

광섬유를 이용한 위치 다중화 구조의 체적 홀로그램*

강용훈 · 김기현 · 이병호

서울대학교 전기공학부

(1997년 1월 4일 받음)

체적 홀로그램을 저장하고 재생하는데 있어서 광섬유에서 유도되는 스페클 패턴을 이용하는 것을 제안하고, 이를 이론 및 실험적으로 연구하였다. 기준빔으로 광섬유에서 회절되는 스페클 패턴을 이용한 홀로그램 위치 다중화 구조는, 스페클 패턴의 상대적 위치 차이에 따라 상관 관계가 없어지는 특징을 이용하기 때문에 좋은 횡방향 위치 선택도를 가지게 하며 축방향 움직임에 대해서는 둔감한 안정성을 보여준다. 따라서 이러한 구조를 광 정보 저장 장치에 적용하면 저장 밀도를 높일 수 있으며 홀로그램 재생시의 안정도를 증가시킬 수 있다.

I. 서 론

광저장 장치나 광연결의 수단으로서 다중화(multiplexing)된 체적 홀로그램을 이용하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 이러한 응용을 위한 다중화 방법에는 각 다중화(angular multiplexing), 파장 다중화(wavelength multiplexing)^[1,2], 위상 코드 다중화(phase code multiplexing) 방법 등이 있다. 위상 코드 다중화 방법의 하나인 불규칙 위상 평면을 이용한 다중화 방법은, 불규칙 평면의 상관 관계가 상대적 위치의 변화에 따라 작아지는 효과로 인하여, 위치 및 파장 다중화에서의 선택도를 높일 수 있다.^[3-5] 다중모드 광섬유에서 유도되는 스페클(speckle) 패턴은 불규칙 위상 평면에 의한 스페클 패턴과 유사한 효과를 나타내는데^[6-10], 광섬유에서의 스페클 패턴은 광섬유에 가해지는 외란(disturbance)에 민감하게 반응하므로 여러 종류의 센서로 응용되어 왔다.^[11] 불규칙 위상 평면을 이용하는 경우에서처럼, 홀로그램을 재생하는 스페클 패턴의 모양 변화 없이 단지 상대적인 위치 변화에도 홀로그램을 기록할 때의 스페클 패턴과의 상관 관계는 없어지게 된다. 이러한 성질은 체적 홀로그램의 위치 다중화 특성을 향상시킨다.

본 논문에서는 광굴절 체적 홀로그램(photorefractive volume hologram)을 기록하는 데 있어서 기준빔(reference beam)으로 광섬유에서 회절되는 스페클 패턴을 사용하였다. 이러한 구조는 위치 다중화 방법(spatial multiplexing)에서 좋은 위치 선택도를 가지게 한다. 다중모드 광섬유에서 뿐만 아니라 단일모드 광섬유에서도 스페클 패턴을 유도하였는데 이는 짧은 길이의 단일모드 광섬유에서 존재하는 고차의 클래딩 모드로 인해서 나타난다. 이렇게 만들어진 복잡한 위상면에 의해서 위치 선택도가 향상된다. 본 논문의 II장에서는 광섬유에서 회절되는 스페클 패턴에 의해 기록된 체적 홀로그램에서 회절되는 재생빔을 이론적으로 유도하였고, III장에서는 수치계산과 실험을 통하여 스페클 패턴을 이용한 위치 다

중화 구조의 특성을 분석하였으며, IV장에서 결론을 맺었다.

II. 체적 홀로그램에서 회절되는 재생빔의 이론적 해석과 수치 계산

일반적으로 홀로그램에서 회절되는 빛은 Born의 근사법(approximation)으로 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^[12]

$$\vec{E}_{out}(\vec{r}) \int d^3 r_i G(\vec{r}, \vec{r}_i) \chi(\vec{r}_i) \vec{E}_{in}(\vec{r}_i), \quad (1)$$

