

근적외선 분광 분석을 위한 음향광학변조필터의 설계 및 교정

유장우[†] · 김대석^{*} · 곽윤근^{*} · 김수현^{*} · 이운우^{**} · 황인덕^{***}

(2004년 5월 8일 접수, 2004년 8월 13일 심사완료)

Design and Calibration of Acousto-Optic Tunable Filter(AOTF) for Near Infrared Spectral Analysis

Jang Woo You, Daesuk Kim, Yoonkeun Kwak, Soohyun Kim, Yunwoo Lee and In Duk Hwang

Key Words : NIR(근적외선), AOTF(음향광학변조필터), Calibration(교정)

Abstract

In this paper, we proposed the design and calibration method for the near infrared Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF). The theory and design principles of AOTF for the visible light are well known since I.C.Chang has developed the parallel tangent condition for the non-collinear AOTF. Deflection angle, frequency-wavelength relation, spectral resolution, etc. were calculated based on the theory of AOTF. From this result, important parameters – incident and acoustic angle – to fabricate AOTF were decided. We measured the spectral resolution and the relation between electrical driving frequency and the optical wavelength of diffracted light to calibrate the near infrared AOTF. About 40 ~ 80 MHz electrical frequency was required to get 1200 ~ 2200 nm near infrared light. Spectral resolution was less than 10 nm in the near infrared region.

기호설명

k_i : 입사광의 파수 벡터
 K_a : 음파의 파수 벡터
 k_d : 회절광의 파수 벡터
 θ_i : 입사각
 θ_a : 음향각
 θ_d : 회절각
 Δn_b : 분산 특성
 f : AOTF 구동 주파수
 λ : 회절광의 파장
 $v(\theta_a)$: 음파의 속도

C_{ij} : 탄성강성계수
 $\Delta\lambda_a$: 분광 분해능

1. 서론

분광 분석이란 시료에 빛을 조사하여 투과, 흡수 또는 반사되는 빛의 스펙트럼을 분석하는 것이다. 근적외선은 약 700 nm 에서 2500 nm 의 파장대역을 말하며, 최근 컴퓨터의 발달과 스펙트럼의 통계적인 분석 방법의 발달로 농업, 식품, 의료, 제약, 환경, 화학 등의 많은 분야에서 연구가 진행되고 있다. 대표적인 연구 분야로서 당뇨병 환자의 혈당 농도를 고통 없이 측정할 수 있는 무채혈 혈당기(Noninvasive Glucometer)가 있다. 혈당 농도를 측정하기 위해서는 인체 일부에 빛을 조사하여 반사되거나 투과된 빛의 흡광도(Absorbance)를 통계 분석하여 농도를 예측한다. 사용되는 글루코즈(Glucose) 흡수파장은 1650 nm 와 2200 nm 대역의 근적외선이며, 특히 2200 nm 대역이 글루코즈 농도와 상관성이 좋은 것으로 알려져 있다. 분광 분석을 위한 근적외선 파장의 빛을 얻기 위해 널리

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : jyou@kaist.ac.kr
 TEL : (042) 869-3252 FAX : (042) 869-5201

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

^{**} 한국표준과학연구원 광도영상그룹

^{***} 삼성종합기술원

사용되는 방법으로 회절격자(Grating)를 이용하여 기계적인 주사(Scan)을 한다. 그러나 회절격자를 이용한 방법은 기계적인 구동으로 인한 시스템의 안정성이 떨어지며, 크기가 커지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 최근에는 음향광학변조필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 음향광학변조필터는 기계적인 구동방식이 아닌 전기적인 주파수 주사를 통하여 원하는 파장을 고속으로 얻을 수 있다. 또한 회절격자에서는 불가능한 2 차원 분광 분석을 할 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 현재 가장 많이 쓰이고 있는 음향광학변조필터는 1970 년대 I.C.Chang 에 의해서 개발되었다.^(6,7) TeO₂ 를 이용한 비동축(Non-collinear) 방식으로, 입사각이 약 7°까지 확대되어 광학계를 간단하게 구성할 수 있게 됨으로써 많은 응용 분야에 이용되고 있다. 가시광선 영역에서의 연구는 많이 진행되었으나, 근적외선 대역의 음향광학변조필터에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 가시광선 대역에서의 설계 방법을 확장하여 근적외선 대역의 음향광학변조필터를 설계 및 제작하고, 시스템을 구성하여 교정(Calibration)함으로써 설계 방법의 적합성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 음향광학변조필터(AOTF)의 설계

