

4. Киш Г. Влияние несовершенств оптической системы на вероятность сбоев голографического запоминающего устройства // Квантовая электрон.— 1984.— Т. 11, № 10.
5. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Влияние дифракционного фона на качество восстановленного изображения в ГЗУ // Труды IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982, т. 2.
6. Hill В. Point efficiency and signal-to-background ratio in exponential holograms for optical memories // Appl. Opt.— 1972.— V. 11, N 12.— P. 2937.
7. Пен Е. Ф. Исследование качества записи и воспроизведения изображений страниц двоичной информации в голографических ЗУ (ГЗУ) // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике.— Фрунае: ФПИ, 1981.
8. Lee Wai-Hon. Effect of film-grain noise on the performance of holographic memory // JOSA.— 1972.— V. 62, N 6.— P. 797.
9. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Исследование помехоустойчивости фурье-голограмм в ГЗУ // Автометрия.— 1985.— № 4.
10. Богданова Е. С., Соскин С. И. Влияние aberrаций оптической системы на емкость голографической памяти // Автометрия.— 1975.— № 3.
11. Соскин С. И., Шойдин С. А. Оптимизация параметров голографического запоминающего устройства с учетом aberrаций // Опт. и спектр.— 1978.— Т. 44, № 6.
12. Пен Е. Ф. Расчет достоверности считывания информации в ГЗУ на основе экспериментальных данных характеристик восстановленных изображений // Труды IV Всесоюз. конф. по голографии.— Ереван: ВНИИРИ, 1982, т. 2.
13. Блок А. А. и др. Устройство автоматической записи матриц голограмм цифровых данных // Автометрия.— 1984.— № 3.
14. Ванюшев Б. В. и др. Устройство хранения и считывания цифровых данных в голографической системе архивной памяти // Автометрия.— 1984.— № 3.
15. Вентцель Е. Ф. Теория вероятностей.— М.: Наука, 1969.
16. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Экспериментальные исследования достоверности считывания данных в голографических ЗУ // Автометрия.— 1984.— № 3.

Поступила в редакцию 28 февраля 1986 г.

УДК 621.372.8.029.7

Н. В. ГУСАК, А. В. МИРОНОС, В. Л. СМЕРНОВ, В. И. СОЛДАТОВ

(Москва)

ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФОКУСИРУЮЩИХ ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАММ НА СЛОЯХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ

Данная работа посвящена вопросам формирования высокоэффективных безабберационных голографических линз, необходимость создания которых обуславливается широкими перспективами применения их в интегральной оптике в качестве базовых элементов интегрально-оптических процессоров [1, 2], в волноводной голографии [3] как элементов ввода и вывода, а также в качестве элементов когерентных оптических вычислительных машин [4].

В работах [5, 6] показано, что голографические фокусирующие элементы такие, например, как геодезические линзы, брегговские линзы, обладают большими aberrациями [5, 6] и, кроме того, ввиду модовой селективности не всегда могут быть использованы для фурье-анализа [7]. Наряду с этим перечисленные фокусирующие элементы сложны в изготовлении. Таким образом, перспективным направлением создания фокусирующих элементов для интегральной оптики, по-видимому, следует считать метод оптической записи фокусирующих голографических элементов (ФГЭ). Однако перспективность ФГЭ в большой степени зависит от выбора фоточувствительного материала для записи. Так, в [8] исследовались aberrационные свойства синтезированных на ЭВМ фокусирующих голограмм; установлено, что величина aberrаций резко уменьшается при увеличении разрешающей способности фоточувствительного

материала. Таким образом, для записи ФГЭ в первую очередь необходимо соответствующий материал и методы записи ФГЭ.

Один из перспективных материалов для записи голограмм — халькогенидное стекло [9—13], причем наиболее практически ценными свойствами халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) в связи с изложенным являются: высокое разрешение (до 10^3 лин./мм), большой динамический диапазон (9 дБ) [9], технологичность формирования пленки и записи на ней голограмм, низкий уровень шумов. Однако дифракционная эффективность (ДЭ) таких голограмм невысока. С целью увеличения дифракционной эффективности используется эффект селективного травления [14, 15].

Было показано, что селективность растворения, а значит и ДЭ голограмм, повышается в слоистых структурах As—S, где скорость растворения меняется главным образом за счет фотостимулированной диффузии атомов халькогена [15]. Так, применение слоистых структур позволило увеличить ДЭ до 30—40%, что на порядок выше ДЭ, полученных на пленках с однородным составом по толщине.

