

# 두 종류의 불순물을 가진 광굴절 물질의 체적 홀로그램 광연결에서 생기는 모드간 공간 전하 필드

황 병 준, 이 혁  
서울대학교 전기공학과

## Intermode Space Charge Fields in Photorefractive Material with Two Impurities for Volume Holographic Interconnections

Hwang, Byeong Joon, Hyuk Lee  
Dept. of Electrical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

### Abstract

The space charge fields, including intermode space charge fields in photorefractive material with two impurities are obtained for the small light intensity at large modulation depth, and their implication of high-capacity volume holographic interconnection are presented. In the following data regions the effect of intermode space charge fields are suppressed and the criteria for optimal implementation of volume holographic interconnections are satisfied.

### 1. 서론

체적 홀로그램은 신경망 컴퓨터의 연결 구현을 위해 전선이나 평면 홀로그램의 강력한 대안으로서 연구되어 왔다. [1] 특히 체적 홀로그램 광연결은 3차원에 정보를 저장함으로써 연결용량( interconnection capacity )의 엄청난 증가에 대한 가능성을 보여주었다. [1]

체적 홀로그램에 많이 쓰이는 것은 광굴절 물질인데 빛의 간섭 무늬가 물질에 비추면 빛의 강도에 따라 전자가 여기 된다. 그후 전자는 drift와 diffusion과정을 거친 후 어느 정도 시간이 지나서 안정된 준위로 떨어진다. 이때 공간의 각 점에서 전하 분포가 변해서 electro-optic effect에 의해서 물질의 굴절율이 바뀐다. 굴절율의 변화는 주기적으로 되어 grating을 만들어 낸다. [4]

그림 1 은 input i 와 output p 간의 체적 홀로그램을 보여준다. i 와 p'에서 나오는 두개의 광선이 간섭을 일으켜서 하나의 grating을 만든다. grating을 만든후 i 에서 나오는 빛은 grating에 의해 산란되고 다시 점 p 로 초점이 맞추어진다. 따라서 저장된 grating wave vector ( $K_{op}$ 로 표시됨)은 점 i 와 p 를 연결한다.

이전의 연구에서는 비선형적인 광굴절 기록 메카니즘과 평행이 아닌 간섭 패턴의 경우에, 두 불순물을 가진 광굴절 물질의 공간 전하 필드에 대한 연구는 없었다. 광연결 용량을 늘리기 위해서는 빛의 간섭 패턴이 평행일 수 없다. 따라서

이 논문에서는 평행이 아닌 간섭 패턴의 경우, 레이저 세기가 작을때 두 가지 불순물을 가진 광굴절 물질의 모드가 공간전하 필드를 구하고자 한다. 그리고, 고용량 체적 홀로그램의 경우 그것이 어떤 의미를 지니는지 살펴볼 것이다.

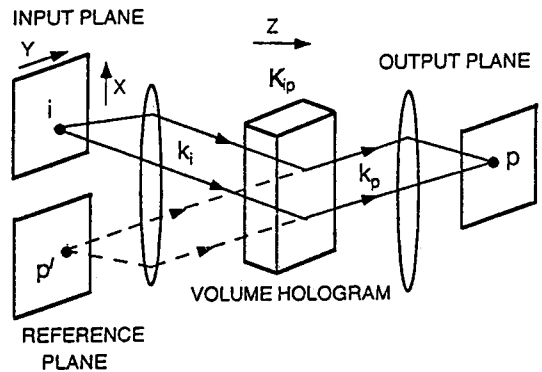


그림 1

### 2. 체적 홀로그램 광연결을 위한 최적 조건

체적 홀로그램에서  $K_1, K_2$  두개의 phase grating을 생각하면, 각각의 grating은 각각 간섭 beam에 의해 생겨난다. 전체 빛의 간섭식은

$$I = \sum_{\alpha=1}^2 I_{\alpha} \left[ 1 + \frac{1}{2} m_{\alpha} \left( e^{i(K_{\alpha} \cdot X + \phi_{\alpha})} + e^{-i(K_{\alpha} \cdot X + \phi_{\alpha})} \right) \right]$$

로 주어진다[11].  $I_{\alpha}$ 는  $\alpha$ 번째 간섭의 전체 빛의 세기이다. 즉  $m$  는 modulation depth,  $K_{\alpha}$ 는 grating wave vector,  $\phi_{\alpha}$ 는 두개의 간섭 beam사이의 relative phase이다.

