

Cu-KNSBN 결정에서 시변조된 광신호의 광굴절 2광파결합 특성 및 응용*

소 지 영

순천대학교 공과대학 전기제어공학과

이 권 연

순천대학교 공과대학 전자공학과

(1998년 1월 5일 받음, 1998년 2월 24일 수정본 받음)

Cu 도핑된(0.04 wt.%) 광굴절 ($(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.2}(Sr_{0.61}Ba_{0.39})_{0.4}Nb_2O_6$) 결정에서 두 빔간의 에너지 교환특성을 632.8 nm He-Ne 레이저 파장에서 해석하고 측정하였다. 또한 신호빔 혹은 기준빔이 고주파에서 진폭 변조될 때 광유기된 굴절을 부피 격자의 코히어런트한 2광파 결합 특성을 해석하고 실험하였으며, 코히어런트 광통신 시스템 및 광신호처리 분야에서 동적 광굴절 결합기 및 펄스 shaping 소자로 활용하기 위한 예비 실험 결과를 제시했다.

I. 서 론

광굴절(Photorefractive : PR) 결정에서 광파결합은 실시간 홀로그래픽 성질뿐만 아니라 TWM(two-wave mixing)에 의한 두 빔 사이의 에너지 교환, 자기펌핑(self-pumping) 및 FWM(four-wave mixing)에 의한 위상공액 특성으로 인해 현재 광정보처리, 고밀도 광정보저장, 광컴퓨팅 등과 같은 다양한 분야에 적용하기 위한 광범위한 연구가 진행되고 있다.^[1]

일반적으로 코히어런트(coherent)한 두 개의 빔이 PR 결정에서 결합하면 두 빔간에 비가역적인 에너지 교환이 발생하게 되고, 결정 내에서 이러한 빔 결합 특성은 광유기된 굴절을 부피 격자와 광 간섭 패턴(light interference pattern)간의 공간적인 위상천이 Φ 에 기인한다. 낮은 광세기에서도 강한 PR 효과를 나타내는 BaTiO₃, SBN, KNSBN 등과 같은 비교적 큰 전기 광학 계수를 갖는 PR 매질의 경우, TWM에 의해 형성된 굴절을 부피 격자가 오직 광캐리어의 확산에 의해서만 유도되면 Φ 는 $\pi/2$ 가 되고 한 빔에서 다른 한 빔으로 옮겨간 에너지량은 최대가 된다. 그러나 이러한 전형적인 CW 레이저 빔에 의한 TWM 구조와는 다르게 최근에는 두 빔 중 한 빔이 고주파에서 진폭 변조(혹은 위상 변조)될 때 시변(time-varying) 입력 신호빔에 대한 PR 매질의 광파결합 특성 및 많은 응용 분야들이 보고되고 있다.

입력신호가 짧은 펄스 혹은 계단 함수일 때의 과도적인 에너지 결합특성은 Vinetskii, Kukhtarev, Valley, Au, Heaton 및 Solymar 등에 의해 제시되었고,^[2,23] 이후 Cronin-Golomb는 Heaton과 Solymar에 의해 발표된 해를 확장하여 undepleted-pump-beam 조건하에서 PR 결정에 입사되는 두 빔 중 한 빔이 시변일 때 TWM의 시간응답 특성 및 해석적인 해를 발표했다.^[2] 그리고 Hamel de Montchenault et al. 등에 의해 신호빔이 고주파에서 진폭 변조 되었을 때 BSO 결정에서 동 간섭 패턴(moving

fringe pattern)을 이용한 시변 신호의 증폭과 코히어런트 검파(coherent detection)에 관한 이론적 해석 및 실험이 행해졌으며, PR 결정의 시간 적분 성질에 의해 결정을 빠져나온 시변 신호는 변조 주파수가 매질의 반응시간(response time)의 역수보다 훨씬 큼에도 불구하고 높은 이득을 얻을 수 있음을 입증하였다.^[3,4] 또한 Dolfi et al. 등은 낮은 반응시간을 갖는 BaTiO₃ 결정을 이용하여 수 GHz의 마이크로파 신호를 증폭하고 검파하는 방식을 제안하고 실험하였다.^[5] 그리고 Davidson과 Boutsikaris는 PR 부피 격자의 광파결합 특성과 기존 호모다인 수신기(homodyne receiver)의 수동 빔 분할기(passive beam splitter)와의 유사성을 이용하여 PR 매질을 코히어런트 광통신 시스템에서 수신된 신호 광파와 강한 국부 발진기(local oscillator)의 광파를 코히어런트 하게 결합하는 빔 분할기로 적용할 것을 제안하고 비교 해석하였다.^[6]

최근에는 이 분야와 관련하여 PR 결정을 영상 시-미분기(time-differentiator), 레이더 신호처리, 광학적 전치증폭기(preamplifier), 코히어런트 호모다인 검파, 광학적 lock-in 검파, 장기 저장(long-term storage), 광학적 적응 전송(adaptive transmission) 및 주파수 변환 소자 등으로 적용하기 위한 연구 결과가 발표되고 있다.^[5,9]

본 논문에서는 전형적인 TWM 실험을 통해 광굴절 Cu-KNSBN 결정의 광학적 특성을 632.8nm 레이저 파장 영역에서 조사하고, 결정에 입사되는 입력 빔의 세기가 고주파에서 진폭 변조 될 때 시변 신호빔에 대한 PR 결정의 2광파결합 특성을 실험하고 해석한다. 그리고 이러한 시변 입력 신호빔의 2광파결합 특성을 이용하여 동적 광굴절 결합기(dynamic photorefractive combiner) 및 펄스 shaping 소자로서의 응용 방법을 제시하고 실험적으로 입증한다.

II. Cu-KNSBN 결정의 2광파결합 특성

KNSBN 결정은 tungsten-bronze 형의 $(K_{1-y}Na_y)_{2-x}Z(Sr,Ba_{1-x})_{2-x}A$

*이 논문은 1996년도 순천대학교 공과대학 학술재단 연구비에 의하여 연구 되었습.

