디스크형 홀로그래픽 메모리에서의 면적 저장밀도

Area storage density in holographic disk memories

장주석, 신동학
부경대학교, 정보통신공학과
jsjang@jjlab.pknu.ac.kr; jsjang@dolphin.pknu.ac.kr

매질의 성능이 이상적이라 가정하고, 여러 가지 시스템 파라미터로 2진 홀로그램을 저장하는 경우에 있어서, 얻을 수 있는 면적 저장밀도와 다중화 횟수를 산출하고 비교하였다. 이 논문의 결과들은 새로운 디스크형 3차원 홀로그래픽 메모리[1-3]를 연구하거나 매질을 개발함에 있어서 비교 지표로 사용될 수 있다.

크기가 $D\times D$ 인 정방형 공간 광 변조기 (Spatial Light Modulator: SLM)를 사용한다고 하고, 픽셀의 pitch는 δ 라 하자. 그러면 $(D/\delta)^2 \equiv N^2$개의 픽셀들, 즉 정보 bit들이 홀로그램 한 페이지를 기록할 때마다 매질에 저장된다. 보편적으로 많이 사용되는 각다중, 회전다중, 그리고 이 두 가지를 결합한 방식을 사용하여 다중기록 한다고 가정하였다. 이들 경우 모두, 신호빔이 입사되는 방향은 매질 면에 수직이라고 하자. SLM의 정보를 기록 매질에 집속시켜 주는 렌즈 L_2의 f 수, 즉 f_2/D_{L2}를 $F/\#_2$로 표기하기로 한다. 여기서 f_2는 L_2의 초점거리이고 D_{L2}는 직경이다. 각다중 또는 회전다중을 구현하는 시스템에서, 매질면에 입사되는 기준빔의 최대 입사각을 $\theta_{R,\max}$라 하자. 이때, 편의상 θ 대신에 다음의 관계를 갖는 등가적인 $F/\#_1 = 1/2\tan\theta_{R,\max}$을 사용하였다.

Fourier 면 홀로그램을 기록 할 때에 면적저장밀도는

$$S_{2D} = \frac{N^2}{A}\times M = \frac{M}{8\lambda^2}\left(\frac{1}{F/\#_2}-\frac{2\lambda}{\delta}\right)^2 \tag{1}$$

로 쓸 수 있다. 여기서 M은 한 지점에 다중화하는 횟수를 의미한다. 영상면 홀로그램을 저장할 경우, 기록면에서 상의 축소율 r이라 하면,

$$S_{2D}' = \frac{M}{r^2\delta^2} = \frac{M}{4\lambda^2}\left[\frac{1}{F/\#_2}\left(1-\frac{\sqrt{2}D}{D_{L2}}\right)-\frac{2\lambda}{\delta}\right]^2 \tag{2}$$

이 된다. 식 (2)로부터, 영상면 홀로그램을 기록할 때에는, SLM의 대각선 길이 $\sqrt{2}D$는 렌즈의 직경 D_{L2}보다 작을수록, 그만큼 영상을 축소할 수 있어서, 면적 저장밀도가 높아짐을 알 수 있다. 식 (1)과 (2)에서 페이지 당 저장밀도를 비교해 보면

$$\frac{S_{2D}/\text{page}}{S_{2D}'/\text{page}} = \frac{r^2\delta^2}{8\lambda^2}\left(\frac{1}{F/\#_2}-\frac{2\lambda}{\delta}\right)^2 = \frac{r^2}{2}\left(\frac{\delta}{2\lambda F/\#_2}-1\right)^2 \tag{3}$$

가 된다. 편의상 배율(혹은 축소율) $r=1$인 경우에 대해서만 생각한다.

Fourier 면 홀로그램을 기록할 경우, 각다중 방식을 사용할 때 그의 다중화 횟수를 M_a, 면적저장밀도를 $S_{2D,a}$로 표기한다. 회전다중 방식을 사용할 경우에 있어서 Bragg 각 불일치를 사용할 수 없을 정도로 얇은 매질을 사용할 경우, 각각 M_{r1}, $S_{2D,r1}$로, 회전다중 방식을 사용할 경우에 Bragg 각 선

택도를 이용할 경우에는 각각 M_{r2}, $S_{2D,r2}$로 표기하자. 또, 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용할 경우 이들을 각각 $M_a \times M_r$ 및 $S_{2D,ar}$로 표기하자.