Однако вопрос, возникающий в процессе травления aberrаций, не рассматривался и представляет в связи с изложенным выше несомненный практический интерес.

Цель данной работы — исследование возможности применения метода селективного травления для получения безабберационных фокусирующих голограмм с высокой ДЭ на слоистых структурах As—S.

Пленки ХСП формировались на подложках из стекла К-8 методом термического напыления в вакууме с одновременным контролем толщины интерференционным методом. Запись и восстановление голограмм производились одновременно на длинах волн 0,51 мкм (Ag-лазер, мощность 0,5 Вт/см²) и 0,63 мкм (He-Ne-лазер, мощность 60 мВт/см²) соответственно.

На рис. 1 приведена схема записи и считывания исследуемых ФГЭ. Данная схема использовалась в [16] для записи волноводных голограмм (внешними пучками). В [16, 17] исследовалась модовая селективность таких голограмм. ДЭ фокусирующих волноводных голограмм достаточно мала в силу конструктивных особенностей составных волноводных структур, используемых для записи [16, 17]. В связи с этим повышение ДЭ методом селективного травления является весьма актуальным.

На рис. 2 представлены графики зависимости ДЭ от времени травления ФГЭ для разных экспозиций. Из графиков следует, что максимальная дифракционная эффективность достигается при временах экспонирования и травления, равных 3 и 50 с соответственно. Уменьшение ДЭ при больших экспозициях объясняется, по-видимому, влиянием

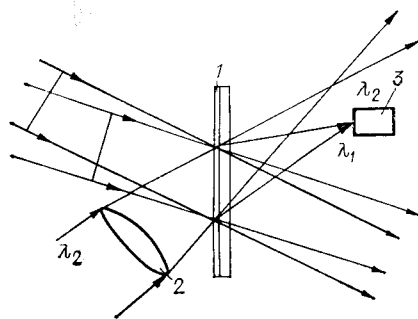


Рис. 1. Схема записи и считывания фокусирующих голограмм ($\lambda_1 = 0,63$, $\lambda_2 = 0,52$ мкм):
1 — пленка ХСП, 2 — линза, 3 — регистратор, МТУ-1, С1-81

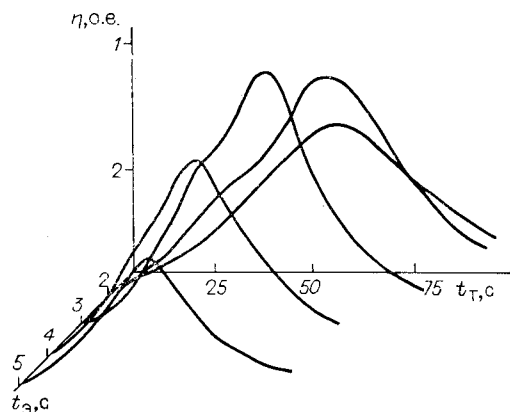


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности от времени травления фокусирующих голограмм для разных экспозиций

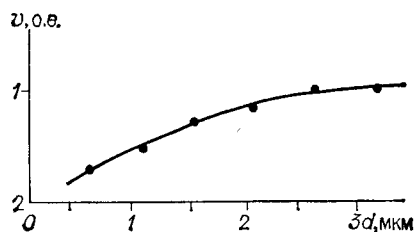


Рис. 3. Зависимость фотоиндуцированного изменения скорости растворения структуры As—S от периода интерференционных полос

фоновой засветки, а также диффузией атомов между экспонированной и неэкспонированной областями. Подтверждением данного предположения может служить представленная на рис. 3 зависимость фотоиндуцированного изменения скорости растворения слоистой структуры от периода интерференционной картины при постоянной экспозиции. Измерения проводились на записанных интерференционным методом дифракционных решетках.

Из рисунка видно, что фотоиндуцированное изменение скорости растворения структуры As—S возрастает с увеличением периода интерференционной картины.

Таким образом, в процессе травления более сложных голограмм, в том числе фокусирующих, скорости формирования гофров с разными периодами на поверхности растворяемой структуры имеют разные значения, что естественно приводит к возникновению aberrаций. Но aberrации могут возникать и вследствие низкой разрешающей способности фоточувствительного материала. Из литературы известно, что разрешение на халькогенидных стеклах достигает 10^3 лин./мм, что может быть недостаточно для записи голограмм с малыми aberrациями. Однако механизмы записи должны обеспечивать более высокую разрешающую способность, которая ограничивается длиной волны записывающего излучения.

