

ния уголкового призмы и турбулентностью воздуха, поскольку измерения проводились в обычном подвальном помещении.

Результаты работы могут быть полезны для разработчиков оптических схем лазерных интерферометров различных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленкова Г. А. Особенности интерферометров перемещений с обычными и лазерными источниками излучения.— *Автометрия*, 1972, № 5.
2. Шур В. Л., Эцин И. Ш. О влиянии расходимости пучка лазера на точность измерений в двухлучевом интерферометре.— *Автометрия*, 1976, № 3.
3. Когельник, Ли. Резонаторы и световые пучки лазеров.— *ТИИЭР*, 1966, т. 54, № 10.
4. Коронкевич В. П., Ленкова Г. А. Лазерный интерферометр для измерения длины.— *Автометрия*, 1971, № 1.
5. Ведерников В. М. и др. Устройство для измерения линейных перемещений. (Автор. свид-во № 586323.) — *БИ*, 1977, № 48.

Поступила в редакцию 2 марта 1979 г.

УДК 681.327.535

А. А. ТИТОВ

(Москва)

ЗАПИСЬ ОДНОМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ НА ПОДВИЖНЫЙ НОСИТЕЛЬ

Существенное увеличение скорости обмена данными в запоминающих устройствах можно ожидать при использовании в них метода одномерной голографии. В экспериментальных голографических запоминающих устройствах (ГЗУ) достигнута скорость обмена данными ~750 Мбит/с [1, 2]. В работе [3] рассмотрены вопросы записи и воспроизведения одномерных голограмм на неподвижный носитель. Вопросы же записи одномерных голограмм на движущийся носитель исследованы еще недостаточно. В частности, отсутствуют аналитические выражения для расчета полосы пропускания ГЗУ, что весьма важно для определения пропускной способности устройства, нет методики расчета основных параметров ГЗУ в динамическом режиме.

Рассмотрим процесс записи голограмм на подвижный носитель. Положим, что при записи и воспроизведении голограмм носитель движется в направлении y , со скоростями V_s и V_v соответственно, а энергия излучения лазера меняется скачком. Определим распределение энергии на подвижном носителе при записи скачка интенсивности лазерного излучения. Для этого проинтегрируем полученное в работе [3] выражение для интенсивности луча в плоскости фокусировки объектива записи. Тогда после некоторых преобразований для линейной регистрирующей среды получим

$$W(U) = W_m \Phi(U), \quad (1)$$

где

$$W_m = W_0 \left[1 + \frac{VL}{N(1+L)} \sum_{n=1}^N \{ \exp(i\varphi_n - 2\pi i \xi \Delta n - 2\pi i \xi x_{оп}) + \right. \\ \left. + \exp(-i\varphi_n + 2\pi i \xi \Delta n + 2\pi i \xi x_{оп}) \} \right] \exp - \pi l^2 \xi^2.$$

$$\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U \exp -\frac{U^2}{2} dU$$
 — интеграл вероятности, $W_0 = R^2(1+L)\lambda f / \sqrt{2}V_3c$, $U = \sqrt{2\pi}(cV_3t/\lambda f)$, l и c — размеры светоклапанных элементов управляемого транспаранта, Δ — шаг между элементами управляемого транспаранта, R^2 , A^2 — интенсивность опорного и объектного лучей соответственно, N — количество светоклапанных элементов управляемого транспаранта, $L = NA^2/R^2$ — отношение интенсивностей объектного и опорного лучей, V_3 — скорость движения носителя при записи голограмм, f — фокусное расстояние объектива записи, λ — длина волны излучения лазера, φ_n — случайная фаза, $\eta = y_r/\lambda f$ — пространственные частоты в плоскости голограммы, $\xi = x_r/\lambda f$, а x_r, y_r — координаты в плоскости голограммы.

Длительность переходного процесса можно определить из выражения (1), учитывая, что интеграл вероятности достигает 95% от максимума при $U = 2$. Тогда $t_n = \sqrt{2/\pi}(\lambda f/cV_3)$. Для определения частотной характеристики носителя удобно приближенно заменить интеграл вероятностей функцией

$$1 - e^{-1/\tau_n},$$

где $\tau_n = t_n/3 = (1/3)\sqrt{2/\pi}(\lambda f/cV_3)$ — постоянная времени носителя записи.