2.1 이론

음향광학변조필터(AOTF)란 빛과 음파가 광학 결정 안에서 상호 작용하여 음파의 주파수에 해당하는 빛의 특정 성분만을 걸러내는 일종의 필터이다. 광학 결정으로는 복굴절 성질이 있는 Tellurium Dioxide(TeO₂)가 많이 사용된다. 결정 내에서 기계적인 구동 없이 음파를 생성시키기 위해서 압전 소자(Piezoelectric Material)가 부착되어 있다. 압전 소자는 AOTF 드라이버에서 공급되는 수십에서 수백 MHz 의 정현파를 결정 내부의 음파로 변환시켜주는 변환기(Transducer)역할을 한다. Fig. 1 의 (a)는 빛과 음파의 상호작용을 설명해 주는 파수 벡터인 k-벡터 다이어그램을 보여준다.⁽³⁾ TeO₂ 는 복굴절(Double Refraction)결정이기 때문에 굴절을 타원체(Index Ellipsoid)에서 정상 굴절률(Ordinary Refractive Index)과 이상 굴절률(Extra-Ordinary Refractive Index)을 갖는다. 입사광, 음파, 회절광은 각각 k_i, K_a, k_d로 표현되어 있으며, 입사광이 음파와 만나서 서로 다른 방향으로 두 개의 회절광이 생성되는 것을 알 수 있다.

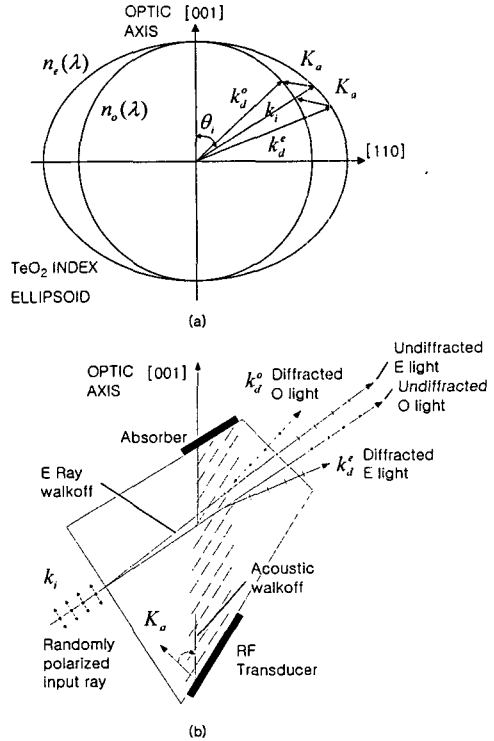


Fig. 1 Acousto-optic interaction in TeO₂ crystal

Fig. 1 의 (b)는 실제 결정 내부에서 빛과 음파의 상호 작용 결과를 보여주고 있다. AOTF 의 주요 설계 변수로는 입사광의 시야각(Field of View), 회절광의 출사 각도, 음파의 가진 주파수와 회절광의 파장 관계, 분광분해능 등이 있다.

2.2 설계

입사광의 시야각은 동축(Collinear) AOTF 의 경우 mrad 단위로 매우 작아서 널리 사용되지 못하였지만, 비동축(Non-Collinear) AOTF 는 Fig. 1 의 (a)에서와 같이 입사광과 회절광이 굴절을 타원체와 만나는 교점에서 기울기 평행(Parallel Tangent)조건을 만족한다면 입사광의 각도를 확장할 수 있음을 I.C.Chang 이 밝힘으로써 약 6°~7°의 시야각을 확보할 수 있게 되었다.^(6,7) 회절광의 출사 각도는 광학계를 설계하고 센서를 위치시키는데 고려해야 할 중요한 설계 변수이다. 회절광의 출사 각도 θ_d 는 파장의 함수로서 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.⁽⁸⁾

$$\theta_d = \frac{\Delta n_b \sin^2 \theta_i}{\tan(\theta_i - \theta_a)} \tag{1}$$

Δn_b 는 굴절률의 분산 특성(Dispersion Characteristic) 을 나타낸다. 이는 파장 λ 의 함수로서 실용적으로 식 (2)가 많이 사용된다.

$$\Delta n_b = \frac{a}{\lambda - \lambda_c} + b \quad (2)$$

a, b, λ_c 는 상수이며, 실험값에 의해서 다음과 같이 결정된다.