Использование слоистой структуры As—S, а также применение методики записи голограмм во встречных пучках позволили сформировать дифракционные решетки с периодом 0,1 мкм и глубиной гофра 0,10—0,15 мкм (рис. 4). Как видно из микрофотографии, разрешение структуры составляет 10^4 лин./мм. Это обеспечивает максимально необходимую разрешающую способность при записи на длине волны 0,51 мкм, соответствующей максимальной фоточувствительности для данного материала.

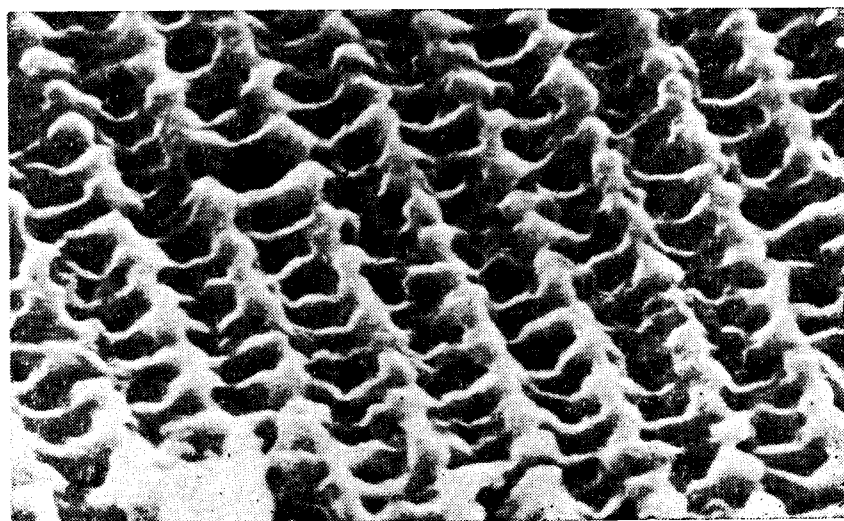


Рис. 4. Микрофотография дифракционной решетки

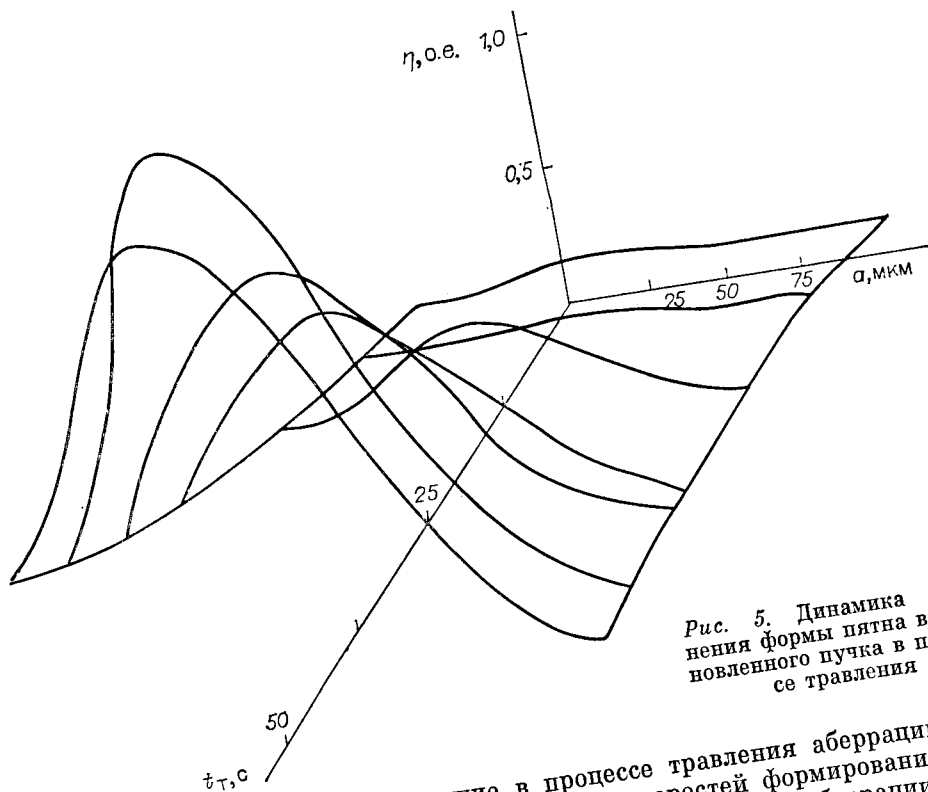


Рис. 5. Динамика изменения формы пятна восстановления пучка в процессе травления

Таким образом, возникающие в процессе травления aberrации обуславливаются главным образом различием скоростей формирования гофров с различными периодами. Далее исследовались aberrации ФГЭ на слоистых структурах из ХСП.

