

나노 임프린트 기술을 이용한 폴리머 링 광공진기

김도환[†] · 임정규 · 이상신

광운대학교 전자공학과

Ⓢ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

안세원 · 이기동

LG 전자기술원 소재재료연구소

Ⓢ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2005년 6월 10일 받음, 2005년 7월 19일 수정본 받음)

본 논문에서는 나노 임프린트 기술을 이용한 폴리머 링 광공진기를 제안하고 구현하였다. 공진기 역할을 하는 링 도파로에서의 전파손실과 링 및 버스 도파로 간의 광파워 결합계수를 빔전파방법을 도입하여 계산하였으며, 또한 전달 매트릭스 방법을 도입하여 이들이 소자에 미치는 영향을 분석하고 소자를 설계하였다. 특히, smoothing buffer layer를 갖는 임프린트용 스탬프를 도입하여 다음과 같은 성과를 얻을 수 있었다. 먼저 식각공정으로 얻어진 스탬프 상의 도파로 패턴의 측면 거칠기를 링 도파로의 산란손실을 개선함으로써 Q값을 획기적으로 향상시켰다. 또한, 결합영역에서 버스와 링 도파로 간의 간격을 기존 lithography 공정에서는 불가능하였던 0.2 μm 정도까지 효과적으로 줄이고 제어함으로써 링과 도파로 간의 광파워 결합을 정밀하게 조절할 수 있게 되었다. 제작된 소자의 성능을 살펴보면, 링 반경이 200 μm 인 경우에 대해 1550 nm 파장 대역에서 Q값은 ~103800이고, 소멸비는 ~11 dB, free spectral range는 1.16 nm였다.

주제어 : Ring, Resonator, Nanoimprint, Polymer, Optical

I. 서 론

21세기 들어 우리나라는 정부 차원에서 국민 소득 2만불 시대를 견인할 핵심 기술로 차세대 대용량 광통신용 소자, 지능형 로봇, 지능형 자동차, 바이오센서, 차세대 PC 등의 신성장 동력 산업기술을 발굴하여 집중적인 투자를 추진하고 있다. 현재 광통신 시스템은 개별적인 기능을 갖는 소자를 조립하여 구현하므로 가격이 매우 비싸다. 따라서 경제적으로 가장 효과적인 광통신 시스템을 구현하기 위해서는 다양한 기능의 광통신용 소자를 집적한 광 집적회로(photonic IC)가 필수적이다. 또한, 지능형 로봇과 지능형 자동차에 응용되는 자이로스코프(gyroscope)와 가속도계 센서 그리고 신체의 건강상태 등을 비파괴/비접촉 방식으로 검사할 수 있는 바이오 광센서도 앞서 언급한 광 집적회로를 통한 구현이 필수적이다. 위에서 살펴본 바와 같이 여러 가지 신성장 기술에 공통적으로 응용될 수 있는 핵심 요소가 광 SoC(system-on-chip)이다. 광 SoC가 성공적으로 구현되기 위해서는 기존의 전자집적회로에서 사용되는 트랜지스터와 같은 building block이 필수적이다. 최근에 광 SoC의 building block으로서 링(ring) 광공진기가 주목 받고 있다.^[1] 이 링 광공진기는 좁은 공간에서 광의 경로를 바꿀 수 있으며, 광의 세기를 조절할 수 있고, 외부 환경에 민감하게 응답특성이 제어되고, 광범위하게 Q값(quality factor)이 조절되고, 광섬유와 결합손실이 작은 특성

을 갖고 있다.

지금까지 보고된 폴리머 링 광공진기의 제작 방법으로는, 건식 식각 공정을 이용하는 기술,^[2] soft lithography를 바탕으로 한 몰딩 기술,^[3] 나노 임프린트 기술^[4] 등이 있다. 특히, 나노 임프린트 기술은 복잡하고 비싼 lithography 공정없이 미리 만들어진 스탬프를 활용하여 패턴을 저가에 대량으로 신속하게 형성할 수 있다는 장점으로 인하여 반도체, 디스플레이, 광통신용 소자 등 분야에 응용될 수 있기 때문에 최근에 각광을 받고 있다.^[5] 본 논문에서는 나노 임프린트 기술을 이용한 폴리머 링 광공진기를 제안하고 구현하였다. 공진기 역할을 하는 링 도파로에서의 전파손실과 링 및 버스 도파로 간의 광파워 결합계수 등을 빔전파방법(BPM: beam propagation method)을 이용하여 계산하였다. 또한, 전달 매트릭스 방법(transfer matrix method)을 도입하여 전파손실과 결합계수 등이 소자의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 smoothing buffer layer를 갖는 임프린트용 스탬프를 도입하여 소자의 성능을 획기적으로 향상시켰다. 즉, 식각공정을 통해 만들어진 스탬프 상의 도파로의 측면 거칠기(sidewall roughness)를 개선하여 링 도파로의 산란손실을 감소시킴으로써 공진기의 Q값을 향상시켰다. 또한, e-beam writer를 이용한 direct writing 방법을 사용하지 않고 결합영역에서 버스와 링 도파로 간의 간격을 ~0.2 μm 까지 효과적으로 줄였다. 이것은 기존의 마스크를 활용한 lithography와 식각공정을 이용한 방법에서는 불가능하다.

