

나노임프린트 방법을 이용한 폴리머 광도파로 열 격자

임정규 · 이상신[†]

광운대학교 전자공학과

⑧ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

이기동

LG 전자기술원 소자재료연구소

⑧ 137-724 서울특별시 서초구 우면동 16

(2006년 5월 3일 받음, 2006년 8월 8일 수정본 받음)

본 논문에서는 폴리머 광도파로 열 격자(arrayed waveguide grating: AWG)를 나노임프린트 방법을 이용하여 제안하고 구현하였다. 빔전파방법을 도입하여 소자를 설계하고 해석하였다. 균일한 접착 및 분리 특성을 갖는 임프린트용 PDMS(polydimethylsiloxane) 스템프(stamp)를 쿼츠 글래스 물질로 만들어진 마스터 몰드를 이용하여 개발하였다. 이 PDMS 스템프로 폴리머층을 눌러서 소자 패턴을 형성하고 폴리머를 스판코팅하여 소자를 완성하였다. 이러한 소자는 식각공정 없이 간단한 스판코팅과 임프린트 공정만으로 만들 어지기 때문에 대량 생산에 적합할 것이다. 제작된 폴리머 AWG 소자의 출력 채널 수는 8개, 채널 간격은 0.8nm, 각 채널의 중심 파장은 1543.7nm ~ 1548.3nm 였다. 평균적인 채널 누화와 대역폭은 각각 ~10dB와 0.8nm였다.

주제어 : Polymer, demultiplexer, Nanoimprint, Arrayed waveguide grating.

I. 서 론

최근에 음성-데이터 통합, 통신-방송 융합, 홈 네트워크 활성화 등으로 대변되는 초고속 대용량 정보를 언제 어디서나 주고 받을 수 있는 유비쿼터스(Ubiquitous) 정보통신 시대가 도래하고 있다. 이러한 유비쿼터스 통신 시대의 핵심 인프라 기술은 각 가정까지 100Mbps ~ 수 Gbps 속도로 데이터를 효과적으로 전송을 가능하게 하는 광가입자 망 (Fiber-to-the-home: FTTH) 기술이다. 이 FTTH의 구현 방법 중에서 WDM-PON(wavelength division multiplexed passive optical network) 방식이 전송 프로토콜에 대한 무의존성, 전송 속도 무제한, 우수한 서비스 품질 및 보안 등의 장점으로 인하여 집 중적으로 연구되어 오고 있다^[1]. 광파장 역다중화기는 WDM-PON 시스템과 장거리 WDM 광통신 시스템 등을 구성하는 핵심 요소 중의 하나이다. 지금까지 광파장 역다중화기는 주로 PLC (planar lightwave circuit) 형태의 광도파로 열 격자 (arrayed waveguide grating: AWG) 구조로 구현되었다^[2].

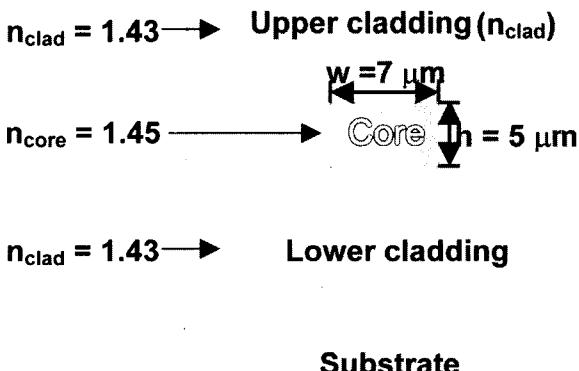
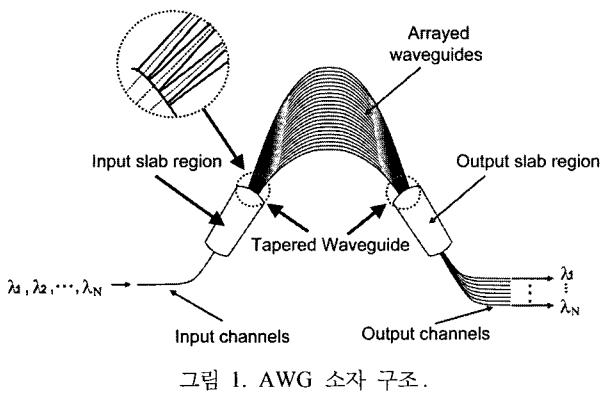
기존의 AWG 소자는 전식 식각공정 기반의 실리카 도파로를 이용하여 주로 구현되었는데, 이러한 소자는 공정이 복잡하여 가격이 비싸고 대량생산이 어려운 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로서 나노 스케일의 초미세 구조물을 경제적이고 효과적으로 제작할 수 있는 나노임프린트 기술이 최근에 주목을 받고 있다^[3]. 그 이유는 이 방법을 통하여 나노 스케일의 구조물을 각인된 스템프를 이