Расчет aberrаций производился по известной методике, в основе которой лежит измерение формы пятна в фокусе восстановленной голограммы. Измерения проводились с помощью телевизионной установки МТУ-1 и осциллографа С1-81 с построением развертки. На рис. 5 представлена зависимость формы пятна от времени травления при экспозиции, обеспечивающей максимальную дифракционную эффективность. Из графиков видно, что наряду с увеличением дифракционной эффективности происходит изменение формы пятна.

Для обеспечения оптической обработки информации непосредственно в тонкопленочном волноводе, а также решения проблемы согласования и стыковки планарных элементов перспективных волноводных установок, при формировании таких волноводных линз, при травлении которых распределение интенсивности в фокусе дифракционного пучка с высокой точностью сохраняло бы гауссову форму. В связи с этим и был проведен анализ возникающих в процессе травления aberrаций.

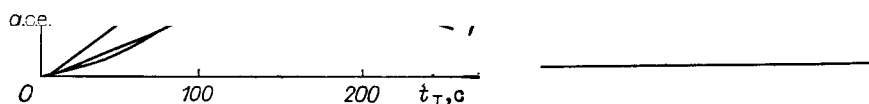
Идеальная фокусирующая система, как упоминалось, обеспечивает гауссово распределение интенсивности в фокусе дифракционного пучка:

$$f_{\Gamma}(x) = Ae^{-\frac{\pi x^2}{2\sigma}} = Ae^{-\frac{\pi d^2}{2}}$$

где σ — полуширина пятна; d — нормированная координата. Сравнивая распределение интенсивности с гауссовой кривой, определим функцию aberrации:

$$f_{\text{ш}}(d) = f_{\Gamma}(d) - f_{\text{экс}}(d).$$

Разлагая $f_{\text{ш}}(d)$ в степенной ряд, коэффициенты при степенях которого соответствуют весам различных типов aberrаций, можно определить их количественное соотношение в общем шумовом фоне [18].



Аналитический вид зависимости $f_m(d)$ определяется методом Лагранжа по узловым точкам экспериментальной кривой. Значения функции в узловых точках находятся как

$$f_m(d_j) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(d_j), \quad j = 1, \dots, m,$$

где φ_i — интерполяционный многочлен Лагранжа. Решая систему уравнений

$$\sum_{i=1}^n a_i d_j^{i-1} = f_m(d_j), \quad j = 1, \dots, m,$$

получаем значения искомых коэффициентов a_i . Решение системы уравнений было найдено с помощью ЭВМ стандартным методом. Результаты расчета представлены на рис. 6.

Приведенные кривые позволяют определить оптимальные времена химического травления ФГЭ. Кроме того, как следует из графиков, предложенная методика формирования высокоэффективных ФГЭ вносит малые aberrации. Распределение интенсивности в фокусе с большой точностью сохраняет при травлении гауссову форму (ДЭ 38%, диаметр пятна 100 мкм, апертура 0,25).

Таким образом, в данной работе разработана методика получения высокоэффективных безабберационных волноводных голограмм, которые могут широко использоваться в интегральной оптике в качестве всевозможных функциональных элементов таких, например, как фильтры пространственных частот, устройства согласования, интегрально-оптические процессоры, а также в качестве элементов когерентных оптических вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завалин А. И., Кульчин Ю. П., Миронос А. В., Смирнов В. Л. О возможности создания волноводных фильтров для оптических процессоров путем записи голограмм на слоях ХСП // Фотохимические процессы записи голограмм.— Л.: ФТИ, 1983.
2. Быковский Ю. А., Кульчин Ю. П., Смирнов В. Л. Пространственная фильтрация изображения в планарном волноводе // Опт. и спектр.— 1982.— Т. 52, вып. 6.
3. Wuthrich A., Lukosz W. Holography with guided optical waves // Appl. Phys.— 1980.— N 21.— P. 55.
4. Акаев А. А., Майоров С. А. Принципы построения и функционирования ГЗУ // Когерентные оптические вычислительные машины.— Л.: Машиностроение, 1977.
5. Ахмаджанов И. М., Киселев А. В., Прохоров А. М., Щербаков Е. А. Aberрационные искажения сферической геодезической волноводной линзы в $Ti:LiNbO_3$ // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 2.
6. Быковский Ю. А., Миронос А. В., Смирнов В. Л. Исследование интегрально-оптических лубберговских линз, изготовленных методом лазерного напыления // Квантовая электрон.— 1981.— Т. 8, № 3.
7. Tanaka S., Hatakoshi G., Yushiro H., Umegaki S. Out of phase properties of optical waveguide Bragg grating lenses // Appl. Opt.— 1984.— V. 23, N 11.— P. 1754.
8. Kedmi J., Frigsem A. A. Optimal holographic Fourier-transform lens // Appl. Opt.— 1984.— V. 23, N 22.— P. 4015.
9. Кикинешни А. А., Семак Д. Г. Физические процессы оптической записи информации в слоях ХСП // Новые регистрирующие среды для голографии.— Л.: Наука, 1983.