[†]E-mail: s_huski@kw.ac.kr

II. 제안된 링 광공진기의 동작원리 및 설계

본 장에서는 제안된 공진기의 기본적인 구조와 동작원리를 살펴보고, 소자의 구조를 설계하고 특성을 해석하였다. 그림 1에는 본 논문에서 제안된 폴리머 링 광공진기의 구조가 도시되어 있다. 이 소자는 광 공진용 링 도파로와 입·출력 포트용 직선 버스(bus) 도파로로 구성되어 있다. 입력 포트에 입사된 광이 버스 도파로를 진행하는 중 결합영역에서 광파워의 일부가 링으로 결합되고, 이 결합된 광이 링을 반복적으로 진행하면서 일부가 다시 버스 도파로로 결합되어 최종적으로 출력포트로 나오게 된다. 여기서 링의 반경은 R 이고, 결합영역 길이는 L , 버스와 링 간의 간격은 G 이다.

본 논문에서는 링 광공진기의 동작 특성을 해석하기 위하여 결합모드 이론(coupled mode theory)을 바탕으로 한 전달 매트릭스 방법을 이용하였다.^[6] 그림 2는 전달 매트릭스 방법을 링 공진기에 적용하는 과정을 보여주고 있다. 이 그림에서 k 는 결합영역에서의 버스와 링 간의 필드(field) 결합계수를 나타내며, t 는 버스에서 링으로 결합되지 않고 출력되는 필드의 전송계수이고 $t = |t|e^{-j\phi}$ 로 주어진다. 결합영역에서 손실이 없다고 가정할 경우, $|k|^2 + |t|^2 = 1$ 의 관계가 성립된다. 또한, 링에서의 필드 전송계수는 $ae^{j\theta}$ 와 같이 주어진다. 여기서 α 는 링의 전송 손실계수이며, 특히 손실이 없는 경우에는 $\alpha=1$ 이 된다. 그리고 θ 는 광이 링을 한 바퀴 진행하였을 때 얻어지는 위상변화를 나타내며, $\theta = \beta \cdot 2\pi R = 4\pi^2 \frac{n_{eff}}{\lambda} R$ 로 주어진다. 여기서 β 는 전파상수, n_{eff} 는 모

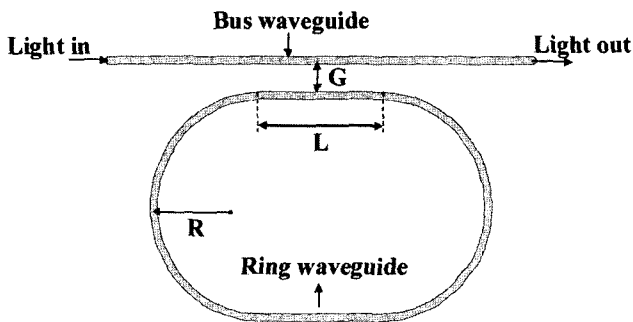


그림 1. 제안된 링 광공진기.

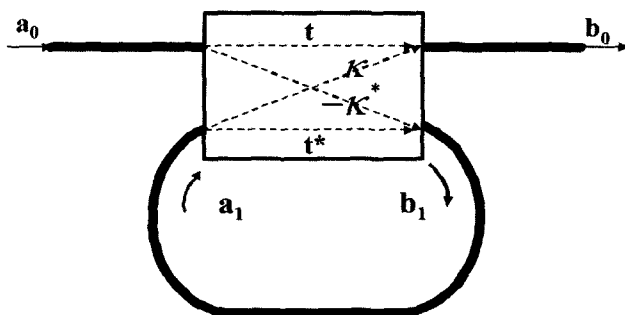


그림 2. 링 광공진기에서의 광의 전송 및 결합.

드의 유효굴절률, R 은 링 반경이다. 입력포트와 출력포트에서 광 필드의 크기를 각각 a_0 와 b_0 라 할 때, 공진기의 전체 전달특성은 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\left| \frac{b_0}{a_0} \right|^2 = \frac{\alpha^2 + |t|^2 - 2\alpha|t|\cos(\theta + \phi_i)}{1 + \alpha^2|t|^2 - 2\alpha|t|\cos(\theta + \phi_i)} \quad (1)$$

위 식으로부터 알 수 있듯이, 링 공진기 소자는 출력포트에서 특정한 광파장에 대해 링으로부터 결합되는 광과 버스로부터 직접 입력 되는 광신호 간에 소멸간섭이 일어나 출력이 최소가 되거나, 보강간섭이 일어나 최대가 되는 주기적인 대역저지 특성을 갖게 된다. 특히, $\alpha=1$ 일 때 임계결합(critical coupling) 조건이 만족되어, 공진 파장에서 출력되는 광파워가 이상적으로 0이 되어 대역저지 소멸비(extinction ratio)가 ∞ 가 된다. 전달특성으로부터 얻어지는 링 광공진기 소자의 성능을 나타내는 파라미터로는 FWHM(full width at half maximum), FSR(free spectral range), Q값 등이 있다. 원하는 소자의 성능을 얻기 위해서는 결합영역에서의 광파워 결합계수 $|k|^2 (= 1 - |t|^2)$ 와 링 도파로의 전송 손실계수 α 를 적절히 조절해야 한다.

