

图象的全息存储

徐敏, 郑庸
(北京工业大学)

许澍翔, 罗振坤
(军事医学院放射医学研究所)

摘 要

本文提出用于全息存储的“散斑随机相移法”将其与“随机相位抽样法”做了比较, 所得实验结果与理论一致。当用新型卤化银全息干版和稀释显影处理, 可得再现童象的衍射效率为 2%, 可分辨的线宽为 $20\mu m$ 以及可分辨的灰度级为 16。

Holographic Image Storage

Xu Min, Zheng Yong, Xu Shu-xiang, Luo Zhen-Kun

Abstract

In this paper, the speckle random phase shifter method for holographic image storage is presented and compared with random phase sampling method. The experimental results obtained agree well with the theory. By using new type of silver halide holographic plate and development processing of dilute solution, the diffraction efficiency of the reconstructed image of a girl is 2 percent, the resolvable line width is $20\mu m$ and the number of resolvable grey level is 16.

一、导 言

随着科学技术的发展和时间的延续, 人们积累了越来越多的信息, 方便地将信息存入和取出, 早就被人注意并发展了缩微技术、只读式全息存储技术、随机全息存储技术及计算机存储等。由于全息存储具有高存储密度、高冗余度、高衍射效率、低噪声、高分辨率和高色调保真度等优点, 更是引人注目。

通常, 在只读式全息存储技术中, 采用付里叶变换全息图。由于被存储的信息种类繁多, 性质各异, 故由普通的付里叶变换全息图再现的信息质量差别很大。为此, 先后采用了

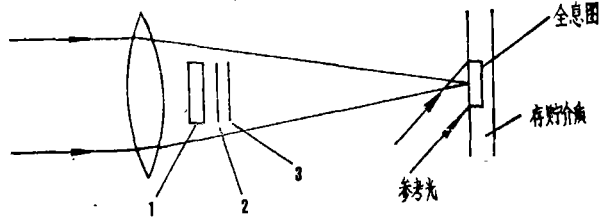
“离焦法”^[1]、“多光束记录”^[2]、“随机相移法”^[3]和“随机相位抽样法”^[4]。

“随机相位抽样法”是将随机相移器、抽样网格和待存贮信息紧贴在一起，放入光路中（图一），再引入一束与之相干的参考光束，在严格的付里叶变换平面记录信息的付里叶变换全息图。

随机相移器的孔径须同抽样网格相匹配。而制作随机相移器的掩模是用计算机产生的，再用照相方法将掩模缩微到所需尺寸，然后经“真空蒸镀”^[6]或“光刻法”^[6]，在玻璃基片上做出随机相移器和抽样网格。

本文作者用“全息法”制作所需的随机相移器，称之为“散斑随机相移器”^[7]。

“散斑随机相移器”与“随机相位抽样法”相比，原理相同，方法有别，均可用于全息存贮系统。

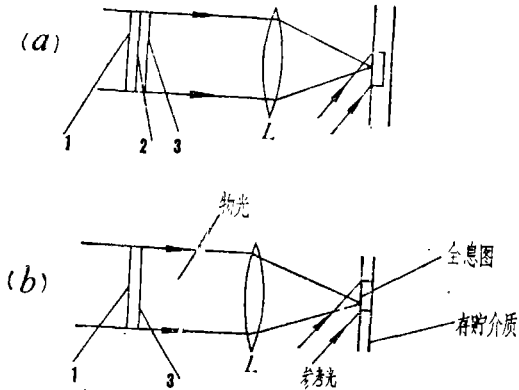


1. 随机相移器； 2. 抽样网格； 3. 图象信息。

图一 随机相位抽样法，全息存储示意图

二、原 理

我们选用的全息存贮系统，共示意图如图二所示。为使再现图象比原图象放大 M 倍，将待存贮图象、抽样网格和随机相移器（或待存贮图象与随机相移器）紧贴在一起，放入付里叶变换透镜 L 的前焦面之外某一确定位置（ $f-2f$ 之间），由单色平面波照明。



图二 予放大全息存储系统示意图

若 $M=5$ ，则上述的抽样网格和随机相移器的象，同样被放大成可见的噪声迭加在再现图象上。当采用“随机相移法”，此时，虽无网格象，但若再现图象偏离了理想的象面位置（共轭面），则随机相移器（可看成位相物体）的象迭加在再现图象上，也是一种噪声，在共轭面的前、后、噪声的强度发生反转，刚好在共轭面上，则噪声消失（附录1）。

