

УДК 535.4 : 778.38

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ПОВОРОТНЫЙ ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

Г. А. Ленкова

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: lenkova@iae.nsk.su*

Проведены исследования формы дифракционной структуры киноформного поворотного элемента, предназначенного для фокусировки мощных лазерных пучков с длиной волны 10,6 мкм. Получены формулы для расчёта световых потерь, вызванных наклоном падающего пучка, дифракцией и технологическим размытием крутого склона структуры. Показано, что высота структуры должна изменяться от минимального до максимального значения в зависимости от азимутального угла. Определено, что световые потери, вызванные затенением из-за наклонного падения лучей, достаточно низкие (0,6–1,3 %), а из-за дифракции — на порядок меньше и могут не учитываться. Потери, обусловленные технологическим размытием склона и отклонением высоты структуры от расчётного значения (при несоблюдении азимутальной зависимости), могут быть выше 10 %.

Ключевые слова: поворотный фокусирующий элемент, дифракционная структура, эффективность, световые потери.

Введение. Для установок с мощными источниками инфракрасного излучения (СО₂-лазеров) представляет интерес создание дифракционного отражающего элемента [1–7]. Большинство известных работ [1–4] относится к расчёту и технологии изготовления дифракционного зеркала в виде фазовой бинарной голограммы, синтезированной на компьютере и называемой киноформной. Устройства с такими голограммами предназначены для проецирования объектов различной формы. Другая часть работ [5–7] направлена на создание дифракционного зеркала как поворотного элемента для концентрации излучения. Элемент совмещает функции двух оптических компонентов, из которых один отклоняет (отражает) световой пучок, а другой фокусирует его на фоточувствительный материал, экран и т. д. При этом упрощается технология изготовления, так как вместо внеосевого параболического зеркала используется плоская пластина с дифракционной структурой, которая может быть изготовлена, например, с помощью лазерного фотопостроителя [8].

Для повышения эффективности структурам дифракционных элементов обычно придается пилообразную (киноформную) форму, подобную фазовой линзе Френеля. Здесь термин «киноформ» относится к форме зон структуры в отличие от голографии, где он обозначает, что структура синтезирована на компьютере и информация об объекте содержится исключительно в фазовой составляющей (без учёта амплитудной).

При расположении дифракционного элемента под углом (а не перпендикулярно) к падающему пучку должны изменяться топология зон и глубина структуры. Кроме того, возникает проблема затенения части пучка вблизи вершин дифракционных зон. В [5–7] исследуется только топология зон поворотного дифракционного элемента без учёта формы поверхностной структуры. В первых двух работах рассмотрение проводится на основе геометрического построения хода лучей, а в третьей — на основе эллипсоидов вращения, что позволяет вывести более точные формулы для расчёта топологии зон при произвольном расположении источника и точки фокусировки.

Цель предлагаемой работы — анализ топологии и глубины структуры киноформного поворотного фокусирующего элемента и исследование влияния затенения, вызванного наклоном пучка и технологией изготовления, на световые потери.

Топология зон и глубина структуры. Расчёт топологии зон элемента без учёта поверхностной формы структуры проводился в [5]. Показано, что при падении параллельного светового пучка на дифракционный фокусирующий элемент угол наклона элемента равен максимальному значению α только в одном осевом сечении пучка, содержащем перпендикуляр к элементу (например, в вертикальной плоскости), а в любом другом сечении угол определяется из соотношений

$$\sin \gamma = \sin \alpha \cdot \cos \varphi; \quad \cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (1)$$

где γ — угол наклона в произвольном осевом сечении пучка, отклонённом относительно вертикальной плоскости на угол φ . Для расчёта топологии зон получена формула

$$r_{+,-} = [\sqrt{2fk\lambda \cos^2 \gamma + k^2 \lambda^2} \mp k\lambda \sin \gamma] / \cos^2 \gamma, \quad (2)$$

где r_+ и r_- — расстояния границ зон от центра элемента выше ($\cos \varphi > 0$) и ниже ($\cos \varphi < 0$) оптической оси; f — фокусное расстояние элемента вдоль оптической оси; k — номер зоны; λ — длина волны. Из (2) следует, что зоны элемента представляют собой деформированные относительно центра эллипсы, у которых в верхней части большая полуось меньше, а в нижней части — больше, чем у системы концентрических эллипсов, соответствующих формуле (2) в первом приближении (при $k\lambda \ll f$):

$$r_k = \sqrt{2fk\lambda} / \cos \gamma. \quad (3)$$

Далее для радиусов зон будет использоваться формула (3), так как характерные размерные параметры поворотных фокусирующих устройств удовлетворяют этому приближению.

