Regular paper
Journal of the KIECS. pp. 731-736, vol. 12, no. 5, Oct. 31 2017, t. 85, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.5.731

오목한 광섬유 팁의 방사특성에 관한 연구

손경호* · 유경식**

A Study on the Radiation Characteristics of Concave Optical Fiber Tips

Gyeong-Ho Son* · Kyoung-Sik Yu**

요 약

본 논문에서는 광통신용 공진기에 필요한 광섬유의 오목한 면 제작에 관한 연구를 진행하였다. 불산(Hydrofluoric acid) 용액과 이 용액에 잘 흡수될 수 있는 파장인 1.55 ㎛의 레이저를 인가하여 광열효과를 유도하였고, 식각 용액에서의 광열효과를 통해 광섬유 끝단의 곡률 반경을 자유롭게 변경할 수 있는 점을 현미경 사진 촬영으로 확인하였다. 빔 프로파일러를 이용하여 제작한 결과물의 끝단에서 방사되는 빔의 크기 변화를 관측하여 유효성을 검증하였고 본 논문의 저자들은 제시한 방식이 광통신용 공진기에 적용 가능성이 있을 것으로 보고 있다.

ABSTRACT

In this paper, we report the fabrication of concave surface fiber tips for optical resonators. It was confirmed that the radius of curvature on fiber end can be controlled by introducing the hydrofluoric acid solution and the wavelength of 1.55 ㎛ laser which is absorbed well in the etchant to induce the photothermal effect. Using the microscope images, we observed the proposed concave fiber tip fabrication method is effective to make the controllable concave tips. We also observed changes in the size of the beam emitted from the tips with the various radius of curvature using the beam profiler. The authors believe that the proposed method will be applied to resonators for optical communications.

키워드

Optical Cavity, Micro Fiber Machining, Fiber Tip, Fiber Lens, Radiation
광학 공진기, 마이크로 광섬유 머시닝, 광섬유 팁, 광섬유 렌즈, 방사

Ⅰ. 서 론

통신 기술에 많이 이용되고 있는 무선 및 마이크로파(RF/Micro wave) 주파수 대역[1]의 경우 이미 포화한 상태이며 많은 통신사 및 정부에서 새로운 고주파 대역을 통신에 이용하기 위해 높은 주파수 소스(source) 및 이를 식별할 수 있는 검출기(detector)에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 고용량의 정보 전달을 위한 전송 속도 및 처리속도의 증가 요구 및 수요에 맞춰 수~수백 테라헤르츠(10^{12} Hz) 영역의 광(light)을 이용한 통신 시스템의 발전과 이를 뒷받침할 수 있는 소스 및 검출기에 대한 연구는 한창 진행중이며, 이러한 광통신을 구동할 수 있는 각종 광통신 구성 요소 및 품목들 또한 발전해 오고 있다[2-3]. 그 중에서 특정 주파수 및 대역을 차단하거나 일부 선택하여 통과시킬 수 있는, 통신에 기본적으로 필요한 필

* 한국과학기술원 전기및전자공학부(sonkh@kaist.ac.kr)
** 교신저자 : 한국과학기술원 전기및전자공학부
· 접 수 일 : 2017. 06. 30
· 수정완료일 : 2017. 08. 13
· 게재확정일 : 2017. 10. 18
· Received : Jun 30, 2017, Revised : Aug 13, 2017, Accepted : Oct 18, 2017
· Corresponding Author : Kyoungsik Yu
School of Electrical Engineering, Korea Advanced of Science and Technology
Email : ksyu@kaist.edu

터(filter)의 경우 공진기의 상쇄 및 보강 간섭의 원리에 기반을 두어 제작된다[4]. 다양한 주파수 영역 중에서도 위에서 언급한 광학 주파수 영역을 처리할 수 있는 광학 공진기는 빛의 파장 크기 단위에 맞춰 대체로 매우 소형화된 형태를 띠고 있고 광학 공진기는 현재 주파수 계측(optical metrology) 및 전자파의 영향에서 벗어날 수 있는 다양한 간섭계의 근본 기술로 이용되고 있다. 또한, 특정 주파수 영역만을 통과시키거나 반사시키고 차단할 수 있으므로 그 특정 파장 영역 천이의 원리를 이용하여 습도, 온도, 압력, 진동, 음향, 속도, 가속도 및 대형 선박 및 비행기 등의 균열 등 다양한 감지를 할 수 있다고 알려져 있다[5].

