論文99-36D-6-7

집적형 λ/4 위상 천이 회절격자 필터의 제작성 연구

(On the Fabricability of Planar Integrable Optical Band-pass Filters with Phase-shifted Gratings)

金 相 培 *

(Sang Bae Kim)

요 약

유효 굴절율 전달 매트릭스 방법을 이용하여 위상 천이 회절격자 필터의 구조상의 비이상성의 영향을 살펴봄으로써 이 필터의 제작성을 검토하였다. 계산 결과, 위상 천이 오차나 회절격자 주기의 랜덤 변이는 이들 오차에 따른 공진 파장의 변화가 필터의 투과 대역폭 이내에 있어야 함을 알 수 있었다. ITU 기준에 따른 파장과 대역폭을 기준으로 할 때, 이는 상대 오차가 0.1% 이내여야 함을 의미하며, 이 정도의 허용 오차는 회절격자의 제작에 큰 부담으로 작용한다. 필터 끝면 반사는 투과대역의 ripple을 증가시키므로, ripple을 0.25dB 이하로 줄이려면 반사율이 1% 이하로 되어야 한다. 또, 위상 천이 필터는 다중 반사에 따른 공진 현상을 이용하기 때문에 도파로 손실은 증배되어 나타남을 보였으며 도파로 손실이 1dB/cm로 낮아도 약 0.2dB의 투과 손실이 나타났다. 이 연구 결과는 파장 다중화 방식 협대역 투과 필터를 설계하고 제작하는 데 있어 기본 자료로서 중요한 의미를 가진다.

Abstract

Fabricability of phase-shifted grating filters has been theoretically studied by an effective index transfer matrix method. In the optical band-pass filter with multiple $\lambda/4$ phase-shifts, the phase-shift error and random variation of the grating period should be suppressed such that corresponding resonance frequency lies within the filter pass-band. The tolerance for the relative error is less than 10^{-3}, and is quite stringent in typical filters for WDM applications. End facet reflection produces ripple in the transmission spectra, and the reflectivity should be less than 1% in order to keep the ripple less than 0.25dB. Also, the effect of waveguide absorption loss is enhanced by the resonance in the filter, and the absorption should be limited to 1dB/cm for the signal loss of less than 0.2dB.

I. 서 론

고밀도 파장 다중화 방식의 광통신 기술이 실용화됨에 따라 이 방식을 뒷받침하는 여러 소자들의 필요성이 점차 증대되고 있다.[1] 특히 채널 간격이 좁아짐에 따라 각각의 채널을 분리해 내는 광필터에 요구되는 성능 요건은 더욱 더 엄격해지고 있으며, 이 요건을 만족시키기 위하여 투과 스펙트럼이 사각형에 가까운 이상적인 형태의 투과형 필터들이 반도체 기판[2] 위나 광섬유 안에[3] 만들어진 회절격자를 이용하여 제작되고 있다. 이러한 이상적인 특성에 가까운 회절격자 필터를 만들려면, 여러 개의 위상 천이가 있거나[2] 회절격자를 이루는 굴절율 변화의 형태나 주기에 변화를[3] 주어야 한다. 이 가운데에서 위상 천이를 이용

* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Ajou University)

接受日字:1999年1月18日, 수정완료일:1999年5月20日

한 구조는 굴절율 변화나 주기 변화가 없는 균일 회절 격자에 위상 천이를 첨가하는 구조로, 회절격자 제작이 간편하다는 장점을 가지고 있다.

특히 레이저, 광검출기, 광변조기, 트랜지스터 등 주요 광전소자의 재료가 되는 반도체 기판을 이용한 광 필터는 광전집적회로로의 발전을 고려하면 매우 중요한 의미를 가진다. 특히 위상 천이 회절격자는 λ/4 위상 천이 DFB 레이저에서 널리 사용되고 있는 제작 기술이므로, 이 위상 천이를 이용한 필터는 이 레이저 제작 공정과도 잘 맞는다.

이처럼 반도체 기판을 이용하는 평면 집적형 회절격자 필터는 큰 가능성을 가진다. 이렇게 큰 가능성을 가지는 회절격자 필터에 대하여 실제의 필터 제작 공정에서 나타날 수 있는 공정 오차에 따른 필터 구조의 비이상성이 필터의 특성에 미치는 영향을 조사하는 것은 제작 공정 요건을 설정하고, 이에 따른 비용과 수율을 예측하여 필터의 경제성을 평가하는 데에 있어 중요한 기초가 된다. 그럼에도 불구하고, 이 부분에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 이 연구의 목표는, 바로 이 큰 가능성을 가지는 위상 천이 회절격자 필터의 구조상의 비이상성에 따른 필터 특성의 변화를 살펴봄으로써, 이 필터의 제작 가능성과 경제성을 검토하는 데에 있다. 이를 위하여 회절격자 비이상성의 영향을 쉽게 알아낼 수 있는 계산 방법인 유효 굴절율 전달 매트릭스 방법을[4] 사용한다. 먼저 Ⅱ장에서는 필터의 구조와 동작 특성, 해석 방법에 대하여 기술하고, Ⅲ장에서는 공정상의 비이상성 때문에 발생하는 필터 구조의 비이상성이 필터의 특성에 미치는 영향에 대하여 기술한다. 마지막으로 Ⅳ장에서는 Ⅲ장의 계산 결과를 바탕으로 결론을 맺는다. 이 연구 결과는 필터 제작 공정 요건의 산출과 비용 및 수율 예측을 가능하게 함으로써, 위상 천이 회절격자 필터의 실용성을 평가하는 기초가 될 것이다.

