

8. Silver R. M., Ehrichs E. E., De Lozanne A. L. Direct writing of submicron metallic features with a scanning tunneling microscope // Appl. Phys. Lett.— 1987.— 51, N 4.— P. 247.
9. Ben Assayag G., Sudraud P., Swanson L. W. Close-spaced ion emission from gold and gallium liquid metal ion source // Surf. Sci.— 1987.— 181, N 1/2.— P. 362.
10. Емельянов В. И., Коротеев Н. И. Эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами, адсорбированными на поверхности металла // УФН.— 1981.— 135, № 2.
11. Moskovits M. Surface enhanced spectroscopy // Rev. Mod. Phys.— 1985.— 57, N 3.— Pt. 1.— P. 785.
12. Герстен Дж. И., Питцан А. Электромагнитная теория: модель сфероида // Гигантское комбинационное рассеяние.— М.: Мир, 1984.
13. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.— Гл. 2, 9.
14. Белиничер В. И. Поверхностный фотогальванический эффект на свободных носителях // ФТТ.— 1982.— 24, № 3.
15. Белиничер В. И., Стурман Б. И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии // УФН.— 1980.— 130, № 3.
16. Намот В. А. Гигантское комбинационное рассеяние и определение структуры биологических макромолекул // Биофизика.— 1985.— 30, № 4.
17. Wessel J. Surface-enhanced optical microscopy // JOSA (B).— 1985.— 2, N 9.— P. 1538.
18. Personov R. I. Site selection spectroscopy of complex molecules in solutions and its applications // Spectroscopy and Excitation Dynamics of Condensed Molecular Systems/Ed. V. M. Agranovich, R. M. Hochstrasser.— Amsterdam e. a.: North-Holland, 1983.— P. 555.
19. Schellenberg S. N., Bjorklund J. C. Technological aspects of frequency-domain data storage using spectral hole burning // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 18.— P. 3207.
20. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.— Гл. 13.

*Поступила в редакцию 16 декабря 1988 г.*

УДК 681.327.68 : 535.421

А. А. БЛОК, Р. С. КУЧЕРУК, Е. Ф. ПЕП  
(Новосибирск)

## ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЧАСТИЧНО НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ

Информационную емкость голографической памяти можно существенно повысить путем записи наложенных голограмм [1, 2]. Еще в ранних работах исследовались различные методы селективного восстановления изображений из этих голограмм [1—5], а также показано, что при наложенной записи резко падает дифракционная эффективность (ДЭ) отдельной голограммы ( $\sim 1/N^2$  для тонких амплитудных [6] и  $\sim 1/N$  для толстых фазовых голограмм [1, 7], где  $N$  — количество наложений). Однако до сих пор остался неизученным практически важный случай частично наложенных голограмм, один из вариантов реализации которого рассмотрен в данной статье. Цель статьи — исследование зависимости дифракционной эффективности частично наложенных голограмм от характера и количества наложений.

**Метод записи частично наложенных голограмм.** Наиболее простой метод записи наложенных голограмм основан на изменении ориентации вектора решетки каждой из них [1, 3—5]. На рис. 1 показана схема записи таких голограмм. Для определенности будем считать, что направление сигнальных пучков  $S$  совпадает с нормалью к плоскости голограмм, а опорные пучки  $R_1, R_2, R_3, \dots$  образуют угол  $\alpha$  по отношению к этой нормали, но для различных голограмм отличаются ориентацией по азимуту. Как уже было отмечено, недостаток данного метода записи наложенных голограмм состоит в резком уменьшении ДЭ отдельной голограммы с ростом количества наложений. Этот эффект может быть

