

소멸비가 가변되는 폴리머 링 레조네이터

송주한 · 김도환 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과

⑩ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2006년 6월 9일 받음, 2006년 7월 31일 수정본 받음)

공진 파장 대역에서의 소멸비가 전기적으로 조절되는 폴리머 링 레조네이터를 제안하고 구현하였다. 이 소자는 버스 도파로에 결합된 링 도파로와 링의 바깥 쪽 클래딩 영역에 형성된 전극으로 이루어져 있다. 전극에 전력이 인가되면 열광학 효과에 의하여 폴리머의 굴절률이 감소하여 링 도파모드의 구속이 강해지며, 이 모드가 느끼는 등가 유효굴절률이 감소하게 된다. 결과적으로 링의 전파손실이 감소하게 됨에 따라 레조네이터의 소멸비가 변하게 된다. 측정된 소자의 특성을 살펴 보면, 전력을 12mW까지 인가함에 따라 소멸비는 약 9dB 정도 증가하였는데, 이것은 링 도파로의 전파손실이 약 80dB/cm 감소한 것에 해당된다.

주제어 : Optical resonator, Polymer, Filter, Waveguide.

I. 서 론

최근에 집적광학형 링 레조네이터(ring resonator)는 포토닉 SoC(photonic System-on-Chip)의 핵심 빌딩 블록(building block)으로서 활발하게 연구되어 왔다^[1-4]. 이 소자는 필터, 스위치, 변조기, 라우터 등의 광통신용 소자, 바이오/화학/환경/위치 센서, 광 연결, 차세대 컴퓨터 분야 등에 다양하게 응용될 수 있다. 기본적인 레조네이터의 구조는 입출력용 버스 도파로에 결합된 링 도파로와 변조용 전극으로 이루어져 있으며, 주기적인 대역 저지/통과 파장 응답 특성을 갖는다. 이 특성을 결정하는 요소로는 버스와 링 간의 결합세기 및 링의 전파손실이다^[5]. 위에서 언급된 여러 가지 기능 소자를 구현하기 위해서는 공진 파장의 위치뿐만 아니라 소멸비가 동시에 제어되어야 한다. 지금까지는 위상변조기를 결합영역에 추가로 도입하여 결합세기를 조절하는 방법^[6,7], 미세가공 기술(MEMS)에 의해 만들어진 멤브레인(membrane)을 기계적으로 움직여 링의 전파손실을 제어하는 방법^[8], 그리고 링 레조네이터 자체를 기계적으로 움직여 버스와 링의 결합세기를 조절하는 방법^[9] 등이 주로 연구되었다. 이러한 기존의 방법들은 복잡한 구조, 기계적 움직임으로 인한 안정성 저하 및 높은 구동 전압 등의 문제점을 지니고 있다.

본 논문에서는 공진 파장 대역에서의 소멸비가 전기적으로 가변되는 폴리머 링 레조네이터를 구현하였다. 제안된 소자는 직선 버스 도파로에 결합된 링 도파로와 변조용 전극으로 이루어져 있다. 링 도파로의 외부 클래딩 영역에 형성된 전극에 전력을 인가하여 열광학효과에 의하여 도파모드가 느끼는 등가 유효굴절률(equivalent effective refractive index)을 감소시킴으로써 전파손실을 줄였다. 버스와 링 간의 결합세기를 일정하게 유지한 상태에서 링의 전파손실을 변화시킴

으로써 공진 파장에서의 소멸비를 전기적으로 조절하는데 성공하였다. 이 제작된 소자는 변조기, 스위치, 가변 광감쇠기, 투과율이 가변되는 파장 필터 등에 다양하게 응용될 수 있을 것이다.