광학 주파수 대역에서 이용되고 있는 공진기는 다양한 형태로써 존재하고 있다. 마이크로포스트(micro-post), 마이크로디스크(microdisk), 반도체 구조의 필터, 폴리머 구조의 필터, 광결정(photonic crystal), 파브리-페로(Fabry - Pérot) 간섭계, 마이크로스피어(micro sphere), 마이크로토로이드(microtoroid) 등이 다양한 공진기 형태로 소개되어 연구되고 있는 상황이다[6]. 이때 파브리-페로 간섭계와 같이 두 개의 반사면(mirror)을 이용해 제작한 공진기의 경우, 반사면의 곡률 반경이 각각 R_1, R_2, 간격이 d라 할 때, 공진기가 빛을 안정적으로 공진시킬 수 있는지를 보여주는 안정성(stability)을 이용하여 쉬운 비교를 할 수 있다. 이때 안정도는 $(1-d/R_1)\times(1-d/R_2)$로 정의할 수 있으며 이 값이 0과 1 사이일 때 안정하다고 할 수 있다[7]. 마이크로 크기 단위의 두 반사면의 축을 정확히 정렬하기는 쉽지 않아 위에서 제시한 안정성이 크게 떨어질 가능성이 쉽다. 그러므로 대체로 두 반사면의 정렬을 쉽게 하도록 한쪽은 축이 정의되지 않은 평면거울($R_1=\infty$)을 배치하고 반대편은 오목한 거울($R_2>0$)을 결합한 파브리-페로 간섭계의 공진기를 많이 쓴다.

다양한 파브리-페로 간섭계 가운데서도 광섬유를 기반으로 하는 공진의 경우에는 크게 내인성(intrinsic)과 외재성(extrinsic) 형태로 구분할 수 있으며, 물리적, 화학적 검출을 위해 다양하게 쓰이고 있다. 특히나 광섬유가 제공하는 다양한 장점이 있는데, 그중 몇 가지를 꼽자면 값이 저렴하고 매우 간편하고 부피가 작으며 이를 공진기에 이용할 경우 제작이 편리하다는 점이다. 광섬유의 경우에 부피가 작으므로 접근성이 좋아 반사면과 같은 특정 대상에 가까지 접근할 수 있으며 곡률 반경을 작게 만들어 모드 부피(mode volume)를 줄여 특정 대상 물질과 상호작용을 하여 작은 신호도 크게 증폭시킬 수 있다. 또한, 레이저와 같은 광원으로부터 공진기를 이루는 광섬유가 직접 커플링(coupling) 되어있기 때문에 추가 손실을 줄일 수 있다.

위와 같은 광섬유형 공진기를 제작하기 위하여 광섬유 끝단에 탄산가스(CO_2) 레이저의 강한 파워(> 20 W)의 펄스(pulse)를 가하여 광섬유 끝단을 녹여 오목면을 제작하는 레이저 가공법이 가장 많이 소개되고 다양한 응용으로 적용되고 있다[8-9]. 레이저 가공법이 다양한 장점을 갖고 있지만, 탄산가스 레이저의 경우엔, 값이 매우 비싸고 백 마이크로미터 수준 크기의 광섬유 끝단을 레이저와 잘 정렬하는 문제가 있을 수 있다. 이에 2007년에 영국 버밍엄(Birmingham) 대학교의 Gerard Fernando 교수팀이 실리카(silica)로 구성된 SM800 광섬유를 플루오린화 수소산(Hydrofluoric acid: HF)에 화학적으로 반응시켜 광섬유 끝단에 오목한 면을 제작하였고 두 개의 오목한 면을 갖는 광섬유를 접합시켜 파브리-페로 간섭계를 제작하는 데 성공하였다[10]. 이때 광섬유 중심부의 코어(core) 영역이 코어를 둘러싸고 있는 클래딩(cladding) 영역보다 도핑(doping)의 영향으로 인해 굴절률이 미세하게 높다는 점을 통해 HF 용액의 식각비를 다르게 가져갔고 굴절률이 높은 코어가 더 빠른 속도로 식각된다는 점을 이용하였다. 그 이후로도 실리카 광섬유에 HF 용액을 이용하여 오목하게 만든 뒤 파브리-페로 간섭계를 제작하여 다양한 응용 연구가 현재까지 활발히 진행되어오고 있다[11-13]. 하지만 위에 언급한 결과뿐만 아니라 HF 용액을 이용한 다른 실험에서도 모두, 곡률반경 조절을 자유롭게 할 수 없다는 점을 한계로 지적하였으며 이 곡률반경은 광섬유 종류, 식각 용액의 종류 및 농도, 온도를 통해 제한된다는 점을 한계로 제시하였다.