Ⅱ. λ/4 위상 천이 회절격자 필터의 설계 변수와 해석 방법

1. 필터의 구조와 해석 방법

그림 1은 3개의 λ/4 위상 천이(QWS, quarter wavelength shift)가 있는 회절격자 필터의 기본 구조를 보여 준다. 위상 천이의 개수가 많아질수록 필터의 투과 특성이 사각형에 가까워지지만 제작이 어려워지므로 위상 천이의 개수를 3으로 고정하였다. 그것은 3개의 위상 천이만으로도 투과 스펙트럼이 사각형에 가까운 이상적인 투과 필터를 구현할 수 있기 때문이다.[2]

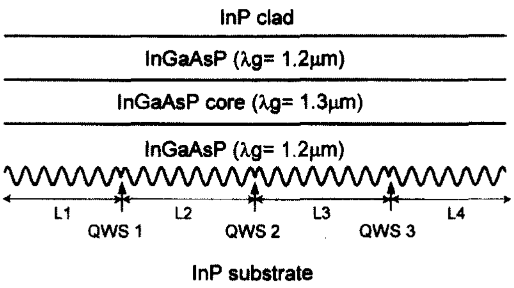


그림 1. λ/4 위상 천이(QWS) 회절격자 필터의 구조. L1 - L4는 각 부분의 길이를 나타낸다

Fig. 1. Schematic structure of the phase-shifted grating filter.

회절 격자의 광학적 특성을 해석하는 데에 주로 사용되는 방법은 coupled mode theory를 직접 또는 매트릭스 형태로 전개하는 방법과 전달 매트릭스 방법이 있다. 가장 흔히 쓰이는 전달 매트릭스 방법은 유효 굴절율 전달 매트릭스 방법이다.[4] 이 방법은, 회절 격자를 축방향으로 잘게 나누어 각 분할에서의 도파로 해석을 통하여 유효 굴절율을 구한 다음에, 회절격자를 앞에서 구한 유효 굴절율의 다층 구조로 보고 다층 구조를 해석하는 매트릭스 방법을 적용한 방법이다.[4] k번째 분할의 오른쪽 끝에서 입사파와 반사파의 전장 a_k, b_k와 k+1번째 분할의 오른쪽 끝에서 입사파와 반사파의 전장 a_{k+1}, b_{k+1}을 관계 지우는 전달 매트릭스는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_k+N_{k+1}}{2N_k} & \frac{N_k-N_{k+1}}{2N_k} \\ \frac{N_k-N_{k+1}}{2N_k} & \frac{N_k+N_{k+1}}{2N_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(jk_0N_{k+1}l_{k+1}) & 0 \\ 0 & \exp(-jk_0N_{k+1}l_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{k+1} \\ b_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 N_k, l_k는 k번째 분할의 복소 굴절율과 길이를 나타내며, 유효 굴절율을 구할 때 각 층의 굴절율은 참고문헌 [5]의 데이터를 사용하였다. 모든 분할에 대하여 이 매트릭스를 구하여 곱하면 전체 필터의 특성을 규정하는 전달 매트릭스가 다음과 같이 구하여진다.

$$\begin{bmatrix} a_{in} \\ b_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{out} \\ b_{out} \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 출력부로부터의 입력 b_{out}을 0으로 두고 얻은 투과율과 반사율은 다음과 같다.

$$T = \left| \frac{a_{out}}{a_{in}} \right|^2 = \left| \frac{1}{H_{11}} \right|^2 \quad (3)$$

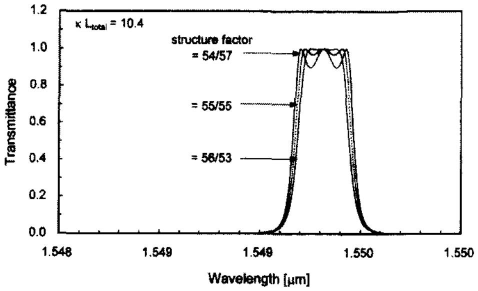
$$R = \left| \frac{b_{in}}{a_{in}} \right|^2 = \left| \frac{H_{21}}{H_{11}} \right|^2 \quad (4)$$

이 전달 매트릭스 방법에서는 필터의 구조와 매트릭스가 직접적으로 대응되므로 주기적인 회절격자는 물론 주기적이지 않은 어떠한 구조의 회절격자라도 쉽게 해석할 수 있어, 회절격자 구조의 비이상성의 영향 등을 해석하는 데에도 매우 유용하다. 또, 회절격자의 높이가 높을 때에도 coupled mode theory 결과보다 정확하다고 알려져 있다. 물론 회절격자의 높이가 낮을 때에는 두 방법으로 구한 해석 결과는 잘 일치한다. 이 연구의 주요 목표가 회절격자 구조의 비이상성이 필터의 특성에 미치는 영향을 조사하는 데에 있으므로, 기본 TE 모드에 대하여 전달 매트릭스 방법을 사용하였다.