기존의 논문에서 최적의 광연결을 위한 기준이 연구되었는데 [5][6][7], 그것을 요약하면

- 1) 공간 전하 필드의 fundamental fourier component는 writing beam의 총 세기에 비례하여야 한다.
- 2) writing beam 사이에 beam coupling은 최소화되어야 한다.

- 3) modulation depth는 최대로 커야한다.
- 4) 고차의 Fourier component는 최소화 되어야한다.
- 5) 모드간 공간전하 필드는 최소화되어야한다. [11]

3. 빛의 세기가 작은 경우 공간 전하 필드의 해석

공간 전하 필드를 발생시키는 빛의 간섭 패턴은 두개의 writing beam 사이에 frequency detuning을 포함하는 것으로 일반화 된다. frequency detuning의 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔다. [8 - 10] 공간 전하 필드를 발생시키는 전체 빛의 패턴은, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \sum_{\alpha=1}^2 I_{\alpha} \left[ 1 + \frac{1}{2} m_{\alpha} \left( e^{j(K_{\alpha}x + \delta\omega_{\alpha}t + \phi_{\alpha})} + e^{-j(K_{\alpha}x + \delta\omega_{\alpha}t + \phi_{\alpha})} \right) \right]$$

$\delta\omega_{\alpha}$ 는 두개의 간섭 평면사이의 detuning frequency이다.

Kukhtarev[11]에 의해 제안된 방정식과, 두 종류의 불순물이 있는 광굴절 물질의 경우 Carrascosa와 Agullo-Lopez[12]에 의해 제안된 방정식의 결합으로 시작한다.

BSO에 대한 데이터는 참고문헌 [6]의 값을 기초로 하여 정하였으며, 그 값은 다음과 같다.

$\sigma_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{J}^{-1}$	$\sigma_2 = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{J}^{-1}$
$A_1 = 10^{18} \text{ m}^{-3}$	$A_2 = 1.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
$N_1 = 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$N_2 = 1.1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
$N_A = 10^{22} \text{ m}^{-3}$	$\mu = 0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$\gamma_1 = 1.6 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$\gamma_2 = 1.8 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
$\epsilon = 56 \epsilon_0$	$E_0 = 5 \text{ kV cm}^{-1}$
$A = 0.117 \times 10^{-6} \text{ m}$ (grating spacing)	

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \sigma_1 I D_1 + \sigma_2 I D_2 - \gamma_1 A_1 n - \gamma_2 A_2 n - \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial t} = -\sigma_1 I D_1 + \gamma_1 A_1 n$$

$$\frac{\partial D_2}{\partial t} = -\sigma_2 I D_2 + \gamma_2 A_2 n$$

$$e \nabla \cdot \mathbf{E} = e(n - (A_1 + A_2) + N_A)$$

$$\mathbf{J} = \mu n e \mathbf{E} - \mu K T \nabla n$$

$\sigma_1, \sigma_2$ : cross section  
 $\gamma_1, \gamma_2$ : trapping coefficient  
 $n$ : electron concentration  
 $A_1, A_2$ : ionized donor concentration  
 $D_1, D_2$ : non-ionized donor concentration  
 $\mu$ : carrier mobility

$$w_T = \frac{\bar{E}_T}{E_0}, \quad u_T = \frac{\bar{v}_T}{N_A}, \quad \bar{y} = \left( \frac{\delta\omega_1}{\gamma_1 N_A}, \frac{\delta\omega_2}{\gamma_2 N_A} \right), \quad a_{IT} = \frac{\bar{A}_T}{D_0}$$

$$\bar{N}_T = \frac{I_1 \bar{K}_1 + I_2 \bar{K}_2}{K_1 + K_2}, \quad T = \gamma_1 N_A t$$

$$E_0 = \frac{e N_A}{\epsilon(K_1 + K_2)}, \quad E_0 = \frac{kT(K_1 + K_2)}{e}$$

$$E_M = \frac{\gamma_2 N_A}{\mu(K_1 + K_2)}, \quad \gamma_0 = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$$

#### 4. 결과 및 분석

빛에 대한 광굴절물질 BSO( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ )의 반응을 결정하는 Kukhtarev와 Carrascosa의 비선형 미분방정식의 해가 전기장과 자유캐리어 밀도를 복소 Fourier series로 전개해서 여러 개의 대수식으로 표현되었다. 방정식의 해를 구하기전에 레이저의 세기가 작도록 하고, 2장에서 최적의 광연결을 위한 조건중 modulation depth를 최대로 크게 한다는 것을 ( $m=1$ ) 가정한다. 외부 인가 전기장은 y축 방향이고,  $K_1$ 은 y축에서  $+5^\circ$   $K_2$ 는 y축에서  $-5^\circ$  기울어져 있다.

