

2. По формулам (8) или (9) из [1] вычисляется нулевое приближение высоты на входе.

3. Просчитывается луч через  $P_1$  и определяется нулевое значение радиуса голограммы  $\rho_{m0}$  ( $m$  — порядок интерференции, в нашем случае  $m = 0$ , второй индекс — номер итерации).

4. В обратном ходе от  $S'$  (точка изображения) через  $P_2$  опять-таки с начальным приближением по тем же формулам отыскивается радиус голограммы  $\rho'_{m0}$ .

5. Вычисляется  $|\rho'_{m0} - \rho_{m0}|$ . Если эта величина меньше заданного  $\epsilon$ , радиус найден, если нет, то высота (или угол) в обратном ходе изменяется в  $\rho_{m0}/\rho'_{m0}$  раз и снова через  $P_2$  обчисляется луч и определяется  $\rho'_{m1}$ . Опять сравнивается  $|\rho'_{m1} - \rho_{m0}|$  с  $\epsilon$ . Если условие «меньше» не выполнено, снова меняется высота (угол) на входе в  $\rho_{m0}/\rho'_{m1}$  раз и процесс повторяется.

6. После того как радиусы голограммы в прямом и обратном ходе совпали с заданной точностью  $\epsilon$ , проверяется, соответствует ли найденный радиус истинному, т. е. равна ли разность оптических длин путей полученного осевого луча, деленная на длину волны света, заданному порядку интерференции  $m$ . Если нет, то теперь меняется высота на входе системы в  $\Delta L_m/\Delta L_m^{\text{тек}}$  раз ( $\Delta L_m$  — нужная разность оптических длин,  $\Delta L_m^{\text{тек}}$  — полученная на предыдущем шаге).

7. Процесс в пп. 3—6 повторяется до тех пор, пока  $|\Delta L_m - \Delta L_m^{\text{тек}}|$  не станет меньше  $\delta$  (в наших расчетах  $\delta = 10^{-5}\lambda$ ); вычислительный радиус голограммы является искомым.

8. Порядок интерференции  $m$  увеличивается на 1. Нулевая высота на входе — последнее ее значение в предыдущем расчете. Все остальное повторяется в соответствии с пп. 3—7. Расчет радиусов голограммы выполняется до  $m = M$ .

Алгоритм, приведенный в настоящем сообщении, был реализован в программах на ЕС-1033 и применен в практических расчетах голограмм. Решения задачи на ЕС-1033 показали высокую скорость расчета радиуса осевых голограмм: например, определение параметров голограммы на шестой поверхности оптической системы, состоящей из восьми поверхностей, заняло 2 мин 54 с процессорного времени на 740 радиусов, т. е. среднее время расчета одного радиуса 0,23 с при точности расчета  $10^{-5}\lambda$ . Использование других методов, например [5], требуют значительно больше времени, по крайней мере на порядок. Приведенный алгоритм пригоден для расчета голограммных оптических элементов с монотонно возрастающим эйконалом, например, для голограммы, нанесенной на произвольную поверхность (плоскую, сферическую, асферическую) в оптических системах с поверхностями всех известных на сегодня типов. Голограмма может быть многоуровневой, в частности бинарной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циглер Ю. Н. Об одном методе расчета синтезированных голограмм // Автометрия.— 1987.— № 4.
2. Хузин Ф. Г., Циглер Ю. Н. Упрощенные формулы расчета хода лучей через центрированные оптические системы, содержащие голограммные элементы // Автометрия.— 1987.— № 4.
3. Feder D. P. Optical calculations with automatic computing machinery // JOSA.— 1951.— 44, N 9.— P. 630.
4. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1969.
5. Ган М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов: Метод. пособие.— Л.: ГОИ, 1984.

Поступило в редакцию 18 января 1989 г.

УДК 621.373.824 : 315.61

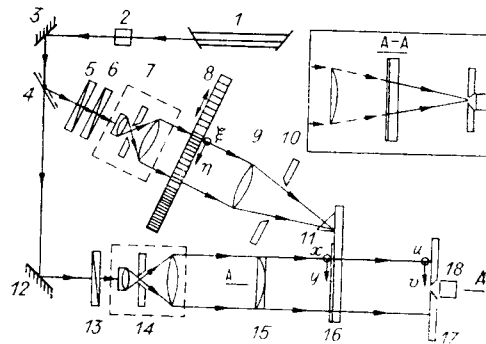
Ю. А. БЫКОВСКИЙ, В. Г. ЖЕРЕГИ, Ю. Н. КУЛЬЧИН, В. Л. СМІРНОВ  
(Москва)

## ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ВОЛНОВОДНОМ ТРАКТЕ

Возможность передачи и обработки оптических сигналов в волноводном тракте позволяет создавать устройства оптической обработки информации (ООИ), имеющие высокую надежность, помехозащищенность, малые габариты [1, 2]. Вызванным направлением развития волноводных процессоров является разработка чисто волноводных способов когерентно-оптической обработки аналоговых сигналов [3]. Однако

Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — лазер; 2 — оптический затвор; 3, 4, 12 — зеркала; 5, 6, 13 — поляризаторы; 7, 14 — коллиматоры; 8 — транспарант; 9 — линза; 10 — диафрагма; 11 — вводная призма; 15 — цилиндрическая линза; 16 — волновод с нанесенным слоем ХСП; 17 — диафрагма диаметром 25 мкм; 18 — фотоприемник



сложность изготовления качественных волноводных фурье-линз ограничивает их возможности и приводит к необходимости использования объемных элементов. Так, например, в [4] при разработке интегрально-оптического коррелятора одномерных оптических сигналов использовались внешние объемные линзы для осуществления прямого и обратного преобразования Фурье (ПФ), что, безусловно, сделало устройство менее надежным и компактным. В то же время известны голографические методы выполнения ПФ, в которых исключается применение линз на стадии обработки сигналов [5]. Реализация данного метода в волноводных голографических устройствах ООИ позволяет избежать трудностей, связанных с необходимостью использования волноводных линз. Поэтому цель настоящей работы — изучение возможности осуществления голографической корреляционной обработки сигналов, распространяющихся в планарном волноводе без применения фурье-линз.

Запись голографического согласованного фильтра производилась предметной волной, распространяющейся в виде волноводной моды, и цилиндрической опорной волной, сходящейся в плоскости, нормальной к направлению распространения излучения в волноводе (рис. 1). В плоскости голограммы амплитуда интерференционного поля с точностью до фазовых множителей описывается выражением

$$\varepsilon(x, y) = F_1(x) \exp(i\beta y) + \exp\left(-\frac{ik}{2l}x^2\right),$$

где  $F_1(x)$  — ПФ функции пропускания входного транспаранта  $f_1(\xi)$ , осуществляемое линзой 9 с фокусным расстоянием  $d$ ;  $\beta$  — постоянная распространения моды, на которой осуществляется запись;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны записи;  $l$  — расстояние от плоскости голограммы до фокуса линзы. При взаимодействии с записанной голограммой предметной волны с распределением амплитуды поля  $F_2(x)$ , являющегося ПФ функции пропускания входного транспаранта  $f_2(\xi)$ , образуется волна, соответствующая полю корреляции. В плоскости  $(u, v)$  она имеет вид

$$\varepsilon(u, v) = A(u, v) \exp\left(i\frac{k}{2l}u^2\right) \int \bar{F}_1(x) F_2(x) \exp\left(-i\frac{k}{l}ux\right) dx. \quad (*)$$

Интеграл в полученном выражении является пространственным аналогом функции неопределенности. Можно показать, что в случае  $d = l$ , с точностью до несущественного множителя, выражение (\*) соответствует функции корреляции входных сигналов  $f_1(\xi)$  и  $f_2(\xi)$ . При  $u = 0$  интеграл в выражении (\*) равен значению функции корреляции с нулевым аргументом при любых  $d$  и  $l$ :

$$\varepsilon(0, v) \sim \int \bar{F}_1(x) F_2(x) dx \sim \int \bar{f}_1(\xi) f_2(\xi) d\xi = K(0).$$

Таким образом, интенсивность сигнала при  $u = 0$  в плоскости фокусировки восстановленной с голограммы волны пропорциональна квадрату модуля центрального отсчета функции корреляции анализируемых сигналов. Вследствие затухания волноводной моды под голограммой интенсивность волны, выводимой из волновода, спадает в направлении распространения излучения в волноводе. Это приводит к экспоненциальной зависимости квадрата модуля функции корреляции от координаты  $v$ :

$$|K(0)|^2 \sim \exp(-\alpha v) \left| \int \bar{f}_1(\xi) f_2(\xi) d\xi \right|^2,$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания интенсивности волноводной моды под голограммой. Оптимальной для записи волноводных голограмм (ВГ) является составная волноводная структура, состоящая из волновода с низкими потерями с нанесенным на него светочувствительным слоем [4, 6]. В данной работе запись ВГ осуществляется на слоях халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) состава  $As_2S_3$ , приготовленных термическим напылением на поверхность стеклянного диффузионного волновода. Запись голограмм производится излучением аргонового лазера ( $\lambda = 0,51$  мкм).

