Thermal Evaporation of Amorphous Chalcogenide on Single-mode Optical Fiber

Sung-Tae Hwang, Kyuman Cho, Bonghoon Kang*, and Gi-Tae Joo**†

Department of Physics, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

*Department of Visual Optics, Far East University, Chungbuk 369-700, Korea

**Materials Science & Technology Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received December 4, 2009; Revised December 16, 2009; Accepted December 21, 2009)

단일 모드 광섬유 표면의 비정질 Chalcogenide 열 증착

황성태 · 조규만 · 강봉훈* · 주기태**†

서강대학교 물리학과

*극동대학교 안경광학과

**한국과학기술연구원 재료기술연구본부

(2009년 12월 4일 접수 ; 2009년 12월 16일 수정 ; 2009년 12월 21일 승인)

ABSTRACT

We made a film of a few μm thickness by evaporating As_2S_3 piece to perpendicularly cut optical fiber by thermal evaporation process. Linear refractive index(n) and linear absorption coefficient(k) of amorphous As_2S_3 are 2.525 and 1.727×10^{-3} , respectively. A surface roughness did not exceed 2 nm and a transmission spectrum showed that the sample of thermal evaporation was homogeneous.

Key words : Single-mode optical fiber, Amorphous chalcogenide, As_2S_3 , Thermal evaporation

1. 서 론

비정질 매질인 칼코게나이드 유리는 다양한 광유도 현상을 보이며 이러한 광학적 현상은 비선형 굴절률이나 흡수계수 등과 같은 비선형 광학상수에 의해 설명된다. 비정질 칼코게나이드 유리에 띠 간격(band-gap) 또는 서브 띠 간격(sub-band-gap)의 빛을 광조사(illumination)하면 optical Kerr effect에 의한 자체집광(self-focusing)^(1,2) 현상이 나타난다. 그리고 광유도 구조변화(photoinduced structure change)에 의한 광팽창(photoexpansion)⁽³⁻⁵⁾ 및 광수축(radiation contraction) 등의 부피변화 현상⁽⁶⁾과 광조사에 따른 굴절률 변화⁽⁷⁻¹⁰⁾ 현상인 광암색화(photodarkening)⁽¹¹⁾ 현상 등이 나타난다. 이러한 다양한 현상들 중에서 Optical Kerr effect에 기인하는 자체집광(Self-focusing)현상은 매우 높은 집적도를 가지는 광기록매체의 제작에 응용 가능하기 때문에 많은 연구자들에 의해 광범위하게 연구되어왔다.⁽¹²⁾

As_2S_3 는 단사정 층상구조(monoclinic layer structure)를 이루고 있으며 각각의 As원자들은 3개의 S원자들과 결합하여 밀면이 3개의 S원자로 구성되고 정점은 하나의 As

원자로 구성되어 있는 편평한 피라미드 형태의 배열을 하고 있다. 또한 각각의 S원자들은 2개의 피라미드의 각 한 부분을 이루고 있으므로 모든 As원자와 S원자들은 서로 공유결합을 하고 있으며 모든 공유결합 물질과 마찬가지로 각각의 원자들은 Van der Waals 힘으로 연결되어 있다. Band gap 에너지는 약 2.4 eV 정도이지만 비정질 반도체의 특성상 band edge가 정확하게 결정되지 않기 때문에 tail absorption이 있다. 즉, band gap 에너지 보다 적은 에너지를 갖는 빛의 흡수가 일어나는데 흡수계수의 크기가 $h\nu - E_g$ 에 지수 함수적으로 비례한다. 칼코게나이드 비정질 반도체가 band tail에서 매우 큰 3차 비선형계수를 갖는 이유는 아직 정확하게 밝혀지지 않았으나, 작지만 band tail에서 흡수가 일어나기 때문에 이 과정에서 발생하는 self-trapped exciton에 의한 효과가 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 band tail에서 벗어날수록 3차 비선형 계수의 크기가 작아지고, 또한 광 유도 현상들도 작아지게 된다. 따라서 입사 빛의 파장에 따라 광 유도 현상 및 자체 집광효과를 복합적으로 관찰함으로써 칼코게나이드 반도체에서 일어나는 여러 가지 현상들에 대한 정량적인 연구를 수행할 수 있다. 반도체 레이저의 경우 As_2S_3 의 band tail의 전 영역 및 이보다 훨씬 긴 파장까지 거의 연속적으로 광원을 구할 수 있기 때문에 광 유도 현상, SF현상

