

유전물질의 비선형 광학 특성

Optical nonlinearity in genetic material

박병호*, 전성찬†

Byeongho Park and Seong Chan Jun

(2014년 3월 15일 접수; 2014년 3월 19일 심사완료; 2014년 3월 22일 게재확정)

Abstract

Optical nonlinear property is utilized to the wave generation, generating the beam at intended wavelength, and optical computing systems. The genetic material, which is the DNA with helical structure in nano-scale, is fascinating for optics communities due to artificially controllable sequence that determines the physical and chemical property. Nonlinearity of DNA was investigated by the four wave mixing experiment, which is with two incident beams located at 1550nm and 1650nm. The four output beams including incident beams are emitted from genetic material such as 1461nm and 1763nm by nonlinear characteristic. The 1461nm beam which is generated by four wave mixing phenomena was observed by optical spectrum analyzer.

Key Words : DNA, Optical nonlinearity

기호설명

n : 굴절률
 n_0 : 선형 굴절률
 n_2 : 비선형 굴절률
 E : 전자기 파동의 세기
 λ : 전자기 파동의 파장
 ω : 전자기 파동의 주파수

활용되며 맞닿은 물질간 경계에서 빛의 진행 속도 변화 비율로 값을 매긴다. 굴절률은 입사되는 빛의 파장에 따라 달라질 수 있으며 일상생활에서 사용되는 전자기 파동의 세기에서는 선형적으로 변화를 일으킨다. 이와 다르게 입사되는 빛의 세기가 매우 커지면 물질을 통과한 빛의 굴절률 변화가 비선형적으로 일어나게 된다.

1. 서론

1.1 광학적 비선형성

빛은 전자기 파동으로 진동하는 주파수에 따라 파장이 결정되며 주파수 별로 광자(Photon)가 갖는 에너지는 달라지게 된다. 빛이 물질에 입사되면 물질을 구성하고 있는 원소, 원소들간의 배열과 결합 상태, 표면에서의 구조 등 다양한 요소에 의해 에너지 변화를 겪게 된다. 그래서 물질은 빛을 흡수하기도 하며 반사, 투과 시키기도 한다. 빛에 대한 물질의 특성은 빛 입사 전, 후의 전자기 파동 진행속도변화로 비교 및 분석할 수 있다. 이에 대한 지표는 굴절률이

$$n = n_0 + n_2 E^2 \quad (1)$$

식 (1)은 물질을 투과하면서 발생하는 광학적 비선형 굴절률 변화를 나타낸 식이며, 빛의 세기(E)가 커질수록 비선형성이 커짐을 알 수 있다. 이러한 비선형 특성을 갖는 물질을 이용하여 다양한 광학 응용분야가 연구되고 있으며, 산업에서도 다각도로 접근하여 활용되고 있다. 입사된 빛의 에너지에 따라 들어온 빛의 파장에 1/2 배, 1/3 배 파장의 빛을 발산하는 물질을 이용하여 원하는 파장을 발생시키는 기술, 광학 연산 회로를 만들어 빛으로 운영되는 컴퓨터 개발 기술 등 활용도가 다양하다. 본 논문에서는 두 개의 빛을 입사 받은 물질이 네 개의 빛을 발산하는 현상(Four wave mixing)을 관찰한 내용을 서술하려고 한다. [1]

† School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : scj@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-5817

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

1.2 유전물질의 활용

최근에는 인체의 유전정보를 담고 있는 DNA 를 생물학적인 접근 외에도 물질 자체로 다양한 가능성을 갖고 있는 재료로써 연구가 진행되고 있다. DNA 가 비선형성을 갖는 물질로 밝혀지면서 과거 비선형 물질을 대체할 수 있는지 그 여부에 관심이 모아지고 있다. 이러한 이목을 끌 수 있는 이유는 DNA 가 유전정보를 네 가지 아미노산 기본 요소의 배열형태로 저장하고 있으면서 배열 순서에 따라 자체 특성이 달라질 수 있기 때문이다. 배열을 인공적으로 변형시킬 수 있는 기술이 개발되어 나노미터 수준의 초 미세 입자를 원하는 특성을 갖도록 조정할 수 있다는 점도 DNA 가 더욱 각광받게 된 이유 중 하나다. 기본요소 아미노산에는 아데닌(Adenine), 티민(Thymine), 구아닌(Guanine), 시토신(Cytosine)이 있으며 DNA 의 길이, 배열, 나선구조 형태 등 다양하게 조작가능 하다.

