

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЛОСКИХ ФОКУСИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фокусаторы - оптические элементы с заранее заданными фокусирующими свойствами представляют собой фазовые зонные пластинки, высота фазового рельефа в которых непрерывно изменяется в пределах каждой зоны от 0 до 2π [1]. В связи с этим, задача изготовления фокусатора сводится к изготовлению зонной пластинки с заданным фазовым профилем. Изменение фазы волны, прошедшей через две разные точки фокусатора, составляет:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(h\Delta n + n\Delta h),$$

где Δn и Δh - соответственно изменения показателя преломления и высоты рельефа.

Для нормальной работы оптического элемента необходимо, чтобы разность фаз на границах зон составляла 2π . Этого можно достичь либо изготавливая профилированные зонные пластинки с максимальной высотой рельефа $\lambda(n-1)$ или $\lambda/2 \cos \theta$ соответственно для пропускающих или отражающих элементов (θ - угол падения излучения на элемент), либо используя вещества с изменяющимся показателем преломления. В последнем случае необходимо, чтобы изменение показателя преломления достигало значения $\Delta n = \lambda/h$, где h - толщина слоя

Из вышесказанного можно сделать два вывода. Во-первых, фокусаторы можно изготовить в виде плоских пластинок с поверхностным рельефом высотой порядка λ или в виде тонких

пленок из материала с изменяющимся показателем преломления (с чисто фазовым рельефом). Во-вторых, глубина модуляции поверхностного или фазового рельефа пропорциональна длине волны падающего излучения. Поэтому выбор материала и технологии для изготовления оптических элементов должен зависеть от рабочей длины волны и специфических требований, предъявляемых к элементу в каждом конкретном случае.

В данной работе делается попытка проанализировать свойства различных материалов и технических процессов на предмет использования их для создания плоских фокусирующих элементов.

Рассмотрим в первую очередь элементы с поверхностным рельефом, которые в настоящее время получили наибольшее распространение, с одной стороны, из-за более отработанной технологии изготовления, а с другой - из-за ряда ценных свойств их можно использовать как отражающие элементы для технологических лазеров, легко тиражировать методом теснения или гальванопластики.

Наиболее простым представляется способ изготовления оптических элементов с помощью прецизионных станков с ЧПУ. В настоящее время алмазным точением удается достичь точности $\lambda/20$ ($\lambda = 10$ мкм) при изготовлении асферической оптики [2]. На такого типа станках, по-видимому, можно производить зонные линзы, кор-

ректирующие пластинки и другие оптические элементы с осесимметричными зонами для диапазона длин волн свыше 10 мкм. Для меньшего коротковолнового диапазона точность станков пока недостаточна, кроме того, при создании фокусаторов требуется, как правило, изготовление поверхностей сложной формы, не описываемой аналитически. В этом случае обычно используется двухстадийный способ изготовления элемента. На первом этапе создается так называемая "амлитудная маска" на фотоматериале, в которой плотность почернения соответствует высоте рельефа на оптическом элементе. Затем через эту маску экспонируется светочувствительный материал. В зависимости от полученной дозы облучения при дальнейшей химической обработке слоя происходит соответствующее изменение его толщины, в результате чего получается зонная пластинка требуемого профиля.

Среди материалов такого типа следует в первую очередь назвать бихромированный желатин (БХЖ), на котором были изготовлены фокусаторы ИК-диапазона ($\lambda = 10,6$ мкм) [3]. К достоинствам желатина следует отнести прежде всего простоту изготовления оптических элементов, достаточно высокое качество (энергетическая эффективность достигает 80%). Такие результаты были получены на слоях БХЖ, разработанных совместно с киевским филиалом ВНИИПолиграфии. Недостатком желатиновых слоев является их невысокая разрешающая способность, поэтому на них нельзя получать оптические элементы с размером зон менее 150-200 мкм, что делает их применение целесообразным лишь для изготовления элементов ИК-диапазона.

Весьма перспективным является использование методов фотолитографии для изготовления высокоэффективных элементов ИК-диапазона, а также видимого диапазона [4,5]. Многоступенчатое химическое травление стекла по технологии, разработанной в [4], позволило изготовить фокусаторы для $\lambda = 10,6$ мкм с энергетической эффективностью около 90%. К сожалению, для реализации технологии фотолитографии требуется специальное оборудование: устройства вывода изображения, установки уменьшения и совмещения фотшаблонов, техника прецизионного химического или ионного травления. С другой стороны, при массовом производстве стоимость изделий зна-

чительно уменьшается, как и при производстве изделий микроэлектроники. Кроме того, остается возможность тиражирования элементов достаточно простыми методами на дешевых и доступных материалах. С помощью фотолитографии были изготовлены двухэдационные фокусаторы видимого диапазона ($\lambda = 0,63$ мкм) с эффективностью около 40% [6]. В случаях, когда требуется высокая разрешающая способность оптического элемента и не важна эффективность, техника фотолитографии дает наилучшие результаты, так как с ее помощью можно изготовить зоны размером в несколько микрон.

