
광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating) 제작과 제작 조건에 따른 특성 향상

최보훈*

Fabrication optimization of Fiber Bragg gratings

Bo-Hun Choi*

이 논문은 동아대학교 연구비를 지원받았음

요 약

가우스 광분포를 가지는 248nm 파장의 KrF 엑시머 레이저 빔과 1.072 μ m 주기를 가지는 위상마스크를 이용하여 최저 투과율 파장이 1549.9nm 인 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating)를 제작하였다. 레이저 빔과 마스크 그리고 광섬유의 최적 정렬 과정을 조사하기 위해 평행 정렬 오차와 각 정렬 오차가 조사되었고 또한 엑시머 레이저의 투과 에너지와 발진 주파수의 변화에 따른 영향도 조사되었다. 실험 결과 얻어진 최적 정렬 조건 하에서 제작된 광섬유 격자의 광 투과 스펙트럼 형성 과정을 측정하여 특성이 분석되었고 이 같이 사용된 제작 조건의 안정성을 확인하기 위해 재현성 실험이 수행되었다.

ABSTRACT

Optical fiber Bragg grating to have the lowest transmittivity at 1549.9nm wavelength was fabricated using a Gaussian distributed KrF Eximer laser of 248nm lasing wavelength and a phase mask of 1.072 μ m period. The proper alignment of an optic setup to fabricate fiber gratings was investigated and the reproductivity of the grating fabrication was examined using the obtained optimum fabrication condition in this experiment.

키워드

광섬유 브래그 격자, 엑시머 레이저, 홀로그래픽 리소그래피, 위상 마스크, 광학 정렬

Key word

Optical fiber Bragg grating, Eximer laser, holographic lithography, phase mask, optical alignment

I. 서 론

게르마늄(Ge)이 첨가된 광섬유 코어는 240nm 근처의 파장 광선에 노출될 때 굴절율이 증가하는데 이 성질을 이용하여 광섬유에 주기적인 굴절률 변화를 형성시켜 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating; FBG)를 얻게 된다[1]. 최근 광섬유 격자는 광통신 및 광센서 분야 등에서 응용 범위가 넓어지고 있으며 특히 1550nm 대역 광섬유 격자는, 기존에 포설되어 있는 표준형 단일 모드 광섬유를 근간으로 하는 광전송시스템에서의 응용을 위해 다양하게 연구 개발되고 있다. 또한 광섬유 격자는 고속 DWDM (dense wavelength division multiplexing) 전송에서 다양한 변조포맷 생성을 위해, Optical Add/Drop Multiplexer로, 분산보상기 및 EDF 광섬유 증폭기/레이저 등에서 다양하게 응용되고 있다[2].

광섬유를 따라 진행되는 빛의 파장이 다음 식의 Bragg 조건을 만족하는 경우 광섬유 격자는 반사형 필터의 기능을 갖게 된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

여기서 Λ 는 반사가 일어나는 파장, n_{eff} 는 반사되는 빛의 굴절율, Λ 는 광섬유 격자의 주기를 나타낸다[3]. 제작 과정에서는 주로 격자의 굴절률 변조 주기를 조정함으로써 원하는 파장에서 반사를 일으키는 광섬유 격자를 얻게 된다.

광섬유 격자의 제작 기술은 크게 홀로그래피 방식과 위상마스크 방식으로 나누어지는데 홀로그래피 방식은 굴절률 주기를 임의로 조정 가능하지만 제작상의 어려움이 있고 위상마스크를 이용한 광섬유 격자 제작 방식은 마스크의 주기에 의해 광섬유 격자의 중심파장이 일의적으로 결정되는 단점이 있지만 제작 과정이 외부 환경에 덜 민감해서 상대적으로 격자의 제작이 용이하고 재현성이 높은 장점이 있다[4].