그림 3은 구현하고자 하는 링 공진기의 inverted rib 구조를 갖는 도파로의 단면 모습을 보여주고 있다. 이 도파로는 하부 클래딩(폴리머 ZPU445: $n=1.445$), 코어(폴리머 Ormocer: $n=1.53$), 상부클래딩 (공기: $n=1$)으로 이루어져 있다. 이때 코어와 클래딩 간의 굴절률 차이 Δn 은 약 0.1(6.5%)이다. 먼저 빔 전파방법(BPM: beam propagation method)을 이용하여 소자에 사용되는 직선 버스 도파로와 링 도파로의 기본적인 특성을 해석하였다. 기본적으로 이 도파로들은 1550 nm 파장대에서 단일모드 도파로특성을 갖도록 설계되었다. 링의 도파모드 분포는 반경에 따라 근사적으로 결정되는 등가 굴절률 분포를 이용하여 계산하였다.^[7] 그림 4(a), 4(b), 4(c)에는 링 반경이 각각 ∞ (직선), 200 μm , 100 μm 인 경우에 대한 계산된 모드분포가 도시되어 있다. 예상대로 버스의 모드분포는 도파로 중심에 위치하고 있는 반면에 링의 경우에는 반경이 감소함에 따라 모드가 바깥쪽으로 점점 치우쳐서 분포됨을 알 수 있다. 한편, 직선 버스의 기본 도파모드의 유효굴절률은 1.513였다.

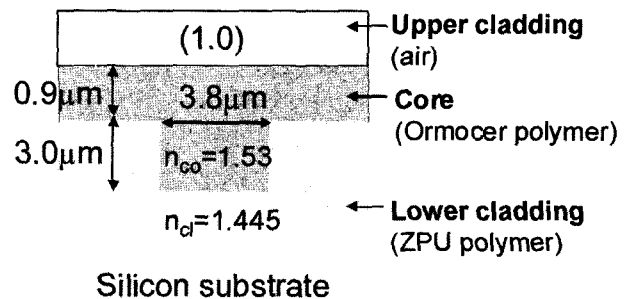


그림 3. 제안된 폴리머 광공진기의 도파로 단면 구조.

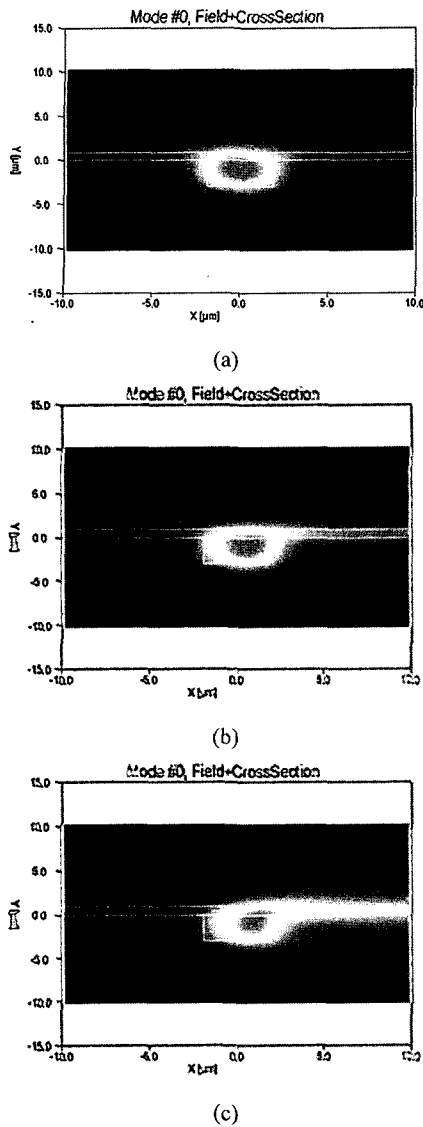


그림 4. 링 반경에 따른 기본 도파모드분포, (a) $R = \infty$, (b) $R = 200 \mu\text{m}$ (c) $R = 100 \mu\text{m}$.

그림 5는 서로 다른 링 반경에 대해 버스와 링 간의 간격 G 에 따른 두 도파로 간의 광파워 결합계수를 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 결합계수는 소자의 Q값을 결정하는 요소 중의 하나이며, 예상대로 두 도파로 간의 간격이 커질수록 감소함을 알 수 있다. 그림 5로부터 알 수 있듯이, 도파로 폭이 $3.8 \mu\text{m}$ 이고 두 도파로 간의 간격이 $0.2 \mu\text{m}$ 인 경우, 링 반경 $100 \mu\text{m}$ 와 $200 \mu\text{m}$ 에 대한 광파워 결합계수는 각각 5.7%와 10.5%였다.

다음으로 링 도파로의 전파손실 α_{prop} [dB/cm] ($=20 \log \alpha$) 이 소자의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 일반적으로 링 도파로의 전파손실은 벤딩손실, 물질(material)손실, 그리고 산란(scattering)손실 등으로 이루어져 있다. 우수한 성능을 갖는 공진기 소자를 구현하기 위해서는 실제적으로 벤딩손실과 산란손실을 최소화 하는 것이 필수적이다. 첫째로, 벤딩손실

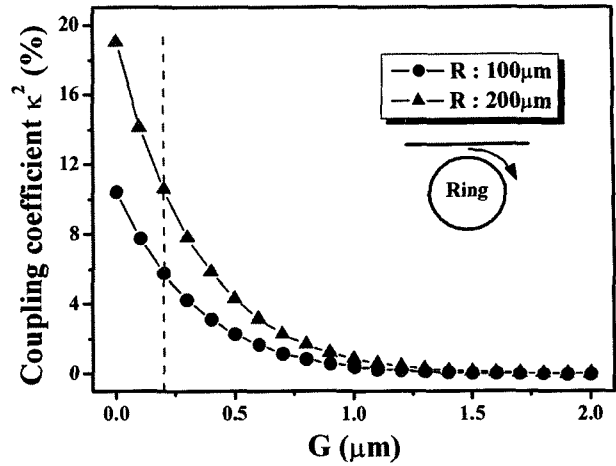


그림 5. 버스와 링 간의 간격에 따른 두 도파로 간의 광파워 결합 계수.