Следовательно, передаточная функция носителя при записи информации приближенно описывается апериодическим звеном. Реакцию носителя на импульс лазерного излучения длительностью t_n можно найти как разность двух скачков интенсивности лазерного излучения, используя выражение (1):

$$W = W_m [\Phi(U) - \Phi(U - U_{t_n})], \quad (2)$$

$$U_{t_n} = \sqrt{2\pi}(cV_3t_n/\lambda f).$$

Из выражения (2) находится размер голограммы при записи на подвижный носитель в предположении, что действующая апертура голограммы согласно [4] вычисляется на уровне e^{-2} . При этом амплитуда достигает 95% от максимума, если $U_{t_n} = 2$; в случае когда $U_{t_n} < 2$, амплитуда будет уменьшаться. Поэтому получим размер голограммы при $U_{t_n} = 2$. График зависимости выражения (2) от U приведен на рисунке. Определяя из графика U , будем иметь

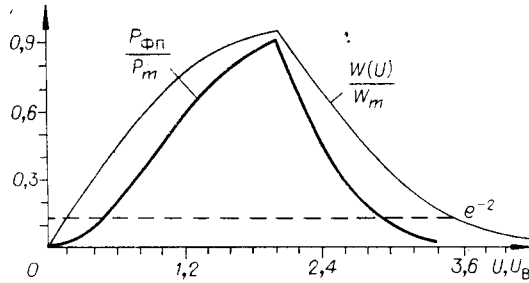
$$y_r = 1,35(\lambda f/c). \quad (3)$$

Для нахождения интенсивности света в восстановленном изображении при освещении голограммы опорным лучом умножим выражение (2) на выражение для амплитуды $A_{оп}$ опорного луча [3] и на чувствительность носителя записи. Применив к произведению обратное преобразование Фурье и ограничившись действительной частью восстановленного изображения, получим

$$J_{вых} = |\mathcal{F}^{-1}[SW_B A_{оп}]|^2 = |\mathcal{F}^{-1}\{W_m[\Phi(U - U_B) - \Phi(U - U_{t_n} + U_B)]\} \times SR \exp -\frac{U^2}{2} \exp -\frac{\pi l^2 \xi^2}{2} \exp 2\pi i \xi x_{оп}}|^2 = J_m [\Phi(U_B^*) - \Phi(U_B^* - U_{t_n}^*)]^2. \quad (4)$$

$$\text{Здесь } J_m = \frac{4W_0^2 L R^2 S^2}{9N^2(1+L)^2} \left/ \sum_{n=1}^N \exp \left| i\varphi_n - \left(\frac{2\pi(x + \Delta n)}{3l^2} - \frac{2}{3} \frac{\pi y^2}{c^2} \right) \right|^2 \right.,$$

S — чувствительность носителя записи, $U_B = \sqrt{2\pi}(cV_3t/\lambda f)$; $U_B^* = \sqrt{2\pi/3} \times (cV_3t_n/\lambda f)$, $U_{t_n}^* = \sqrt{2\pi/3}(cV_3t_n/\lambda f)$, а \mathcal{F}^{-1} — символ обратного преобразования Фурье.



Зависимости мощности сигнала на фотоприемнике $P_{\text{ФП}}/P_m$ и распределения энергии $W(U)/W_m$ по носителю от перемещения носителя при $U_{t_n} = 2$.

Мощность сигнала на фотоприемнике можно определить путем интегрирования выражения (4) по площади фотоприемника.

После некоторого преобразования

$$P_{\text{ФП}} = \frac{3}{2\pi} J_m l c \int_0^{V_m} dV \int_0^{\varphi_m} \exp - \frac{V^2 + \varphi^2}{2} d\varphi [\Phi(U_B^*) - \Phi(U_B^* - U_{t_n}^*)]^2 = P_m [\Phi(U_B^*) - \Phi(U_B^* - U_{t_n}^*)], \quad (5)$$

где $P_m = \frac{3}{2} \varphi_m l c \int_0^{V_m} dV \int_0^{\varphi_m} \exp - \frac{V^2 + \varphi^2}{2} d\varphi$, $V = (J/c) \sqrt{8\pi/3}$, $\varphi = (x/l) \sqrt{8\pi/3}$, $V_m = (l_{\text{ФП}}/2l) \sqrt{8\pi/3}$, $\varphi_m = (c_{\text{ФП}}/2c) \sqrt{8\pi/3}$, а $l_{\text{ФП}}$ и $c_{\text{ФП}}$ — размеры элемента фотоприемной матрицы. Выражение для P_m идентично выражению, полученному в работе [3] для неподвижного носителя записи. На рисунке построен график зависимости $P_{\text{ФП}}/P_m$ и $W(U)/W_m$ от U_B^* и U при $U_{t_n}^* = 2$. Длительность импульса при воспроизведении на уровне 0,1 от амплитуды равна

