

Refractive Index Dispersion of Sputter-Deposited Silicon-Rich Silica Thin Films

Byeong Kyou Jin and Yong Gyu Choi[†]

Department of Materials Science and Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea
(Received July 7, 2008; Revised November 26, 2008; Accepted December 3, 2008)

스퍼터링 방법으로 증착된 실리콘 과잉 실리카 박막의 굴절률 분산

진병규 · 최용규[†]

한국항공대학교 항공재료공학과

(2008년 7월 7일 접수 ; 2008년 11월 26일 수정 ; 2008년 12월 3일 승인)

ABSTRACT

We have fabricated silicon-rich silica thin films via RF magnetron sputtering using a SiO target. Thickness evolution and microstructure change of such SiO_x (1 < x < 2) films were investigated in terms of the substrate temperature during the deposition. Optical interference patterns obtained from a spectroscopic reflectometer were analyzed to yield refractive index dispersion profiles of the deposited film layers in the visible wavelengths. Changes of the refractive indexes were then explained in connection with changes in microstructure and composition of the silicon-rich silicon oxide films. Increase in the number of the Si-Si bonds formed inside the SiO_x thin films turned out to be mainly responsible for the increase of refractive index.

Key words : Silicon-rich silica, Thin film, Refractive index, Sputtering

1. 서 론

굴절률은 유전체 박막의 광학적 응용을 위한 물성평가에 있어 매우 중요하게 고려되어야 하는 인자 중 하나이다. 빛의 집속 및 도파 특성은 박막의 절대 굴절률 및 기판과 박막의 굴절률 차이에 민감하게 영향을 받으며, 결과적으로 광 소자의 크기 역시 굴절률의 영향을 받게 된다. 또한 굴절률은 박막에 함유된 양자점 또는 첨가이온 등으로부터 발생하는 전기 쌍극자 천이의 흡수 단면적 및 자발 방출율 등의 광 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 극부 전기장 효과로 인하여 전기 쌍극자 유기 복사천이의 진동 강도가 변하게 되며 이러한 변화는 발광 특성의 변화도 초래하게 된다.^{1,2)} 한편, 조성이 크게 다른 소재의 광학적 접합에 있어서도 굴절률은 매우 중요하다. 일례로써 폴리머 도파로와 실리카 도파로의 접합 시 발생하는 접합 손실은 각 도파로 단면의 형태 및 크기에도 영향을 받지만 두 소재의 굴절률 차이에도 영향을 받게 된다.^{3,4)} 따라서 유전체 박막의 광학적 응용을 위하여 해당 박막의 굴절률 크기를 효과적으로 조절할 수 있는 조성 시스템 또는 공정 조건을 확보하는 것이 중요하다.

실리콘 기판에 형성된 실리카는 대표적인 silicon-on-insulator 형태의 소재로써 전자 집적회로의 제작에 활용될 뿐만 아니라 최근에는 실리콘 기반 도파로, 변조기 및 검출기 등을 포함하는 'silicon photonics'의 핵심 소재로 활용되고 있다.^{5,6)} 실리코나 실리카의 굴절률은 그 차이가 비교적 커서 단일모드 조건을 위한 도파로의 단면적이 작아지게 되고, 결과적으로 공정상의 허용 오차가 작고 기존 실리카 기반 도파로와의 일대일 접속 시 모드 크기의 불일치로 인한 추가적인 광 손실이 발생하게 된다.^{3,4)} 이와 같은 문제는 클래드용 소재의 굴절률을 기존 실리카보다 크게 함으로써 완화될 수 있다. 실리코나 산소로 이루어진 기존 조성에 분극률이 큰 원소를 새롭게 첨가하거나 실리카 박막의 밀도를 크게 함으로써 굴절률을 높일 수 있을 것이나, 각각 밀도 불균일에 의한 추가적인 산란 손실이 발생하고 새로운 공정을 확보해야 하는 등의 많은 연구를 필요로 한다.

