

В. Г. ВАСИЛЬЕВ, В. М. ДЫТЫНКО, В. П. ЛЕБЕДЕНКО,  
Е. С. ФЕДЯКИНА, Ю. И. ХАБАРОВ  
(Москва)

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗУ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ

**Введение.** Одной из важных прикладных проблем голографии является создание голографических ЗУ (ГЗУ), открывающее новые перспективы развития вычислительной техники. Как уже отмечалось, особый интерес вызывает возможность применения в ГЗУ полупроводниковых лазеров [1, 2]. Полупроводниковые лазеры в первую очередь находят применение при считывании информации, использование же таких лазеров для голографической записи цифровой информации сегодня сдерживается специфичностью их излучательных характеристик, а также отсутствием серийно выпускаемых носителей с высокой экспозиционной чувствительностью в инфракрасной области спектра [3, 4]. Так, например, время записи голограммы на фотопластинки И-880 Г составляет несколько десятков секунд [5]. Достигнутые в настоящее время результаты по записи голограмм с помощью инжекционных полупроводниковых лазеров не позволяют пока выйти за рамки физических исследований [6]. В то же время найдены простые и эффективные методы устранения аберраций изображений, возникающих при использовании источников с различными длинами волн излучения на стадиях записи и считывания. В связи с этим использование полупроводниковых лазеров наиболее целесообразно в трактах считывания голограмм, запись которых осуществляется газовым, например He—Ne, лазером.

В данной работе представлены результаты исследований характеристик действительных изображений страниц бинарной информации, восстановленных с голограмм, записанных He—Ne-лазером по схеме Фраунгофера. Основная цель состоит в сравнении характеристик изображений, восстановленных излучением полупроводниковых и газовых лазеров. Полученные результаты могут быть полезны для количественной оценки достоверности считывания, обеспечиваемой голографическими ЗУ [7—9].

**Характеристики изображений.** Для исследования соотношения сигнал/шум\*, дисперсии и максимального разброса сигналов оптических «1» и «0», образующих страницу бинарной информации, использовался метод сканирования изображения фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Точность установки ФЭУ в каждое дискретное положение, соответствующее оптической «1» или «0», составляла  $\pm 5$  мкм. Для измерения энергии в каждом элементе изображения перед фотокатодом ФЭУ устанавливалась диафрагма. Диаметр диафрагмы был согласован с размерами элемента транспаранта данных, записанного на голограммах, и составлял 0,1 мм. Линейность регистрации интенсивностей световых потоков контролировалась посредством калиброванных фильтров. Погрешность измерения интенсивности световых потоков оптических «1» и «0» не превышала 10%.

По результатам измерений сигналов оптических «1» и «0» вычислялись следующие параметры: соотношение сигнал/шум ( $S/N$ ) (среднее, минимальное и максимальное значения); среднеквадратичные отклонения сигналов оптических «1» и «0» ( $\sigma_1$  и  $\sigma_0$ ); максимальный разброс сигналов оптических «1» и «0» ( $\delta_1$  и  $\delta_0$ ) — рассчитываемые по формулам

\* Строго говоря, в данной работе идет речь о соотношении сигнал/помеха (или контрасте), так как по определению [10]  $(S/N)_i = \langle U_i \rangle / \sigma_i$ . (Прим. ред.)

Таблица 1

Среднее значение параметра	37	12	134	26	27	$\pm 76$	$\pm 65$
----------------------------	----	----	-----	----	----	----------	----------

Таблица 2

Номер голограммы	$\langle \frac{C}{\Pi} \rangle$	$\min \frac{C}{\Pi}$	$\max \frac{C}{\Pi}$	$\sigma_1, \%$	$\sigma_0, \%$	$\delta_1, \%$	$\delta_0, \%$
1	24	6,7	90	24	36	$\pm 71$	$\pm 86$
2	27	10	107	28	19	$\pm 81$	$\pm 46$
3	22	5,7	70	25	29	$\pm 63$	$\pm 69$
4	26	7,5	150	29	28	$\pm 108$	$\pm 69$
Среднее значение параметра	25	7,5	104	27	28	$\pm 81$	$\pm 67$

$$\langle C/\Pi \rangle = \langle U_1 \rangle / \langle U_0 \rangle,$$

$$\delta_1 = \pm [(U_{1 \max} - U_{1 \min}) / 2 \langle U_1 \rangle],$$

$$\delta_0 = \pm [(U_{0 \max} - U_{0 \min}) / 2 \langle U_0 \rangle],$$

где  $U_{1 \max}$ ,  $U_{1 \min}$ ,  $\langle U_1 \rangle$  — максимальное, минимальное и среднее значения сигналов оптических «1» в изображении, аналогичные обозначения — для сигналов оптических нулей.