$$a = 7.156 \text{ nm}, b = 0.1338, \lambda_c = 262.9 \text{ nm} \quad (3)$$

입사광과 음파가 진행하는 방향의 광축에 대한 각도는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_i = 30.8^\circ, \theta_a = 12.9^\circ \quad (4)$$

식 (2) ~ 식 (4)를 이용하여 식 (1)의 회절광의 출사각도를 근적외선 파장 대역에서 예상한 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 회절광의 각도가 파장에 대해서 6.4°에서 6.55° 사이의 분포를 보이고 있다. 이러한 각도 분포는 결정의 출사면을 경사지게 가공함으로써 $\pm 0.02^\circ$ 라는 매우 적은 양의 각도 분포를 얻을 수 있음이 Yano 와 Watanabe 에 의해서 보고되었다.⁽⁸⁾

음파를 생성하기 위한 가진 주파수 f 와 파장 λ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{\Delta n_b(\lambda) v(\theta_a)}{\lambda} \frac{\sin^2 \theta_i}{\tan(\theta_i - \theta_a)} \quad (5)$$

v 는 음파의 속도로서 TeO₂ 결정속에서 광축에 대한 각도 θ_a 에 대하여 다음과 같다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

$$v(\theta_a) = \left[\left(\frac{C_{11} - C_{12} \cos^2 \theta_a + C_{44} \sin^2 \theta_a}{2} \right) / \rho \right]^{1/2} \quad (6)$$

C_{ij} 는 탄성 강성 계수(Elastic Stiffness Constant)이고 ρ 는 밀도이다. TeO₂ 에 대한 값은 다음과 같다. $C_{11} = 0.575$, $C_{12} = 0.54$, $C_{13} = 0.201$, $C_{33} = 1.08$, $C_{44} = 0.265$, $C_{66} = 0.68$ 단위는 10^{12} dynes/cm² 이고, $\rho = 6 \text{ g/cm}^3$ 이다. 이들을 이용하여 식 (5)에 의한 구동 주파수와 회절광의 파장사이의 관계를 근적외선 영역에서 예상한 결과가 Fig. 3 이다. 파장 1200 nm 에서 2200 nm 의 영역에 해당하는 주파수는 82 MHz 에서 43 MHz 로 반비례 관계인 것을 알 수 있다.

완벽한 평행광이 입사하고 결정 내에서도 완벽한 음파가 생성된다면 운동량 정합 조건(Momentum Matching Condition)을 만족시키는 빛만이 회절될 것이다. 그러나, 실제로는 음파를 생성시키는 변환기의 길이가 W 로 제한되어 있어서, 분광 분해능은 음파의 파면에 영향을 받는다. 식 (5)를 θ_a 에 대해서 편미분하면 분광 분해능 $\Delta \lambda_a$ 에 대한 다음의 식을 얻을 수 있다.

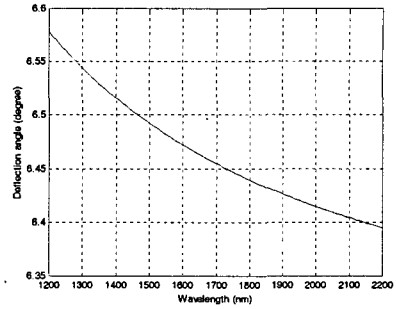


Fig. 2 Deflection angle of AOTF

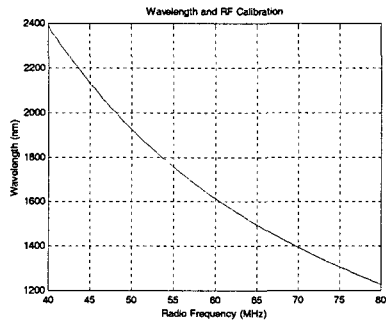


Fig. 3 Wavelength and frequency calibration curve

$$\Delta \lambda_a = \frac{1}{D} \frac{\lambda}{\tan(\theta_i - \theta_a)} \Delta \theta_a$$

$$D = 1 + \frac{\Delta n_b - b}{\Delta n_b} \frac{\lambda}{\lambda - \lambda_c} \quad (7)$$

$\Delta \lambda_a$ 는 분광 분해능이고, $\Delta \theta_a$ 는 음파의 각 분산이며, 길이 L 인 사각형의 변환기에 대해서 $0.9v/fL$ 로 표현된다. 이를 이용하여 근사화된 분광 분해능은 다음과 같다.

