

Adiabatic Optical-fiber Tapers for Efficient Light Coupling between Silicon Waveguides and Optical Fibers

Gyeongho Son, Jiwon Choi, Youngjae Jeong, and Kyoungsik Yu[†]

*School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea*

(Received July 20, 2020; Revised August 5, 2020; Accepted August 6, 2020)

In this study we report a wet-etching-based fabrication method for adiabatic optical-fiber tapers (OFTs), and describe their adiabaticity and HE₁₁ mode evolution at a wavelength of 1550 nm. The profile of the fabricated system satisfies the adiabaticity properties well, and the far-field pattern from the etched OFT shows that the fundamental HE₁₁ mode is maintained without a higher-order mode coupling throughout the tapers. In addition, the measured far-field pattern agrees well with the simulated result. The proposed adiabatic OFTs can be applied to a number of photonic applications, especially fiber-chip packages. Based on the fabricated adiabatic OFT structures, the optical transmission to the inversely tapered silicon waveguide shows large spatial-dimensional tolerances for 1 dB excess loss of ~60 μm (silicon waveguide angle of 1°) and insertion loss of less than 0.4 dB (silicon waveguide angle of 4°), from the numerical simulation. The proposed adiabatic coupler shows the ultrabroadband coupling efficiency over the O- and C-bands.

Keywords: Fiber tapers, Adiabaticity, Fiber coupler, Integrated photonics

OCIS codes: (060.2280) Fiber design and fabrication; (060.4005) Microstructured fibers; (130.3120) Integrated optics devices

실리콘 도파관과 광섬유 사이의 효율적인 광 결합을 위한 아디아바틱 광섬유 테이퍼

손경호 · 최지원 · 정영재 · 유경식[†]

한국과학기술원 전기및전자공학부
Ⓣ 34141 대전광역시 유성구 대학로 291

(2020년 7월 20일 받음, 2020년 8월 5일 수정본 받음, 2020년 8월 6일 게재 확정)

본 논문에서는 아디아바틱(adiabatic) 광섬유 테이퍼의 습식 식각 기반 제조 방법에 대해 보고하고 1550 nm 파장에서의 아디아바틱 성질 및 테이퍼드 광섬유에서 HE₁₁ 모드의 전개에 대해 설명하고자 한다. 제조한 결과물은 아디아바틱 성질을 잘 만족하며 far field 패턴 측정 결과로부터 테이퍼 전체에 걸쳐 고차 모드 커플링 없이 기본 HE₁₁ 모드가 유지되는 것을 보여준다. 측정된 far field 패턴의 경우에 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 검증하였고, 테이퍼드 광섬유는 다수의 광자 응용에 적용할 수 있으며 특히 광섬유-칩 패키지에 적용할 수 있다. 시뮬레이션을 통해서 제작한 아디아바틱 광섬유 테이퍼를 모델링한 후 역방향 테이퍼드 실리콘 도파관 사이의 광 전송률 시뮬레이션을 살펴보았을 때, 1 dB 초과 손실(실리콘 도파관 각도 1°)이 약 ~60 μm 길이라는 여유있는 공간 치수 공차를 보이며, 0.4 dB 미만의 삽입 손실(실리콘 도파관 각도 4°)을 보인다. 또한, 본 연구자들이 제시하는 아디아바틱 커플러가 O 밴드 및 C 밴드 대역을 넘어, 초 광대역 결합 효율 가능성을 보이는 것을 확인하였다.

Keywords: 광섬유 테이퍼, 아디아바틱 성질, 광섬유 커플러, 집적 포토닉스

OCIS codes: (060.2280) Fiber design and fabrication; (060.4005) Microstructured fibers; (130.3120) Integrated optics devices

I. 서 론

광섬유 테이퍼(optical fiber taper, OFT) 및 소산장(evanescent field)에 기반한 에너지 전달은 굴절률 및 모드 사이즈

차이가 매우 큰 다른 두 도파관 사이에서 효율적인 광 전달을 위해 매우 필수적인 요소이다^[1]. 이러한 소산장을 이용한 광 커플링(coupling)은 파장 크기 혹은 그 이하의 크기를 갖는 도파관에서 대부분의 광 에너지가 도파관 외부에 분포하

[†]E-mail: ksyu@kaist.edu, ORCID: 0000-0003-4901-7519

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

는 것을 이용하는 것이며, 특히 광섬유의 가장 기본 모드인 HE₁₁ 모드와 직사각형 단면 유전체 도파관의 TE₀₀ 모드를 결합하기 위해서는 이러한 테이퍼드 광섬유의 소산장이 매우 핵심적인 역할을 한다^[1]. 이 외에도 OFT에서 생성하는 소산장은 광 센싱^[2-5], 광 유전학^[6,7], 원자 측정^[8-10], 비선형 광학^[11,12] 등 매우 다양한 곳에 활용할 수 있다.