반면에 영상면 홀로그램을 기록할 경우, 각다중 방식을 사용할 때의 다중화 횟수를 M_a' 면적저장밀도를 $S_{2D,a}'$로, 회전다중 방식을 사용할 경우에 있어서 Bragg 각 불일치를 사용할 수 없을 정도로 얇은 매질을 사용할 경우 각각 M_{r1}', $S_{2D,r1}'$로, 회전다중 방식을 사용할 경우에도 Bragg 각 선택도를 이용할 경우 각각 M_{r2}', $S_{2D,r2}'$로, 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용할 경우 이들을 각각 $M_a' \times M_r'$, $S_{2D,ar}'$로 표기하자.

이들 여덟 가지 면적 저장밀도 $S_{2D,a}$, $S_{2D,r1}$, $S_{2D,r2}$, $S_{2D,ar}$, $S_{2D,a}'$, $S_{2D,r1}'$, $S_{2D,r2}'$, $S_{2D,ar}'$와 이들 각각에 대한 다중화 횟수 M_a, M_{r1}, M_{r2}, $M_a \times M_r$, M_a', M_{r1}', $M_{r2}' (= M_{r2})$, $M_a' \times M_r'$를 여러 가지 파라미터 값들에 대해 그려보았다. (지면 관계로 이들에 대한 결과는 생략하기로 한다.) 모든 경우에 있어서 $F/\#_1$이 작을수록 저장밀도는 높아진다. Fourier 면 홀로그램을 기록할 경우, 주어진 $F/\#_1$값에 대해, $F/\#_2$값이 작을수록 면적 저장밀도가 높아지지만, 영상 면 홀로그램을 기록할 경우, 면적 저장밀도는 $F/\#_2$값에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 물론 영상면에서 기록하는 경우, $F/\#_2$값이 커지면 한 페이지 당 저장되는 정보량은 감소하므로 병렬적 정보 인출 면에서는 불리해진다. 또한, 영상 면 홀로그램을 기록할 경우, 픽셀 pitch δ가 작을수록 면적 저장밀도는 대략 그의 제곱의 역수에 비례해서 증가하지만, Fourier면 홀로그램을 기록할 경우, δ는 면적 저장밀도에 큰 영향을 주지 않음을 (아주 약간 증가시키는 정도임을) 볼 수 있다. 물론, Fourier 면 기록에서 δ가 커질수록 한 페이지 당 저장할 수 있는 정보량은 감소한다.

상용화된 SLM의 δ값이 20 μm 정도이므로, 영상 면 홀로그램을 기록하는 것보다 Fourier면 홀로그램을 기록하는 것이, 높은 면적 저장밀도를 얻는데 유리함을 알 수 있다. 일반적으로 동일한 조건의 파라미터 값을 사용할 경우, 높은 저장밀도를 얻기 위해서는 다중화 횟수를 높여야 함을 알 수 있다. 그러나 영상면 홀로그램을 기록할 때에는 Fourier 면 홀로그램을 기록할 때에 비해 저장 밀도는 낮지만 다중화 횟수는 오히려 더 크다. 사실 홀로그램의 회절 효율은 다중화 횟수의 제곱에 반비례하게 된다. 따라서 영상 면 홀로그램은 면적밀도 뿐 아니라 회절 효율에서도 불리함을 알 수 있다.

한가지 다중화 방식을 사용할 경우, 매질의 두께가 대략 500 μm 이하일 때에는 회전다중 방식이 각다중 방식에 비해 유리하며, 그 보다 더 두꺼운 경우에는 각다중 방식이 가장 유리함을 알 수 있었다. 그러나 충분히 높은 면적 저장밀도를 얻기 위해서는 각다중과 회전다중 방식을 결합하여 사용하는 것이 가장 낫다는 것을 볼 수 있었다. 만약 Fourier 면과 영상 면 사이에서 기록한다면 저장밀도 역시 지금까지 구한 두 극단적 경우의 사이 값이 될 것이다. 또한 여러 파라미터 값에 대한 면적 저장밀도의 변화도 두 극단적인 경우의 성격을 모두 조금씩 띠게 될 것이다.

[1] H. S. Li and D. Psaltis, Appl. Opt. Vol. 33(17), 3764-3774 (1994).
[3] A. Pu and D. Psaltis, Appl. Opt. Vol. 35(14), 2389-2398 (1996).
[3] G. Zhou, D. Psaltis, and F. Mok, to appear in Optics and Quantum Electronics.