

3. Барков А. П., Дорош В. С., Прохорова И. А. и др. Фотоуправляемые оптические волноводы на основе ситалловых стекол/КубГУ.— Краснодар, 1984.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 5409.
4. Петровский Г. Т., Агафонова К. А., Мишин А. В. и др. Фотоуправляемые планарные волноводы на основе фотохромного стекла // Квантовая электрон.— 1981.— 8, № 10.
5. Иванов В. Н., Никитин В. А., Никитина Е. П. и др. Получение полосковых волноводов с прогнозируемой формой поперечного сечения методом электростимулированной диффузии // ЖТФ.— 1983.— 53, № 10.

Поступило в редакцию 25 мая 1988 г.

УДК 535.317.1

Ю. А. БЫКОВСКИЙ, Ю. Н. КУЛЬЧИН, В. Л. СМЕРНОВ  
(Москва)

### ЗАПИСЬ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Использование пространственно-модулированных (кодированных) опорных волн сделало возможным проведение таких операций оптической обработки информации, как ассоциативный поиск, мультиплицирование изображений, запись наложенных голограмм и т. д. [1, 2]. В настоящее время предложен ряд способов кодирования опорных волн. Они включают в себя изменение угла наклона опорной волны по отношению к плоскости голограммы [3] и использование протяженных источников опорного луча таких, как диффузные экраны [1] и пространственные модуляторы света [4, 5]. Однако все известные способы усложняют устройства обработки, требуют больших управляющих напряжений и в ряде случаев не удовлетворяют требованиям по быстродействию и надежности [6].

Ранее, в [7, 8], сообщалось об использовании пространственно-неоднородных опорных волн, излучаемых из многомодовых волоконных световодов (ВС), для записи фурье-голограмм. Волновой фронт излучения из многомодовых ВС по своей структуре близок к фронту волны, формирующейся после прохождения когерентного излучения через диффузные экраны, которые являются идеальными средствами кодирования. Современное развитие элементной базы волоконно-оптических линий связи, а также технологии производства оптических волокон открывает перспективы по совершенствованию устройств обработки информации, уменьшению габаритов, увеличению надежности и быстродействия. Поэтому цель настоящей работы — изучение возможности использования многомодовых ВС для кодирования опорных волн при записи наложенных голограмм.

Задача кодирования опорного луча состоит в получении  $\delta$ -коррелированных волн, т. е. волн, для которых функция автокорреляции (АК) близка к  $\delta$ -функции, а функция взаимной корреляции (ВК) — к нулю [1]. Для удовлетворения этому условию необходимо иметь протяженный источник опорной волны, который является аналогом источника белого шума. В таком случае фаза волны, излучаемой протяженным источником, меняется случайным образом в интервале от 0 до  $2\pi$  и имеет множество градаций. При прохождении когерентного излучения по многомодовому волоконному световоду каждая мода претерпевает случайные изменения фазы как в результате многократных отражений от границы раздела сердцевина — оболочка, так и из-за рассеяния на неоднородностях световода [9]. Это приводит к тому, что различные моды приобретают случайные распределенные в интервале от 0 до  $2\pi$  фазовые сдвиги по отношению друг к другу. Поэтому при формировании усредненной по всему ансамблю возможных состояний освещенности выходного торца ВС, представляющей результат интерференции направляемых волн со случайными фазами, ее пространственная структура будет пропорциональна числу мод, сходящихся в данной точке под данным углом по отношению к оси световода. Так как их число пропорционально разности пространственных частот или углов, под которыми моды распространяются в ВС, то, используя [10], можно показать, что средний размер спеклов, формируемых на излучающем торце, будет иметь значение

$$\Delta_s \approx \frac{3\pi}{2} \frac{(\beta_{lm})_c}{\beta_{01}^2}, \quad (1)$$

где  $\beta_{01}$  — константа распространения  $LP_{01}$  моды, а  $(\beta_{lm})_c$  — константа распространения моды отсечки [9].