본 논문에서는 가우스 광반포를 가지는 KrF 엑시머 레이저 빔과 위상마스크를 이용하여 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating)를 제작하였다. 제작 과정에서 발생 가능한 정렬 오류의 영향을 조사하기 위해 평행 정렬 오차, 각 정렬 오차를 유발시켜 결과를 측정하였다. 또한

엑시머 레이저의 빔 세기와 발진 주파수 변화에 따른 형성된 광섬유 격자의 특성 변화도 조사되었다. 이 같은 제작 조건의 최적화 과정을 이용하여 얻어진 광섬유 격자의 투과 스펙트럼이 조사되고 제작 조건의 재현성이 검증되었다.

II. 실험 장치

광섬유 브래그 격자를 제작하기 위한 실험 장치도 가 간략하게 표현되어 그림 1에 주어져 있다. KrF 가스를 사용하는 엑시머 레이저(Lambda PhysiK사)의 파장은 248nm이고 펄스의 시간폭은 25 nsec 이며, 사용되는 에너지 영역은 0.1-1 J/cm² 이다. 반사경에 의해 수직으로 방향을 바꾼 빔은 convex cylindrical 렌즈(초점 거리는 30cm)에 의해 평행 광이 된다. 이후 Concave cylindrical 렌즈에 의해 광섬유의 길이 방향으로 선 초점을 맺게 한다 (이 Concave cylindrical 렌즈는 경우에 따라 선택적으로 사용되었다.). Cylindrical 렌즈를 지난 레이저는 마스크를 거쳐서 광섬유에 레이저가 도착하게 된다.

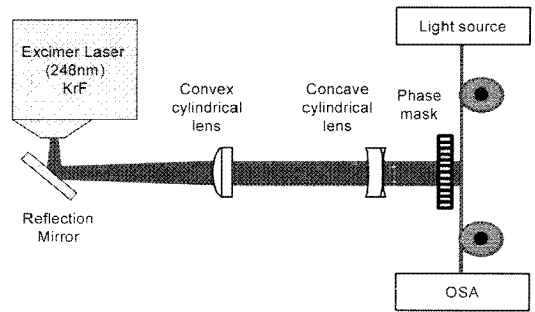


그림 1. 광섬유 브래그 격자 제작 장치도
Fig. 1. the experiment setup

레이저 빔의 좌우 조정은 반사경의 각도를 이용하였고 제작 장치의 정렬 기능을 높이기 위해 반사경과 렌즈, 마스크와 광섬유의 지지대들이 모두 같은 레일에 놓여 있도록 했으며 이들을 지지하는 홀더들의 위치를 통해 상대적인 거리를 조정하였다. 빔의 높이 변화에 따른 정렬을 위해 개별 광 부품 홀더들은 높이 조절이 가능하도록

록 했다. 이들 광 부품들을 모두 함께 진동 흡수 기능을 가진 광테이블 위에 위치시켜서 외부 진동에 영향을 받지 않도록 했다. 또한 평형자를 이용하여 광테이블의 높이 평형을 세심하게 맞추었다.

광섬유 격자로 만들어지는 광섬유(Fibercore사)는 광통신용 표준광섬유보다 광감광도(Photosensitivity)가 향상된 광섬유로 코아 직경은 4 μm 이며 차단주파수(cutoff wavelength)는 1.4 μm 이다. 사용되는 광섬유의 폴리머 피복은 CH_2Cl_2 용액에 담구어 최소한 5cm 길이 이상 제거한 뒤 광섬유의 클래딩이 마스크에 직접 밀착되도록 하였다. 마스크는 회절빔의 간섭을 이용하기 위해 위상마스크(Ipsen사)가 사용되었는데 1.072 μm 주기를 가진다. 위상 마스크의 정확한 위치를 위해서 가시광선인 HeNe 레이저를 보조적으로 사용하여 위상마스크와 광섬유를 평행하도록 정렬하였다.