†Corresponding author : Gi-Tae Joo

E-mail : jgt1580@kist.re.kr

Tel : +82-2-958-5515 Fax : +82-2-958-5489

Fig. 1. Photograph of cleaved single-mode optical fiber.(before thermal evaporation)

을 비롯하여 여러 가지 선형 비선형 광학적 특성을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 단일모드 광섬유 단면 위에 비정질 chalcogenide As_2S_3 를 열증착 방법을 사용하여 증착하였으며, 광섬유의 증착 표면 및 증착된 As_2S_3 의 광투과도, 굴절률 및 선형 흡수계수 등을 살펴보았다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 수직 절단된 광파이버의 광학 현미경사진이다. 본 실험에서 기관으로서 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유(3M Model FS-SN-3224)로서 그 사양은 다음과 같다. 광섬유에 대한 작동파장은(operating wavelength) 630 nm이며 Mode Field Diameter는 $4.0\mu m$ 이고 cladding은 $125\mu m$ 이고 NA는 0.12이다.

이 광섬유에 As_2S_3 를 증착하고 레이저 빔살을 광섬유에 넣어줌으로써 원형의 평행광이 샘플에 입사하는 것으로 간주할 수 있다. 이와 같은 광섬유에서 재킷(jacket)을 벗긴 후 광섬유 절단기(fiber cleaver)로 광섬유를 수직 절단하고 여기에 As_2S_3 샘플을 증착하였다. 이때, 증착은 열 증착법(thermal evaporation)을 이용하였다. As_2S_3 조각은 모래알 크기로 잘게 부셔서 사용하였으며 텅스텐 boat를 이용하는 경우에는 boat와 As_2S_3 가 서로 화학반응을 일으켜 순수한 As_2S_3 박막을 얻을 수 없기 때문에 quartz crucible에 넣어 가열하였다. 증착 시 진공도는 $\sim 5 \times 10^{-6}$ Torr이었고 증착 속도는 전류를 조절하여 $\sim 5 \text{ \AA/sec}$ 로 천천히 올려 증착속도가 빠르거나 변동이 심할 때 발생하는 균열을 최대한 적게 하였다. 또한 샘플이 증착된 후 vent 전에 진공 상태에서 1시간 이상 냉각시간을 두었다.

증착된 샘플에 대한 두께 측정은 진공장비에 장착되어진 thickness monitor로 측정하였으며 좀 더 정확한 값을

Fig. 2. SEM image of thermal evaporated optical fiber.