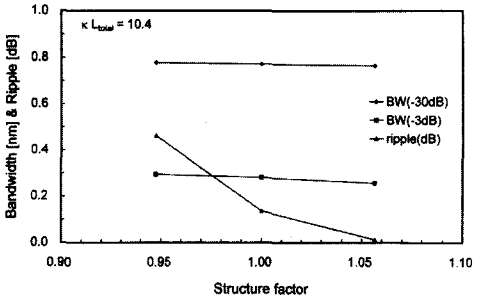
2. 필터의 특성과 설계 변수

이상적인 밴드 투과 필터의 특성은 투과 대역과 그 밖에서의 투과율이 각각 1과 0인 사각형 형태이다. 이에 따라 실제 밴드 투과 필터의 성능은 이 이상적인 특성에 얼마나 가까우냐를 기준으로 판단할 수 있다. 이 절에서는 투과 대역에서 투과율의 최대 값과 최소 값의 비율을 dB로 나타낸 리플, -30dB, -3dB 대역폭과 그 비율로 주어지는 shape factor를 기준으로 필터의 특성을 비교하였다. 여기에서 shape factor가 1에 가까울수록 사각형에 가까운 투과 특성을 보임에 주의할 필요가 있다.

그림 1의 3개의 위상 천이가 있는 회절격자 필터는 기본적으로 3개의 위상 천이 회절격자 필터를 결합시킨 형태이다. 위상 천이가 하나인 회절격자 필터의 투과 특성은 Bragg 파장에서 투과율이 최대로 되며, 입력 파장이 Bragg 파장에서 조금만 벗어나도 투과율이 급격히 낮아지는 반면에 투과 대역의 -30dB 대역폭은 매우 넓어, shape factor가 매우 큰 투과 특성을 보인다. 그러므로, 입력 신호의 파장은 매우 정밀하게 조절하여야 하는 반면에 인접한 채널 사이의 간격은 넓어야 하므로 실용적이지 못한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결한 구조가 바로 그림 1의 위상 천이가 여러 개인 회절격자 필터이다.[2] 이 필터는 위상 천이를 중심으로 양쪽의 회절격자가 거울 역할을 하는 Fabry-Perot 공진기 세 개가 연결되어 있는 형태이다. 따라서 공진기 각각의 공진 주파수가 같더라도, 전체 필터의 공진 주파수는 셋으로 분리된다. 그리고 이 세 공진기 사이의 결합 정도는 공진기 각각의 회절격자 거울 반사율이 결정하여, 반사율이 커질수록 결합 정도는 약하여진다.



(a)



(b)

그림 2. L2 / (L1+L4) = L3 / (L1+L4)으로 정의한 structure factor에 따른 a)투과 특성과 b) -30dB, -3dB 대역폭과 ripple의 변화. 회절격자의 결합 계수 κ와 필터의 길이 L_{total}의 곱 κL_{total} = 10.4로 일정하게 두었다

Fig. 2. Effect of the filter structure factor on a) the transmission spectrum, b) the bandwidth and ripple of the phase-shifted grating filter.

이 필터의 동작 원리를 알아보기 위하여 그림 2에 위상 천이가 3개인 필터의 특성을 보였다. 그림 1에 보인 L2/(L1+L4) = L3/(L1+L4)으로 정의한 structure factor가 커짐에 따라 투과 대역폭과 ripple이 동시에 줄어들고 있다. 여기에서 필터의 총 길이 L_{total} =L1+L2+L3+L4는 약 400μm이며, 회절격자의 결합

계수 κ와 필터 길이의 곱 κL_{total} = 10.4로 일정하게 두었다. 또, 투과 대역의 중심 파장은 ITU 표준의 가장 짧은 파장인 1549.315nm에 맞추었으며, 투과 대역의 -30dB 대역폭은 16 채널 표준에서의 파장 간격 0.81nm보다 약간 작게 하였다. structure factor의 변화에 따른 이러한 변화는 이 필터가 3개의 위상 천이 필터가 결합된 것이라는 사실로부터 쉽게 이해할 수 있다. 먼저 3개의 공진기가 결합됨에 따라 필터의 투과 특성이 3 개의 transmission peak로 분리되었음에 주의한다. structure factor가 커진다는 것은 3 개의 위상 천이 사이의 거리가 넓어져 각각의 필터 사이의 결합이 약해짐을 의미하므로, 3 개의 transmission peak 사이의 간격이 좁아지게 된다. 이에 따라 투과 대역폭과 ripple이 동시에 줄어들어 structure factor가 1.05보다 커지면 대역폭은 계속 줄어들고 리플은 0dB로 수렴한다. 한편, 그림 2 a)의 투과 특성에서 볼 수 있는 것처럼, structure factor가 커지면서 ripple은 줄어들지만 투과대역 양쪽에서 투과율 변화의 급준성은 나빠진다. 즉 필터의 shape factor가 커진다. 그러므로 structure factor는 ripple과 shape factor 사이의 trade-off 관계로부터 결정되어야 하며, 1.05 정도의 값이 적당하다.

