폴리머 결합 링 공진기 기반 가변 광신호 지연기의 설계 및 제작

권오상 · 김재성 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과
Ⓢ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2011년 11월 3일 받음, 2011년 11월 24일 수정본 받음, 2011년 11월 24일 게재 확정)

본 논문에서는 결합 링 공진기 구조 기반의 가변 광신호 지연기를 고 굴절률 차이를 갖는 폴리머 물질을 이용하여 설계 및 제작하였다. 링들의 FSR은 100 GHz 로 설계하였고, 8 개의 링들이 결합된 구조를 사용하였다. 버스 도파로에 가까운 두 개의 링들이 공진하는 경우 약 100 ps, 4 개의 링들이 공진하는 경우 180 ps 정도의 지연시간이 측정되었으며, 이는 이론적인 결과에 가까움을 확인할 수 있었다.

Design and Fabrication of Variable Optical Signal Delay Line Based on Polymer Coupled Ring Resonators

Oh-Sang Kwon, Jae-Seong Kim, and Youngchul Chung[†]

*Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University,
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea*

(Received November 3, 2011; Revised manuscript November 24, 2011; Accepted November 24, 2011)

In this paper, a variable optical signal delay line based on coupled ring resonators is designed and fabricated in high-index contrast polymer material. The free spectral ranges (FSR) of the rings are designed to be 100 GHz, and 8 coupled rings are used. When two rings near a bus waveguide are in resonance, the optical delay is measured to be about 100 ps. When four rings are in resonance, the measured delay is about 180 ps. Both are close to the theoretical calculations.

Keywords: Polymer waveguides, Resonators, Integrated optics devices, Optical buffers, Optical delay line

OCIS codes: (130.5460) Polymer waveguides; (070.5753) Resonators, (230.3120) Integrated Optics Devices; (200.4490) Optical buffers

I. 서 론

대용량 고속 통신 시스템에 대한 수요가 급증함에 따라서, 광통신 시스템은 광섬유 한 가닥을 통하여 매 초당 테라 비트 급의 통신이 가능할 정도에 이르게 되었다. 이에 따라서, 광전(optical-to-electrical) 또는 전광(electrical-to-optical) 변환이 필요 없이 광 데이터 패킷의 교환이 가능한 광 패킷 스위칭 기술을 이용한 전광(all-optical) 네트워크가 궁극적으로 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 전광 통신 시스템 또는 전광 연결 시스템에서는 광 데이터 버퍼, 광 스위치, 동기화 모듈 등이 필요하게 되는데, 이를 위하여 가변 광신호 지연 모듈을 구현하기 위한 “Slow Light” 기술이 개발되어야 한다.^[1]

“Slow Light” 기술은 광학에서 중요한 관심사였으며, “Slow Light” 실현을 위한 다양한 형태의 현상들이 알려진 바 있다. 원자 매질에서의 전자 공진 현상을 이용하는 경우 가장 작은 군속도를 얻을 수 있기는 하지만, 대용량 광통신 시스템에 활용하기에는 대역폭이 너무 좁고 저온에서 동작 시켜야 하는 등 실용적으로 적용하기에 부적당한 면이 여전히 존재한다.^[2-3] 수 km 정도의 유리 광섬유에서 유도 브릴루앙 산란(SBS : Stimulated Brillouin Scattering) 현상과 연관된 포논(phonon) 천이를 이용하는 경우, 수 GHz의 대역폭과 0.3 비트 정도의 지연을 얻을 수 있다는 보고가 있었지만, 이는 여전히 비실용적이다.^[4-5] 한편, 고온 세슘(Cs) 증기에서의 이중 흡수 공진을 이용하여 수 GHz 정도의 비트율을 가지는 광 펄스 신호에서 수십 개의 비트들을 가변 지연시킬 수 있다

[†]E-mail: ychung@kw.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

는 사실이 보고되기도 하였다.^[6] 이 결과는 대역폭 · 지연시간 곱 값에 있어서 가장 우수한 결과이기는 하지만, 수 cm 길이의 증기 셀의 길이뿐만 아니라 기존의 광통신 부품들과의 집적에 있어서의 호환성들을 고려하면 여전히 실용화 면에서 문제점을 노출하고 있다.