Рассмотрим, как изменяется глубина структуры h наклонного дифракционного элемента. На рис. 1 показана оптическая схема хода лучей при отражении от поворотного

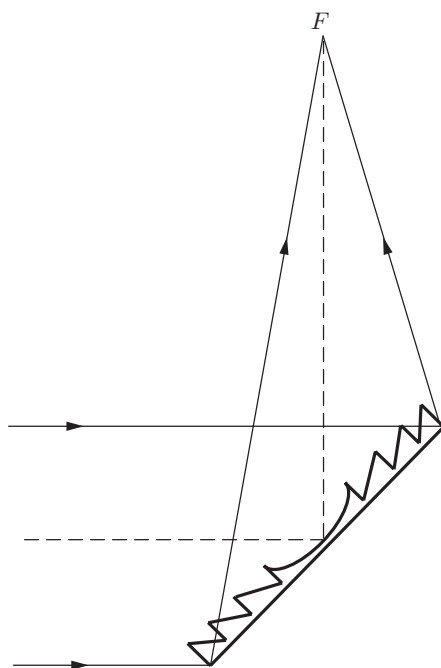


Рис. 1. Оптическая схема поворотного киноформного фокусирующего элемента

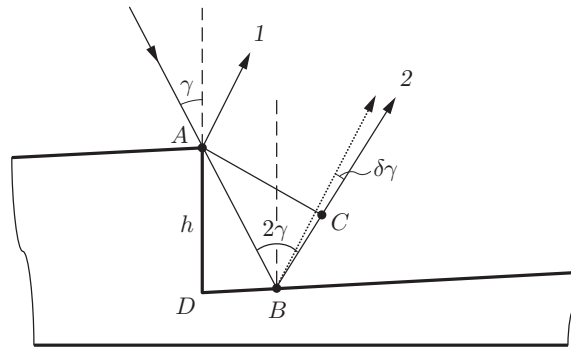


Рис. 2. Схема хода интерферирующих лучей 1 и 2

киноформного фокусирующего элемента. Если на такой элемент падает параллельный пучок под углом γ (рис. 2), то, для того чтобы все отражённые лучи были в одной фазе и фокусировались в одной точке, надо приравнять разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 к длине волны: $AB + BC = (h/\cos \gamma) + h \cos(2\gamma \pm \delta\gamma)/\cos \gamma = \lambda$. Из последнего соотношения следует, что глубина структуры

$$h = \frac{\lambda \cos \gamma}{1 + \cos(2\gamma \pm \delta\gamma)}, \quad (4)$$

$$\delta\gamma = (r_{k0}/\cos \gamma)/f. \quad (5)$$

Здесь $\delta\gamma$ — угол дифракции на k -й зоне. Знаки «+» и «-» зависят от направления падения луча относительно вершины зоны: «-» соответствует рис. 2 и верхней части структуры на рис. 1, а «+» — противоположному направлению лучей и нижней части структуры на рис. 1. Так как в данном случае высота структуры много меньше ширины дифракционной зоны, то при расчёте разности хода полагалось, что угол между крутым и пологим склонами близок к 90° .

При условии $\delta\gamma \ll 2\gamma$, которое соответствует малому значению отношения r/f , получаем выражение для h в виде

$$h = \lambda/(2 \cos \gamma). \quad (6)$$

Из (6) следует, что высота структуры на элементе не постоянная, а изменяется в зависимости от γ , принимая значения от максимального $h = \lambda/(2 \cos \alpha)$ в вертикальном сечении (рис. 3, а), где $\varphi = 0$ и 180° , а $\gamma = \alpha$, до минимального $h = \lambda/2$ в горизонтальном сечении (рис. 3, б), где $\varphi = \pm 90^\circ$, а $\gamma = 0^\circ$.