위와 같은 논의를 바탕으로 본 연구에서는 실리코나 산소의 화학양론비를 변화시킨 silicon-rich silicon oxide (SRSO) 박막을 제작하고 공정조건 및 미세구조와 굴절률과의 상관관계를 파악하고자 하였다. SRSO 박막의 제작을 위하여 화학기상 증착법,⁷⁻¹⁰⁾ 증발 증착법,¹¹⁾ 실리콘 이온 주입^{12,13)} 및 스퍼터링 증착법^{14,15)} 등의 다양한 방법이 시도되고 있다. 스퍼터링 증착법의 경우 여타 증착법에서 발생할 수 있는 문제를 피할 수 있으며,^{16,17)} 실리코나 실

[†]Corresponding author : Yong Gyu Choi
E-mail : ygchoi@kau.ac.kr
Tel : +82-2-300-0169 Fax : +82-2-3158-3770

리카의 비율 조절이 상대적으로 용이하고 기존 CMOS 공정에 적용성이 우수하다는 장점을 가진다. 스퍼터링을 이용한 SRSO 박막의 제작을 위하여 실리콘 타겟과 산소 기체를 반응시키면서 증착하거나 실리콘과 실리카 타겟을 동시에 증착하는 방법이 주로 사용된다. 그러나 이러한 증착 방법의 경우 공정 변수가 증가하게 되고 결과적으로 재현성의 확보에 추가적인 노력이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단순한 스퍼터링 공정을 적용하되 SiO 조성의 타겟을 활용함으로써 SRSO 박막의 제작을 시도하였으며, 기판 온도의 변화에 대한 박막의 두께 및 굴절률의 변화 경향을 집중적으로 파악하고자 하였다. SRSO 박막의 굴절률에 대한 기존 보고가 있으나,¹⁸⁻²¹⁾ 본 연구에서 적용한 교류 마그네트론 스퍼터링 증착법으로 제작된 SiO_x ($1 \leq x \leq 2$) 박막의 굴절률에 대한 보고는 미비한 상태이다.

2. 실험 방법

기판으로 (100) 방향의 무침가 실리콘(Siltronix Co.)을 활용함으로써 p형 또는 n형 실리콘 기판 대비 불순물의 영향을 최소화하고자 하였다. 모든 기판은 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 으로 절단한 후 아세톤과 증류수로 각각 40분간 초음파 세척하고 질소 가스로 건조하여 기판 표면에 존재할 수 있는 불순물을 제거하였다. 증착에 필요한 타겟으로써 99.9% 순도의 SiO(Super Conductor Materials Co.) 소결체를 사용하였다. 챔버 내 진공은 초기 진공도를 2.6×10^{-6} Torr로 하였으며 아르곤 가스를 15 sccm 주입하여 공정 시 진공도는 1.7×10^{-2} Torr가 되게 하였다. 플라즈마 형성에 사용된 고주파의 세기는 150 W로 일정하게 설정하였고 공히 2시간 동안 박막의 증착을 시도하였으며 증착 과정 시 기판을 분당 약 8회 회전시킴으로써 박막 두께의 균일성을 높이고자 하였다. 여타 공정 변수는 위와 같이 일정하게 유지하되 기판 온도는 50°C부터 400°C까지 50°C간격으로 변화시키며 기판온도에 따른 SiO_x 샘플을 제작하였다. 증착된 각 샘플을 질소 분위기로 900°C에서 60분 동안 열처리한 후 로냉하였다. 일반적으로 실리콘의 결정화는 700°C에서 진행되므로,²²⁾ 본 연구에서 설정한 공정조건을 거친 샘플은 일부분 Si 및 SiO₂ 결정상을 포함하나 대부분 비정질 상태인 것으로 판단된다.

박막의 두께와 미세조직의 확인을 위하여 전계 방출형 주사전자현미경(JEOL, JSM-6700)을 활용하였으며, 분광형 반사측정기(Spectroscopic reflectometer; K-MAC Co., ST2000DLXn)를 이용하여 400~900 nm 영역에 걸쳐 박막 표면에 대해 수직으로 빛이 입사하는 경우 발생하는 간섭 스펙트럼을 측정하였다. 박막에 존재하는 Si-Si 결합의 상대적인 양을 확인하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기(FTR; Perkin Elmer, Spectra 100)를 이용하였으며

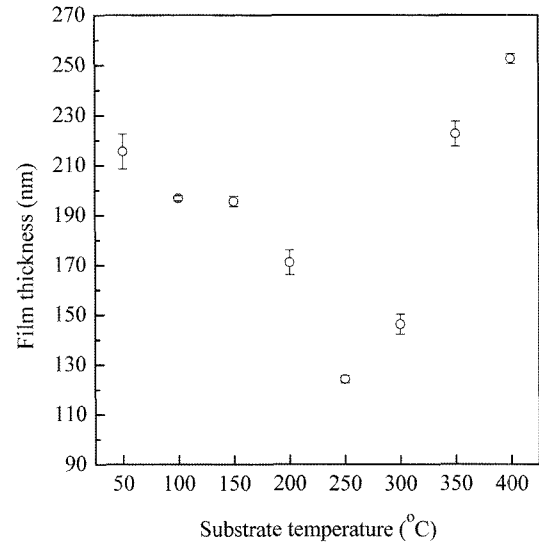


Fig. 1. Thicknesses of SiO_x films plotted as a function of substrate temperature.

