

복소 굴절률 함수 행렬에 기초한 비선형 해석

Nonlinear analysis based on complex refractive index functional matrix

김명준

아주대, 일반대학원, 분자과학기술학과, mjkim@ajou.ac.kr

매질의 복소 굴절률은 원래 스칼라 상수라고 알려져 왔으나, 근래에는 광자 홀러스 밀도에 따라 포화되는 특성이 관측되어 광자 홀러스 밀도 함수이라는 것이 일반적으로 연구되고 있으며, 이방성 매질에서의 빛의 거동을 기술하기 위해서 복소 굴절률 함수를 행렬로 기술되고 있다.[7] 굴절률이 비선형 광학에 사용된 예로는 펄스 광 매개 진동(POPO)의 위상정합에 광 결정의 굴절률 스펙트럼이 사용되어 왔다.[5]

고 밀도의 기록을 행하고 재생하는데, 쓰이는 광이 집광되어 단위 면적당의 광량이 증가하므로 비선형 효과가 커진다. 중심 대칭성을 갖는 물질의 편극(Polarization)은 위의 3차 비선형 항을 고려했을 때, 매질의 비선형 유전율에서, 비선형 굴절률은 다음과 같이 복소 굴절률의 제곱은 유전율로 된다.

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi^{(1)} + \chi^{(3)}I + \chi^{(5)}I^2) = (n - \gamma I)^2 \dots\dots\dots 1)$$

이러한 굴절률의 비선형 항 γI 는 susceptibility χ 의 비선형성에 기인한 것으로 이렇게, 굴절률은 광자 홀러스 밀도의 함수로 주어진다. 비선형 항 γI 는 χ 의 비선형 항에 의한 것으로 흡수 에지 근처에서 음의 값을 가지는 경우도 있어서 렌즈 구실을 하는 박막이 광기록 응용으로 기대되고 있다. 높은 밀도의 광자 홀러스가 좁은 영역에 집중되면, 비선형 효과가 크게 는데 양자역학적인 소광 계수가 에너지 준위간 천이와 연관되어 있고, 물질이 광이 이동한 거리에 따른 기하급수적으로 광량이 줄어들게 흡수되던 것이 포화되는 현상도 존재한다. 간단한 2준위 계에 대해서 흡수율은 $k_0/(1+I/I_s)$ 의 형태를 지니게 된다[1]. 온도에 따라 굴절률이 변하는 현상은 열팽창에 의한 밀도의 변화에 의해서 굴절률이 변화하고 그 것 또한 $n - \gamma I$ 의 형식으로 근사될 수 있다. 이러한 비선형 굴절률의 온도 창(Thermal Window)방식의 고밀도 기록을 재생하는데 응용 연구되고 있는데, 현재 알려진 초해상 방식으로는 열에 의한 산화물의 환원, 타원 버블[6] 등은 비가역 구조 변형의 문제를 포함하고 있어 재생 횟수가 제한되는 문제점이 발생하였다.

비선형 광학계수를 측정하는 방법으로는 그림 1과 같이 레이저 광, 렌즈와 광 검출기를 사용해서 시행되고 있다.[2] 1mm의 얇은 CS₂ (n = 1.5) 샘플을 광 초점 근처에서 광의 진행 방향인 z 방향으로 스캔하는 경우,

검출되는 광량이 변하는데, 이는 집광에 의해 굴절률의 비선형 특성 ($n - \gamma I$)이 발생하고 따라서 경계 조건에 의해 결정된 흐레넬 반사 계수가 비선형 특성을 가지게 된다.

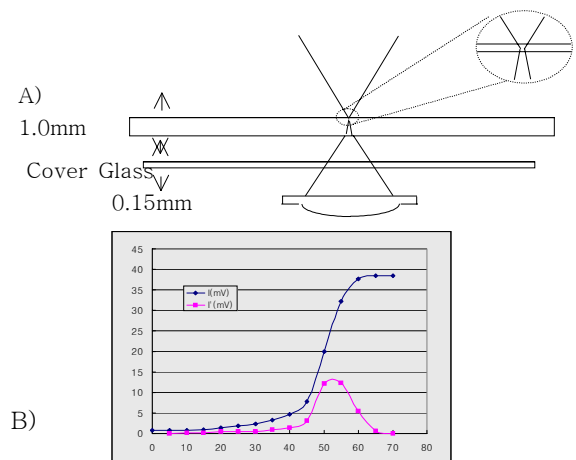


Fig.1. Z-Scan Apparatus

A) Z scan schematic B) 스팩 크기측정(Knife Edge Method)