Nb₂O₆ 고용체계(solid-solution system)에 속하고 A=1.1일 때는 결정학상 A자리가 부분적으로 채워진 구조(partially filled structure)이고, A=1.2일 때는 완전히 채워진 구조를 취한다. Neurgaonkar,^[10] Rodriguez^[16]에 의해 보고된 Ba_{2-x}Sr_xK_{1-y}Na_yNb₅O₁₅(BSKNN)의 결정은 완전히 채워진 KNSBN과 기본적으로 같은 구조이다. 이러한 tungsten-bronze계 KNSBN 결정의 경우 다른 강유전성 PR 매질에 비해 비교적 큰 크기로 결정 성장이 용이 할 뿐만 아니라 90° 분역(ferroelectric domain)을 갖지 않기 때문에 BaTiO₃ 결정에 비해 분극(poling) 작업이 쉽고, 낮은 온도(10°C)에서 강유전성 상전이(phase transition)가 일어나지 않으므로 사용하기 편한 특징을 갖는다. 또한 longitudinal 전기 광학 계수 r₃₁ 및 r₃₃은 Ba-Sr 및 K-Na의 조성비에 의해 조절이 가능하고, 결정학상 빈자리가 존재하기 때문에 Ce, Cu, Cr 등과 같은 도판트(dopant)의 도핑에 의해 PR 특성을 크게 변화시킬 수 있는 잇점을 갖는다.^[10,12]

본 논문에서 사용된 KNSBN결정은 Cu가 0.04 wt.%로 도핑된 (K_{0.5}Na_{0.5})_{0.2}(Sr_{0.61}Ba_{0.39})_{0.9}Nb₂O₆를 사용했고 결정의 크기는 5 mm × 5 mm × 5 mm이다. 본 결정의 경우 결정학상 12-폴드(fold) 및 15-폴드 좌표자리의 91.67%(=1.1/1.2)가 K⁺, Na⁺, Sr²⁺, Ba²⁺이온에 의해 점유되어 있고, 6-폴드자리에는 Nb⁵⁺이온에 의해 점유된 구조를 취하고 있다. 그리고 Cu 이온은 12-폴드 자리를 점유한다. 일반적으로 Cu-KNSBN 결정에서의 2광파 결합 특성은 전형적인 TWM 실험을 통해 조사할 수 있다.

만약 결정에 입사되는 신호빔 I_s(0)와 기준빔 I_r(0)에 의해 형성된 PR 부피격자의 파수 벡터(grating wave vector) K_g의 방향이 결정의 C축과 평행이 되도록 정렬되었다고 가정하면, I_s(0) < I_r(0) 조건에서 약한 신호빔이 경험하는 이득은 흡수에 의한 손실을 무시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.^[13]

$$G = \frac{I_s(\text{with reference beam})}{I_s(\text{without reference beam})} = \frac{(1+q)\exp\Gamma L}{1+q\exp\Gamma L} \quad (1)$$

여기서 q (=I_s(0)/I_r(0))은 두 입사 빔의 세기비, I_s는 신호 빔의 광세기, L은 결정내에서 두 빔의 상호 작용 길이이고 지수이득계수(exponential gain coefficient) Γ는 다음과 같이 표시된다.

$$\Gamma = \frac{2\pi r_{eff} E_{sc}}{\lambda m} \left(\frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} \right) \quad (2)$$

여기서 n은 굴절률, m은 격자의 변조지수(modulation index)이고 m=2(I_sI_r)^{1/2}/(I_s+I_r), θ는 결정내에서 두 빔의 교차 반각(half crossing angle)이고 cos 2θ 및 cos θ는 두 빔의 편광 방향 및 비축 전파(off-axis propagation)에 관계되는 인자이다. 그리고 유효 전기광학 계수 r_{eff}는 입사 빔의 편광 상태 및 입사각에 따라 이상 편광(extraordinary polarization)인 경우 r_{eff}=r₃₃n_e⁴cos²θ-r₁₃n_o⁴sin²θ이고, 여기서 n_e는 이상 굴절률(extraordinary refractive index), n_o는 정상 굴절률(ordinary refractive index)이다.

만약 결정에 외부에서 전기장을 인가하지 않으면 KNSBN 결정에서 공간 전하장(space-charge electric field)은 오직 확산에 의해서만 유도되고, Kukhtarev의 물질방정식으로부터

정상상태에서 공간 전하장은 허수가 되며 공간 전하장의 크기는 다음과 같이 구해진다.^[13,17]

$$E_{sc} = \frac{RK_B T m}{e} \frac{K_g}{1 + \left(\frac{K_g}{K_o} \right)^2} \quad (3)$$

여기서 R은 전자와 정공의 경쟁 인자(competition factor), 두 빔의 간섭에 의해 형성된 주기적인 광간섭 패턴의 무늬 간격(fringe pattern)을 Λ_g라고 하면 K_g=2π/Λ_g이고, K_BT/e는 전하당 열에너지이며, K_B는 볼츠만(Boltzmann) 상수이고 T는 온도이다. 그리고 K_o는 PR 효과에 관여하는 캐리어의 유효 전하밀도 N_{eff}에 관계되고 K_o²=e²N_{eff}/K_BTεε_o으로 표시되며, 여기서 ε는 유전율 상수(dielectric constant), ε_o는 자유공간의 유전율(permittivity)이고, TWM 실험에서 최대 지수이득계수 Γ_{max}를 갖는 θ_{peak}를 구하면 N_{eff}를 결정할 수 있다. 그림 1은 앞에서 언급한 TWM 실험 조건에서 광원으로는 이상 편광된 35 mW 출력의 He-Ne 레이저(λ=632.8 nm)를 이용하였고, 상호 작용 길이 L=~0.5 cm, 두 빔의 세기비 q=0.0016일 때 두 빔의 외부 입사각에 따른 지수이득계수 Γ를 측정 한 결과이다. 본 결정의 경우 지수이득계수는 두 빔의 외부 입사각이 24°가 될 때 최대가 되고 입사 각도가 증가하게 되면 다른 강유전성 PR 매질과 마찬가지로 감소하게 된다. 그리고 그림 1에서 곡선은 λ=632.8 nm에서 n_o=2.35, n_e=2.3, r₃₃=250×10⁻¹² m/V, r₁₃=50×10⁻¹² m/V, ε₃₃=500 일 때 식 (2)를 측정값에 fitting하여 얻은 곡선이다. 여기서 fitting 변수 N_{eff}는 1.2×10¹⁶ cm⁻³이고 R은 0.61이다.