В табл. 1, 2 приведены параметры изображений, восстановленных с голограмм газовым лазером фирмы «Spectra Physics» (модель 120) и полупроводниковым лазерным диодом 32ДЛ-103, излучение которого коллимировалось линзой с фокусным расстоянием  $\sim 7$  мм. Исследуемые голограммы диаметром 1 мм записаны на фотопластинках «Микрат-ВРЛ» He—Ne-лазером ЛГ-38.

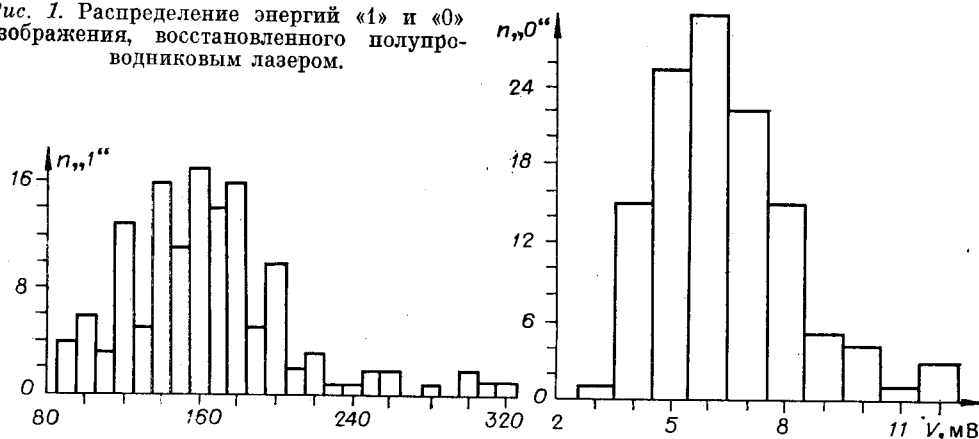
На голограммах регистрировались изображения плоских транспарантов, содержащих  $16 \times 16$  элементов размером  $0,1 \times 0,1$  мм<sup>2</sup>, расположенных с шагом 0,25 мм. Из сравнения данных табл. 1 и 2 следует, что изображения, восстановленные излучением полупроводникового лазера, незначительно уступают по качеству изображениям, восстановленным He—Ne-лазером. Так,  $C/\Pi$  при использовании полупроводникового лазера составляет  $\sim 70\%$  от  $C/\Pi$ , обеспечиваемого газовым лазером, а различие  $\sigma_1$ ,  $\sigma_0$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_0$  не превышает 5%. Такое незначительное отличие параметров изображений, восстановленных газовым и инжекционным лазерами, объясняется тем, что используемый для считывания голограмм полупроводниковый лазерный диод имел достаточно узкий спектр излучения  $\sim 1$  нм, а угловой размер его тела свечения не превышал  $2 \cdot 10^{-3}$  рад.

На рис. 1 представлены типичные диаграммы распределения сигналов оптических «1» и «0» страницы информации по уровням энергии при восстановлении голограммы инжекционным лазером.

Таблица 3

Тип лазера	$\langle \frac{C}{\Pi} \rangle$	$\min \frac{C}{\Pi}$	$\max \frac{C}{\Pi}$	$\sigma_1, \%$	$\sigma_0, \%$	$\delta_1, \%$	$\delta_0, \%$
Газовый	20	2	126	29	37	$\pm 117$	$\pm 102$
Полупроводниковый	14	2	56	31	36	$\pm 74$	$\pm 100$

Рис. 1. Распределение энергий «1» и «0» изображения, восстановленного полупроводниковым лазером.



В табл. 3 приведены результаты измерений параметров изображений, восстановленных с голограмм, записанных на голографической фотопленке ФП-ГВ2. Информационная емкость голограммы диаметром 1 мм равна  $32 \times 32$  бит.

Так же как и для голограмм, записанных на фотопластинках, среднее соотношение сигнал/шум для изображений, восстановленных полупроводниковым лазером, составляет  $\sim 70\%$  от среднего значения С/Ш при восстановлении He—Ne-лазером. Из сравнения данных табл. 1—3 следует, что для голограмм, записанных на фотопленке ФП-ГВ2, характерен более высокий уровень шума, причем минимальное значение С/Ш в несколько раз меньше, чем для голограмм, записанных на фотопластинках, а максимальный разброс сигналов оптических «1» и «0» увеличивается на 35%.