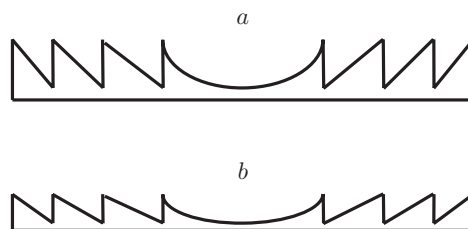


Рис. 3. Форма дифракционной структуры поворотного элемента: в вертикальном (а) и горизонтальном (б) сечениях

Вывод аналитических формул для расчёта потерь и эффективности при наклонном падении светового пучка. Наклонное падение пучка приводит к тому, что некоторая радиальная часть зоны $\delta r = DB$ (см. рис. 2) оказывается в тени и становится нерабочей. Эта часть зоны с учётом угла дифракции $\delta\gamma$ находится по формуле

$$\delta r = h \operatorname{tg}(\gamma + \delta\gamma). \quad (7)$$

Вклад затенения $\delta\gamma$ (5), обусловленного дифракцией, зависит от радиуса зоны r_k , фокусного расстояния и от γ , т. е. фактически от φ и α (1), (3). Максимальное значение $\delta\gamma$ наблюдается на крайних зонах. Если угол дифракции мал ($\delta\gamma \ll \gamma$), то можно считать, что радиальное затенение δr с учётом (6) определяется соотношением

$$\delta r = h \operatorname{tg} \gamma = \frac{\lambda \sin \gamma}{2 \cos^2 \gamma}. \quad (8)$$

Следовательно, в этом случае радиальное затенение δr , как и высота структуры h (6), зависит от γ , принимая значения от максимума $\delta r = \lambda \sin \alpha / (2 \cos^2 \alpha)$ в вертикальном сечении (см. рис. 3, а), где $\varphi = 0$ и 180° , а $\gamma = \alpha$, до минимума $\delta r = 0$ в горизонтальном сечении (см. рис. 3, б), где $\varphi = \pm 90^\circ$, а $\gamma = 0^\circ$.

Затенение приводит к потерям световой энергии и снижению дифракционной эффективности. Так как интенсивность светового потока пропорциональна площади, то снижение дифракционной эффективности представим в виде отношения общей площади затенения к площади всего эллиптического элемента S_k . Сначала определим длину окружности L эллиптической зоны:

$$L = \int_0^{2\pi} dL = \int_0^{2\pi} r_k d\varphi = \sqrt{2fk\lambda} \int_0^{2\pi} (1/\cos \gamma) d\varphi = a\sqrt{2fk\lambda} = ar_{k0}, \quad (9)$$

где $dL = r_k d\varphi$ — элемент окружности; $r_{k0} = \sqrt{2fk\lambda}$;

$$a = \int_0^{2\pi} (1/\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi}) d\varphi \approx 4 \sum_0^{\pi/2} (\Delta\varphi/\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi}). \quad (10)$$

Как известно, в отличие от (9) длина окружности круговой зоны $L = 2\pi r_{k0} = 6,28r_{k0}$.

Далее найдём площадь эллипса S_k . Площадь эллиптического сектора $dS = 0,5r_k dL = 0,5r_k^2 d\varphi$ и, следовательно, S_k можно представить в виде

$$S_k = 0,5 \int_0^{2\pi} r_k^2 d\varphi = 0,5 \cdot 2fk\lambda \int_0^{2\pi} (1/\cos^2 \gamma) d\varphi = br_{k0}^2, \quad (11)$$

$$b = 0,5 \int_0^{2\pi} (1/(1 - \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi)) d\varphi = \left| 0,5 \frac{1}{\cos \alpha} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos \alpha} \right|_0^{2\pi} = 3,14/\cos \alpha. \quad (12)$$

В отличие от (11) площадь круга $S_{\text{кр}} = \pi r_{k0}^2 = 3,14r_{k0}^2$. Из (11) получаем выражение для площади эллиптического k -го кольца ΔS_k :

$$\Delta S_k = b(r_{k0}^2 - r_{k0-1}^2) = 2bf\lambda = br_{k0}^2/k. \quad (13)$$

На основании (11) площадь затенения эллиптической зоны будет иметь вид

$$\Delta S_{\delta r} = 0,5 \int_0^{2\pi} [(r_k + \delta r)^2 - r_k^2] d\varphi = 0,5 \int_0^{2\pi} (2r_k \delta r + \delta r^2) d\varphi. \quad (14)$$

