

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ И ТРАВЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ДООЭ

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев
Институт систем обработки изображений РАН

При изготовлении микро рельефа дифракционных оптических элементов (ДООЭ) широко применяются методы микроэлектронной технологии, позволяющие получать ступенчатый рельеф, аппроксимирующий требуемую форму поверхности оптического элемента. В работах [1, 2] был предложен относительно простой и малотрудоемкий метод изготовления микро рельефов послойным наращиванием фоторезиста, исключая процесс травления подложки. Суть его заключалась в том, что ступенчатый рельеф дифракционного оптического элемента формируется путем многократного нанесения фоторезистивных слоев, слой на слой, прошедших этапы засветки через соответствующие фотошаблоны и все процессы обработки, включая глубокое задубливание. Исключение из общего процесса этапов травления подложки позволяет значительно улучшить точность воспроизведения размеров зон ДООЭ. Однако при изготовлении широкоапертурных дифракционных структур с необходимыми параметрами микро рельефа сохраняются проблемы обеспечения:

- заданной толщины, наносимого слоя;
- равномерности распределения его по подложке;
- высокой точности совмещения при изготовлении многоуровневых структур;
- стабильности технологических режимов фотолитографии.

Основополагающей операцией в данном методе является нанесение фоторезистивных слоев. От точности воспроизведения толщин каждого слоя и равномерности распределения его по подложке зависит, в конечном счете, качество работы ДООЭ. В случае, когда наносится большое количество слоев, для обеспечения совмещения, особенно при автоматизации процесса, при формировании субмикронного изображения оптическим степпером требуется, чтобы неравномерность толщины резиста не превышала ± 10 нм [3].

Толщина слоя, получаемая в результате длительного центрифугирования, соизмерима с толщиной пограничного слоя, вычисляется из выражения:

$$D = 2,79 \sqrt{V/\omega};$$

где: ω - угловая скорость вращения центрифуги,

V – кинематическая вязкость фоторезиста,

Необходимо так же для получения воспроизводимых результатов необходимо жестко стабилизировать время от момента нанесения капель фоторезиста до начала центрифугирования (около 3 сек) и время разгона центрифуги до полной скорости (40 - 50 мсек.) [4]. Эти режимы были обеспечены благодаря изготовлению центрифуги с массивным маховиком, к которому в нужный момент подсоединялся

подложкодержатель посредством электромагнитной фрикционной муфты.

В качестве исходного основания для формирования микро рельефа ДООЭ, была использована ситалловая подложка СТ-50-1, как материал относительно дешевый и широко используемый в микроэлектронике.

Сравнение качества поверхностей исходной подложки (рис.1) и с нанесенным слоем фоторезиста (рис. 2), изображения фрагментов которых были получены с помощью сканирующего зондового микроскопа, показало, что качество поверхности подложки с фоторезистом значительно лучше исходной подложки. Шероховатость (чистота) фоторезистивного слоя составляет ± 7 нм, (у исходной подложки ± 12 нм), и отражательные ДООЭ оказываются работоспособными в ИК и видимом диапазонах.

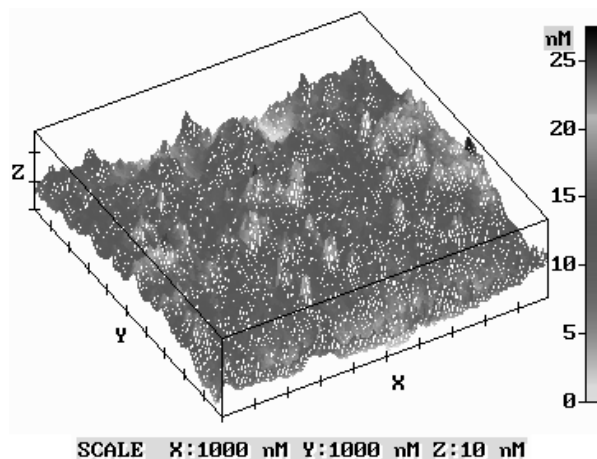


Рис. 1. Фрагмент поверхности ситалловой подложки СТ-50-1.

