

열광학 효과를 이용한 파장 가변 필터와 미세광학벤치를 이용한 패키징

박현용*, 황병철, 이승걸, 오범환, 이일항, 박세근
인하대학교 정보통신공학부 마이크로포토닉스 센터

Thermo-Optic Tunable Filter and Packaging for Micro-Optical Bench

H. Y. Park, B. C. Hwang, S. G. Lee, B. H. O, E. H. Lee, S. G. Park
m-PARC, School of Information & Communication Engineering, Inha University

ABSTRACT

Thermo-optic tunable filter, with 4-pairs of H/L layers for DBR, was designed and fabricated. The transmittance characteristics of the filter were measured. Additionally, heating system and temperature sensor system were used in order to observe property of the filter by thermo-optic effect. The tuning efficiency of the filter was measured to be 0.144nm/K^{-1} showing the tuning range of 9.4nm for the temperature variation of 64.7°C . Filter, lens and fiber were aligned by micro-optical bench.

Key Words: Wavelength Tunable Filter (파장 가변 필터), Thermo-Optic Effect (열광학 효과), Micro-Optical Bench (미세광학벤치), Membrane(멤브레인)

1. 서론

파장 가변 필터는 최근 급속히 성장하고 있는 Wavelength-division-multiplexing (WDM) 시스템에 핵심적인 소자로 적용될 수 있다. 페브리-페롯 공진을 이용하고, Micro electro mechanical systems (MEMS) 공정 기술인 마이크로 머시닝 기술을 이용하여 구현 할 수 있는 파장 가변 필터는 높은 가격 경쟁력을 가질 수 있고, 광학 필터로서 좋은 특성을 보일 수 있으며, 높은 가변 특성을 구현 할 수 있다.^[1] 이러한 페브리-페롯 파장 가변 필터는 Optical-performance monitoring, Spectrometer, Optical noise filter, Sensor 등 여러 분야에 응용될 수 있다. 최근 여러 타입의 파장 가변 필터와 가변 방법이 연구되고 있다. Electrostatic, electro-optic 혹은 piezoelectric 효과를 이용한 파장 가변 필터와 열적, 전기적으로 페브리-페롯 필터의 공진 층의 광학적 거리 및 물리적 거리를 변화시키는 방법들이 응용되고 있다.^{[1][4]} 하지만 이러한 방법들은 구현하는데 있어 공정상 어려움이 있거나 파장 가변 효과가 낮다는 문제점을 가지고 있다.^[2] 이에

본 논문은 비교적 쉬운 박막 증착 방법으로 필터를 구현하고, 파장 가변 시킬 수 있는 열광학 효과를 이용한 필터를 디자인 하고 제작 한 후, 온도의 변화에 따른 필터의 특성을 분석해 보았다. 필터 투과 파장의 $\Delta\lambda$ 를 줄이기 위하여 고 굴절률층(H)과, 저 굴절률층(L)으로 이루어진 층을 4-pairs 로 구성된 거울을 만들었고, 필터의 투과 특성을 분석하기 위하여 온도 변화에 따른 투과 변화를 분석하였다. 또한 온도 가변 시스템과 온도를 측정하기 위한 센서를 포함하는 광학 시스템을 구현하여 필터의 투과 특성을 분석하였다. 그리고 정밀한 정렬 및 필터가 실질적인 소자로서 응용하기 위해 실리콘 미세 광학 벤치를 이용하여 필터, 구면 볼렌즈, 광섬유를 각각 V-groove 및 micro-pits 에 위치시켜 패키징 하였다.

2. 열광학 효과를 이용한 파장 가변 필터

2.1 기본 원리

페브리-페롯 공진 현상을 이용한 파장 가변 필터는 양쪽에 반투과성의 DBR 거울이 있고 그

사이에 공진 층이 있게 된다. 공진 층으로 입사된 빛은 multi-beam 간섭을 일으키며, 필터를 투과하는 파장 λ_m 은 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\lambda_m = 2 \cdot n \cdot d / m \dots\dots (1)$$

n 은 공진 층의 굴절률, d 는 그 간격, m 은 정수이다. 투과 되는 파장의 이웃한 피크 값 사이의 거리를 free spectral range (FSR) 이라고 하며, FSR 은 다음 식으로 표현 될 수 있다.