structure factor 외에 필터의 주요 설계 변수로는 회절격자의 결합 계수 κ와 필터의 총 길이 L_{total}의 곱 κL_{total}이 있다. 이 값이 커지면 각각의 필터 사이의 결합이 작아져 ripple과 대역폭이 줄어든다.

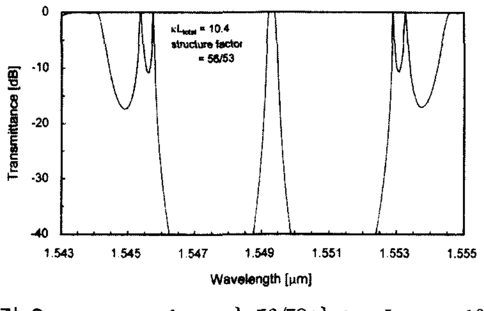


그림 3. structure factor가 56/53이고 κL_{total} = 10.4인 필터의 금지대역 바깥 영역까지를 포함한 투과 특성

Fig. 3. Transmission spectrum of the phase-shifted grating filter over the whole stop and pass bands.

그림 3은 그림 2의 투과 특성을 보다 넓은 파장 영역에서 로그 스케일로 보여주고 있다. 투과 대역에서의 특성 뿐 아니라 투과 대역 밖의 금지대 특성도 필터의 특성으로서 중요하기 때문이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 투과 대역에서의 특성은 매우 우수한 반면, 금지대의 폭이 너무 좁아 수용할 수 있는 채널의 수가 4개 정도로 제한됨을 알 수 있다. 용도에 따라서 다를 수는 있지만, 실제로 사용할 수 있는 신호 파장 영역은 필터의 금지대 폭의 반밖에 안됨에 주의할 필요가 있다. 이 금지대 폭을 넓히려면 회절격자의 결합계수를 크게 하고 필터의 길이를 줄여야 하지만, 그림 1과 같은 구조에서는 결합계수를 키우는 데에 한계가 있다. 그러므로, 이 위상 천이 회절격자 필터에서는 채널 수에 제약이 따른다. 이에 따라 투과 대역의 특성은 그대로 둔 채 금지대 폭만 확장시키는 새로운 필터 구조가 요망된다.

Ⅲ. 구조 변수의 비이상성이 필터 특성에 미치는 영향

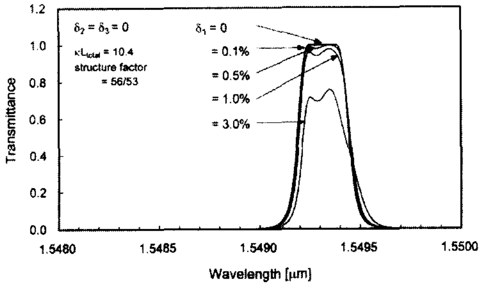
필터의 특성 못지 않게 중요한 것이 필터의 제작성, 즉 제작 공정에서 생긴 구조 변수의 변이가 필터 특성에 미치는 영향의 정도이다. 필터 구조 변수의 변이가 필터 특성에 미치는 영향이 클수록 제작 공정이 정교하여야 하기 때문에 필터의 가격이 높아지고 제작 수율이 감소하게 되므로, 이 제작성은 필터의 경제성을 결정하는 주요 요소가 된다. 이 장에서는 실제의 공정에서 나타날 수 있는 필터 구조 변수의 변이가 필터의 특성에 미치는 영향에 대하여 기술하기로 한다.

그림 1의 이상적인 구조와는 달리 실제의 필터에서는 위상 천이 오차, 필터 양 끝면에서의 반사, 도파로 두께와 넓이 등의 변이, 회절격자 높이, 모양, 길이 등의 변이, 도파로 손실 등 필터 구조 변수의 비이상성이 나타나게 된다. 이 가운데 도파로 구조의 변이는 곧바로 유효 굴절율의 변화로 이어져, 회절 격자의 높이와 주기의 변화와 같은 효과를 나타내므로 별도로 고려하지 않았다. 이에 따라 1절에서는 위상 천이 오차의 영향을, 2절에서는 회절격자 구조의 랜덤 변이의 영향을 다루고 3절에서는 양 끝면 반사의 영향을 다룬 다음에 4절에서는 도파로 손실의 영향에 대하여 기술한다.