이와 같이 OFT는 그 사용 범위가 매우 넓고 응용 가능성이 매우 높아 최근 많은 연구자들의 관심을 받고 있다. 그중에서도 아디아바틱 성질을 보이는 OFT는 집적회로의 도파관에 매우 많은 기여를 할 수 있기에^[1,13], 매우 첨예한 아디아바틱 OFT 제작에 많은 노력이 필요하다. 이러한 OFT를 제작하기 위해서 가열 및 풀링(heating-and-pulling) 방법이 매우 활발하게^[14,15] 이용되지만, 첨예한 광섬유 테이퍼를 균일하게 대량생산할 수 있는 방법이 현재까지는 미흡한 편이다.

본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하고자 매우 첨예하면서 동시에 대량생산이 가능한 화학적 식각을 이용한 새로운 OFT 제작법을 제시하고자 한다. 화학적 식각법은 기존의 가열 및 풀링 방법에 비해 많이 성숙한 방법은 아니지만, 제작이 매우 간단하다는 장점이 있다. 또한, 재현성이 매우 좋아서 대량생산에 매우 적합하다고 할 수 있다. 본 연구자들이 자체적으로 고안한 OFT 제작 방법^[16]을 설명한 후 아디아바틱한 성질 검증을 위해 far field를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다. 제작한 OFT의 아디아바틱한 성질을 확인한 후 이를 시뮬레이션 구조물에 대입하여 집적 광소자에 매우 활발하게 이용하는 실리콘 광 도파관과의 광 전달률을 확인한다. 본 논문에서는 실험적인 결과를 보이지 않지만, 제작한 OFT의 집적 도파관에 고효율 광 전달의 가능성을 확인하고자 한다.

II. 화학 식각을 이용한 OFT 제작

광통신 C-밴드에서 일반적으로 사용하는 SMF-28 등과 같은 상용화된 광섬유를 준비한다. 이때 광섬유는 코어와 클래딩의 반경이 각각 약 4.15 μm와 62.5 μm이다. 클래딩 외부는 폴리머 자켓으로 감싸여 있으며 이 폴리머 자켓이 제작 방법의 핵심이다. 이렇게 준비한 광섬유 가닥을 49% 농도의 불화수소산(HF) 용액에 담가준다. 이때 시간에 따른 광섬유 식각 모식도는 그림 1(a)-1(d)와 같다. 시간이 지나면서 폴리머 자켓을 통과하며 클래딩 영역이 제거된다. 이때, 코어 영역이 식각되기 전까지 코어 영역은 유지되며(그림 1(b)) 그 제작 결과물은 그림 1(b')과 같다. 그림 1(c)와 같이 시간이 흘러 약 70에서 75분 사이에서 광섬유 말단부가 큰 모양을 이룰 때 식각을 멈춘다. 이때 전반적인 OFT의 형태가 그림 1(c')와 같이 매우 첨예하고 아디아바틱한 성질을 보인다고 할 수 있다.

식각 과정은 크린룸에서 진행되었으며 식각 환경은 온도 ~23°C 및 습도 50%에서 진행되었다. 식각 시간이 환경에 따라 매우 민감하게 변화할 수 있으나, 본 실험 조건에서는 약 70에서 75분 사이에서 아디아바틱 성질을 잘 보이는 OFT가

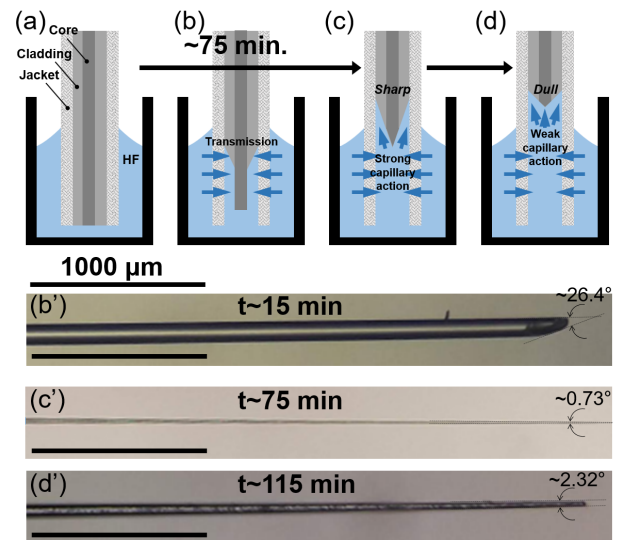


Fig. 1. (a-d) OFT fabrication procedures. (b'-d') Microscope images of fabricated OFTs with different etching conditions and its corresponding schematic diagram.

