

При работе фотоприемной линейки в широком спектральном диапазоне на ее выходной сигнал накладываются значительные искажения, связанные с неравномерностью излучения источника света по спектру, а также с неравномерностью спектральной чувствительности фотоячеек, т. е. с непостоянством  $S_\lambda$ . Для определения свободных от этих искажений спектральных характеристик пропускания (или поглощения) процесс измерений приходится усложнять. При этом исследуется спектральный состав как падающего на исследуемый образец излучения  $P_{\text{пад } \lambda}$ , так и прошедшего через него (или отраженного от него)  $P_{\text{пр } \lambda}$ , так как необходимо измерить опорный спектр и вычислить отношение  $T_\lambda = P_{\text{пр } \lambda} / P_{\text{пад } \lambda}$ . Как видно из (1), это отношение равно

$$T_\lambda = (I_{01} - I_{0п}) / (I_{01} - I_c), \quad (2)$$

где  $I_{0п}$  — выходной ток с фотоячеек при освещении фотоприемной линейки опорным спектром;  $I_c$  — выходной ток с фотоячеек при их освещении излучением, прошедшим через исследуемый образец.

Таким образом, измерение спектральных характеристик сводится к измерению и занесению в регистр памяти информации о темновых токах всех фотоячеек. Затем в фотоприемную линейку при отсутствии исследуемого образца вводится опорный спектр излучения источника и вычисляется разность  $I_{01} - I_{0п}$ , которая также запоминается в регистре памяти. Наконец, устанавливается образец, на который проецируется излучение, определяется  $I_{01} - I_c$  и вычисляется  $T_\lambda$ .

В заключение отметим следующее. Так как сдвиговые регистры МДП-фотодиодных линеек позволяют сканировать фотоячейки с частотой 9—10 МГц, то съем сигнала с них осуществляется за десятки микросекунд при числе ячеек 128 и за сотни микросекунд при числе ячеек 1024. Поэтому скорость регистрации спектров определяется в основном необходимым временем накопления и мощностью излучения, падающего на фотоприемную линейку. В автоматизированных спектральных приборах она может достигать нескольких тысяч спектров в секунду. При этом выходные сигналы фотоприемной линейки, адекватные спектру излучения, могут быть обработаны микропроцессором в реальном масштабе времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев С. Ф., Кисловский И. Л., Нагулин Ю. Е. и др. Спектрометр с видикомом для исследования контуров спектральных линий.— Прикл. спектроскопия, 1978, т. XXVIII, вып. 5, с. 912.
2. Horlick G., Coddling E. G. Characteristics of photodiode arrays for spectrochemical measurements.— Appl. Spectroscopy, 1976, v. 30, N 2, p. 113.
3. Каган Ю. Х., Кащеев Э. Л., Кругликов С. В. и др. Самосканируемая МДП-интегральная линейка фотоприемников.— Автометрия, 1984, № 3, с. 50.
4. ГОСТ 181.167-72. Определения характеристик относительной спектральной чувствительности.— Введ. 23.VI.72.
5. Ван де Виле Д. Просветляющие пленки и многослойные структуры.— В кн.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображения/Под ред. П. Песперса и др. М.: Мир, 1979, с. 87.

Поступило в редакцию 24 октября 1985 г.

УДК 621.372.8 : 535.1

А. Я. БАЛАГУРОВ, В. И. ДОЦЕНКО, В. Н. МОРОЗОВ,  
В. И. НАЛИВАЙКО, А. Н. ПУТИЛИН, В. И. СКОБЕЛКИН

(Москва)

#### ВОЛНОВОДНЫЕ ГОЛОГРАММЫ ДВУМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Создание интегрально-оптических (ИО) схем с большой степенью интеграции — важная научная задача. Соединение достижений полупроводниковой технологии с голографическими методами формирования ИО-элементов открывает возможность получения широкого класса специализированных оптических схем [1]. Волноводные голограммы двумерных транспарантов позволяют вводить в ИО-схемы элементы голографической памяти, создавать ИО-процессоры и согласующие устройства для перехода от электронного к оптическому уровню обработки сигнала и обратно.