II. 제안된 폴리머 레조네이터의 구조 및 동작원리

그림 1에는 제안된 폴리머 링 레조네이터의 전체 구조와 도파로의 단면 구조가 나타나 있다. 이 소자는 버스 도파로에 결합된 링 도파로와 변조용 금 박막 전극으로 이루어져 있는데, 특히 전극은 링 도파로의 외부 클래딩 영역에 링으로부터 일정한 간격만큼 떨어져서 형성되어 있다. 사용된 도파로는 하부클래딩, 코어, 상부클래딩 3개의 폴리머층으로 구성된 inverted rib 구조를 갖는다. 버스에 입력된 광의 일부가 링으로 결합되어 진행하게 되며, 이 중 일부가 다시 버스로 결합되어 출력된다. 전달매트릭스 방법을 도입하여 얻어진 소자의 정규화된 광파워 출력 P는 다음 식과 같이 주어진다^[5].

$$P = \frac{\alpha^2 + |t|^2 - 2\alpha|t|\cos\theta}{1 + \alpha^2|t|^2 - 2\alpha|t|\cos\theta}$$

여기서 t는 입력 광이 버스에서 링으로 결합되지 않고 출력되는 정도를 나타내는 field transmission factor이다. 버스와 링 간의 필드(field) 결합계수를 k라고 할 때, $|k|^2 + |t|^2 = 1$ 의 관계가 만족된다. 그리고, α 는 링에서의 field attenuation factor이다. 따라서 버스에서 링으로의 결합이 없는 경우에는 $t=1$ 이 되고, 손실이 없는 경우에는 $\alpha=1$ 이 된다. 그리고 θ 는 광이 링을 한 바퀴 진행하면서 겪는 위상변화를 나타내며, $\theta = 4\pi^2 \frac{n_{eff}}{\lambda} R = 2\pi \frac{n_{eff}}{\lambda} Z$ 로 주어진다. 여기서 n_{eff} 는 도파모드의 유효굴절률, R은 링의 반경, Z는 링 둘레이다. 위 식으

[†]E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr

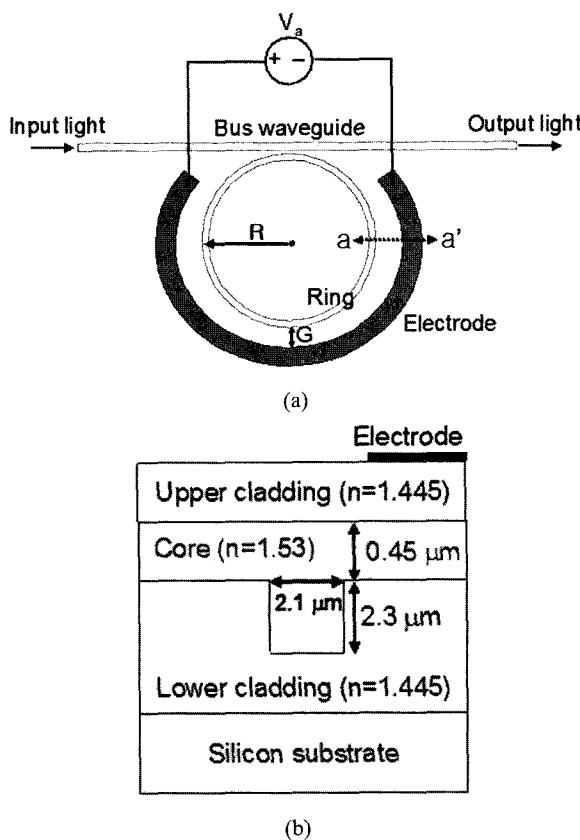


그림 1. 제안된 폴리머 링 레조네이터의 (a) 전체 구조 (b) 도파로 단면 구조.

로부터 레조네이터는 링 둘레에 의해 결정되는 FSR(free spectral range)을 간격으로 주기적인 대역 저지 파장 응답 특성을 갖는다. 공진 파장에서의 소멸비는 버스와 링 간의 필드 결합세기 및 링의 전파손실에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 특히 $\alpha = |t|$ 인 임계결합(critical coupling) 조건 하에서는 공진 파장 대역에서 출력 광파워가 이상적으로 0이 되어 소멸비(extinction ratio)가 ∞ 가 된다. 본 논문에서는 t 값을 고정시킨 상황에서 α 값을 변화시킴으로써 레조네이터의 소멸비를 조절하고자 하였다. 한편, 링에서의 광파워 전파손실은 $L = -20 \log \alpha / Z [dB/com]$ 로 주어진다.