형성되었다. 제작 시간이 그림 1(b)와 같이 부족한 경우, 불충분한 광섬유 클래딩 및 코어 영역 제거로 인하여 원기둥 형태를 보이며 그 결과는 그림 1(b')과 같다.

식각 시간이(위 실험 조건에서) 약 70에서 75분 이상이 되면 광섬유의 클래딩 영역은 물론, 코어 영역까지 모두 제거된다. 이때 원기둥에서 큰 모양으로 변화하는데(그림 1(c)) 핵심적인 역할을 하는 것은 외부 폴리머 자켓과 광섬유 사이에서 발생하는 모세관 현상이다^[17]. 이로 인하여 광섬유 가운데 영역보다 가장자리에서 더욱 강하게 식각 과정이 일어나며 그림 1(c')과 같이 매우 첨예한 모양을 보이게 되어 제작 결과물이 소산장 생성에 매우 유리하다고 할 수 있다^[18].

하지만 이러한 식각 과정이 지나치게 길어지게 되면 그림 1(d)와 같이 광섬유 팁이 수면 위를 향하게 되고, 그 결과 폴리머 자켓 내부의 수압이 점차 약해진다. 그 결과 가장자리 영역의 식각 속도가 감소하게 되며 점차 그 각이 둔해지게 된다. 또한, 낮은 수압과 오랜 식각 시간으로 인해 그림 1(d')과 같이 OFT 표면 거친 정도가 좋지 않게 되며 아디아바틱 성질이 점차 훼손됨과 동시에 산란 손실을 예상할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로, 외부 폴리머 자켓을 이용한 SMF-28 식각의 최적 시간은 광섬유 단부의 위치가 급격히 변화하며 수면에 도달하기 전 영역(그림 1(c))이다. 이 시간은 본 크린룸 제작 환경에 비추어 보았을 때, 70~75분이 적절하다고 할 수 있다.

III. 아디아바틱 성질 및 재현성 검증

아디아바틱 성질의 기준은 길이 단위로 유도를 할 수 있다. 식각한 코어 영역이 유지된 OFT의 경우, 테이퍼 단위 길이를 다음과 같이 식으로 표현할 수 있으며^[19], $z_1 \approx \rho(z)/\Omega(z) > z_b(z)$, $\rho(z)$ 와 $\Omega(z)$ 는 각각 OFT의 곡소 부위의 반경과 테이퍼

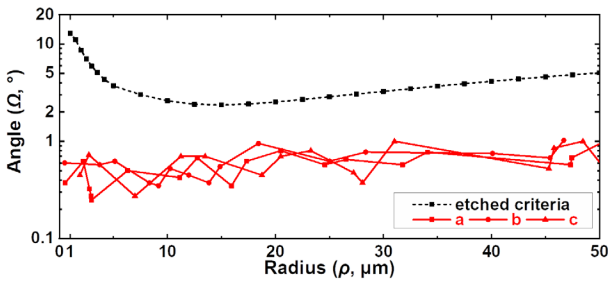


Fig. 2. Fiber taper half-angle (Ω) as a function of the local OTF's radius ρ along the OFTs. The black dashed line indicates the adiabaticity criterion $z_i > z_b$ at a wavelength of 1550 nm, and red symbols and lines represent the measurement results from typical fabricated OFTs.

링 각도라고 할 수 있고 $z_b(z)$ 는 두 모드 사이의 beat length이다. 커플링 길이는 가장 기본 모드인 HE_{11} 모드와 이와 동일한 방향각 번호를 갖는 그다음 고차 모드인 HE_{12} 모드와의 유효 굴절률 차이로 발생하는 길이이고, 위 기준이 만족될 경우 해당 OFT는 아디아바틱한 성질을 보유한다고 할 수 있다. 이러한 아디아바틱 성질의 기준은 그림 2에 검은 점선으로 표시하였으며 SMF-28이 지원하는 파장 영역 중에서 관심 있는 C-밴드 영역 중 하나인 1550 nm 파장에 대해 계산하였다. 그래프의 x축은 국소 지점의 반경이며 y축은 국소 지점의 각도이다.