은 그림 4에 나타난 바와 같이 링 도파로의 반경이 작아짐에 따라 모드가 도파로 경계 바깥쪽으로 치우쳐 분포하게 되어 광이 소실됨으로써 유발된다. 그림 6에는 링 도파로의 반경에 따른 벤딩손실계수 α_{bend} [dB/cm]와 FSR의 계산 결과를 보여 주고 있다. 반경이 $200 \mu\text{m}$ 이상인 경우에는 벤딩손실은 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 특히, FSR을 증가시키기 위하여 링 반경을 작게 해야 하는 경우에 벤딩손실이 커지는 문제를 극복하기 위해서 클래딩의 굴절률과 코어의 굴절률의 차이를 크게 해야 한다. 둘째로, 링 도파로의 측면 거칠기(sidewall roughness)에 의해 유발되는 산란손실의 영향을 조사하였다. 이 산란손실은 도파로의 측면 거칠기를 공간 주파수(spatial frequency)의 함수로 정의하고, 이에 따른 자기상관(autocorrelation) 함수와 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 이용하여 계산된다.^[8,9] 특히 자기상관함수를 식 (2)와 같이 지수함수 형태로 가정할 경우, 산란손실계수 α_{scat} [dB/cm]는 식 (3)과 같이 근사적으로 계산될 수 있다.

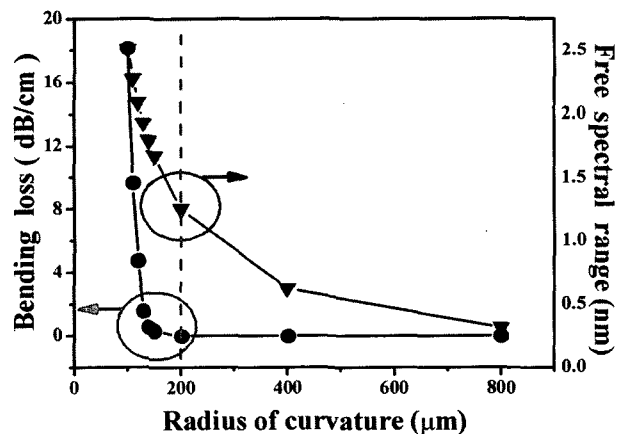


그림 6. 링 반경에 따른 벤딩손실과 공진기의 FSR.

$$R(u) = \sigma_{ms}^2 \exp\left(-\frac{|u|}{L_c}\right) \quad (2)$$

$$\alpha_{scat} = 10 \log e^{-\alpha_s z} \text{ [dB/cm]} \quad (3)$$

where

$$\alpha_s = \frac{\sigma_{ms}^2}{\sqrt{2} k_0 d^4 n_1} g(V) f_e(x, \gamma) \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

$$g(V) = \frac{U^2 V^2}{1+W}; f_e(x, \gamma) = \frac{x \{ [(1+x^2)^2 + 2x^2 \gamma^2]^{1/2} + 1 - x^2 \}^{1/2}}{[(1+x^2)^2 + 2x^2 \gamma^2]^{1/2}}$$

$$x = W \frac{L_c}{d}; \gamma = \frac{n_2 V}{n_1 W \sqrt{\Delta}}; \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

$$U = d \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}; W = d \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}; V = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

산란손실계수 계산 과정을 살펴보면 다음과 같다. 실험적으로 얻어지는 도파로의 측면 거칠기 함수로부터 표준편차 $\sigma_{rms} = \sqrt{R(0)}$ 를 계산한다. 그리고 Autogressive 방법을 이용하여 측면 거칠기로부터 자기상관 함수를 구하고, 이것을 지수함수 형태의 자기상관 함수로 가정하여 상관길이(correlation length) L_c 를 구한다. 따라서 도파로 구조에 의해 결정되는 함수 $g(V)$ 와 측면 거칠기에 의해 결정되는 함수 $f_e(x, \gamma)$ 를 얻음으로써 결과적으로 식 (3)으로부터 산란손실계수를 구하게 된다. 일반적으로 산란손실은 도파로 폭이 크고 측면 거칠기의 표준편차가 작을수록 작다. 특히, 이 손실은 도파로의 코어와 클래딩 간의 굴절률 제곱의 차이 ($n_{co}^2 - n_{cl}^2$)에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 링 공진기의 경우에 FSR을 크게 하기 위하여 링 반경을 줄이게 되면 벤딩손실을 줄이기 위하여 굴절률 차이를 크게 해야 한다. 그러나 이렇게 되면 산란손실이 증가하는 등의 문제가 발생될 수 있다.

그림 7은 서로 다른 링 도파로 전파손실 α_{prop} [dB/cm]에

대하여 광파워 결합계수에 따른 공진기의 Q값과 FWHM을 계산한 결과를 보여주고 있다. 예상대로 전파손실이 커짐에 따라 Q값이 감소하고, FWHM이 증가한다. 또한, 결합계수가 커짐에 따라서 Q값이 감소한다. 이 결과로부터 높은 Q값을 얻기 위해서는 작은 결합계수에 대해 전파손실이 작아야 함을 알 수 있다. 특히, 앞에서 언급된 바와 같이 광파워 결합계수가 5.7%일 경우에 전파손실에 따른 Q값을 살펴보면 다음과 같다. 즉, 전파손실이 0 dB/cm, 5 dB/cm, 10 dB/cm 경우에 대한 Q값은 각각 60000, 20000, 10000이고, 해당 FWHM은 각각 0.02 nm, 0.06 nm, 0.1 nm이다.