용하여 식각 공정 없이 폴리머 층에 패턴을 반복적으로 용이하게 형성할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 이 기술은 광소자, 반도체, 디스플레이 등의 여러 분야에 활발하게 응용되어 왔다^[4,5]. 본 논문에서는 나노임프린트 방법을 이용한 폴리머 AWG 소자를 제안하고 구현하였다. 이 소자 경우에 슬랩 도파로와 도파로 배열 간의 저손실 연결을 위해 사용되는 테이퍼 구조 부분 등에서는 나노 스케일의 정밀도가 요구된다. 제안된 나노임프린트 방법은 기존의 방법과는 달리 식각공정 없이 간단한 스판코팅과 임프린트 공정만으로 소자를 제작할 수 있기 때문에 대량생산에 매우 유리하다. 제안된 소자는 빔전파방법을 도입하여 설계하고 해석하였으며, 쿼츠 글래스로 만들어진 마스터 몰드로부터 임프린트용 PDMS 스템프를 제작하여 소자 패턴 형성시 정교하고 균일한 접촉이 가능하며 폴리머층과의 분리가 용이하도록 하였다. 본 논문 구성을 살펴보면, 먼저 제안된 소자의 동작원리 및 설계과정에 대하여 논하고, 소자의 제작 및 특성의 측정을 고찰하고 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 제안된 AWG 소자의 동작원리 및 설계

광파장 역다중화기로서의 AWG는 서로 다른 여러 파장(λ)의 광신호를 파장에 따라 분리하는 기능을 갖는 일종의 필터이다. 그럼 1에는 본 논문에서 제안된 AWG 소자의 구조가 도시되어 있다. 한 개의 입력 도파로, 다채널의 출력 도파로, 자유전파영역인 두 개의 슬랩 도파로, 그리고 슬랩 도파로를 연결하는 도파로 배열(arrayed waveguides)로 이루어져 있다.

[†]E-mail: sslee@daisy.kw.ac.kr



여기서 슬랩 도파로와 도파로 배열은 각각 렌즈와 격자의 역할을 한다. 도파로 배열의 인접한 두 도파로 간에는 일정한 경로차이(ΔL)가 존재한다. 그림 2에는 AWG 소자의 단면구조를 도시되어 있다. 기본적으로 하부클래딩, 코어, 상부클래딩 등의 3개의 폴리머 층으로 구성된 단일모드 립(rib) 도파로 구조를 갖는다. 립 도파로를 구성하는 코어와 클래딩 층의 굴절률은 각각 $n_{core}=1.45$ 와 $n_{clad}=1.43$ 이고, 해당하는 굴절률 차이는 1.3%이다. 도파로의 폭 $w=7\text{mm}$, 립 높이 $h=5\text{mm}$ 이다.

제안된 소자의 동작원리를 살펴보면 다음과 같다. 입력 도파로로 입사된 광은 입력단 슬랩 도파로에서 분산되어 도파로 배열로 입력된다. 인접한 도파로 간에 일정한 경로차이를 갖는 도파로 배열을 통해 전파된 각 모드들은 출력단 슬랩 도파로 영역을 통과한 후, 출력 채널 도파로들이 존재하는 특정한 지점인 초점에서 보강 간섭을 일으키게 된다. 이 초점의 위치는 도파로 배열 내에서 $\Delta L/\lambda$ 에 비례하는 위상차이에 의해 결정되므로 이로 인하여 광의 파장 λ 에 의존한다. 결과적으로 출력 도파로를 적절한 위치에 배치함으로써 입력 신호의 광파장에 따라 서로 다른 채널 도파로로 출력되도록 할 수 있다. 결과적으로 제안된 소자는 광파장에 따라 신호를 분리할 수 있는 광파장 역다중화기의 기능을 갖게 된다.