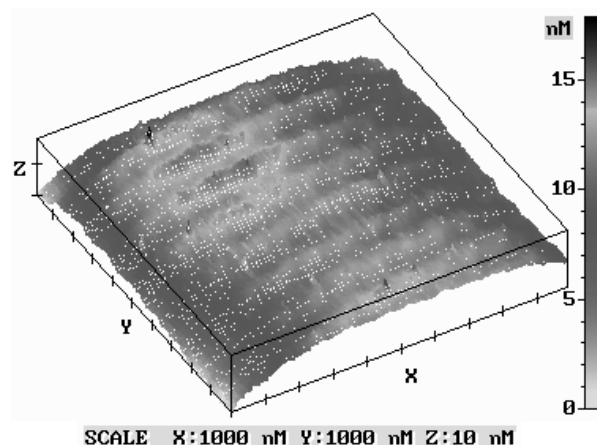


Рис. 2. Фрагмент поверхности фоторезистивного слоя

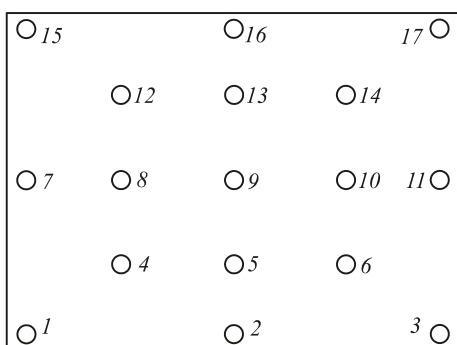


Рис. 3. Распределение контрольных точек на фотошаблоне.

Таблица 1. Координаты контрольных точек на стандартной ситалловой подложке 60x48.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
X, мм	2	30	58	15	30	45	2	15	30	45	58	15	30	45	2	30	58
Y, мм	2	2	2	12	12	12	24	24	24	24	24	36	36	36	46	46	46

Для экспериментов использовался позитивный фоторезист на основе диазосоединений СК-151. Необходимо отметить, что для минимизации сжатия нанесенной пленки во время сушки желательно использовать резист с высоким содержанием твердого вещества - до 40%, и малым содержанием растворителя [7]. Это позволило в значительной степени повысить планаризирующие свойства резиста, нанесенного поверх ступенек. После осуществления

Перед нанесением фоторезиста исходная подложка, после предварительной жидкостной обработки подвергалась очистке в установке плазменного травления ПХО-008. Контроль химической чистоты подложек осуществлялся с помощью изготовленного в ИСОИ РАН прибора экспресс-контроля чистоты поверхности подложек [5,6]. Для оценки толщины нанесенного на подложку слоя фоторезиста, использовался фотошаблон, эскиз которого представлен на рис.3.

Он представляет собой темное поле с 17-ю прозрачными окнами, координаты которых представлены в таблице 1. Диаметр всех окон равнялся, примерно, одному миллиметру.

процессов нанесения фоторезиста и его сушки, производилась засветка последнего через контрольный фотошаблон. После проявления слоя и его задубливания измерялась толщина D интерферометром МИИ-4, обеспечивающего измерения толщин 0,5-1,5 мкм с точностью ± 300 нм. Распределение толщины фоторезистивного слоя для различных режимов центрифугирования представлено в таблице 2.

Таблица 2. Распределение толщин фоторезиста по контрольным точкам для разных режимов центрифугирования.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
X	2	30	58	15	30	45	2	15	30	45	58	15	30	45	2	30	58
Y	2	2	2	12	12	12	24	24	24	24	24	36	36	36	46	46	46
D1, мкм	0,81	1,08	1,08	0,81	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,45	1,35	1,35	1,35	1,35	1,08	1,35	1,35
D2, мкм	1,08	0,81	0,81	1,08	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,08	1,08	0,81	0,81	1,08	1,08	1,08	1,08
D3, мкм	1,08	1,35	1,35	1,08	0,81	0,81	0,81	1,08	0,81	1,08	1,08	1,08	1,08	0,81	0,81	0,81	1,35
D4, мкм	1,35	1,35	1,35	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	1,08	1,08	0,81	1,08	1,08	1,08

Здесь D1- толщина фоторезиста при центрифугировании со скоростью 2000 об/мин., D2- 3000 об/мин., D3- 3500 об/мин. и D4- 4000 об/мин. Вязкость композиции во всех опытах оставалась неизменной.