본 논문에서는 도파로 패턴의 측면 거칠기를 개선하여 산란손실을 줄이고 링과 버스 도파로 간의 간격을 효과적으로 줄여서 광파워 결합을 향상시킬 목적으로 smoothing buffer layer를 갖는 임프린트용 스탬프를 제안하였다. 그림 8에는 제안된 스탬프의 구조가 도시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 식각공정에 의해 제작되는 스탬프 상의 도파로의 측면 거칠기가 비교적 큰 경우에, 표면 특성 및 step coverage가 매우 우수한 실리콘 나이트라이드(SiN)로 이루어진 박막을 코팅하여 평탄화 buffer층으로 활용함으로써 전체적으로 도파로의 측면거칠기가 smoothing layer의 표면 거칠기와 거의 동일해지는 효과를 얻을 수 있었다. 또한, smoothing layer를 사용함으로써 링과 버스 간의 간격도 G_{mask} 에서 $G = G_{mask} - 2t_s$ 로 감소하게 되었고, 한편 도파로의 폭은 W_{mask} 에서 $W = W_{mask} + 2t_s$ 로 커지게 되었다. 여기서 t_s 는 smoothing layer의 두께이다. 표 1에는 본 논문에서 설계한 공진기 소자의 구조 파라미터가 요약 정리되어 있다.

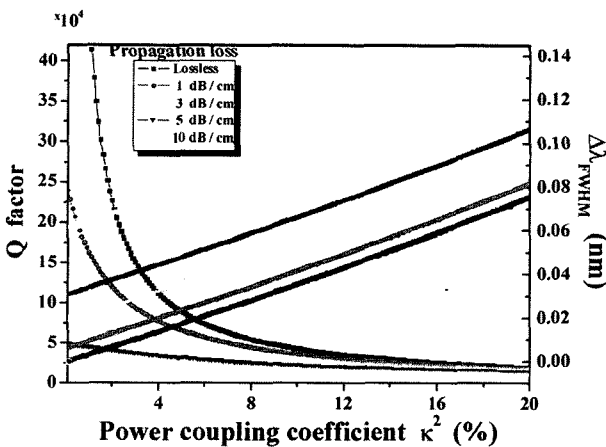


그림 7. 광파워 결합에 따른 소자의 Q값 및 FWHM.

III. 소자 제작 및 측정 결과

폴리머 링 광공진기의 제작공정이 그림 9에 도시되어 있다. 먼저 그림 9(a)에는 임프린트용 스탬프의 제작공정이 도시되어 있다. Quartz glass 기판에 Cr박막을 형성하고 그 위

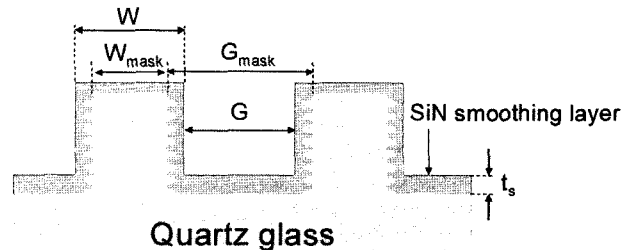


그림 8. Smoothing buffer layer를 갖는 임프린트용 스탬프.

표 1. 제안된 폴리머 링 광공진기의 설계 파라미터

	R	W_{mask}	M_{mask}	t_s	W	G	L
Type 1	100 μm	3.0 μm	1 μm	0.4 μm	3.8 μm	0.2 μm	100 μm
Type 2	200 μm	3.0 μm	1 μm	0.4 μm	3.8 μm	0.2 μm	40 μm

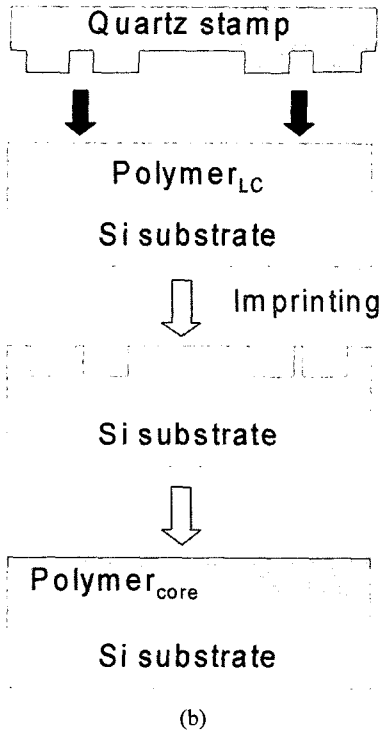
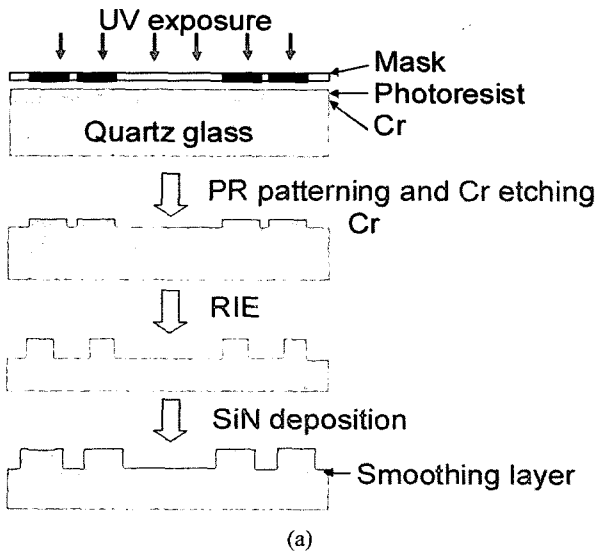


그림 9. 소자 제작 공정, (a) 스탬프, (b) 임프린트를 이용한 소자 제작.