$$FSR = c / (2 \cdot n \cdot d) \dots\dots (2)$$

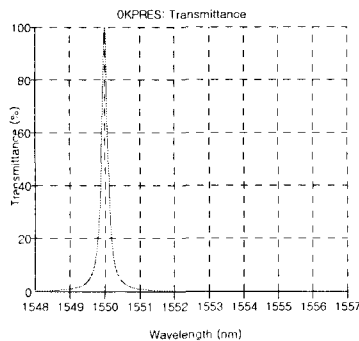
이 식에서 c 는 진공에서 빛의 속도를 표현한다. 페브리-페롯 공진을 이용한 파장 가변 필터에서 투과되는 빛의 파장 의존성은 다음과 같다.

$$T(\lambda) = \frac{t^2}{(1-r)^2} \frac{1}{1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} nd\right)} \dots (3)$$

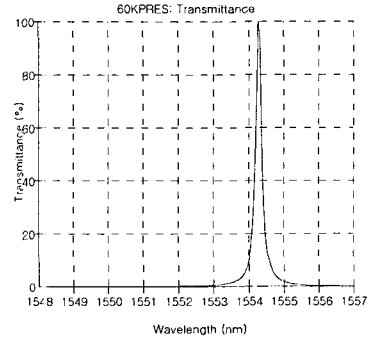
t 와 r 은 각각 DBR 거울의 투과도와 반사도를 나타내며, 위 식에서 페브리-페롯 필터는 중간 공진 층의 두께 d 와 굴절률 n 의 변화에 따라 투과하는 파장이 변함을 알 수 있다.

2.2 전산모의

실제 제작 하고자 하는 모델로서 열광학 효과에 의한 파장 가변 정도를 전산모의 하였다. 전산모의 결과 poly-Si 의 dn/dT 과 dl/dT 은 각각 $2.25 \times 10^{-4}K^{-1}$ 과 $2.6 \times 10^{-6}K^{-1}$ 이므로, [2] 열광학 효과에 의한 파장 가변 효율은 $0.071nm/K^{-1}$ 를 나타내었고, FSR 이나 파장 가변 범위를 고려할 때 WDM 시스템이나 Spectrometer 로 사용이 적절함을 확인할 수 있었다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 각각 온도 변화에 따른 필터 투과 파장변화와 투과 스펙트럼에 대한 전산 모의 결과이다.



(a) $\Delta T=0^\circ C$



(b) $\Delta T=60^\circ C$

Fig. 1 Transmittance for different temperatures

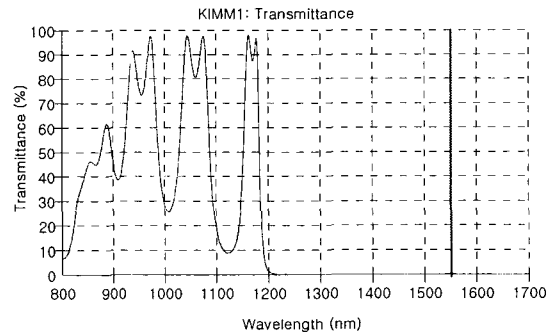


Fig. 2 Spectral response of FP-filter

2.3 제작

높은 반사율을 가지는 Distributed Bragg reflector (DBR) 거울은 각각 4 층의 고 굴절률 물질과 저 굴절률 물질이 차례로 증착되어 구성되며, 중간 cavity 층 양쪽에 DBR 거울이 있게 된다. DBR 거울을 이루는 고 굴절률 물질은 poly-Si ($n=3.48@1550$) 이고, 저 굴절률 물질은 SiO_2 ($n=1.44@1550$) 를 사용하며, 1550nm 를 중심 파장으로 하여 $\lambda/4$ 의 광학적 두께를 가지게 된다. 또한, 양쪽의 DBR 거울 사이에서 multi-beam 공진을 일으키는 cavity 층이 있게 되는데, 이 층은 1550nm 의 중심 파장으로 하여 광학적 두께가 $\lambda/2$ 인 poly-Si 층이다. poly-Si 은 열광학 계수가 다른 물질에 비해 높고, 열광학 효과를 이용한 파장 가변 필터로 사용하기에 적절한 물질임을 알 수 있다. 고 굴절률 물질인 poly-Si 층은 LPCVD 를 이용해 증착하였고, 저 굴절 물질로 사용된 SiO_2 는 PECVD 를 사용해 증착 하였다. Fig. 3 은 디자인된 광학적 두께로 증착된 필터의 SEM

사진이다.