450~1500 cm⁻¹ 대역에서 측정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 박막의 두께 변화

기판온도에 따라 증착되는 박막의 두께가 변화하였으며, 이를 정량적으로 확인하기 위해 전계 방출형 주사전자현미경을 통해 각 박막 샘플의 두께를 측정하였다. 박막의 여러 지점에서 측정 후 평균치를 구하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. SiO_x 박막의 두께는 기판온도가 50°C에서 250°C까지는 ~215 nm에서 ~124 nm로 감소하였고 그 이후 400°C까지는 다시 ~253 nm로 증가하였다. 기판온도의 증가는 증착이 이루어지는 챔버 내 온도 상승을 야기하고 이는 플라즈마 내 아르곤 이온의 활동도를 증가시키게 된다.²³⁾ 이러한 아르곤 이온의 활동도 증가는 단위시간 당 타겟에 충돌하는 아르곤 이온의 증가를 의미하며 결과적으로 증착량이 증가하게 되는 것으로 사료된다. 그러나 기판온도가 계속적으로 증가함에 따라 기판에 증착된 입자의 재 증발 역시 발생할 수 있다. 즉, 타겟에서 떨어져 기판에 증착된 박막 입자가 기판온도의 증가로 인한 재 증발 때문에 증착률의 감소를 초래하게 된다.²⁴⁾ 따라서 본 실험의 경우 기판온도 250°C까지는 박막의 두께가 감소하지만 그 이상의 온도에서는 재 증발되는 양보다 증착되는 양이 상대적으로 많아 박막의 두께가 증가하였던 것으로 생각된다.

3.2. 박막의 입자크기 변화 및 산란강도

기판온도가 박막의 미세구조에 미치는 영향을 확인하기 위하여 전계 방출형 주사전자현미경을 이용하여 박막의 미세구조를 측정하였다. 이 중 대표적인 조건의 SiO_x

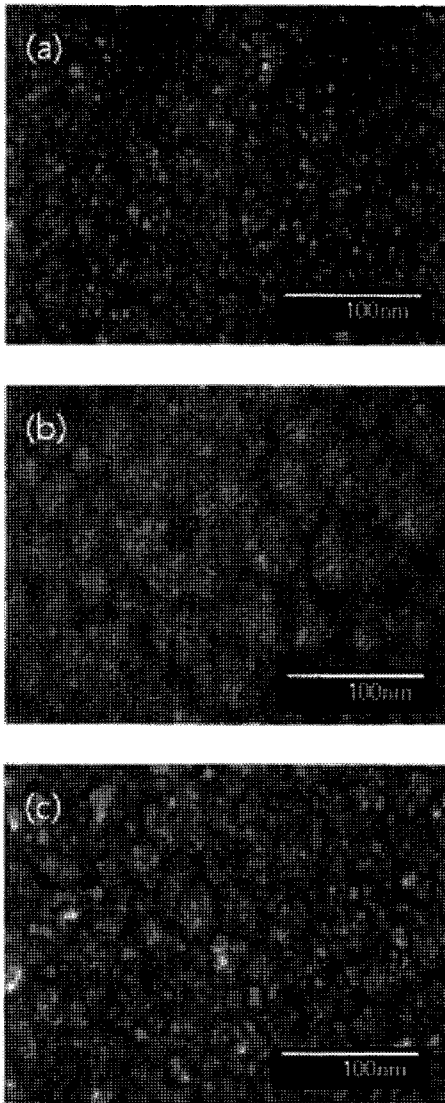


Fig. 2. FE-SEM micrographs of the SiO_x films for substrate temperatures of (a) 50°C , (b) 250°C , and (c) 400°C .

박막 샘플의 사진을 Fig. 2에 도시하였다. 이러한 전계 방출형 주사전자현미경 사진을 이미지 분석 방법을 통해 각 SiO_x 박막을 구성하는 입자의 평균크기를 구하였으며, 그 결과를 기판온도의 함수로써 Fig. 3에 나타내었다. 박막 내 입자의 크기가 박막의 두께가 감소하면서 커지는 것을 알 수 있으며, 이는 기판의 온도가 증가하면서 박막 내 입자의 이동도가 증가하게 되고 그에 따라 입자의 밀집성이 증가하여 입자의 크기가 조대화되는 것으로써 설명될 수 있다. 반면 특정 온도 이상에서는 입자의 이동보다 상대적으로 증착되는 양이 많아 입자의 이동이 쉽게 이루어지지 못해 입자의 조대화가 어렵다.^{25,26} 본 연구에서 제작된 SiO_x 박막의 경우 250°C 를 경계로 입자크기의 변화 경향이 바뀌는 것을 볼 수 있으며, 이러한 경향성은 박막의 두께 변화와 정확히 일치하고 있다. 즉, 기판온도