III. 실험 및 실험 결과

그림 2는 레이저 빔이 광섬유와 만나는 위치에서 사용되는 레이저 빔의 공간적인 분포를 측정된 것이다. 사각형 점이 측정값을 의미하고 점선은 추계선으로, 가우스 분포(Gaussian profile)로 계산하였다. 레이저의 FWHM(full width at half maximum)은 7.8mm에 해당되었으며 빔의 전체 분포가 가우스형에 잘 일치함을 보여 준다.

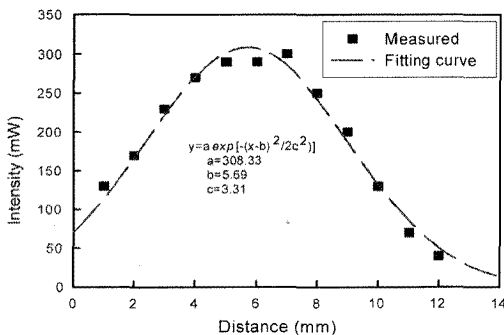


그림 2. 광섬유에 입사하는 엑시머 레이저의 공간적인 분포
Fig. 2. the spatial distribution of Eximer laser

빔의 세기 분포가 길이 방향으로 일정한 경우(uniform distribution) 보다 가우스형 분포를 가진 레이저 빔은 광섬유 격자의 광 스펙트럼에서 보조 피크(sidelobe)를 억제시키므로 광원으로써 보다 적절하다[5].

실험 장치도에서 보이는 것처럼 여러 가지 광학 장치들을 사용하고 회절 간섭을 이용하며 광원이 집속되는 곳이 직경 4 μm 인 광섬유 코아(core)이므로 광섬유 제작 실험은 정렬 상태에 매우 민감하게 된다. 따라서 광섬유 격자를 제작하는 장치들의 배열 조건에 따라서 요구되는 결과에 종종 차이가 발생하며, 또한 이러한 배열과 관련된 오류로 인해 제작 과정에서 재현성이 떨어진 경우가 흔히 발생한다. 이를 확인하기 위해 실험 장치들의 정렬 조건의 변화에 의한 광섬유 격자의 특성의 차이를 조사하였다.

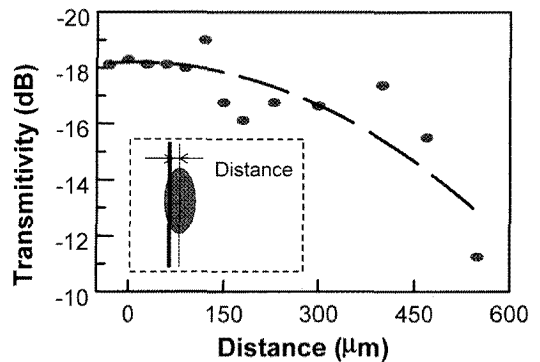


그림 3. 레이저의 초점 중심에서의 평행 위치 정렬 오류에 따른 FBG의 투과율 변화
Fig. 3. the transmittivity variation by parallel distance misalignment

그림 3은 레이저의 초점 중심에서의 평행 위치 정렬 오류에 따른 FBG의 투과율의 변화를 보여준다. 상사 내의 그림이 이 정렬 오류를 설명하며 그래프에서 주어지는 “거리(distance)”의 의미가 정의되어 있다. 사용된 엑시머 레이저는 공간적으로 가우스 분포를 가지므로 세기의 정점에서 벗어남에 따른 정렬 오류가 가져올 수 있는 특성 차이를 확인하게 위해서 550 μm 까지 정렬 오류를 유발시키면서 각각의 상태에서 격자들이 제작되었고 이들의 최고 투과율을 비교한 결과가 그림 3이다.

현재의 실험 조건에서는 최적 위치에서 100um 정렬 오류는 측정 오차 범위 내에서 오류를 발생시키지 않았고 약 400um 정렬 오류까지는 2dB 정도의 투과율 감소를 가져오며 그 이상의 오류에서는 격자의 형성이 크게 악화되는 것을 확인 할 수 있다. 투과율에서 -18dB에서 -16dB로의 변화는 투과율 1%의 변화에 해당한다.