일반적으로 링 도파로에서의 전파손실은 흡수, 산란, 벤딩 등의 세 가지 손실로 구성되어 있는데, 본 논문에서는 벤딩 손실만을 고려하고 나머지 두 가지의 영향은 무시할만큼 작으며 일정하다고 가정하였다. 링 도파로의 벤딩손실은 링의 곡률 반경이 작아짐에 따라 증가하게 되는데, 도파 모드가 느끼는 등가 유효굴절률은 도입함으로써 해석할 수 있다^[10]. 여기서 등가 유효굴절률이란 링의 기본 도파모드의 분포 상에서 테일이 중심보다 더 먼 거리를 진행한다는 사실을 동가적으로 더 느린 속도로 진행한다고 간주함으로써 도입된 개념이다. 따라서 링의 벤딩손실은 도파모드의 분포 상에서 모드의 테일(tail)이 중심보다 더 먼 거리를 진행하기 때문

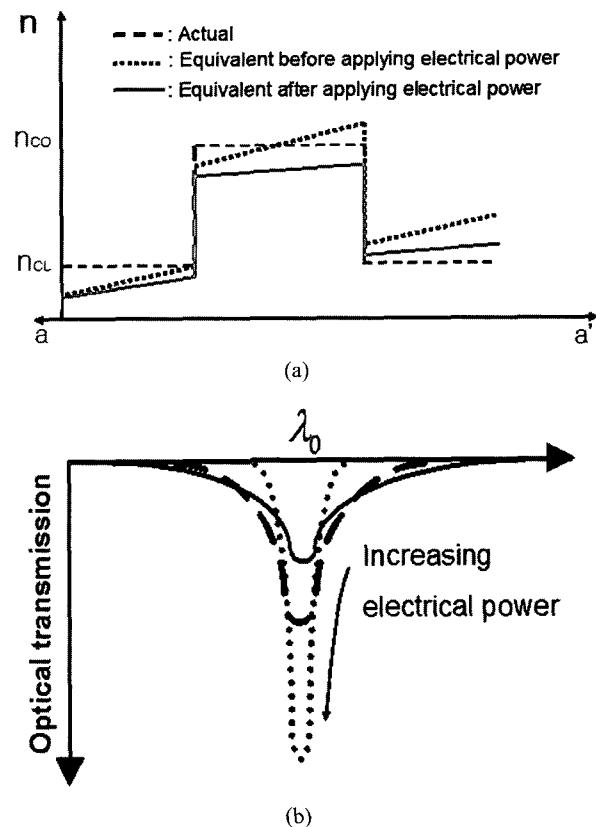


그림 2. 제안된 소자의 동작원리 (a) 링 도파로의 외부 클래딩 영역에서의 유효굴절률 분포 (b) 전달특성 변화.

에 도파로 경계에 존재하는 evanescent 필드가 점점 소실되면서 유발된다고 볼 수 있다.

그림 1에 도시된 제안된 소자의 경우에 링 도파로의 외부 클래딩 영역에 형성된 전극에 전력을 인가하면 열광학 효과에 의하여 폴리머의 굴절률이 감소되고 외부 클래딩과 도파로 영역의 굴절률 차이가 커져서 모드의 구속력이 증가하게 된다. 도파 모드가 느끼는 등가 유효굴절률이 작아진다. 그림 1(a)에 도시된 소자의 a-a' 부분에서 링 도파로의 실제 굴절률 분포와 도파모드가 느끼는 등가 유효굴절률을 분포, 그리고 전극에 전력이 인가되었을 때의 변화된 등가 유효굴절률 분포가 그림 2(a)에 개략적으로 도시되어 있다. 전력이 인가된 경우에 열광학 효과에 의하여 전극이 존재하는 지점으로부터 링의 중심 방향으로 도파모드가 느끼는 등가 유효굴절률이 점진적으로 작아질 것으로 예상된다. 이렇게 되면 도파모드의 구속력이 강해지고 전파손실이 감소될 것이다. 결과적으로 전극에 전력을 인가함으로써 링 도파모드의 벤딩손실을 변화시켜 궁극적으로는 레조네이터의 소멸비를 조절할 수 있게 된다. 이 때, 버스와 링의 결합영역에서는 전극에 인가된 전력에 의하여 거의 영향을 받지 않기 때문에 t 값은 일정하다고 가정하였다. 그림 2(b)에서 알 수 있듯이, 본 논문에서는 작은 링 반경을 선택하여 초기에 벤딩손실이 충분히