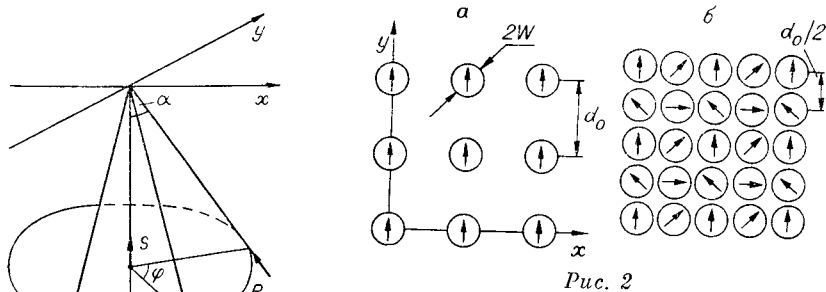


Рис. 2

тивным диаметром  $2W$  и расстоянием между ними  $d_0$ . Величина  $\hat{2}W$  определяется размерами поперечных сечений сигнального, опорного и восстанавливающего пучков, а отношение  $d_0/2W$  выбирается из соображений заданного уровня перекрестных шумов [8]. Стрелками изображено направление вектора решетки голограммы. На рис. 2, б показан фрагмент матрицы голограмм, информационная емкость которой увеличена в 4 раза за счет последовательной во времени записи четырех частично наложенных матриц голограмм на один и тот же участок регистрирующей среды. Причем первая матрица голограмм совпадает с ранее описанной (см. рис. 2, а). Вторая матрица голограмм накладывается на первую со сдвигом на расстояние  $d_0/2$  по координате  $x$ , третья матрица смещена на такое же расстояние по оси  $y$ , а четвертая — на расстояние  $d_0/2$  по обеим координатам. Опорный (восстанавливающий) пучок при записи (чтении) голограмм в различных матрицах расположен в плоскостях, развернутых относительно друг друга на некоторый угол  $\varphi$  (см. рис. 1). Угол  $\varphi$  выбирается таким, что полезное и фоновые изображения (восстановленные из частично наложенных соседних голограмм) пространственно разделяются (рис. 3). Минимальное значение угла  $\varphi$ , при котором соблюдается условие пространственного разделения полезного и фоновых изображений, равно [9]

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} [(\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол падения опорного пучка;  $\beta$  — половина углового размера восстановленного изображения. Для объемных голограмм максимальное количество наложенных голограмм  $N_{\max} = 2\pi/\varphi$ . Для плоских голограмм, наряду с мнимым изображением, восстанавливается действительное, поэтому максимальное количество наложенных голограмм уменьшается в 2 раза ( $N_{\max} = \pi/\varphi$ ). Из (1) следует, что при увеличении  $\alpha$  и уменьшении  $\beta$   $N_{\max}$  увеличивается. Например, для реальных голографических фотопластинок при  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$   $N_{\max} = 3$ , а при  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$   $N_{\max}$  увеличивается до 13. Уровень перекрестных помех при записи частично наложенных матриц голограмм практически не увеличивается по сравнению с одиночной матрицей на рис. 2, а.

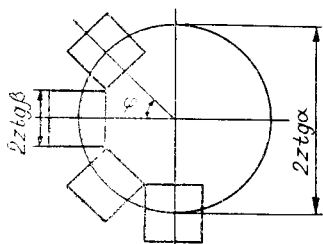


Рис. 3

**Дифракционная эффективность частично наложенных голограмм.** Исследуем зависимость дифракционной эффективности частично наложенных голограмм от их геометрических параметров и количества наложений. Предположим, что голограммы являются тонкими амплитудными и записаны в линейном приближении отклика фотоматериала, а сигнальные и опорные пучки голограмм гауссовы с радиусами поперечных сечений  $\omega_0$  (на уровне  $1/e^2$  по

интенсивности) и соотношением интенсивности опорного и сигнального пучков  $I_{\text{оп}}/I_c = R$ . Рассмотрим вначале случай четырех частично наложенных матриц голограмм (см. рис. 2, б). Предположим, что в каждой матрице голограммы записаны с таким шагом, что их взаимным влиянием друг на друга можно пренебречь, тогда амплитудное пропускание любой голограммы, кроме крайних, равно

$$T_a = 1 - kIt_a = 1 - k(I_0 + I_1 + I_2 + \dots + I_8)t_a, \quad (2)$$

где  $k$  — постоянный коэффициент;  $I_0 - I_8$  — интенсивности световых распределений, формирующих рассматриваемую голограмму и восемь ближайших частично наложенных на нее голограмм;  $t_a$  — время экспозиции.