$$\Delta \lambda_a = 0.9 \frac{\lambda^2}{L \Delta n_b D} \frac{\cos(\theta_i - \theta_a)}{\sin^2 \theta_i} \quad (8)$$

2.3 AOTF 의 제작

Fig. 4 는 식 (4)와 같이 설계되어 제작된 AOTF 이다. AOTF 를 제작하는 방법은 먼저 TeO₂ 단결정 으로부터 식 (4)와 같이 설계된 θ_i 와 θ_a 에 맞게 결정을 가공한다. 그리고 전기적인 정현파를 결정 내부의 음파로 전환시켜주는 변환기를 결정에 부착한 뒤 임피던스 정합 회로(Impedance Matching Circuit)를 구성하여 완성된다. 제작 방법에 대한 흐름도를 Fig. 5 에 나타내었다.⁽¹³⁾

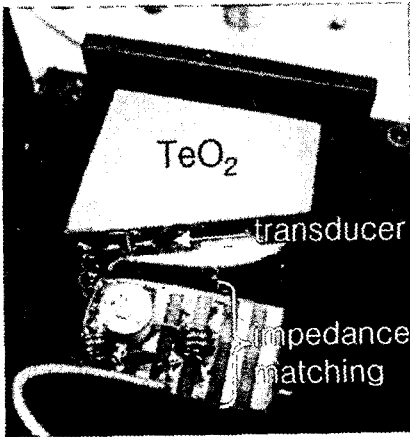


Fig. 4 AOTF structure

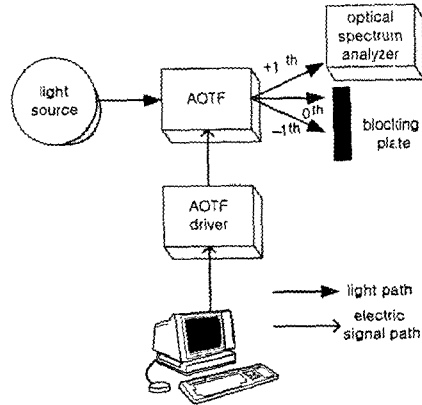


Fig. 6 Experimental setup

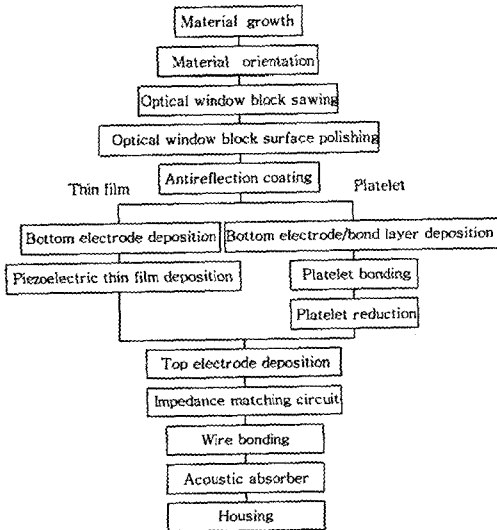


Fig. 5 AOTF manufacturing process

2.4 구동 드라이버의 제작

AOTF 를 구동하기 위해서는 식 (5)에서와 같이 원하는 파장에 해당하는 주파수의 전기적인 정현파를 변환기에 인가해 주어야 한다. 원리적으로는 주파수 발생기(Function Generator)와 같으며, 충분한 강도의 음파를 생성시키기 위해서는 약 2W 정도의 출력으로 증폭시켜서 변환기에 인가하게 된다. PC 에서 RS232 시리얼 통신을 통해 AOTF 드라이버에 명령이 전달되면, AOTF 드라이버는 원하는 주파수를 생성하게 된다. 40 ~ 80 MHz 대역의 주파수를 생성하고 제어하기 위해서 Analog Device 사의 AD9854 를 이용하였다. RF 주파수 대역이기 때문에 AOTF 변환기나 드라이버의 임출력은 50 ohm 으로 임피던스가 매칭되도록 설계하였다.

3. 실험 및 교정

실험을 위한 시스템의 구성은 Fig.6 과 같다. 빛의 전달경로(Optical Path)를 따라 광원(Light Source)에서 나온 빛이 AOTF 를 통과하면서 +/- 차의 분광된 빛과 0 차의 분광되지 않은 빛으로 나뉘어진다. +1 차 또는 -1 차의 분광된 빛이 광파이버를 통해 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)에 전달되어 분광 성능 분석을 수행한다. 광원(Light Source)은 텅스텐 할로겐 램프이며, 광파이버를 통해 AOTF 로 빛을 전달한다. 전기적인 제어 신호를 따라 PC 에서 RS232 시리얼 통신을 통하여 AOTF 드라이버를 제어한다. AOTF 드라이버에서는 식 (5)에 따라 원하는 빛의 파장에 대응하는 주파수의 전기적인 정현파를 생성하여 AOTF 에 인가함으로써 회절광을 발생시키게 된다.