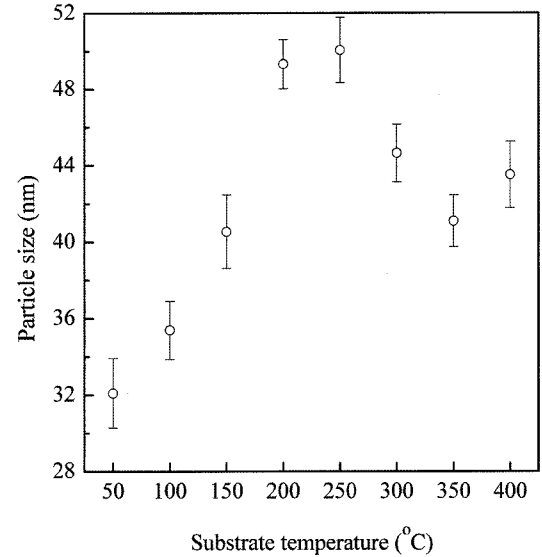


Fig. 3. Particle sizes of SiO_x films plotted as a function of substrate temperature.

의 변화는 증착되는 입자의 이동 및 재증발(re-evaporation) 등을 야기하게 되고 이는 증착되는 박막의 두께 및 미세 구조에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

박막 내 입자는 박막에 조사되는 빛의 산란을 유발하고 따라서 입자크기의 변화와 같은 미세구조의 변화는 주요 광학적 특성 중 하나인 산란 강도의 변화를 야기한다. 특히 입자의 크기가 조사되는 빛의 파장에 비해 약 1/10 정도일 경우 레일라이 산란이 주로 발생하게 된다. 본 연구에서 굴절률의 측정에 사용된 분광형 반사측정기의 파장 대역은 가시광($400\sim 900\text{ nm}$) 영역이었으며, 이러한 파장은 제작된 SiO_x 박막의 입자크기보다 10배 이상 크기 때문에 입자에 의한 레일라이 산란이 발생할 것임을 확인

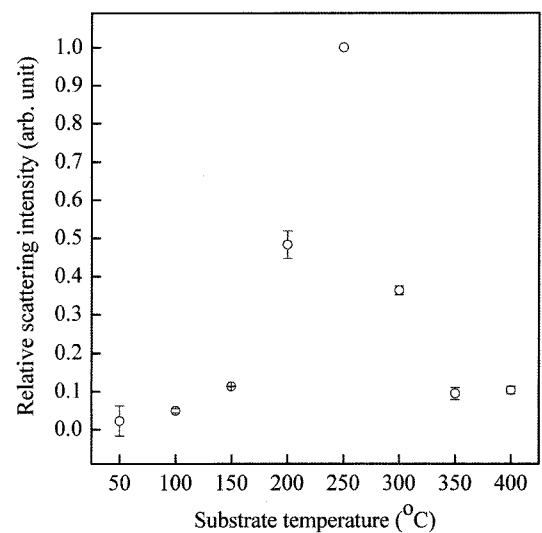


Fig. 4. Relative Rayleigh scattering intensities of the SiO_x films plotted as a function of substrate temperature.

할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 입자크기의 변화에 따른 레일라이 산란 강도의 변화를 확인하여 굴절률 측정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다음과 같은 식을 활용하였다.²⁷⁾

$$I_s = I_0 \left(\frac{9\pi^2 V^2}{2d^2 \lambda^4} \right) [(m^2 - 1)(m^2 + 2)]^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (1)$$

여기서 V 와 d 는 각각의 박막샘플에 존재하는 입자의 부피와 박막의 두께를 나타내며, λ 는 샘플에 조사되는 빛의 파장이다. θ 및 m 은 각각 입사빔과 산란 빔 사이의 각도와 입사와 주위 매질 사이의 굴절률 비이다. 각 박막샘플에서 발생하는 레일라이 산란의 상대적인 강도를 Fig. 4에 도시하였다. 입자의 크기가 가장 큰 기판온도 250°C에서 증착된 박막샘플에서 레일라이 산란의 강도가 가장 큰 것을 확인할 수 있으며, Fig. 3과 Fig. 4의 비교를 통하여 레일라이 산란의 상대적인 강도가 박막 내 입자크기의 변화와 동일한 경향성을 가지는 것을 알 수 있다.