여기에서, $\vec{E}_{out}(\vec{r})$ 는 홀로그램에서 회절된 광파의 위치 \vec{r} 에서의 field를 나타내며, $\vec{E}_{in}(\vec{r})$ 는 입사파를 뜻한다. r_i 는 홀로그램 격자(grating) 내의 위치를 뜻한다. 또한 k_o 는 진공에서의 파수(wave number)이며 $\chi(\vec{r}_i) = n^2(\vec{r}_i) - 1$ 이고 $n(\vec{r}_i)$ 는 위치의 함수로 기억된 굴절률, 즉 홀로그램을 뜻한다. $G(\vec{r}, \vec{r}_i)$ 는 Green 함수이다. $|\vec{r}_i|$ 이 홀로그램 크기에 비해서 아주 크다고 가정하면 Green 함수는 다음과 같이 표현된다.^[13]

$$G(\vec{r}, \vec{r}_i) = \frac{\exp[ik_o |\vec{r} - \vec{r}_i|]}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}_i|} \cong \frac{\exp[ik_o r - ik_o \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i]}{4\pi r} \quad (2)$$

$$\chi(\vec{r}_i) = n^2(\vec{r}_i) - 1 = (n_o + \Delta n(\vec{r}_i))^2 - 1 \approx n_o^2 - 1 + 2n_o \Delta n(\vec{r}_i) \quad (3)$$

여기에서, n_o 는 홀로그램이 기록되지 않았을 때의 홀로그램 매질의 굴절률이며 $\Delta n(\vec{r}_i)$ 은 홀로그램 격자에 의한 굴절률의 변화를 뜻한다. ($|\Delta n(\vec{r}_i)| \ll 1$) 식 (3)의 $\chi(\vec{r}_i)$ 에 대한 표현에서 위치에 무관한 상수항은 홀로그램에서의 회절에 영향을 미치는 항이 아니므로 공간적으로 변하는 항 $\chi'(\vec{r}_i) = 2n_o \Delta n(\vec{r}_i)$ 를 고려하면, 이는 다음 식 (4)와 같이 홀로그램을 기록할 때 사용되었던 기준빔 $E_{ref}(\vec{r}_i)$ 과 신호빔 $E_{obj}(\vec{r}_i)$ 의 내적에, 즉 간섭 패턴에 비례한다.

$$\chi(\vec{r}_i) = \gamma_o E_{ref}^* \cdot E_{obj}(\vec{r}_i) \quad (4)$$

여기에서, γ_o 는 비례상수이다. 광섬유를 이용한 위치 다중화 체적 홀로그램의 구성도가 그림 1에 나타나 있다. 광섬유에서 나온 빔이 기준빔이며 이것이 화상 등의 정보를 실은 신

*본 연구는 서울대학교 발전기금 포철학술연구비(95-15-2127)의 지원을 받은 것임.

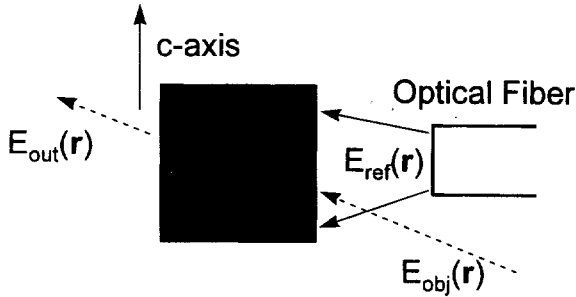


그림 1. 광섬유를 이용한 홀로그램 저장 장치의 구성도

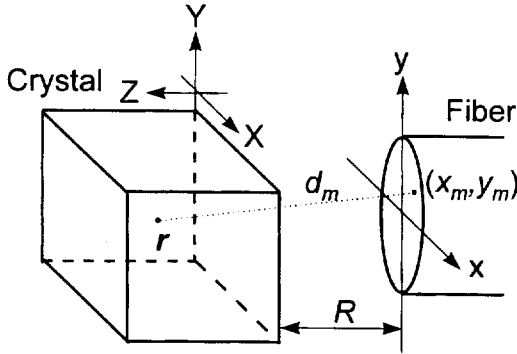


그림 2. 홀로그램 매질과 광섬유 단면의 상세 배치도

호빔과의 간섭으로 홀로그램을 생성하게 된다.