$$t_b = 1,78\lambda f/cV_b.$$

Зная размеры голограммы и длительности импульсов записи и считывания, можно определить скважность импульсов при записи и воспроизведении информации, учитывая, что для получения достаточно большого отношения сигнал/шум шаг между голограммами может быть в пределах (1,2—1,4) y_r [3]. Тогда, принимая во внимание выражения (3) и (5), получим, что скважность при записи $Q_s = 2 - 2,37$. Скважность при воспроизведении $Q_b = 1,6 - 1,87$. Следовательно, при воспроизведении скважность уменьшается, что обусловлено увеличением длительности импульса t_b по сравнению с t_n . Полученное выражение для постоянной времени носителя не характеризует влияния чувствительности носителя, мощности излучения лазера, дифракционной эффективности на частотные свойства носителя, хотя как это будет показано далее, это влияние является преобладающим. Выразим t_n через указанные выше параметры. Для этого определим дифракционную эффективность голограммы. Интенсивность света в восстановленном изображении сразу за голограммой

$$J_r = |WSA_{\text{оп}}|^2 = \frac{W_0^2 L R^2 S^2}{(1+L)^2} [\Phi(U) - \Phi(U - U_{t_n})]^2 \exp - (U - U_{t_n})^2 \exp - 3\pi l^2 \xi^2. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что апертура восстановленной из голограммы волны будет

$$\begin{aligned} y_b &= 1,8\lambda f/\sqrt{\pi}c, \\ x_b &= 1,68\lambda f/\sqrt{\pi}l, \\ S_b &= x_b y_b = 0,95(\lambda^2 f^2/cl). \end{aligned}$$

Мощность в восстановленном изображении найдем, умножив амплитуду выражения (6) на S_v . Тогда

$$P_v = \frac{0,95S^2W_0^2LR^2\lambda^2f^2}{(1-L)^2 cl}.$$

Аналогичным образом находится апертура опорного луча. В таком случае для мощности опорного луча будем иметь

$$P_{оп} = 2,55R^2(\lambda^2f^2/cl).$$

Дифракционную эффективность определим как отношение мощности в восстановленном изображении к мощности опорного луча. Получим

$$\eta_d = \frac{P_v}{P_{оп}} \frac{S^2W_0^2}{2,7} \frac{L}{(1+L)^2}. \quad (7)$$

Положим, что пропускание носителя описывается линейной характеристикой следующего типа [4]:

$$\Psi_n = \Psi_{но} - SW, \quad (8)$$

где $\Psi_{но}$ — пропускание неэкспонированного носителя, $S = \Psi_{но}/W_{max}$, W_{max} — максимальное значение энергии, при котором $\Psi_n = 0$. Заменяя в выражении (7) S на $\Psi_{но}/W_{max}$, найдем

$$\eta_d = \frac{1}{2,7} \frac{\Psi_{но}^2 W_0^2}{W_{max}^2} \frac{L}{(1+L)^2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно определить дифракционную эффективность для одномерных голограмм. Например, полагая $W_0/W_{max} = 0,5$, $\Psi_{но} = 1$, $L = 1$ (на середине участка характеристики), будем иметь $\eta_d = 2,3\%$ (для амплитудных голограмм). Аналогичный результат получен для двумерных голограмм в работе [6]. С учетом выражения (7)

$$\tau_n = 0,6\sqrt{\eta_d(1+L)}/SJ_n\sqrt{L}, \quad (10)$$

где $J_n = R^2(1+L)$ — интенсивность луча в плоскости голограммы. Ее можно выразить через мощность лазера

$$J_n = P_n \eta_n P_s / N \quad (11)$$

(P_s — плотность записи, P_n — мощность лазера, η_n — коэффициент потерь в оптической системе). Преобразуем (10) с учетом выражения (11), в результате будем иметь

$$\tau_n = 0,6\sqrt{\eta_d(1+L)N}/SP_n\eta_n P_s. \quad (12)$$

Максимально возможную мощность лазера P_n в выражении (12) определим из условия, что максимальная энергия при записи голограммы не должна превосходить величины, полученной из выражения (8) при $\Psi_n = 0$, т. е. $W_{max} \leq \Psi_{но}/S$. Это условие следует из принятого допущения о линейной зависимости пропускания от энергии в определенном диапазоне. Тогда с учетом выражений (1) и (2) при $U = U_{тн} = 2$ и $W_{max} \leq \Psi_{но}/S$

$$P_{nmax} \leq 0,95 \frac{\Psi_{но}}{S} \frac{N}{P_s} \frac{R^2(1+L)}{\eta_n W_m}.$$

Найдем τ_n для некоторых носителей записи. Для одномерных ГЗУ $P_s = 2 \cdot 10^4$ бит/мм², $\eta_n = 0,02$, $N = 100$ [1, 2], $\eta_d = 2,3\%$, $L = 1$. Применяя аргоновый лазер мощностью 1 Вт, $\lambda = 0,488$ мкм, получим $\tau_n = 150$ нс для фототермопластика, $\tau_n = 15$ мкс для оптических фотохромных материалов.