Обычно при воспроизведении волноводных голограмм образуются два изображения, расположенные симметрично относительно плоскости волновода [2]. При

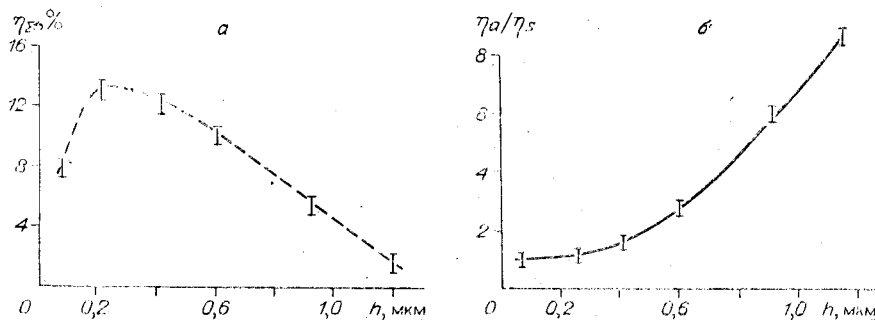


Рис. 1. Зависимость ДЭ волноводных голограмм (а) и отношения интенсивностей изображений (б), выводимых в полупространство над волноводом ( $\eta_a$ ) и через подложку ( $\eta_s$ ), от толщины слоя  $As_2S_3$ .

считывании информации с такой голограммы предпочтительно использовать энергию только одного изображения. В работе [3] отношение интенсивностей этих изображений равнялось  $1/4$ , причем яркое изображение выводилось через подложку, в то время как оптимальным является получение одного изображения в полупространстве над волноводом.

В данной работе исследовано влияние параметров волноводных структур на общую дифракционную эффективность (ДЭ) голограмм, отношение интенсивностей изображений и их качество.

Использовались диффузионные планарные волноводы, изготовленные методом ионного обмена в стекле К-8. Обмен проводился в расплаве  $KNO_3$  с микродобавками  $AgNO_3$ . Изготовленные таким образом волноводы имели от одной до четырех мод.

На поверхность волновода наносились слои  $As_2S_3$ . Напыление проводилось в вакууме  $5 \cdot 10^{-7}$  тор термическим способом. Толщина слоя  $As_2S_3$  составляла 0,1—1,2 мкм. Исследуемые двухслойные волноводы имели затухание не более 4 дБ/см на длине волны 0,63 мкм. Выбор стеклянных диффузионных волноводов для исследования волноводных голограмм был связан с их высоким качеством, но высокий показатель преломления (2,5—2,9) халькогенидных стеклообразных полупроводников, примененных нами в качестве регистрирующей среды (РС) для записи волноводных голограмм, позволяет использовать и волноводы, изготовленные методом диффузии в  $CdS$  или в  $LiNbO_3$ .

Исследование влияния параметров слоя  $As_2S_3$  на ДЭ голограмм проводилось на нулевой моде двухмодовых волноводов. Записывались голограммы плоских волн излучением He—Cd-лазера ( $\lambda = 0,44$  мкм) мощностью 6 мВт и аргонового лазера ( $\lambda = 0,51$  мкм) мощностью 100 мВт. Восстановление голограмм осуществлялось излучением He—Ne-лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм), волноводная мода возбуждалась при помощи призмленного элемента связи с эффективностью 30%. Углы падения опорной и предметной волн на плоскость волновода составляли 65 и 5° соответственно. На рис. 1, а представлена зависимость ДЭ голограмм от толщины слоя  $As_2S_3$ . Рост толщины РС приводит к увеличению угловой селективности голограмм вследствие усиления брегговского резонанса. Однако при использовании двухволновой методики запись — восстановление в нашем случае условия Брегга не выполнялись для восстанавливающего луча и ДЭ с ростом толщины слоя РС падала. При этом отношение интенсивностей пучков, выводимых в пространство над волноводом и в подложку, также изменялось (рис. 1, б). Увеличение доли энергии в пространстве над волноводом с ростом толщины слоя РС связано с перекачкой энергии из диффузионного волновода в слой  $As_2S_3$  [4] и объемными свойствами голограмм [5].

Для получения поверхностно-рельефных голограмм и повышения ДЭ слой  $As_2S_3$  обрабатывался в позитивном и/или негативном травителе. В качестве травителя применялись растворы диметиламина, диэтиламина и едкого калия КОН. В процессе травления, особенно в КОН, на поверхности  $As_2S_3$  происходило образование сильно рассеивающих центров. С целью уменьшения рассеяния в волноводной структуре нами применялись безводные травители, при этом время обработки было достаточным для удаления с поверхности диффузионного волновода необлученных участков  $As_2S_3$ . Это позволило обойтись без применения масок при напылении слоев РС в отличие от данных в работе [3].