随机相移器，抽样网格和待存贮图象三者紧贴，但在图象和随机相移器之间夹有一层玻

1. 为使再现图象具有前述特点，要求在所限定的全息图面积上包含几乎所有的图象信息并且其光能分布趋于均匀，全息图的直径(d)应与图象的最小可分辨单元(D_o)相对应($d=2\lambda f/D_o$)^[8]是再现图象具有高分辨率的前提。这些已为人所共知^[4]。

2. 抽样网格和随机相移器成象

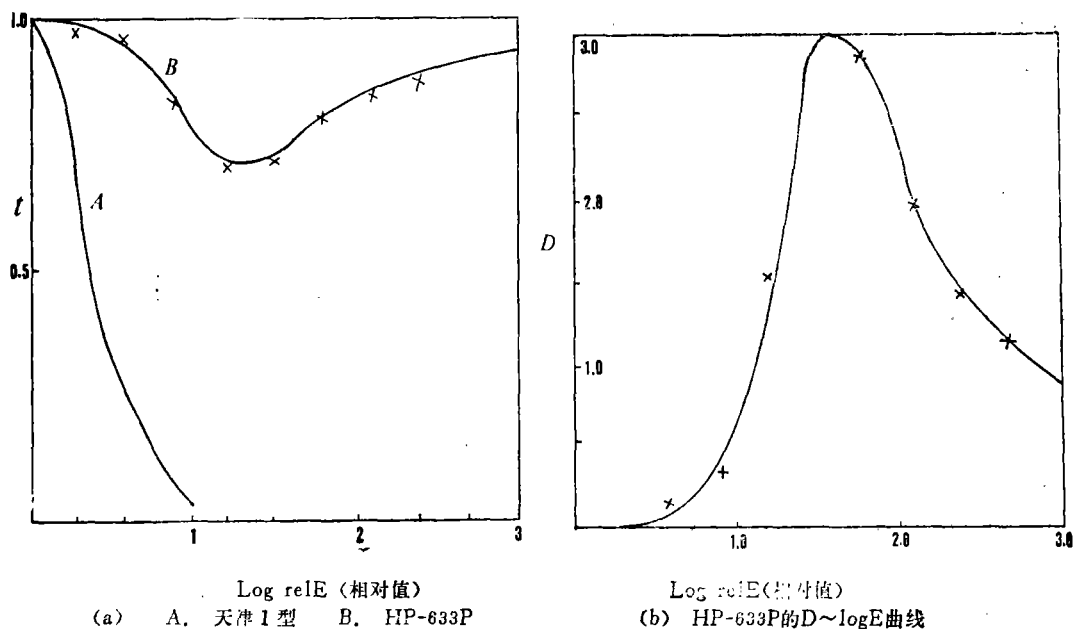
Y. Tsunoda 等人所用的全息存贮系统，无象差的再现图象与原图象同等大小（即 $M=1$ ），抽样孔径（ $50\mu m$ ）和随机相移器的象，人眼观察不到。

璃片基的厚度, 相当于两个分立的输入面, 对应于两个分立的成像面, 对 $M > 1$ 的全息存储系统是不允许的。散斑随机相移器正是摒弃抽样网格, 提高了再现图象的信噪比。

3. 全息记录介质

常用的全息记录介质为卤化银干版, 如天津 I 型, Kodak 120—01 型等, 由于它们的线性范围较窄, 即便使用了随机相移器, 仍不能使图象的高、低空间频率组份同时满足最佳曝光件。为提高衍射效率, 经漂白处理成位相型, 然而噪声也随之增加。

我们采用新型的卤化银干版, 由于其线性范围较宽 (图三), 特别适于作付里叶变换全息图的记录介质, 既可提高衍射效率, 又降低了噪声。



图三 全息记录介质的感光特性

三、实验结果的讨论

实验中选用光刻法制作的随机相移器 (带抽象网格及不带抽象网格两种) 和散斑随机相移器, 抽样网格的元格为边长 $32\mu\text{m}$ 的正方形小孔, 彼此中心距 $40\mu\text{m}$, 呈矩阵式排列。随机相移器的元格除边长为 $40\mu\text{m}$ 的正方形小孔外, 其它与抽样网格相同, 随移值的阶数为 2, 散斑随机相移器元格的平均孔径约 $27\mu\text{m}$, 相移值为连续分布。