그림 2는 최대 지수이득계수를 갖는 외부 입사각 조건에서 빔의 세기비 q를 변화시켰을 때 신호빔의 이득 G를 측정 한 곡선이다. 측정된 이득 곡선은 식 (1)에서 예측한 바와 같이 q에 따라 거의 지수 함수적으로 증가하다가 q≤0.0016에서 포화상태가 된다. 이 경우 Cu-KNSBN 결정의 최대 지수이득계수 Γ_{max}는 9.82 cm⁻¹이고, 이 결과는 이미 보고된 바 있는 Cu 도핑된 (0.26 wt.%) KNSBN^[14]의 최대 이득계수(Γ_{max}=7.2 cm⁻¹)에 비해 다소 차이가 있으나 이는 도핑 농도 및 사용 파장이

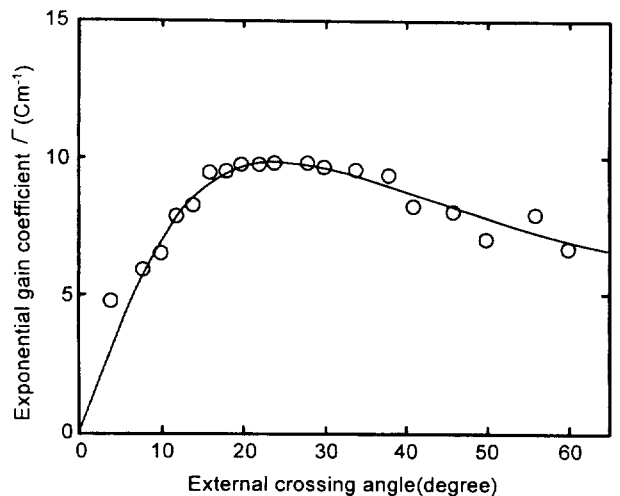


그림 1. 외부 입사각에 대한 지수이득계수 Γ.

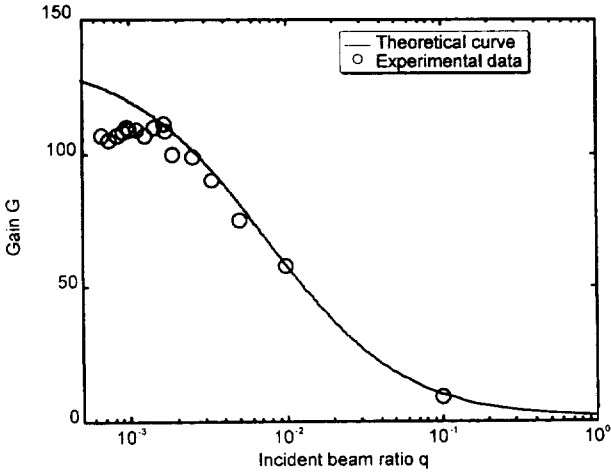


그림 2. 두 간섭 빔의 세기비 q에 따른 신호빔의 이득.

다르기 때문에 생긴 결과로 인식된다.

또한 TWM 실험에서 증폭된 신호빔이 정상상태 값의 $(1-e^{-1})$ 에 도달하는 시간으로 Cu-KNSBN 결정의 반응시간을 정의할 때, $q=0.01$, $I(0)=16\text{ mW}$ 입사조건에서 측정된 반응시간은 ~45 sec 정도이다. 일반적으로 도핑된 KNSBN 결정의 경우 도핑에 의해 이동도와 재결합 시간의 곱 및 확산길이(diffusion length)가 감소하기 때문에 도핑 안된 시료의 경우 보다 10배 정도 향상되며, Cu 도핑된 KNSBN 결정의 경우 $\lambda=514.5\text{ nm}$ 에서 반응시간은 입사광의 세기 I에 대해 $\sim 10^{17}$ 로 보고된 바 있다.^[14]

III. 진폭변조된 시변 신호빔의 2광파결합 특성

본장에서는 2장의 전형적인 CW 레이저 빔에 의한 TWM 실험 조건과는 다르게 결정에 입사되는 두 빔 중 한 빔의 세기가 고주파에서 진폭변조될 때 시변 신호빔에 대한 2광파결합 특성을 알아본다. Cu-KNSBN 결정에서 2광파결합 특성을 조사하기 위한 실험 구성도는 그림 3과 같고, 실험에 사용된 광원은 이상 편광된 35 mW 출력의 He-Ne 레이저를 사용했으며 CW 레이저 빔에 의한 전형적인 TWM 실험 조건과는

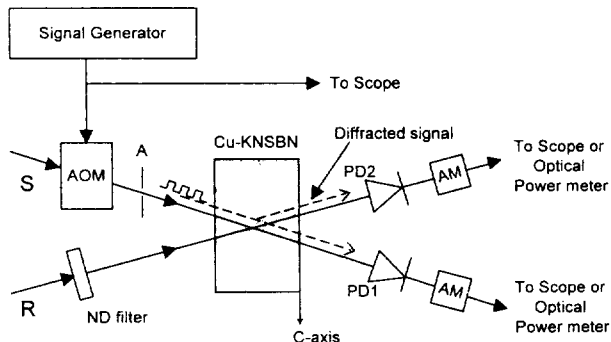


그림 3. 진폭 변조된 신호빔과 변조되지 않은 기준빔을 포함하는 TWM 실험 구성도(R: reference beam, S: signal beam, ND: neutral density, A: aperture, PD: photodiode, AM: amplifier, AOM: acousto-optic modulator).

다르게 신호빔의 경로에 음향광변조기(acousto-optic modulator: AOM)를 삽입시켜 신호빔의 세기를 참고문헌3의 실험 조건(예를 들면, AOM에서 음향파에 의한 신호빔의 주파수 천이를 억제하는 구조)과 마찬가지로 주기적인 구형파 전기신호에 의해 진폭 변조시켰다.^[3] 그리고 진폭이 S인 시변 신호빔 S(t)와 기준빔 R의 입사각은 2장의 2광파결합 실험에서 얻은 최대 지수이득계수를 갖는 외부 입사각 조건(24°)으로 입사시켰고 ND 필터를 이용하여 두 빔의 세기비 q를 변화시켰다.