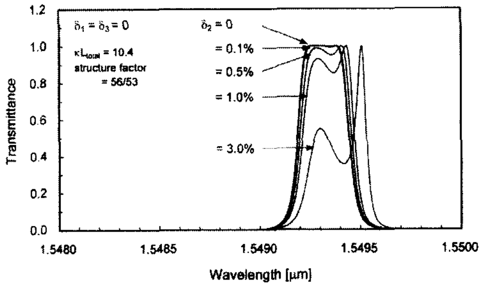
1. 위상 천이 오차의 영향

그림 1의 필터는 3개의 위상 천이 필터가 서로 결

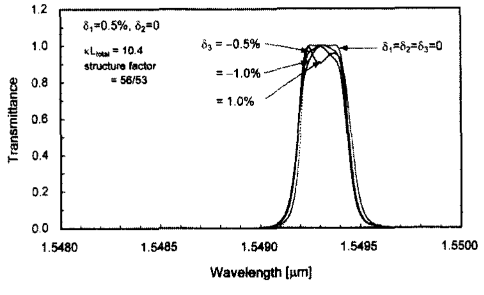
합된 구조이므로 각각의 필터의 특성을 결정하는 주요 요소인 위상 천이는 필터의 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이 위상 천이 오차 δ_1, δ_2, δ_3은 그림 1의 QWS1, 2, 3에 생긴 위상 천이 오차로, 이상적인 위상 천이 값 π보다 상대적으로 몇 % 커졌는지를 나타낸다. 양 끝면의 반사율과 도파로 손실은 0으로 두어 위상 천이 오차의 영향만을 분석할 수 있게 하였다. 이 위상 천이 오차의 원인에는 위상 천이 부근의 도파로 구조 변이, 물질 조성 변이, 회절격자 모양의 변이 등이 있을 수 있다. 특히 그림 1에 보인 것과 같이 위상 천이 부분이 뾰족하게 파인 구조를 실제로 만들기는 매우 어려운데, 이 부분의 모습이 이상적인 모습에서 벗어나도 위상 천이 오차가 생긴다.



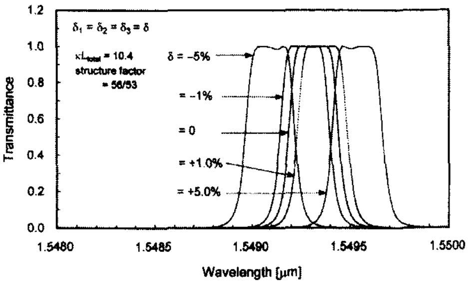
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. structure factor가 56/53이고 κL_{total} = 10.4인 필터의 투과 특성에 미치는 위상 천이 오차의 영향. 위상 천이 오차가 a) QWS1, b) QWS2에만 있을 때와 c) QWS1, 3에 있을 때 및 d) 똑같은 크기의 오차가 모든 위상 천이에 동시에 있을 때 투과 특성

Fig. 4. Dependence of the transmission spectrum on the phase-shift error in the a) left, b) center, c) both left and right phase shifts, and d) in all the phase shifts with the same magnitude.

그림 4 a)는 위상 천이 오차가 그림 1에서 왼쪽 위상 천이(QWS1)에만 있을 때 오차의 크기에 따른 투과 특성의 변화를 보여 준다. 1% 정도의 오차만으로도 심각한 변형이 나타남을 볼 수 있다. 그림에 보이지는 않았지만, 위상 천이 오차가 -값일 때의 투과 스펙트럼은 +값일 때의 스펙트럼과 중심 파장을 중심으로 반대칭이 된다. 그림 4 b)는 위상 천이 오차가 가운데 위상 천이에만 있을 때 투과 특성의 변화를 보여 준다. 그림 4 a)의 결과에 비하여 투과 특성에 더 큰 변화가 나타남을 알 수 있다. 그림 4 c)는 위상 천이 오차가 좌우 위상 천이 두 곳에서 발생하였을 때의 투과 특성을 보여 준다. $\delta_1 = -\delta_3$일 때 좌우 대칭으로 됨이 흥미롭다. 한편, 그림 4 d)에는 위상 천이 오차가 3 위상 천이에서 같은 크기로 동시에 일어날 때 투과 스펙트럼의 변화를 보였다. 위상 천이 오차가 양수일 때에는 공진 파장이 길어져 투과 대역이 긴 파장 쪽으로 움직임을 볼 수 있다. 또, 위상 천이 오차의 크기가 다를 때에 비하여, 투과 대역 안에서의 특성은 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 중심 파장을 맞출 때, 위상 천이 오차를 이용할 수도 있음을 보여 준다. 여기에서 보이지는 않았지만, 필터의 투과 대역폭이 좁을수록 위상 천이 오차의 영향은 크게 나타난다.

그림 4의 계산 결과로부터 위상 천이 오차가 있더

라도 3 위상 천이에서 똑같이 나타나면, 투과 대역 자체의 특성 변화는 10배 이상 덜 민감하게 나타남을 보았다. 이는 그림 1의 필터가 3개의 위상 천이 필터가 결합된 형태라는 사실을 이용하여 이해할 수 있다. 필터를 구성하는 각각의 필터가 서로 다른 특성을 보이면, 이 3 필터 사이의 결합이 충분히 일어나지 않아 필터의 투과율이 낮아진다. 그러므로 그림 4 d)에서처럼 위상 천이 오차의 크기가 같으면, 오차가 있어도 3 필터 사이의 결합이 충분히 일어나, 투과 대역의 중심 파장은 움직이지만 투과 스펙트럼 모습은 크게 변하지 않는 것이다.