실제로, 샘플의 Z-Scan에 의해 Peak Valley Fluctuation 이 발생하는 것이 보고되어 있다.[2] 비선형 효과를 고려한 투과율은 다음과 같이 주어진다.

$$T = T_0 + T_1 \gamma (I_1 - I_2), T_1 = \frac{16m(n-1)}{(n+1)^5} \dots\dots\dots 2)$$

여기서, I_1 과 I_2 는 각각 제1 반사면과 제2 반사면에서 집광된 광자 홀러스 밀도에 단위 광자의 에너지를 곱한 에너지 밀도이다. 가우시안 광의 z 축 상의 광자 홀러스 밀도는 로렌쯔안이 되고, 광의 웨이스트를 측정하기 위해서는 나이프 에지법과 같은 방법이 사용되는데, 포인터 레이저의 렌즈에 의한 빛의 웨이스트 측정이 실시되었다. (그림 1.B) 실제의 광 자료 저장 매질에서의 비선형 효과를 계산하기위해 비선형굴절률을 사용하여 접근한다.

광 기록 시스템 내의 레이저의 집광 초점에서는 비선형 광 효과를 유발하기에 충분히 광자 홀러스 밀도가 높다. 막의 두께에 따른 비선형 투과 광량의 아래 식의 근사계산이 수행될 수도 있다.

$$t \approx f_1 a f_2 \dots\dots\dots 3)$$

비선형 특성의 측정법으로는 지-스캔(Z-Scan), 여기-검출(Excite -Probe)등이 사용되며, 초 해상 박막을 가우시안 파동의 투과 광 진폭은 비선형 굴절률 functional $n(I) = 1 + (n-1-jk)/(1+I/I_s)$ 에 의해 다음과 같이 근사된다. 상대적으로 두꺼운 매질에 대해서 근사 $t_{10} \approx t_{02}t_{20} \exp(jkd)$ 와 다중 반사현상을 무시하여 투과율을 계산하면,

$$T = T_0(1+I/I_{s1}) \exp(4\pi k_2 d/\lambda I/I_s) \dots \dots \dots 4)$$

광 자료저장용 픽업의 렌즈의 집광이 의한 광 디스크의 반사 신호에 비선형 효과의 영향을 평가하기 위해서 고려되었다.

$$R = R_0/(1+I/I_{s2}) \dots \dots \dots 5)$$

I_{s2} 의 불균일로 인한 잡신원(Noise Source)으로 고려된다. 이들 포화 현상을 해결하기 위해서, 재생 시 펄스 파를 사용하는 것이 유용하다. 비선형 굴절률의 근원이 조사되었는데, 분자 재배향, Electro- Striction, 전자 밀도 재분배, 그리고 열적인 기여가 그것이다. 최근, 열 환원과 타원 버블이 광 자료 저장을 위한 Super RENS 응용을 위해 강도 높게 연구되어 왔다.[6] Super-ReNS의 기록 다층막이 4층에서 6층으로 고층화되며 디스크 초해상막이 상변화를 일으키는 문제점 등이 발생하였다. 근래에는 최고 용점의 텅스텐이 초해상 특성을 가지고 있어 연구되고 있다. 이러한 비선형 현상들은 시간지연을 지닌 지연응답특성을 지니고 있다.

사실, 다층 방식과 짧은 파장을 사용하는 것이 용량향상의 주된 기술이었다. 고집적의 다층 광디스크를 실현하기 위해서, 설계의 관점에서 투과형 다층 저장 방식의 채용이 이익이 될 수 있다고 판단되기도 하였다. 투과형 다층 저장 방식의 집광 서보 제어를 가능케 하기 위해서, 박막의 비선형 응답 신호가 집광 오류신호로 사용될 가능성이 미세하지만 존재한다.