여기에서의 기준빔 $E_{ref}(r_i)$ 는 광섬유 스펙클 패턴으로서 광섬유 내에 존재하는 여러가지 고차 모드들이 회절된 빛의 중첩의 형태로 다음의 식 (5)와 같이 표시된다. 각 모드의 편광은 일정한 선형편광을 갖는다고 가정하였다.

$$E_{ref}(r_i) = \hat{e} \sum_m \iint dx_m dy_m A_m(x_m, y_m) \frac{\exp[ik_o d_m + i\phi_m]}{d_m} \quad (5)$$

여기에서 \hat{e} 는 편광 방향을 나타내며, m 은 광섬유 내에 존재하는 모드들을 나타내고, $A_m(x_m, y_m)$ 은 모드 m 의 광섬유 단면 x - y 평면에서의 field 분포 함수이다. 또한 ϕ_m 는 각 모드 간의 위상 차이를 나타내며, d_m 은 그림 2에서 보듯이 광굴절 크리스탈 내의 홀로그램의 한 점 r_i 와 광섬유 단면의 점 (x_m, y_m) 사이의 거리를 뜻한다. 크리스탈의 좌표계는 X, Y, Z 로 나타나고 크리스탈과 광섬유와의 거리는 R 로 표시된다.

광섬유와 광굴절 크리스탈 사이의 거리 R 이 홀로그램의 크기보다 아주 크다고 가정하면, d_m 은 식 (6)과 같이 전개되고,

$$d_m = [(X-x_m)^2 + (Y-y_m)^2 + (Z+R-z_m)^2]^{1/2} \cong R - \frac{(X \cdot x_m + Y \cdot y_m)}{R} + \frac{X^2 + Y^2 + Z^2}{2R} + Z, \quad (6)$$

기준빔 $E_{ref}(r_i)$ 는 다음 식 (7)과 같이 나타내어진다.

$$E_{ref}(r_i) \cong \hat{e} f(r_i) \sum_m \iint dx_m dy_m A_m(x_m, y_m) \times \exp[-ik_o \frac{(X \cdot x_m + Y \cdot y_m)}{R} + i\phi_m] \quad (7)$$

여기에서,

$$f(r_i) = \frac{1}{R} \exp[ik_o (R+Z + \frac{X^2+Y^2+Z^2}{2R})]$$

이다.

신호빔 $E_{obj}(r_i)$ 는 다음과 같은 평면파라고 하자.

$$E_{obj}(r_i) = \hat{e} \exp[ik_o \cdot r_i] \quad (8)$$

체적 홀로그램을 이용한 일반적인 정보 저장 장치에서는 신호빔 $E_{obj}(r_i)$ 에는 이차원적인 영상 정보가 실리게 된다. 이러한 신호빔은 평면파의 중첩으로 생각할 수 있다.

기준빔과 신호빔으로 기록된 체적 홀로그램을 재생하는 입력빔 E_{ref} 이 원래의 기준빔과 동일하지만 단지 Δ_x, Δ_y 만큼 평면상에서 움직여진 모양이라고 가정하자. 이는 위치 선택도를 계산하기 위한 것이다.

$$E_{ref}(r_i) \cong \hat{e} f(r_i) \sum_n \iint dx_n dy_n A_n(x_n - \Delta_x, y_n - \Delta_y) \times \exp[-ik_o \frac{(X \cdot (x_n - \Delta_x) + Y \cdot (y_n - \Delta_y))}{R} + i\phi_n] \quad (9)$$

식 (4), (7)-(9)를 식 (1)에 대입하면 홀로그램에서 회절되는 출력빔을 얻을 수 있다.

$$E_{out}(r; \Delta x, \Delta y) = k_o^2 \int d^3 r_i \frac{\exp[ik_o r - i k_o \cdot r_i]}{4\pi r} \times [\gamma_o \exp(ik_o \cdot r_i) \hat{e} \cdot E_{ref}^*(r_i)] E_{ref}(r_i) = \frac{k_o^2 \gamma_o L_1 L_2 L_3}{R^2 4\pi r} \exp(ik_o r) \sum_{m,n} \iint dp_x^{mn} dp_y^{mn} \text{sinc}(\frac{k_o p_x^{mn} L_1}{2R}) \times \text{sinc}(\frac{k_o p_y^{mn} L_2}{2R}) \iint dx_m dy_m A_m(x_m, y_m) \times A_n(x_m - p_x^{mn} - \Delta x, y_m - p_y^{mn} - \Delta y) \exp[i(\phi_n - \phi_m)] \quad (10)$$

여기에서, $p_x^{mn} \equiv x_m - x_n$, $p_y^{mn} \equiv y_m - y_n$ 이고 L_1, L_2, L_3 은 X, Y, Z 축 방향의 홀로그램의 크기이다.