所用激光波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 付里叶变换透镜的 F 数等于 2, 输入图象尺寸最大为 $20 \times 20\text{mm}^2$, 存储介质选用天津无线电技术研究所的全息干版 (HP-633P), 全息图的孔径均定为 2.5mm 。

图四示出用散斑随机相移器制作的付里叶变换全息图的再现图象。

我们用 16 个不同的光密度 (D) 组成一灰阶板 ($D = 0.0 \sim 1.8$ 之间) 作其付里叶变换全息图。再现图象的灰阶仍为 16, 测试结果为图五所示。

衍射效率 $\eta = 2\%$ (童象)

分辨率 0.02mm

为得到高质量,大存储密度的付里叶变换全息图,从理论上做一些仔细考虑固然必要,但实验过程中所遇到的一些具体问题,必须逐一解决,方可获得较好结果。

1. 由图四可知,对再现图象放大的全息存储系统,“随机相移器法”所得再现象的信噪比优于“随机相位抽样法”。

2. 适当增大全息图的直径 ($d \geq 2\lambda f/D_0$) 是付里叶变换全息图具有高衍射效率、高分辨率、高保真度和低噪声的关键。(附录2)。

3. 几个具体问题

(1) 参考光与物光的强度比(束比 B)

由于随机相移器的引入,消除了物光束中的自相干部份,因而可增大调制度。为此,应在全息记录平面内使 B 接近 1。

(2) 物光束与参考光束之间的夹角

我们所得到的全息图属于相位型。当用激光再现时,除再现出图象信息外,还有以再现光为对称轴的激光散斑分布于空间。若 θ 角较小,散斑可能迭加在图象上使噪声增加,因此在存储介质的截止频率以内,尽可能增大 θ 角。我们取 $\theta \approx 45^\circ$ 。

(3) 稀释显影

我们选用的 $HP-633P$ 全息干版,用稀释显影法,可使透射全息图的衍射效率大大地提高。显影液原液为 $D-76$,以 5—10 倍的水稀释原液作为显影液。显影温度控制在 20°C 左右。显影时间与曝光条件和全息图的性能要求有关。显影后的全息图呈桔黄色到棕色之间为好,光密度 D 在 0.35—0.45 之间。

(4) 全息干版涂层和玻璃片基的均匀性对再现图象的影响。(附录3)

实验发现,同样的条件在全息干版不同区域记录的全息图,其衍射效率、信噪比有时差别较大。这对只读式全息存储器将造成再现图象的失真,甚至缺页。

前面提到,一个位相物在其共轭面上是不成象的。但若在记录平面插入全息干版而引入一个随机相位,则在成象面上出现与位相有关的噪声。对全息干版提出达波长级的均匀性要求是不现实的,只能用筛选法挑选干版,即在记录前,利用相干光学成象系统(挡住图二光路中的参考光)分别观察记录平面有、无干版时成象面上图象的噪声。当插入干版引起的噪声是可以容忍的,且当干版垂直于光轴移动时噪声的变化不大时,此类版可用。

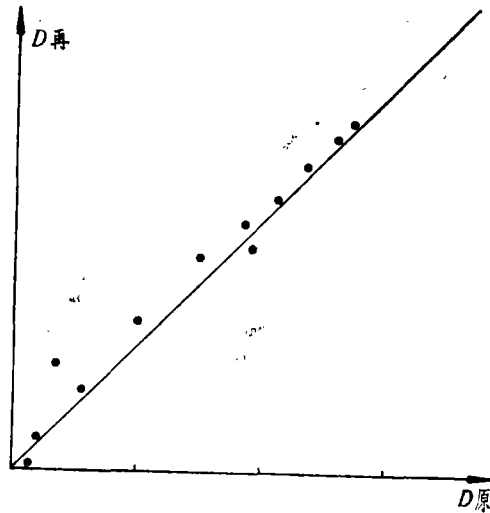
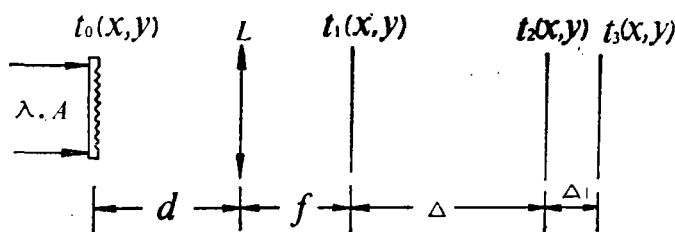