에 포토레지스트(photoresist)를 스핀코팅 한다. 소자의 마스크를 정렬하고 자외선을 조사하는 lithography 공정을 통하여 Cr박막에 패턴을 형성한다. 그리고 RIE공정을 이용하여 기판을 선택적으로 식각함으로써 소자 패턴을 형성한다. 다음으로 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)를 이용하여 smoothing buffer layer로서 SiN박막을 형성한다. 이 smoothing layer의 두께는 약 0.4 μm 이고, 따라서 링 도파로와 버스 도파로 간의 간격 G는 1.0 μm 에서 0.2 μm 로 줄어들

게 된다. 그리고 도파로 폭은 3.0 μm 에서 3.8 μm 로 증가하였다. 다음으로 그림 9(b)에는 스탬프를 이용한 소자 제작공정이 나타나 있다. 먼저 실리콘 기판 위에 스핀코팅된 하부 클래딩용 자외선 경화 폴리머 위에 스탬프를 눌러 도파로 패턴을 임프린트한다. 그리고 적절한 두께의 폴리머를 스핀 코팅하여 코어층을 형성한다. 마지막으로 광결합을 위하여 기판의 양쪽 단면을 절단(cleaving) 하여 소자를 완성한다. 그림 10은 제작된 폴리머 링 공진기 도파로 패턴 및 단면 모습을 보여주고 있다.

먼저 그림 11에서는 임프린트용 스탬프의 smoothing layer 증착상태와 측면 거칠기 정도를 SEM(scanning electron microscope) 이미지로 확인하였다. SiN박막이 안정되게 스탬프에 증착되었고, smoothing layer가 증착되기 전의 스탬프에 비하여 측면 거칠기가 획기적으로 완화되었음을 알 수 있다. 또한 제작된 광 링공진기의 산란손실을 알아보기 위하여 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 임프린트용 스탬프 상의 패턴의 측면 거칠기 대신에 표면 거칠기를 측정하였다. 왜냐하면 실제적으로 도파로의 두께가 수 μm 정도로 작은 경우에 링 도파로의 측면 거칠기를 직접적으로 측정하는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 그렇지만, LPCVD로 형성된 실리콘 나이트라이드 박막은 step coverage가 매우 우수한 표면 평탄화 특성이 우수하기 때문에 smoothing layer를 사용한 경우에는 표면 거칠기가 도파로의 측면 거칠기와 거의 동

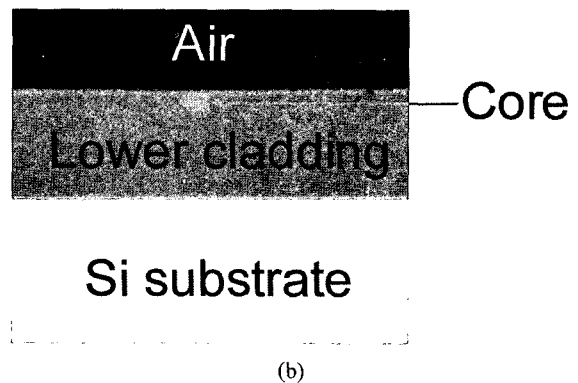
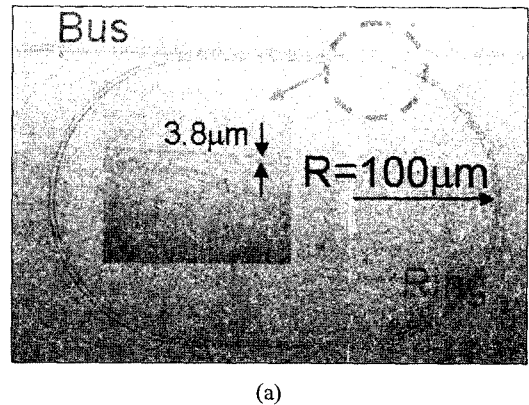
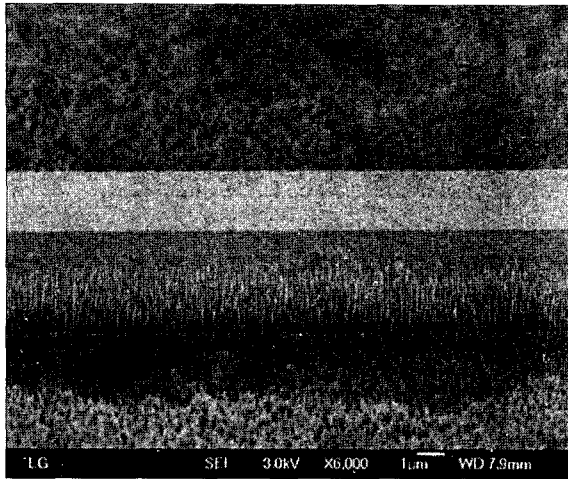
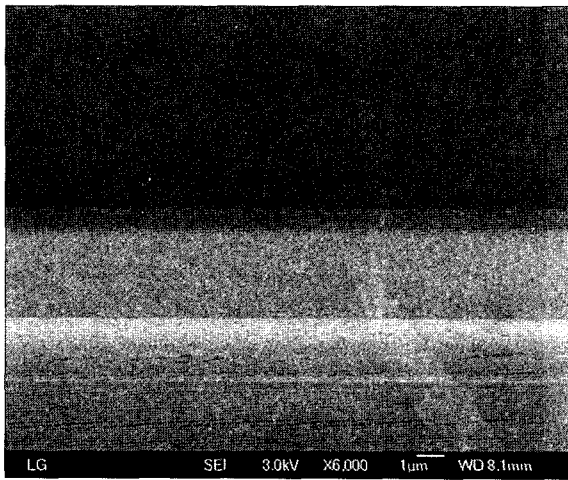


그림 10. 제작된 링 광공진기, (a) 도파로 패턴, (b) 도파로 단면.