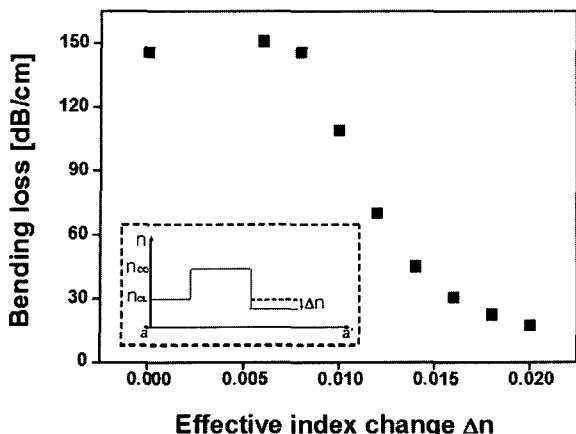


그림 3. 링 도파로의 외부 클래딩 영역에서의 외부 굴절률 변화에 따른 벤딩 손실의 변화.

크도록 한 후, 전극에 전력을 인가함으로써 전파손실을 감소 시켜 임계결합 조건에 가깝게 함으로써 궁극적으로 레조네이터의 소멸비가 증가되도록 하였다.

본 논문에서는 C2V사의 상용화된 빔전파방법 틀인 OlymPIOs™을 이용하여 제안된 소자의 특성을 해석하였다. 이 때, 그림 1(b)에 나타난 제안된 소자의 구조 파라미터는 다음과 같다. 코어층 폴리머의 굴절률은 1.53, 하부클래딩층 및 상부클래딩층 폴리머의 굴절률은 1.445이다. 버스와 링 도파로의 폭은 $w=2.1\mu\text{m}$, 결합영역에서 버스와 링 간의 간격은 $0.7\mu\text{m}$ 이다. 도파로 내에서 코어층의 rib height는 $2.3\mu\text{m}$, 도파로 외부에서의 슬랩 두께는 $0.45\mu\text{m}$ 이다. 전극 폭은 $10\mu\text{m}$, 전극과 링 간의 간격은 $G=10\mu\text{m}$ 이다. 먼저, 링의 반경에 따른 벤딩손실을 계산하였는데, 링 반경이 $80\mu\text{m}$ 인 경우에 벤딩 손실 L 이 약 $150 \text{ dB}/\text{cm}$ 로 매우 커졌으며 반경이 $250\mu\text{m}$ 이상인 경우에는 $1 \text{ dB}/\text{cm}$ 이하로 무시할 만큼 작음을 확인하였다. 따라서 초기에 충분한 벤딩손실을 얻기 위하여 링 반경을 $80\mu\text{m}$ 로 선택하였다. 다음으로 제안된 소자의 동작 특성을 분석하기 위하여 유효굴절률 방법을 도입하여 링 도파로를 1차원 구조의 평면 도파로로 근사하였다. 이 경우에, 링의 외부 클래딩 영역의 굴절률 변화에 따른 벤딩손실을 구하였으며 그 결과가 그림 3에 나타나 있다. 여기서 Δn 은 열광학 효과에 의한 링 도파로의 외부 클래딩 영역에서의 유효굴절률 감소를 나타내며, n_{co} 와 n_{cl} 은 도파로 영역과 클래딩 영역의 유효굴절률을 각각 나타낸다. 이 Δn 은 전극에 인가되는 전력에 비례하게 되는데, 폴리머의 열광학계수(-1.4×10^{-4}) 및 열전도계수($0.17 \text{ W}/(\text{mK})$), 전극의 비유전율 등에 의해 결정된다. 실제로 열광학 효과에 의한 폴리머의 굴절률 변화는 전극으로부터 멀어질수록 점진적으로 감소하는 특성을 고려하여 그림 3에서와 같이 링 도파로의 외부 클래딩 영역에서는 도파모드가 느끼는 등가 유효굴절률이 균일하게 감소한다고 가정하였다. 그림 3으로부터 알 수 있듯이, Δn 이 증가함에 따라 예상대로 모드의 구속력이 증가하여 벤딩손실이 감소

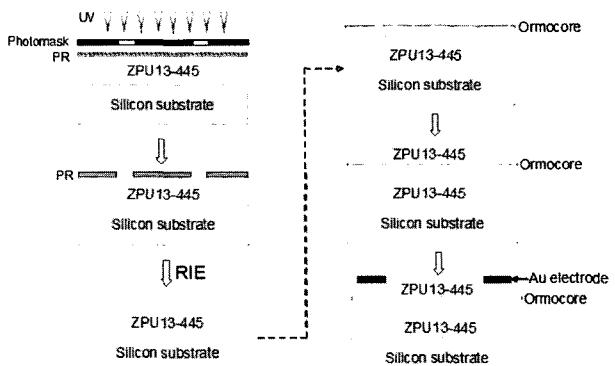


그림 4. 제안된 소자의 제작 공정.