Пусть центр данной голограммы совпадает с началом координат, тогда

$$I_0 = \left| e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}} + \sqrt{R} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}} e^{-ikx \sin \alpha} \right|^2,$$

интенсивность света для голограммы, ближайшей справа от рассматриваемой, имеет вид

$$I_1 = \left| e^{-\frac{(x-d_0/2)^2+y^2}{\omega_0^2}} + \sqrt{R} e^{-\frac{(x-d_0/2)^2+y^2}{\omega_0^2}} e^{-ik(x \cos \gamma_x + y \cos \gamma_y)} \right|^2, \quad (3)$$

здесь  $\gamma_x, \gamma_y$  — углы между опорным пучком и осями  $x, y$ . Аналогично записываются выражения для интенсивностей  $I_2 - I_8$ .

Можно показать, что интенсивность восстановленной волны для интересующей нас голограммы равна

$$I_{\text{восст}}(x, y) = k^2 I_c(x, y) I_{\text{оп}}(x, y) I_B(x, y) t_a^2, \quad (4)$$

где  $I_B(x, y)$  — интенсивность восстанавливающего пучка. Интенсивность восстановленной волны пропорциональна  $t_a^2$ , но максимальное значение  $t_{a \text{ max}}$  ограничено требованием

$$1 - kI_{\text{max}}(x, y)t_{a \text{ max}} = 0. \quad (5)$$

Нетрудно показать, что интенсивность  $I(x, y)$  достигает максимального значения в центре рассматриваемой голограммы и с учетом (3) равна

$$I_{\text{max}}(0, 0) = (1 + \sqrt{R})^2 H[(d_0/\omega_0)^2], \quad (6)$$

где  $H[(d_0/\omega_0)^2] = \left\{ 1 + 4 \exp[-(d_0/\omega_0)^2] + 4 \exp\left[-\frac{1}{2}(d_0/\omega_0)^2\right] \right\}$ .

По определению дифракционная эффективность голограммы  $\eta$  равна

$$\eta = \frac{\iint_{\Omega} I_{\text{восст}}(x, y) dx dy}{\iint_{\Omega} I_B(x, y) dx dy}$$

( $\Omega$  — площадь голограммы). С учетом (4) — (6) дифракционная эффективность каждой из частично наложенных голограмм равна

$$\eta_{\text{чн}} = \frac{1}{(1 + \sqrt{R})^4 H^2[(d_0/\omega_0)^2]} \frac{\iint_{\Omega} I_c(x, y) I_{\text{оп}}(x, y) I_B(x, y) dx dy}{\iint_{\Omega} I_B(x, y) dx dy}. \quad (7)$$

Как показано в [10], оптимальным соотношением радиусов поперечного сечения сигнального  $\omega_c$ , опорного  $\omega_{\text{оп}}$  и восстанавливающего  $\omega_B$  пучков является  $\omega_c = \omega_{\text{оп}} = \sqrt{2}\omega_B$ , причем эффективный радиус голограммы  $W$  удовлетворяет соотношению  $1/W^2 = 1/\omega_c^2 + 1/\omega_{\text{оп}}^2 + 1/\omega_B^2$ .

Далее будем считать  $\omega_c = \omega_{оп} = \sqrt{2}\omega_b = \omega_0$ , тогда (7) примет вид

$$\eta_{чн} = \frac{1}{(1 + \sqrt{R})^4 H^2 [(d_0/\omega_0)^2]} \frac{\int_{\Omega} \exp[-8(x^2 + y^2)/\omega_0^2] dx dy}{\int_{\Omega} \exp[-4(x^2 + y^2)/\omega_0^2] dx dy}. \quad (8)$$