일반적으로 코히어런트한 기준빔과 진폭 변조된 약한 신호빔의 간섭에 의해 PR 결정에서 광유기된 굴절을 변조는 PR 결정의 시적분 성질에 의해 변조지수의 시평균값에 비례하는 정상상태 굴절을 부피 격자를 형성한다. 더구나 시변 신호빔의 변조지수가 충분히 작다면 이미 형성된 시평균 부피 격자를 심각하게 변화시키지 않을 것이고 정적인 경우와 마찬가지로 부피 격자에서의 자기 회절현상에 의해 두 빔 사이에는 비가역적인 에너지 교환이 발생하게 된다. 따라서 AOM에 인가되는 구형파 전기신호의 듀티 사이클(duty cycle)을 d라고 하고, 변조되지 않은 CW 신호빔과 기준빔의 간섭에 의해 광유기된 굴절을 변조의 최대 진폭을 Δn_0 라고 하면 시변 신호빔에 의해 유기된 굴절률 변조의 크기 $\Delta n = d\Delta n_0$ 로 표시된다.^[3]

그리고 부피격자의 회절효율 η 는 $R^2/S^2 \gg \exp \Gamma' L > 1$ 이고, 결정에 의한 흡수를 무시하면 Kukhtarev의 물질 방정식으로부터 다음과 같이 표시된다.^[17]

$$\eta = qd^2 \left[\exp \left(\Gamma' L / 2 \right) - 1 \right]^2 \quad (4)$$

여기서 시변조된 신호빔 조건에서 2광파결합의 지수이득계수의 크기는 $\Gamma' = 4 \pi \Delta n / \lambda \cos \theta$ 이므로 CW 레이저 빔에 의한 지수이득계수 Γ 와는 $\Gamma' = d \Gamma$ 관계이고 Γ' 는 d값에 따라 변하게 된다. 만약 AOM에 인가되는 구형파 신호 파형의 온(on) 및 오프(off) 시간 간격이 같으면 Γ' 는 Γ 에 비해 0.5배 감소하게 된다. 또한, 앞장에서 서술한 바와 같이 결정에 외부 전계를 인가하지 않은 경우, 내부 공간 전하장은 오직 캐리어의 확산에 의해서만 유도되고 광간섭 패턴과 굴절률 변조사이에는 $\pi/2$ 위상차가 존재하게 된다. 그리고 이 위상차에 의해 굴절률 부피 격자로부터 신호빔의 진행방향으로 회절된 기준빔은 신호빔과 정확히 동위상으로 더해지기 때문에 신호빔은 결정내의 상호 작용 길이에 따라 지수 함수적으로 증폭하게 된다. 따라서 주파수 f에서 진폭 변조된 시변 신호빔과 변조되지 않은 기준빔이 부피 격자에 의해 서로 코히어런트하게 더해진 후 광검출기에 의해 검출된 신호빔의 세기는 다음과 같이 표시된다.^[3]

$$I^2 = |S(t) + \sqrt{\eta} R|^2 \quad (5)$$

그리고 식 (4), 식 (5) 및 참고문헌 3에서 전달된 신호빔의 ac 이득에 관한 유도 수식(참고문헌3의 식 (11) 및 식 (12))을 이용하면 $d=0.5$ 일때 시변 신호빔의 정상 상태 ac 이득 G_{sac} 및

dc 이득 G_{sdc} 는 각각 $G_{sac} = \exp(\Gamma L/2)$ 및 $G_{sdc} = \exp(\Gamma L)$ 로 포화되므로 $G_{sac} = \sqrt{G_{sdc}}$ 로 등가화 된다. 여기서 G_{sac} 는 전달된 신호빔 세기의 peak-to-peak 진폭을 입력 신호빔 세기의 peak-to-peak 진폭으로 나눈 값으로 정의하고, G_{sdc} 는 전달된 시변 신호빔의 세기(dc 성분)를 입력 시변 신호빔의 세기(dc 성분)로 나눈값으로 정의한다. 그리고 시변 신호빔이 부피 격자에 의해 기준빔의 진행 방향으로 회절될 때는 두 빔의 90° 위상차는 더해지므로 결론적으로 180° 위상차로 존재하게 되어 정상상태에서 기준빔의 세기는 상호 작용길이에 따라 감소하게 된다. 반면 시변 신호빔의 ac 성분은 이미 형성된 시평균 부피 격자에 의해 기준빔의 방향으로 회절되므로 그림 3의 PD2에서는 여분의 기준빔 세기에 더해진 회절된 시변 신호 성분을 검출하게 되고, 기준빔 방향으로 전달되는 시변 신호의 ac이득 G_{rac} (=전달된 기준빔 세기의 peak-to-peak 진폭/입력 신호빔 세기의 peak-to-peak 진폭)는 두 빔의 세기비에 따라 변하게 된다.

그림 4는 그림 3의 실험 구성도에서 신호빔을 $d=0.5$ 인 4 KHz 구형파 전기신호로 진폭 변조 시켰을 때 입사빔의 세기비에 따른 신호빔의 G_{sdc} 및 G_{sac} 이득 그리고 기준빔 방향으로 회절된 시변 신호의 ac 이득 G_{rac} 를 나타내었다. 여기서 측정된 G_{sdc} 의 지수이득계수 Γ 는 $\sim 4.89 \text{ cm}^{-1}$ 이고 CW레이저 빔에 의한 $\Gamma = 9.82 \text{ cm}^{-1}$ 보다는 약 2배가 감소되었으며 이때 최대 dc 이득은 ~ 10.43 이고, $q \geq 0.2$ 에서 시변 신호빔의 ac 이득 G_{sac} 는 ~ 3.3 으로 포화되었다. 그리고 $q < 0.01$ 영역에서는 기준빔의 모든 에너지가 신호빔 쪽으로 넘어가서 기준빔의 세기는 고갈되는 반면에 신호빔의 dc 및 ac 이득은 포화상태가 되고, 기준빔 쪽에서는 회절된 변조 신호가 거의 나타나지 않으므로 PD1, PD2에서 변조 신호의 유무로 스위칭 동작을 구분하면 그림 5(a)와 같이 검출단에서 신호빔은 온 상태(on state)이고 기준빔은 오프 상태(off state)가 되며 출력 기준빔의 광로가 완전히 절체된다. 또한 입사빔의 세기비가 $0.1 \leq q \leq 10$ 인 범위에서는 기준빔 방향으로 회절된 시변 신호의 이득은 $0.5 \leq G_{rac} < 1$ 이고, $G_{sac} > 1$ 이 되므로 그림 5(b)와 같이 검출단에서 신호빔

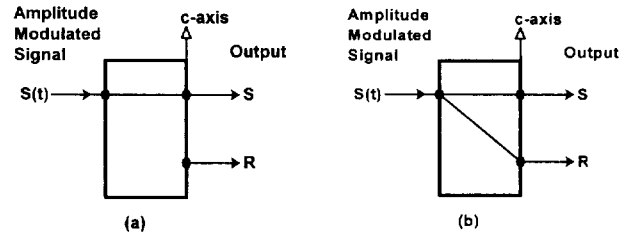


그림 5. 그림 4의 광스위칭 특성 : (a) 직진상태, (b) 분할상태.