2. 기초 광학 특성 분석

2.1 흡수도 측정

유전물질과 같이 생체물질들의 경우 전기적 실험을 실시하였을 때 손상되거나 오염될 수 있으며, 버퍼 용액이나 생장액 속에 적절한 pH 와 양분, 단백질 등이 섞여 평형상태를 유지한 용액 안에서만 상태가 보존되는 경우가 많아 전기적 특성 분석 방법을 적용하기 힘들다. 하지만, 광학 분석 방법은 빛의 세기만 적절하다면 접촉 없이 액상, 박막, 기체 상태 등 샘플 상태와 상관 없이 측정이 가능하다. 그리고 다양하게 섞여 있는 물질들에 의해 발생하는 변수들도 대조군과 실험군 실험을 따로 실시하여 실험물질에 의한 영향을 알아볼 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 물질의 광학적 특성을 보기 위해 활용되는 기초 실험으로는 투과도 측정을 통한 흡수도 연산 방법이 있다. 이 실험은 물질에 다양한 파장의 빛을 입사하여 물질이 입사된 빛을 얼마나 흡수하고 나머지 빛을 투과 시키는지를 가능하여 물질의 광학 특성을 분석할 수 있다. 파장 별 흡수되는 정도가 달라질 수 있으며, 파장에 따른 흡수도 스펙트럼은 물질 고유의 특징으로 다른 물질들과 차별적으로 나타나게 된다.

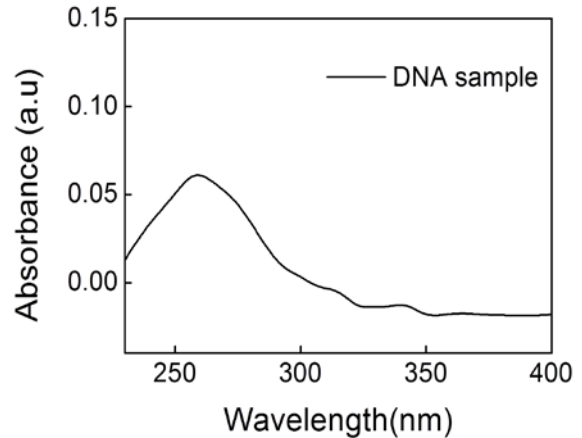


Fig.1 Absorbance of DNA sample in UV and visible range from 230nm to 400nm

그림 1 을 보면, 이번 연구에서 사용된 DNA 는 과거 연구되었던 DNA 의 흡수도 특성과 유사하며 260nm 에서 다른 파장에서보다 높은 흡수도를 보이고 있다. [2] DNA 와 같은 생체 물질의 경우 분자량이 매우 큰 물질에 속하며 빛이 입사되었을 때 파장이 짧고 높은 에너지의 빛을 흡수한다. 이후 350-400nm 에서부터 흡수가 거의 없는 투명한 모습을 보여주며 일반적인 생체물질들의 가시광선 영역에서 거의 투명한 성질과 일맥상통한 결과를 보여준다.

물질의 흡수도를 통해 우리는 물질의 다양한 물리적 특성을 알 수 있다. 예를 들어 흡수가 시작되는 시점을 토대로 밴드갭의 크기를 유추해 볼 수 있으며, 물질 속에서의 빛의 진행을 예상하여 굴절률, 유전율 등 광학 특성들을 연산해볼 수 있다.

