

유기광굴절 재료

전 현 애 · 김 낙 중

1. 개 요

광굴절(photorefractivity)이란 광전도성(photoconductivity)과 비선형 광학성질(optical nonlinearity)을 동시에 갖고 있는 재료에서 관찰되는 현상으로, 빛에 의해 발생된 전하의 재분포로 인하여 재료의 굴절율이 공간상에서 주기적으로 변화(spatial modulation of refractive index)하는 것을 말한다.^{1,2} 광굴절 현상은 1966년 전기광학성질을 가진 강유전체 무기결정(ferroelectric crystal)인 LiNbO₃에서 Ashkin 등에 의해 최초로 발견되었으나, 그 당시는 빛에 의한 굴절을 변화를 레이저에 의한 재료의 손상 정도로 간주되었다.³ 그러나 1년 후 Bell 연구소의 Chen에 의해 가역적인 굴절을 변화로 밝혀지면서 Ashkin의 발견이 광굴절현상으로 불리는 새로운 광학 현상의 하나로 인식되기 시작했다.⁴ 유기재료에서는 1990년 7,7,8,8,-tetracycloquinodimethane을 포함한 유기결정인 2-cyclooctylamino-5-nitropyridine 에서 최초로 발견되었고,⁵ 그 다음해 diethylaminobenzaldehyde diphenylhydrazone(DEH)이라는 전하수송체분자가 첨가된 가교된 에폭시계 비선형 고분자재료에서도 광굴절효과가 관찰되었다.⁶

본 고에서 논의할 광굴절현상을 개념적으로 살펴보면 다음과 같다. 두 빔의 간섭(interference)에 의해 형성된 주기적으로 반복되는 빛(spatially modulated light intensity)을 재료에 조사하면 보강간섭이 일어난 곳에서 광전하들이 생성된다. 생성된 광전하들이 확산이나 표류(drift)를 통해 이동하다 재료 내에 존재하는 트랩(trap)에 의해 고정되

면, 이로 인해 전하분포가 불균일해진다. 전하의 재분포는 재료 내에 주기적으로 변화하는 내부전기장(internal space-charge field)을 유도한다. 이와 같은 내부 전기장하에서 전기광학효과로 인하여 재료의 굴절율은 공간상에서 일정한 간격으로 변화(spatial modulation of refractive index)하게 된다. 이 과정을 거쳐 형성된 광굴절 격자는 첨단 광학 재료로의 응용에 아주 유용한 광학 특성들을 가지고 있다.^{1,2} 즉 광굴절효과에 의해 재료에 형성된 격자(grating)는 장기간 보존될 만큼 안정하지만,



전현애

1987 서울대학교 화학교육과(학사)
1989 서울대학교 화학과(석사)
1997 The University of Akron, 고분자공학과
1989~ (주)SK 인천고분자기술연구소 연구원
1991 연구원
1997~ 포항공과대학 화학공학과 위촉 연구원
1998 연구원
1999~ 한국과학기술연구원 Post-Doc
2000 연구원
2000~ 한양대학교 화학과 Post-Doc
현재



김낙중

1973 서울대학교 화학과(학사)
1978 서울대학교 화학과(석사)
1983 University of Texas at Austin, 화학과
1983~ 한국과학기술연구원 광굴절연구단 단장
2000 연구원
2000~ 한양대학교 화학과 교수
현재

Organic Photorefractive Materials

한양대학교 자연과학대학 화학과(Hyun-ae Chun and Nakjoong Kim, Department of Chemistry, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

균일한 세기의 빛을 단순히 조사 하면 재료에 저장된 정보를 가역적으로 손쉽게 지울 수 있다. 또한 다른 광학현상에 비해 매우 예민(photosensitivity)하여 mW정도의 작은 세기의 레이저를 이용하여도 큰 굴절율의 변화를 유도할 수 있다. 다른 광학 재료에 비해 광굴절현상만이 갖고 있는 독특한 성질로는 non-local response를 보인다는 것이다. 여기서 non-local response란 빛에 의해 유도되는 굴절율 변화가 광의 분포(light distribution)와 일치하지 않고 공간상으로 이동된 위상차이(phase difference)를 보이는 것을 의미한다(참고로 화학적 변화 등으로 인한 다른 광학현상은 local response를 보인다). 따라서 빛이 조사되는 바로 그 위치에서 재료의 굴절율이 변화하므로 빛의 강도가 최대인 곳에서 재료의 굴절율 역시 최대로 변한다.) 광굴절재료는 이 같은 위상차이로 인해 조사되는 두 레이저 빔 간의 에너지 전이(2-beam coupling), 즉 한쪽 빔의 에너지가 다른쪽 빔으로 전이되는 독특한 성질을 갖게 된다. 위와 같은 광학 특성들로 인해 광굴절 재료는 optical information processing, dynamic holographic storage, imaging 등 많은 첨단 정보 재료소자로의 응용이 다양하게 시도되고 있다.