본 논문에서 제시한 OFT 제작 방법 결과물의 아디아바틱 성질을 검증하기 위하여 영상 처리(image processing) 이미지 분석을 통한 통상적인 세 가닥(a, b, c)의 OFT 결과물 분석을 하였다. 각 영역별로 반경-테이퍼링 각도를 분석하여 그림 2와 같이 붉은색 그래프로 표시하였다. 이때 1550 nm 파장에서 세 가닥 a, b, c의 OFT가 모두 아디아바틱한 성질을 보인다. 즉, 해당 파장에서 기본 모드인 HE_{11} 모드가 해당 OFT에 인가될 경우 OFT 단부까지 진행하면서 다른 고차 모드와의 커플링 없이 진행할 수 있으며 그 결과 기본 모드의 손실이 없으며, 매우 효과적으로 HE_{11} 모드를 단부에 전달할 수 있고, 소산장 생성을 통하여 집적 광회로 도파관에 빛을 효과적으로 전달할 수 있는 기회를 획득하였다.

이미지 분석을 통한 제작 결과물의 외형적 분석 외에, OFT에서 방사되는 far field 검증법 또한 아디아바틱 성질 검증에서 유효성을 갖는다¹¹. 먼저, 아디아바틱 성질을 보이는 OFT를 3차원 유한차분시간영역법(finite-difference time-domain, FDTD) 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 테이퍼링 각도 Ω 가 2.5°일 때, 반경 10 μm 미만에서 아디아바틱 성질을 보인다. 이러한 결과에 기반하여 FDTD 시뮬레이션 공간에서 2.5°의 리니어(linear) 테이퍼 구조에 1550 nm 파장의 HE_{11} 모드를 인가한 후 자유공간에서 far field를 분석하면 파장에 따라 결과가 그림 3(a)과 같이 HE_{11} 모드가 유지되어 검출된다. 제작 결과물 중 샘플 a에 대하여 1500 nm 파장을 가이딩한 후 CCD 타입의 빔 프로파일러(bean profiler, Newport)를 이용하여 빔을 확인할 경우,

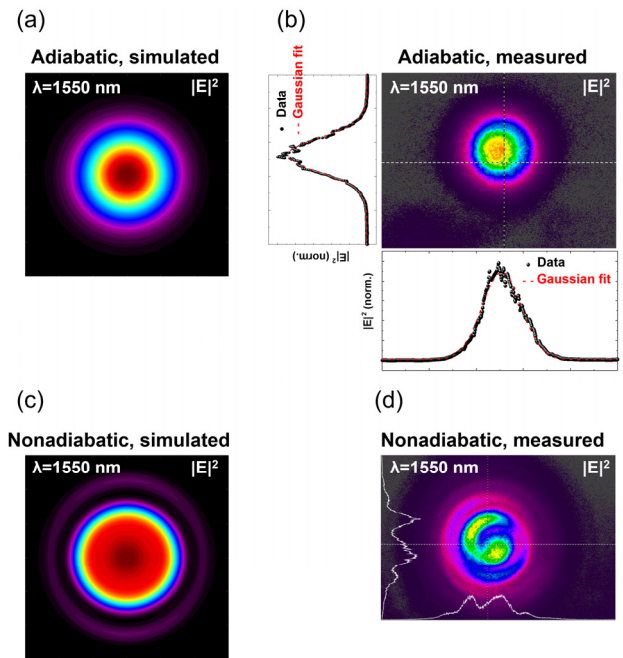


Fig. 3. (a) Simulated far-field patterns with a wavelength of 1550 nm from a typical adiabatic OFT. (b) A measured far-field pattern shows a Gaussian profile using 1550 nm light. (c) Simulated far-field patterns with a wavelength of 1550 nm from a nonadiabatic OFT. (d) A measured far-field pattern from a typical nonadiabatic OFT.

그림 3(b)와 같이 그 모양이 가우시안(Gaussian) 형태로 관측되며 R^2 (coefficient of determination, 결정계수) 값이 0.99 이상인 것으로 보아 대부분의 far field 에너지가 HE_{11} 모드에 분포한 것으로 확인할 수 있다. 즉, 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 실험 결과에서도 제작한 OFT 결과물이 아디아바틱한 것을 알 수 있다.