图 五

四、结 论

1. 散斑随机相移器用于图象放大的全息存储系统是合适的, 所得实验结果与理论一致。
2. 全息图的孔径稍大于由图象的最小分辨单元所确定的孔径 ($d \geq 2\lambda f/D, e$), 在实际的全息存储系统中是必要的。
3. 新型卤化银全息干版稀释显影处理, 可获得较高衍射效率、低噪声、高稳定性的全息图, 用这种干版作全息存储记录介质是较合适的。
4. 测量了再现图象的色调保真度和分辨率, 其结果与予期的一致。

附录 1 位相物成象



附图一 位相物成象

设: $t_0(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)] \approx 1 + j\varphi(x, y)$

当 $\Delta = \frac{f^2}{(d-f)}$ 时, 则

$$t_2(x, y) = \frac{1}{M} t_0\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right)^{[8]} \quad \text{式中, } M = \frac{\Delta}{f}$$

上式说明, 在象平面上, 位相物是不成象的。

设 Δ_1 为成象面位置偏离严格象平面的距离, 则有

$$F\{t_2(x, y)\} = T_2(u, v) = T_2(u, v) \exp[-j\pi\lambda\Delta_1(u^2 + v^2)]$$

$$t_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$t_3(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) \exp[-j\pi\lambda\Delta_1(u^2 + v^2)] \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$\approx \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) [1 - j\pi\lambda\Delta_1(u^2 + v^2)] \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$= t_3^{(1)}(x, y) + t_3^{(2)}(x, y)$$

式中:

$$t_s^{(1)}(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv = t_2(x, y)$$

$$t_s^{(2)}(x, y) = - \iint_{-\infty}^{\infty} T_2(u, v) [j\pi\lambda\Delta_1(u^2 + v^2)] \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$\therefore \frac{\partial t_2(x, y)}{\partial x} = \iint_{-\infty}^{\infty} j2\pi u T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$\frac{\partial^2 t_2(x, y)}{\partial x^2} = \iint_{-\infty}^{\infty} (j2\pi u)^2 T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$\therefore \frac{\partial^2 t_2(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2(x, y)}{\partial y^2} = \iint_{-\infty}^{\infty} -4\pi^2(u^2 + v^2) T_2(u, v) \exp[j2\pi(ux + vy)] du dv$$

$$\text{故 } t_s^{(2)}(x, y) = \frac{j\lambda\Delta_1}{4\pi} \left[\frac{\partial^2 t_2(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2(x, y)}{\partial y^2} \right]$$

为简单起见, 设 $t_2(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)]$

$$\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} = [j(\varphi''_x + \varphi''_y) - (\varphi'^2_x + \varphi'^2_y)] \exp[j\varphi(x, y)]$$

由于 φ'_x 与 φ'_y 同数量级, $\varphi'^2 \ll 1$ 。

$$\text{故 } t_s(x, y) \approx t_2(x, y)(1 + b\varphi'')$$

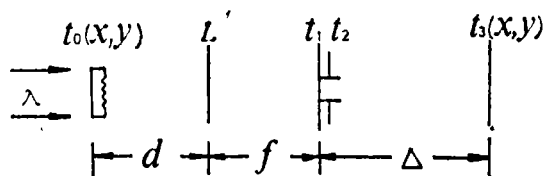
$$\text{式中: } b = \frac{\lambda\Delta_1}{4\pi}, \quad \varphi'' = \varphi''_x + \varphi''_y$$

$$I_s(x, y) = [t_s(x, y)]^2 \approx 1 + 2b\varphi''$$

b 的正、负决定衬度的暗、亮。

(当远离成象面时, $\Delta_1 > 0$, b 取正值; 在成象面的另一侧, $\Delta_1 < 0$, b 取负值)

附录2 全息图孔径的影响



附图二

$$t_0(x, y) = \exp[j\phi(x, y)]$$

$$\begin{aligned}
 t_1(x, y) &= \frac{A \exp\left[j \frac{k}{2f} \left(1 - \frac{d}{f}\right) (x^2 + y^2)\right]}{i \lambda f} \\
 &\quad \iint_{-\infty}^{\infty} t_0(x', y') \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f} (xx' + yy')\right] dx' dy' \\
 &= \frac{A \exp\left[j \frac{k}{2f} \left(1 - \frac{d}{f}\right) (x^2 + y^2)\right]}{i \lambda f} T_0(x/\lambda f, y/\lambda f)
 \end{aligned}$$