Так как $\delta r \ll r_k$, то, полагая в (14) $\delta r^2 \ll 2r_k \delta r$ и подставляя из (8) $\delta r = h \operatorname{tg} \gamma$, получим

$$\Delta S_{\delta r} = 0,5 \cdot 2 \int_0^{2\pi} r_k \delta r d\varphi = \sqrt{2fk\lambda} \int_0^{2\pi} (h \operatorname{tg} \gamma / \cos \gamma) d\varphi = cr_{k0}, \quad (15)$$

$$c = \int_0^{2\pi} (\lambda \sin \gamma / (2 \cos^3 \gamma)) d\varphi \approx 2 \sum_0^{\pi/2} ((\Delta\varphi) \lambda \sin \gamma / \cos^3 \gamma). \quad (16)$$

На основании (15) площадь затенения зон на всём элементе $S_{\delta r}$ запишем как

$$S_{\delta r} = \sum_1^k \Delta S_{\delta r} = c \sum_1^k r_{k0} = c \sqrt{2fk\lambda} \sum_1^k \sqrt{k}. \quad (17)$$

При расчёте коэффициентов a и c применялось численное интегрирование из-за сложной зависимости подынтегральных выражений от φ в (10) и (16).

С учётом (11) и (17) относительные потери $S_{\delta r}/S_k$ и полезный сигнал (эффективность) $1 - S_{\delta r}/S_k$ составят

$$S_{\delta r}/S_k = \left(c \sum_1^k r_{k0} \right) / br_{k0}^2, \quad (18)$$

$$1 - S_{\delta r}/S_k = 1 - \left(c \sum_1^k r_{k0} \right) / br_{k0}^2. \quad (19)$$

Для повышения эффективности можно заменить одно дифракционное зеркало двумя зеркалами с фокусами, увеличенными в 2 раза (рис. 4). При этом снижаются потери света, так как угол падения пучка уменьшается в 2 раза, и существенно уменьшается вариация глубины структуры по поверхности элемента, что особенно важно для технологии изготовления элемента.

В табл. 1 приводятся результаты расчёта параметров r , dr , h , δr , $\delta\gamma$ и $\delta r_{\delta\gamma}$ для предельных значений $\gamma = 0$ и 45° или $\gamma = 0$ и $22,5^\circ$, а также $S_{\delta r}/S_k$ и $1 - S_{\delta r}/S_k$. Кроме того, для dr , $\delta\gamma$ и $\delta r_{\delta\gamma}$ указаны пределы значений от первой до последней зоны. Расчёты проводились для характерных параметров фокусирующего устройства: $\lambda = 10,6$ мкм, $r_0 = 15$ мм — радиус падающего пучка, фокусное расстояние $f = 250$ мм (для устройства с одним зеркалом) и $f = 500$ мм (для устройства с двумя зеркалами). В первой колонке (k) — полное число зон, символ «*» соответствует эффективности $(1 - S_{\delta r}/S_k)^2$ и потерям $S_{\delta r}/S_k$ после отражения от двух зеркал с $f = 500$ мм.