및 기준빔은 각각 온 상태가 되어 시변 신호빔은 기준빔 방향으로도 전달된다.

그림 6는 그림 3의 실험구성도와는 반대로 기준빔을 그림 4의 실험 조건과 마찬가지로 진폭 변조시키고 신호빔을 변조시키지 않았을 때 2광파결합 실험 결과이다. 여기서 G_{sdc} 는 신호빔의 dc 이득, G_{sac} 는 시변 기준빔의 회절에 의해 신호빔 쪽에 전달된 ac이득, G_{rac} 는 시변 기준빔의 ac 이득을 나타낸다. 그리고 측정된 G_{sdc} 의 지수이득계수 Γ 는 $\sim 4.6 \text{ cm}^{-1}$ 이며

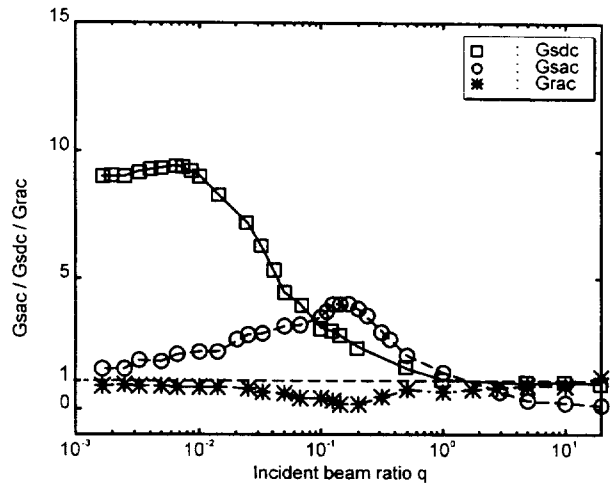


그림 6. 진폭 변조된 기준빔을 포함하는 TWM 구조에서 입사빔의 세기비 q에 대한 G_{sdc} , G_{sac} 및 G_{rac} .

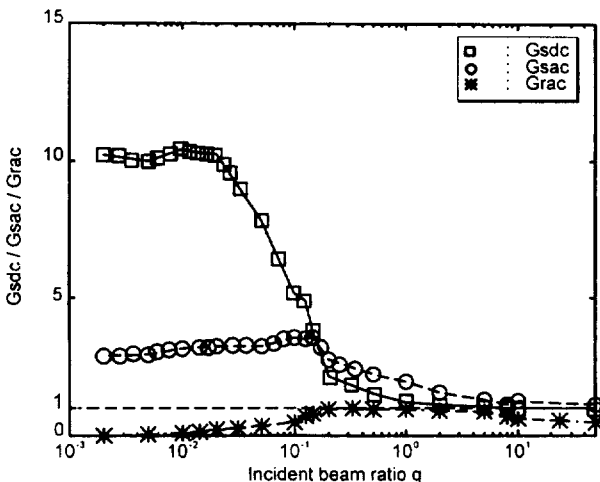


그림 4. 진폭 변조된 신호빔을 포함하는 TWM 구조에서 입사빔의 세기비 q에 대한 G_{sdc} , G_{sac} 및 G_{rac} .

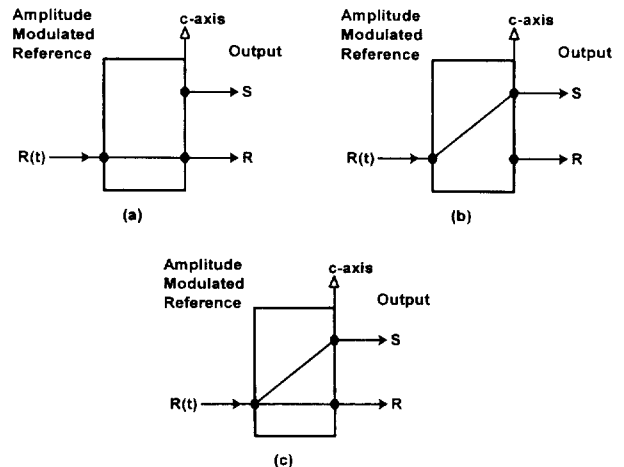


그림 7. 그림 6의 광스위칭 특성. (a) 직진상태, (b) 교체상태, (c) 분할상태.

$q \leq 0.006$ 에서 포화되고 이때 최대 dc 이득은 ~ 9.43 이다. 또한 $q = -0.125$ 근처에서 G_{sc} 는 최대값(~ 4)을 가지며, $q > 1$ 에서는 이득은 1이하로 감소한다. 그리고 $q > 10$ 에서는 신호빔쪽으로 전달된 ac 신호는 거의 나타나지 않기 때문에 그림 7(a)와 같이 신호빔 채널에서는 오프 상태이고 기준빔 채널은 온 상태가 된다. 더구나 그림 4의 결과와는 다르게 G_{sc} 가 최대가 되는 세기비 조건에서 G_{ac} 는 거의 영이 되기 때문에 이 조건에서는 그림 7(b)와 같이 신호빔 채널은 온 상태이고 기준빔 채널은 오프 상태가 되어 서로 반전된다. 그리고 신호빔의 dc 이득이 포화상태가 되는 빔의 세기비 조건에서는 그림 7(c)와 같이 신호빔과 기준빔 채널은 각각 온 상태가 된다.