하였다.

III. 소자의 제작 및 특성 측정

그림 4에는 제안된 소자의 개략적인 제작 공정이 도시되어 있다. 먼저, 실리콘 기판 위에 Chem Optics사의 자외선 경화 폴리머인 ZPU13-445($n=1.445$)를 스판 코팅하고 자외선으로 경화하여 하부 클래딩층을 형성하였다. 이 때 하부 클래딩은 900 nm 으로 20초간 스판코팅하였고, 자외선 경화는 $12 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 세기로 3분간 질소 분위기에서 이루어졌다. 포토마스크와 자외선 광원을 이용한 리쏘그래피(lithography) 공정을 이용하여 포토레지스트(photoresist) 상에 소자의 도파로 패턴을 형성한 후, 반응이온식각(RIE: reactive ion etching) 공정을 통하여 하부 클래딩층으로 소자 패턴을 전사하였다. 이 때, O_2 를 이용하여 건식식각을 하였고 RIE 공정상에 사용된 RF 전력은 100W 이다. 그리고 Ormocer사의 Ormocore ($n=1.53$) 폴리머를 희석제와 1:3의 비율로 희석한 후, 스판 코팅하여 코어층을 형성하였으며, 다시 ZPU13-445 폴리머를 이용하여 상부 클래딩층을 만들었다. 이 때 스판코팅 조건은 코어는 4000rpm 으로 60초간 하였고, 상부 클래딩은 1000rpm 으로 30초간 이루어졌다. 상부 클래딩 위에 리쏘그래피와 선택적인 식각 공정을 이용하여 금 박막 전극을 형성하였다. 최종적으로 효과적인 광 결합을 위하여 소자의 입출력 단면을 dicing 하였다. 측정된 저항값은 약 30Ω 이다. 그림 5에는 제작된 링 레조네이터의 현미경 사진이 나타나 있다.

제작된 소자의 특성 측정을 위하여 파장가변 광원(Agilent 8164B)으로부터 나오는 입력 광을 편광 조절기를 통하여 소자에 입사시킨 다음 광파워미터(Newport 1930F-2G)를 사용하여 출력을 관찰하였다. 이 때, 적외선 카메라를 이용하여 도파모드의 분포도 관찰하였다. 그림 6에는 TM 편광에 대한 전극에 인가된 전력에 따른 제작된 소자의 파장 응답특성이 나타나 있다. 인가된 전력이 없는 경우에는 링 도파로의 과도한 벤딩손실로 인하여 공진 파장에서의 대역 저지 정도를 나타내는 소멸비가 상대적으로 작다. 한편, 전력이 증가함에 따라 소멸비가 점진적으로 증가됨을 알 수 있다. 그림 7은

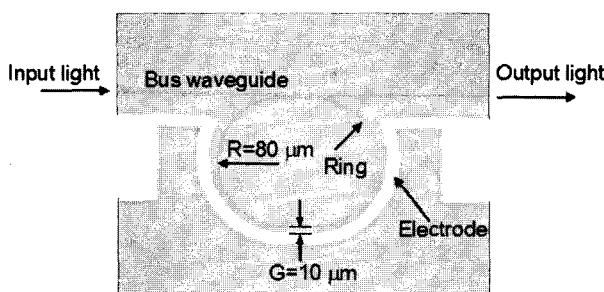


그림 5. 제작된 소자의 현미경 사진.