В результате применения процесса травления существенно повышалась ДЭ голограмм (рис. 2, а). Максимальная ДЭ составляла 90%, при этом в полупространство над волноводом выводилось 75% излучения, распространявшегося по волноводу. Двухмодовый и трехмодовый волноводы, имевшие экспоненциальный профиль показателя преломления, обладали более слабыми направляющими свойствами по сравнению с волноводами ступенчатого профиля [6]. При этом степень локализации мод убывала с увеличением номера моды и приводила к падению ДЭ (кривые 1 и 2) для высших мод [7]. Противоположный характер поведения ДЭ для четырехмодового волновода (кривая 3) можно объяснить иным, близким к парабо-

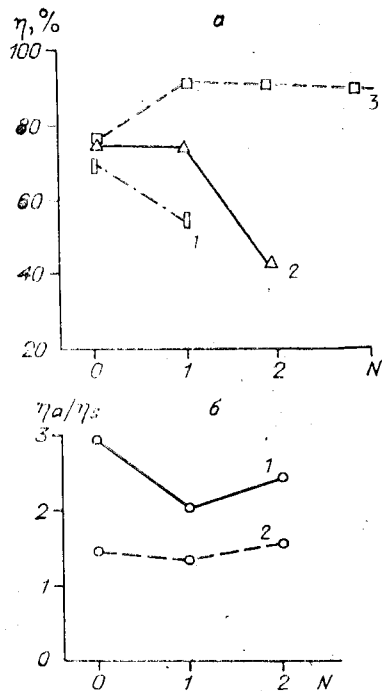


Рис. 2. Зависимость ДЭ рельефных волноводных голограмм (а) для двух (1)-, трех (2)- и четырехмодового (3) волноводов и отношения интенсивностей изображений (б) при согласованном (1) и обратном (2) направлениях падения на область голограммы.

падения волноводной моды на решетку. Применение асимметричного падения опорного и предметного пучков при записи голограмм приводило к образованию несинусоидального рельефа на поверхности РС и, как следствие, к перераспределению энергии в изображениях [8].

Схема записи голограмм двумерных транспарантов показана на рис. 3. Введение расфокусировки  $\Delta f$  позволило повысить ДЭ примерно на порядок по сравнению с записью фурье-голограмм без расфокусировки. В качестве транспарантов использовались стандартная мира, «звезда Сименса» (для исследования АЧХ), бинарные и полутонные изображения. При записи плоских волн использование контрастного травителя обеспечивало получение высоких значений ДЭ, однако при восстановлении голограмм двумерных объектов в изображении возрастали спекл-шум и интермодуляционные искажения (рис. 4, а). Выбор линейного режима травления позволил значительно уменьшить уровень шумов (рис. 4, б). Максимальная ДЭ при восстановлении двумерной информации ТЕ-волноводной модой составляла 67%. Отношение сигнал/шум определялось с помощью калиброванного клина с переменным пропусканием ослаблением пучка света от одного бита информации до уровня фоновой засветки. При максимальной ДЭ отношение сигнал/шум составляло 10 дБ, при снижении величины ДЭ до 20% отношение сигнал/шум возрастало до 20 дБ.

Информационная емкость голограмм определялась по максимальному разрешению в изображении стандартной миры по критерию Фуко [9]. Волноводные голограммы обладали информационной емкостью  $5 \times 10^4$  бит/мм<sup>2</sup> при максимальной теоретической —  $10^5$  бит/мм<sup>2</sup>.

На амплитудно-частотной характеристике волноводных голограмм наблюдался спад на высоких частотах, который можно объяснить уменьшением интенсивности волноводной моды по мере вывода излучения из волновода. В результате вклад в изображение от разных участков голограммы неодинаков и один из краев изображения получается более ярким. Для голограммы с ДЭ, равной 55%, изменение яркости составило 3 дБ.