IV. 동적 광굴절 결합기 및 펄스 Shaping

4.1. 광굴절 결합기

3장에서 살펴본 바와 같이 PR 결정에 입사되는 두 빔 중 한 빔이 고주파에서 진폭 변조 될 때 TWM은 결정에서 형성된 시평균 부피 격자의 코히어런트한 광파결합 특성으로 인해 신호빔의 세기 뿐만 아니라 ac 성분까지도 이득을 얻게 되고, 이득은 두 빔의 세기비를 변화시킴으로써 제어된다. 또한 PR 결정이 변조 주파수에 무관하기 때문에 이러한 광파결합 특성을 적용하면 수 GHz 이상의 광대역 신호를 증폭하는 가변 이득 전치증폭기로 적용이 가능할 것으로 예상된다. 더구나 결정에 입사되는 두 빔의 세기비에 따라 변조되지 않은 빔의 방향으로도 고주파 신호를 전달하는 동적인 채널 스위칭 및 그림 7(c)와 같이 광신호의 분할도 가능하므로 이러한 원리를 적용하면 그림 8에 나타낸 바와 같이 서로 다른 채널에서 들어오는 고주파 변조 신호를 원하는 채널로 선택, 분할 및 결합이 가능한 동적인 광소자를 구현할 수 있다. 또한 3장에서 살펴본 구조처럼 시변 신호빔과의 간섭에 의해 형성된 시평균 부피 격자의 회절특성 및 코히어런트한 검파 방식을 적용하는 구조보다는 전형적인 TWM 실험 조건과 마찬가지로 코히어런트한 두 개의 CW 레이저 빔을 이용하여 정적인 부피 격자를 결정에 기록하고, 그림 8의 신호빔(S_{in})과 기준빔(R_{in})의 경로에 Dolfi et al. 의 제안 방식^[5]과 유사하게 기록빔과는 다른 채널에서 시스템 입력으로 들어오는 독립적인 고주파 변조 신호빔 f_1, f_2 를 함께 실어 줌으로써 성능 및 자유도를 향상시킬 수 있다. 즉, 3장의 구조와는 다르게 고주파에서 진폭 변조된 시변 신호빔을 직접 부피 격자의 기록빔으로 사

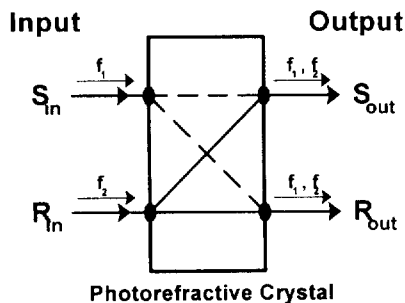


그림 8. 광굴절 결합기의 개념도.

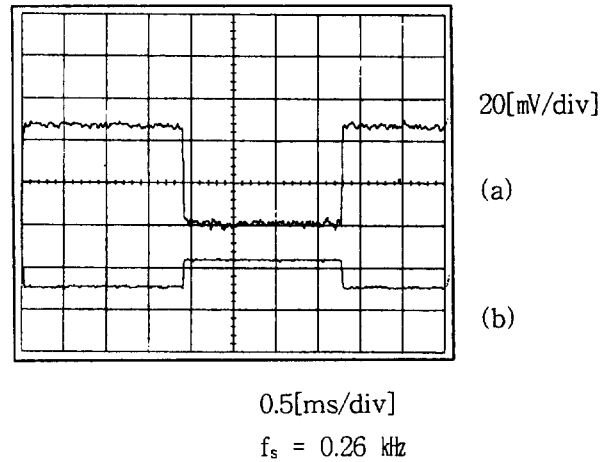


그림 9. 광굴절 분할기의 실증 실험 결과(진폭 변조된 신호빔과 변조되지 않은 기준빔을 포함하는 TWM 구조). (a) 검출된 신호빔의 파형, (b) 검출된 기준빔의 파형.

용하지 않고 독립적인 CW 기록빔을 이용하여 정적인 부피 격자를 기록하고 원리적으로 이미 형성된 부피 격자에서의 회절특성을 이용하므로 시평균 부피 격자에서의 ac 이득 보다 더 높은 이득을 얻을 수 있으며, 격자가 형성된 후에는 입출력 간의 링크(link)는 온 상태이므로 높은 주파수에서 진폭 혹은 위상 변조된 신호빔은 격자를 지우거나 링크를 오프 시키지 않는다. 따라서 그림 8의 고주파 신호빔 f_1, f_2 의 dc 바이어스(bias)가 없을 경우에도 링크가 유지된다. 또한 고주파 신호빔과는 무관하게 단지 기록빔의 세기비를 조정함으로써 부피 격자의 회절효율^[18]을 변화시킬 수 있으므로 입출력 채널 간의 안정된 제어가 가능한 특징을 갖는다. 그리고 스위칭 속도는 부피 격자의 형성에만 관계되므로 더 빠른 광굴절 반응 시간을 갖는 PR 매질을 적용하여 스위칭 속도의 향상을 꾀할 수 있고, 격자 고정(fixing) 기술^[19]을 적용하여 수동형 빔 분할기 및 결합기의 구조도 가능할 것으로 예상된다.

그림 9는 앞에서 언급한 시변 신호빔의 분할 특성을 입증하기 위해 그림 4의 실험 방법과 마찬가지로 신호빔을 주파수 $f_s = 0.26$ KHz에서 진폭 변조시키고, 두 빔의 세기비를 0.33으로 조정했을 때 전달된 신호빔과 기준빔의 방향에 각각 광검출기를 위치시켜 관찰한 출력 파형이다. 여기서 기준빔과의 결합이 없을 때 측정된 입력 신호빔 세기의 peak-to-peak 진폭은 15 mV이다. 예측한 바와 같이 광굴절 부피 격자에 의해 시변 신호빔은 이득을 얻을 뿐만 아니라 기준빔 방향으로도 전달되므로 그림 3의 PD1, PD2에서는 각각 시변 신호를 검출하게 된다. 그리고 기준빔 방향으로 회절된 신호빔의 출력 파형과 증폭된 신호빔의 출력 파형의 극성은 그림 9에 나타낸 바와 같이 서로 반전된다.