본 고에서는 유기 광굴절재료에 대한 전반적인 이해를 돕기 위하여, 광굴절현상의 원리, 측정방법 및

현재까지 연구된 유기 광굴절재료의 종류 및 특성 등에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 광굴절현상의 원리

그림 1과 같이 동일파장의 두개의 coherent한 빛이 재료에 조사되면 간섭현상(interference)에 의해 일정한 간격으로 변화하는 빛의 분포(spatially modulated light intensity)를 갖는다. 이때 빛의 세기가 주기적으로 변화하는 간격, 즉 격자간격(Λ)은 사용 파장과 두 빔 사이각에 의해 결정되는 데, 가시광선을 사용하는 대부분 경우 μm 범위이다. 재료의 광전하 생성율(rate of photogeneration)은 빛의 강도에 의존하므로, 보강간섭이 일어난 밝은 부분에서 전하(charge carrier)가 생성된다.⁷ 이렇게 생성된 전하들은 광학적으로 활성화되어 어두운 곳으로 이동하는 데, 무기결정에서 전하이동의 원동력은 일반적으로 전하농도차이에 의한 확산이지만, 유기재료에서는 외부에서 인가된 전기장에 의한 표류(drift)가 더 큰 역할을 한다.¹ 이동중인 전하가 재료에 내재해 있는 트랩을 만나면 고정되는 데, 트랩에 잡힌 전하로 인해 재료내의 전하분포($\rho(x)$)가 불균

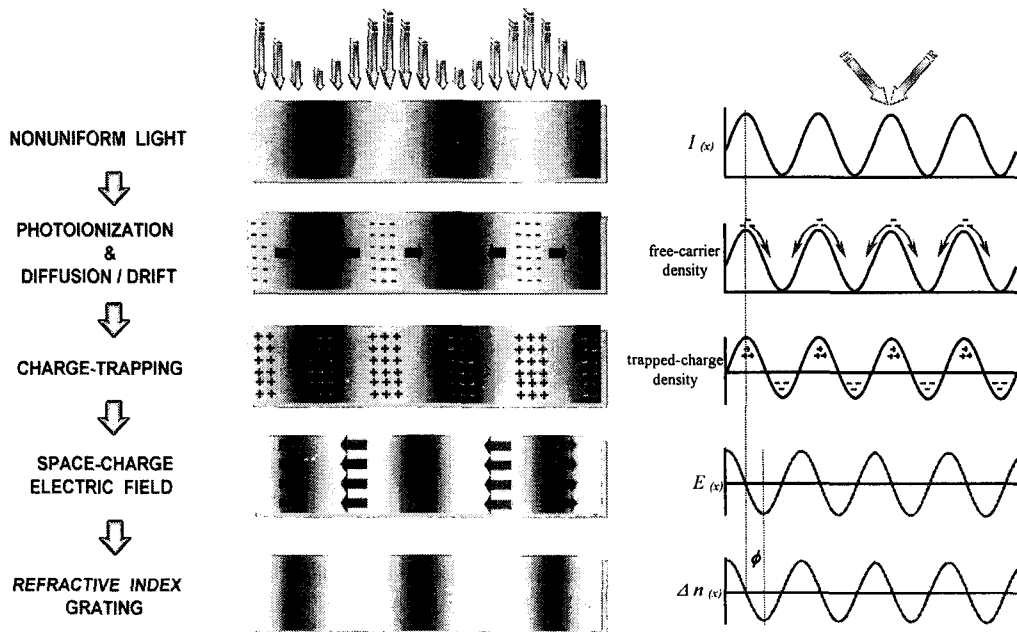


그림 1. Mechanism of photorefractive effect.

일해진다. 유기재료의 트랩 메카니즘은 현재까지도 정확히 이해되고 있지 않지만, 시료 중에 존재하는 불순물이나 구조결함 등이 트랩으로 작용한다고 알려져 있다. 전하의 재분포로 인해 유전상수 ϵ 를 가진 재료 내에 주기적으로 반복되는 내부전기장이 생성되는 데(Poisson 식), 광굴절현상에서는 이와 같이 유도된 내부전기장을 space-charge field (E_{SC})라고 명명한다.

$$\frac{dE_{SC}}{dx} = \frac{4\pi\rho}{\epsilon}$$

광굴절성질을 설명하는 기본적인 모델을 제안한 Kukhtarev에 의하면,⁸ 생성된 space-charge field (E_{SC})의 값은 아래식과 같이 주어진다.

$$E_{SC} = m \left(\frac{(E_0^2 + E_D^2)}{(1 + E_D/E_q)^2 + (E_0/E_q)^2} \right)^{1/2}$$