3.3. 박막의 굴절률

분광형 반사측정기로 기판의 굴절률과 상이한 굴절률을 가지는 박막을 관찰할 때 나타나는 간섭패턴의 형태는 박막의 두께 및 굴절률의 함수로써 결정되는 반사율의 변화에 의하여 결정된다. 즉, 빛이 박막에 수직으로 입사하는 경우 반사율은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$R \approx A + B \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(n - ik)d\right) \quad (2)$$

여기서 R 은 반사율이며 A 와 B 는 상수, n 및 k 는 각각 박막의 굴절률과 소광계수를 의미한다.²⁸⁾ 분광형 반사측정기로 측정된 각 박막샘플의 반사 패턴과 전자 현미경으로 측정된 해당 샘플의 두께를 이용하여 가시광 대역에서 각 SiO_x 박막의 굴절률을 구하였으며, 이를 Fig. 5에 도시하였다. 또한 보다 구체적인 굴절률의 비교를 위하여 400 nm와 700 nm에서의 굴절률 값을 Fig. 6에 나타내었다. 모든 박막의 경우에 파장이 짧아지면서 굴절률이 커지는 전형적인 정상분산 특성을 나타내고 있으나 굴절률은 박막에 따라 다소 상이한 값을 가짐을 알 수 있다. 기본적으로 식 (2)를 기반으로 하여 얻은 각 박막의 소광계수가 10^{-18} 이하로 크지 않은 것으로 나타났기 때문에 다음과 같은 코시 식에 따라 각 박막의 굴절률에 해당하는 코시 상수를 결정할 수 있다.

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (3)$$

여기서 A_n , B_n 및 C_n 은 코시 상수를 의미하며, 제작된 SiO_x 박막의 코시 상수 A_n 은 SiO_2 의 코시 상수 $A_n(1.458)$ 과 SiO 의 코시 상수 $A_n(1.860)$ 사이의 값을 가지는 것으

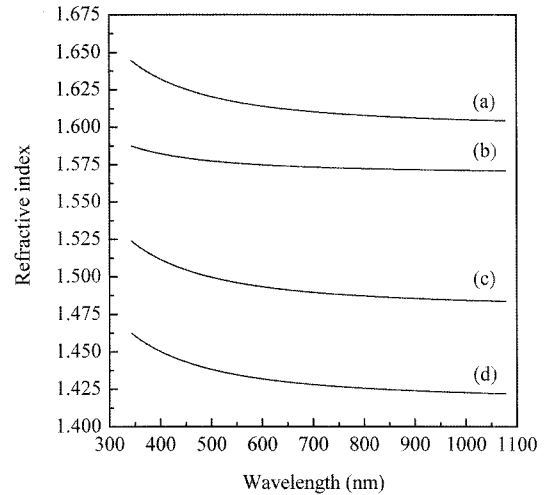


Fig. 5. Refractive index dispersion spectra of the SiO_x film for substrate temperature of (a) 50, 100, 250, 300, and 400°C, (b) 200°C, (c) 350°C, and (d) 200°C.

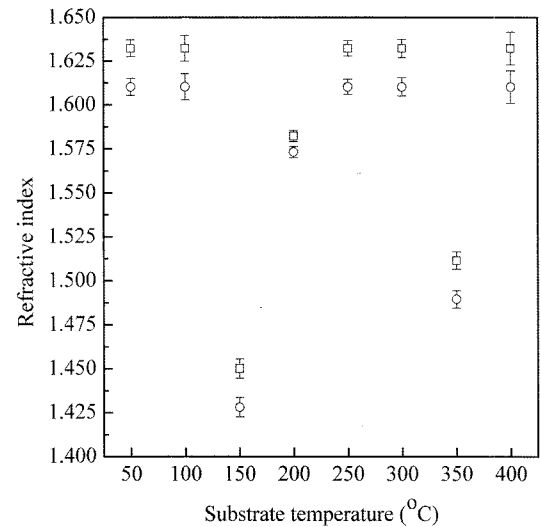


Fig. 6. Refractive indices of the SiO_x film at (a) 400 nm and (b) 700 nm plotted as a function of substrate temperature. Squares and circles represent refractive indices at 400 nm and 700 nm, respectively.

로 확인되었다.