Fig. 7 은 OSA 를 통해 얻은 결과이다. 중심 파장이 1453 nm 이고, 분광 분해능을 의미하는 반치폭(Full Width Half Maximum, FWHM)이 약 5 nm 정도인 것을 확인 할 수 있다. 주파수를 바꿔가면서 OSA 를 통해 측정을 수행함으로써 식 (5)의 주파수와 파장 사이의 관계와 식 (8)의 파장에 따른 FWHM 값을 측정하여 분해능을 확인할 수 있다. Fig. 8 은 주파수와 파장 사이의 관계이다. 이론적인 결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있으나 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 교정(Calibration)을 통해서 보완해 주어야 한다. AOTF 드라이버의 저 주파수대역은 회절광의 고 파장대역에 해당하는데, OSA 의 측정 한계가 약 1700 nm 이기 때문에 이 파장 이상에서는 실험값을 얻지 못하였다. 식 (5)에서 주파수와 파장 이외의 값을 상수로 두면, 주파수와 파장은 서로 반비례관계에 있기 때문에 주파수의 역수와 파장은 식 (9)와 같

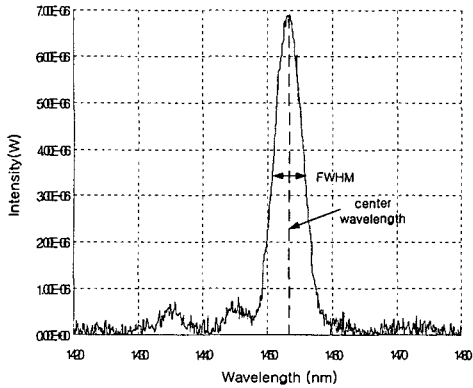


Fig. 7 Spectral resolution and center wavelength

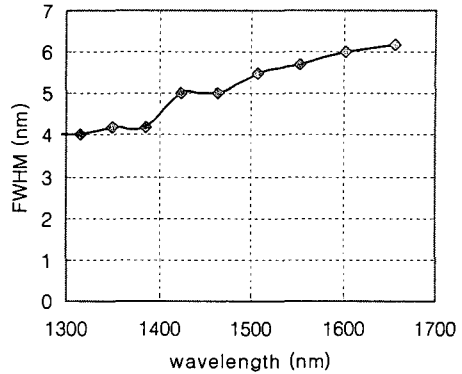


Fig. 9 Spectral resolution

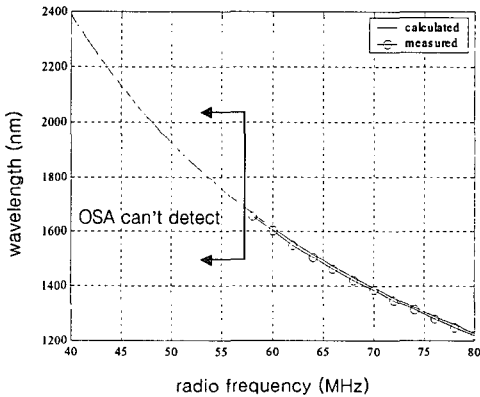


Fig. 8 Calculated and experimental calibration

은 일차함수의 비례관계를 갖게 된다.

$$\lambda = \frac{a}{f} + b, \quad a = 91418, \quad b = 79.089 \quad (9)$$

여기서, 주파수의 단위는 MHz 이고 파장의 단위는 nm 이다. 이 식을 이용함으로써 원하는 파장의 빛을 얻기 위해서 필요한 주파수에 대한 교정을 수행하였다.