이제, 위상 천이 오차가 얼마나 작아야 투과 스펙트럼의 변화를 무시할 수 있을까가 주요 관심사로 된다. 위의 논의를 토대로 하면, 각각 필터의 공진 파장 또는 중심 주파수가 필터의 대역폭 안에 있어야 한다고 볼 수 있다. 필터의 -3dB 대역폭을 $\Delta\lambda$, 위상 천이 오차에 따른 중심 파장의 변이를 $\delta\lambda$, 필터 투과 대역의 중심 파장을 λ_C라 하면,

$$\delta\lambda/\lambda_C < \Delta\lambda/\lambda_C \quad (5)$$

가 된다. 이는 $\Delta\lambda$=0.8nm, λ_C =1550nm에서 위상 천이 오차가 0.1% 수준이 되어야 함을 의미한다.

이렇게 위상 천이 오차를 0.1% 이하로 유지시키는 것은 쉬운 일이 아니다. 하나의 예로, 위상 천이 부분의 회절격자의 모습이 그림 1의 이상적인 모습에서 벗어나, 골이 메워져 회절격자의 마루와 같은 높이로 편평해지는 정도만으로도 0.1%보다 큰 오차가 생긴다. 그러므로, 위상 천이 부분의 회절격자 모습까지도 일정하게 유지시킬 수 있어야 이 필터가 제대로 동작할 수 있다. 그리고, 세 위상 천이 모두 골이 메워져 회절격자의 마루 높이로 편평할 때에는, 위상 천이 오차가 똑같게 되어 투과 스펙트럼의 모양에는 큰 변화가 없고 중심 파장이 약 0.014nm 만큼 짧은 파장으로 이동한다.

한편, 위상 천이 회절격자를 만들 때 제작 공정에 따라서는 $\lambda/4$ 위상 천이의 모습이 그림 1과 같이 똑같지 않고, 세 개 가운데 하나의 극성이 뒤바뀔 수도 있다. 즉, 그림 1에서 세 개의 위상 천이 가운데 어느 하나가 회절격자 반 주기만큼 좌우로 움직일 수도 있다. 이 때에는 필터의 특성에 큰 변화가 없을 것으로 생각할 수도 있으나, 실제로는 그렇지 않다. 그 이유는 3 공진기 사이의 결합 계수의 위상이 변하기 때문으로, 그림 4 b)에서 0.5% 정도의 위상 천이 오차가 있을 때와 같은 정도의 투과 스펙트럼의 변화를 보인다.

2. 회절 격자 구조 변수 랜덤 변이의 영향

그림 1의 필터에서 회절격자는 주기와 높이가 수백 nm 정도인 미세 구조이다. 이는 원자 층 수백 개 정도의 크기이므로, 회절격자의 높이와 크기에 원자층 하나 정도의 랜덤 변이가 있다 하더라도 1%에 가까운 랜덤 변이가 존재하게 되는 것이다. 그러므로, 이 랜덤 변이의 영향을 살펴 볼 필요가 있다. 회절 격자 모습의 랜덤 변이 가운데 높이의 랜덤 변이는 결합계수의 변이와, 유효 굴절율의 변이에 따른 회절격자 유효 주기의 변이로 나타날 것이다. 이 가운데에서 결합계수의 랜덤 변이의 영향은 비교적 작게 나타나므로, 이 연구에서는 회절 격자 주기의 랜덤 변이에 대하여만 간략히 기술하기로 한다. 더 자세한 연구 결과는 다음에 발표할 예정이다. 회절격자 주기 Λ의 랜덤 변이가 Gaussian 분포를 한다고 가정하고 투과 스펙트럼을 계산하면, 회절격자 주기 변화의 표준 편차 $\sigma(\Lambda)$가 똑같더라도 랜덤 변이가 축방향으로 어떻게 분포하느냐에 따라 많은 특성의 차이가 나타난다. 특히 위상 천이 부근에서 랜덤 변이가 클수록 투과 특성에 큰 변화가 나타난다. 그 이유는 랜덤 변이가 위상 천이에 가까이 있을수록 위상 천이를 중심으로 하는 각각의 공진기 특성에 큰 변화를 주기 때문이다. 그러므로, 랜덤 변이의 영향은 많은 경우에 대한 계산 결과를 통계 처리하여 알아보아야 한다. 그렇지만, 그 많은 경우 가운데 평균적인 경우의 결과를 살펴보면, 주기의 랜덤 변이는 위상 천이 오차의 영향과 같은 형태로 나타나며, 그 영향이 무시할 수 있을 정도로 작으려면 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\sigma(\Lambda)/\Lambda < \Delta\lambda/\lambda_C \quad (6)$$

이 결과는 공진 파장이 회절격자 주기에 비례함을 이용하여 (5) 식에서 직접 구할 수 있다.