Поскольку подынтегральные выражения являются быстроубывающими функциями на интервалах  $x = -\omega_0, \omega_0, y = -\omega_0, \omega_0$ , то можно установить пределы интегрирования по  $x, y$  в (8) от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Тогда, учитывая, что  $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-a^2 x^2) dx = \sqrt{\pi}/a$ , значение

$$\eta_{чн} = \frac{1}{2(1 + \sqrt{R})^4 H^2 [(d_0/\omega_0)^2]}. \quad (9)$$

Напомним, что формула (9) получена в предположении четырех частично наложенных матриц голограмм. Нетрудно показать, что в случае четырех полностью наложенных голограмм дифракционная эффективность  $\eta_{пн}$  каждой из них равна

$$\eta_{пн} = 1/[2(1 + \sqrt{R})^4 16]. \quad (10)$$

Выигрыш по дифракционной эффективности в предложенном методе записи частично наложенных голограмм по сравнению с записью полностью наложенных голограмм равен

$$K = \eta_{чн}/\eta_{пн} = 16/H^2 [(d_0/\omega_0)^2]. \quad (11)$$

Предположим теперь, что реализована запись  $N$  частично наложенных матриц голограмм. Повторяя все рассуждения и выкладки, получим для  $\eta_{чн}$  и  $K$  следующие соотношения:

$$\eta_{чн} = \frac{1}{2(1 + \sqrt{R})^4 H_N^2 [(d_0/\omega_0)^2]}; \quad (12)$$

$$K = N^2/H_N^2 [(d_0/\omega_0)^2].$$

Выражение  $H_N [(d_0/\omega_0)^2]$  учитывает влияние на дифракционную эффективность  $\eta_{чн}$  голограммы ближайших частично наложенных на нее голограмм. Если при записи четырех матриц голограмм ( $N = 4$ ) необходимо учитывать влияние восьми ближайших частично наложенных голограмм, то при  $N = 8$  добавляется еще шестнадцать частично наложенных голограмм:

$$H_8 [(d_0/\omega_0)^2] = \left\{ 1 + 4 \exp[-(d_0/\omega_0)^2] + 4 \exp\left[-\frac{1}{2}(d_0/\omega_0)^2\right] + \right. \\ \left. + 4 \exp\left[-\frac{1}{4}(d_0/\omega_0)^2\right] + 8 \exp\left[-\frac{5}{4}(d_0/\omega_0)^2\right] + 4 \exp\left[-\frac{9}{4}(d_0/\omega_0)^2\right] \right\}. \quad (13)$$

Анализ выражения (13) показывает, что при числе наложений  $N = 2^m$  основной вклад в  $H_N [(d_0/\omega_0)^2]$  вносят члены, соответствующие четырем ближайшим частично наложенным на рассматриваемую голограмму, поэтому (13) можно записать в общем виде:

$$H_N [(d_0/\omega_0)^2] = \left\{ 1 + 4 \exp[-(d_0/\omega_0)^2] + 4 \exp\left[-\frac{1}{2}(d_0/\omega_0)^2\right] + \dots \right. \\ \left. \dots + 4 \exp\left[\frac{1}{2^{m-1}}(d_0/\omega_0)^2\right] \right\}. \quad (14)$$

На рис. 4, а, б приведены расчетные зависимости  $\eta_{чн}$  и  $K$  от количества наложений  $N$  при  $d_0/\omega_0 = 2, R = 1$ . Видно, что с увеличением  $N$  дифракционная эффективность  $\eta_{чн}$  голограмм резко уменьшается и уже при  $N = 16$  равна всего  $\sim 0,1\%$ . При условии  $\eta_{чн} \geq 1\%$  максимальное