각 박막의 굴절률을 앞에서 언급한 입자크기의 변화에 의한 레일라이 산란의 변화경향과 비교하였을 때, 상호간의 연관성을 찾기 어렵다. 따라서 레일라이 산란의 차이는 박막의 굴절률 측정에 체계적인 분석이 가능한 수준의 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 또한 기판온도에 대한 굴절률의 의존성은 뚜렷한 상관관계를 찾기 어려웠으며, 결과적으로 박막의 굴절률은 기판온도와 연관하여 설명될 수 있는 입자크기 및 박막두께의 변화와 무관함을 알 수 있다. 따라서 박막의 굴절률은 박막의 조성 및 밀도 등에 크게 영향을 받는 것으로 예측할 수

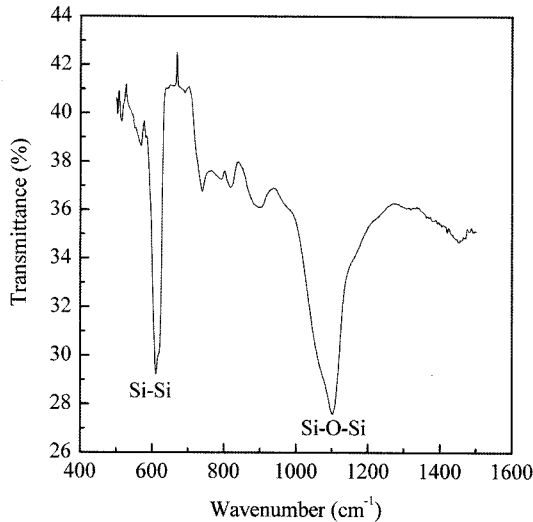


Fig. 7. Representative FT-IR transmittance spectrum of a SiO_x film. Note that this film was fabricated under the substrate temperature of 50°C .

있었으며, 이를 확인하기 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기를 활용하여 각 박막의 적외선 투과 스펙트럼을 측정하였다. 이때 증착 전에 기판 만의 투과 스펙트럼을 측정하고, 증착 후 박막의 투과 스펙트럼을 측정함으로써 사용된 실리콘 기판의 영향을 배제하였다. 대표적인 박막 샘플의 투과 스펙트럼을 Fig. 7에 도시하였다. 기판의 효과와 박막의 두께 효과를 보정한 후 얻어진 투과 스펙트럼에서 각 진동모드에 의한 흡수 피크의 면적은 해당 진동의 양과 비례할 것이며, 따라서 면적을 비교함으로써 결합의 상대적인 양을 확인할 수 있다. Fig. 7에 도시한 스펙트럼에서 $\sim 610\text{ cm}^{-1}$ 에 나타나는 흡수는 Si-Si 결합에 의한 흡수이며,²⁹⁾ 각 박막샘플에서 관찰되는 해당 흡수 피크의 면적을 굴절률의 함수로써 Fig. 8에 도시하였다. Si-Si 결합의 증가에 따라 굴절률이 커지는 경향을 볼 수 있으며, 해당 결합의 증가는 SiO_x 조성에서 산소 대비 실리콘의 함량이 증가함을 의미하기 때문에 실리콘과 산소의 상대적인 비율을 바꿈으로써 SRSO 박막의 굴절률을 조절할 수 있음을 재차 확인할 수 있다. 한편, 굴절률에 영향을 미칠 수 있는 박막의 밀도와 관련하여 각 샘플이 동일한 열처리 공정을 거치면서 Fig. 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 기공이 없는 구조를 나타내었기 때문에 밀도 변화에 따른 굴절률 변화는 크지 않을 것으로 사료되나, 추가적인 분석이 필요하다.

본 연구에서 제작한 SiO_x 박막의 굴절률이 SiO_2 의 굴절률과 SiO 의 굴절률 사이에 있고³⁰⁾ 적외선 스펙트럼에서 Si-Si 결합이 확인되기에, 그 조성이 $1 < x < 2$ 조건을 만족함을 알 수 있다. 이는 대표적인 박막 샘플에 대한 EDS 분석을 통하여 재차 확인되었다.

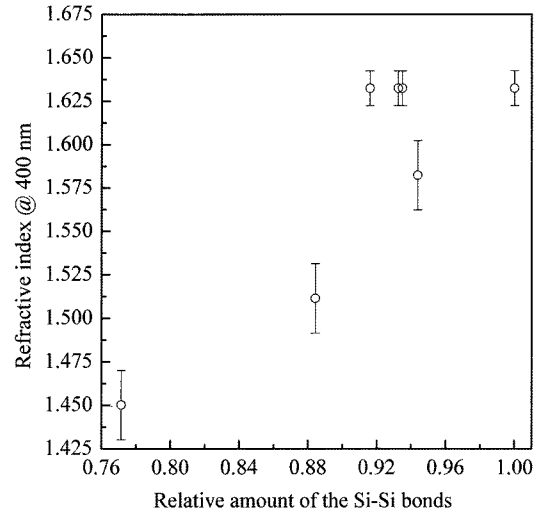


Fig. 8. Refractive indices at 400 nm of the SiO_x films plotted as a function of relative amount of the Si-Si bonds present in each SiO_x film.