상기와 같은 매질의 공진 특성을 이용한 지연기의 여러 가지 문제점들, 즉 소자의 크기, 설계 유연성, 집적 가능성의 어려움을 해결하기 위한 방법으로, 인공적인 결합 공진 소자를 이용할 필요가 있다.^[7] 결합 공진기 감속 구조 (SWS : Slow-Wave Structure)는 공진기의 quality factor (또는 finnese)의 값이 허용하는 한에서 광파를 공진기 내부에 가두어 둬으로써 지연을 발생시키는 구조이다. 결합공진기 SWS 구조는 Fabry-Perot 공진기^[8-9], 결합 링 공진기^[10-11], 또는 광 결정의 결합 결합 모드^[12] 등과 같은 다양한 형태의 공진기들을 이용하여 구현할 수 있다. 수십 개의 링 공진기들이 결합된 형태의 CROW (Coupled Resonator Optical Waveguide) 구조가 유리 도파로 또는 폴리머 도파로에서 구현된 바가 있다.^[13-14] 또한 100 개의 미소 링 공진기들이 결합 링 (Coupled Ring) 구조 또는 전역 필터 (All Pass Filter) 구조로 구현된 고정 광 지연기가 SOI (Silicon-on-insulator) 광 와이어 도파로 (Photonic wire waveguide)에서 구현된 바가 있고, 이 소자에서는 0.09 mm²의 면적에 20 Gbps의 비트율에서 10 비트 이상의 광 지연이 실현된 바 있다.^[15]

전술한 SOI 기반의 광 와이어 도파로 지연기는 매우 작은 면적으로 구현할 수 있지만 가변 지연 특성을 구비하지 않은 반면에, 최근에는 8 개의 링이 결합된 형태의 SWS 구조를 이용한 광 지연기를 SiON 도파로에서 구현하여 수백 ps 정도의 가변 광 지연을 얻을 수 있음이 보고된 바 있다.^[16] 본 논문에서는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 매우 큰 폴리머 도파 구조를 이용하여 가변 광 지연기를 설계 및 제작하였다. 링 공진기의 반경이 250 μm 정도로 작게 설계할 수 있었으며, 8 개의 링이 결합된 구조인 경우 광 지연기의 footprint는 2 mm² 이내로서 앞서 보고된 SiON 도파로의^[16] 12.4 mm²에 비하여 훨씬 소형으로 컴팩트하게 제작하였으며, 가변 광 지연 모듈로서의 가능성을 실험적으로 입증하였다.

II. 전광 가변 지연기의 구조 및 동작원리

폴리머 도파로 기반의 전광 가변 지연기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 이 광지연기는 8 개의 결합된 링들이 버스 도파로에 결합된 형태의 전역 (all-pass) 필터 구조로 되어 있다. 모든 링들은 동일한 주회 길이 (L_r)를 가진다. 이 구조에서 입력단으로 입사한 광신호는 동작 파장이 결합된 링 공진기의 통과 대역 파장 $B = 2FSR(\kappa_1)/\pi$ 내에 위치하는 경우에 공진하며 결합 링 공진기들을 통하여 전파될 수 있다. 여기서 FSR 은 링 공진기의 Free Spectral Range 이고, κ_1 은 링 공진기 사이의 결합 비율이다. 신호 스펙트럼이 통과 대

FIG. 1. Schematic configuration of variable optical delay line based on coupled ring resonators.

역 B 바깥에 존재하는 경우는 입력 광신호 8 개의 링 공진기로 이루어진 전광 가변 지연기로 결합 및 공진되지 못하고 그대로 출력 도파로로 나오게 되어 지연이 거의 발생하지 않게 된다. SWS (Slow Waveguide Structure) 내부에 광신호가 입사하게 되면, 광 펄스는 $S = \cos(kL_r/2) / \sqrt{\kappa_1^2 - \sin^2(kL_r/2)}$ 의 factor 만큼 지연된다. 여기서 k 는 링 도파로의 전파상수이다. 전류를 가하지 않았을 때 8 개의 링들이 특정 공진파장 (λ_0)에 맞추어져 있다고 가정한다. 이 경우에 m 개의 링 전극의 전류를 I_1 이 되도록 조절하여 공진 파장이 입력 광파의 파장 λ_1 으로 이동하도록 튜닝하고, 나머지 링에는 전류를 인가하지 않음으로써 공진파장이 λ_0 에 머물러 있도록 한다. 그러면 광 신호는 m 개의 링을 통해서만 공진되면서 전파가 되고 나머지 비 공진 링으로는 전파가 되지 않기 때문에, m 번째 링까지만 공진한 후 출력단으로 빠져 나오게 된다. 단위 링 공진기를 통한 지연시간은 약 $T_r = 2/\pi B$ 이므로, 이 경우에 광 신호가 겪게 되는 지연 시간은 약 $T_d = 2m/\pi B$ 정도가 된다. 공진 파장에서 공진하는 링들의 수는 링 도파로의 위상을 조절함으로써 정할 수 있기 때문에, 전체 지연 시간을 임의대로 조절할 수 있게 된다.^[17]