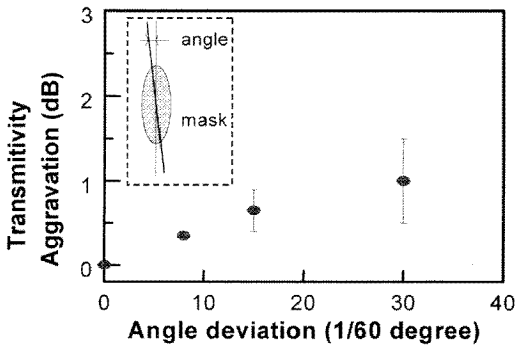


그림 4. 레이저의 초점 중심에서의 각도 정렬 오류에 따른 광섬유 격자의 투과율 변화
Fig. 4. the effect of angular misalignment

그림 4은 레이저 빔과 광섬유의 정렬 각도에서 오류가 발생한 경우에 결과적으로 영향을 미치는 광섬유 격자의 특성 변화를 측정된 것이다. 이 그림 속의 점선 상자 안에 각 정렬 오류 (angular alignment mismatch)에 대한 설명 그림이 첨부되어 있다. 각 정렬 오류에 따른 광섬유 격자의 특성 변화가 민감하여 각도 변화를 각각 8초도 (8/60도), 15초도, 30초도로 변화시키면서 제작하였다. 또한 각각의 각도에 대해서 시계방향과 반시계 방향으로 구분하여 측정되었기에 결과적으로 각 각도가 2회씩 측정되었다. 각각의 실험 조건에서 얻은 투과 스펙트럼의 투과율을 비교하여 그림 4을 얻었다.

결과적으로 각도 오류에 상당히 민감함으로 알 수 있다. 약 0.5도(30초)만 오류가 있어도 투과율이 상대적으로 1dB나 감소함을 보여준다. 여기서 각도 오차가 증가할수록 편차도 함께 증가하는 것은 시계방향과 반시계방향의 오차에 따른 특성 차이가 정확치 일치하지 않는다는 것을 의미하며 이는 기준점이 완벽히 각 오류에 대해서 자유롭지 않았음을 의미한다.

반복되는 실험 과정에서 이 각도 정렬의 정밀도는 실험 장치 주위에 레이저 광이 광섬유에 투과된 뒤 만드느 회절광을 관측함으로써 정렬의 정밀도를 높일 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 즉 이 회절광이 광섬유를 중심으로 높이를 기준으로 하여 좌우 대칭이 되도록 정렬을 조정하면 각 정렬 오류를 제거할 수 있었다.

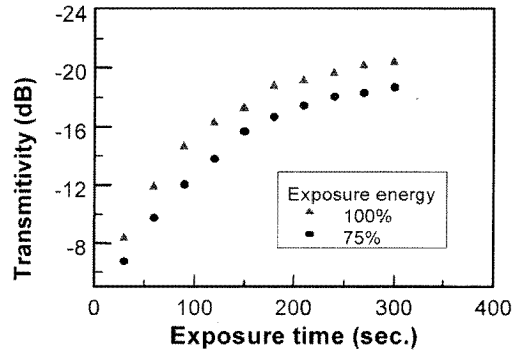


그림 5. 레이저 빔의 에너지의 차이에 따른 FBG의 투과율 변화
Fig. 5. the transmittivity variation by laser exposure energy

그림 5은 가해지는 레이저 빔의 에너지의 차이에 따른 특성 변화를 보여주는데 100% 에너지를 사용했을 때와 75% 에너지를 사용했을 때의 차이로 생성된 광섬유 격자의 투과 특성 차이가 나타나 있다. 75%로 레이저 세기 조건을 위해서는 100% 경우와 동일한 레이저 발전 조건에서 레이저 빔의 경로 상에 25% UV 광 감쇄기를 사용하여 얻었다.