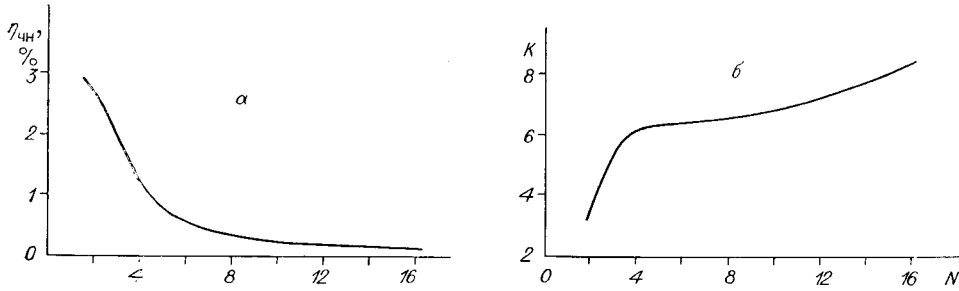


Рис. 4

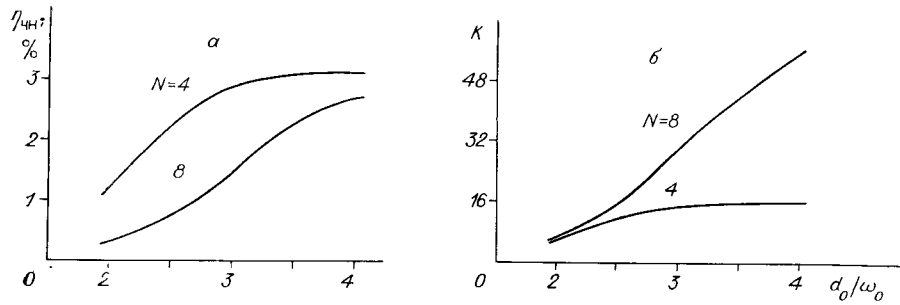


Рис. 5

количество наложений  $N=4$ . Значение  $K$  при увеличении количества наложений до  $N=4$  заметно увеличивается до величины  $K \approx 6$ , при  $N > 4$   $K$  также увеличивается, но более плавно. На рис. 5, а, б показаны расчетные зависимости  $\eta_{\text{чн}}$  и  $K$  от параметра  $d_0/\omega_0$  для  $N=4; 8; R=1$ . При увеличении параметра  $d_0/\omega_0$  уменьшается степень перекрытия частично наложенных голограмм, что приводит к увеличению  $\eta_{\text{чн}}$  и  $K$ . Однако при увеличении  $d_0/\omega_0$  уменьшается средняя плотность записи информации  $n_{\text{чн}}$ . На рис. 6 показаны зависимости нормированной средней плотности записи частично наложенных матриц голограмм  $n_{\text{чн}}/n_0$  от параметра  $d_0/\omega_0$  для  $N=4; 8$ . Значения  $n_{\text{чн}}$  нормированы на среднюю плотность записи одиночной матрицы голограмм  $n_0$  при  $d_0/\omega_0 = 2$ . Таким образом, увеличение  $\eta_{\text{чн}}$  возможно только за счет уменьшения плотности записи  $n_{\text{чн}}$ .

Напомним, что в случае полного наложения  $N$  голограмм дифракционная эффективность каждой из них пропорциональна  $\eta_{\text{пн}} \sim 1/N^2$  для тонких амплитудных голограмм,  $\eta_{\text{пн}} \sim 1/N$  — для толстых фазовых. На рис. 7 показаны для сравнения зависимости нормированной дифракционной эффективности наложенных голограмм  $\eta_{\text{п}}/\eta_0$  от количества наложений

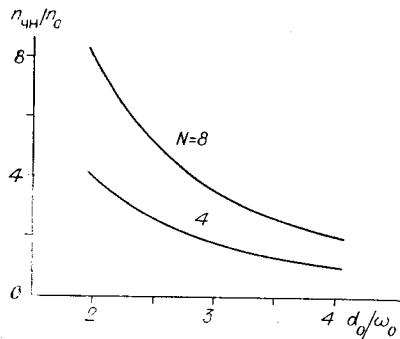


Рис. 6

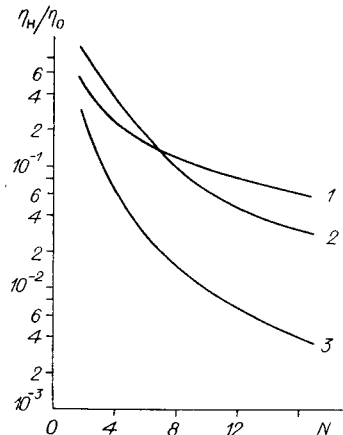


Рис. 7

плитудной голограммы с гауссовыми пучками при однократной записи). Видно, что при  $N < 7$  величина  $\eta_{\text{чн}}$  спадает слабее, чем  $1/N$ , и при любом количестве наложений  $\eta_{\text{чн}}$  всегда превышает соответствующее значение  $\eta_{\text{пн}}$ . Выигрыш по дифракционной эффективности в предложенном методе записи частично наложенных голограмм по сравнению с полным наложением физически объясняется тем, что при частичном наложении более эффективно используется площадь носителя.