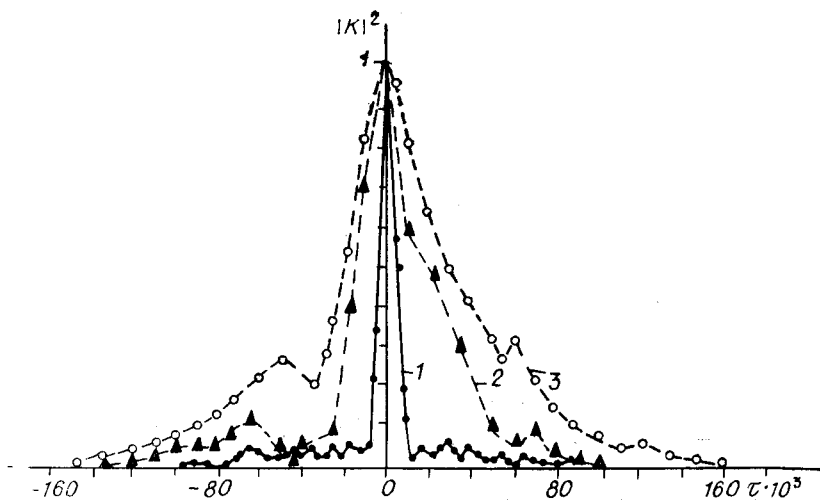
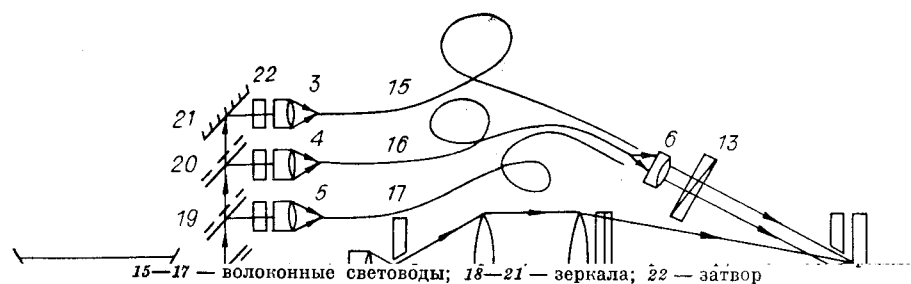


Рис. 1. Зависимость функции автокорреляции излучения после прохождения через ВС с диаметрами сердцевин: 50 (1); 25 (2); 28 (3) мкм

Фаза излучения в пределах спекла будет оставаться постоянной и принимать случайное значение из указанного выше интервала. Например, для волоконных световодов с числовой апертурой  $NA = 0,21$ , диаметром сердцевин 50 мкм при длине волны используемого излучения  $\lambda = 0,63$  мкм средний размер спеклов составит  $\Delta_s \approx 0,32$  мкм.

Таким образом, распространение высококогерентного лазерного излучения по многомодовым волоконным световодам связано с формированием на выходных торцах ВС сложной картины спеклов со случайным распределением фаз, являющейся результатом статистического усреднения амплитудно-фазовых распределений полей отдельных мод. Ввиду малости размеров спеклов излучающий торец ВС можно приближенно представить как набор точечных источников со случайными фазами. В этом смысле многомодовый волоконный световод по своему действию близок к диффузному экрану. Это сходство будет тем ближе, чем большее число мод способно распространяться в ВС. Однако в отличие от диффузного рассеивателя конус, в который происходит излучение волн в свободное пространство, будет в основном определяться числовой апертурой ВС. Кроме того, как известно, волоконный световод оказывает деполаризующее действие на распространяющееся по нему излучение [11].