Для создания оптических элементов видимого диапазона весьма перспективными могут оказаться халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) [7] и системы ХСП - металл [8]. И в том, и в другом случаях изменяется скорость растворения пленки ХСП в зависимости от количества поглощенного света. При этом реализуется высокая разрешающая способность процесса (≈ 1000 лин/мм), но глубина травления составляет всего 0,5-1 мкм что вполне достаточно для элементов видимого диапазона.

К материалам, пригодным для создания элементов с поверхностным рельефом, можно отнести и фоторезисты, особенно негативные, имеющие на своей характеристической кривой линейный участок, но для более полной оценки необходимо их серьезное экспериментальное исследование.

Материалы с изменяющимся показателем преломления привлекательны тем, что на их поверхности не надо создавать рельефа со строго заданным профилем, поэтому снижаются требования к качеству поверхности. В процессе эксплуатации они менее восприимчивы к повреждениям поверхности, загрязнениям и т.п. К таким материалам следует в первую очередь отнести уже упоминавшиеся халькогенидные стеклообразные полупроводники, у которых под действием актиничного излучения смещается пик поглощения и изменяется показатель преломления. При этом величина составляет 0,2-0,3, поэтому для получения модуляции фазы на 2 π достаточно иметь пленку толщиной всего 3-5 мкм [9]. Таким способом были изготовлены зонные линзы и призмы достаточно высокого качества [9]. В ряде случаев возможна ре-

версивная запись фазовых рельефов. Автором были изготовлены на слоях ХСП элементы видимого диапазона, аналогичные получаемым методами фотолитографии. При том же качестве фокусировки, что и на фоторезисте, фокусаторы на ХСП имели значительно меньшую эффективность. Это, видимо, обусловлено большим коэффициентом отражения ХСП ($n=2,6$) и некоторым рассеянием.

Для создания элементов плоской оптики с чисто фазовым рельефом можно использовать широко известную технику отбеливания фотоматериалов, используемую при создании фазовых голограмм [10]. Хотя эта технология достаточно проста, обычно бывает трудно добиться точного соответствия фазы на границах зон [11]. Высокий уровень шумов также не позволяет изготовить элементы высокого качества.

Большой интерес представляют фотополимеры, изменяющие n в процессе полимеризации под действием УФ-излучения. Для фазовых голограмм в таких материалах были достигнуты

высокие значения дифракционной эффективности [12]. Чувствительность их пока недостаточно высока, но, возможно, в будущем они найдут применение благодаря высокой прозрачности и стабильности свойств после полимеризации.

Существуют также другие материалы с изменением n , однако о возможном практическом применении их говорить еще рано, так как они находятся в стадии лабораторных исследований. Таким образом, в настоящее время наиболее универсальной следует признать технологию многоградационного травления методами фотолитографии, хотя при тенденции к уменьшению размеров зон все более остро встает проблема совмещения фотошаблонов. В связи с этим следует внимательно относиться к альтернативным технологиям таким, как селективное травление полупроводников, а также использование фотополимеров.

Автор выражает благодарность С.Т. Боброву, Б.И. Котлецову, Ю.Г. Туркевичу за помощь в изготовлении ряда фокусирующих элементов.

Л и т е р а т у р а

1. Д а н и л о в В.А., П о п о в В.В., П р о х о р о в А.М. и др. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, с. 810-815.
2. J o h n s o n F.E., S a i t o T.T. - Optical Engineering, 1977, vol. 16, № 4, p. 387-392.
3. Г о н ч а р с к и й А.В., Д а н и л о в В.А., П о п о в В.В. и др. - ДАН СССР, 1983, т. 273, № 3, с. 605-609.
4. Б о б р о в С.Т., Т у р к е в и ч Ю.Г. - В сб.: Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации, Л., 1978, с. 73-77.
5. M i c h a l t s o v a I.A., N a l i v a i k o V.I., S o l d a t e n k o v I.S. - Optik, 1984, vol. 67, № 3, p. 267-278.
6. Г о н ч а р с к и й А.В., Д а н и л о в В.А., П о п о в В.В. и др. - Квантовая электроника, 1986, т. 13, № 3, с. 606-607.
7. Г у р е в и ч С.Б., И л ь я ш е н к о Н.И., К о л о м и е ц Б.Т. - В сб.: Оптические методы обработки информации, Л., 1974, с. 117-134.

8. К о с т ы ш и н М.Т., Р о м а н е н к о П.Ф. Оптиче-
ская и электрооптическая обработка информации, М., 1972, с. 61-64.

9. К о р о н к е в и ч В.П. и др. - Автометрия, 1976, № 5,
с. 3.

10. К и р и л л о в Н.И. Высокорастворимые материалы для
голографии и процессы их обработки, М., 1979.

11. К а р н а у х о в В.И., М е р з л я к о в Н.С.
В сб.: Вопросы кибернетики, 1979, вып. 38. с. 148.

12. П е р е д е р е е в а С.И. и др. - В сб.: Несеребряные
и необычные материалы для голографии, Л., 1978, с. 51-71.