Положительный эффект будет наблюдаться при записи частично наложенных голограмм и в объемных фазовых средах. Дополнительным важным достоинством в этом случае является автоматическое обеспечение условия «несвязанных» объемных голограмм, что, в свою очередь, позволяет увеличить количество наложений с достаточной дифракционной эффективностью [7].

**Эксперимент.** Для проверки эффективности предложенного способа записи частично наложенных голограмм на одной фотопластинке записывались матрицы голограмм с однократной записью (без наложения), с частичным и полным четырехкратным наложением. Использовались голографические фотопластинки ПЭ-2, транспарант данных представлял собой кадр микрофильма печатного текста, угловой размер изображения  $\sim 13 \times 13^\circ$ . Записывались матрицы фурье-голограмм с расстоянием между ними  $d_0 = 1,6$  мм,  $d_0/\omega_0 = 2$ . Для обеспечения линейности процесса записи применялась дефокусировка сигнального пучка, угол падения опорного пучка  $\alpha = 30^\circ$ . Энергия экспозиции голограмм  $\sim 5$  мДж/см<sup>2</sup>.

Дифракционная эффективность голограмм с однократной записью оказалась равна  $\sim 3\%$ , для частично наложенных — в 4 раза меньше, а для голограмм с полным наложением примерно в 16 раз ниже. Таким образом, коэффициент  $K$  в данном эксперименте составил  $\sim 4$ , что лишь в 1,5 раза меньше расчетного значения  $K \approx 6$  (при  $N = 4$ ,  $d_0/\omega_0 = 2$ ). Данное расхождение можно считать несущественным, поскольку в эксперименте не соблюдались в полной мере требования записи тонкой амплитудной голограммы в линейном приближении отклика фотоматериала, оптимального использования динамического диапазона фотоматериала и т. п.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают, что дифракционная эффективность частично наложенных голограмм в несколько раз выше, чем в случае полного наложения при равном количестве наложений.

**Заключение.** Теоретически и экспериментально показано, что при записи частично наложенных голограмм по сравнению с полным наложением обеспечивается значительно большая дифракционная эффективность (примерно в  $N$  раз при  $N < 8$ ). Реализована запись четырех частично наложенных матриц голограмм с селективным восстановлением изображений без увеличения уровня перекрестных шумов.

Авторы выражают благодарность В. А. Домбровскому за полезные обсуждения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ.— М.: Мир, 1973.
2. La Macchia J. T., White D. L. Coded multiple exposure holograms // Appl. Opt.— 1968.— 7, N 1.— P. 91.
3. Заявка 50—5585 Япония. Голографическое устройство памяти с увеличенным объемом хранения информации/К. К. Хитати.— Опубл. 05.03.75.
4. Landry M. J., Phipps G. S. Holographic characteristics of 10E75 plates for single and multiple exposure holograms // Appl. Opt.— 1975.— 14, N 9.— P. 2260.

5. Борискевич А. А., Дайлюденко В. Ф., Ероховец В. К., Ярош Н. А. Методы развязки наложенных записей в ГЗУ типа ЗД // Тез. докл. V Всесоюз. школы по оптической обработке информации.— Киев: КПИ, 1984.
6. La Macchia J. T., Vincelette C. J. Comparison of the diffraction efficiency of multiple exposure and single exposure holograms // Appl. Opt.— 1968.— 7, N 9.— P. 1857.
7. Якимович А. П. Дифракционная эффективность наложенных объемных фазовых голограмм // Оптическая голография.— М.: Наука, 1983.
8. Hill V. Some aspects of a large capacity holographic memory // Appl. Opt.— 1972.— 11, N 1.— P. 182.
9. Борискевич А. А., Ероховец В. К., Ярош Н. А. Пространственное разделение воспроизводимых изображений в ГЗУ типа ЗД // Автометрия.— 1987.— № 6.
10. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Исследование помехоустойчивости голограмм в ГЗУ // Автометрия.— 1985.— № 4.

*Поступила в редакцию 9 сентября 1988 г.*

---