또한 그림 10은 그림 8의 구조와 마찬가지로 서로 다른 채널에서 들어오는 고주파 신호간의 결합특성을 알아보기 위해 그림 3의 신호빔과 기준빔 경로에 각각 AOM을 위치시켜 구형과 전기 신호로 진폭 변조시켰을 때(그림 10(a)) PD1, PD2에서 검출한 출력 파형(그림 10(b))을 나타내었다. 여기서 신호빔과 기준빔의 변조 주파수는 각각 1 KHz, 9 KHz이고, 입

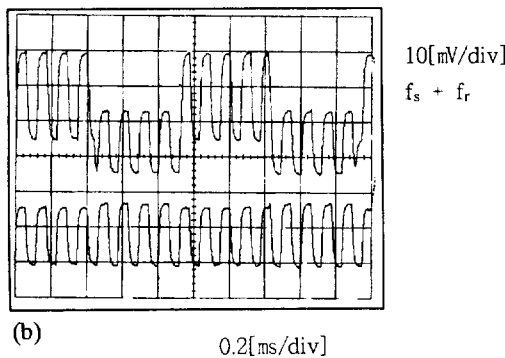
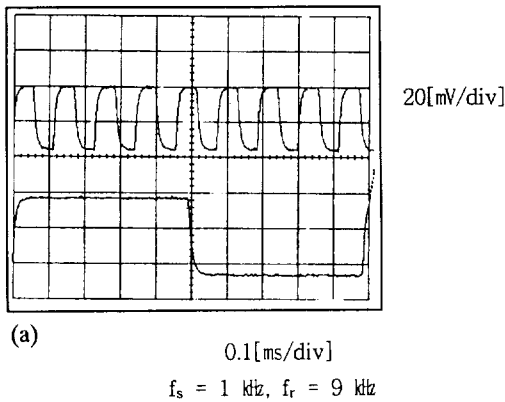


그림 10. 광굴절 결합기의 실증실험 결과. (a) 입력 기준빔(상단)과 신호빔(하단)의 진폭 변조 파형, (b) 검출된 신호빔(상단)과 입력 기준빔의 진폭 변조 파형(하단).

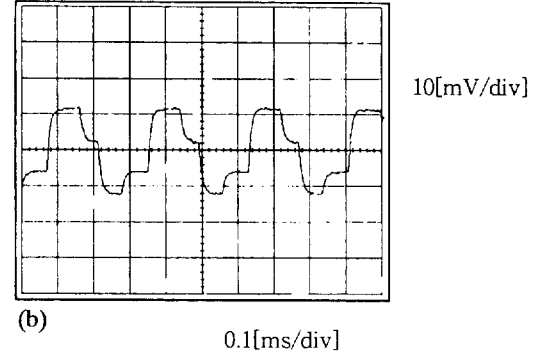
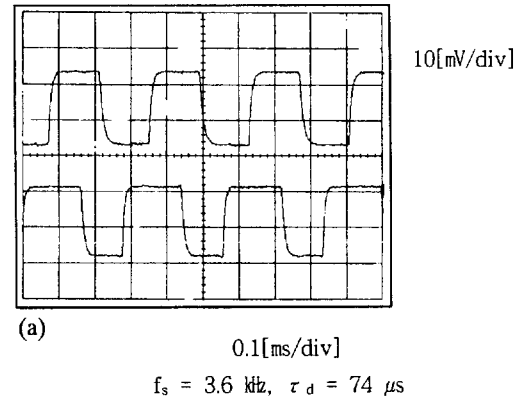


그림 11. 광굴절 펄스 shaping 실증 실험 결과. (a) 진폭 변조된 신호빔(상단)과 기준빔 파형(하단), (b) 검출된 출력 파형.

사범의 세기비 $q=1.5$, 결합이 없을 때 결정 뒷면에서 측정된 신호빔과 기준빔 신호의 peak-to-peak 진폭은 편의상 각각 43.3 mV, 35.3 mV로 조정했다. 출력 파형에 나타난 바와 같이 각각 서로 다른 주파수로 변조된 두 광파는 PR 부피 격자에 의해 서로 코히어런트하게 더해짐을 알 수 있다. 더구나 그림 4 및 그림 6의 실험결과에서 제시된 바와 같이 두 빔의 세기비 조건에 따라 채널간의 스위칭 및 신호의 분할이 가능하고, 결합 과정이 자동으로 이루어지므로 동적인 광굴절 결합기 및 코히어런트 광통신 소자로의 활용이 기대된다.

4.2. 광굴절 펄스 Shaping

앞장에서 언급한 PR 부피 격자의 이러한 광파 결합 특성을 적용하면 비교적 늦은 반응시간을 갖는 SBN, KNSBN 결정 등에서 짧은 레이저 펄스 및 고주파에서 진폭 변조된 신호 펄스의 세기 뿐만 아니라 시간적인 형태도 변화시킬 수 있다. PR 부피 격자를 이용한 레이저 펄스의 shaping 효과는 Yao 등에 의해 보고^[15]된 바 있으나, 본 연구에서는 고주파에서 진폭 변조된 CW 레이저 빔을 이용하여 실험적으로 입증한다. 시변 신호의 shaping을 입증하기 위해 그림 3의 기준빔 경로에 추가로 AOM을 위치시켜 두 빔을 동일 주파수에서 진폭 변조시켰다고 가정한다. 그리고 기준빔의 펄스열을 신호빔의 펄스열에 비해 τ_d 만큼 시간 지연되었다고 가정하면, 두 빔에 의해 형성된 정상상태 부피격자는 기준 광파를 신호빔 방향으로 회절시키게 되고 회절된 기준빔은 신호빔과 코히어런트

하게 더해지게 된다.

따라서 두 신호가 중첩되는 부분은 시간영역에서 두 신호의 상관관계이기 때문에 두 빔의 펄스 파형이 동일하다면 앞에서 언급한 바와 같이 2광파결합에 의해 두빔의 세기비 q 에 따라 신호 펄스는 이득을 얻게 되고, 신호빔이 기준빔과 중첩되지 않는 부분에서는 신호 파형의 경우 흡수 및 결정 표면에서의 손실만 있게 된다. 그리고 신호빔의 방향으로 회절된 기준빔의 펄스 중 신호빔과 중첩되지 않은 영역은 신호빔과 코히어런트하게 더해지므로 전달된 신호빔의 파형은 변하게 된다. 그림 11(a)는 AOM에 의해 동일 주파수 $f=3.6$ KHz에서 진폭 변조된 신호빔과 기준빔의 파형이고, 두 펄스열의 시간 지연 τ_d 는 74 μ s이다. 그리고 그림 11(b)는 결정의 앞단에서 신호빔의 펄스의 진폭을 22 mV, 기준 빔 펄스의 진폭을 20 mV, 두빔의 세기비 q 를 1.2로 조정했을 때 PD1에서 검출한 출력 파형이다. 예측한 바와 같이 신호빔의 파형은 shaping되며 이러한 빔결합 원리를 적용하면 극히 짧은 레이저 펄스를 shaping하는데 응용가능 할것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에서는 Cu가 0.04 wt.%로 도핑된 KNSBN 광굴절 결정의 에너지 교환 특성을 조사하기위해 632.8 nm 파장에서 TWM 실험을 통해 지수이득계수의 입사각 의존성 및 결합 이득의 광세기 의존성을 측정하고 해석했다. 그리고 전형적인 TWM 구조와는 다르게 입력빔의 세기를 고주파에서 진폭 변