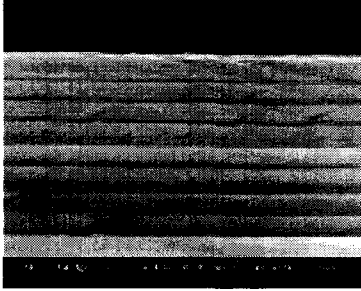


Fig. 3 Cross sectional image of thermo-optic tunable filter

이러한 multi-layer 로 구성되는 페브리-페롯 필터는 실리콘 웨이퍼 위에 증착되는데, 필터의 삽입 손실을 줄이고, 불필요한 공진 특성 및 재료에 의한 흡수를 제거하여 열광학 효과를 극대화시키기 위해 웨이퍼 뒷면을 식각하는 membrane 으로 제작한다. 뒷면 식각은 항온 수조를 이용하여 식각환경의 조건을 80°C 로 균일하게 고정 시키고 42 weight % KOH solution 을 이용하여 수행하였다. Fig. 4 는 뒷면 식각된 필터의 SEM 사진이다.

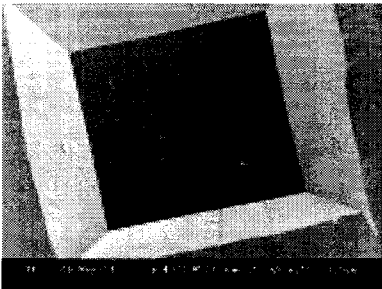


Fig. 4 Back-side of FP-filter with membrane

3. 광학 시스템 구현 및 결과

3.1 필터 특성분석 시스템

제작된 파장 가변 필터의 온도에 따른 투과 파장 특성을 분석하기 위하여 본 연구진은 필터 특성분석 광학 시스템을 구성하였다. 광학 시스템은 Fig. 5 와 같다. 입력 광원으로 중심 파장이 1500nm 영역범위의 broad-band source (JDSS FITEL, BN1415)를 사용하였고, 필터 투과

파장특성을 분석하기 위하여 optical spectrum analyzer (ANRITSU, MS9710B)를 사용하였다. 또한 입력광원을 필터에 시준화시키고 필터를 통과한 투과된 빛을 집속시키기 위해 각각 입출력단에 GRIN 렌즈(SELFOC SLW-1.0)를 사용하였다. 열광학 효과에 의한 투과 파장을 분석하기 위하여 구성된 광학 시스템에 별도의 20°C 에서 100°C 까지 온도 변화가 가능한 온도 가변 시스템과 온도 센서를 구성하였다.

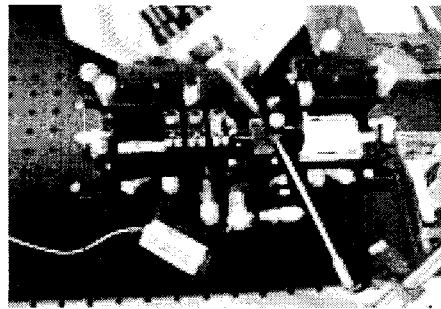


Fig. 5 Experimental setup for measuring filter characteristics

3.2 열광학 효과에 의한 파장 가변 결과

Fig. 6 은 제작된 필터의 온도변화에 따라 투과하는 파장의 변화를 나타낸 그래프이다. 25.3°C 에서 투과되는 파장의 피크 값은 1554.4nm 이고 삽입 손실은 2.67dB, $\Delta\lambda$ 는 4.8nm 를 나타내었다. 온도가 증가할수록 투과되는 파장의 피크 값은 장파장 대역으로 이동하여, 90°C 에서 파장의 피크 값은 1563.8nm 에서 나타남을 확인할 수 있다. 64.7°C 의 온도가 변화함에 따라 최종 파장 가변의 범위는 9.4nm 로서 열광학에 따른 온도 가변 효율은 0.144nm/K⁻¹ 임을 나타내었다.