본 연구에서는 광섬유 곡률반경을 예측하기 위해 모드 필드 지름(mode field diameter, MFD)을 이용하였다. 광섬유에서 진행하는 모드의 크기를 나타내는 여러 지표 중 많이 쓰이는 MFD는 광섬유에 가이딩되어 진행하는 모드를 가우시안 빔(Gaussian beam)

이라 가정하고, 이때의 가장 높은 세기(intensity)를 기준으로 $1/e^2$ (=0.1353)되는 영역의 직경을 의미한다. MFD는 일반적으로 광섬유의 광 코어(core) 지름과 주변부 클래딩(cladding)의 직경과 굴절률에 의해 결정된다. 보편적으로 광통신에서 많이 쓰이는 1.55 ㎛ 대역 파장의 빛을 가이딩 해주는 일반적인 광섬유의 경우 Corning사의 SMF-28이 가장 널리 알려져 있고 쓰이고 있다. 이러한 1.55 ㎛ 파장의 단일모드 광섬유의 경우, 코어의 직경이 약 8.3 ㎛, 클래딩 직경이 약 125 ㎛로 규격화되어있다. 직경뿐만 아니라 굴절률(refractive index)의 경우에도 제조사마다 약간씩의 차이는 있지만, 코어(core)와 클래딩(cladding)이 각각 대략 1.4504, 1.4447로 설정되어 있으며 이러한 값을 이용하여 Finite-difference time-domain (FDTD)와 같은 전산모사를 통해 얻은 가장 기본적인 모드인 HE_{11} 모드의 경우 MFD가 대략 9.34 ㎛이며, SMF-28의 단면을 클리버(cleaver)를 이용해 평평하게 잘라 빔 프로파일러(beam profiler)를 이용하여 가우시안 빔으로 가정한 뒤 간접적으로 MFD를 측정하였을 때 약 11.35 ㎛로 규격화된 값이 계산되었다.

이에 본 연구에서는 레이저를 이용해 식각 용액 온도를 높일 수 있고 높아진 용액 온도는 화학 반응 원리에 의해 광섬유에 대한 식각비가 더욱 크다는 점을 이용하여 광섬유 끝단의 오목한 면의 곡률 반경을 조절할 수 있다는 것을 예상하였다. 제안한 방법을 이용하여 동일 식각 시간에서 인가한 레이저 파워에 따라 다양한 곡률 반경을 확인할 수 있었으며 식각 시간의 변화를 통해 다양한 곡률 반경 또한 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 제시하는 방법을 통해 위에 언급한 레이저 가공법 및 기존 HF 용액을 이용하여 광섬유 끝단의 오목한 면을 제작하는 방법의 한계를 극복할 수 있었다. 또한, 레이저 파워를 적절히 조절하여 곡률 반경을 변화시킬 수 있으며 더 나아가 기존 레이저 가공법으로 얻을 수 없었던 작은 곡률 반경을 얻을 수 있을 것으로 생각했으며, 본 논문에서 제시하는 제작 방법은 고가의 탄산가스 레이저 장비 없이 동시에 여러 개를 제작할 수 있는 장점으로 인하여 경제적인 측면에서 또한 좋은 장점을 보일 것으로 예상할 수 있다.

본 논문의 2장에서는 식각 방법과 광열효과를 통해 광섬유 팁을 제작하는 방법을 소개하고 3장에서는 제작된 결과물을 관찰하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 끝으로 4장에서는 본 논문에서 제안하는 제작 방법을 통해 향후 어떻게 활용할 수 있을지 제시한다.

II. 오목한 광섬유 팁 제작 및 제작 결과

2.1 오목한 광섬유 팁 제작 방법

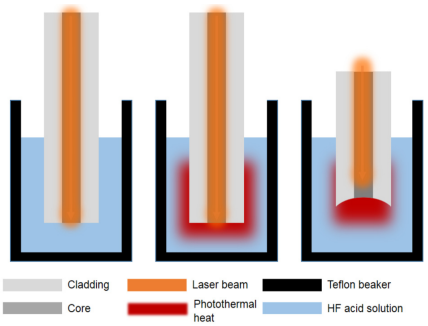


그림 1. 플루오린화수소산 용액과 레이저 광열효과를 이용해 싱글모드광섬유 오목면을 만드는 과정
Fig. 1 Process of making a concave surface on the fiber ends using laser-induced photothermal effect