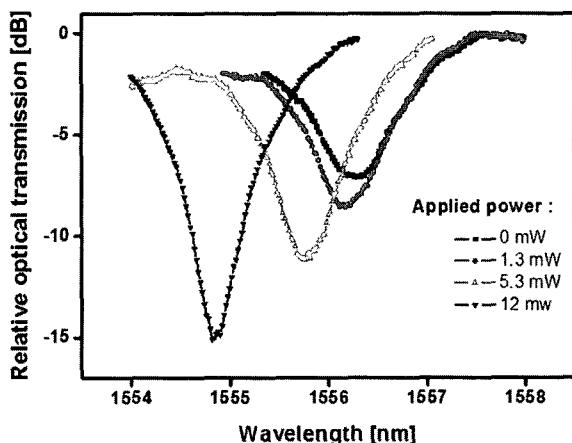


그림 6. 전극에 인가된 전력에 따른 소자의 측정된 파장 응답 특성.

측정결과로부터 얻어진 몇 가지 특정 소멸비에 해당하는 α 와 t 값의 조합을 나타내는 컨투어(contour) 그래프를 보여준다. 이 그림에는 fitting^[4,11]을 통해 얻어진 각 소멸비에 해당하는 α 와 t 값이 나타나 있다. 전극에 인가되는 전력이 증가함에 따라 벤딩손실이 감소하여 α 값이 증가함으로써 a 와 t 가 같아지는 임계결합 조건에 근접함에 따라 소멸비가 증가함을 알 수 있다. 그리고 그림 8에는 여러 인가 전력에 따른 레조네이터의 소멸비와 벤딩손실을 도시하였다. 인가된 전력이 0에서 12mW까지 증가함에 따라 소자의 소멸비가 5 dB에서 14dB까지 약 9dB 정도 증가함을 알 수 있다. 벤딩손실의 변화를 살펴보면, 전력이 인가되지 않은 경우에는 ~200 dB/cm였으며 전력이 12mW로 증가된 경우에는 120dB/cm로 약 80dB/cm 정도 감소하였다. 이러한 측정 결과를 통하여 앞에서 예상했듯이 제안된 레조네이터 구조에서 전력을 조절하여 공진 파장대역에서의 소멸비를 용이하게 제어할 수 있음을 확인하였다. 한편, 그림 6에서 알 수 있듯이 전극에 인가된 전력이 변함에 따라 ~0.12nm/mW의 비율로 공진 파장이 짧아짐을 알 수 있다. 이것은 전극이 링 도파로와 떨어져 있어도 전극에서 발생된 열이 횡방향으로 점진적으로 전파되어 전체적으로 링 도파모드의 유효굴절률을 감소시키기 때문이라고 사료된다. 한편, 인가된 전력에 의해 소멸비만을 조절하기 위해서는 열이 아니라 인가된 전기장에 따라 굴절율이 변하는 전기광학 폴리머를 사용할 수 있을 것이다. 또한,

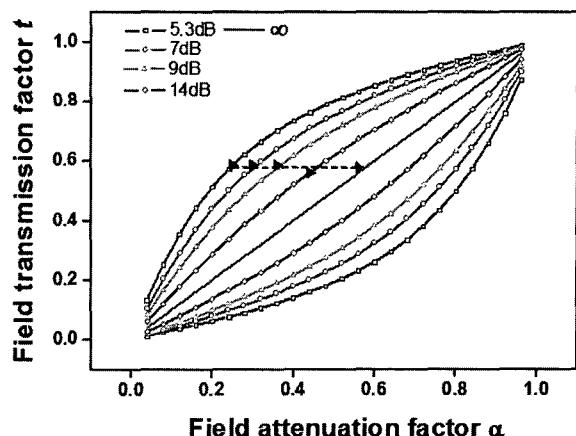
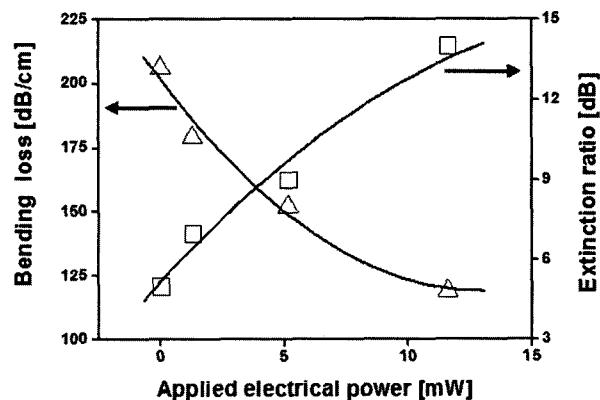
그림 7. 전극에 인가된 전력에 따른 소멸비 및 a , t 값의 변화.

