

*Амурский Владислав Брониславович
к.т.н., доцент, факультет информатики и управления, кафедра
информационных систем и телекоммуникаций
Московский Государственный Технический университет имени
Н.Э. Баумана
Россия, г. Москва
e-mail: garvad11@gmail.com*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОМЕРНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПРИ ПОДВИЖНОМ НОСИТЕЛЕ

***Аннотация:** В статье рассматривается процесс записи одномерных голограмм на подвижный носитель, определения их параметров. Определены параметры одномерных голографических запоминающих устройств (ОГЗУ) при подвижном носителе. Получены соотношения, позволяющие рассчитать основные параметры ОГЗУ, включая плотность записи, глубину фокусировки, полосу пропускания, емкость.*

Ключевые слова: параметры, одномерные голограммы, голография, подвижные носители.

*Amursky Vladislav Bronislavovich
Ph.D., Associate Professor,
Faculty of Informatics and Management,
Department of Information Systems and Telecommunications
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman
Russia, Moscow*

DETERMINATION OF PARAMETERS OF ONE-DIMENSIONAL HOLOGRAPHIC REMEMBERING DEVICES WITH MOBILE CARRIER

***Abstract:** The article discusses the process of recording one-dimensional holograms on a mobile carrier, determining their parameters. The parameters of one-dimensional holographic storage devices (OGZU) with a movable medium are determined. Relationships are obtained that make it possible to calculate the main parameters of the OGZU, including the recording density, focusing depth, bandwidth, and capacity.*

Key words: parameters, one-dimensional holograms, holography, mobile carriers.

В настоящее время все большее распространение получает запись информации на основе методов одномерной голографии [1].

Достоинствами одномерных голографических запоминающих устройств (ОГЗУ) являются высокая плотность записи, высокая скорость передачи данных, большая глубина фокусировки, низкая точность установки лучей на дорожку записи, малая чувствительность к дефектам носителя, простота оптической схемы.

В статье рассмотрен процесс записи одномерных голограмм на подвижный носитель.

Определим основные характеристики устройства при подвижном носителе записи.

Положим, что при записи и воспроизведении голограмм носитель движется в направлении y со скоростями V_z и V_e соответственно, а энергия излучения лазера меняется скачком.

Определим распределение энергии на подвижном носителе при записи скачка интенсивности лазерного излучения.

Для этого проинтегрируем выражение для интенсивности луча в плоскости фокусировки объектива записи.

Тогда после некоторых преобразований для линейной регистрирующей среды получим:

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

$$W_m = W_0 \left[1 + \frac{\sqrt{L}}{N(1+L)} \sum_{n=1}^N \{ \exp(i\varphi_n - 2\pi i \xi \Delta n - 2\pi i \xi x_{0n}) + \right.$$

$$\left. + \exp(-i\varphi_n + 2\pi i \xi \Delta n + 2\pi i \xi x_{0n}) \} \right] \exp - \pi^2 \xi^3, \quad (1)$$

$$\Phi(U) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi} \exp - \frac{U^2}{2} dU \quad \text{- интеграл вероятности,}$$

$$W_U = R^2 (1+L) \lambda f \sqrt{2V} f,$$

$$U = \sqrt{\frac{2 c V_c t}{\pi \lambda f}},$$

f 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;

V_3 - скорость движения носителя при записи голограмм;

φ_n - случайная фаза;

$\eta = y_r/\lambda f$ $\xi = x_r/\lambda f$ - пространственные частоты в плоскости голограммы;

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 $U = 2$.

$$\text{Тогда } t_n = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\lambda f}{c V_3}}.$$

Для определения частотной характеристики носителя удобно приближенно заменить интеграл вероятностей функцией $1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}$, где

$$\tau_n = \frac{t_n}{3} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\lambda f}{c V_3}}$$
 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):

$$W = W_m [\Phi(U) - \Phi(U - U_m)], \quad (2)$$

$$U_m = \sqrt{2\pi \frac{c V_3 t_n}{\lambda f}}$$

Из выражения (2) находится размер голограммы при записи на подвижный носитель в предположении, что действующая апертура голограммы вычисляется на уровне e^{-2} .