С целью определения оптимальных условий записи исследуется зависимость отношения сигнал/шум, восстановленного с ВГ изображения бинарного транспаран-

**Зависимость глубины травления засвеченных ( $h_3$ ) и незасвеченных ( $h_H$ ) участков ХСП от времени травления ( $t_{тр}$ ) и концентрации раствора NaOH ( $n$ )**

$t_{тр}, c$	0,1 $n$		0,05 $n$	
	$h_3, мкм$	$h_H, мкм$	$h_3, мкм$	$h_H, мкм$
15	0,45	0,13	0,05	<0,02
30	>0,5	0,27	0,12	0,12
60	—	0,5	0,22	0,07

та, от толщины светочувствительного слоя (рис. 2, а) и экспозиции (рис. 2, б) при различных соотношениях мощностей опорной и предметной волн. Для увеличения дифракционной эффективности (ДЭ) и стабилизации записанных голограмм проводится их травление в растворе NaOH. В таблице приведены результаты измерения скорости травления засвеченных и незасвеченных участков ХСП от концентрации травителя. В нашем случае оптимальными оказались значение концентрации (нормальности  $n$ ) раствора NaOH, равное 0,05, и время травления 1 мин, что обеспечивает глубину гофра до 0,2 мкм и минимальное искажение волноводного тракта, поскольку не приводит к существенному протравливанию незасвеченных участков ХСП. Наряду с увеличением ДЭ, травление светочувствительного слоя позволяет также считать записанную ВГ на длине волны

записи, что устраняет хроматические aberrации. При этом считывание протравленной ВГ в течение 60 мин приводит к уменьшению ДЭ не более чем на 10 %.

В качестве голографируемого объекта используются элементы стандартной штриховой миры № 6. Поскольку светочувствительный материал имеет ограниченный динамический диапазон, для увеличения ДЭ и линейности записи ВГ осуществляется запись и считывание ВГ, помещая в предметную волну различные элементы миры. На рис. 3 приведено распределение интенсивности восстановленной с голограммы волны в направлении на оси  $u$  и  $v$  при использовании на стадии восстановления элементов № 16 и № 10 миры (соответственно зависимости 1 и 2). При этом запись выполнялась с применением элемента № 16. Из приведенных зависимостей видно, что пик автокорреляционного сигнала на  $\sim 12$  дБ превышает величину выброса сигнала взаимной корреляции. При этом различие в суммарной интенсивности сигналов, восстановленных с ВГ, не более 20 %. Для определения чувствительности сигнала корреляции к изменению пространственной частоты ана-

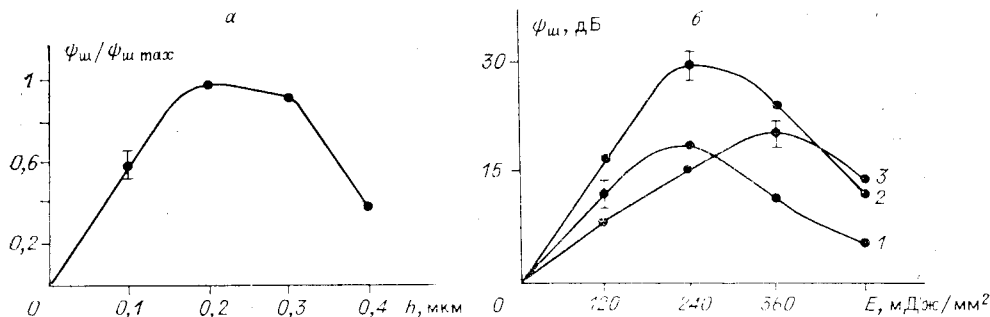


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум ( $\Psi_{ш}$ ), восстановленного с ВГ бинарного изображения, от толщины слоя ХСП (а) и экспозиции (б) при следующих соотношениях мощностей опорной и предметной волн:

1 : 1 (1), 1 : 2 (2), 1 : 4 (3)

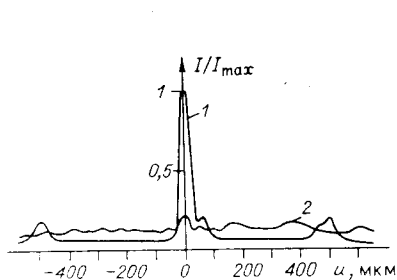


Рис. 3. Распределение интенсивности волны, восстановленной с ВГ, в плоскости  $u, v$