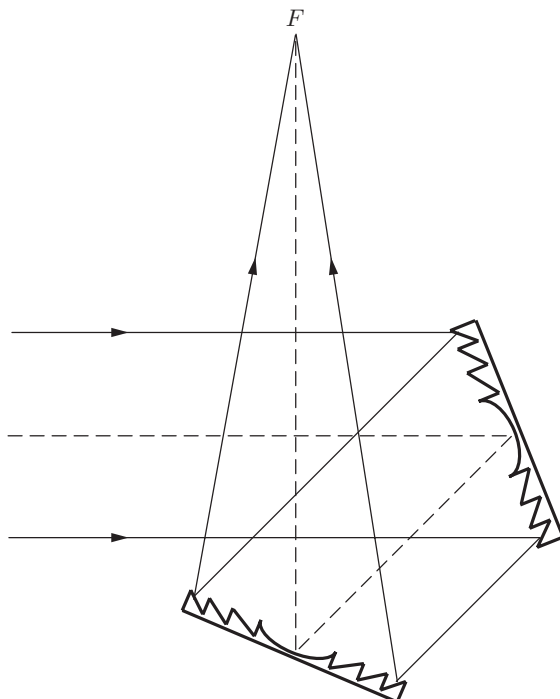


Рис. 4. Оптическая схема поворотного устройства с двумя зеркалами

Таблица 1

f , мм (k)	γ , град	r , мм	dr , мм	h , мкм	δr , мкм	$\delta\gamma$, град	$\delta r\delta\gamma$, мкм	$S_{\delta r}/S_k$, %	$1 - S_{\delta r}/S_k$, %
250 (42)	0 45	14,92 21,10	2,3–0,18 3,26–0,25	5,3 7,5	0 7,50	0,53–3,42 0,75–4,84	0,05–0,32 0,10–0,64	1,3	98,7
500 (21)	0 22,5	14,92 16,15	3,26–0,36 3,52–0,39	5,3 5,74	0 2,38	0,37–1,71 0,40–1,85	0,04–0,16 0,04–0,19	0,3 (0,6)*	99,7 (99,4)*

Из таблицы видно, что световые потери, вызванные затенением из-за наклонного падения светового пучка δr , достаточно низкие (1,3 %), а с двумя зеркалами уменьшаются ещё в 2 раза (0,6 %). Радиальное затенение, вызванное дифракцией $\delta r\delta\gamma$, на порядок меньше, чем затенение δr , поэтому при расчёте эффективности может не учитываться. Но возникают ещё проблемы технологического порядка — потери света из-за размытия крутого склона зоны и ошибок в выполнении высоты структуры Δh .

Влияние на световые потери размытия крутого склона. Если считать, что величина радиального затенения δr , вызванного размытием крутого склона, не зависит от высоты структуры и постоянная для всех зон ($\delta r = \text{const}$), то площади затенения на зоне $\Delta S_{\delta r}$ и на всём элементе $S_{\delta r}$ будут иметь вид

$$\Delta S_{\delta r} = \int_0^{2\pi} r_k \delta r d\varphi = \delta r \sqrt{2fk\lambda} \int_0^{2\pi} (1/\cos \gamma) d\varphi = a \delta r \sqrt{2fk\lambda} = c_1 \sqrt{2fk\lambda} = c_1 r_{k0}, \quad (20)$$

$$S_{\delta r} = \sum_1^k \Delta S_{\delta r} = c_1 \sqrt{2f\lambda} \sum_1^k \sqrt{k}, \quad (21)$$

$$c_1 = a\delta r \approx 4\delta r \sum_0^{\pi/2} (\Delta\varphi / \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi}). \quad (22)$$

На основании (11) и (21) световые потери $S_{\delta r}/S_k$ и эффективность $1 - S_{\delta r}/S_k$ составляют

$$S_{\delta r}/S_k = (c_1 \sqrt{2f\lambda}/br_{k0}^2) \sum_1^k \sqrt{k}, \quad (23)$$

$$1 - S_{\delta r}/S_k = 1 - (c_1 \sqrt{2f\lambda}/br_{k0}^2) \sum_1^k \sqrt{k}. \quad (24)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициентов a (10), b (12), c (16) и c_1 (22) для определения длины окружности L (9), общей площади S_k (11) и площадей затенения эллиптического элемента $S_{\delta r}$ (17), (21), рассчитанные для фокусных расстояний $f = 250$ и 500 мм и значения размытия крутого склона $\delta r = \text{const} = 26$ мкм. Символ «*» соответствует значениям для поворотного элемента с двумя зеркалами с $f = 500$ мм. Для сравнения в последних двух столбцах даны значения световых потерь $S_{\delta r}/S_k$, рассчитанные для коэффициентов c и c_1 , а в последней строке — коэффициенты для кругового элемента (что соответствует углу наклона $\alpha = 0$), аналогичные a и b для эллиптического элемента. Для кругового и эллиптического элементов длина окружности L и площадь S выражаются как $L = 2\pi r_{k0}$, $S = \pi r_{k0}^2$ и $L = ar_{k0}$, $S = br_{k0}^2$ соответственно.