Для исследования скоростей протекания технологических операций, в частности скорости проявления, исследуемая тест-структура, описанная выше, подвергалась общей засветке УФ - излучением и дальнейшему проявлению в стандартном щелочном проявителе. В данном случае проявление осуществлялось без интенсивного перемешивания. По мере снятия массы фоторезиста проводились замеры толщины пленки в контрольных точках и, соответственно, вычислялась скорость реакции. Графики распределения относительных скоростей удаления фоторезиста по контрольным точкам представлены на рис. 4, а фотография промежуточного результата проявления - на рис. 5.

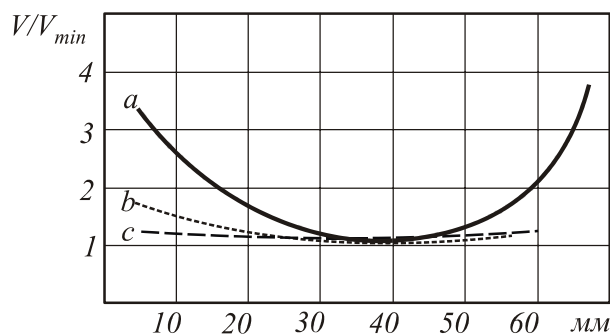


Рис. 4. Распределение скоростей обработки по контрольным точкам подложки:

- a - по диагонали подложки (точки 1-4-9-14-17),
- b - по ширине подложки (точки 2-5-9-13-16),
- c - по длине подложки (точки 7-8-9-10-11)

Из приведенных данных ясно видно, что скорость обработки фоторезиста на краях подложки в

4-5 раз выше, чем в центре, а точность в одно кольцо Ньютона достижима только в центре, на 10-15% общей площади подложки. Это объясняется затрудненным доступом проявителя к центральным зонам и требует применения специальной организации потоков обработки - перемешивание, барботирование, проявление поливом на центрифуге и т.п. (рис. 5).

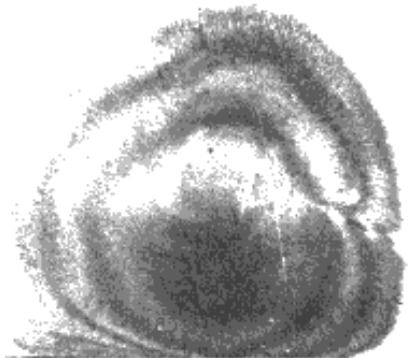


Рис. 5. Неравномерность проявления фоторезиста.

Для устранения этого эффекта была проведена модернизация центрифуги с целью получения возможности проявления поливом непосредственно в процессе центрифугирования. Это дало заметно лучшие результаты и неравномерность скорости обработки снизилась до 8 – 10%, (рис.6).

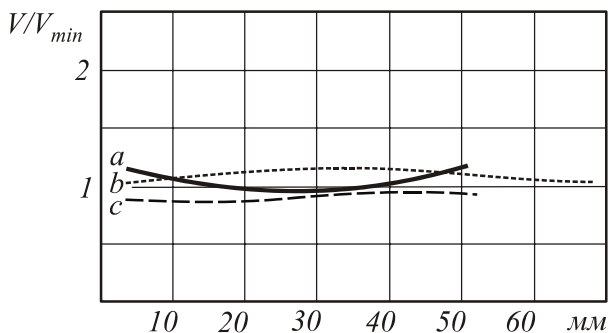


Рис. 6. Неравномерность проявления фоторезиста поливом. Скорость проявления:

- a - по диагонали подложки (точки 1-4-9-14-17),
- b - по ширине подложки (точки 2-5-9-13-16),
- c - по длине подложки (точки 7-8-9-10-11)

Используя полученные результаты, был изготовлен фокусатор в «кольцо», работающий под углом 45° со следующими расчетными параметрами:

- фокусное расстояние – 400 мм;
- рабочая длина волны – 10,6 мкм;
- диаметр освещающего пучка – 12 мм;
- диаметр «кольца» в фокальной плоскости – 20 мм.

Фрагмент профилограммы изготовленного фокусатора, снятой с использованием профилографа-профилометра 170311, представлен на рис. 7.