표 1. 제안된 AWG 소자의 사양

중심 파장	1543.7nm~1548.3nm
채널 간격	0.8nm
출력 채널 수	8

표 2. 제안된 AWG 소자의 설계된 구조 변수

광도파로 열의 도파로 개수	100
도파로 열의 인접한 도파로 간의 경로차 ΔL	$89\mu\text{m}$
도파로 격자의 최소 길이	$13\mu\text{m}$
슬랩 도파로의 초점거리	$7189\mu\text{m}$
코어와 클래딩의 굴절률 차 ($n_{core}=1.45$, $n_{clad}=1.43$)	1.3%
단일모드 도파로 폭	$7\mu\text{m}$

본 논문에서 구현하고자 하는 AWG 소자의 사양이 표 1에 주어져 있다. 중심 파장은 1543.7nm~1548.3nm, 출력 채널 간의 간격은 0.8nm (100 GHz), 출력 채널 수는 8개이다. 주어진 사양을 만족하는 소자를 설계하기 위하여 네덜란드 C2V사의 상용화된 빔전파방법 시뮬레이션 툴인 Olympios를 사용하였다. AWG 소자는 진행 방향으로 구조의 변화가 매우 크기 때문에 기존의 빔전파방법으로 전체 구조를 해석하는 것이 불가능하다. 이러한 문제점을 고려하여 입력단과 출력단의 광의 진행 상황을 각 부분별로 구분하여 해석하는 방법을 사용하였는데, 구체적인 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 도파로에 입사된 광이 첫 번째 슬랩 도파로를 진행한 후, 가우시안 광파워 분포를 가지면서 도파로 배열에 도달된다. 이 때, 도파로 배열을 구성하는 도파로를 슬랩 도파로에 자연스럽게 연결해 주기 위해 도입된 테이퍼 영역을 통하여 광파워의 손실이 없이 각각의 도파로에 입력되도록 하였다. 각 도파로를 진행하는 광신호는 광파워의 손실없이 도파로의 길이에 의해 주어지는 위상 변화만을 겪은 후 두 번째 슬랩도파로에 입력된다. 두 번째 슬랩 도파로의 출력단에 연결된 채널 도파로들의 출력 광파워를 시뮬레이션 툴을 이용하여 얻었다.

위의 설계과정을 통하여 얻어진 AWG 소자의 구조 변수가 표 2에 정리되어 있다. 먼저 도파로 배열 부분의 구조를 살펴보면, 도파로 개수는 100개, 인접한 도파로 간의 경로차이는 $89\mu\text{m}$, 최소 도파로 길이는 13mm 로 설계되었다. 여기서 도파로 배열의 도파로 개수가 증가함에 따라 출력단의 누화 및 대역통과 특성이 향상된다. 그리고 슬랩 도파로의 초점거리는 $7189\mu\text{m}$ 이다. 특히, 슬랩 도파로와 도파로 배열 사이의 경계에서 인접한 두 도파로 간의 간격이 넓으면 슬랩 도파로에서 도파로 배열로 전달되는 파워가 손실되기 때문에 각각의 도파로들이 슬랩 도파로와 만나는 부분을 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 길이의 테이퍼 구조로 만들었다. 이 테이퍼 구조의 도입을 통하여 광파워 전달효율이 20% 정도 개선될 것으로 예상된다.

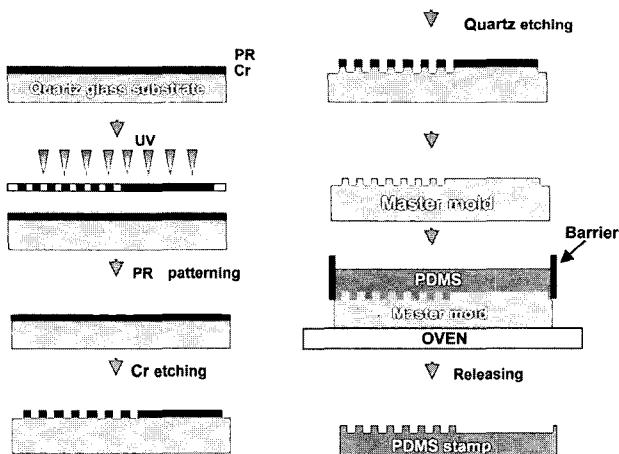


그림 3. 임프린트용 PDMS 스템프 제작 공정.