여기서 E_0 는 외부 전기장의 grating vector방향 성분이고, E_D 는 확산에 의해 이동된 전하에 의해 생성된 확산전기장(diffusion field)이고, E_q 는 trap-limited field이다. 비선형 광학성질을 가진 재료의 굴절율은 전기장하에서 변화하므로(Pockels effect), 주기적으로 변화하는 내부전기장(spatially modulated internal field)은 광굴절 재료 내에 주기적으로 변화하는 굴절율의 변화 (Δn)를 유도한다(그림 1).^{1,2,7}

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 r_{eff} E_{SC}(\chi)$$

여기서 n 은 재료의 평균 굴절율이고, effective electro-optic coefficient인 r_{eff} 는 이차비선형감수율(second-order nonlinear susceptibility, $\chi^{(2)}$) 등에 의해 결정된다. 광굴절재료에 유도된 굴절율 분포는 앞 절에서 언급했듯이 빛 분포와 일치하지 않고 위상차이(phase shift, Θ)를 보이는 데, Θ 는 아래 식과 같이 주어진다(그림 1).

$$\tan \Theta = \left[\frac{E_D}{E_0} \left(1 + \frac{E_D}{E_q} + \frac{E_0^2}{E_D E_q} \right) \right]$$

Θ 는 전하이동이 확산에 의한 경우에만 $\pi/2$ 로 최대값을 보이며, 고분자 같이 전하이동이 확산보다는

주로 인가된 전장하에서의 표류에 의해 일어나는 경우 위상차이는 $\pi/2$ 보다 작다. 위상차로 인해 생기는 두 조사 빔 간의 에너지 전이(two-beam coupling)는 두 빔 간의 위상차가 90° 일때 최대에너지전이가 일어난다.

굴절율의 변화(Δn) 및 위상차이(Θ)에 의해 결정되는 재료의 광굴절 특성은 이득계수(gain coefficient, Γ) 및 회절효율(diffraction efficiency, η)에 의해 결정되는 데, 이들은 2.3절에서 기술할 2-beam coupling법 및 four wave mixing(FWM)법을 이용하여 측정된다.

2.2 유기광굴절 재료

앞 절에서 설명했듯이, 광굴절재료는 광전도성 및 비선형 광학성질을 동시에 포함하고 있어야 한다. 현재까지 보고된 광굴절재료는 이같은 구성성분을 조합하는 방법에 따라 크게 다관능성 고분자 재료계(multifunctional polymeric system)와 주인-손님계(host-guest system)로 분류할 수가 있다. 그림 2에서 보여 주듯이 다관능성 고분자재료는 비선형 전기광학 분자와 광전도성 분자를 고분자의 주쇄나 곁가지에 화학결합으로 연결시켜 만든다.^{9,11} 1992년 University of Arizona의 Peyghambarian 그룹은⁹ polyacrylate backbone에 carbazole 그룹과 전기광학성질을 갖는 tricyanovinylcarbazole을 측쇄에 치환한 fully functionalized side chain polymer(그림 2(a))을 발표 하였는데, 이 고분자는 광전도성과 전기광학성질은 각각 보였지만, 2-beam coupling 실험 결과 광굴절현상은 관찰되지 않았다. 이 분야에 대한 연구는 University of Chicago의 Yu 그룹에¹⁰ 의해 가장 활발하게 연구되어, 광개시제로 전이금속 착화합물을 포함한 광굴절고분자의 경우 비교적 높은 이득계수를 갖는 것으로 발표되기도 했다(그림 2(b)). 이같은 다관능성 광굴절 고분자재료의 가장 큰 장점은 구성 성분간의 상분리 문제를 근본적으로 해결하였다는 것이다. 그러나 분자구조 선택이 제한되고 합성의 어려움에도 불구하고 우수한 광굴절 특성을 얻기가 일반적으로 어렵기 때문에, 현재 다관능성 광굴절 재료에 대한 연구는 매우 제한적으로 수행되고 있다.

광굴절재료를 제조하는 데 또 다른 방법인 주인-손님계(host-guest system)는 (1) PMMA나 polycarbonate(PC) 같은 inert polymer에 광전도성 물질과 비선형 광학분자를 첨가하는 방법, (2) 비선형 광학 고분자매질에 광전도성 분자를 첨가하는 방법,