그림 1은 본 논문에서 제안한 광섬유형 오목 팁을 제작하는 방법으로써 1.55 ㎛ 파장의 레이저를 광섬유에 인가하여 광섬유를 식각한다. 빛의 파장에 따른 물(식각 용액)의 흡수도가 다르나 1.55 ㎛ 파장에서 약 10.0/cm의 흡수 계수를 보이며 이 값은 자외선, 가시광 및 근적외선 영역의 레이저 빛에 대비해서 높은 값이라 할 수 있다. 즉, 보편적으로 광통신에서 많이 쓰이는 1.55 ㎛ 파장을 가이딩 할 수 있는 SMF-28의 경우 우리가 제안한 방법에 가장 최적화되어있다고 보고 있다. 인가한 레이저는 SMF-28에 가우시안 형태를 띠며 가이딩 되어 광섬유 끝단에서 방사되는 1.55 ㎛ 빛은 코어 중심부에서 가장 강한 빛을 방출하고 클래딩 끝 영역으로 갈수록 빛의 세기가 기하급수적으로 감소하는 분포를 취하고 있기에 인가한 레이저 세기에 따라 매우 다른 영향을 기대할 수 있다. 또한, 가이딩 되어 진행한 빛이 코어 중심부 근처의 HF 용액을 가열하고 가열된 빛이 코어 중심부를 더

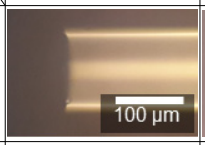
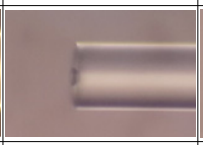
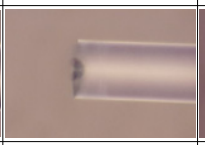
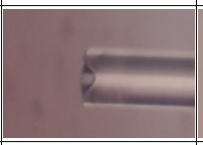
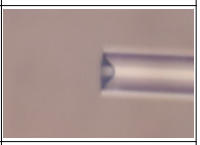
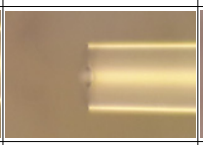
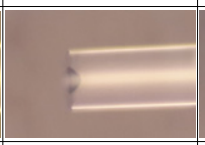
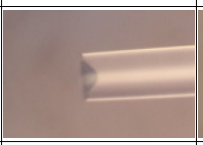
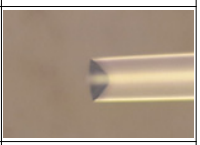
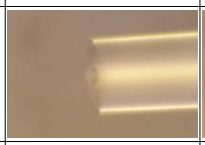
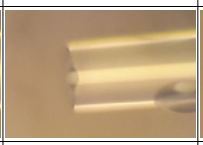
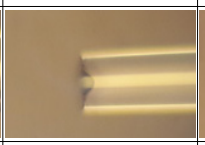
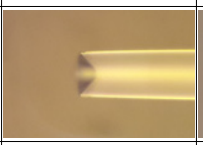
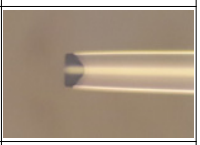
Time (min.) / Power (mW)	5	10	15	20	25
0					
Radius of curvature (㎛)	26.0	14.6	16.3	10.8	10.4
5					
Radius of curvature (㎛)	19.8	13.5	12.1	9.5	9.7
10					
Radius of curvature (㎛)	9.4	10.4	10.8	9.7	8.7

그림 2. 인가한 광 파워와 식각 시간에 따른 광섬유 끝의 오목한 면에 대한 현미경 촬영사진
Fig. 2 Microscope images of concave tip on fibers according to applied laser power and etching time

빨리 식각하며 동시에, 클래딩 끝단에는 빛이 진행되지 않아 광열효과는 정귀환(positive feedback) 영향으로 오목한 면이 더욱 잘 제작될 수 있다.