3. 끝면 반사율의 영향

위상 천이 필터를 개별 소자로 사용할 때에는 물론 광집적회로의 부품으로 사용할 때에도 입출력 도파로와의 접합 부분 또는 필터와 연결된 다른 부품으로부터의 반사 때문에 필터의 특성에 변화가 있을 수 있다. 이 절에서는 양 끝면의 반사가 필터의 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보기로 한다.

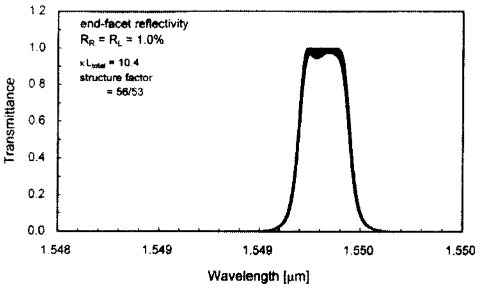


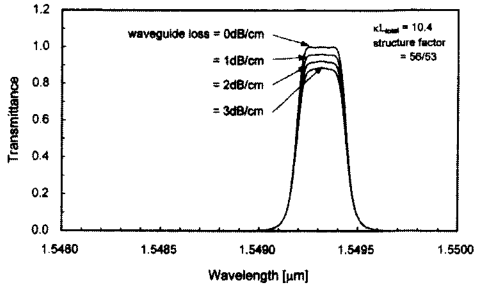
그림 5. structure factor가 56/53이고 κL_{total} = 10.4인 필터에서 양 끝면 반사율이 각각 1%일 때 끝면의 회절격자 위상의 변화에 따른 투과 특성

Fig. 5. Effect of end-facet reflection on the filter transmission spectra.

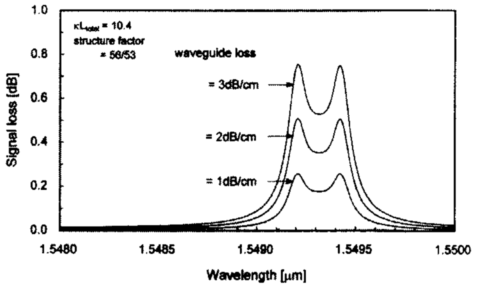
그림 5는 양 끝면의 반사율이 모두 1%일 때 투과 스펙트럼을 보여준다. 왼쪽 끝면에서의 회절격자 위상은 그림 1의 회절격자의 마루로 고정하였으며 오른쪽 끝면의 위상은 균등하게 분할된 12 가지로 두어, 모두 12 가지 위상 조합에 대한 결과를 겹쳐서 그린 것이다. 그림 5로부터, 투과 대역의 중심 파장이나 밴드 폭에는 큰 변화가 없지만 ripple은 0.25dB 정도로 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. 그러므로 투과 대역의 ripple을 0.25 dB 이하로 하려면 양 끝면의 반사율은 1% 이하로 낮추어 주어야 한다. 거울면 반사의 영향이 반도체 레이저에 비하여 비교적 작게 나타나는 것은 끝면에서 반사된 광파가 반도체 레이저에서는 증폭되어 되돌아가는 데 반하여 필터에서는 그렇지 않기 때문이다.

4. 도파로 손실의 영향

반도체를 이용한 도파로 소자의 가장 큰 문제점의 하나가 도파로 손실이다. 그림 1과 비슷한 도파로 구조에서 1.2-1.4dB/cm 정도의 손실 측정 결과가 발표되었다.[6] 이 손실은 도파로의 물질 조성, 불순물 농도, 도파로 구조와 표면 또는 계면의 평탄도 등의 함수이므로 제작 공정과 깊이 관련되어 있다. 이에 따라 도파로 손실이 0, 1, 2, 3dB/cm일 때의 필터 투과 특성을 그림 6에 보였다. 그림 6 a)에는 도파로 손실에 따른 투과 스펙트럼을, 그림 6 b)에는 손실 스펙트럼을 보였다. 여기에서 signal loss는 -10 log(T+R)로 정의하여 순수한 손실만을 고려하였다. 그림 6으로부터 투과 대역의 손실은 금지대에서의 손실에 비하여 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 이 필터가 공진 현상을 이용한 것이기 때문이며, 이에 따라 신호 손실은 회절격자가 없는 균일 도파로의 손실에 비하여 약 5배정도 증가하였다. 그러므로 공진기 안에서 반사가 더욱 많이 일어나는 투과 대역폭이 좁은 필터일수록 신호 손실이 더 커지게 된다. 이와 같은 손실의 증배는 도파로 손실 최소화의 필요성을 보여준다. 특히, 각각의 공진기에서 광신호의 다중 반사가 위상 천이를 중심으로 일어나 광자가 이 부분에 집중됨에 비추어, 위상 천이 부근에서의 손실을 최소화하는 것이 중요하게 된다.