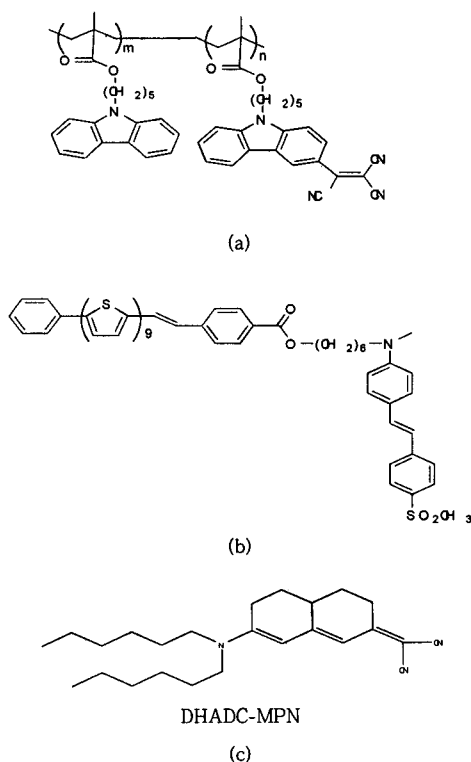


그림 2. Chemical structures of multifunctional molecules.

(3) 광전도성 고분자 매질에 비선형 색소를 첨가하는 방법으로 분류된다. 먼저 첫번째 방법의 경우, 많은 양의 inert한 고분자매질(약 30-40 wt% 이상)을 사용하게 되는 데, 이로 인해 광전도성 및 전기광학 성질이 낮아져, 우수한 광굴절 재료의 제조가 쉽지 않다. 뿐만 아니라, 많은 양의 도핑제 첨가에 따른 상분리 문제가 매우 심각하다. 따라서 전기광학 성질 및 광전도성을 동시에 갖고 있는 이관능성 분자(bifunctional molecule)를 첨가하여 도핑율을 줄여 복합체의 상안정성을 확보하려는 시도들이 보고되었는데, 그 중에서 Peyghambarian group에 의해 발표된 이관능성 분자는 주목할 만큼 우수한 광굴절 특성을 보였다.¹² 그림 2(c)에 주어진 DHADC-MPN을 아크릴계 고분자에 첨가하여 제조된 복합체는 50 V/um의 비교적 낮은 전압에서 227 cm⁻¹ 정도의 큰 이득계수를 보였다.

비선형 광학 고분자를 매질로 이용한 최초의 광굴절 복합체는 bis-A-NIPDA에 전하수송체인 diethylaminobenzaldehyde diphenylhydrazone(DEH)를 첨가하여 제조하였다(그림 3).⁶ 이 재료는 2-beam

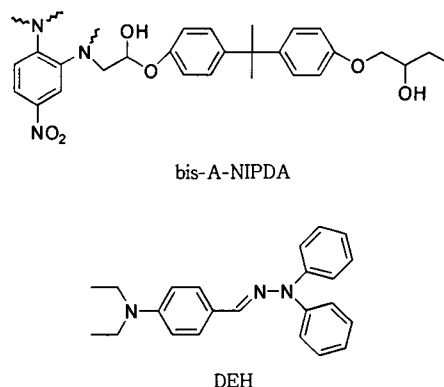


그림 3. Chemical structures of NLO polymer and charge transporting agent.

coupling(2BC)의 이득계수(gain coefficient)가 약 1 cm⁻¹ 정도이고 수 분 정도의 반응속도를 보이는 등 매우 낮은 광굴절특성을 보였다. 지금까지 보고된 비선형 고분자를 이용한 복합체들은 일반적으로 광굴절을 변화(Δn)가 매우 작아서, 충분한 회절효율(diffraction efficiency)나 순이득 계수(net gain coefficient)가 관찰되지 않았다(여기서 순이득 계수란 이득계수(Γ)에서 흡수에 의해 감소된 에너지(α)를 뺀 값임). 현재까지 보고된 비선형 고분자를 이용한 광굴절 복합체들이 우수한 성질을 갖지 못하는 가장 큰 이유는 비선형 색소가 고분자사슬에 화학적으로 결합되어 비선형색소의 배향이 제약을 받기 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서 비선형색소의 유동성이 확보되지 않는 한, 우수한 광굴절 성질을 갖는 비선형 고분자 복합체를 제조하기는 어렵다고 생각한다.

2BC실험의 순이득 계수는 광전도성 고분자를 매질로 하는 복합체에서 1993년에 최초로 발견되었다. 널리 알려진 광전도성 고분자인 poly-N-vinylcarbazole(PVK)에 3-fluoro-4-N,N-diethylamino- β -nitrostyrene(FDEANST)과 2,4,7-trinitrofluorene(TNF, PVK와 착화합물을 형성하여 전하발생체로 작용)을 도핑하여 7 cm⁻¹의 net gain을 관찰하였다(그림 4).¹³ 그리고 이듬해 University of Arizona의 Peyghambarian group은¹⁴ 가소제를 첨가하여 유리전이온도를 낮춘 광전도성 고분자복합체(PVK/2,5-dimethyl-4-(p-phenylazo)anisole(DMNPAA)/N-ethyl-carbazole/TNF)를 제조하여, 순이득 계수가 90 V/um에서 200 cm⁻¹ 이상이고 회절 효율(diffraction efficiency)이 60 V/um에서 100%