频谱面置一圆孔 (半径为 R_0)。透过圆孔的光场为:

$$\begin{aligned}
 t_2(x, y) &= t_1(x, y) \text{circ}\left(\frac{r}{R_0}\right) \\
 &= \frac{A \exp\left[j \frac{k}{2f} \left(1 - \frac{d}{f}\right) (x^2 + y^2)\right]}{i \lambda f} T_0\left(\frac{x}{\lambda f}, \frac{y}{\lambda f}\right) \cdot \text{circ}\left(\frac{r}{R_0}\right)
 \end{aligned}$$

当 $\Delta = f^2/(d-f)$ 时, 成象面上的光场为

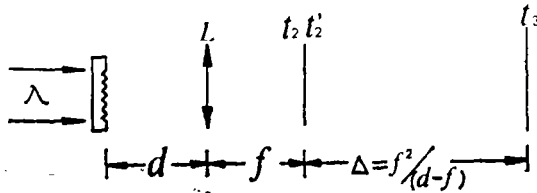
$$\begin{aligned}
 t_3(x, y) &= t_2(x, y) * h(x, y) \\
 &= \iint_{-\infty}^{\infty} t_2(x', y') \exp\left[\frac{jk}{2\Delta} (x-x')^2 + (y-y')^2\right] dx' dy' \\
 t_3(x, y) &= \frac{A}{i \lambda f} \exp\left[\frac{jk}{2\Delta} (x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} T_0(x'/\lambda f, y'/\lambda f) \\
 &\quad \text{circ}\left(\frac{r'}{R_0}\right) \exp\left[-\frac{jk}{\Delta} (xx' + yy')\right] dx' dy' \\
 &= \frac{A}{i \lambda f} \exp\left[\frac{jk}{2\Delta} (x^2 + y^2)\right] F\left\{T_0\left(\frac{x'}{\lambda f}, \frac{y'}{\lambda f}\right)\right\} \begin{cases} f_x = \frac{x}{\lambda \Delta} \\ f_y = \frac{y}{\lambda \Delta} \end{cases} \\
 &\quad * F\left\{\text{circ}\left(\frac{r'}{R_0}\right)\right\} \begin{cases} f_x = \frac{x}{\lambda \Delta} \\ f_y = \frac{y}{\lambda \Delta} \end{cases} \\
 &= \frac{A}{i \lambda f} \exp\left[\frac{jk}{2\Delta} (x^2 + y^2)\right] (\lambda f)^2 \cdot R_0^2 \\
 &\quad t_0\left(-\frac{f}{\Delta} x, -\frac{f}{\Delta} y\right) * \frac{J_1(2\pi R_0 \rho)}{R_0 \rho} \Big|_{\rho = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda \Delta}}
 \end{aligned}$$

由上式可知, 当 R_0 取值不当时, 即便在严格的成象面位置, 位相物也会成象。

当 $R_0 \geq 2\lambda f/D_0$ 时, $\frac{J_1(2\pi R_0 \rho)}{R_0 \rho}$ 趋近于 $\delta(x, y)$,

而 $t(x, y) * \delta(x, y) = t(x, y)$, 则位相物不成象。

附录3 存贮介质的影响



附图三

$$\text{已知 } t_2(x, y) = \frac{A \exp \left[j \frac{k}{2f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) (x^2 + y^2) \right]}{i \lambda f} \cdot F \left\{ t_0(x, y) \right\}_{\substack{f_x = x/\lambda f \\ f_y = y/\lambda f}}$$

设存储介质的光场分布用一位相函数 $\exp[j\varphi(x, y)]$ 表征, 则透过存储介质的光场分布为

$$t_2'(x, y) = t_2(x, y) \cdot \exp[j\varphi(x, y)]$$

成象面的光场分布 $t_3(x, y)$ 为

$$t_3(x, y) = t_2'(x, y) * \exp \left[j \frac{k}{2\Delta} (x^2 + y^2) \right]$$

为简单起见, 令 $\Delta = f$, 仅考虑一维情况, 则有

$$t_2'(x) = t_2(x) \exp[j\varphi(x)] \approx t_2(x) [1 + j\varphi(x)]$$

$$t_3(x) = t_2(x) [1 + j\varphi(x)] * \exp \left[j \frac{k}{2\Delta} x^2 \right]$$