Из таблицы видно, что световые потери, вызванные технологическими причинами, при $\delta r = 26$ мкм существенно больше потерь из-за наклона элемента. В первом случае площадь затенения $S_{\delta r}$ при $f = 250$ и 500 мм пропорциональна коэффициенту c ($c = 0,032$ и $0,01$ мм, см. (17) и табл. 2), а во втором — коэффициенту c_1 , который зависит от δr и a и имеет вид $c_1 = a\delta r$ ($a = 7,489$ и $6,898$, см. (10) и табл. 2). Из (17) и (21) следует, что световые потери из-за размытия склона не будут превышать потерь, вызванных наклоном элемента, если $c_1 = c$, т. е. при $\delta r = c_1/a = c/a = 4,3$ и $1,4$ мкм. Таким образом, чтобы эффективности $1 - S_{\delta r}/S_k$ в этих двух случаях были близки по значению, величина радиального затенения δr во втором случае должна быть приблизительно в 2 раза меньше максимального значения δr в первом случае (см. табл. 1, шестой столбец).

На рис. 5 показано, как изменяются потери $S_{\delta r}/S_k$ в зависимости от величины размытия крутого склона при $f = 250$ мм. Из рисунка следует, что, действительно, потери из-за размытия склона не превышают потерь, обусловленных наклоном элемента, равных $1,3\%$ (см. табл. 1, девятая колонка), при $\delta r = 4,3$ мкм.

Таблица 2

f , мм	a (10)	b (11)	c , мм (16)	c_1 , мм (22)	$S_{\delta r}/S_k$, % (18)	$S_{\delta r}/S_k$, % (23)
250	7,489	4,530	0,032	0,195	1,3	8,10
500	6,898	3,415	0,010	0,179	0,3 0,56*	5 9,8*
$\alpha = 0$	6,28 (2π)	3,14 (π)	—	—	—	—

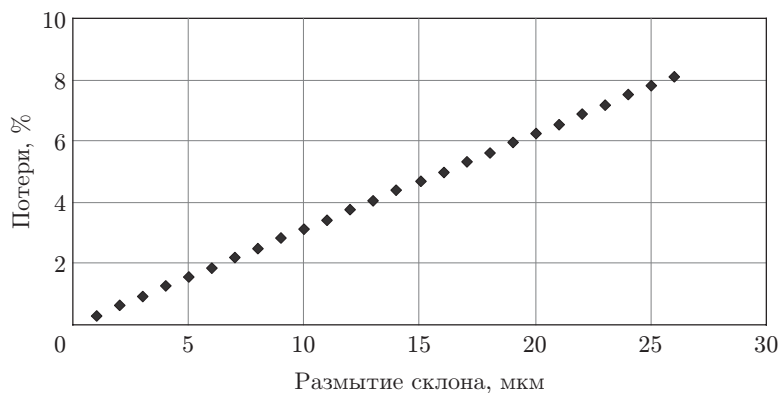


Рис. 5. Зависимость потерь $S_{\delta r}/S_k$ от величины радиального затенения δr , вызванного размытием склона

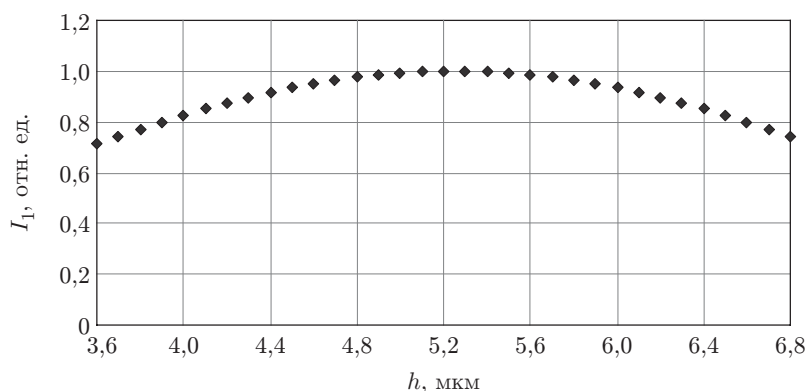


Рис. 6. Зависимость интенсивности I_1 от высоты структуры h

Влияние ошибок высоты структуры Δh на дифракционную эффективность. Относительная интенсивность в первом (рабочем) порядке дифракции I_1 для отражённого света зависит от высоты структуры следующим образом [9]:

$$I_1 = \left[\frac{\sin(\varphi_{\max}/2)}{(2\pi - \varphi_{\max})/2} \right]^2, \quad (25)$$