III. 설계 및 제작 공정

전광 가변 지연기를 설계하기 위한 단위 도파로의 단면 구조는 그림 2와 같은 매립형 구조로서 코어는 폭 1.5 μm와 높이 1.6 μm의 직사각형으로 구성되어 있고, 클래딩이 코어를 감싸는 구조이다. 이때 코어와 클래딩의 굴절률은 각 1.51과 1.378로 8.7%의 높은 굴절률 차를 갖는 도파로로 설계되었으며 시뮬레이션 결과 광을 효과적으로 구속시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 높은 굴절률 차는 굽음 손실(bending loss)을 최소화하여 링의 반경을 상당히 줄일 수 있기 때문에 작은 크기의 소자를 구현할 수 있다.^[18]

FIG. 2. Cross-sectional configuration of buried polymer waveguide.

FIG. 3. Bending loss as a function of ring radius.

그림 3은 링의 반경에 따른 굽음 손실을 보여주고 있다. 그림 3에서 반경이 120 μm 이상일 때 굽음 손실이 0.005 dB/cm 이하가 됨을 알 수 있다.

그림 4에 보인 폴리머 도파 구조를 기반으로 하는 전광 가변 지연기의 특성을 시뮬레이션하기 위하여, 전달 행렬 방법을 이용하였다. 즉, 공진하는 링의 개수 $m = 2, 4, 8$ 인 경우의 출력단에서 파장에 따른 투과 특성(진폭 및 위상)을 구한 다음, $\tau = Ad\phi/d\lambda$ 의 식을 이용하여 지연 시간을 파장의 함수로 구할 수 있다. 링의 반경은 250 μm 이고, 모든 링의 주회 길이는 $L_r = 1994 \mu\text{m}$ 로 하여, 모든 링들의 FSR은 100 GHz 가 되도록 설계하였다. 또한 버스와 링의 결합 비율은 0.8 이고, 링과 링의 결합 비율은 차례대로 각각 $\kappa = 0.34, 0.19, 0.17, 0.17, 0.17, 0.19, 0.34$ 가 되도록 설계하였다. 이와 같은 결합 비율을 선택함으로써, 통과대역이 비교적 평탄하게 되어 허용 대역폭이 넓어지게 된다. 이 경우의 지연시간을 계산하여 결과를 그림 4에 나타내었다. 투과 대역폭은 0.07 nm 정도이고, 지연시간은 공진 링의 개수 $m = 2, 4, 8$ 인 경우 각각 80, 200, 400 ps 정도임을 알 수 있다. 계산과

FIG. 4. Optical signal delay as a function of wavelength. The calculations are performed for the number of rings in resonance set to be 2, 4, 8, respectively.

FIG. 5. Fabrication process of the polymer waveguide used for the realization of variable optical signal delay line.

정에서 군굴절률(n_g)은 1.447이며 각 링의 유효굴절률(n_{eff})은 1.440798로 하였고, 두 링의 굴절률을 0.0003씩 변화시켜서 공진 파장을 이동하여 공진 링의 개수를 조절하였다.

설계된 전광 가변 지연기는 그림 5에 나타난 공정에 따라 제작되었다. 코어와 클래딩은 저손실 폴리머 물질을 사용하였고, 실리콘 웨이퍼 위에 클래딩 폴리머를 스핀 코팅하여 도포하였으며, 포토 리소그래피 공정을 통하여 패턴을 형성한 후 코어의 높이만큼 클래딩을 건식 식각하였다. 이렇게 형성된 코어 영역에 코어에 해당하는 폴리머를 스핀코팅 공정으로 채운 후, 코어의 높이를 적절하게 맞추기 위해 다시 건식 식각하였다. 그 후 클래딩 폴리머를 이용하여 상부 클래딩을 형성 하였다. 각 도파로 제작 공정에서 사용되어진 폴리머는 자외선 및 열 경화 방법을 통하여 경화 하였다. 또한 소형 이중 링 공진기의 굴절률 변화를 주기위해 전극을 증착시켰다.^[18] 제작된 전광 가변 지연기의 현미경 사진을 그림 6에 나타내었다.

FIG. 6. Top view of the fabricated polymer variable optical signal delay line.