III. 실험

실험에서는 철이 도핑된 LiNbO_3 광굴절 결정을 홀로그램 매질로 사용하였고 광원으로는 633nm He-Ne 레이저를 사용하였다. 그림 3에 나타난 것처럼, 레이저에서 나온 빛은 두 갈래로 나뉘게 되는데, 신호빔은 평면파로서 홀로그램 매질에 입사하고 기준빔은 대물렌즈로 광섬유에 유도되어 광섬유를 통과하면서 다중 모드 빔으로 변하게 된다.

실험에서는 단일모드와 다중모드 광섬유를 모두 사용하였다. 다중모드 광섬유에서 회절되는 기준빔은 광섬유 내에 존재하는 여러 고차 모드의 중첩에 의한 스펙클 패턴을 가지게 된다. 이러한 스펙클 패턴은 단일모드 광섬유에서도 만들어졌는데, 이는 광섬유의 길이가 10 cm 정도로 짧기 때문에 고차의 클래딩 모드가 광섬유 끝 부분까지 존재하게 되어서 홀로그램을 기록할 때 영향을 미치게 되기 때문이다. 그림 4에는 광섬유에서 회절되는 기준빔의 스펙클 패턴이 나타나 있다.

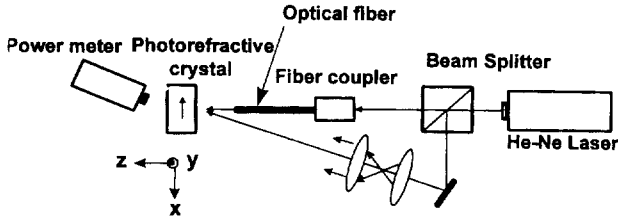


그림 3. 실험 구성도

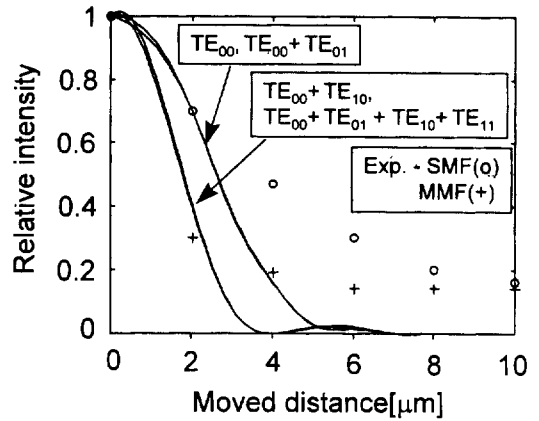


그림 5. x축 방향 위치 선택도의 계산 결과와 실험 결과



그림 4. 광섬유에서 회절되는 스펙클 패턴 (a) 단일모드 광섬유 (b) 다중모드 광섬유

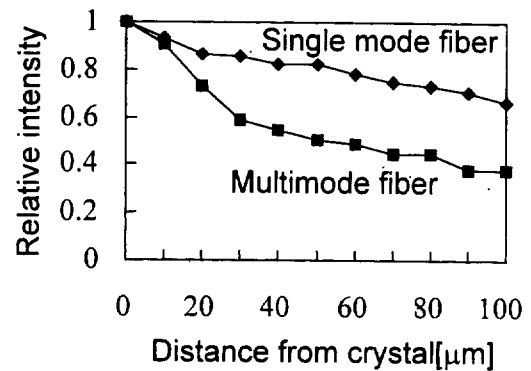


그림 6. 축방향 움직임에 따른 회절 빔세기의 변화

사용된 단일모드 광섬유의 field패턴은 Gaussian분포에서 벗어나 주변에 스펙클을 나타낸다. 전형적인 다중모드의 스펙클 패턴은 그림 4(b)에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 다중모드 스펙클 패턴이 단일모드 광섬유의 스펙클 패턴보다 더 복잡한 것을 알 수 있다. 홀로그래프 기록시의 두 빔의 각도는 15°이었다. 홀로그래프를 재생할 때는 신호빔은 차단되고 기준빔으로 홀로그래프를 재생하여 신호빔을 만들게 된다. 이 때, 기준빔의 스펙클 패턴이 홀로그래프 기록시의 패턴에 대해 상대적으로 움직이게 되면 두 패턴의 상관 관계는 없어지게 되고 회절 효율은 급격하게 작아지게 된다. 하나의 홀로그래프를 저장하고 기준빔(광섬유를) x축 또는 y축 방향(그림 2 참조)으로 약간만 움직여도 재생이 잘 안된다면, 이는 기준빔을 약간 움직인 그 상태에서 새로운 홀로그래프를 저장할 수 있다는 의미가 된다. 이를 위치 다중화(spatial multiplexing) 또는 변이 다중화(shift multiplexing)이라 한다. 본 논문에서 말하는 스펙클 패턴을 사용하는 위치 다중화는 스펙클 패턴을 갖는 기준빔을 x, y축으로 이동시켰을 때 기준빔이 광굴절 크리스탈 내에서 이동시키기 전의 기준빔과 중첩(overlap)이 되어도 상관관계가 매우 작아서 crosstalk이 일어나지 않도록 한다는 것을 의미한다. 위치 다중화에서는 위치에 대한 선택도가 좋을수록 저장 밀도가 높아지게 된다.

