

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СРЕД

© 2008 г. **Б. С. Гуревич***, доктор техн. наук; **С. Б. Гуревич****, доктор физ.-мат. наук;
А. Пецкус***, канд. физ.-мат. наук

* ОАО “Научные приборы”, Санкт-Петербург

** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

*** Институт физики, г. Вильнюс, Литва

E-mail: bgurevich@mail.ru

Обсуждается информационный критерий определения необходимой входной энергии для записи в объемных голографических средах. Дается определение информационной голографической чувствительности. Определяется пороговая информационная голографическая чувствительность в случае бинарной и полутонковой записи. Учитывается связь информационной чувствительности с динамическим диапазоном среды в объемной среде. Проводится сравнение информационной голографической и обычной чувствительностей для некоторых тонких и объемных сред, используемых в голографии.

Коды OCIS: 090.0090.

Поступила в редакцию 23.08.2007.

Введение

В процессах записи и преобразования сигнала, включающих ввод данных, запись голограмм в среде, восстановление голограмм и регистрацию восстановленных данных, важную роль играет чувствительность. От эффективности голографического устройства зависит величина световой энергии, которая нужна для ввода и вывода необходимой информации.

Обычно под чувствительностью понимается величина, обратная входной энергии (или ее плотности), при которой появляется необходимый уровень выходного сигнала. Понятие чувствительности по-разному трактовалось применительно к разным системам.

В большинстве случаев такое различие обусловлено различными традициями в описании оптических, фотографических, телевизионных и других систем. При решении многих задач оказывалось необходимым пересмотреть традиционные представления чувствительности и выдвинуть новые определения. В частности, во многих оптико-электронных системах часто главенствующую роль играет объем записываемой информации. В этом случае необходим информационный подход к оценке чувствительности [1, 2].

Поскольку в голографии необходимо обеспечить максимальную модуляцию интерференционной картины с целью создания максимальной дифракционной эффективности, то критерий должен быть свя-

зан с этой величиной. В качестве входной энергии принималась, как и в фотографии, плотность падающей энергии света [3]. Однако такая оценка чувствительности недостаточно определяет эффективность голографической записи.

Совсем другая картина получается, если чувствительность определять не по плотности энергии, а по энергии, приходящейся на единицу информации. Если для оценки считать, что фотографический материал, обладающий разрешающей способностью 5000 лин/мм, позволяет записать 10^{10} дв. ед./см², а при 50 лин/мм – приблизительно 10^6 дв. ед./см², то одна и та же информационная чувствительность 10^{14} дв. ед./Дж, т. е. около $3,5 \times 10^{-5}$ дв. ед./квант, обеспечивается в первом случае при плотности энергии 10^{-4} Дж/см², в последнем – при плотности 10^{-8} Дж/см² (соответственно 0,005 и 50 ед. по ГОСТ).

Информационная оценка чувствительности является более правильной при оценке возможностей записываемого материала или всей информационной системы. Однако в литературе часто чувствительность голографических сред по инерции продолжают оценивать фотографическими единицами либо просто по необходимой плотности энергии (например, в Дж/см²) [3]. Наиболее полно специфику оптико-электронной информационной системы отражает единица, имеющая размерность Дж⁻¹бит [2]. Она же может быть использована и для голографической записи.

Для определения чувствительности сред хранения голограмм важно понимать, что представляет

собой величина выходного сигнала и какое его значение может быть принято в качестве критерия.

Поскольку в среде записывается интерференционная картина, то выходным сигналом целесообразно считать комплексную величину амплитудного коэффициента пропускания, определяемую не только амплитудными, но и фазовыми изменениями. Однако не весь прошедший свет создает копию записанного волнового фронта, а только та часть, которая создана его модулирующим членом. Эта часть и должна служить выходным сигналом.