2.2 광섬유 팁의 곡률 반경 변화 관측

HF 용액에 대한 광섬유 식각 시 광열효과를 확인하기 위해 그림 2와 같이 SMF-28 광섬유에서 최적으로 잘 가이딩 될 수 있는 1.55 ㎛ 파장의 레이저 빛을 인가하고 인가한 레이저 파워를 조절해가며 광섬유 식각 시간을 5분 간격으로 5분부터 25분까지 확인하였다. 레이저 파워의 경우엔 0 (off state), 5, 10 mW를 이용하였다. 그림 2에서 확인할 수 있듯, 총 15개의 제작된 결과물을 광학 현미경을 통해 촬영한 뒤 촬영 사진을 통해 곡률 반경을 대략 계산하였고 그 결과는 그림 2의 표에 정리되어 있다. 광학 현미경을 통한 곡률반경(radius of curvature) 예측값이지만 여러 논문에서 소개된 레이저 가공법에 비해 작은 곡률반경을 얻을 수 있었다.

III. 제작 결과물의 MFD 측정 결과

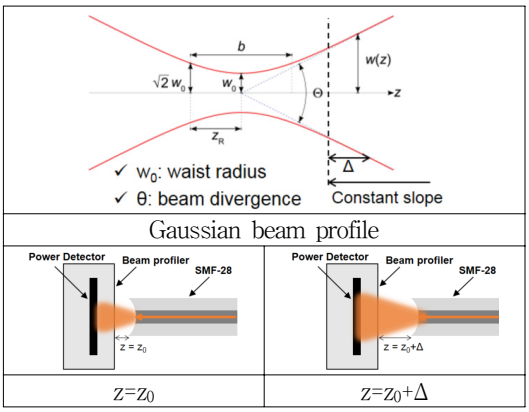


그림 3. 가우시안 빔의 프로파일(profile) 및 빔 프로파일러를 이용한 제작 결과물의 MFD 측정 과정
Fig. 3 Gaussian beam profile and the measurement of MFDs using the beamprofiler

제작한 광섬유 오목 팁을 통해 방사되는 빛의 MFD를 측정하기 위해 그림 3과 같이 빔 프로파일러를 이용해서 특정 위치 $z=z_0$로부터 z축 상에서 Δ만큼

떨어진 위치에서 빔을 관측할 때 측정되는 빔의 프로파일을 모두 기록한 뒤 각 지점의 웨이스트 반경(waist radius)를 통해 빔 확산각(beam divergence angle)을 추측할 수 있다. 측정 방법의 검증을 위해 사전 처리가 없는 잘 알려진 SMF-28의 클리빙(cleaveing) 단면을 통해 측정값과 FDTD 계산 값의 결과를 비교해 보았을 때, 웨이스트 직경이 11.4 ㎛, 9.34 ㎛로 각각 측정되었다. 오차는 클리빙하는 과정에서 사면으로 잘렸을 수 있으며 측정에 쓰인 SMF-28과 FDTD 계산에 이용된 굴절률 값의 차이에 의한 것으로 판단하였고 적절한 오차로 보인다.

그림 4와 같이 총 3개의 추가 샘플을 준비하였다. 각 샘플은 5분 동안 HF용액에서 식각되었는데, 0, 10, 16.6 mW의 1.55 ㎛ 빛을 각각 입사하여 광열효과를 통한 식각을 진행하였다. 그림 2에서의 결과와 마찬가지로, 광열효과를 통한 식각비의 변화는 우리의 예상대로 동일 식각 시간에서 인가한 광 파워가 0에서 10, 16.6 mW로 증가할수록 웨이스트 반경이 각각 3.256, 2.783, 2.739 ㎛로 감소하는 것을 알 수 있으며, 오목면의 깊이(D)와 너비(H)의 비율 D/H의 값이 0.341, 0.421, 0.482로 인가한 레이저 파워에 따라 증가하는 것을 알 수 있고 이를 통해서 곡률반경이 작아진 것 또한 간접적으로 도출할 수 있다.