(a)



(b)

그림 6. 도파로 손실에 따른 a) 투과 스펙트럼과 b) 신호 손실 스펙트럼. 여기에서 신호 손실은 -10 log(T+R)로 정의되며, T와 R은 각각 투과율과 반사율이다

Fig. 6. Effect of waveguide loss on a) filter transmission and B) loss spectra.

한편, 그림 6 b)의 신호 손실 스펙트럼은 다중 반사에 따른 신호의 시간 지연과도 밀접하게 연관된다. 이는 다중 반사에 의하여 광파가 필터 안에서 왕복하는 거리가 길수록 시간 지연과 손실이 함께 커질 것임을 고려하면 쉽게 이해할 수 있다. 그러므로 시간 지연의 차이에 따른 악영향을 최소화하려면, 신호의 파장은 투과 대역의 중앙 부근에 있도록 하여야 한다. 또, 투과 대역 부근의 금지대역에서는 도파로 손실이 증가함에 따라 필터의 반사율이 감소한다. 이는 이 필

터를 add-drop multiplexer에 사용할 때 인접 채널 신호에 대한 손실의 증가로 이어짐을 의미한다.

Ⅳ. 결 론

유효 굴절율 전달 매트릭스 방법을 이용하여 위상 천이 회절격자 필터의 구조상의 비이상성의 영향을 살펴봄으로써 이 필터의 제작성을 검토하였다. 필터 구조 변수의 변이가 필터 특성에 미치는 영향이 클수록 제작 공정이 정교하여야 하기 때문에 필터의 가격이 높아지고 제작 수율이 감소하게 되므로, 이 제작성은 필터의 경제성을 결정하는 주요 요소가 된다. 계산 결과, 위상 천이 오차나 회절격자 주기의 랜덤 변이는 이들 오차에 따른 공진 파장의 변화가 필터의 투과 대역폭 이내에 있어야 함을 알 수 있었다. ITU 기준에 따른 파장과 대역폭을 기준으로 할 때, 이는 상대 오차가 0.1% 이내여야 함을 의미하며, 이 정도의 허용 오차는 회절격자의 제작에 큰 부담으로 작용한다.[7] 따라서, 오차의 영향을 보상하는 오차 보상 기법이 요망된다. 필터 끝면 반사의 영향에 대한 계산 결과, 끝면 반사가 필터의 대역폭이나 중심 파장에 미치는 영향은 작은 반면 투과대역의 ripple을 증가시키므로, ripple을 0.25dB 이하로 줄이려면 반사율이 1% 이하로 되어야 한다. 또, 위상 천이 필터는 다중 반사에 따른 공진 현상을 이용하기 때문에 도파로 손실은 증배되어 나타남을 보였으며, 특히 위상 천이 부분에서의 도파로 손실을 줄이는 것이 중요함을 보였다. 이에 따라 도파로 손실이 1dB/cm로 낮아도 약 0.2dB의 투과 손실이 나타났다. 이 연구 결과는 파장 다중화 방식 협대역 투과 필터를 설계하고 제작하는 데에 있어 기본 자료로서 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구 과정에서 좋은 제안을 하여 준 미국 플로리다 대학교의 R. V. Ramaswamy 교수와 R. F. Tavlykaev 박사와 연구년 기회를 준 아주대학교에 감사합니다.

참 고 문 헌

[1] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, "Optical components for WDM lightwave networks," *Proc. of IEEE*, vol. 85, no. 8, pp.1274-1307, August 1997.

[2] R. Zengerle and O. Leminger, "Phase-shifted Bragg grating filters with improved transmission characteristics," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 12, pp.2354-2358, Dec. 1995.

[3] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp.1277-1294, August 1997.

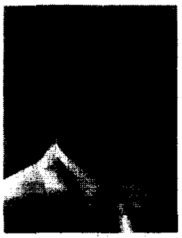
[4] T. Makino, "Effective-index matrix analysis of distributed feedback semi-conductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.28, no. 2, pp.434-440, Feb. 1991.

[5] C. H. Henry, L. F. Johnson, R. A. Logan, and D. P. Clarke, "Determination of the refractive index of InGaAsP epitaxial layers by mode line luminescence spectroscopy," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 21. no. 12, pp.1887-1892, Dec. 1985.

[6] M. Heinbach, M. Schienle, A. Schmid, B. Acklin, and G. Muller, "Low-loss bent connections for optical switches," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp.833-837, May 1997.

[7] E. M. Bradley, P. K. L. Yu, and R. F. Mathis, "Control of Bragg grating resonant wavelength through its dependence on the effective index of a waveguide," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 7, pp.1156-1164, July 1997.

저 자 소 개



金 相 培(正會員)
1959년 2월 15일 생. 1981년 2월 아주대학교 전자공학과(공학사). 1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학 석사). 1987년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1987년 9월 - 1990년 8월 한국전자통신연구소 선임연구원. 1990년 9월 - 현재 아주대학교 전자공학부 조교수, 부교수. 1997년 3월 - 1998년 2월 미국 플로리다 대학교 대우 교수. 주관심분야는 광통신용 반도체 레이저, 필터와 광전소자 등임