알기 위하여 미리 넣어둔 슬라이드 글라스에서 증착된 일부를 벗겨내고 stylus (α -step 200, Tenco Co.)를 이용하여 재차 측정하였다. 광 투과도 측정은 Spectrophotometer(UV-4100, HITACHI)를 사용하여 측정하였으며, Commercial spectroscopic ellipsometer (J. A. Wollan, VASE)를 사용하여 원하는 파장에 대한 굴절률을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 수직 절단된 fiber 단면에 열 증착된 As_2S_3 박막의 SEM 이미지이다. 열 증착 공정을 통하여 $1.6\mu m$, $2.0\mu m$, $5.7\mu m$ 등의 두께를 갖는 a- As_2S_3 박막을 제작하였으며, commercial spectroscopic ellipsometer (J. A. Wollan, VASE)의 측정결과로부터 633 nm의 He-Ne 레이저 파장대에 대해서 선형 굴절률(n)은 2.525이고 선형 흡수 계수(k)는 1.727×10^{-3} 이라는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2에서와 같이 광섬유에 샘플을 증착하면 샘플에 입사되는 빔살이 광섬유를 통과하여 입사하므로 대칭을 가지고 있는 이상적인 빔살을 만들 수 있다. 또한 기하광학계와는 다르게 광학적인 정렬이 불필요 하게 된다. 샘플은 정확히 입사되는 빔살에 대해 수직으로 놓이게 되며 광섬유의 mode field diameter(MFD)가 정해져 있으므로 샘플에 입사되는 빔살의 크기가 일정하다고 볼 수 있다. 따라서 반도체 레이저와 같은 비대칭적인 빔살도 광섬유에 의해 대칭적인 빔살로 만들 수 있으므로 광원의 형태에 영향을 받지 않는다. 또한, 광조사에 사용되는 빔살을 공간잡음(spatial noise)이 없는 이상적인 빔살로 만들기 위한 추가적인 장비가 필요 없다. 또한 슬라이드 글라스에서의 다중반사(multiple reflection)된 빛에 의해서 자체집광이 영향을 받을 수 있기 때문에 정량적인 측정에 어려움이 있다. 다음으로 슬라이드 글라스에 증착한 방법에 비해 열처리가 쉽다. 샘플과 유리의 열팽창 계수차이로

(a)

(b)

Fig. 3. (a) AFM image of sample after thermal evaporation ($1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$). RMS roughness is 0.33 nm. (b) Transmitted laser beam image when linear polarized beam enters the film.

인해 열처리 시 샘플이 깨지는 현상 등이 발생하는데 반해 광섬유에 증착하게 되면 광섬유의 지름이 $125\ \mu\text{m}$ 정도로 매우 작기 때문에 열처리가 수월하고 시간에 대하여 거의 변화가 없는 빛살을 비선형 매질에 전달할 수 있으며, 샘플의 이동 또한 쉬워진다.

Fig. 3(a)은 열 증착(thermal evaporation)하여 올린 샘플의 표면 거칠기에 대한 AFM 이미지이다. 표면영역은 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 이며 표면의 거칠기는 2 nm를 넘지 않았다. Fig. 3(b)에서는 수직 절단된 fiber에 균일하게 열증착된 As_2S_3 film을 통과하는 laser 빛살에 대한 이미지를 보였다. 일반 기하광학계와는 달리 공간 잡음이 없는 이상적인 빛살을 만들 수 있었으며, 다중 반사 등을 고려하지 않는 광-물질간의 상호작용을 규명하기 위한 이상적인 상황이 구현되었다. 현재 진행 중인 자체집광현상이나 필라멘테이션 그리고 다양한 광유도 현상 등을 실험적으로 밝히기 위해서는 우선 회절한계를 넘어선 분해능으로 이를 관찰할 수 있어야 한다. 이와 같은 연구의 목적에 맞게 실험장치 및 방법을 획기적으로 개선하여 다양한 광유도 현상에 대한 정량적인 분석을 시도하고 있다.

Fig. 4에서는 글라스 및 박막이 있는 글라스에 대한 흡수 스펙트럼이다. 박막은 다중반사에 의한 간섭효과로 흡수 스펙트럼은 파장에 따라서 주기적으로 극대와 극소 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 4(a)는 기판으로 사용한 글라스의 투과율을 나타내고 Fig. 4(b)는 고르게 증착된 샘플

(a)

(b)

Fig. 4. Transmission spectrum of substrate (slide glass) (a) and thermal evaporated amorphous As_2S_3 thin film. (b)

의 투과율이다. 400~530 nm 부근에서는 비정질 As_2S_3 의 흡수영역 끝(absorption edge) 부근이므로 강한 흡수영역을 가져 내부의 간섭효과가 무시되고, 570 nm 이상의 영역에서는 투과율의 극대값이 기판의 투과율(0.9)과 거의 같다. 가시광선 영역에서 보면 기판의 투과율은 거의 일정하다. 또한 투과율의 스펙트럼에서 박막 두께가 균일하지 않다면 박막 내부에서 다중간섭 효과는 크게 감소하거나 없어질 것이므로 Fig. 4(b)와 같이 주기적으로 진동하는 그림을 얻을 수 없다.