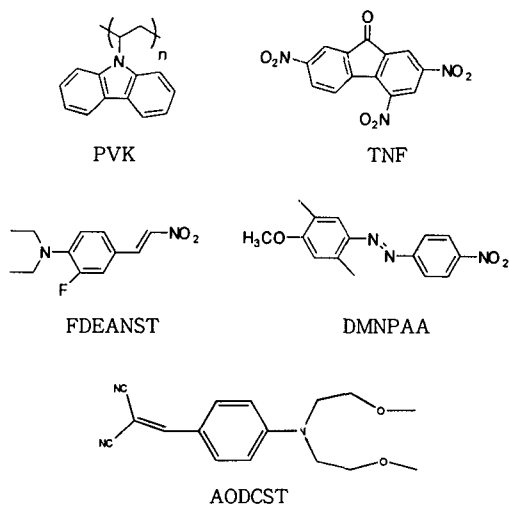


그림 4. Chemical structure of PVK, TNF and NLO chromophores.

정도로 매우 우수한 광굴절재료를 얻었다. 광굴절재료설계에 중요한 이정표가 된 이 재료의 가장 중요한 특징은 가소제인 N-ethylcarbazole를 첨가하여 복합체의 유리전이온도(T_g)를 상온으로 감소시켰다는 것이다. 낮은 T_g 를 가진 복합체의 장점은 상온에서도 유동성이 크므로, 재료 내에 생성된 내부전기장(spatially modulated space-charge field)에 의해 색소가 재배열할 수가 있다는 것이다. 광굴절재료의 비선형 색소는 그림 5와 같이 외부에서 걸어준 전압과 내부전기장의 합으로 결정된 주기적으로 변화하는 total field를 받게 되므로, 유동성이 있는 색소는 total field의 방향으로 재배열하게 된다. 이로 인한 굴절율의 변화는 orientational enhancement라고 하는데,¹⁵ 순수한 전기광학효과(Pockels effect)보다 광굴절현상에 대한 기여가 크다고 보고되어 있다. 이 연구결과 이후로 낮은 유리전이온도를 갖는 광전도성 고분자 복합체계가 광굴절 재료로 가장 폭 넓게 사용되기 시작했으며, 이 시스템을 이용하여 2BC의 이득계수가 200 cm^{-1} 이상의 고효율 광굴절 재료들이 발표되었다. 1998년 Science에 발표된 DHADC-MPN/PVK/ECZ/TNF 복합체는¹⁶ 50 V/m 의 비교적 낮은 전압에서 이득계수가 200 cm^{-1} 이었고, $30 \text{ V}/\mu\text{m}$ 에서 회절 효율이 피크를 보일 정도로 우수한 광굴절 특성을 보였다. 또한 1998년 Moernor group에^{17,18} 의한 PVK/AODCST(35 wt%)/butyl benzyl phthalate(15 wt%)/C₆₀(0.5 wt%) 복합체의 경우(그림 5) 높은 이득계수(230 cm^{-1} at

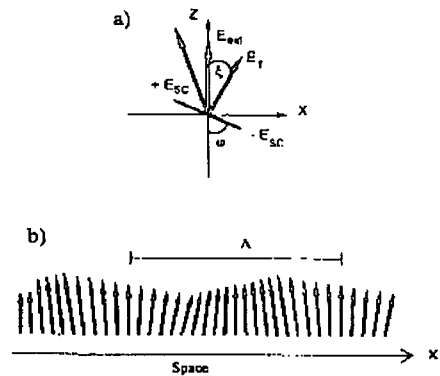


그림 5. (a) Total poling field of PR composite with low T_g ; (b) spatially modulated poling in PR sample [taken from ref. 7].

$100 \text{ V}/\mu\text{m}$) 뿐만 아니라 매우 빠른 반응 속도($\tau_g \approx 5 \text{ ns}$ at $1 \text{ W}/\text{cm}^2$)를 보여, 유기광굴절재료의 광전 자재료로의 응용가능성을 한층 높여 주었다.

2.3 실험방법

2.3.1 광전도성

광굴절재료에서 광전도성은 내부전기장의 크기 및 형성 속도를 결정하므로, 효율적인 광굴절 재료를 설계하기 위해서는 광전도성에 대한 정확한 측정이 중요하다. 유기광굴절재료에서와 같이 전하의 운반이 정공(hole)의 hopping메카니즘을 통해 이루어지는 경우, 광전도성은 $\sigma_{ph} = p e \mu$ 로 표시된다. 여기서 e 는 기본 전하량이고, μ 는 전하의 유동성(hole mobility)이다. p 는 빛 조사에 의해 생성된 광전하(mobile holes)의 갯수로서 전하발생효율(photogeneration efficiency) 및 사용파장에서의 흡광도 등에 의해 결정된다. 따라서 효율적인 광전도성 재료를 설계하기 위해서는 높은 광전하생성율을 갖는 전하 발생체(photogenerator) 및 빠른 전하의 유동성을 갖는 전하 수송체(charge transportor)를 동시에 고려해야 한다.