Минимальная энергия, требуемая для записи набора бинарных данных

Для определения дифракционной эффективности, которую надо обеспечить при записи голограмм, следует определить пороговую энергию, необходимую для различения на выходе матрицы фотоприемников сигнала от одного пиксела,

$$W_p = \Psi_{\min} W_{n,\text{sys},p}, \quad (1)$$

где $W_{n,\text{sys},p}$ – энергия шумов системы, отнесенная к одному пикселу на выходе, а Ψ_{\min} – минимальное отношение сигнал/шум, при котором сигнал различается с удовлетворительной вероятностью. Эту энергию можно связать с мощностью восстанавливающего пучка P_{rec} , γ_2 – коэффициентом его полезного использования, η_h – дифракционной эффективностью голограммы, t_k – временем накопления сигнала на матрице фотоприемников и N_p – числом пикселов на выходе.

$$W_p = \frac{\gamma_2 P_{\text{rec}} \eta_h t_k}{N_p}. \quad (2)$$

Тогда для минимального значения дифракционной эффективности голограммы имеем

$$\eta_{h\min} = \frac{W_{p\min} N_p}{\gamma_2 P_{\text{rec}} t_k}. \quad (3)$$

Чувствительность среды, в которой записывается такая голограмма, должна быть такова, чтобы используемые для записи световые пучки обеспечивали $\eta_{h\min}$.

Как уже отмечалось, величину чувствительности удобнее связывать с $\eta^{1/2}$. Отнесенная к единице площади величина голографической чувствительности, если принять коэффициент V , определяющий видность, равным единице, согласно [3]

$$G = \frac{\sqrt{\eta}}{E_0}. \quad (4)$$

Здесь экспозиция

$$E_0 = \frac{\gamma_1 t_e P}{s_h}, \quad (5)$$

где P – мощность записывающего лазера, γ_1 – коэффициент его использования в двух пучках (опорном и объектном), t_e – время экспозиции при записи голограммы, s_h – площадь голограммы.

Подставляя $\eta_{h\min}$ из (3) в (4), получаем значение голографической чувствительности, выраженную в $\text{см}^2/\text{Дж}$.

Таблицы голографической чувствительности некоторых сред, определенной по выражению (4)

В таблицах 1 и 2 приведены значения неинформационной голографической чувствительности (отнесенные к единице площади в соответствии с выражением (4)) для некоторых тонких и объемных сред соответственно.

Различие в чувствительности здесь частично связано с различной информационной емкостью сред. Известно, что информационная емкость определяется комплексом физико-технических характеристик, таких, как динамический диапазон, полное и удельное разрешение, уровень собственных шумов, которыми характеризуется среда. Каждая из этих составляющих информационной емкости может оказывать влияние на величины чувствительности сред, указанные в таблицах.

Информационная голографическая чувствительность для объемных сред

Поскольку объемные среды позволяют записывать больший объем информации, то в оценку чувствительности таких сред должны быть внесены изменения.

Таблица 1. Чувствительность некоторых тонких сред [4]

Среда	G , $\text{см}^2/\text{Дж}$	Толщина, мм
649F	$2,6 \times 10^3$	0,015
649F, отбеленная	4×10^2	0,015
Хромированный желатин	$0,65 \times 10^2$	0,02

Таблица 2. Чувствительность некоторых объемных сред [5]

Среда	G , $\text{см}^2/\text{Дж}$	Толщина, мм
LiNbO ₃ :Fe	0,02	10
LiNbO ₃ (Two-color)	0,02	10
Polaroid photopolymer	20	0,5
PQ/PMMA	0,2–0,3	2

В работе [5] для объемных сред использовалось выражение

$$G = \frac{\sqrt{\eta}}{t_e d \frac{P}{s_h}}, \quad (\text{см/Дж}). \quad (6)$$

Такое определение для записывающих сред определенного состава является неудобным, так как различные слои имеют разные толщины d и чаще всего используют то же соотношение (4), что и для плоских сред, но с измененным значением E_0 , которое должно быть больше из-за большего объема вводимой информации. Очевидно, что при объемной записи неинформационная оценка чувствительности приведет к неправильным результатам: с увеличением толщины среды, что позволяет вводить больший объем информации, чувствительность объемной среды, определенная по выражению (4), окажется ниже.

Оценим информационную чувствительность голографических сред, более пригодную для объемных сред.

Поскольку обычно приходится иметь дело со средами низкой чувствительности, то желательно, чтобы в качестве критерия выбиралась наименьшая пригодная величина η . Она определяется выражением (3).

Дифракционная эффективность голограммы зависит как от числа пикселей N_p , содержащихся в изображении, записанном в виде голограммы, так и от числа мультиплексированных голограмм N_M на одной и той же площадке. В первом случае в идеальном варианте зависимость определяется выражением (3). В реальном варианте зависимость от N_p может быть нелинейной. Во втором случае суммарная дифракционная эффективность от M наложенных голограмм не может превышать нескольких единиц, а зависимость от N_M – квадратичная [5].