(a)



(b)

그림 11. SiN박막 증착 전 후의 스탬프 SEM 이미지, (a) 증착 전, (b) 증착 후.

일하다고 가정할 수 있을 것으로 사료된다.^[10] 그림 12에는 측정된 거칠기 결과가 도시되어 있는데, 이 거칠기 함수의 표준편차 σ_{rms} 값은 2.2 nm이고 상관길이 L_c 는 40 nm였다. 이로부터 얻어지는 산란손실은 거의 ~0 dB/cm로 매우 작음을 확인하였다.

제작된 소자의 전달 특성을 측정하기 위하여 파장가변 광원과 편광기 그리고 광파워미터를 이용하였고 TE모드에서의 측정결과를 그림 13, 14에 도시하고 있다. TM모드의 경우에는 전달 특성중 중심 파장만이 0.26 nm 이동하였음을 알 수 있었다. 이는 각 모드에서의 유효굴절률 차이에 의해 기인한다. 링 도파로의 반경이 100 μm 이고 결합영역 길이가 100 μm 인 소자에 대한 측정된 특성이 그림 13에 도시되어 있다. FSR은 예상대로 1.86 nm였으며, 대역저지 소멸비는 ~13 dB로 링과 버스 간의 광파워 결합이 임계결합 조건에 근접함을 알 수 있었다. 또한 FWHM은 0.102 nm이고 Q값은 15200이었다. 다

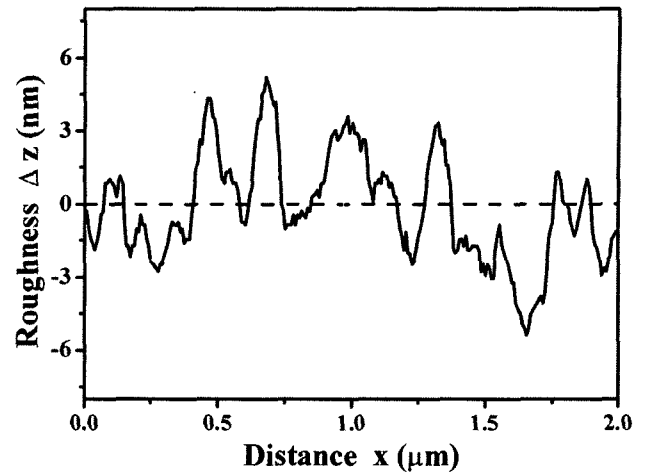


그림 12. 스탬프 상의 smoothing buffer layer의 표면 거칠기 측정 결과.

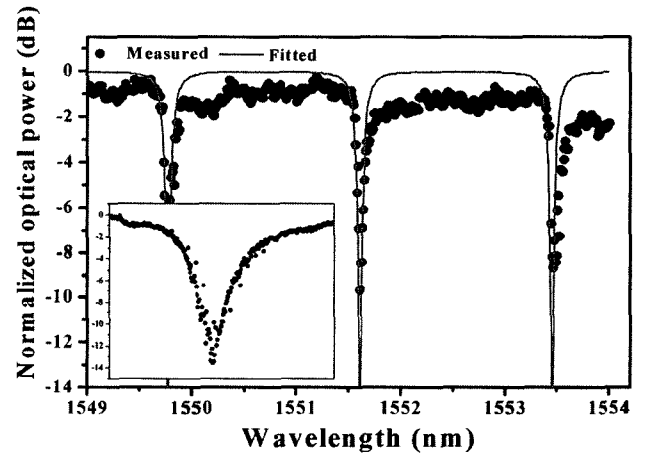


그림 13. 링 반경 100 μm 를 갖는 소자의 전달특성 측정결과.

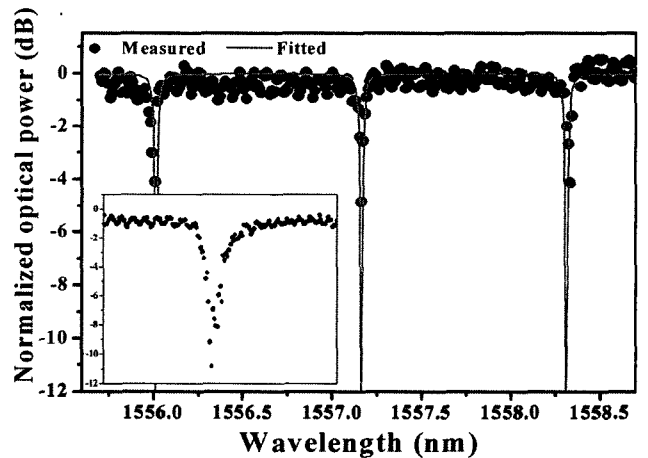


그림 14. 링 반경 200 μm 를 갖는 소자의 전달특성 측정결과.