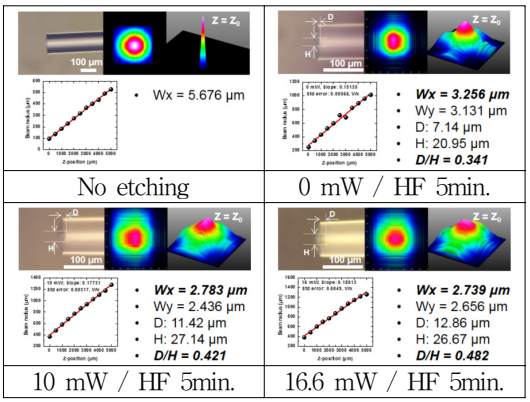


그림 4. 웨이스트 반경 측정 결과
Fig. 4 Measurements of waist radius results

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 레이저의 광열효과와 HF 용액을 통한 광섬유 끝단의 오목면 제작을 통해 동일 시간에서 오목면의 곡률 반경을 조절할 수 있다는 점을 광학현미경을 통해 확인하였고 동시에 빔 프로파일러를 이용하여 제작한 팁에서 방사되는 빔의 웨이스트 반경을 확인하였다. 이러한 결과로 기존에 광섬유형 공진기를 만들 때 많이 쓰는 방식인 레이저 머시닝 방법의 한계로 지적될 수 있는 정렬이 쉽지 않다는 단점을 극복할 수 있었고, 본 논문에서 제시하는 방법의 경우엔 광섬유 오목면 제작에 이용하는 레이저 종류나 식각 용액의 종류의 변경을 통해 오목면의 곡률반경 또한 줄일 가능성을 볼 수 있다고 판단되며 향후 곡률반경을 줄여 모드 체적(mode volume)을 작게 하여 공진 효과를 더욱 향상할 수 있다고 본 논문의 저자들은 예상하며 필요 시, 두 광섬유 팁 사이에 대한 모드를 결합 모드 이론(coupled mode theory) 분석을 [14] 통해 적절한 곡률 반경을 얻을 수 있다.

감사의 글

이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] T. Kim, Y. Rhee, and S. Kim, “Implementation of a Microwave Doppler Sensor,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 4, no. 2, 2009, pp. 77-81.

[2] J. Xie, W.-H. Fan, and X. Chen, "Systematic experimental study on a highly efficient terahertz source based on two-color laser-induced air plasma," *Laser Physics*, vol. 26, no. 5, 2016, p. 055002-055008.

[3] K. Peng, P. Parkinson, Q. Gao, J. Boland, Z. Li, F. Wang, S. Mokkapati, L. Fu, M. Johnston, and H. Tan, "Single n+-i-n+ InP nanowires for highly sensitive terahertz detection," *Nanotechnology*, vol. 28, no. 12,

2017, p. 125202-125211.
[4] T. Yun, “Harmonic-Suppressed Hairpin Bandpass Filter for the Microwave Radiomete,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 9, no. 10, 2014, pp. 1169-1174.
[5] K. Grattan and T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 82, no. 1, 2000, pp. 40-61.
[6] K. Vahala, "Optical microcavities," *Nature*, vol. 424, no. 6950, 2003, pp. 839-846.
[7] H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and resonators," *Applied Optics*, vol. 5, no. 10, 1966, pp. 1550-1567.
[8] D. Hunger, T. Steinmetz, Y. Colombe, C. Deutsch, T. Hänsch, and J. Reichel, "A fiber Fabry–Perot cavity with high finesse," *New J. of Physics*, vol. 12, no. 6, 2010, pp. 065038-065060.
[9] D. Hunger, C. Deutsch, R. J. Barbour, R. J. Warburton, and J. Reichel, "Laser micro-fabrication of concave, low-roughness features in silica," *American Institute of Physics Advances*, vol. 2, no. 1, 2012, pp. 012119-012124.
[10] V. Machavaram, R. Badcock, and G. Fernando, "Fabrication of intrinsic fibre Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, no. 1, 2007, pp. 248-260.
[11] W. Chen, D. Wang, B. Xu, C. Zhao, and H. Chen, "Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement," *Scientific Reports,* vol. 7, 2017, pp. 1-6.
[12] Y. Liu, D. Wang, and W. Chen, "Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement," *Scientific Reports*, vol. 6, 2016, pp. 1-9.
[13] S. Wu, G. Yan, B. Zhou, E. Lee, and S. He, "Open-cavity Fabry–Perot interferometer based on etched side-hole fiber for microfluidic sensing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 17, 2015, pp. 1813-1816.
[14] Hyung-Jun Heo and Sang-In Kim, "Analysis of Coupled Mode Theory for Design of Coupler Between Optical Fiber And Grating Assisted Waveguide," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 12, no. 4, 2017, pp. 561-568.

저자 소개

손경호(Gyeong-Ho Son)

2015년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학사)
2017년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 졸업(공학석사)
2017년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정
※ 관심분야 : Photonics

유경식(Kyoung-Sik Yu)

1999년 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사)
2001년 미국 Stranford University, Electrical Engineering (공학석사)
2004년 미국 Stranford University, Electrical Engineering (공학박사)
2004년~2007년 기초전력연구원
2007년~2010년 University of California, Berkely 연구원
2010년~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 부교수
※ 관심분야 : Optoelectronics, Photonics