그림 6과 같이, 광전도성은 투명한 전극사이에 샌드위치된 얇은 필름에 직류전압을 가한 후, 빛 조사 전과 후에 시료에 흐르는 전류를 측정하는 광전도법(photocurrent method)을 이용하여 결정할 수가 있다.¹⁹ Photoconductive sensitivity, S 는 실험으로 구한 광전류(I)로부터 다음과 같이 결정된다.

$$S = I / E I_0$$

여기서 J 는 단위 전극 면적 당 흐른 광전류 (I)

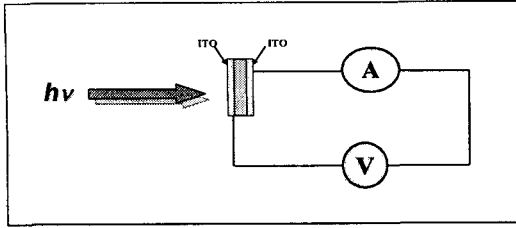


그림 6. Experimental setup for photoconductivity.

이고, E 는 측정시 가한 외부전압, I_0 는 단위 면적당 레이저의 강도이다.

2.3.2 Electro-optic 성질

광굴절 재료의 반응속도는 광전도성에 의해 의존하는 반면, 변조된 광굴절률(modulated refractive index)의 크기는 주로 비선형색소의 전기광학성질에 의해 영향을 받는다. 기존 전기광학용 색소의 특성은 이차 비선형 감수율(second order susceptibility, $\sim \mu \cdot \beta / M$)에 의해 평가되었지만, orientational enhancement의 기여가 큰 낮은 유리전이온도 광굴절 복합체에서는 다음과 같은 식으로 비선형 색소의 특성을 평가한다.²⁰

$$F = [9\mu\beta + 2\mu^2 \Delta\alpha / kT] / M$$

여기서 μ 는 dipole moment, β 는 hyperpolarizability, $\Delta\alpha$ 는 polarizability anisotropy, M 은 분자량이다.

광굴절용 색소의 전기광학성질은 그림 7에서 보여주는 것과 같이 transmission ellipsometry를 이용하여 비교적 손쉽게 결정할 수가 있다. 약 100 μm 정도의 후막 필름에 전장을 가해 비선형 색소를 폴링 시키면, 색소의 광학 계수(*i.e.*, $\Delta\alpha$, β) 및 배향된 정도에 의해 analyzer를 투과하는 빛의 세기가 변화한다. 투과된 빛의 세기 (T)는 다음과 같다.

$$T = \sin^2\left(\frac{2\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cdot \cos \theta}\right)$$

여기서 λ 는 사용광원의 파장, θ 는 시료의 기울인 각도, d 는 시료의 두께이다. 그리고 색소의 전기광학성질 (r)은 굴절률 차이 (Δn)로부터 알 수 있다.

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n^3 \cdot r \cdot E$$

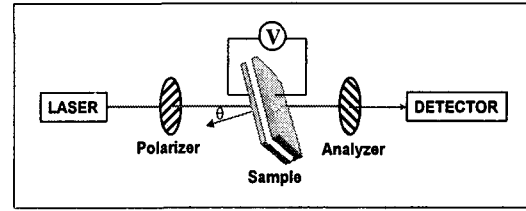
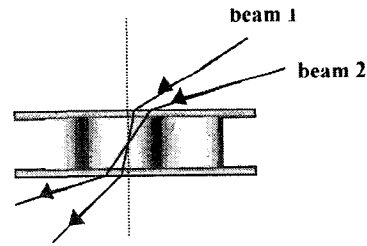
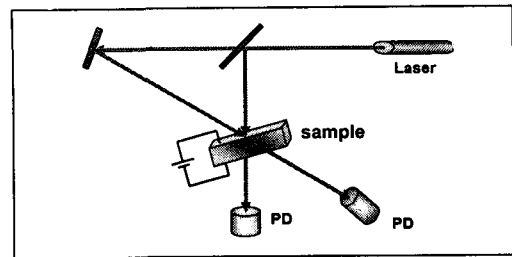


그림 7. Experimental setup for electro-optic measurement.