Для выяснения кодирующих свойств волоконных световодов в работе были экспериментально измерены функции автокорреляции для трех различных типов ВС. На рис. 1 приведены нормированные на максимум зависимости распределения модуля функции АК для кварцевых ВС со ступенчатым профилем распределения показателя преломления с диаметрами сердцевин 50 и 25 мкм (соответственно зависимости 1 и 2), а также для ВС с градиентным профилем показателя преломления с эффективным диаметром 28 мкм (зависимость 3). Здесь  $\tau = x/L$ , где  $L$  — расстояние от выходного торца ВС до линзы,  $x$  — координата в фокальной плоскости фурье-линзы. Сравнение зависимостей показывает, что с ростом диаметра сердцевины ВС ширина корреляционного максимума уменьшается и функция АК приближается к  $\delta$ -функции. Это означает, что корреляционные свойства излучения, прошедшего через волоконные световоды, улучшаются с увеличением диаметра сердцевины ВС, т. е. чем ближе модель излучающего торца волоконного световода оказывается к модели диффузного экрана, что подтверждает сделанные выше выводы. Кроме того, из сравнения зависимостей 2 и 3 видно, что корреляционные свойства излучения возрастают с увеличением количества направляемых волн, поскольку число мод, возбуждаемых в градиентном ВС, как правило, оказывается вдвое меньше, нежели в ВС со ступенчатым профилем. Важным параметром, характеризующим возможности использования кодирующего устройства для обработки информации, является величина отношения боковых выбросов функции АК к величине центрального максимума, которая определяет уровень корреляционного шума, сопровождающего восстанавливаемый сигнал [4]. Проводя сравнение экспериментальных данных, представленных на рис. 1, и расчетов, можно показать, что это отношение хорошо аппроксимируется зависимостью  $\sim 1/\sqrt{N_0}$ , где  $N_0$  — число мод, направляемых в ВС. Так, для используемых в работе ВС с диаметром сердцевин 50 мкм  $NA = 0,21$  и  $\lambda = 0,63$  мкм согласно [9] число направляемых мод равно  $N_0 = 125$ . Это дает значение для отношения  $\sim 0,067$ . Экспериментально измеренное значение относительной величины боковых выбросов  $\sim 0,05$ . Уровень перекрестных помех при записи наложенных голограмм зависит от величины боковых выбросов функции АК. Для используемых в экспериментах волоконных световодов ( $NA = 0,21$ ) максимальное значение отношения величины боковых выбросов функции АК к вели-



чине центрального максимума функции АК  $\sim 0,05$ . Все это свидетельствует о хороших кодирующих свойствах данного типа ВС.

Кодированные при помощи многомодовых ВС опорные световые волны были использованы для записи наложенных фурье-голограмм. Ранее в [8] отмечалось, что спекловая структура фронта опорной волны и неоднородное распределение интенсивности в предметной волне приводят к нелинейности записи голограмм Фурье. В связи с этим для достижения однородного распределения интенсивности объектной волны в плоскости регистрации голограммы использовался метод случайной фазовой маски [1, 6], в качестве которой брался диффузный рассеиватель. Схема экспериментальной установки для записи и восстановления наложенных голограмм Фурье приведена на рис. 2. Для записи использовались информационные страницы емкостью  $10^4$  бит, представляющие собой прозрачные с амплитудным пропусканием, состоящие из черных и светлых квадратов размером  $0,65 \times 0,65$  мм. Запись и восстановление голограмм производилось излучением He-Ne-лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм). Для формирования опорных волн часть излучения отводилась в плечо опорного луча, в котором делилась на три луча, равной интенсивности, и вводилась в три волоконных световода. При помощи затворов волоконные световоды возбуждались поочередно. В экспериментах использовались кварцевые ВС с диаметрами сердцевин и оболочки, соответственно равными 50 и 125 мкм, и числовой апертурой  $NA = 0,21$ . Длина ВС равнялась 100 см. Выходные торцы ВС располагались на расстоянии 500 мкм друг от друга. Излучение из световодов проецировалось в плоскость голограммы объективом. Для устранения деполаризующего действия ВС за объективом помещался поляризатор. С целью обеспечения точного совпадения волновых фронтов опорных волн на стадиях записи и восстановления обработка голограммы производилась непосредственно на установке. Экспозиция каждой наложенной голограммы подбиралась таким образом, чтобы их дифракционная эффективность была практически одинаковой. Запись голограмм осуществлялась на фотопластинках ЛОИ-2. Для увеличения дифракционной эффективности после проявления голограммы отбеливались. Плотность записи информации на каждой из голограмм была близка  $\sim 10^4$  бит/мм<sup>2</sup>. На рис. 3, а — в приведены изображения, восстановленные с наложенных голограмм. Отношение сигнал/шум в восстановленных изображениях было не хуже 4,5, что согласуется с результатами, полученными при измерении корреляционных характеристик излучения из ВС. Некоторое увеличение шумового фона, по-видимому, связано с процессами отбеливания голограмм.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что многомодовые волоконные световоды могут использоваться в качестве устройств кодирования опорных волн при записи наложенных голограмм. Корреляционные свойства