2.2 DNA 의 선형 굴절률

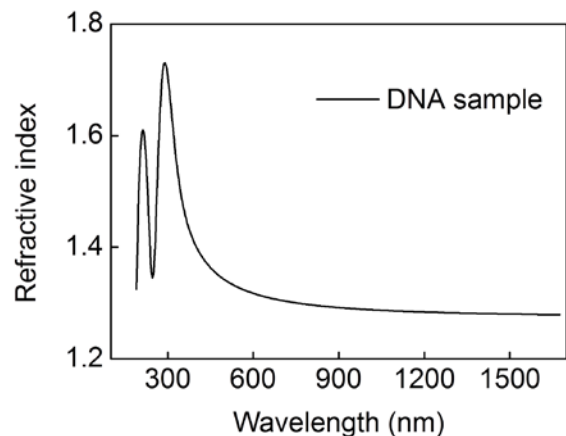


Fig. 2 Linear refractive index of DNA sample from 200nm to 1600nm range

선형 굴절률이란, 비선형 현상이 일어나지 않는 약한 세기의 빛에서 나타나는 물질의 광학 특성으로 앞서 실험했던 흡수도 스펙트럼을 활용하여 실험 조건에 맞는 가정과 공식을 적용하면 얻을 수 있고 타원 편광 반사법(Ellipsometry)으로도 구할 수 있다. 일상 생활에서 발생하는 빛의 굴절과 매질에서의 빛의 진행 속도 변화 등은 모두 이 선형 굴절률에 의해 결정되며, 비선형 효과는 이를 지배하는 n_2 값이 매우 작아 강한 세기의 빛이 주어지야만 그 변화를 포착할 수 있다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 비선형 굴절률을 얻기 위해서는 선형 굴절률, n_0 ,의 값이 필요하다.

본 연구에서는 선형 굴절률의 분석을 통해 비선형성을 물질의 비선형성을 알아보기 위해 타원편광 반사법을 사용하였다. 이 실험은 박막 형태의 샘플에 타원 편광을 주사하여 빛의 위상(phase)과 크기(amplitude) 변화를 동시에 얻음으로써 물질의 광학특성을 분석하게 된다. 유리(Glass) 기판에 올려진 DNA 박막을 대체적으로 투명하다는 가정에 실험 조건에 맞는 공식을 찾아 샘플의 구조와 상태 등 조건들을 적용하여 선형 굴절률, n_0 ,를 구하였다. 그림 2 를 보면, 200~350nm 에 걸친 영역에 흡수도가 DNA 만의 특이 스펙트럼을 보여주었듯이 선형 굴절률에서도 2 개의 고점이 나타나고 있다. 600nm 이후 구간에서는 근적외선 영역까지 거의 변화가 없는 굴절률을 보여주고 있으며 이는 가시광선영역과 적외선 영역에서 DNA 로 인해 빛이 급격하게 변화를 가져오지 않음을 뜻한다.

3. 비선형 특성 관찰을 위한 실험

3.1 입력광 입사

본 연구에서는 Four wave mixing 현상을 확인하여 DNA 가 갖는 비선형 특성을 관찰하였다. Four wave mixing 은 이름에서 알 수 있듯이 파장이 각기 다른 다수의 빛이 물질 내에서 상호작용이 일어나면 비선형 효과에 의해 새로운 빛이 발생하는 현상을 말한다. 이를 위해선 입력광에 두 가지 다른 파장의 빛을 사용하여야 하고 광학 스펙트럼 분석기를 통해 출력광을 분석하였다.

물질에 파장이 다른 두 개의 빛을 입사 시키기 위해 광학 매개변수 증폭기(optical parametric amplifier)를 사용하였다. 이 장비는 800nm 파장 빛을 비선형 특성을 갖는 결정물질을 활용하여 에너지 변환에 따라 1550nm(λ_1) 와 1650nm(λ_2) 빛으로 나누어 발산시킨다. 두 전자기 파동이 물질 안에서 서로 부딪치면서 물질의 특성에 따라 비선형 효과가 나타나게 된다. 상호작용이 잘 일어나고 강한 세기의 빛을 만들기 위해 빛은 포물면 거울에 의해 초점이 잡히게 된다. 초점에서 두 빛간에 영향으로 비선형 효과가 가장 많이 일어나게 되며 초점을 지나 방사되는 빛을 다시 한번 포물면 거울을 활용해 초기 빛 상태와 같이 평행광으로 돌려주게 된다.