Отмеченные особенности воспроизведения голограмм волноводной модой не являются сдерживающим фактором, поскольку они могут быть сведены к минимуму путем оптимизации процессов записи и проявления голограмм. Высокие значения ДЭ волноводных голограмм, достигающие 90% при записи плоских волн, а также возможность вывода до 70% излучения в одно изображение при записи

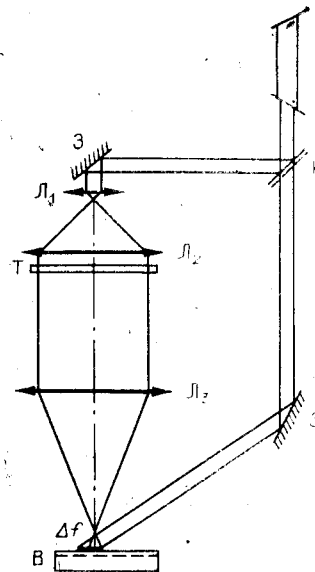


Рис. 3. Схема записи волноводных голограмм двумерных объектов: З — зеркала; К — светоделительный кубик; Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub> — линзы коллиматора; Л<sub>3</sub> — фурье-линза; Т — транспарант; В — волновод.

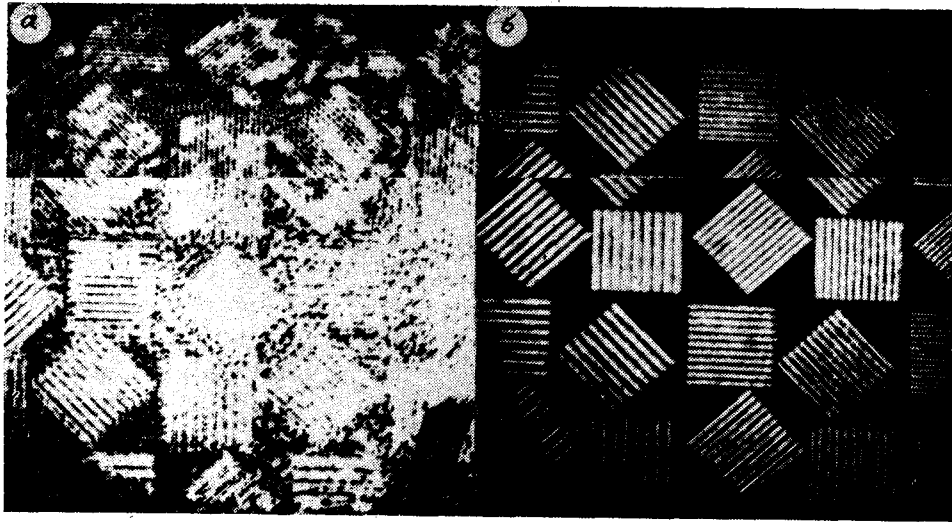


Рис. 4. Фрагмент восстановленного изображения:  
 а — контрастное, б — линейное травление.

двумерной информации позволят создать на основе волноводных голограмм компактные согласующие устройства и элементы голографической памяти для интегрально-оптических схем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В. Н., Плетнев В. А., Попов Ю. М., Смирнов В. Л. Интегрально-оптические элементы и устройства.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1980, т. 44, № 8, с. 1651.
2. Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф., Дубровин В. Н. Микроволновая оптика и голография.— М.: Наука, 1983, с. 195.
3. Sahara T., Nishihara H., Koyama J. High efficiency relief — type waveguide holograms.— Trans. IECE of Japan, 1978, v. E-61, p. 167.
4. Noda J., Zembutsu S., Fukunishi S., Uchida N. Strip — loaded waveguide formed in a graded-index LiNbO<sub>3</sub> planar waveguide.— Appl. Opt., 1978, v. 17, N 12, p. 1953.
5. Андриеш А. М., Быковский Ю. А., Коломейко Э. П. и др. Волноводные структуры и функциональные элементы интегрально-оптических схем на основе объемных голографических решеток в тонких пленках As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>.— Квант. электроника, 1977, т. 4, с. 629.
6. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов.— М.: Мир, 1984.
7. Прохоров А. М., Спихальский А. А., Сычугов В. А. Изучение E- и H-волн на гофрированном участке диффузионного волновода.— Квант. электроника, 1976, т. 3, с. 2227.
8. Yamamoto Y., Kamiya T., Yunai H. Improved coupled mode analysis of corrugated waveguides and lasers.— IEEE. J. of Quant. Electr., 1978, v. QE-14, N 4, p. 245.
9. Вычислительная оптика/Под ред. М. М. Русинова.— М.: Машиностроение, 1984, с. 415.

Поступило в редакцию 8 июля 1985 г.