조시커 광굴절 부피 격자의 동적인 광파결합 특성을 실험하고 해석하였다. 실험 결과 광굴절 결정에서 형성된 굴절을 부피 격자의 코히어런트한 광파결합 특성으로 인해 진폭 변조된 시변 신호빔은 세기뿐만 아니라 ac 성분까지도 이득을 경험하게 되며, 부피 격자에서의 회절특성에 의해 변조되지 않은 빔의 방향으로도 시변 신호를 전달하는 기능도 동시에 수반됨을 알 수 있었다. 더구나 이러한 시변 신호의 전달 기능은 입사되는 빔의 세기비를 적절하게 조정해 줌으로서 동적인 광스위칭 동작이 가능함을 확인하였다. 또한 광굴절 부피 격자의 이러한 광파결합 특성을 적용하여 동적 광굴절 결합기 및 펄스 shaping 소자로의 응용 방법을 제시하고 예비 실험을 통해 입증하였다.

본 논문의 실험결과는 광굴절 결정이 변조 주파수에 무관하고 오직 검출 회로에만 관계 되기 때문에 시변 신호에 대한 광굴절 부피 격자의 이러한 광파결합 특성을 적용하면 수 GHz 이상의 광대역 신호를 증폭하는 광학적 가변 이득 전치 증폭기로 적용 가능할 뿐만 아니라 서로 다른 주파수에서 광 변조된 신호를 원하는 채널로 병렬 전송할 수 있는 동적인 완전 광 결합기로 응용가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] P. Gunter and J. P. Huignard, eds., *Topics in Applied Physics*, Vol. 62 (Springer-verlag, New York, 1989).
- [2] M. Cronin-Golomb, *Potorefractive Materials, Effects, and Devices*, Vol. 17 of OSA Technical Digest Series, p 142 (1987).
- [3] G. Hamel de Montchenault, B. Loiseaux, and J. P. Huignard, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1794 (1987).
- [4] G. Hamel de Montchenault and J. P. Huignard, *J. Appl. Phys.* **63**, 624 (1988).
- [5] D. Dolfi, B. Forestier, B. Loiseaux, H. Rajbenbach, and J. P. Huignard, *Appl. Opt.* **29**, 5228 (1990).
- [6] F. M. Davidson and L. Boutsikaris, *Opt. Eng.* **29**, 369 (1990).
- [7] J. Khoury, V. Ryan, C. Wood, and M. Cronin-Golomb, *Opt. Lett.* **16**, 1442 (1991).
- [8] S. Mailis and N. A. Vainos, *Appl. Opt.* **32**, 7289 (1993).
- [9] J. Khoury, V. Ryan, and M. Cronin-Golomb, *J. Opt. Soc. Am. B* **10**, 72 (1993).
- [10] R. R. Neurgaonkar, W. K. Cory, J. R. Oliver, M. D. Ewbank, W. F. Hall, *Opt. Eng.* **26**, 392 (1987).
- [11] J. Xu, S. Liu, Y. Wu, G. Zhang, Y. Song, and H. Chen, *Opt. Comm.* **80**, 239 (1991).
- [12] J. Xu, S. Liy, Y. Wu, G. Zhang, *Opt. Lett.* **16**, 1255 (1991).
- [13] M. D. Ewbank, R. R. Neurgaonkar, and W. K. Cory, *J. Appl. Phys.* **62**, 374 (1987).
- [14] Y. Tomita and J. Bergquist, *Optoelectronics- Devices and Technologies* **8**, 357 (1993).
- [15] X. S. Yao, V. Dominic, and J. Feinberg, *J. Opt. Soc. Am. B* **7**, 12, 2347 (1990).
- [16] J. Rodriguez, A. Siahmakoun, G. Salamo, M. J. Miller, W. W. Clark III, G. L. Wood, E. J. Sharp, and R. R. Neurgaonkar, *Appl. Opt.* **26**, 1732 (1987).
- [17] N. V. Kukhtarev, V. B. Mrkov, S. G. Odulov, M. S. Soskin, and V. L. Vinetskii, *Ferroelectrics* **23**, 949, (1979).
- [18] J. H. Hong and R. Saxena, *Opt. Lett.* **16**, 180 (1991).
- [19] J. J. Amodei, W. Phillips, and D. L. Staebler, *Appl. Opt.* **11**, 390 (1972).
- [20] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, and S. G. Odulov, *Opt. Comm.* **23**, 338 (1977).
- [21] J. M. Heaton and L. Solymar, *Opt. Acta* **32**, 397 (1985).
- [22] G. C. Valley, *IEEE J. Quantum. Electron.* **19**, 1637 (1983).
- [23] L. B. Au, *Opt. Comm.* **72**, 265 (1989).

Photorefractive two-wave coupling properties of time-modulated optical signal in Cu-KNSBN crystal and its applications

Ji-Young So* and Kwon-Yeon Lee**

*Dept. of Electrical Control Eng., Suncheon Nat'l Univ., Suncheon, Chonnam, 540-742, Korea

**Dept. of Electronic Eng., Suncheon Nat'l Univ., Suncheon, Chonnam, 540-742, Korea

(Received January 5, 1998, Revised manuscript received February 24, 1998)

The energy transfer between two incident beams in a photorefractive Cu-doped(0.04 wt.%) $(K_{0.5}Na_{0.5})_{0.2}(Sr_{0.61}Ba_{0.39})_{0.9}Nb_2O_6$ crystal is investigated at 632.8 nm laser wavelength. In addition, the coherent two-wave coupling properties of a photoinduced refractive-index grating in the presence of amplitude modulation on the signal beam or reference beam are also experimentally investigated. Some preliminary experimental results are presented for use as a dynamic photorefractive combiners and pulse shaping elements in coherent optical communication systems and in optical signal processing.