IV. 측정 결과

그림 7(a)는 가변 광 지연 모듈의 파장에 따른 투과 특성을 Matlab을 이용하여 시뮬레이션한 결과이고, 그림 7(b)는 제작된 가변 광신호 지연기를 측정하여 나타낸 결과이다. 측정 결과 FSR이 0.8 nm 로 시뮬레이션 결과와 동일함을 확인하였으며, 이는 설계 기준 FSR이 100 GHz 가 되는 것과 일치한다. 전광 가변 지연기의 소광비는 약 8 dB 정도로 측정되었다. 광신호 지연기로 광을 입사하기 전에, 편광 조절기를 조절하여 그림 7(b)에 보인 스펙트럼에서 예상되는 FSR 사이에 발생하는 공진이 최대한 억제되도록 함으로써 TE 또는 TM 편광만 주로 입력되도록 하였다.

그림 8은 제작된 전광 가변 지연기를 이용하여 시간지연을 측정하기 위한 구성도이다. PPG(Pulse Pattern Generator)에서 생성된 3.2 Gbps의 NRZ (Non-Return-to-Zero) 신호를 리튬나이오베이트(LiNbO₃) 변조기를 구동하여, 파장 가변 레이저에서 나오는 CW (Continuous Wave) 광을 변조하여 광 펄스를 생성하였다. 이 광 펄스가 전광 가변 지연기를 통과한 출력 광 펄스를 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)로 증폭한 후, DCA(Digital Communication Analyzer)를 통해 확인할 수 있다. 이 때 전광 가변 지연기의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 TEC(Thermo-Electric Cooling)를 사용하였다. 그림 9는 제작된 전광 가변 지연기 내에 두 개의 링 공진기 상부에 증착된 전극에 전류를 인가하여 굴절률을 변화시킴으로써 두 개의 링을 공진 시켰을 때 측정된 결과를 도시한 것으로 펄스가 100 ps 지연되었다. 이 때 파장은 공진 파장에서 약 0.1 nm 정도 어긋난 파장을 사용하였으며, 약 23 mA의 전류를 인가하여 중심 파장이 0.1 nm 정도 이동하도록 하여 펄스를 지연시켰다. 두 개의 링 공진기의 전극에 추가로 23 mA의 전류를 인가하여 네 개의 링을 모두 공진시켰을 때는 약 80 ps 정도 추가로 지연되는 것을 확인하였다. 약 1.5 dB/cm 정도로 추산되는 폴리머 도파로 손실 때문에 지연이 많이 될수록 펄스가 점차 감쇄되어 나타남을 보이고 있다. 본 측정에서는 전극의 배치 설계의 미숙으로 인하여 프로브를 4 개 이상 동시에 사용하기가 어려워 6 개 및 8 개의 링을 모두 공진시키기 위한 전류 공급이 어려운 관계로 4 개 링이 공진하는 경우까지의 측정 결과만 얻을 수 있었다. 추후 제작에서는 전극 배치를 적절히 하여 마스크 설계를 함으로써, 모든 링을 공진시키는 경우의 실험을 진행할 예정이다. 또한 저 손실 도파 물질을 사용하여 공진기의 손

(a)

(b)

FIG. 7. (a) Simulation and (b) measurement results for transmission characteristics at through port.

FIG. 8. Experimental setup for the measurement of optical signal delay.

실을 줄임으로서 지연되는 광 펄스가 감쇄되는 정도를 완화해야 할 것이다.

FIG. 9. Measurement results of optical signal delay characteristics.

V. 결 론

본 논문에서는 굴절률 차이가 매우 큰 폴리머 도파 구조의 결합 링 공진기들을 이용하여 가변 광신호 지연기를 설계 및 제작하였다. 전송행렬 방법을 이용하여 전광 가변 지연기의 특성을 분석하였다. 도파구조는 코어 폭 $1.5\ \mu\text{m}$ 와 높이 $1.6\ \mu\text{m}$ 인 매립형 구조이다. 코어의 굴절률은 1.51이고 클래딩의 굴절률은 1.378로 8.7 %의 높은 굴절률 차로 인해 곡률 반경이 $120\ \mu\text{m}$ 정도로 작아도 될 것임을 알 수 있었고, 설계에서는 $250\ \mu\text{m}$ 의 곡률 반경의 곡선도파로를 이용하여 링 공진기를 구성하였다.

