

07

## Голографическая память, основанная на угловой спекл-селективности объемных голограмм

© В.Б. Марков

Институт прикладной оптики НАН Украины, Киев  
Центр исследований по физике, Богота, Колумбия

Поступило в Редакцию 17 ноября 1997 г.

Проанализирована возможность накапливания информации, использующая угловую спекл-селективность объемных голограмм. Продемонстрирована возможность построения высокочастотных элементов памяти на основе таких голограмм.

1. Селективные свойства объемных голограмм (ОГ) неоднократно обсуждались в связи с возможностью создания на их основе высокочастотных систем памяти [1–3]. Было показано [4], что предельная плотность информации  $N$  в ОГ ( $N \sim \lambda^3 \approx 10^{12}$  bit/cm<sup>3</sup>) определяется длиной волны  $\lambda$  излучения. При этом в качестве основного механизма, позволяющего осуществить многократную запись, предлагается угловая или спектральная селективность ОГ [5–7].

К недостаткам методов накопления информации, основанных на дисперсионных свойствах голограмм, следует отнести избирательный характер угловой и спектральной селективности. В связи с этим последовательная регистрация голограмм осуществляется преимущественно в плоскости дисперсии решетки. Кроме того, осциллирующая как  $\sin(x)/x$  зависимость интенсивности дифрагированного сигнала  $I_D(\delta\theta, \delta\lambda)$  при разьюстировке от условий Брэгга приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум [8–9].

В настоящей работе анализируется возможность накопления информации, используя особенности угловой селективности объемных голограмм, регистрируемых с опорной спекл-волной (ОГСВ).

2. Рассмотрим ОГ, сформированную плоской  $S_0(r) = s \cdot \exp(-i\sigma r)$  и спекл-волной  $R_0(r)$ . Предполагается, что восстановление осуществляется спекл-волной, пространственная структура которой идентична

записывающей  $R_0(r)$ , а угол восстановления ( $\theta_{reg}$ ) отличается от записывающего:  $\theta_{reg} = \theta_{rec} \pm \delta\theta_A$  ( $\delta\theta_A \ll \theta_{rec}$ ), здесь  $\theta_{rec}$  соответствует углу схождения пучков на этапе записи). В этом случае нормированная интенсивность дифрагированного пучка  $I_{ND}(\delta\theta_A)$  описывается выражением [10]:

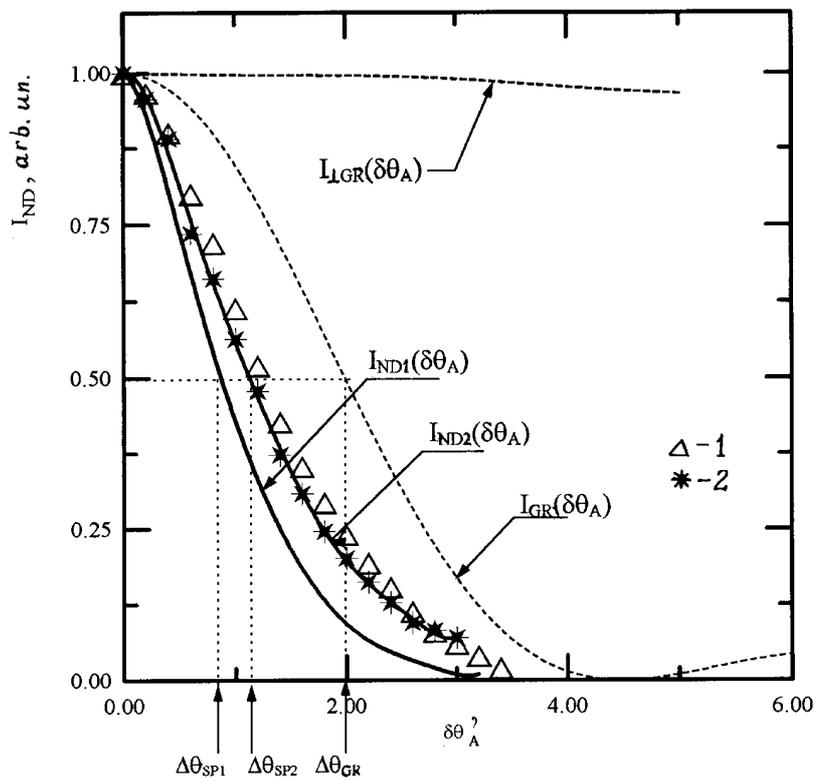
$$I_{ND}(\delta\theta_{SP}) = \frac{I_D(\delta\theta_A)}{I_{D_{max}}} = \left(\frac{4d}{k_0}\right)^4 \frac{1}{(DLT\delta\theta_A)^2} \times \left| \int_0^{T\delta\theta_A} \frac{1}{v^2} \exp\left[\frac{ik_0}{d}v^2\right] J_1\left(\frac{k_0D}{2d}v\right) J_1\left(\frac{k_0L}{2d}v\right) dv \right|^2, \quad (1)$$

где  $v = \delta\theta_A z$ ;  $dv = \delta\theta_A dz$ ;  $I_{D_{max}}$  — интенсивность дифрагированного пучка при  $\delta\theta_A = 0$ ;  $T$  — толщина голограммы;  $d$  — расстояние диффузор–голограмма;  $D$  и  $L$  — сечение освещенной части диффузора и голограммы соответственно;  $|\mathbf{k}_0| = 2\pi/\lambda$  — волновой вектор считываемого спекл-пучка;  $J_1(x)$  — функция Бесселя первого рода.