4. 결 론

본 연구에서는 SiO 타겟을 사용하여 교류 마그네트론 스퍼터링 증착법으로 SiO_x ($1 < x < 2$) 조성의 박막을 제작하였으며, 기판온도의 변화에 따라 증착된 박막의 두께와 입자크기가 상호연관성을 가지는 것을 확인하였다. 분광형 반사측정기로 측정된 SiO_x 박막의 굴절률은 기판온도에 대한 의존성을 보이지 않았으며, 박막에 존재하는 Si-Si 결합의 양에 의존하는 것으로 파악되었다. 따라서 해당 박막의 굴절률은 산소 대비 실리콘의 함량에 비례함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

Acknowledgments

이 논문은 2006년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-331-D00238).

REFERENCES

1. S. V. Bhat, A. Govindaraj, and C. N. R. Rao, "Tuning the Emission Bands of Nanophosphors Through the Refractive Index of the Medium," *Chem. Phys. Lett.*, **422** [4-6] 323-27 (2006).
2. A. L. Lopez, M. A. Mijares, and O. Malik, "Optical and Electrical Properties of Silicon Rich Oxide Films for Optical Sensors," *Sensor Actuator. A*, **132** [1] 278-82 (2006).
3. D. M. Yeo, and S. Y. Shin, "Polymer-silica Hybrid 1×2 Thermo-optic Switch with Low Crosstalk," *Optic. Comm.*, **267** [2] 388-93 (2006).
4. M. C. Oh, C. Zhang, H. J. Lee, W. H. Steier, and H. R. Fet-