2장의 최적 광연결 조건 1)에서, 공간 전하 필드의 fundamental Fourier component( $W_{10}$ )는 writing beam의 총 빛

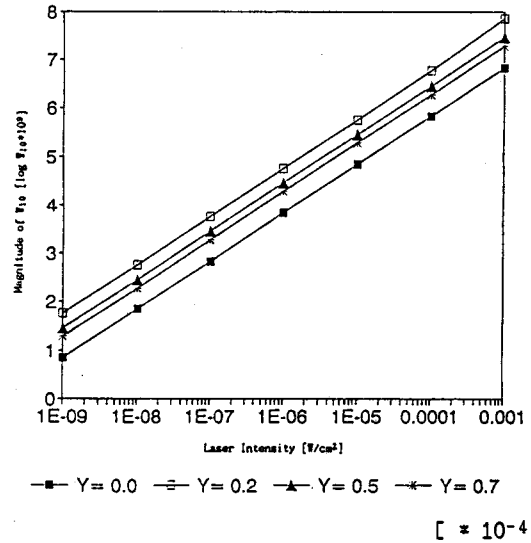


그림 2. 여러가지 Detuning frequency 에서, Laser Intensity의 변화에 따른  $W_{10}$ 의 크기

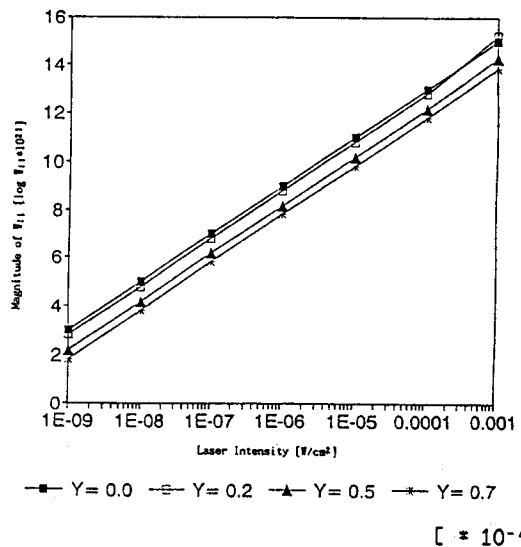


그림 3. 여러가지 detuning frequency 에서, laser intensity의 변화에 따른  $W_{11}$ 의 크기

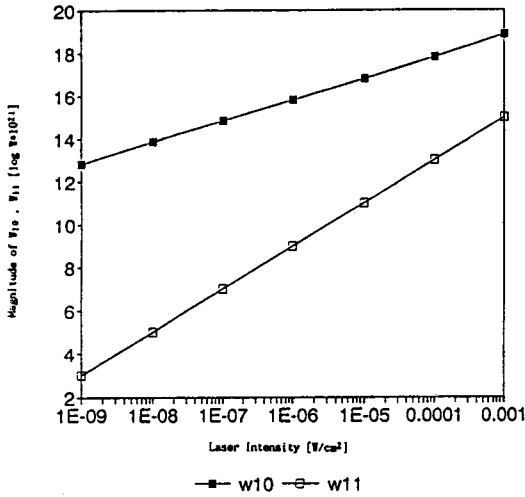


그림 4. Laser Intensity의 변화에 따른  $W_{10}$ 와  $W_{11}$ 의 비교 ( $y = 0.0$ 인 경우)

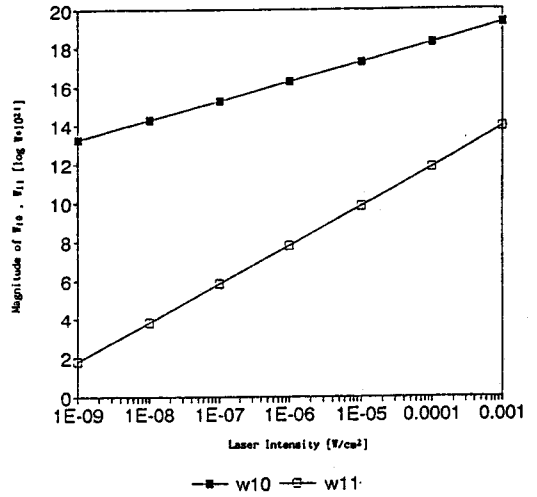


그림 5. Laser Intensity의 변화에 따른  $W_{10}$ 와  $W_{11}$ 의 비교 ( $y = 0.75 \times 10^{-4}$ 인 경우)