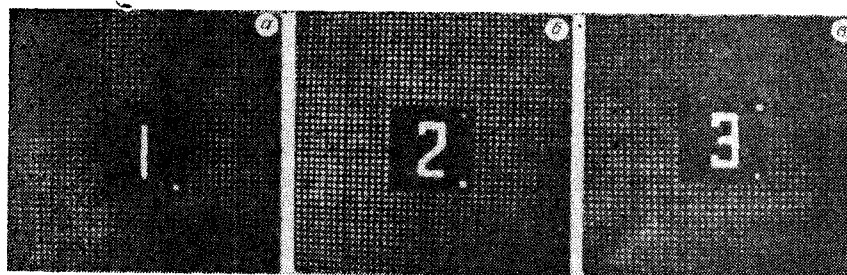


Рис. 3. Фрагменты изображения, восстановленного с наложенных голограмм

излучения, прошедшего через ВС, улучшаются с увеличением диаметра и модового состава волоконных световодов. Полученные данные позволяют создавать голографические устройства хранения информации с высокой плотностью записи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
2. Оптическая голография/Под ред. Г. Колфилда.— М.: Мир, 1982.
3. Микаэлян А. Л., Бобринев В. И. Голографические системы памяти // Оптические методы обработки информации.— Л.: Наука, 1974.
4. Морозов В. П. К теории голограмм с кодированным опорным пучком // Квантовая электрон.— 1977.— 4, № 8.
5. Васильев А. А., Компанец И. Н., Котова С. П., Морозов В. П. Управляемые транспаранты в голографических схемах с кодированным опорным пучком // Автометрия.— 1979.— № 1.
6. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации.— М.: Выш. шк., 1988.
7. Быковский Ю. А., Маковкин А. В., Кульчин Ю. Н. и др. Использование оптических волокон для записи фурье-голограмм с высокой информативной плотностью // Квантовая электрон.— 1978.— 5, № 1.
8. Быковский Ю. А., Кульчин Ю. Н., Смирнов В. Л. Использование оптических волокон типа «Селфок» для записи фурье-голограмм // Оптика и спектроскопия.— 1980.— 48, вып. 1.
9. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов.— М.: Радио и связь, 1987.
10. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М.: Мир, 1982.
11. Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф., Дубровин В. Ф. Микроволноводная оптика и голография.— М.: Наука, 1983.

Поступило в редакцию 19 декабря 1988 г.

УДК 535.361

М. А. НЕДУЖКО, А. Г. УШЕНКО  
(Черновцы)

#### МЕТОД ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ФАЗОВОЙ СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ СКВОЗЬ РАССЕИВАЮЩУЮ СРЕДУ

Настоящее сообщение посвящено разработке поляризационно-фазового метода, повышающего отношение сигнал/шум (ОСШ) в изображении плоских шероховатых объектов, находящихся в мутной среде.

Идея метода состоит в поляризационном выделении информативного сигнала, отраженного объектом путем «подавления» фона с помощью поляризационной системы, размещенной перед приемником излучения. Для экспериментальной реализации данного метода необходимо располагать информацией о поляризационной структуре (азимуте  $\lambda$  и эллиптичности  $\omega$ ) указанных составляющих поля рассеянного излучения. Перспективным в решении этой задачи представляется применение наиболее полной оптической методики, основанной на описании световых полей вектором Стокса; объектам и средам ставятся в соответствие матрицы Мюллера [1]. Показано [2], что такие матрицы для плоских шероховатых объектов и жидких мутных сред (типа взвеси сферических частиц) имеют вид

$$\{F\} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 & 0 \\ f_{21} & f_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Рис. 1 иллюстрирует серию угловых зависимостей матричных элементов  $x_{ik}$  (шероховатая поверхность Ge — «объект») и  $R_{ik}$  (раствор молока в дистиллированной воде — «мутная среда»), измеренных в ситуации, когда угол облучения  $\xi$  равен углу наблюдения  $\xi'$ ; угол рассеяния  $\Theta = \pi 2\xi$ .

Из полученных данных видно, что, несмотря на равнозначную структуру измеренных матриц, угловой ход и относительная величина индикатрис  $x_{ik} = x_{ik}/x_{11}$  и