결과는 레이저 광 세기 조건에 따라서 도달 가능한 최소 투과율 값이 달라져서 광 투과 시간을 충분히 준다 하더라도 적절한 레이저 광 세기를 사용하지 않으면 원하는 최저 투과율의 광섬유 격자를 얻을 수 없다는 것을 보여준다. 하지만 보다 더 작은 투과율을 가진 (혹은 최대 감쇄율을 가지는) 광섬유 격자를 위해서 레이저 광 세기를 키울 경우 광섬유가 손상을 입게 된다. 실제로 본 실험에서도 최적화된 값 이상으로 실험하였을 때 광섬유가 손상되어 끊어지는 현상이 종종 발생하였다.

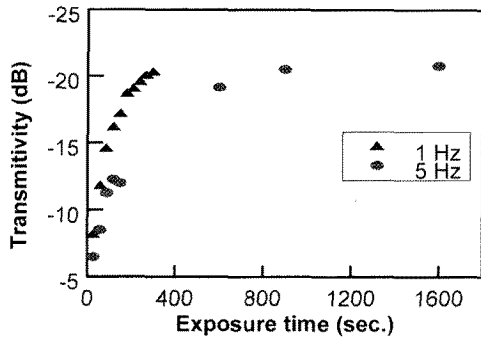


그림 6. 레이저의 발진 진동수에 따른 FBG의 투과율 변화
 Fig. 6. the transmittivity variation by laser repetition rate

그림 6은 레이저의 발진 진동수에 따른 광섬유 격자의 투과율 변화를 보여준다. 발진 진동수는 1 Hz인 경우와 5 Hz인 경우가 비교되었는데 포화되는 투과율에 도달하는 시간은 틀리지만 최종적으로 투과율이 포화된 값은 둘 다 20dB로 같음을 알 수 있다. 포화되기 까지 걸리는 레이저 광의 노출 시간은 5 Hz인 경우 약 300 ms이었고 1Hz인 경우는 1600 ms임을 알 수 있는데 측정상의 오차 범위를 고려하면 약 1:5가 된다. 이 비율은 두 실험 조건의 발진 진동수와 직접적으로 연관되어서 결국 가해지는 총 에너지로 고려하면 두 실험의 결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 레이저의 발진 진동수를 조정함으로써 레이저의 노출 시간을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그리고 총 가해지는 에너지가 중요 변수가 됨을 알 수 있다. 하지만 발진 진동수의 급격한 증가는 광섬유에 가해지는 광 파워를 증가시켜서 광섬유에 물리적인 손실을 줄 수 있는 가능성을 증대시킨다는 점도 고려되어야 할 것이다.

앞서 정렬 실험들을 통해 얻은 결과를 이용하고 또한 다양한 반복 실험을 통해 광 부품의 정렬을 최적화하였다. 또한 레이저 빔 조건 변화 실험들을 통해 얻어진 결과들을 함께 이용하였다. 이 최적화 조건 하에서 레이저 빔의 노출 시간에 따라서 생성되는 광섬유 격자의 광 투과 스펙트럼의 변화가 그림 7에 정리되었다. 여기서 레이저 조사시간은 1분에서부터 1분 간격으로 16분 까지 측정하였고 그 중 일부가 그림에 주어져 있다.

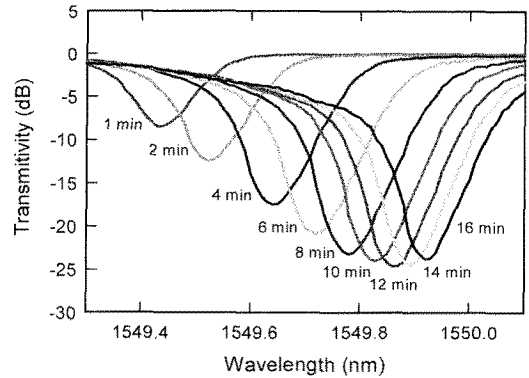


그림 7. 엑시머 레이저의 노출 시간에 따라 생성된 광섬유 격자의 광 투과 스펙트럼의 변화
 Fig. 7. the effect of laser exposure time