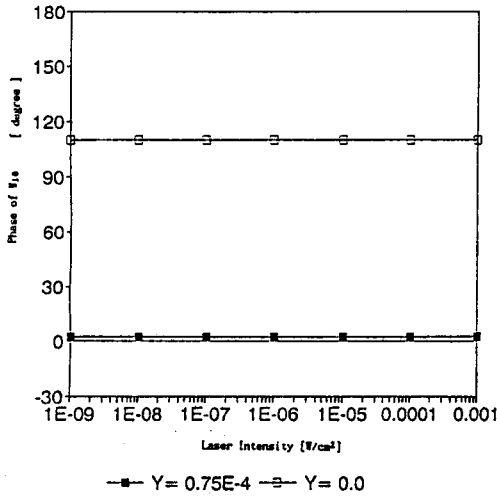


그림 6. Laser Intensity의 변화에 따른  $W_{10}$ 의 phase

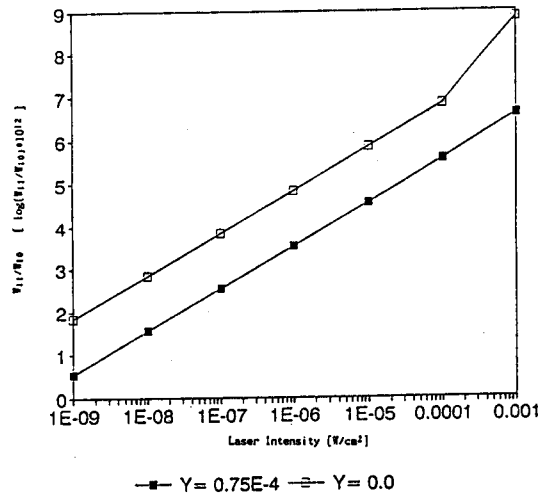


그림 7. Laser Intensity의 변화에 따른  $W_{11}$ 과  $W_{10}$ 의 비

의 세기 ( $I$ )에 비례해야 한다고 했다. detuning frequency  $y$ 가 0.0,  $0.25 \times 10^{-4}$ ,  $0.5 \times 10^{-4}$ ,  $0.75 \times 10^{-4}$ 인 경우에  $W_{10}$ 의 값을 그림 2에 표시했다. 그림 2에서 보는바와 같이 레이저 세기가  $1mW/cm^2$ 까지 증가할때  $W_{10}$ 가 거의 선형적으로 증가하고 있어서 최적 광연결 조건 1)을 만족한다.

그림 3에서는  $y$ 가 0.0,  $0.25 \times 10^{-4}$ ,  $0.5 \times 10^{-4}$ ,  $0.75 \times 10^{-4}$ 인 경우에  $W_{11}$ 의 크기를 비교해 보았다.  $y$ 가 클수록 cross talk을 일으키는 요인인  $W_{11}$ 의 크기가 작아진다는 것을 볼 수 있다.

한편 두개의 writing beam사이의 beam coupling의 정도는 간섭 패턴과 공간 전하 필드의 fundamental Fourier component와의 relative phase 차이에 의해서 결정된다. 그리고 최대 beam coupling은 phase차가  $90^\circ$ 일 때 일어난

다. [3] 최적 광연결을 위해서 beam coupling이 최소가 되면 phase차가  $0^\circ$ 에 가까워야한다. 그림 (6)의 결과에서  $y = 0.75 \times 10^{-4}$ 인 경우(즉 moving light interference pattern), 레이저 세기의 넓은 영역에서 phase 차가 매우 작은 것을 보여주어서 최적 광연결 조건 2)도 만족시킨다.