Рис. 7. Фрагмент профилограммы центральной зоны фокусатора в «кольцо», увеличение по вертикали – 1000, увеличение по горизонтали – 20, размер клетки 2х2мм.

После проведения фотолитографических операций на рельеф термовакuumным способом напылялись слои меди или серебра для повышения коэффициента отражения. Измерения интенсивности в фокальной плоскости проводились по известной методике (см. [2]), результирующий график распределения мощности представлен на рис. 8.

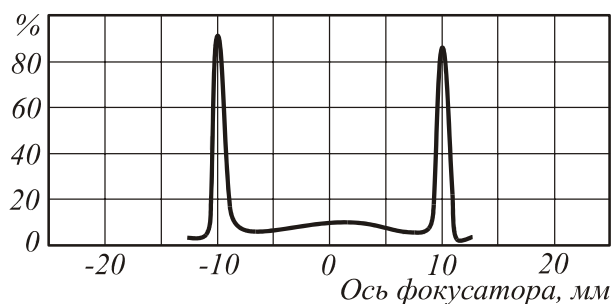


Рис. 8. Сечение распределения интенсивности в фокальной плоскости фокусатора в «кольцо».

По сравнению с фокусатором в «кольцо» [8], изготовленным методом отбеливания на фотопластинке «Микрат», представленный ДОЭ обладает заметными лучшими характеристиками: практически нет центрального пика излучения, области фокусировки явно выражены и по своим параметрам хорошо согласуются с теоретическими работами по моделированию [9]. Дальнейшая экспериментальная проверка показала, что представленный фокусатор практически не изменил своих характеристик при длительном воздействии лазерного излучения мощностью около 100 Вт.

Заключение

Предлагаемая технология изготовления ДОЭ послойным наращиванием фоторезиста позволяет получать относительно недорогие и высококачественные оптические элементы. Однако проведенный в настоящей работе анализ показал, что для получения качественного микрорельефа по рассматриваемой технологии необходимо выполнение следующих требований: применение насыщенных фоторезистов с малым содержанием растворителя, строгое

выдерживание параметров центрифугирования – особенно время разгона до номинальных оборотов, использование центральных зон подложки для устранения краевого эффекта.

Показано, что при соблюдении указанных требований возможно получение следующих параметров: неравномерность высоты ступеньки микрорельефа $\pm 0,05$ мкм; шероховатость отражающих поверхностей ± 7 нм. Проведенные исследования позволили увеличить эффективность широкоапертурных ДОЭ, изготавливаемых по описанной технологии до 85-90%.

Литература

1. Волков А.В., Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Соيفер В.А. Метод формирования дифракционного микрорельефа на основе послойного наращивания фоторезиста // Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1996. - Вып.16. С.12-14.
2. A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.Yu. Moiseev & V.A. Soifer. A Method for the Diffractive Microrelief Formation Using the Layered Photoresist Growth // Optics and Lasers in Engineering, vol. 29(1998). - P.281-288.
3. D. Angel. Semicond. Int. April. 1983. - 72 P.
4. Ануфриенко В.В., Неустроев Е.М., Новикова Е.М. Влияние режимов центрифугирования на толщину и стабильность толщины пленок фоторезиста // Электронная техника, №1(33). 1970. - С.42-45.
5. Рафельсон Л.Л., Волков А.В., Бородин С.А., Иванова В.А. Устройство контроля чистоты поверхности подложек. А.с. №1741032 от 15 февраля 1992г.
6. Волков А.В., Колпаков А.И. Способ определения чистоты поверхности подложки. А.с. №1784868 от 1 сентября 1992г.
7. L.Whit. J. Electrochem, soc.130. 1983. 1543 P.
8. Арефьев Е.Ю., Гилев В.А., Голуб М.А., Казанский Н.Л., Карпеев С.В., Сисакян И.Н., Соифер В.А., Соловьев В.С., Тихонов Д.Н., Уваров Г.В. Экспериментальное исследование плоского оптического элемента, фокусирующего в кольцо. // Компьютерная оптика, вып. 5. -М.: МЦНТИ, 1989. –С.49 – 54.
9. Казанский Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента. // Компьютерная оптика, вып10-11. -М.: МЦНТИ, 1989. –С.128 – 144.