В выражении (1) члены вида  $J_1(k_0D_H v/2d)$  и  $J_1(k_0L v/2d)$  описывают рассогласование считываемого поля и зарегистрированной в объеме голограммы структуры при  $\delta\theta_A \neq 0$ . На рис. 1 представлена полученная из (1) зависимость  $I_{ND}(\delta\theta_A)$ , а также рассчитанная в соответствии с [5] зависимость  $I_{GR}(\delta\theta_A)$  для голограммы плоских волн. Как следует из приведенных данных, селективность  $\Delta\theta_{SP}$  ОГСВ (определяемая как величина  $\delta\theta_A$  при  $0.5I_{ND}$ ) связана со средним размером спекла ( $\langle\sigma_{\perp}\rangle = 1.22\lambda L/d$ ) и при идентичных условиях записи может быть "сильнее" селективности кросс-решетки  $\Delta\theta_{GR}$ . Кроме того, из сравнения зависимостей  $I_{ND}(\delta\theta_A)$  и  $I_{GR}(\delta\theta_A)$  следует, что селективность ОГСВ имеет монотонный характер, в отличие от осциллирующей зависимости  $I_{GR}(\delta\theta_A)$  у кросс-решетки.

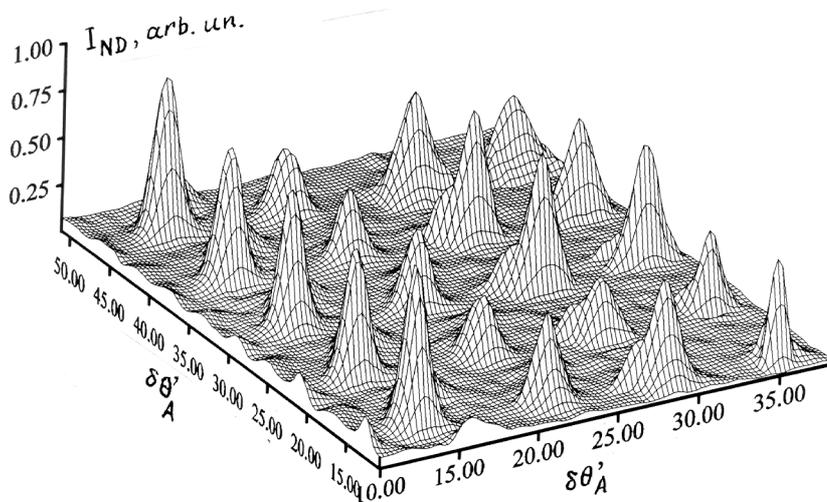
3. Голограммы с опорной спекл-волной записывались излучением одночастотного лазера с  $\lambda = 530$  nm в несимметричной геометрии ( $\theta_R = 0^\circ$  и  $\theta_S = 15^\circ$ , период кросс-решетки  $\Lambda \approx 2.0$   $\mu\text{m}$ ). В качестве регистрирующей среды использовались кристаллы  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  (0.02 вес.%) толщиной  $T = 1.5$  mm.

При измерении угловой селективности таких голограмм их восстановление осуществлялось спекл-волной. Изменение величины угла  $\theta_{reg} \neq \theta_{rec}$  приводило к уменьшению значения  $I_{ND}$ . Экспериментальная зависимость  $I_{ND}(\delta\theta_A)$  при повороте голограммы в плоскости дисперсии



**Рис. 1.** Зависимость нормированной интенсивности дифрагированного пучка  $I_{ND}$  от углового рассогласования  $\delta\theta_A$  для нескольких значений среднего размера спекла ( $I_{ND1} - \sigma_{\perp} = 5.0 \mu\text{m}$ ;  $I_{ND2} - \sigma_{\perp} = 8.0 \mu\text{m}$ ) и угловой селективности решетки плоских волн в плоскости дисперсии  $I_{GR}$  и перпендикулярном направлении  $I_{LGR}$ . Экспериментальные зависимости угловой спекл-селективности при  $\sigma_{\perp} \approx 8.0 \mu\text{m}$ : 1 — поворот в плоскости дисперсии решетки; 2 — поворот в перпендикулярной плоскости.

и перпендикулярном направлении показана на рис. 1. Как следует из приведенных данных, важной особенностью ОГСВ является отсутствие зависимости угловой спекл-селективности  $\Delta\theta_{SP}$  от направления разъюстировки. Это существенно отличает ее от голограммы плоских



**Рис. 2.** "Элемент памяти", формирующийся в результате последовательного опроса голограммы опорной спекл-волной при угловом рассогласовании в двух ортогональных направлениях.