음으로 그림 14는 링 도파로의 반경이 200 μm 이고 결합영역 길이가 40 μm 인 소자의 특성 측정 결과를 보여준다. 이 경

우에 FSR은 1.16 nm, 대역저지 소멸비는 10 dB, FWHM은 0.015 nm, Q값은 ~103800이었다. 이 결과로부터 링 도파로의 반경이 200 μm 인 소자의 Q값이 반경이 100 μm 인 소자에 비해 7배 정도 향상되었음을 알 수 있다. 이것은 이론적인 계산결과로부터 예측할 수 있듯이 링 반경이 100 μm 인 경우의 벤딩손실이 200 μm 인 경우에 비해 훨씬 크기 때문이다.

그림 12과 13에는 전달매트릭스 방법을 이용하여 fitting한 소자의 전달특성도 함께 도시되어 있다. 이 fitting된 이론적 전달특성으로부터 얻어지는 링 도파로의 전파손실과 링과 버스 간의 결합계수(k)는 다음과 같다.^[11] 즉, 링 반경이 100 μm 인 소자의 경우에는 전파손실이 $\alpha_{\text{prop}}=10.6$ dB/cm이고 광파워 결합은 13.3%였다. 그리고 링 반경이 200 μm 인 경우에는 전파손실이 $\alpha_{\text{prop}}=1.1$ dB/cm이고 광파워 결합은 5.1%였다. 앞서 측정된 측면 거칠기로부터 얻은 산란손실을 적용하고 물질손실은 매우 작아 무시할 수 있다고 가정할 경우, 링 공진기의 반경 100 μm 와 200 μm 에 대해 벤딩손실이 각각 ~10 dB/cm, ~1 dB/cm임을 확인할 수 있었다. 이 결과는 앞에서 이론적으로 계산했던 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 나노임프린트 기술을 이용한 폴리머 링 광공진기를 설계하고 구현하였다. 특히, 우수한 박막 특성을 갖는 실리콘 나이트라이드 smoothing buffer layer를 갖는 임프린트용 스탬프를 도입하여 소자의 도파로 패턴을 형성함으로써 도파로의 측면 거칠기를 개선하여 Q값을 향상시켰다. 얻어진 소자의 성능을 살펴보면, 1550 nm 파장 대역에서 Q값은 ~103800, 소멸비는 11 dB, free spectral range는 1.16 nm였다.

감사의 글

본 연구는 교육부 학술진흥재단의 지원(과제번호 R08-2004-000-10321-0)과 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환인 나노 메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

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. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 11, pp. 1968-1975, 2002.
- [3] J. K. S. Poon, Y. Huang, G. T. Paloczi, and A. Yariv, "Soft lithography replica molding of critically coupled polymer microring resonators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 11, pp. 2496-2498, 2004.
- [4] C. Chao and L. J. Guo, "Polymer microring resonators fabricated by nanoimprint technique," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 20, no. 6, pp. 2862-2866, 2002.
- [5] S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, S. H. Lee, J. D. Park, and P. W. Yoon, "Fabrication of subwavelength aluminum wire grating using nanoimprint lithography and reactive ion etching," *Microelectron. Eng.*, vol. 78-79, pp. 314-318, 2005.
- [6] A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 321-322, 2000.
- [7] D. Marcuse, "Bending losses of the asymmetric slab waveguide," *Bell System Technical J.*, vol. 50, no. 8, pp. 2551-2563, 1971.
- [8] F. Ladouceur, J. D. Love, and T. J. Senden, "Effect of side wall roughness in buried channel waveguides," *IEE Proc. J. Optoelectron.*, vol. 141, no. 4, pp. 242-248, 1994.
- [9] J. Lacey and F. Payne, "Radiation loss from planar waveguides with random wall imperfections," *IEE Proc.*, vol. 137, pt. J., no. 4, pp. 282-288, 1990.
- [10] K. K. Lee, D. R. Lim, and L. C. Kimerling, "Fabrication of ultralow-loss Si/SiO₂ waveguides by roughness reduction," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 23, pp. 1888-1890, 2001.
- [11] T. Ito and Y. Kokubun, "Nondestructive measurement of propagation loss and coupling efficiency in microring resonator filters using filter response," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 3, pp. 1002-1005, 2004.

Polymer Optical Microring Resonator Using Nanoimprint Technique

Do-Hwan Kim[†], Jung-Gyu Im and Sang-Shin Lee

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

[†]*E-mail: s_huski@kw.ac.kr*

Seh-Won Ahn and Ki-Dong Lee

Devices and Materials Lab., LG Electronics Institute of Technology 16 Woomyeon-Dong, Seocho-Gu, Seoul 137-724, Korea

(Received June 10, 2005, Revised manuscript July 19, 2005)

A polymer optical microring resonator, which is laterally coupled to a straight bus waveguide, has been proposed and demonstrated using a nanoimprint technique. The propagation loss of the ring waveguide and the optical power coupling between the ring and bus waveguides was calculated by using a beam propagation method, then the dependence of the device performance on them was investigated using a transfer matrix method. We have especially introduced an imprint stamp incorporating a smoothing buffer layer made of a silicon nitride thin film. This layer played an efficient role in improving the sidewall roughness of the waveguide pattern engraved on the stamp and thus reducing the scattering loss. As a result the overall Q factor of the resonator was greatly increased. Also it reduced the gap between the ring and bus waveguides effectively to enhance the coupling between them, without relying on the direct writing method based on an e-beam writer. As for the achieved device performance at the wavelength of 1550 nm, the quality factor, the extinction ratio, and the free spectral range were ~103800, ~11 dB, and 1.16 nm, respectively.

OCIS Codes : 230.5750, 290.5880, 250.5460.