При этом амплитуда достигает 95% от максимума, если $U_m=2$; в случае, когда $U_m < 2$, амплитуда будет уменьшаться.

Поэтому найдем размер голограммы при $U_m=2$.

График зависимости выражения (2) от U приведен на рис.1.

Определяя из графика U , будем иметь

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

Для нахождения интенсивности света в восстановленном изображении при освещении голограммы опорным лучом умножим выражение (1) на выражение для амплитуды $A_{оп}$ опорного луча и на чувствительность носителя записи.

Применив к произведению обратное преобразование Фурье и ограничившись действительной частью восстановленного изображения, получим

$$J_{вых} = \left| F^{-1} [S W_B A_{оп}] \right|^2 = \left| F^{-1} \left[W_m (\Phi(U - U_B) - \Phi(U - U_{tu} + U_B)) \right] \right|^2 \cdot S \operatorname{Re} \exp - \frac{U^2}{2} \exp - \frac{\pi i^2 \xi^2}{2} \exp 2\pi i \xi x_{0n} \quad (4)$$

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

$$U_B^* = \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{cV_3 t_u}{\lambda f} \right); \quad U_{tu} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{cV_3 t_u}{\lambda f} \right);$$

$$U_{tu}^* = \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{cV_3 t_u}{\lambda f} \right);$$

S - чувствительность носителя записи;

F^{-1} - символ обратного преобразования Фурье.

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

После некоторого преобразования получим:

$$P_{\varphi_n} = \frac{3}{2\pi} J_m l_c \int_0^{V_m} dV \int_0^{\varphi_m} \exp - \frac{V^2 + \varphi^2}{2} d\varphi \left[\Phi(U_B^*) - \Phi(U_B^* - U_{tu}^*) \right]^2 =$$

$$P_m = \frac{3}{2} \varphi_m l_c \int_0^{V_m} dV \int_0^{\varphi_m} \exp - \frac{V^2 + \varphi^2}{2} d\varphi, V = \left(\frac{J}{c} \right) \sqrt{\frac{8\pi}{3}} = \left(\frac{x}{l} \right) \sqrt{\frac{8\pi}{3}}, \quad (5)$$

$$V_m = \left(\frac{l_{\phi n}}{2l} \right) \sqrt{\frac{8\pi}{3}}, \varphi_m = \left(\frac{c_{\phi n}}{2c} \right) \sqrt{\frac{8\pi}{3}},$$

$l_{\phi n}, c_{\phi n}$ - размеры элемента фотоприемной матрицы.

Выражение для P_m идентично выражению, полученному в работе [2] для неподвижного носителя записи.

На рис. 1 построен график зависимости $P_{\phi n}/P_m$ и $W(U)/W_m$ от $U_e^* u U n p u U_{t_u}^* = 2$.

Длительность импульса при воспроизведении на уровне 0,1 от амплитуды равна $t_B = 1,78\lambda f/cV_B$.

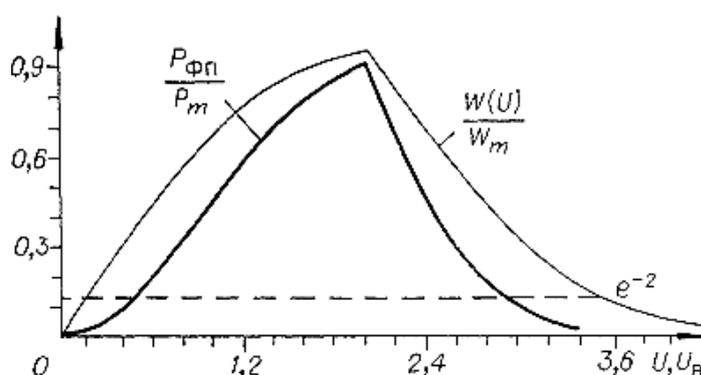


Рисунок 1. Зависимости мощности сигнала на фотоприемнике $P_{\phi n}/P_m$ и распределения энергии $W(U)/W_m$ по носителю от перемещения носителя при $U_{тн} = 2$

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_2 [3].