Для того чтобы информационную голографическую чувствительность G_1 определить в единицах бит/Дж, необходимо, чтобы экспозиция E_0 определялась не в Дж/см², а в Дж/бит (E_1). Выражения (5) и (4) примут вид

$$E_1 = \frac{\gamma_1 t_e P}{N_p}, \quad (7)$$

$$G_1 = \frac{\sqrt{\eta}}{E_1}. \quad (8)$$

Если взять за критерий минимальное значение η_{hmin} , обеспечивающее необходимую надежность выходных данных, и, имея в виду выражения (8),

(7) и (3), можно получить для информационной голографической чувствительности среды

$$G_{1\text{min}} = \frac{\sqrt{W_{p\text{min}} N_p / \gamma_2 P_{\text{rec}} t_k}}{\gamma_1 t_e P / N_p} = \frac{W_{p\text{min}} N_p^{3/2}}{\sqrt{\gamma_2 P_{\text{rec}} t_k} \gamma_1 t_e P}. \quad (9)$$

Ниже приводятся некоторые оценки. В работе [6], где сообщается о получении сверхвысокой плотности хранения информации (примерно 400 бит/мкм²) в кристалле LiNbO₃:Fe толщиной 8 мм, приводятся следующие данные для записи голограмм и выборки данных: $P_{\text{rec}} = 345$ мВт, $P = 21,6$ мВт, $N_p = 10^6$, $s_h \approx 2,5 \times 10^{-2}$ см², $V \approx 0,8$, $t_e = 0,34$ с, $\eta_h = 1,1 \times 10^{-6}$.

Значение $\eta_h = 10^{-6}$ может быть получено при $W_{p\text{min}} = 3,3 \times 10^{-16}$ Дж (что соответствует примерно 1000 квантов на один элемент ПЗС – значение, приведенное в работе [7]), т. е. достаточная величина, если принять $t_k = 10^{-3}$ с.

Используя выражение (7), можно согласно (8) получить

$$G_1 = \frac{\sqrt{\eta}}{VE_1} = \frac{10^{-3}}{0,8 \frac{0,34 \times 0,021}{10^6}} = 1,8 \times 10^5 \text{ бит/Дж}.$$

Для чувствительности, оцениваемой в см²/Дж, расчеты дают

$$G_0 = \frac{10^{-3}}{0,8 \frac{0,34 \times 0,21}{2,5 \times 10^{-2}}} \approx 0,5 \times 10^{-2} \text{ Дж/см}^2,$$

что близко к табличным данным.

В настоящее время ведется интенсивная разработка новых чувствительных и малошумящих сред для голографической записи и хранения информации [8]. Можно надеяться, что среди новых сред появятся такие, которые позволят существенно увеличить плотность записываемой информации и одновременно сократить время, затрачиваемое как на запись голограмм, так и на адресацию и восстановление необходимой информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич С.Б. Информационный подход к оценке чувствительности в фотографии и телевидении // Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1962. Т. 7. С. 3–11.
2. Гуревич С.Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.–Л.: Энергия, 1964.
3. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография / Пер. с англ. М.: Мир, 1973.

4. *Гладден Дж., Лейти Р.Д.* Регистрирующие среды // *Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда.* М.: Мир. Т. 1. С. 294–314
 5. *Ashley J., Bernal M.P., Burr G.W., Coufal H., Guenther H., Hoffnagle J.A., Jefferson C.M., Macfarlane R.M., Shelby R.M., Sincerbox G.T.* Holographic data storage // *IBM J. Res. Develop.* 2000. V. 44. № 3. P. 341–368.
 6. *Burr G.W., Jefferson C.M., Coufal H., Jurich M., Hoffnagle J.A., Macfarlane R.M., Shelby R.M.* Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in² // *Opt. Lett.* 2001. V. 26. № 7. P. 444–447.
 7. *Pu A., Psaltis D.* High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. № 14. P. 2389–2398.
 8. *Гуревич Б.С., Гуревич С.Б., Пецкус А.М.* Среды для объемной записи в голографических устройствах хранения и передачи информации // *Научное приборостроение.* 2006. Т. 16. № 2. С. 22–33.
-