Это связано прежде всего с увеличением плотности записи информации на фотопленке, а также с большей неоднородностью эмульсионного слоя фотопленки по сравнению с фотопластинкой.

**Влияние основы фотопленки и оптического компенсатора на характеристики изображений.** Исследование распределения интенсивности оптических «1» и «0» по полю изображений показало, что оно носит случайный характер. Несмотря на то что на всех голограммах записывался один и тот же транспарант данных, а условия записи голограмм и последующей обработки носителя оставались неизменными, распределения интенсивностей как оптических «1», так и оптических «0» по полю изображения индивидуальны для каждой голограммы.

Этот результат потребовал выяснения влияния рассеяния когерентного света в материале основы пленки ФП-ГВ2 на соотношение сигнал/шум и другие параметры восстановленных изображений. Для этого непосредственно перед носителем голограмм устанавливалась незасвеченная обработанная фотопленка указанного типа, а прошедший через нее считывающий пучок использовался для восстановления голограмм.

Из рис. 2, где приведено распределение сигналов оптических «1» в одной строке изображения, видно, что основа фотопленки ФП-ГВ2 не влияет на закономерности распределения интенсивностей оптических «1» по полю изображения, а лишь уменьшает амплитуды регистрируемых сигналов. Рассчитанный по данным измерений средний коэффициент поглощения основы фотопленки ФП-ГВ2 составляет 0,49. Аналогичные результаты получены и при размещении фотопленки непосредствен-

Таблица 4

Условия восстановления	$\langle \frac{C}{\text{Ш}} \rangle$	$\min \frac{C}{\text{Ш}}$	$\max \frac{C}{\text{Ш}}$	$\sigma_1, \%$	$\sigma_0, \%$	$\delta_1, \%$	$\delta_0, \%$
С компенсатором	25	2,6	85	33	22	$\pm 92$	$\pm 28$
Без компенсатора	38	8,6	157	32	23	$\pm 104$	$\pm 39$

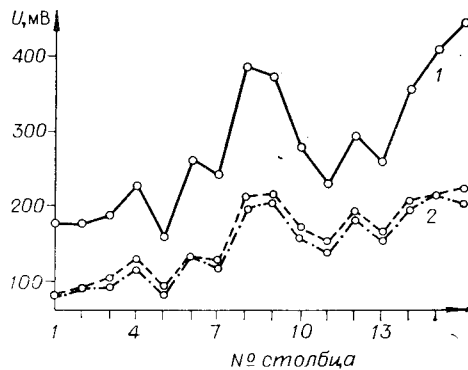


Рис. 2. Изменение исходного распределения интенсивностей «1» в строке изображения (1) при размещении основы пленки перед носителем голограмм и за носителем (2).

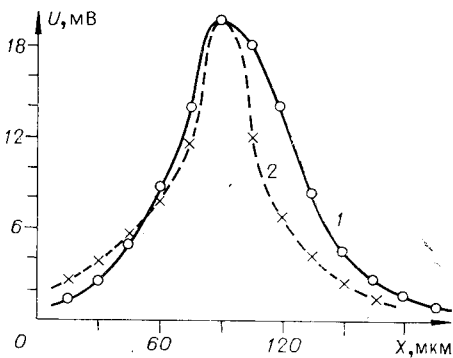


Рис. 3. Распределение энергии в изображении «1» в направлении, перпендикулярном (кривая 1) и параллельном (2) плоскости  $p$ - $n$ -перехода инжекционного лазера.

но за носителем голограмм. Случайный характер распределения интенсивностей оптических «1» и «0» по полю изображения обусловлен, по-видимому, неоднородностями и дефектами фоточувствительного слоя носителя голограмм.

Для компенсации aberrаций восстановленных изображений (в основном дисторсии [11]), вызванных двухволновым режимом записи-считывания, целесообразно использовать компенсатор из оптического стекла с показателем преломления  $n = \lambda_2/\lambda_1$ , где  $\lambda_1$  — длина волны при записи,  $\lambda_2$  — при восстановлении. Хотя конструкция компенсатора исключает попадание не протифрагировавшего на голограмме пучка на участок, где формируется восстановленное изображение, тем не менее, рассеяние, френелевские отражения и поглощение излучения в материале компенсатора влияют на характеристики изображения. Для оценки этого влияния измерялись характеристики изображений, восстановленных с одной и той же голограммы без компенсатора и при введении компенсатора, который устанавливался между носителем голограмм и ФЭУ. В эксперименте использовался компенсатор из оптического стекла марки К-2.