Тогда, принимая во внимание выражения (3) и (5), получим, что скважность при записи $Q_3 = 2-2,37$.

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_u .

Полученное выражение для постоянного 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 τ_n через указанные выше параметры.

Для этого определим дифракционную эффективность голограммы.

Интенсивность света в восстановленном изображении сразу за голограммой будет равна

$$J_{\dot{A}} = |WSA_{0n}|^2 = \frac{W_0^2 LR^2 S^2}{(1+L)^2} [\Phi(U) - \Phi(U - U_{in})]^2 \exp - (U - U_{in})^2 \exp - 3\pi^2 \xi^2. \quad (6)$$

Из выражения (5.15) следует, что апертура восстановленной из голограммы волны будет равна: $y_B = \frac{1.8\lambda f}{\sqrt{\pi c}}$, $x_B = \frac{1.68\lambda f}{\sqrt{\pi l}}$.

Площадь $S_B = x_B y_B = 0,95(\lambda^2 f^2 / cl)$.

Мощность в восстановленном изображении найдем, умножив амплитуду выражения (6) на S_B . Тогда получим:

$$P_B = \frac{0.95 S^2 W_0^2 LR^2 \lambda^2 f^2}{(1-L)^2 cl}. \quad (7)$$

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

$$P_{0n} = 2,55 R^2 (\lambda^2 f^2 / cl). \quad (8)$$

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

$$\eta_{\dot{A}} = \frac{P_B}{P_{0n}} \frac{S^2 W_0^2}{2.7} \frac{L}{(1+L)^2}. \quad (9)$$

Положим, что пропускание носителя описывается линейной характеристикой следующего типа [67]:

$$\Psi_n = \Psi_{но} - SW, \quad (10)$$

$\Psi_{но}$ — пропускание неэкспонированного носителя,

$$S = \Psi_{\text{но}}/W_{\text{max}},$$

W_{max} - максимальное значение энергии, при котором $\Psi_{\text{н}}=0$.

$$\eta_{\dot{A}} = \frac{1}{2,7} \frac{\Psi_0^2 W_0^2}{W_{\text{max}}^2} \frac{L}{(1+L)^2}. \quad (11)$$

Заменяя в выражении (9) S на $\Psi_{\text{но}}/W_{\text{max}}$ из выражения (11) можно определить дифракционную эффективность для одномерных голограмм.

Например, полагая $W_0/W_{\text{max}}=0,5$, $\Psi_{\text{но}} = 1$, $L=1$ (на середине участка характеристики), будем иметь $\eta_{\dot{A}}=2,3\%$ (для амплитудных голограмм).

Аналогичный результат получен для двумерных голограмм в работе [1].

С учетом (11) выражение для постоянной времени носителя примет вид:

$$\tau_{\text{H}} = 0.6 \sqrt{\eta_{\dot{A}}} (1+L) / S J_{\dot{e}} \sqrt{L}, \quad (12)$$

$J_{\text{л}}=R^2(1+L)$ — интенсивность луча в плоскости голограммы.

Выразим ее через мощность лазера:

$$J_{\text{л}} = P_{\text{л}} \eta_{\text{п}} P_{\text{з}} / N \quad (13)$$

$P_{\text{з}}$ - плотность записи;

$P_{\text{л}}$ - мощность лазера;

$\eta_{\text{п}}$ - коэффициент потерь в оптической системе.

Преобразуем (12) с учетом (13), в результате получим:

$$\tau_{\text{H}} = 0.6 \sqrt{\eta_{\dot{A}}} (1+L) N / S P_{\dot{e}} \eta_{\dot{A}} P_{\text{з}}. \quad (14)$$

Максимально возможную мощность лазера $P_{\text{л}}$ в выражении (14) определим из условия, что максимальная энергия при записи голограммы не должна превосходить величины, полученной из выражения (10) при $\Psi_{\text{н}}=0$, т.е. $W_{\text{max}} \leq \Psi_{\text{но}}/S$.