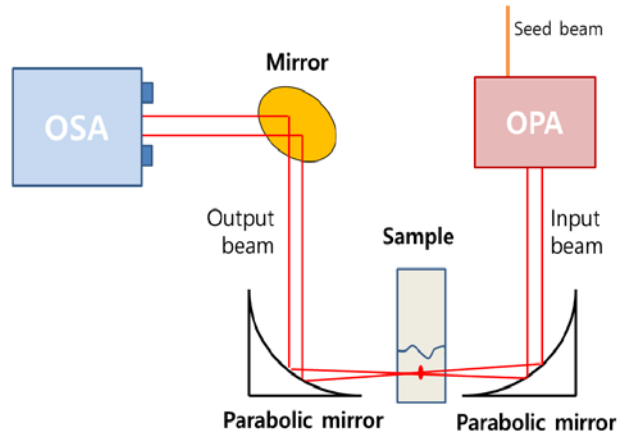


Fig. 3 Optical experiment set up with OPA and OSA

3.2 출력광 검출

물질 안에서 비선형 특성이 발휘되면 다양한 파장의 전자기 파동이 생성되고 이러한 파장이 혼합된 빛은 광학 스펙트럼 분석기에 입력되게 된다. 이 장치는 복수의 파장이 섞인 빛에서 각 파장별 전자기 파동의 세기를 검출해주며 그레이팅(grating)을 활용해 파장에 따라 반사된 빛이 굴절되는 각도가 달라지는 것을 이용하여 스펙트럼을 분석한다. DNA 샘플을 지난 빛은 Four wave mixing 현상에 의해 입력된 빛 외에 새로운 파장의 빛이 방출되는 것이 검출 되었다. 본 연구에서 사용된 광학 스펙트럼 분석기는 1000-1700nm 까지 근적외선 영역이 측정가능하며 1461nm 근처에서 비선형 효과에 의해 발생된 빛이 관찰되었다.

4. 비선형 실험 결과 및 분석

4.1 입력광과 출력광 비교

광학 매개변수 증폭기에 의해 발생된 1550nm 와 1650nm 빛은 DNA 샘플에 입력되어 새롭게 1461nm 빛을 발생시켰고 이 현상은 광학 스펙트럼 분석기를 통해 관찰되었다. Four wave mixing 현상에 의해 새롭게 발생하는 빛은 에너지 변환에 따라 주파수 ω_1 , ω_2 의 빛이 입력 되었을 때 $2\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2 - \omega_1$ 의 에너지를 갖는 빛이 발생하는 것으로 알려져 있다. 위의 이론적, 경험적 바탕에 따라 입력광 1550nm 와 1650nm 를 물질에 입사시켰을 때 Four wave mixing 예상 발생 파장은 1461nm 와 1763nm 이다. 본 연구에서 발견한 빛은 1461nm 파장의 빛으로 비선형 효과에 의해 DNA 에서 발생된 빛이다.

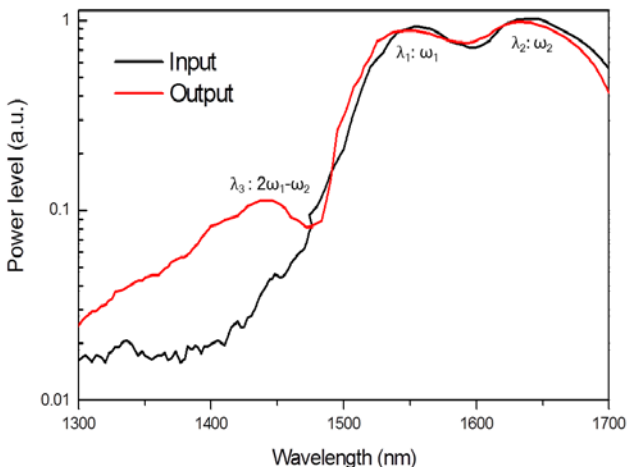


Fig. 4 Four wave mixing spectrum with input and output beams

5. 결론

본 연구에서는 기초 광학 실험을 통해 DNA 가 갖는 기본적인 광학 특성을 확인하였고, DNA 샘플에서 Four wave mixing 을 통해 입력광 1550nm, 1650nm 빛을 받아 1461nm 빛이 새롭게 발생되어 발산하는 모습을 관찰 하였다. 그 빛의 세기는 이후 면밀히 검토되어 DNA 가 갖는 비선형 특성의 강도를 가늠하는데 활용될 수 있으며, DNA 샘플의 광학적 비선형 특성은 DNA 가 갖는 재료측면에서의 장점들과 함께 광학 분야에서 다양하게 이용될 것이다.

후 기

본 연구는 한국 과학 기술 연구원 센서 시스템 연구 센터와 파이오니어 센터 연구 프로그램 (2010-0019457) 지원을 통해 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] Nie, Wenjiang, 1993, "Optical nonlinearity: phenomena, applications, and materials", Advanced Materials, Vol. 5, pp. 520-545
- [2] Samoc, Marek, Anna Samoc, and James G. Grote, 2006, "Complex nonlinear refractive index of DNA", Chemical physics letters, Vol. 431, pp.132-134