또한 넓은 범위의 작은 레이저 세기에서 공간 전하 필드의 2차 Fourier component가 fundamental Fourier component보다 매우 작게 나타났다. 레이저의 세기가  $1mW/cm^2$ 까지 증가할 동안  $W_{10}$ 가  $W_{11}$ 보다 10000배가 되는 것을 볼 수 있다. (그림 7) 따라서, 이것은 공간 전하 필드의 고차 Fourier component가 매우 작다는 것을 나타내며 이것은 최적 광연결 조건 4)도 만족시킨다. 두개의 간섭 패턴에 의해 생겨나는 모든 공간 전하 필드도 fundamental Fourier component에

비해 매우 작아서, cross talk 의 효과는 억제될 수 있다. 그림 4 에서는  $y=0.0$  인 경우,  $W_{10}$  와  $W_{11}$  의 크기를 비교하였는데, 레이저의 세기가 커질수록  $W_{10}$  와  $W_{11}$  의 차이가 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이것은 레이저의 세기가 커질수록 cross talk 를 일으키는 요인이 되는  $W_{11}$  이  $W_{10}$  에 비해 커지는 것을 의미하므로 레이저의 세기가 커지면 최적 광연결 조건이 만족되지 못한다. 따라서  $W_{10}$  가 충분히 커서  $W_{11}$  을 무시할 수 있을 정도로 작은 세기의 레이저를 사용해야한다.

그림 5 에서도  $y=0.75 \times 10^{-4}$  인 경우  $W_{10}$  와  $W_{11}$  의 크기를 비교하였는데, 레이저의 세기가 커지면서  $W_{10}$  와  $W_{11}$  의 차이가 그림 4 의 경우 ( $y=0.0$ ) 보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 고차의 Fourier component 는, detuning frequency 가 존재할 경우 fundamental Fourier component 와 비교할 때 상대적으로 더 작아져서 영향을 거의 미치지 못한다. 그림 6 에서도 detuning frequency 가 존재할 경우에 phase 가 0 에 가까워서 최적 광연결에 적합한 조건으로 나타난다. 따라서 detuning frequency 가 존재해야 최적 광연결이 된다.

### 5. 결론

앞에서, 레이저 세기가 작고 modulation depth 가 큰 경우의 간섭 패턴을 광굴절 물질에 가했을 때, 두 종류의 불순물을 가지는 광굴절 물질에서 모든간 값을 포함하는 공간 전하 필드를 구했다. 레이저 세기가 작고 modulation depth 가 큰 조건은 고용량 체적 홀로그래프 광연결에서 필수적이다. 공간 전하 필드의 fundamental Fourier component 는 레이저 세기에 비례하는 것으로 나타나서 최적 조건을 만족시켰다.

작은 레이저 세기의 넓은 범위에서 공간 전하 필드의 고차 Fourier component 는 fundamental Fourier component 와 비교해 볼 때 무시할 수 있을 정도라는 것이 판명되었다. 또 cross talk 문제를 일으키는 모든간 공간 전하 필드도 위와

같은 세기의 레이저에서 무시될 수 있는 것으로 결과가 나왔다. 최적 광연결을 위해서 beam coupling이 최소가 되려면 phase차가 0°에 가까워야한다.  $y = 0.75 \times 10^{-4}$ 인 경우 (detuning frequency가 존재할 경우), 레이저 세기의 넓은 영역에서 phase 차가 매우 작은 것을 보여주어서 최적 광연결 조건을 만족시킨다. 따라서, 두가지 불순물을 가진 광굴절 물질에서 위의 조건을 만족시킬때, 최적 광연결이 가능하다.

구체적인 광연결 용량을 늘리기 위해 두가지 불순물 사이의 비를 조절하는 방법에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

### 6. 참고 문헌

- [1] D.Psaltis, J.Yu, X.Gu, and H.Lee, in Technical Digest Series at the Topical Meeting on Optical Computing, Lake Tahoe (Optical Society of America, Washington, DC, 1987), Vol.11, pp. 129-132.
- [2] H.Lee, X.Gu, and D.Psaltis, J.Appl.Phys.65,2191(1989)
- [3] J.Yu, Ph.D. thesis, California Institute of Technology, 1988
- [4] W.S.Baek and H.Lee, J. Appl. Phys.67,1194(1990)
- [5] J.J.Amodei, RCA Rev.32,185(1971)
- [6] P.Gunter, Phys.Rep.93,199(1982)
- [7] E.Ochoa, F.Vachss, and L.Hesselink, J.Opt. Soc. Am. A3, 181(1986)
- [8] S.I.Stepanov, K.Kolikov, and M.Petrov, Opt. Commun. 44, 19(1982)
- [9] Ph.Refrégier, L.Solymar, H.Rajbenbach, and J. P. Huignard, J. Appl. Phys.58,45(1985)
- [10] F.Vachss and L.Hesselink, Appl.Opt.27,14(1988)
- [11] H.Lee and W.S.Baek, J. Appl.Phys.66,1908(1989)
- [12] M.Carrascosa and F.Aguilo-Lopez, Appl. Opt. 27, 2851(1988)