$$= t_2(x) * \exp \left[j \frac{k}{2\Delta} x^2 \right] + j\varphi(x) t_2(x) * \exp \left[j \frac{k}{2\Delta} x^2 \right]$$

$$= t_3^{(1)}(x) + j t_3^{(2)}(x)$$

而 $t_3^{(1)} = t_0(-x)$

$$t_3^{(2)}(x) = \frac{A}{\lambda f} \exp \left[j \frac{k}{2f} x^2 \right] F \left\{ F \left\{ t_0(x) \right\} \varphi(x) \right\}_{f_x = x/\lambda f}$$

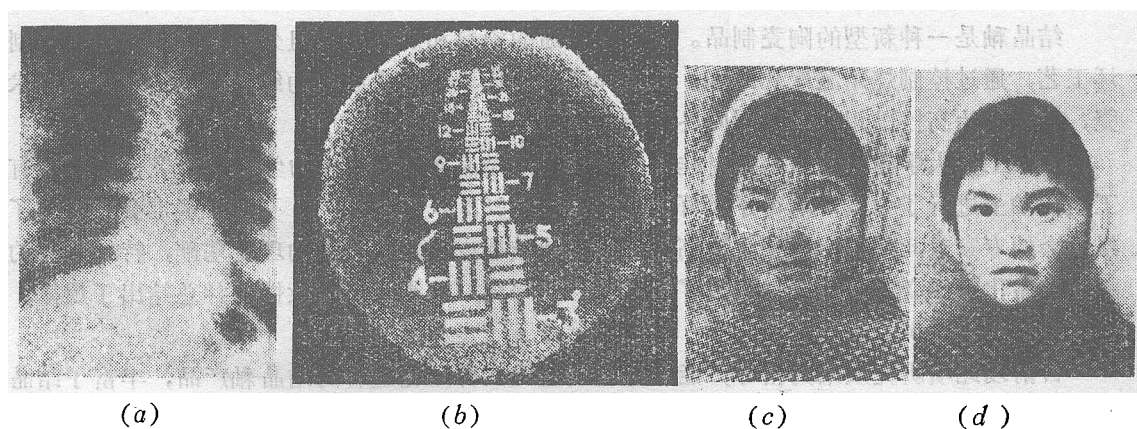
$$= \frac{A}{\lambda f} \exp \left[j \frac{k}{2f} x^2 \right] F F \left\{ t_0(x) \right\} * F \left\{ \varphi(x) \right\}_{f_x = x/\lambda f}$$

$$= \frac{A}{\lambda f} \exp \left[j \frac{k}{2f} x^2 \right] \lambda f t_0(-x) * F \left\{ \varphi(x) \right\}_{f_x = x/\lambda f}$$

$$\text{故 } t_3(x) = A \exp \left(j \frac{k}{2f} x^2 \right) t_0(-x) * \left[\delta(x) + j F \left\{ \varphi(x) \right\}_{f_x = x/\lambda f} \right]$$

由上式可知, 当记录介质插入时, 即使在严格的成象面位置, 位相物成象而降低了再现

象的信噪比, 仅当 $\varphi(x) = \text{const}$ 或 $\varphi(x) = \cos(\pi x)$ 时, 记录介质插入光路不影响成像质量。



图四 (a)、(b)、(c) 均为用散斑相移器的再现象, (d) 为用随机相位抽样法的再现象。

参 考 文 献

- [1] Y. Takeda, Japan, J. Appl. phys, 11, 656 (1972)
- [2] H. J. Gerritsen, W. J. Hannan and F. G. Ramberg Appl, Opt, vol. 7 No. 11, 2301 (1968)
- [3] Y. Takeda, Y. Oshida and Y. Mi yamura Appl. Opt. Vol, 11, No. 4, 818 (1972)
- [4] Y. Tsunoda and Y. Takeda, Appl, Opt, Vol. 13, No. 9, 2046 (1974).
- [5] 江铁良、徐敏、唐小平、陈玉华, 应用激光联刊, VOL 1, No. 2, 18 (1981).
- [6] 徐敏等, “散斑随机相移器” (待发表)。
- [7] Nabil H. Favhat, “Advances in Holography”, Vol. 3, Section 3, P 67.
- [8] 顾德门, 付里叶光学导论, P. 108, 科学出版社, 1976。