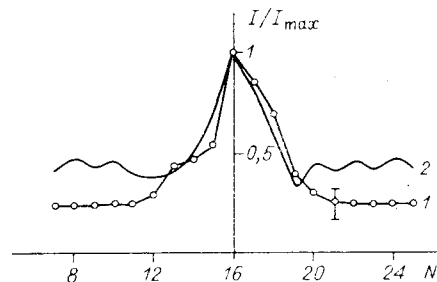


Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости нормированного сигнала корреляции от номера элемента миры

лизированных входных сигналов проводится измерение зависимости квадрата модуля функции корреляции ( $|K(0)|^2$ ) от номера элемента миры, используемого при считывании ВГ (рис. 4, кривая 1). Приведенная на этом же графике расчетная зависимость  $|K(0)|^2$  (кривая 2) хорошо согласуется с экспериментальной при разности номеров элементов, используемых при записи и считывании, не более 4. Несовпадение зависимостей при большем отличии номеров элементов, по-видимому, связано с рассогласованием апертур ВГ и считывающей волны, а также отстройкой от брегговского резонанса.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность корреляционной обработки оптических сигналов с помощью фокусирующих ВГ с использованием безлинзового преобразования Фурье на стадии восстановления. Предложенный метод обработки оптических сигналов позволяет существенно упростить схему волноводного коррелятора, поскольку не требует применения фурье-линзы при формировании корреляционного сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Оптические волноводные процессоры // Квантовая электроника.— 1987.— 14, № 7.
2. Тейлор Х. Ф. Волноводная оптика в процессорах и измерительных системах // ТИИЭР.— 1987.— 75, № 11.
3. Андриеш А. М., Кульчин Ю. И., Пономарь В. В., Смирнова А. С. Запись и считывание голограмм в планарном волноводе // Оптика и спектроскопия.— 1983.— 55, № 2.
4. Баблунян А. С., Морозов В. Н., Путилиц А. Н., Шермергор Т. Д. Волноводные голограммы в системах передачи, хранения и обработки информации // Труды физ. ин-та им. П. Н. Лебедева.— 1987.— 185.— С. 165.
5. Власов Н. Г., Фирсова О. В., Чернов В. И. Голограмма Френеля как комплексный фильтр // Оптика и спектроскопия.— 1971.— 31, вып. 5.
6. Казакевич А. В., Ламекин В. Ф., Миронос А. В., Смирнов В. Л. Волноводные голограммы на составных волноводных структурах // Автометрия.— 1986.— № 6.

*Поступило в редакцию 22 мая 1989 г.*

УДК 621.378.325

А. М. БАКИЕВ, С. Х. ВАЛИЕВ, Н. В. КРЯЖЕВ,  
Е. Г. НИКОЛАЕВА, Б. Т. ЭЛЬТАЗАРОВ

*(Ташкент)*

#### ЛАЗЕРНАЯ ПРОЕКЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЙ С УСИЛИТЕЛЕМ ЯРКОСТИ

**Введение.** Создание квантовых усилителей яркости (КУЯ) позволило значительно расширить арсенал новых оптических приборов и устройств. В настоящее время разработаны и в достаточной мере изучены лазерные проекционные микроскопы (ЛПМ) и оптические системы для внутрирезонаторной обработки объектов, использующие КУЯ [1, 2].

В данной работе описана лазерная проекционная установка для переноса изображений на поверхности объектов, созданная на базе ЛПМ. Изучены особенности формирования лазерного пучка, передающего оптическую информацию. Приведены результаты, полученные с помощью данной установки.

**Структурная схема.** Структурная схема установки представлена на рис. 1. В качестве активного элемента использована газоразрядная трубка УЛ-102 на парах меди с источником питания ИП-18. Оптическая схема установки собрана на базе ЛПМ и содержит оптическую систему формирования передающего пучка (ОСФП), электромеханический затвор (ЭМЗ), объектив О, обрабатываемый объект ОО, светоделительные пластины СП1 и СП2, систему визуального контроля (СВК). Обрабатываемый объект ОО устанавливается на прецизионном координатном столе (КС) с шаговыми двигателями. Контроль мощности передающего пучка осуществляется с помощью фотоприемного устройства (ФПУ).

Управление работой установки осуществляется автоматизированной системой (АС). АС содержит блок управления (БУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок индикации (БИ), блок сопряжения (БС) с системным каналом диалого-вычислительного комплекса ДВК-3, в состав которого входит микроЭВМ (МЭ), видеомонитор (ВМ), блок клавиатуры (БК), накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД).

АС формирует сигналы управления ЭМЗ и положением объекта в плоскости обработки по программе управления, заложенной в памяти ДВК-3.

© 1990 Бакиев А. М., Валиев С. Х., Кряжев Н. В., Николаева Е. Г., Эльтазаров Б. Т.