AOTF의 분광 분해능은 Fig. 7로부터 측정할 수 있으며, 여러 파장에 대하여 측정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. FWHM은 분광 분해능을 나타내는 값으로서 FWHM 값이 작을수록 서로 다른 파장의 두 빛을 분리해 낼 수 있다. 파장이 커짐에 따라서 FWHM 값이 조금씩 증가함을 알 수 있다. 측정 범위 내에서 최대 6 nm 정도가 측정되었다. Fig. 9로부터 2200 nm 파장 범위 내에서 분광 분해능 10 nm 이하를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 근적외선 대역에서 일반적으로 요구하는 10 nm 분해능을 충분히 만족시키는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 가시광선 대역의 음향광학변조필터(AOTF)의 이론을 근적외선 대역으로 확장하여 AOTF 및 드라이버를 설계, 제작하였고 시스템을 구성하여 성능을 평가하고 교정을 수행하였다. AOTF의 주요 설계 변수로서 입사광의 시야각(Field of View), 회절광의 출사 각도, 음파의 가진 주파수와 회절광의 파장 관계, 분광 분해능을 고려하였다.

AOTF에 의한 회절광과 드라이버의 주파수 사이의 관계를 OSA를 이용하여 측정하였으며, 이론적인 결과와 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 발생한 차이는 결정가공시의 오차에 의한 것으로 생각되며, 주파수의 역수와 파장사이의 일차함수 관계식을 얻음으로써 교정을 수행하였다. 이렇게 한번 교정된 AOTF는 이후의 사용에서 다시 교정할 필요가 없기 때문에 고속의 분광 분석 시스템에 안정적으로 적용이 가능하다.

AOTF를 이용한 분광 분석 시스템에서는 분해능이 중요한 사양이 된다. 본 논문을 통해서 제작된 AOTF는 근적외선 대역에서 10 nm 이하의 높은 분광 분해능을 얻음으로써 고 분해능 근적외선 분광 분석 시스템에 응용이 가능할 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부 국제협력연구의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Elliot S. Wachman, Wen-hua Niu, and Daniel L. Farkas, 1996, "Imaging Acousto-Optic Tunable Filter with 0.35-micrometer Spatial Resolution," *Applied Optics*, Vol. 35, No. 25, pp. 5220~5226.
- (2) Romier, J., Selves, J. and Gastellu-Etchegorry, J., 1998, "Imaging Spectrometer Based on an Acousto-Optic Tunable Filter," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 8, pp. 2859~2867.
- (3) David A. Glenar, John J. Hillman, Babak Saif, and Jay Bergstrahl, 1994, "Acousto-Optic Imaging Spectropolarimetry for Remote Sensing," *Applied Optics*, Vol. 33, No. 31, pp. 7412~7424.
- (4) Georgi Georgiev, David A. Glenar, and John J. Hillman, 2002, "Spectral Characterization of Acousto-Optic Filters used in Imaging Spectroscopy," *Applied Optics*, Vol. 41, No. 1, pp. 209~217.
- (5) Elliot S. Wachman, Wen-hua Niu, and Daniel L. Farkas, 1997, "AOTF Microscope for Imaging with Increased Speed and Spectral Versatility," *Biophysical Journal*, Vol. 73, No. 3, pp. 1215~1222.
- (6) Chang, I. C., 1974, "Noncollinear Acousto-Optic Filter with Large Angular Aperture," *Applied Physics Letters*, Vol. 25, No. 7, pp. 370~372.
- (7) Chang, I. C., 1975, "Acoustooptic Devices and Applications," *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. su-23, No. 1, pp. 2~21.
- (8) Yano, T. and Watanabe, A., 1976, "Acoustooptic TeO₂ Tunable Filter using Far-off-axis Anisotropic Bragg Diffraction," *Applied Optics*, Vol. 15, No. 9, pp. 2250~2258.
- (9) Naoya Uchida, 1971, "Optical Properties of Single-Crystal Paratellurite (TeO₂)," *Physics Review B*, Vol. 4, No. 10, pp. 3736~3745.
- (10) Yoshiro Ohmachi, Naoya Uchida, and Nobukazu Niizeki, 1971, "Acoustic Wave Propagation in TeO₂ Single Crystal," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51, No. 1, pp. 164~168.
- (11) Kastelik, J. C., Gazalet, M. G., Bruneel, C. and Bridoux, E., 1993, "Acoustic Shear Wave Propagation in Paratellurite with Reduced Spreading," *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, No. 4, pp. 2813~2817.
- (12) Kastelik, J. C., Gharbi, M. and Gazalet, M. G., 1998, "Paratellurite: Propagation of the Slow Shear Wave in the (001) Plane. New Formulations for the Acoustic Velocity and Divergence," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 2, pp. 671~674.
- (13) Akis P. Goutzoulis, and Dennis R. Pape, 1994, "Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices," Marcel Dekker, New York, p. 341.