그림 5에는 x축 방향 위치 선택도에 대한 계산 결과와 실험 결과가 나타나 있다. 사용된 다중모드 광섬유의 코어지름은 50 μm였다. 식 (10)을 이용한 수치 해석에서는 계산의 편의를 위해 field분포 함수 $A_m(x_m, y_m)$ 는 TE 모드라고 가정하였고 각 모드는 일정한 선형편광을 갖는다고 가정하였다. 광섬유 스펙클 패턴은 이런 TE 모드들의 다양한 위상차이를 갖는 중첩에 의해서 나타나게 된다. 가로 방향의 위치 선택도를 계산하기 위해, 홀로그래프를 재생할 때 입력빔의 위치를 홀로그래프 생성시의 위치에서 x 축을 따라 움직이는 경우 회절되는 빔의 세기를 계산하였다. 홀로그래프는 크리스탈 중간 부분에 기록되어 홀로그래프와 광섬유 단면과의 거리는 5 mm 이상이였다.

계산 결과에서, TE_m 모드의 기준빔인 경우나 TE_{m0} 와 TE_{m1} 모드가 함께 있는 기준빔의 경우 모두 x축으로의 위치 변화에 따른 빔 세기의 변화는 거의 일치하였다. 그러나 기준빔의 모드가 TE_{10} 모드나 TE_{11} 모드를 포함하고 있는 경우의 위치 선택도는 2배 정도 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 x축 방향의 위치 선택도는 x축 방향의 고차모드에 의해 향상됨을 나타낸다. 결국 단일모드 광섬유보다는 고차모드를 포함하는 다중모드 광섬유를 기준빔으로 사용하는 것이 위치 선택도에서 유리함을 알 수 있다. 단일모드 광섬유를 기준빔으로 사용한 경우보다 다중 모드 광섬유를 기준빔으로 사용한 경우의 위치 선택도가 2배 향상되었다. 그리고 2차의 회절 피크(peak)나 주기성 등은 나타나지 않았다.¹¹⁾ 이렇게 개선된 위치 선택도는 각 홀로그래프를 더욱 가깝게 기록할 수 있게 하기 때문에 정해진 홀로그래프 매질에서 저장 밀도를 높일 수 있게 한다.

홀로그래프를 재생할 때 홀로그래프 매질과 광섬유와의 거리(그림 2에서 z축으로의 거리)가 기록할 때의 거리에서 벗어나는 경우 재생되는 빔의 세기 변화에 대한 그래프가 그림 6에 나타나 있다. 식(10)은 홀로그래프를 저장할 때와 재생할 때의 매질과 광섬유 사이의 거리 R이 동일하며 홀로그래프 크기에 비해 매우 크다고 가정하여 유도된 식이다. 홀로그래프를 저장할 때의 R값과 재생할 때의 R 값이 서로 다르다면 식 (7)과 식 (8)에서 서로 다른 R 값을 사용해야 한다. 그러나 그 두 R 값의 차이가 상대적으로 작을 경우 이는 회절효율에 큰 영향을 미치지 못한다. 따라서, 광섬유의 종방향(z방향)으로의 변

화는 횡방향(x, y방향)으로의 변화보다 그 영향이 훨씬 작을 것이며 그림 6에서 이를 확인할 수 있다. 그러나 그림에서 볼 수 있는 것처럼 실험결과에서는 다중모드 광섬유의 경우가 조금 더 민감하게 변화는 것을 알 수 있다. 단일모드 광섬유의 경우에는 100 μm 벗어나도 회절효율이 원래 세기의 70% 이상 유지되어 변화가 적은 것을 알 수 있다. 이는 단일모드 광섬유의 경우는 광섬유 스펙클의 회절 정도가 작기 때문에 생성된 홀로그램의 축방향 크기가 다중모드의 경우에 비해 무시할 만큼 작기 때문이라고 생각된다.