▼

III. 소자 제작 및 측정 결과

나노임프린트 방법으로 제안된 폴리머 소자를 제작 과정은 소자 패턴이 각인된 스템프를 준비하여 이를 도포된 폴리머 층에 눌러서 패턴을 전사하고, 그 위에 폴리머를 스핀코팅하여 완성한다. 제안된 폴리머 AWG 소자의 입·출력단에는 단일모드 도파로에 비해 면적이 훨씬 큰 슬랩 도파로가 존재한다. 기존의 나노임프린트 방법^[5,6]의 경우처럼 도포된 폴리머 층에 스템프를 눌러서 하부클래딩에 패턴을 전사하고 폴리머를 스핀코팅하여 코어를 형성할 경우, 슬랩 도파로 영역의 코어 두께가 예상보다 너무 얕아지는 문제가 발생하게 된다. 슬랩도파로의 두께가 얕아지면 광손실이 급격하게 증가하는 문제가 유발되는데, 본 연구에서 마스터 퀼츠 몰드를 이용하여 기존의 나노임프린트 방법으로 소자를 제작함으로서 이러한 문제점을 직접 확인하였다. 본 논문에서는 이 문제점을 극복하기 위하여 마스터 퀼츠 몰드를 먼저 준비하고, 이 마스터 몰드 상의 도파로 패턴의 톤(tone)이 반전되어 형성된 PDMS 스템프를 도입하여 소자를 제작하였다. PDMS 물질은 광투과 특성이 우수하며, 고분자 재료에 대해 낮은 반응성과 계면 에너지를 갖고 있고 탄성이 좋아서 불균일한 표면에서도 균일한 접촉을 얻을 수 있고, 패턴의 왜곡없이 분리가 가능한 장점을 지니고 있다^[8].

그림 3에는 임프린트용 PDMS 스템프 제작 공정이 도시되어 있다. 마스터 퀼츠 몰드 제작을 위하여 퀼츠 글래스 기판 위에 200nm 두께의 크롬(Cr) 박막을 형성한다. 그 위에 포토레지스트(photoresist: PR)를 스핀 코팅 한 후, 마스크를 정렬하고 자외선을 조사함으로써 패턴을 형성한다. 그리고 RIE(reactive ion etching) 공정을 이용하여 크롬 박막을 선택적으로 식각한 후에 다시 퀼츠 기판을 5μm 깊이로 식각함으로써 소자 패턴을 형성하고 크롬을 제거하여 마스터 몰드를 완성한다. 다음으로 실제 PDMS 스템프를 제작하기 위해서 다음과 같은 단계를 거친다.

표 3. 제작된 AWG 소자의 특성 측정 결과

중심 파장	1543.7nm ~ 1548.3nm
채널 간격	0.8nm
출력 채널 수	8
채널간의 간격	250μm
3 dB 통과 대역폭	~0.8nm
평균 채널 누화	~10 dB
코어의 잔여층 두께	4μm
제작된 소자의 크기	32mm×27mm

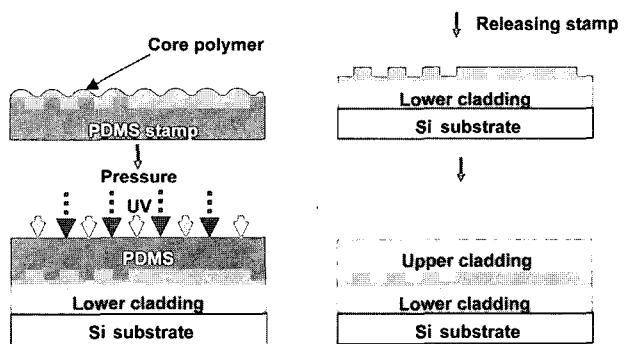


그림 4. PDMS 스템프를 이용한 AWG 제작 공정.