이 투과 스펙트럼은 EDFA (Erbium-doped fiber amplifier)의 ASE를 장치도인 그림 1에서 광원으로 사용하였고, 이 광원을 형성된 격자에 투과시킨 뒤 이를 OSA (optical spectrum analyzer)로 측정하여 얻은 결과다. 이 과정에서 ASE 광원 자체의 파장 의존성은 보정되었다. 레이저의 조사 시간이 길어질수록 광섬유 격자의 투과율은 8 dB에서부터 25 dB 까지 증가하며 그 중심파장은 1549.45 nm 에서 1549.95 nm 까지 장파장 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이것은 자연스러운 현상으로 레이저의 조사에 의한 굴절율의 크기가 커짐에 따라 발생한 것이다. 그러나 12분이 지나면 오히려 FBG의 투과율이 감소해서 최적 시간이 존재함을 알 수 있다. 실험에서 1Hz의 주기 펄스가 사용되었고 레이저 광의 에너지는 70mJ/cm² 이었다. 이 에너지 값은 광섬유가 높이는 위치에서 측정되었다. 투과율은 최대 -25dB를 보여주는데 이는 99.7% 투과가 억제되는 것을 의미한다. 또한 하나의 피크 이외에 보조 피크는 보이지 않아서 이들이 잘 억제되었음을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7에서 구한 투과 그래프의 투과율이 최저점인 피크 파장을 이용하여 레이저에 노출된 시간에 따라 변화하는 ICC (Integrated Coupling Coefficient)를 보여준다. 이 ICC 값은 엑시머 레이저에 의해 광섬유의 코어 속에 새겨진 주기적인 굴절률 패턴에서, 굴절률이 변화된 부분과 변화되지 않은 부분 사이의 굴절률

의 차이가 상대적으로 어떻게 변화하는지를 보여주는 것으로 그 결과가 계산결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 7에서의 실험 결과가 적절한 제작 조건에서 구하여진 결과임을 알 수 있어 실험에서 구성된 부품들의 배열이 잘 이루어져 있음을 간접적으로 알 수 있다.

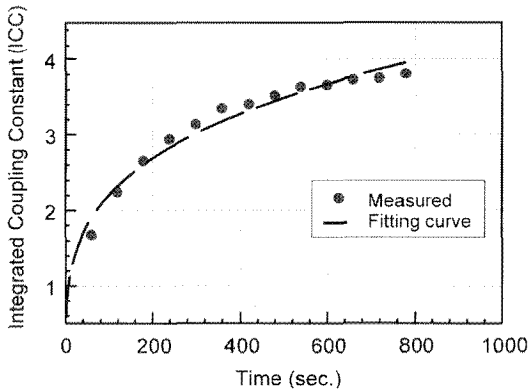


그림 8. 레이저의 조사 시간에 따른 ICC의 변화
Fig. 8. ICC variation by laser exposure time

그림 9는 그림 7에서 사용한 실험 조건을 이용하여 광섬유 격자를 제작할 때에 성능 조건의 재현성을 확인하는 실험을 수행한 결과다. 총 5번을 독립적으로 제작 실험하였는데 투과율은 편차는 최대 1dB 미만이었고 각 광섬유 격자의 3dB 대역폭은 0.389 ± 0.015 nm 를 보여준다.

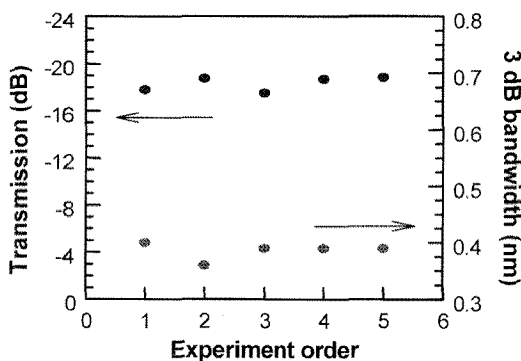


그림 9. FBG 제작 재현성 실험
Fig. 9. FBG reproducibility experiments

이 결과들은 광섬유 격자의 제작을 위한 실험 조건이 재현성이 있게 형성되었음을 의미한다.