중심 대칭성이 아닌 매질에서의 이차 비선형 광학현상 중에서 광학 이방성이 POPO (펄스 광 매개 발생)의 위상 정합에 사용되는데 굴절률이 행렬이라는 사실을 도입할 때의 차이점을 조사하기 시작한다. 맥스웰-존스 행렬 $\exp(j[n]k_0 r)$ 이 이방성 매질의 해이다. 존스 행렬의 좌표 회전을 맥스웰-존스 행렬에 적용하면 $R(\theta) \exp(j[n]k_0 r) R(-\theta) = \exp(jR(\theta)[n]R(-\theta)k_0 r)$ 가 된다. 따라서, $\exp(j[n(\theta)]k_0 r)$ 가 맥스웰 방정식의 해임을 증명할 필요가 있다.

$$d[n(\theta)]/d\theta = dR(\theta)/d\theta [n] R(-\theta) + R(\theta) [n] dR(-\theta)/d\theta \sim 0 \dots \dots \dots 6)$$

따라서 종래의 일축 이방 매질의 굴절률의 각 의존성 $n^{-2}(\theta) = n_e^{-2} \sin^2 \theta + n_o^{-2} \cos^2 \theta$ 을 다음과 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$n(\theta) = (R(\theta)[n]R(-\theta))^{-1/2} = R(\theta) [n]R(-\theta) \dots \dots \dots 7)$$

굴절률의 각의존성이 광 매개 진동에서 위상 정합을 위

해 사용되어 왔는데 행렬 굴절률을 여기에 적용해 본다. 본 발표에서는 그림 2에서와 같이 종래 방식과의 차이가 거의 없음을 확인하였다.

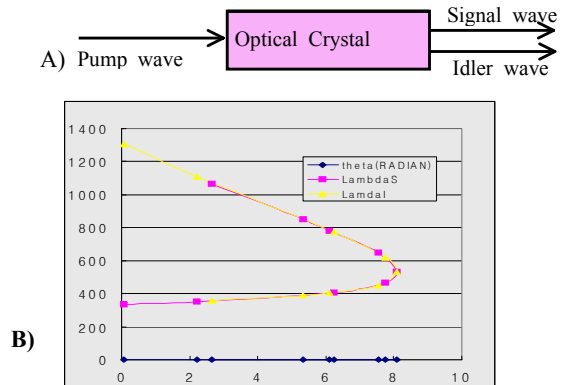


Fig.2 Matrix Phase Matching for Pulsed Optical Parametric Oscillation (POPO) A) POPO B) Energy and Momentum Conservation using Double Refractive Index Spectrum of BBO Crystal for OOE PM

실제로 입체적인 결정 또는 분자구조에 대한 복굴절의 3차원 회전에 대한 기술을 위해서 굴절률 행렬의 도입은 필수적이라고 할 수 있다.

결론적으로 비선형 광학 현상을 복소 굴절률 함수 행렬에 기초하여 접근하였다. 먼저 굴절률의 포화 현상 세부 메커니즘을 조사하였고, 광 자료 저장장치에 응용가능성의 연구가 수행되어 비선형 박막의 투과율을 근사계산하는데 적용하였다. 특히 비선형 현상의 주 응용예의 하나인 광 매개 진동에 쓰이는 이방성 결정의 위상 정합과 복굴절의 삼차원 회전에 대한 기술을 위해 굴절률을 행렬로 기술할 수 있다.

참고문헌

[1] N. Bloembergen *et al.*, Physical Review, Volume 133, Number 1A, (1964) pp. A37~A47
 [2] W.Zhao and P.Palfy-Muhoray, Appl. Phys. Lett. 63 ,12 (1993) pp.1613~1615
 [3] Saleh and Teich, Fundamentals of Photonics (Wiley, New York, 1991).
 [4] J.W.Wu *et al.*, Journal of the Optical Society of America B6, 707 (1989).
 [5] Zhang *et al.*, Journal of the Optical Society of America B10, 1758 (1993).
 [6] Jooho Kim *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42 (2003), pp.1014~1017
 [7] M.-J. Kim., Bulletin of Korea Physical Society, I-19 (2005S). p.110
 [8] M.-J. Kim and S.-Y. Kim, Photonics Conference, T2-E5 (2004)