10:1의 비율로 혼합한 용액을 준비한다. 마스터 몰드 모서리에 베리어(barrier)를 형성하고 PDMS 용액을 붓는다. 50°C의 오븐에서 3시간 동안 가열하여 경화시킨 후, 분리시킴으로써 임프린트용 PDMS 스템프가 완성된다. 다음으로 이 PDMS 스템프를 이용한 소자의 제작 공정이 그림 4에 도시되어 있다. 실리콘 기판 위에 Chemoptics사의 자외선 경화용 폴리머인 ZPU12-430($n_{clad}=1.43$)을 스핀 코팅(800 rpm, 30초)하고 질소 분위기에서 경화하여 10μm 두께의 하부클래딩을 형성하였다. 코어와 클래딩 간의 접착력을 증가시키기 위하여 산소를 이용한 애싱(ashing)공정(압력: 30 mTorr, 전력: 50 mW)을 실시하였다. 코어 형성을 위하여 PDMS 스템프 위에 Chemoptics사의 자외선 경화 폴리머인 ZPU12-450 ($n_{core}=1.45$)을 얇게 바른 후, 준비된 실리콘 기판의 하부클래딩 층 위에 올려 놓는다. 스템프에 적절한 압력을 가하면서 질소 분위기 하에서 자외선을 조사하여 코어용 폴리머를 경화시킨 후 스템프를 기판에서 분리함으로써 소자 패턴을 형성한다. 이 때, 코어층의 슬랩 영역의 두께는 스템프를 누르는 압력에 의해 결정된다. 다음으로 ZPU12-430 폴리머를 이용하여 하부클래딩과 유사하게 상부클래딩을 형성하였다. 마지막으로 광결합을 위하여 기판의 양쪽 단면을 절단하였다.

그림 5(a)에는 완성된 폴리머 AWG 소자의 사진이 도시되어 있다. 입력단의 단일도파로와 슬랩도파로 영역, 도파로 배열, 출력단의 슬랩 도파로 영역과 다채널 출력 도파로 등의 구조가 확대되어 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 제

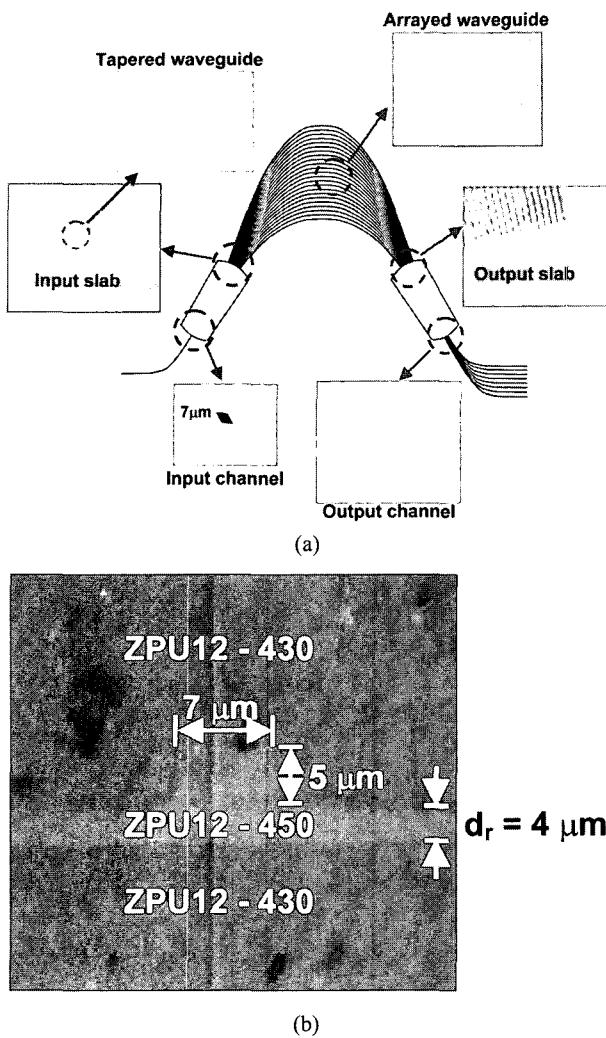


그림 5. 제작된 AWG 소자 사진 (a) 각 부분의 확대된 구조, (b) 단면구조.

안된 PDMS 스템프를 이용하여 구현된 소자의 각 부분의 패턴이 정교하게 재현되었음을 알 수 있다. 소자 전체의 크기는 $32\text{mm} \times 27\text{mm}$ 이다. 그림 5(b)는 제작된 소자의 단면 사진을 보여준다. 도파로 폭은 $7\mu\text{m}$ 이고, 코어 높이는 $5\mu\text{m}$ 이고, 도파로 영역 밖의 코어의 잔여층 두께 $dr=4\mu\text{m}$ 이다.

