмещения, равному 0,25 и 1 для $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм и $f/a = 3,1$.

Из приведенных графиков следует, что если $\Delta = 1$, то практически все киноформы не удовлетворяют критерию качества, а значит, киноформ-

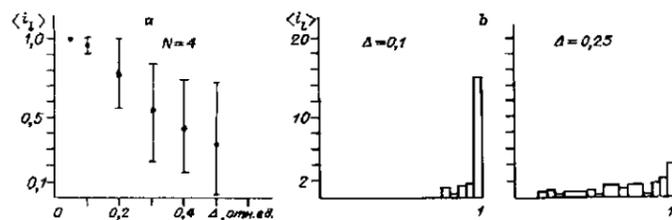


Рис. 3

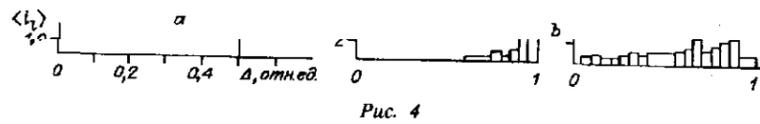


Рис. 4

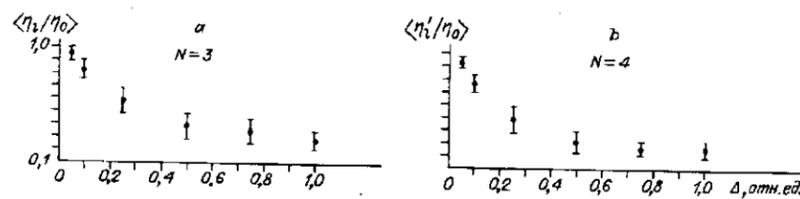


Рис. 5

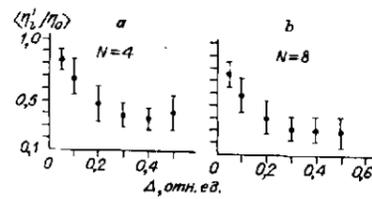


Рис. 6

ные линзы с указанными параметрами не следует изготавливать на установке ЭМ-520.

С помощью полученных результатов решается также и вопрос о целесообразности большого количества ступеней рельефа, которое требуется прежде всего для обеспечения дифракционной эффективности. В рассматриваемом

примере ($N = 4$; $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-3}$ мм; $f/a = 3,1$; $\Delta = 0,25$), по крайней мере, 70 % киноформов (см. рис. 5, б и 6, б) будут иметь дифракционную эффективность, меньшую, чем $0,81 \cdot 0,58 = 0,47$ (для обоих случаев травления), в то время как при $N = 2$ эффективность составляет 0,4, а количество операций резко сокращается. Дифракционная эффективность более чувствительна к ошибкам совмещения, чем число Штреля, и необходима весьма высокая точность совмещения, чтобы проявились преимущества многоступенчатого фазового профиля. Так, если $\Delta = 0,05$ (или 0,1), то среднее значение дифракционной эффективности составит $0,93 \cdot 0,81 = 0,75$ ($0,76 \cdot 0,81 = 0,61$) при $N = 4$ и $0,94 \cdot 0,68 = 0,63$ ($0,83 \cdot 0,68 = 0,56$) при $N = 3$ для равноглубинного травления и $0,84 \cdot 0,81 = 0,68$ ($0,68 \cdot 0,81 = 0,55$) при $N = 4$ для неравноглубинного травления. Дифракционная эффективность идеального рельефа равна 0,81 при $N = 4$ и 0,68 при $N = 3$. Лишь для небольшого количества (< 30 %) изготавливаемых образцов значения отличаются от теоретических менее чем на 5 %.

Таким образом, при выборе количества ступеней рельефа конкретного киноформа необходимо учитывать точностные характеристики установки совмещения, количество изготавливаемых и допустимое количество бракованных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корольков В. П., Коронкевич В. П., Михальцова И. А. и др. Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы // Автометрия.—1989.—№ 3.
2. Бобров С. Т., Грейсх Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем.—Л.: Машиностроение, 1986.

3. Спектор Б. И. Об одном способе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия.—1985.—№ 6.
4. Clair J. J. Synthèse optique de filtres d'amplitude et de phase dits "Kinoform" // These de doctorat.—Paris: l'Université de Paris IV, 1972.—P. 118.
5. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности.—Новосибирск, 1979.—(Препр. АН СССР, Сиб. отд-ние. ИЛиЭ; 98).
6. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия.—1985.—№ 6.
7. Бобров С. Т. Влияние ошибок изготовления дифракционных линз на качество формируемого изображения // Автометрия.—1987.—№ 5.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.—М.: Наука, 1970.
9. Фотолитография и оптика /Под ред. Я. А. Фелотова.—М.: Сов. радио, 1974.

А. И. Валицкас

(Новосибирск)

АЛГОРИТМЫ ДЕЛЕНИЯ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ МНОГОУРОВНЕВОГО ЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Рассматривается операция деления булевых функций — одна из базовых операций, используемых в системах многоуровневого логического синтеза. Приводится краткий обзор наиболее важных результатов по этой тематике и обсуждается реализация алгоритмов деления, выполненная в рамках системы проектирования СБИС, развиваемой в ИЛиЭ СО АН СССР.

Введение. Практический интерес к проблематике многоуровневого логического синтеза обусловлен тем, что, хотя в настоящее время аппарат программируемых логических матриц (ПЛМ) является основным при реализации управляющих структур СБИС, эффективность применения ПЛМ снижается по мере увеличения их сложности. Последнее объясняется тем, что из-за относительно низкой плотности размещения транзисторов в ПЛМ временные задержки и затраты площади кристаллов перестают удовлетворять достаточно жестким требованиям, предъявляемым к параметрам СБИС. Кроме того, существуют булевы функции, реализация которых в виде ПЛМ принципиально невозможна из-за экспоненциального характера зависимости минимального количества необходимых для этого термов от числа входов.

В последние годы активно развивается несколько иной подход к реализации логики СБИС, предусматривающий использование многоуровневых логических схем. Такая схема состоит из нескольких взаимосвязанных частей (уровней): нулевой уровень образован входными сигналами, а каждый из последующих уровней реализует либо операцию логического сложения (дизъюнкции), либо операцию логического умножения (конъюнкции) некоторой совокупности сигналов, полученных на предыдущих уровнях.

Ясно, что традиционные ПЛМ в этих терминах являются двухуровневыми логическими схемами с *AND*-плоскостью в качестве первого уровня и *OR*-плоскостью — в качестве второго. В то же время возможность использовать на каждом из уровней логику, реализованную в предшествующих уровнях, делает структуру многоуровневых схем более гибкой по сравнению с ПЛМ, создает богатые возможности для блочного проектирования СБИС с использованием заранее созданных библиотечных элементов.