волн [5]. Кроме того, приведенные зависимости подтверждают возможность записи голограммы, угловая селективность которой превышает селективность кросс-решетки, записанной в аналогичных условиях.

4. Описанный выше механизм угловой селективности ОГСВ позволяет осуществлять многократную запись информации и на ее основе формировать элемент памяти. В экспериментальной реализации такого элемента последовательная запись осуществлялась при изменении угла падения  $\theta_{rec}$  спекл-волны. Угловая отстройка  $\delta\theta_A \leq 8'$  подбиралась из условия  $\delta\theta_A \gg \Delta\theta_{SP} \approx 1'$ , обеспечивающего существенное подавление интенсивности суммарного сигнала ( $I_{D\Sigma} \leq 10^{-2}I_{D_{max}}$ ), формирующегося вследствие дифракции восстанавливающей волны на остальных голограммах.

На рис. 2 представлена пространственно-угловая структура дифракционных максимумов, формирующихся при восстановлении элемента голографической памяти, основанного на механизме угловой спекл-селективности. Каждому максимуму  $I_{Di}$  соответствует угол восста-

новления  $\delta\theta_{Ai}$ , изменение которого приводит к последовательному считыванию сигнальной волны. Из рис. 2 видно, что контур угловой селективности  $\Delta\theta_{SP}$  остается постоянным и его значение не зависит от направления считывания.

При анализе плотности записи информации за счет механизма угловой спекл-селективности отметим осесимметричный характер зависимости  $I_{ND}(\delta\theta_A)$  в плоскости регистрирующей среды, что обусловлено статистической однородностью распределения интенсивности в структуре опорного пучка в этой плоскости. Количество голограмм  $N$ , последовательно регистрируемых в объеме кристалла, может быть оценено как

$$N = \frac{4\pi\psi}{(\delta\theta_A)^2}, \quad (2)$$

где  $\psi$  — диапазон углов, в котором возможна запись ( $0 < \psi < 90^\circ$ ). Из (2) с учетом приведенных выше данных для  $\Delta\theta_{SP}$  (рис. 1) получим оценку для количества голограмм  $N \approx 10^7$ , что в  $2\pi/(\delta\theta_A)$  раз превышает соответствующую величину при записи плоскими волнами [3,11].

5. По аналогии с [1,3,9] отношение сигнал-шум голографического элемента памяти, основанного на спекл-угловой селективности, может быть рассчитано как

$$SNR = \frac{I_{qD}}{\sum_{m \neq q}^N I_{mD} + I_{PC}}. \quad (3)$$

где  $I_{qD}$  и  $I_{mD}$  — измеряемые значения полезного сигнала и шума. Последний возникает при дифракции считывающей волны на  $m$ -й голограмме.  $I_{PC}$  — шумы, определяемые характеристиками регистрирующей среды.

Выражение (3) в условиях формирования спекл-волны при освещении диффузора пучком с гауссовым распределением интенсивности (для расчета выражения (1)) и без учета шумов среды  $I_{PC}$  может быть преобразовано к

$$SNR = \frac{I_{qD}}{\sum_{m \neq q}^N \exp[(m\delta\theta_A - \Delta\theta_{SP})^2]}. \quad (4)$$

Из (4), с учетом полученных для  $\delta\theta_{SP}$  данных (рис. 1,2), расчетное значение  $SNR$  составляет  $\sim 10^{-3}$  при записи  $10^4$  голограмм.

6. В заключение отметим, что в настоящей работе проведен анализ особенностей угловой селективности объемных голограмм спекл-структуры и продемонстрирована возможность построения на основе таких голограмм высокочастотных элементов памяти.

Автор выражает благодарность Колумбийскому институту по развитию науки и техники "COLCIENCIAS" за частичную поддержку работ в рамках проекта № 28-05-401-93.

## Список литературы

- [1] *Микаэлян А.Л.* // Оптические методы в информатике. М.: Наука, 1990.
- [2] *Bradly D., Psaltis D.* // Opt. Quantum Electron. 1993. V. 25. P. 597.
- [3] *Hong J., McMichel I., Chang T., Christian W., Paek E.* // Opt. Eng. 1995. V. 34. P. 2193.
- [4] *Van Heerden P.J.* // Appl. Opt. 1963. V. 2. P. 393.
- [5] *Kogelnik H.* // Bell Syst. Techn. J. 1969. V. 48. P. 2909.
- [6] *Bradly D., Psaltis D.* // Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9. P. 1167.
- [7] *Mok F.* // Opt. Lett. 1993. V. 18. P. 915.
- [8] *Lee H.* // Opt. Lett. 1988. V. 13. P. 874.
- [9] *Curtis K., Gu C., Psaltis D.* // Opt. Lett. 1993. V. 18. P. 1001.
- [10] *Markov V.B.* // J. Imag. Sci. & Techn. 1997. V. 41. P. 70.
- [11] *Rastani K.* // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 3772.