제작된 소자의 특성을 측정하기 위하여 파장가변 광원으로부터 나오는 광을 편광조절기를 거쳐 단일모드 광섬유를 통하여 소자에 입력시켰다. 그리고 소자의 출력을 광섬유 어레이(array)를 통하여 광스펙트럼 분석기에 입력시켰다. 또한, 소자의 도파 모드 분포를 관찰하기 위하여 적외선 카메라를 이용하였다. 그림 6은 제작된 소자에 넓의 파장 대역폭을 갖는 광신호를 입력하였을 때, 8개의 출력 채널에서 얻어지는 각 도파 모드를 보여준다. 모든 출력 채널이 균일한 단일모드 도파 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 여기서 각 채널 간의 간격은 $250\mu\text{m}$ 이다. 다음으로 TE 편광에 대한 측정된 전달특성이 그림 7에 나타나 있다. 각 채널이 특정 파장대역만

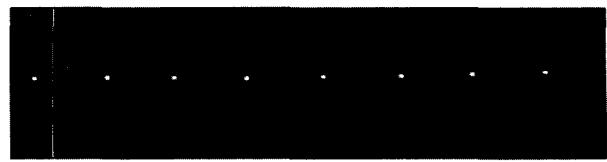


그림 6. 제작된 소자의 출력 채널 모드 분포.

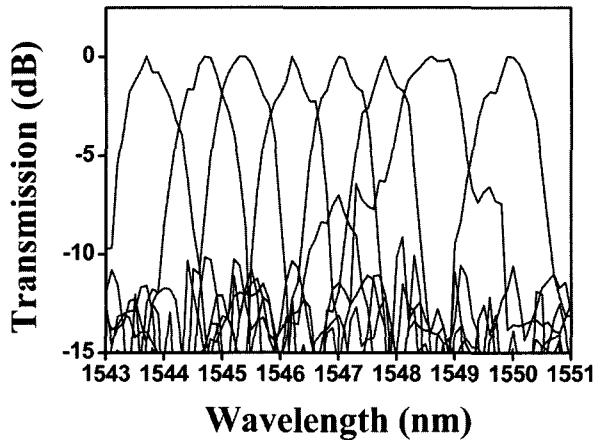


그림 7. AWG 소자의 측정된 전달 특성.

을 선택적으로 통과시키는 필터 특성을 가지며, 채널의 중심파장은 1543.7nm 에서 1549.3nm 까지 0.8nm 간격으로 존재함을 알 수 있다. 출력 채널의 평균적인 3 dB 통과 대역폭은 $\sim 0.8\text{nm}$ 였으며, 평균적인 채널의 누화는 $\sim 10\text{ dB}$ 였다. 그리고 TM 편광에 대해서도 TE 편광과 유사한 결과를 얻었으며, 다만 채널의 중심 파장이 $\sim 0.4\text{nm}$ 정도 이동되어 있었다. 이것은 약 0.0013 정도의 유효굴절률 차이에 해당되는데, 주로 폴리머 물질의 복굴절에 기인한다고 사료된다.

본 논문에서 구현된 AWG 소자는 상대적으로 넓은 대역폭과 불균일한 누화 특성 등의 두 가지 문제점을 지니고 있다. 첫째로, 그림 7에서 알 수 있듯이 얻어진 출력 채널의 대역폭이 0.8nm 로 비교적 크다. 이것은 주로 임프린트 공정상에서 발생되는 코어의 슬랩 영역에서의 잔여층의 두께 dr 에 기인한다. 본 논문에서 얻어진 잔여층의 두께는 약 $4\mu\text{m}$ 였다. dr 가 증가하게 되면 도파로의 유효굴절률이 낮아지고 모드의 구속력(confinement)이 감소하기 때문에 AWG 소자의 투과파장 대역폭이 증가하게 된다. 그림 8은 코어의 잔여층의 두께에 따른 소자의 계산된 출력 특성 변화를 보여준다. 잔여층의 두께가 $4\mu\text{m}$ 에서 $0\mu\text{m}$ 로 감소함에 따라 대역폭이 0.8nm 에서 0.4nm 로 감소함을 알 수 있다. 이러한 슬랩 영역에서의 잔여층 문제를 극복하기 위해서는 열 경화 솔-젤 물질을 이용한 방법^[8] 등을 도입하거나, 코어층을 형성한 후에 추가적인 시각공정을 도입할 수 있을 것으로 사료된다. 둘째로, 불균일한 채널 누화 특성은 주로 도파로를 구성하는 폴리머 층들의 두께가 불균일한 것에서 유발되는 위상 오차에 기인한다고 사료된다. 이 문제는 임프린트 공정을 최적화하여 소자