광섬유를 사용한 홀로그램 저장 방법에서, 회절효율이 기준빔(광섬유)의 축방향 변화에 대해서는 민감하지 않는 특성은, 이러한 구조를 가지는 홀로그램 디스크^[15]와 같은 응용 시스템에서 시스템의 안정성을 더해줄 수 있다. 또한, 광굴절 매질과 광섬유 사이의 거리를 바꾸어가면서 홀로그램들을 만들었을 때, 각각의 경우의 가로 방향 위치 선택도는 거의 차이가 없었다. 이러한 실험을 통해 광섬유를 이용한 홀로그램 구조는 축방향(z방향) 움직임에 대해서는 x, y방향보다 상대적으로 둔감한 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광섬유에서 회절되는 스펙클 패턴을 기준빔으로 사용하는 구조에서 홀로그램에서 회절되는 출력빔을 이론적으로 유도하였고 가로방향 위치 선택도를 수치 계산을 통하여 계산하였다. 또한 실험 결과를 통하여 광섬유를 이용한 홀로그램 구조가 홀로그램 저장 장치에의 응용에서 저장 밀도와 안정성을 높일 수 있음을 보였다. 이와 같은 광섬유의 스펙클 패턴을 이용하는 홀로그램 다중화 방법은 저자들이 아는 한 최초로 제안하는 방법이다. 광섬유에 압력 등의 변형을 가한다면 각 모드들이 중첩되는 비율 및 위상이 달라져서

스펙클 패턴에 변화가 나타날 것이며, 이를 이용한 스펙클 다중화 홀로그램 저장 방법도 앞으로 연구되어야 할 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Rakujic and V. Leyva, *Opt. Lett.*, **17**, 1471 (1992).
- [2] C. Gu, J. Hong, and I. McMichael, *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 1978 (1992).
- [3] H. Lee and S. K. Jin, *Appl. Phys. Lett.*, **26**, 2191 (1993).
- [4] J. H. Jang, Y. H. Kang, and H. Lee, *Opt. Lett.*, **20**, 2426 (1995).
- [5] 강용훈, 장재형, 이병호, 제3회 광전자 공학 학술회의 논문집, 143 (1996).
- [6] 장주석, 양준영, 정신일, 제3회 광전자공학 학술회의 논문집, 173 (1996).
- [7] 강용훈 김기현, 이병호, '96 광정보처리 학술발표회 논문집, 104 (1996).
- [8] 김기현, 강용훈, 제원호, 이병호, *Photonics Conference '96*, 231 (1996).
- [9] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, *OSA Annual Meeting, Rochester, NY, USA, MUU2* (1996).
- [10] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, *IEEE LEOS Annual Meeting, Boston, MA, USA*, 268 (1996).
- [11] F. T. S. Yu, K. Pan, D. Zhao, and P. B. Ruffin, *Appl. Opt.*, **34**, 622 (1995).
- [12] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1975), 421
- [13] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory* (John Wiley & Sons, New York, 1986), 237
- [14] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, and G. Barbastathis, *Opt. Lett.*, **20**, 782 (1995).
- [15] A. Pu and D. Psaltis, *Proc. Summer Topical Meeting on Nonlinear Optics, Maui, Hawaii, USA, JTuA6* (1996).

Spatially multiplexed volume hologram using an optical fiber

Yong Hoon Kang, Ki Hyun Kim and ByoungHo Lee

School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received : January 4, 1997)

A speckle pattern from an optical fiber is used for a reference beam in writing and reading a volume hologram. The photorefractive volume hologram with this scheme shows good spatial selectivity for spatial(shift) multiplexing because the speckle pattern in writing and reading a hologram loses correlation with a small spatial shift. This scheme has the insensitivity to axial movement. The data storage system with this scheme will have a high storage density and a good stability in operation. We theoretically analyze the diffracted beam from a volume hologram recorded with the speckle pattern from the optical fiber. Experimental results are presented and compared with numerical analysis.