- terman, "Low-Loss Interconnection Between Electrooptic and Passive Polymer Waveguide With a Vertical Taper," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14** [8] 1121-23 (2002).
5. W. Jiang, L. Gu, X. Chen, and R. T. Chen, "Photonic Crystal Waveguide Modulators for Silicon Photonics: Device Physics and Some Recent Progress," *Solid State Electron.*, **51** [10] 1278-86 (2007).
 6. H. Wong, V. Filip, C. K. Wong, and P. S. Chung, "Silicon Integrated Photonics Begins to Revolutionize," *Microelectron. Reliab.*, **47** [1] 1-10 (2007).
 7. M. Riera, J. A. Rodriguez, J. Barreto, and C. Dominguez, "Modeling of Non-stoichiometric Silicon Oxides Obtained by Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition Process," *Thin Solid Films*, **515** [7-8] 3380-86 (2007).
 8. C. S. Yang, C. J. Lin, P. Y. Kuei, S. F. Horng, C. C. H. Hsu, and M. C. Liaw, "Quantum Size Effects on Photoluminescence from Si Nanocrystals in PECVD Silicon-rich-oxide," *Appl. Surf. Sci.*, **113-114** 116-20 (1997).
 9. G. Shi, G. Xu, and G. Han, "Preparation and Photoluminescence of Nanocrystalline Si-rich Silicon Oxide Films by PECVD," *Mater. Lett.*, **61** [2] 463-65 (2006).
 10. M. Burchielli, G. Conte, G. Fameli, C. Felici, M. C. Rossi, A. Rubino, S. Salvatori, and F. Villani, "Functional Properties of Silicon Nanocrystals in Oxygen-rich Amorphous Matrices Formed by Laser Irradiation of Substoichiometric Silicon Oxides," *Mater. Sci. Eng. C*, **19** [1-2] 175-79 (2002).
 11. J. H. Son, H. B. Kim, C. N. Whang, M. C. Sung, K. Jeong, S. Im, and K. H. Chae, "Visible Photoluminescence from Si Ion-beam-mixed SiO₂/Si/SiO₂ Layers Deposited by E-beam Evaporation," *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **216** 346-49 (2004).
 12. T. S. Iwayama, Y. Terao, A. Kamiya, M. Takeda, S. Nakao, and K. Saitoh, "Visible Photoluminescence from Silicon Nanocrystals Formed in Silicon Dioxide by Ion Implantation and Thermal Processing," *Thin Solid Films*, **276** [1-2] 104-07 (1996).
 13. L. S. Liao, X. M. Bao, N. S. Li, X. Q. Zheng, and N. B. Min, "Blue-, Green-, and Red-light Emission from Si⁺-Implanted Thermal SiO₂ Films on Crystalline Silicon," *J. Lumin.*, **68** [2] 199-204 (1996).
 14. L. Bi, Y. He and J. Y. Feng, "Effect of Post-annealing in Oxygen Atmosphere on the Photoluminescence Properties of Nc-si Rich SiO₂ Films," *J. Cryst. Growth.*, **289** [2] 564-67 (2006).
 15. S. Charvet, R. Madelon, R. Rizk, B. Garrido, O. G. Varona, M. Lopez, A. P. Rodriguez, and J. R. Morante, "Substrate Temperature Dependence of the Photoluminescence Efficiency of Co-sputtered Si/SiO₂ Layers," *J. Lumin.*, **80** [1] 241-45 (1999).
 16. A. Sassella, A. Borghesi, F. Corni, A. Monelli, G. Ottaviani, R. Tonini, B. Pivac, M. Bacchetta, and L. Zanotti, "Infrared Study of Si-rich Silicon Oxide Films Deposited by Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15** [2] 377-89 (1997).
 17. R. H. Doremus, "Diffusion of Oxygen and Silicon in Silicon: Silicon Monoxide Model," *Mater. Res. Soc.*, **16** [1] 185-91 (2001).
 18. F. Bertin, T. Baron, D. Mariolle, F. Martin, A. Chabli, and M. Dupuy, "Characterization of Deposited Nanocrystalline Silicon by Spectroscopic Ellipsometry," *Phys. Stat. Sol.*, **175** [405] 405-12 (1999).
 19. C. Gravalidis, S. Logothetidis, N. Hatziaras, A. Laskarakis, I. Tsiaoussis, and N. Frangis, "Characterization of Si Nanocrystals into SiO₂ Matrix," *Appl. Surf. Sci.*, **253** [1] 385-88 (2006).
 20. S. Charvet, R. Madelon, F. Gourbilleau, and R. Rizk, "Ellipsometric Spectroscopy Study of Photoluminescent Si/SiO₂ Systems Obtained by Magnetron Co-sputtering," *J. Lumin.*, **80** [1-4] 257-61 (1999).
 21. B. Sun, Y. R. Chen, P. Zhou, C. H. Xu, Y. F. Kong, Y. X. Zheng, and L. Y. Chen, "Ellipsometric Study of the Optical Properties of Silicon-Based Si:SiO₂ Composite Thin Films under Different Annealing Temperatures," *J. Korean Phys. Soc.*, **49** [5] 2184-87 (2006).
 22. P. Roura, J. Farjas, A. Pinyol, and E. Bertran, "The Crystallization Temperature of Silicon Nanoparticles," *Nanotechnol.*, **18** [17] 175705.1-4 (2007).
 23. J. Xu, H. Umehara, and I. Kojima, "Effect of Deposition Parameters on Composition, Structures, Density and Topography of CrN Films Deposited by r.f. Magnetron Sputtering," *Appl. Surf. Sci.*, **201** [1-4] 208-18 (2002).
 24. R. Schmidt, A. Basu, A. W. Brinkman, T. P. A. Hase, Z. Klusek, S. Pierzgalski, and P. K. Datta, "Structural Properties of rf Magnetron Sputter Deposited Nickel Manganate Thin Films," *Surf. Sci.*, **595** [1-3] 239-48 (2005).
 25. H. Jimenez, E. Restrepo, and A. Devia, "Effect of the Substrate Temperature in ZrN Coatings Grown by the Pulsed Arc Technique Studied by XRD," *Surf. Coating. Tech.*, **201** [3-4] 1594-601 (2006).
 26. S. T. Lin and C. Lee, "Growth of Tantalum Boron Nitride Films on Si by Ratio Frequency Reactive Sputtering: Effect of N₂/Ar Flow Ratio," *Mater. Chem. Phys.*, **82** [3] 691-97 (2003).
 27. R. Tilley, "Colour and the Optical Properties of Materials," pp. 110-17, John Willey & Sons, New York, 2000.
 28. S. G. Jung, "Display Process and Thin Film Thickness Measurement," *Prospective of Industrial Chemistry*, **8** [4] 96-105 (2005).
 29. M. Saadoun, B. Bessaïs, N. Mliki, M. Ferid, H. Ezzaouia, and R. Bennaceur, "Formation of Luminescent (NH₄)₂SiF₆ Phase from Vapour Etching-based Porous Silicon," *Appl. Surf. Sci.*, **210** [3] 240-48 (2003).
 30. M. Barozzi, E. Iacob, L. Vanzetti, M. Bersani, M. Anderle, G. Pucker, and C. Kompocholis, "Analytical Methodology Development for Silicon-rich-oxide Chemical and Physical Characterization," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **15** [1] 56-62 (2007).