그림 8. 전극에 인가된 전력에 따른 소멸비 및 링 도파로의 벤딩 손실 변화.

링 도파로의 외부 경계부분과 전극 사이에 트렌치(trench) 구조를 형성하여 여기에 굴절률은 주변의 다른 폴리머 물질과 동일하고 열전도율은 훨씬 작은 물질을 삽입하여 전극에서 발생되는 열이 링도파로까지 퍼지는 것을 막는 방법을 이용할 수도 있을 것이다. 본 연구에서 제작된 소자는 변조기, 스위치, 가변 광감쇠기, 투과율이 제어 가능한 파장 가변 필터 등에 응용될 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소멸비가 전기적으로 제어 가능한 폴리머 링 레조네이터를 구현하였다. 링 도파로의 바깥 쪽에 일정한 간격을 두고 형성된 전극에 전력을 인가하여 열광학 효과를 통하여 링의 도파 모드가 느끼는 등가 유효굴절률을 감소시켰다. 따라서 링의 도파 모드의 벤딩손실이 감소하게 된다. 버스와 링 도파로 간의 결합 세기가 일정한 경우에 링에서의 벤딩손실을 변화시킴으로써 레조네이터의 공진 파장 대역에서의 소멸비를 전기적으로 조절하는데 성공하였다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 「서울시 산학연 협력사업」의 「나노 IP/SoC 설계기술혁신 사업단」의 지원과 학술진흥재단의 지원(D00146)으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] B. E. Little, "Toward very large-scale integrated photonics," *Optics & Photonics News*, pp. 24-29, Nov. 2000.
- [2] P. Rabiei, W. H. Steier, C. Zhang, and L. R. Dalton, "Polymer micro-ring filters and modulators," *J. Light-wave Technol.*, vol. 20, no. 11, pp. 1968-1975, 2002.
- [3] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, pp. 325-327, May 2005.
- [4] Do-Hwan Kim, Jung-Gyu Im, Seh-Won Ahn, Ki-Dong Lee, and Sang-Shin Lee, "Polymeric microring resonator using nanoimprint technique based on a stamp incorporating a smoothing buffer Layer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2352-2354, 2005.
- [5] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 321-322, 2000.
- [6] A. Yariv, "Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 483-485, 2002.
- [7] T. Kominato, Y. Hibino, and K. Onose, "Silica-based finesse-variable ring resonator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 5, pp. 560-562, 1993.
- [8] G. N. Nielson, D. Seneviratne, F. Lopez-Royo, T. T. Rakich, Y. Avrahami, M. R. Watts, H. A. Haus, H. L. Tuller, and G. Barbastathis, "Integrated wavelength-selective optical MEMS switching using ring resonator filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 1190-1192, 2005.
- [9] Ming-Chang M. Lee and Ming C. Wu, "MEMS-actuated microdisk resonators with variable power coupling ratios," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 5, pp. 1034-1036, 2005.
- [10] C. K. Madsen and J. H. Zhao, *Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach*. New York: Wiley, 1999.
- [11] T. Ito and Y. Kokubun, "Nondestructive measurement of propagation loss and coupling efficiency in micro-ring resonator filters using filter response," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 3, pp. 1002-1005, 2004.

Polymeric Ring Resonator with Variable Extinction Ratio

Ju-Han Song, Do-Hwan Kim, and Sang-Shin Lee[†]

Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Korea

[†]*E-mail : sslee@daisy.kw.ac.kr*

(Received June 9, 2006, Revised manuscript July 31, 2006)

A polymeric ring resonator with electrically variable extinction ratio at resonant wavelengths has been proposed and demonstrated. It consists of a ring waveguide coupled to a straight bus waveguide and a modulating electrode, which is formed in the outer cladding region outside of the ring. When electrical power is applied to the electrode, the refractive index of the polymers underneath the electrode is lowered to strengthen the confinement of the guided mode of the ring and thus the equivalent effective refractive index felt by the mode is decreased. Therefore, the propagation loss of the guided mode is reduced with the applied electrical power. Consequently the extinction ratio at resonant wavelengths is varied by the electrical power. For the achieved results, the extinction ratio was changed by about 9 dB for the electrical power of 12 mW, when the propagation loss of the ring was reduced by 80 dB/cm.

OCIS code : 060.2370, 060.2380, 350.2450, 350.5610, 170.3890.