V. 결 론

선폭이 7.8mm인 가우스 광분포를 가지는 248nm 파장의 KrF 엑시머 레이저 빔과 1.072um 주기를 가지는 위상마스크를 이용하여 최저 투과율 파장이 1549.9nm 인 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating)를 제작하였다. 레이저 빔과 마스크 그리고 광섬유의 최적 정렬 과정을 조사하였으며 또한 레이저의 조사 조건을 변화시키면서 광섬유 격자의 광 투과 스펙트럼 특성 변화를 조사하였다. 레이저 빔과 광섬유의 평행 정렬 오차 0.4mm는 1%의 투과율 감소를 유발시켰고 각도 정렬 오차 0.5도는 0.4% 투과율 감소를 만들었는데 이는 -20 dB 투과율을 기준으로 각각 2 dB와 1 dB 약화를 의미한다. 레이저 광의 에너지는 70 mJ/cm² 이 사용되었는데 최저의 투과율을 가지는 광섬유 격자를 얻기 위해서는 1 Hz 발진 진동수에서 12분 이상의 조사 시간을 필요로 했다. 이 레이저의 조사 에너지를 변화시키는 실험을 통해, 사용된 에너지의 값의 크기에 따라 레이저 빔의 조사 시간과 상관 없이 얻을 수 있는 최저 투과율 값은 달라진다는 것을 확인하였다. 레이저 빔의 발진 주파수의 변화는 광섬유 격자 형성에 차이가 없으며 다만 조사된 총 에너지 차에 따라서 광섬유 격자의 형성 시간의 차이를 만들었다. 최적 조건을 이용하여 광섬유 제작의 재현성을 조사하였을 때 투과율을 1dB미만 오차를 대역폭은 0.389 ± 0.015 nm 을 보였다.

참고문헌

- [1] A. Quintela, J. M. Lazaro, M. A. Quintela, C. Jauregui, J. M. Lopez-Higuera, "Fabrication of FBGs With an Arbitrary Spectrum," *IEEE Sensors J.*, Vol. 8, No. 7, pp. 1287 - 1291, 2008.
- [2] T. L. Lowder, K. H. Smith, B. L. Ipson, A. R. Hawkins, R. H. Selfridge, S. M. Schultz, "High-Temperature Sensing Using Surface Relief Fiber Bragg Gratings,"

- IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 17 , No. 9, pp. 1926 - 1928, 2005.
- [3] E. G. Turitsyna, S. Xuewen, S. K. Turitsyn, I. Bennion, "Design and Fabrication of Fiber Bragg Gratings With V-Shaped Dispersion Profile," J. Lightwave Tech., Vol. 25 , No. 2, pp. 606 - 611, 2007.
- [4] J. Poulin and R. Kashyap, "Novel Fabrication of Fiber Bragg Gratings Using Silicone Rubber Phase-Mask Stamp on the Cladding," J. Lightwave Tech., Vol. 27, No. 24, pp. 5602 - 5606, 2009.
- [5] S.R. Blais, and Y. Jianping, "Optical Single Sideband Modulation Using an Ultranarrow Dual-Transmission-Band Fiber Bragg Grating," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 18, No. 21, pp. 2230 - 2232, 2006.

저자소개

최보훈(Bo-Hun Choi)



1992년 부산대학교 물리학 학사
1994~1995년 하이닉스 근무
1996~1998년 삼성전자 근무
2001년 8월 ICU 공학 박사

2001~2004년 Uni. Melbourne, Research fellow

현재 동아대학교 부교수

※관심분야: 광통신망, 광인터넷, 광소자