10. Есаян Ю. В., Акопов Р. В., Татевосян Н. Ц., Еганян М. Ж. О влиянии подогрева на реверсивную запись на халькогенидных пленках As_2S_3 // Письма в ЖТФ.— 1975.— Т. 1, вып. 5.
11. Туреница И. И., Семак Д. Г., Кикинени А. А. Об оптимизации параметров халькогенидных слоев для оптической записи // Журн. науч. и приклад. фотогр. и кинематогр.— 1977.— № 22.
12. Андриеш А. М., Быковский Ю. А., Смирнов В. Л. и др. Фотоприемные элементы и дифракционные решетки рельефного типа в тонких пленках As_2S_3 для интегральной оптики // Квантовая электрон.— 1978.— Т. 5, № 5.
13. Звонарева Т. К., Коломиец Б. Т., Любин В. М., Федоров В. А. Фотостимулированные изменения оптических свойств и запись оптической информации в стеклообразных пленках системы $As-S$ // ЖТФ.— 1978.— Т. 48, № 5.
14. Коломиец Б. Т., Любин В. М., Шило В. П. Фотостимулированные изменения растворимости халькогенидных стекол // Физика и химия стекла.— 1978.— № 4.
15. Быковский Ю. А., Миронос А. В., Смирнов В. Л., Солдатов В. П. Использование селективности растворения пленок ХСП для формирования пассивных элементов интегральной оптики // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 6.
16. Андриеш А. М., Быковский Ю. А., Бородакий Ю. В. и др. Формирование волноводных каналов в оптических волноводах на основе ХСП // Письма в ЖТФ.— 1984.— № 6.
17. Heitmann D., Pole R. V. Two-dimensional focusing holographic grating coupler // Appl. Phys. Lett.— 1980.— V. 37, N 7.— P. 585.
18. Бахвалов Н. С. Интерполяция и смежные вопросы // Численные методы.— М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 3 февраля 1987 г.

УДК 772.99

Н. С. МЕРЗЛЯКОВ, Н. Р. ПОПОВА

(Москва)

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФРЕНЕЛЯ ПРИ ЦИФРОВОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ГОЛОГРАММ

В акустической, сейсмической и радиоголографии в настоящее время широко используется цифровое восстановление голограмм, основанное на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье. Однако в ряде случаев, когда расстояние до объекта сравнимо с размерами объекта и голограммы, при этом объект находится в ближней зоне дифракции, приближение Фурье или Френеля в общем виде не выполняется. Поэтому весьма актуальным становится вопрос о границах применимости дискретного преобразования Фурье и Френеля (ДПФ и ДПФр) при восстановлении голограмм с помощью ЭВМ.

Как правило, при цифровом восстановлении голограмм решается дифракционная задача нахождения поля $g(x, y, z)$ изображения по полю $f(\xi, \eta, 0)$, зарегистрированному на голограмме. Функции $f(\xi, \eta, 0)$ и $g(x, y, z)$ связаны соотношением [1]

$$g(x, y, z) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta, 0) \exp\{ik\rho\} d\xi d\eta, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны, на которой записана и восстановлена голограмма; $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}$ — радиус-вектор.

В зависимости от используемых членов разложения радиуса-вектора для параксиального приближения получим формулы преобразования Фурье

$$g(x, y, z) = A \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi, \eta, 0) \exp\left\{-i \frac{k}{z} (x\xi + y\eta)\right\} d\xi d\eta \quad (2)$$