4. 결 론

수직 절단된 단일모드 광섬유 단면에 비선형광학 매질 As_2S_3 를 열 증착법으로 균일 두께의 박막을 증착하였다. 위와 같이 광섬유 단면에 직접 증착하여 빛이 다른 매질을 진행하지 않고 직접 시료에 조사됨으로서, 이는 일반 기하광학계와는 달리 공간 잡음이 없는 이상적인 빔살을 만들 수 있는 조건이며, 다중 반사 등의 외부 영향이 없는 광-물질간의 광유도 현상 등을 직접적으로 규명하기 위한 이상적인 상황을 구현할 수 있는 조건이라 할 수 있다.

열 증착 공정을 통하여 1.6 μm , 2.0 μm , 5.7 μm 등의 두께를 갖는 a- As_2S_3 박막을 제작하였으며, 633 nm의 He-Ne 레이저 파장대에 대한 선형 굴절률(n)은 2.525이고 선형 흡수 계수(k)는 1.727×10^{-3} 로 측정되었다. 증착된 시료의 표면 거칠기는 2 nm를 넘지 않는 균일한 박막이 형성되었음을 확인 할 수 있었으며, 투과 스펙트럼으로부터 박막 두께가 균일할 때 보이는 다중반사의 스펙트럼을 확인할 수 있었다.

Acknowledgment

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 기관고유사업의 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

1. P. L. Kelley, "Self-Focusing of Optical Beams," *Phys. Rev. Lett.*, **15** 1005-8 (1965).
2. R. Y. Chiao, E. Garmire, and C. H. Townes, "Self-Trapping of Optical Beams," *Phys. Rev. Lett.*, **13** 479-82 (1964).
3. K. Tanaka, "Electron Beam Induced Reliefs in Chalcogenide Glasses," *Appl. Phys. Lett.*, **70** 261-63 (1997).
4. H. Hisakuni and K. Tanaka, "Optical Fabrication of Microlenses in Chalcogenide Glasses," *Opt. Lett.*, **20** 958-60 (1995).
5. H. Hisakuni and K. Tanaka, "Giant Photoexpansion in As_2S_3 Glass," *Appl. Phys. Lett.*, **65** 2925-27 (1994).
6. K. B. Song, J. K. Lee, J. H. Kim, and K. Cho, "Direct Observation of Self-Focusing with Subdiffraction Limited Resolution Using Near-Field Scanning Optical Microscope," *Phys. Rev. Lett.*, **85** 3842-45 (2000).
7. T. Gotoh and K. Tanaka, "Photoinduced Surface Deformations in Ion-conducting Ag-As-S Glasses. II. Anisotropic Deformation Produced by Large Light Spots," *J. Appl. Phys.*, **89** 4703-6 (2001).
8. K. Tanaka, "Photoinduced Deformations in Chalcogenide Glasses: Scalar and Vectorial," *J. Optoelectronics and Advanced Materials.*, **7** 2571-80 (2005).
9. K. Tanaka and Hideaki Asao, "Photoinduced Anisotropic Deformation in As_2S_3 Glass," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** 1668-74 (2006).
10. H. Asao and K. Tanaka, "Polarization-dependent Photoinduced Mechanical Deformations in Covalent Chalcogenide Glasses," *J. Appl. Phys.*, **102** 043508-14 (2007).
11. S. Ramachandran, S. G. Bishop, J. P. Guo, and D. J. Brady, "Fabrication of Holographic GRatings In As_2S_3 Glass By Photoexpansion And photodarkening," *IEEE Photo. Tech. Lett.*, **8** 1041-43 (1996).
12. E. Garmire, R. Y. Chiao, and C. H. Townes, "Dynamics and Characteristics of the Self-Trapping of Intense Light Beams," *Phys. Rev. Lett.*, **16** 347-9 (1966).