Определим передаточные характеристики остальных узлов ГЗУ: модулятора, матрицы фотоприемников, управляемого транспаранта. Как показано в работах [7—9], передаточные характеристики электрооптического модулятора и фотоприемников, работающих в режиме без накопления заряда, можно приближенно представить аperiодическими звеньями с постоянными времени, равными соответственно $\tau_m \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с, $\tau_{\text{ФП}} \approx 10^{-8}$ с. Оценим возможное быстроедействие управляемого транспаранта (УТ), исследуемого в ГЗУ. Рассмотрим, каковы возможности по быстроедействию электрооптических управляемых транспарантов, выполненных, например, на ниобате лития [10]. Полувольтное напряжение на одном элементе УТ можно представить в виде

$$U_{\text{УТ}} = \lambda/2r_{22}n_0^3d.$$

Здесь d — длина элемента УТ вдоль распространения света, r_{22} — тензорный коэффициент, n_0 — коэффициент преломления обыкновенной волны. С другой стороны, емкость элемента УТ

$$c_{\text{УТ}} = \varepsilon(dc/l), \quad (13)$$

ε — диэлектрическая проницаемость.

Время переключения УТ будет в основном определяться временем перезарядки емкости элемента УТ. Объединяя эти два уравнения, получим

$$c_{\text{УТ}} = \varepsilon c (\lambda/2U_{\text{УТ}}r_{22}n_0^3). \quad (14)$$

Мощность, которая требуется для переключения элемента УТ,

$$P = (c_{\text{УТ}}U_{\text{УТ}}^2/\tau) e^{-t/\tau} (1 - e^{-t/\tau}). \quad (15)$$

Это уравнение имеет максимум при $t/\tau \approx 0,7$. Тогда

$$P_{\text{max}} = 0,25c_{\text{УТ}}U_{\text{УТ}}^2/\tau,$$

где $\tau = R_{\text{вых}}c_{\text{УТ}}$, $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление усилителя. Для формирования импульсов большой амплитуды с фронтом переключения порядка 2—3 нс используют лавинные транзисторы [11], которые позволяют обеспечить амплитуду 2—3 нс, пиковую мощность около 1000 Вт. Учитывая, что для ниобата лития $r_{22} = 7$, $n_0 = 2,3$, $\varepsilon = 28$, а также то, что для ГЗУ $c = 10$ мм при $\lambda = 0,5$ мкм, из выражений (13)—(15) с учетом постоянной времени лавинных транзисторов получим, что постоянная времени элемента УТ $\tau_{\text{УТ}} = 3$ нс.

С учетом вышеизложенного передаточную функцию оптоэлектронной части ГЗУ можно представить в виде

$$W(P) = k/(\tau_n P + 1)(\tau_m P + 1)(\tau_{\text{ФП}} P + 1)(\tau_{\text{УТ}} P + 1), \quad (16)$$

где k — коэффициент передачи системы. Используя выражение (16) с учетом определенных выше значений τ_n , τ_m , $\tau_{\text{ФП}}$, $\tau_{\text{УТ}}$, найдем следующие значения для полосы пропускания системы для различных носителей: $F \approx 1,6$ МГц для фототермопластика и $F \approx 0,016$ МГц для фотохромных органических материалов.

Таким образом, полученные соотношения позволяют рассчитать основные параметры ГЗУ, включая полосу пропускания, что даст возможность в дальнейшем определить пропускную способность устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. О применении лазеров.— ВИТНИ ТАСС, 1979, № 4, с. 38—39.
2. Bardos A. Wideband Holographic Recorder.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 4.
3. Титов А. А. Определение некоторых параметров одномерных голографических за-

- поминающих устройств.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 1978, № 3.
4. Hill B. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.— Appl. Opt., 1972, vol. 11, N 1.
 5. Титов А. А., Сергеева О. Ю. Определение плотности записи и глубины фокусировки в одномерных голографических запоминающих устройствах.— Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 1977, вып. 5.
 6. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1973, с. 82—100.
 7. Кашлатый Р. Е. и др. Кремниевые фотодиоды для интегральных фотоприемных матриц.— Автометрия, 1977, № 2.
 8. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974, с. 355—362.
 9. Раков А. В. Линейный транспарант на основе LiNbO_3 .— Автометрия, 1978, № 1.
 10. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М.: Сов. радио, 1974, с. 158.

*Поступила в редакцию 18 апреля 1979 г.;
окончательный вариант — 26 марта 1980 г.*