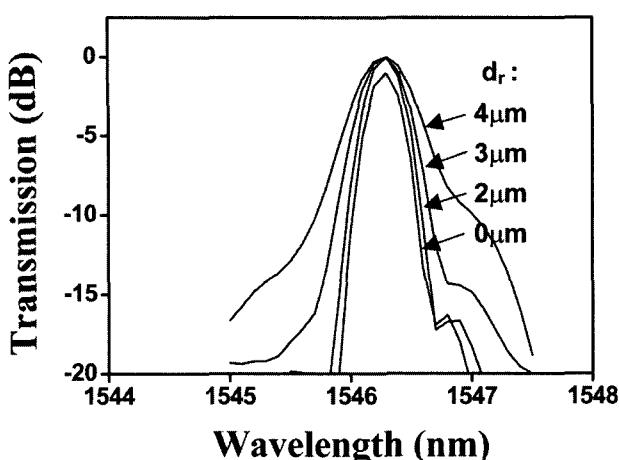


그림 8. 코어의 도파로 영역 밖 슬랩 영역의 잔여총 두께에 따른 출력 특성의 변화.

가 형성되는 전체 면적에 대하여 균일한 폴리머 층이 형성될 수 있도록 해야 할 것이다. 또한, 코어와 클래딩 간의 굽절률 차이를 증가시켜 전체 소자의 크기를 줄임으로써 폴리머층의 두께 균일도를 향상시킬 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 WDM 광통신 시스템 및 FTTH 시스템의 핵심 소자인 저가형의 폴리머 AWG형 광파장 역다중화기를 나노임프린트 방법을 이용하여 구현하였다. 퀼츠 클래스 기판에 마스터 몰드를 만들고 이로부터 PDMS 스템프를 개발하여 소자 패턴을 형성하는데 사용하였다. AWG에 포함된 정교한 패턴을 재현하였으며, 성공적인 광파장 역다중화기 특성을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환인 나노 메카트로닉스 기술 개발사업단의 연구비와 서울시 산학연 협력사업의 나노IP/SoC설계기술혁신 사업단의 지원으로 이루어졌습니다. 한국과학기술원(KAIST) 전자전산학과의 신상영 교수님과 이종환씨의 도움에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. J Park and C. H. Lee, "Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network," *J. Lightwave Technology*, vol. 22, no. 11, pp. 2582-2591, 2004.
- [2] Y. Hibino, "Recent advances in high-density and large-scale AWG multi/demultiplexers with higher index-contrast silica-based PLCs," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 1090-1101, 2002.
- [3] S. Y. Chou, P. R. Karauss and P. J. Renstrom, "Nanoinprint lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 14, no. 16, pp. 4129-4133, 1996.
- [4] S. W. Ahn, K. D. Lee, J. S. Kim, S. H. Kim, S. H. Lee 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, 1996.
- [5] 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.
- [6] Do-Hwan Kim, Won-Jun Chin and Sang-Shin Lee, "Tunable polymeric Bragg grating filter using nanoimprint technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 071120-1~071120-3, 2006.
- [7] J. Poon, Y. Huang, G. 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.
- [8] W. S. Kim, J. H. Lee, S. Y. Shin, Y. C. Kim and B. S. Bae, "Fabrication of ridge waveguides by UV embossing and stamping of sol-gel hybrid materials," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1888-1890, 2004.

**Polymeric Arrayed Waveguide Grating
Based on Nanoimprint Technique Using a PDMS Stamp**

Jung-Gyu Lim, 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*

Ki-Dong Lee

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

(Received May 3, 2006, Revised manuscript August 8, 2006)

A polymeric arrayed waveguide grating (AWG) has been proposed and demonstrated by exploiting the nanoimprint method. A PDMS(polydimethylsiloxane) stamp with device patterns engraved was developed out of a master mold made of quartz glass. The device was fabricated by transferring the pattern in the PDMS stamp to a spin-coated polymer film without using any etching process. The device had 8 output channels, while the center wavelengths of each output channel were positioned from 1543.7 nm to 1548.3 nm with the spacing of 0.8 nm. The achieved average channel crosstalk and the 3-dB bandwidth were about 10 dB and 0.8 nm respectively.

OCIS code : 160.5470, 220.4610, 060.4230, 230.7390.