Это условие следует из принятого допущения о линейной зависимости пропускания от энергии в определенном диапазоне. Тогда с учетом выражений (1) и (2) при $U = U_{\text{ти}}=2$ и $W_{\text{max}} \leq \Psi_{\text{но}}/S$ получим:

$$P_{\dot{e}\text{max}} \leq 0.95 \frac{\Psi_{\text{н}}}{S} \frac{N}{P_{\text{з}}} \frac{R^2(1+L)}{\eta_{\text{и}} W_{\text{м}}}. \quad (15)$$

Найдем τ_{H} для некоторых носителей записи.

Для одномерных ГЗУ $P_3 = 2 \times 10^4$ бит/мм², $\eta_{\text{п}} = 0,02$, $N = 100$, $\eta_{\text{д}} = 2,3\%$, $L = 1$.

Применяя аргоновый лазер мощностью 1 Вт, $\lambda = 0,488$ мкм, получим $\tau_{\text{н}} = 150$ нс для фототермопластика, $\tau_{\text{н}} = 15$ мкс для оптических фотохромных материалов.

Определим передаточные характеристики остальных узлов ГЗУ: модулятора, матрицы фотоприемников, управляемого транспаранта.

Передаточные характеристики электрооптического модулятора и фотоприемников, работающих в режиме без накопления заряда, можно приближенно представить апериодическими звеньями с постоянными времени, равными соответственно $\tau_{\text{м}} \approx 3 \cdot 10^{-9}$ 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.

Полуволновое напряжение на одном элементе УТ можно представить в виде

$$U_{\text{оо}} = \lambda / 2r_{22}n_0^3d. \quad (16)$$

d — длина элемента УТ вдоль распространения света;

r_{22} — тензорный коэффициент;

n_0 — коэффициент преломления обыкновенной волны.

Емкость элемента УТ равна:

$$\tilde{N}_{\text{оо}} = \varepsilon \left(\frac{dc}{l} \right), \quad (17)$$

ε — диэлектрическая проницаемость.

Время переключения УТ будет в основном определяться временем перезарядки емкости элемента УТ.

Объединяя эти два уравнения, получим:

$$\tilde{N}_{\text{оо}} = \varepsilon c \left(\lambda / 2U_{\text{оо}}r_{22}n_0^3 \right) \quad (18)$$

Мощность, которая требуется для переключения элемента УТ,

$$P = (c_{\text{од}} U^2_{\text{од}} / \tau) e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (19)$$

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

$$P_{\text{max}} = 0,25 c_{\text{од}} U^2_{\text{од}} / \tau, \quad (20)$$

$$\tau = R_{\text{вых}} C_{\text{ут}},$$

$R_{\text{вых}}$ - выходное сопротивление усилителя.

Для формирования импульсов большой амплитуды с фронтом переключения порядка 2 - 3 нс используют лавинные транзисторы [1], 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 ОГЗУ можно представить в виде:

$$W(P) = k / (\tau_{\text{н}} P + 1) (\tau_{\text{м}} P + 1) (\tau_{\text{оф}} D + 1) (\tau_{\text{од}} D + 1), \quad (21)$$

K - коэффициент передачи системы.

Используя выражение (21) с учетом определенных выше значений $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{м}}$, $\tau_{\text{фп}}$, $\tau_{\text{ут}}$, 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.

Полученные соотношения позволяют рассчитать основные параметры ОГЗУ, включая плотность записи, глубину фокусировки, полосу пропускания, емкость.

Список литературы:

1. Титов А.А., Амурский В.Б., Гарипов В.К. Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. М.: Машиностроение, 2008. 144 с.

2. Andrew Bardos. Wideband Holographic Recorder. Applied Optics, 1974, v.13. № 4.

3. Hessel K.R. Data Recording One-dimensional Holography. Optics Communication, 1975. v. 15. № 2.