$$\varphi_{\max} = 4\pi h_{\max}/\lambda, \quad (26)$$

где φ_{\max} и h_{\max} — максимальные значения фазовой задержки и высоты профиля в пределах одной зоны структуры. На рис. 6 приводится график изменения интенсивности I_1 в зависимости от высоты структуры h для $\lambda = 10,6$ мкм. Видно, что только при отклонении высоты структуры от максимального значения $h = 5,3$ мкм на $\Delta h = \pm 0,1$ мкм относительная интенсивность (дифракционная эффективность) сохраняется почти равной 1 ($I_1 = 0,99$), при $\Delta h = \pm 0,3$ мкм она падает на 1,5 %, что сравнимо с потерями от затенения, при $\Delta h = \pm 0,6$ и $\pm 1,0$ мкм — приблизительно на 5 и 10 %.

Заключение. В данной работе исследованы особенности дифракционной структуры поворотного фокусирующего элемента. Получены аналитические формулы для расчёта высоты профиля h в зависимости от угла наклона элемента α относительно падающего светового пучка. Показано, что высота структуры на элементе должна изменяться в соответствии с азимутальным углом φ , принимая значения от максимального $h = \lambda/(2 \cos \alpha)$ в

вертикальном сечении, где $\varphi = 0$ и 180° , до минимального $h = \lambda/2$ в горизонтальном сечении, где $\varphi = \pm 90^\circ$. Выведены формулы для расчёта световых потерь, вызванных наклоном пучка, дифракцией и технологическим размытием крутого склона структуры.

Проведены расчёты световых потерь для характерных параметров устройства, предназначенного для фокусировки мощных лазерных пучков с длиной волны 10,6 мкм и диаметром падающего пучка 30 мм. Показано, что при учёте изменения высоты структуры на поверхности дифракционного поворотного элемента световые потери, вызванные затенением из-за наклонного падения светового пучка, достаточно низкие (1,3 %), а при двух зеркалах уменьшаются ещё в 2 раза (до 0,6 %). Потери, вызванные дифракцией, на порядок меньше и могут не приниматься во внимание. Потери из-за размытия склона, обусловленного технологическим процессом, и из-за отклонения высоты структуры от расчётного значения могут быть на порядок выше. Например, если высота структуры остаётся постоянной на всём элементе при фокусе 250 мм (в то время как она должна изменяться от 5,3 до 7,5 мкм), потери могут превышать 10 %. Величина затенения зоны из-за размытия крутого склона должна быть приблизительно в 2 раза меньше затенения, вызванного наклоном светового пучка, чтобы потери от этих двух эффектов были соизмеримы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rileey J. P., Birkett F. N.** A reflection kinoform for use with CO₂ laser // Opt. Acta. 1977. 24, N 10. P. 999–1009.
2. **Гончарский А. В., Данилов В. А., Попов В. В. и др.** Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую // ДАН СССР. 1983. 273. С. 605–608.
3. **Swanson G. J., Veldkamp W. B.** Binary lenses for use at 10,6 micrometers // Opt. Eng. 1985. 24, N 5. P. 791–795.
4. **Hutley M. C., Stevens R. F., Wilson S. J.** The manufacture of blazed zone plates for use in the 10 μm spectral region // Opt. Eng. 1991. 30, N 7. P. 1005–1010.
5. **Ленкова Г. А.** Поворотный фокусирующий киноформ // Автометрия. 1985. № 6. С. 7–12.
6. **Moreno V., Hutley M. C., Tyrer J. R.** The manufacture of blazed oblique zone plates for use at 10.6 μm // Proc. of the 2nd IEE Intern. Conf. Holographic Systems, Components and Applications. Bath, UK, Sep. 11–13, 1989. P. 76–79.
7. **Дубик Б., Зайонц М., Новак Е.** Фокусирующее киноформное зеркало // Автометрия. 1990. № 2. С. 85–88.
8. **Полецук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерение // Автометрия. 1997. № 6. С. 42–56.
9. **Ленкова Г. А.** Влияние глубины фазового профиля на распределение интенсивности в порядках дифракции бифокального элемента // Автометрия. 1995. № 5. С. 16–24.

Поступила в редакцию 13 февраля 2015 г.