Результаты измерений, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что оптический компенсатор дисторсии уменьшает среднее отношение сигнал/шум на 35% и не оказывает существенного влияния на дисперсию сигналов оптических «1» и «0». Компенсатор не изменяет также характера распределения интенсивностей оптических «1» по полю изображения.

**Элементы изображения.** К числу важных характеристик восстановленных изображений относятся также размеры элементов (точек) изображения и распределение интенсивности излучения в элементах изображения. Для исследования распределения интенсивности излучения в битах использовался ФЭУ, перед чувствительной площадкой которого была установлена диафрагма диаметром 12 мкм. На рис. 3 представлены графики наиболее типичных распределений интенсивности излучения в точках изображений, восстановленных серийным инжекционным полупроводниковым лазером 32ДЛ-103. Приведенные кривые 1 и 2 распределения интенсивности получены при сканировании элементов изображения соответственно в направлениях, перпендикулярном плоскости  $p$ - $n$ -перехода лазера и параллельном этой плоскости. Из графиков следует, что горизонтальный и вертикальный размеры элемента изображения составляют  $\sim 140$  мкм по уровню 0,1, что хорошо согласуется с расчетными данными, учитывающими уширение битов за счет дифракции, ширины спектра излучения и протяженности тела свечения считывающего источника.

Таким образом, достигнутые характеристики восстановленных изображений подтверждают целесообразность использования инжекционных

полупроводниковых лазеров в малогабаритных ГЗУ для хранения и считывания цифровой информации.

Авторы выражают благодарность Е. Ф. Пену за полезные обсуждения результатов работы, а также В. В. Карманову за большую помощь в проведении экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г., Никитин В. В., Самойлов В. Д., Семенов Г. И. Восстановление голограмм с помощью инжекционных лазеров.— В кн.: Оптические методы обработки информации. Л.: Наука, 1974.
2. Бобринев В. И. и др. Экспериментальные исследования голографического ЗУ на инжекционных лазерах.— Автометрия, 1977, № 5.
3. Калашников С. П., Климов И. И., Никитин В. В., Семенов Г. И. Запись фурье-голограмм излучением импульсных полупроводниковых лазеров.— Квант. электроника, 1977, т. 4, № 8.
4. Воробьев А. В. и др. Запись голограммы излучением полупроводникового лазера с голографическим селектором.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 12.
5. Калашников С. П. Исследование по записи и восстановлению фурье-голограмм излучением инжекционных лазеров: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук.— М.: ФИАН СССР, 1982.
6. Калашников С. П. и др. Запись и считывание информации излучением полупроводниковых лазеров для голографических ЗУ.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 8.
7. Пен Е. Ф. Исследование качества записи и воспроизведения изображений страниц двоичной информации в голографических ЗУ (ГЗУ).— В кн.: Тезисы докл. I Всесоюз. конф. по радиооптике. Фрунзе: ФПИ, 1981.
8. Бутт В. Е. и др. Фотоматричная система для исследования изображений страниц информации в голограммных ЗУ.— Там же.
9. Аксельрод А. А. и др. Исследование надежности считывания информации опто-электронным каналом ГЗУ.— Квант. электроника, 1978, т. 5, № 5.
10. Троицкий И. И., Устинов И. Д. Статистическая теория голографии.— М.: Радио и связь, 1981.
11. Meier R. W. Magnification and third-order aberrations in holography.— JOSA, 1965, vol. 55, N 8, p. 987—992.

*Поступила в редакцию 23 марта 1983 г.*

УДК 621.3.049.77.002 : 776

**В. Б. ГУРСКИЙ, Р. Е. ПЯТЕЦКИЙ**

*(Минск)*

### **ПОЛУЧЕНИЕ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

Основной тенденцией развития микроэлектроники является уменьшение размера минимального элемента топологии интегральных схем (ИС), ведущее к увеличению быстродействия, снижению рассеиваемой мощности, более плотной упаковке и в конечном итоге — к более высокому уровню интеграции изделий электронной промышленности [1]. Развитие микроэлектроники выдвигает на первый план совершенствование литографии. Задача настоящего времени — получение воспроизводимых элементов субмикронных размеров.

Как известно, литографический процесс принято подразделять на две стадии: 1) генерирование в резисте топологического рисунка ИС, который состоит из бинарных элементов с линейными границами; 2) перенос этого рисунка в лежащую под резистом подложку.

В данной работе на основе скалярной теории дифракции рассматриваются вопросы, связанные с первой стадией литографии, осуществляемой в когерентном свете.