2BC signal (Normalized)

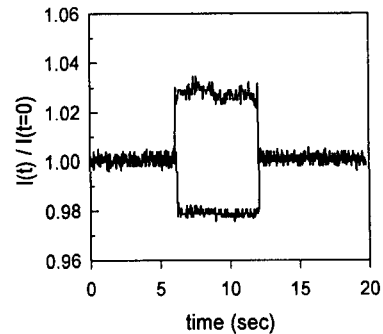


그림 8. Two-beam coupling experiment.

2.3.3 Two-beam Coupling(2BC) 측정법

앞절에서 설명했듯이, 두 빔간의 에너지 전이현상은 nonlocal response를 보이는 광굴절 재료만의 독특한 현상이므로,^{1,2} 2BC실험은 광굴절현상을 증명하는 직접적인 증거로 사용된다. 두 빔간의 에너지 전이의 크기는 이득계수(gain coefficient, Γ)로

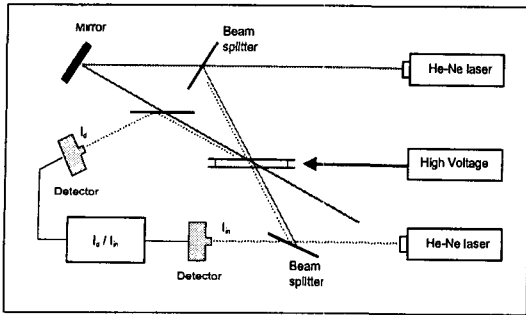


그림 9. Setup for four-wave mixing experiment.

주어진다.⁷

2BC 측정에는 약 100 μm 정도의 후막을 사용하며, 그림 8와 같은 실험장치를 이용한다. 에너지전이에 의한 gain빔 세기의 변화를 실험적으로 측정하여 coupling gain($\gamma = I_1(I_2 \neq 0)/I_1(I_2 = 0)$)을 구하며, 이득계수 (Γ)는 γ 로부터 구한다(coupled-wave equation).

$$\Gamma = \frac{1}{L} [\ln(\gamma\beta) - \ln(\beta + 1 - \gamma)]$$

여기서 $\beta = (I_2/I_1)$ 이고, L 은 beam path length이다.

2.3.4 Four-wave Mixing(FWM) Measurement

FWM법은 2BC법과 더불어 재료의 광굴절성질을 측정하기 위해 널리 사용되는 방법이다. FWM 법에서는 교차된 두개의 빔(writing beam)에 의해 형성된 광굴절격자에 제3의 빔(reading beam)을 조사하여 회절되는 빔의 세기를 측정하여 회절효율(diffraction efficiency, η)을 결정한다. Kogelnik가 제안한 coupled-wave theory에 의하면, 회절효율(η)은⁷ 재료의 굴절율변화와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\eta = \sin^2 [C_{DFWM} \Delta n]$$

여기서 Δn 은 광굴절 변화율이고, C_{DFWM} 는 사용 파장 및 시료의 geometry에 관련된 상수이다. ($C_{DFWM} = \pi d / \{\lambda_0 \cos[(\alpha_1 + \alpha_2)/2]\}$)

FWM측정은 그림 9와 같이 수행된다. Writing beams 간의 에너지전이를 최소화하기 위해서 일반적으로 writing beam으로는 s-편광 빔을 사용한다. 빛 분포가 균일한 reading beam은 writing beam

에 의해 생성된 광굴절 격자를 지우므로, 이를 최소화하기 위해 reading beam은 writing beam에 비해 천분의 1 정도로 낮은 세기의 빛을 이용한다. Reading beam의 파장은 writing beam과 같은 파장을 사용해도 되지만 입사되는 reading beam의 방향은 Bragg condition을 만족하도록 조정해야 한다. 회절효율은 회절된 reading빔의 세기($I_{R, \text{diffracted}}$)를 측정하여 아래와 같이 얻을 수가 있다.

$$\eta_{\text{int}} = I_{R, \text{diffracted}} / (I_{R, \text{diffracted}} + I_{R, \text{transmitted}})$$

여기서 한가지 유의해야 할 점은 회절효율 측정실험은 광굴절현상에 대한 직접적인 증거는 되지 못한다는 것이다. 먼저 2BC측정을 통하여 에너지전이가 관찰된 재료의 경우에만 reading beam의 회절이 다른 광학현상에 의한 것이 아니고 광굴절격자에 의한 것임을 확신할 수가 있다.

3. 결 론

본 고에서 논의한 유기 광굴절 고분자재료는 10년이라는 짧은 연구기간에도 불구하고, 정보재료 소자로의 응용이 가능할 정도의 고효율 광굴절 재료 개발 등 많은 긍정적인 연구결과를 보이고 있다. 유기광굴절 재료는 LiNbO_3 같은 기존의 무기결정에 비해 가격 및 가공 측면에서 훨씬 유리하며, 회절효율 및 에너지 전이 등의 광굴절 특성 면에서도 더 우수한 결과를 보여주고 있다. 뿐만 아니라 유기광굴절재료는 여러 응용분야에 적합하도록 화학적 성분 및 구조를 손쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있어, 무기결정재료를 대체할 수 있는 최첨단재료로 관심이 집중되고 있다.