버스 도파로의 입출력 through 특성 측정결과 $0.8\ \text{nm}$ 의 FSR을 나타냄을 확인하였고, 이는 설계 값과 거의 동일하였다. 온도에 민감한 특성을 갖는 폴리머 물질 기반에 제작된 가변 광신호 지연기는 링 공진기 상부에 증착된 전극에 전류를 인가하여 발생하는 열을 이용해 링 공진기 주변의 굴절률을 조절함으로써 공진 파장을 조절하여 가변 지연 특성을 얻을 수 있음을 확인 하였다. 이때 전광 가변 지연기에 TEC를 장착하여 온도가 일정하게 유지되게 하여 반복 측정 시 동일 파장에서 공진이 일어나도록 하였다.

측정 결과 전광 가변 지연기 내에 두 개의 링을 공진시켰을 때 $100\ \text{ps}$ 의 지연을 확인하였고, 네 개의 링을 공진시켰을 때 $180\ \text{ps}$ 지연되는 것을 확인하였다. 이는 전송행렬 방법을 이용한 시뮬레이션 결과와 매우 유사함을 확인하였다. 본 연구의 결과를 개선하는 경우, 수백 ps의 가변 지연을 유연하게 나타낼 수 있는 광신호 지연기를 구현하여 차세대 광패킷 네트워크에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한

국연구재단의 기초연구사업 (2011-0004923) 지원을 받아 수행된 것임. 또한 이 논문은 2011년도 광운대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. E. Parra and J. R. Lowell, "Towards applications of slow-light technology," *Opt. Photon. News* **18**, 41-45 (2007).
2. L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas," *Nature* **397**, 594 (1999).
3. M. Bajcsy, A. S. Zibrov, and M. D. Lukin, "Stationary pulses of light in an atomic medium," *Nature* **426**, 638 (2003).
4. Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping, Z. Zhu, A. Schweinsberg, D. J. Gauthier, R. W. Boyd, and A. L. Gaeta, "Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 153902 (2005).
5. K. Y. Song and K. Hotate, "25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers," *Opt. Lett.* **32**, 217 (2007).
6. R. M. Camacho, M. V. Pack, J. C. Howell, A. Schweinsberg, and R. W. Boyd, "Wide-bandwidth, tunable, multiple-pulse-width optical delays using slow light in cesium vapour," *Phys. Rev. Lett.* **98**, 153601 (2007).
7. J. B. Khurgin, "Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis," *J. Opt. Soc. Am. B* **22**, 1062 (2005).
8. M. Ghulinyan, M. Galli, C. Toninelli, J. Bertolotti, S. Gottardo, F. Marabelli, D. Wiersma, L. Pavesi, and L. Andreani, "Wide-band transmission of non-distorted slow waves in one-dimensional optical superlattices," *Appl. Phys. Lett.* **88**, 241103 (2006).
9. F. Morichetti, A. Melloni, J. Cap, J. Petracek, P. Bienstman, G. Priem, B. Maes, M. Lauritano, and G. Bellanca, "Self-phase modulation in slow-wave structures: a comparative numerical analysis," *Opt. Quantum Electron.* **38**, 761 (2006).
10. A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee, and A. Scherer, "Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis," *Opt. Lett.* **24**, 711-713 (1999).
11. F. Morichetti, A. Melloni, C. Canavesi, F. Persia, M. Martinelli, and M. Sorel, "Tunable slow-wave optical delay-lines," *Slow and Fast Light*, Washington DC, MB2 (2006).
12. A. L. Reynolds, U. Peschel, F. Lederer, P. J. Roberts, T. F. Krauss, and P. J. I. De Maagt, "Coupled defects in photonic crystals," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **49**, 1860 (2001).
13. B. E. Little, S. T. Chu, P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, F. G. Johnson, F. Seiferth, D. Gill, V. Van, O. King, and M. Trakalo, "Very high-order microring resonator filters for WDM applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 2263 (2004).
14. J. K. S. Poon, L. Zhu, G. A. De Rose, and A. Yariv,

- “Transmission and group delay of micro ring coupled resonator optical waveguides,” *Opt. Lett.* **31**, 456 (2006).
15. F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, “Ultracompact optical buffers on a silicon chip,” *Nature Photonics* **1**, 65 (2006).
16. F. Morichetti, A. Melloni, A. Breda, A. Canciamilla, C. Ferrari, and M. Martinelli, “A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines,” *Opt. Express* **15**, 17273-17282 (2007).
17. A. Melloni, F. Morichetti, and M. Martinelli, “Linear and nonlinear pulse propagation in coupled resonator slow-wave optical structures,” *Opt. Quantum Electron.* **35**, 365-379 (2003).
18. D. Lee, T. Lee, J. Park, S. Kim, and Y. Chung, “Widely tunable double-ring-resonator add/drop filter,” *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **18**, 216-220 (2007).