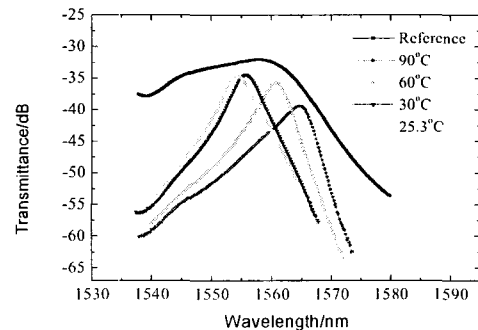


Fig. 6 Transmittance curves of the fabricated filter

실제 실험 결과에서 나타난 파장 가변 효율은

전산모의결과 보다 훨씬 좋게 나타나고 있다. 이는 뒷면 식각에 의해 membrane 에서 열광학 효과를 극대화 시킬 수 있었으며, Fig. 7 에서 보는 바와 같이 필터 층의 열적 팽창에 의한 휨 현상(buckling effect)을^[3] 일으키기 때문에 내부 응력이 발생하고 파장 가변 효율을 더욱 높인 원인이 되었다고 분석된다.

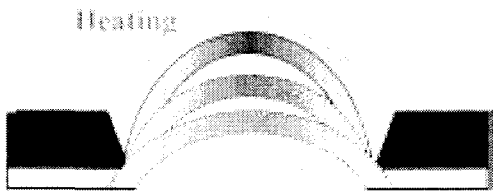


Fig. 7 Bending of filter caused by the stress

4. 미세광학벤치를 이용한 패키징

제작된 필터와 볼렌즈, 광섬유를 미세 광학 벤치를 이용해 패키징 하였다. 정밀한 정렬을 위해 미세 광학 벤치는 실리콘 웨이퍼의 습식 식각에 따른 비등방성 식각의 특성을 이용하여 볼렌즈, 광섬유(SMF) 등의 정렬을 위한 V 홈(V-groove)을 만들어 패키징함에 있어 편리성을 도모 할 수 있었다. Fig. 8 은 (100) 방향성을 갖는 실리콘 웨이퍼에 KOH solution 으로 V-groove 와 micro-pit 이 만들어진 SEM 사진이다.

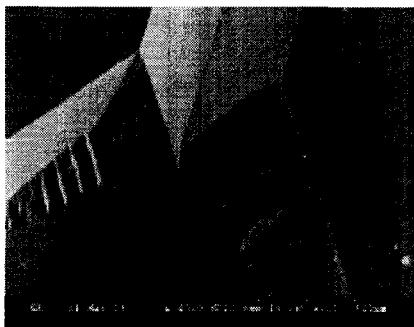


Fig. 8 SEM of the V-groove and micro-pit

볼렌즈는 micro-pit 에 넣어 주게 되고 광 섬유는 V-groove 에서 에폭시를 이용하여 고정하여 정렬 시키게 된다. 이와 같은 방법으로 필터와 볼렌즈, 광 섬유로 이루어진 광학 시스템의 구조가 미세 광학 벤치상에서 구현 되었다.

5. 결론

본 연구는 열광학 효과를 이용한 페브리-페롯 필터의 디자인과 제작을 수행하였고, 온도 변화에 따른 페브리-페롯 필터의 투과 특성을 분석하였다. 필터는 고 굴절률 층과 저 굴절률 층으로 이루어진 4-pair 로 된 DBR 거울과 중간 cavity 로 이루어져 있으며 삽입손실을 줄이고 효율을 높이기 위해 필터 층이 증착되어 있는 실리콘 웨이퍼에 뒷면 식각을 수행하였다. 센서와 온도 가변 시스템이 포함되어 있는 필터 특성분석 시스템을 구성하여 온도 변화에 따른 투과 파장의 변화를 분석해 보았으며, 열광학 효과에 의한 온도 가변 효율은 0.144nm/K^{-1} 로서 높은 효율을 얻을 수 있었고, 최종 실리콘 미세 광학 벤치를 이용하여 필터와 볼렌즈, 광 섬유를 정밀하게 정렬시키는 패키징을 구현 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. P. Meissner, et al., "Micromachined Two-Chip WDM Filters with Stable Half Symmetric Cavity and their system integration," Electronic Components and Technology Conference, pp. 34-41, 2002.
2. D. Hohlfeld, M. Epmeier, H. Zappe, "A thermally tunable, silicon-based optical filter," Sensors and Actuators A, Vol. 103, pp. 93-99, 2003.
3. M. Aziz, J. Pfeiffer, M. Wohlfarth, C. Luber, S. Wu, and P. Meissner, "A New and Simple Concept of Tunable Two-Chip Microcavities for Filter Applications in WDM Systems," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, pp. 1522-1524, 2000.
4. R. LeDantec, T. Benyattou, G. Gillot, A. Spisser, J. L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Rondi and R. Blondeau, "Tunable micro cavity based on InP-Air Bragg mirrors," IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 5, pp. 111-114, 1999.