지금까지 보고된 여러 유기광굴절 재료 중에서 가장 널리 연구되고 있는 분야는 높은 효율성을 보이는 광전도성 고분자를 매트릭스로 하는 고분자 복합체 시스템이다. 현재 이 분야의 연구동향을 살펴보면, (1) PVK보다 전하수송능력이 우수한 광전도성 고분자의 설계 및 광전하생성효율의 향상을 통하여 반응속도를 증가 시키고, (2) 고분자 매트릭스와 상용성이 우수하고 높은 광학성질을 갖는 비선형 색소의 개발로 광굴절특성을 높이려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 아직도 real-time application 등에 적용하기에는 느린 반응속도, 높은 인가 전기장, 많

은 양의 첨가제사용으로 인한 상분리, 색소(chromophore)의 배향 완화 등으로 인한 안정성의 저하 등 해결해야 할 많은 문제를 갖고 있다. 이와 같은 문제들은 광굴절재료분야의 현재의 연구진행속도를 감안해보면 짧은 기간 내에 해결되어, 홀로그래피 등 광전자소자로의 응용개발이 실현될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. W. E. Moerner and S. C. Silence, *Chem. Rev.*, **94**, 127 (1994).
2. P. Gunter and J.-P. Huignard, "Photorefractive Materials and their Applications", vols. 1 and 2, Springer-Verlag, Berlin, 1988/1989.
3. A. Ashkin, G. D. Boyden, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, J. J. Levenstein, and K. Nassau, *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 72 (1966).
4. F. S. Chen, *J. Appl. Phys.*, **38**, 3418 (1967).
5. K. Sutter, J. Hulliger, and P. Gunter, *J. Opt. Soc. Am. B*, **7**, 2274 (1990).
6. S. Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg, and W. E. Moerner, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 1846 (1991).
7. B. Kippelen, K. Meerholz, and N. Peyghambarian, "Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers", eds. by H. S. Nalwa and S. Miyata, Chap. 8, CRC Press, Boca Raton, 1997.
8. N. V. Kukharev, *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.*, **2**, 114 (1976).
9. K. Tamura, A. B. Padias, H. K. Hall, and N. Peyghambarian, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1803 (1992).
10. L. Wang, Q. Wang, and L. Yu, *Appl. Phys. Lett.*, **73** (18), 2546 (1998).
11. L. P. Yu, W. K. Chan, Z. N. Bao, and S. Cao, *Macromolecules*, **26**, 2216 (1993).
12. E. Hendricks, J. Herlocker, J. L. Maldonado, S. R. Marder, B. Kippelen, A. Persoons, and N. Peyghambarian, *Appl. Phys. Lett.*, **72**(14), 1679 (1998).
13. M. C. J. M. Donckers, S. M. Silence, C. A. Walsh, F. Hache, D. M. Burland, W. E. Moerner, and R. J. Twieg, *Opt. Lett.*, **18**, 1044 (1993).
14. K. Meerholtz, B. L. Volodin, B. Sandalphon, B. Kippelen, and N. Peyghambarian, *Nature*, **371**, 497 (1994).
15. W. E. Moerner, S. M. Silence, F. Hache, and G. C. Bjorklund, *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 320 (1994).
16. B. Kippelen, S. R. Marder, E. Hendrickx, J. L. Maldonado, G. Guillemet, B. L. Volodin, D. D. Steele, Y. Enami, Sandalphon, Y. J. Yao, J. F. Wang, H. Rockel, L. Erskine, and N. Peyghambarian, *Science*, **279**, 54 (1998).
17. D. Wright, M. A. Diaz-Garcia, J. D. Casperson, M. DeClue, W. E. Moerner, and R. J. Twieg, *Appl. Phys. Lett.*, **73**(11), 1490 (1998).
18. A. Grunnet-Jepsen, C. L. Thompson, R. J. Twieg, and W. E. Moerner, *Appl. Phys. Lett.*, **70**(12), 1515 (1997).
19. B. E. Jones, S. Ducharme, M. Liphardt, A. Goonesekera, J. M. Takacs, L. Zhang, and R. Athalye, *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 1064 (1994).
20. S. Beckmann, K. Etzbach, P. Kramer, K. Lukaszuk, R. Matschiner, A. J. Schmidt, P. Schuhmacher, R. Sens, G. Seybold, R. Wortmann, and F. Wurthner, *Adv. Mater.*, **11**(7), 536 (1999).