반면 그림 3(c)와 같이 아디아바틱하지 않은 OFT에서는 HE_{11} 모드가 HE_{12} 모드 등의 고차 모드로 커플링되어 노드가 생성된 것을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있으며 이를 통해 HE_{11} 모드의 손실이 발생한 것을 추측할 수 있다. 마찬가지로 제작 결과물 중 아디아바틱하지 않은 OFT를 생성하여 far field를 분석할 경우 그림 3(d)와 같이 실험 결과에서도 또한 고차 모드가 생성된 것을 검증할 수 있다. 이러한 far field 분석을 바탕으로, 본 논문에서 제시하는 OFT 제작법이 유효한 것을 알 수 있으며, 아디아바틱한 성질을 유지하는데 큰 기여를 한다고 할 수 있다.

IV. 실리콘 도파관과의 광 커플링

앞서 아디아바틱 OFT 제작 및 성질 검증을 한 후, 이를 이용하여 그림 4와 같이 실리콘 도파관에 광 커플링을 시도한다. 그림 4(a)의 [side view]에서 보는 것처럼 전각(2Ω)이 약 1°인 OFT를 모사하고 높이 220 nm의 실리콘 도파관을 준비한다. 가장 범용적으로 쓰이는 silicon-on-insulator (SOI) 웨

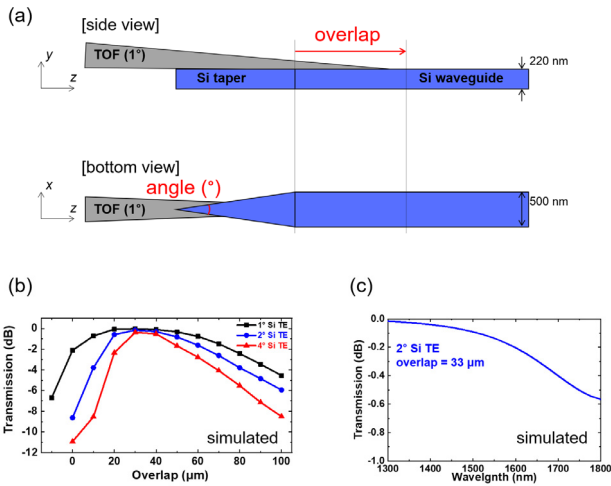


Fig. 4. (a) Schematic of OFT-silicon waveguide coupler. (b) Simulated transmission between an OFT and a silicon waveguide. (c) Simulated result of a broadband wavelength range of the evanescent field based adiabatic OFT-silicon waveguide coupler.

이퍼 두께인 220 nm를 이용했으며, [bottom view]에서 보는 바와 같이 실리콘 도파관의 폭 또한 500 nm로 모사하였다. 두 유전체 도파관인 OFT와 실리콘 도파관 사이에서 겹치는 길이(overlap)에 따라 분석하고자 하며, 이때 실리콘 도파관의 공정 오차를 고려하여 각도(angle)에 대한 분석 또한 동시에 진행한다.

그림 4(b)에서 보는 바와 같이 overlap 길이가 약 20 μm 미만에서 실리콘 angle에 상관없이 광 효율이 급격하게 떨어지며 약 60 μm의 overlap 길이보다 길 경우, 역시 광 전달률이 떨어지는 것을 알 수 있다. 본 시뮬레이션은 Lumerical사의 MODE - mode expansion (EME solver)을 통해 진행했고 OFT의 가장 기본 모드인 HE₁₁ 모드와 실리콘 도파관의 가장 기본 모드인 TE₀₀ 모드 사이에서 발생하는 산란계수(S-parameter) 값을 이용하였다. 실리콘 도파관의 전각이 1°인 경우, 1 dB 초과 손실(excess loss) 영역이 overlap 길이 약 60 μm 정도로 기준에 다양한 커플러 방식(end-fire coupler 및 grating coupler 등)에 비해 높은 허용 오차를 보인다^[13]. 실리콘 도파관의 전각이 더 첨예할수록 1 dB 초과 손실에 대한 허용 오차 길이는 더욱 클 것으로 예상하며, 전각이 4°일 경우에도 손실은 0.4 dB 미만으로 매우 높은 효율을 보인다고 할 수 있다.

광대역 파장 특성을 확인하기 위하여 O-밴드와 C-밴드를 넘어, 1300 nm부터 1800 nm까지 광 효율을 확인해 보았다. 이 역시 OFT의 HE₁₁ 모드 및 실리콘 도파관의 TE₀₀ 모드를 이용하였으며 EME solver의 산란계수를 활용하여 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션 조건은 실리콘 전각이 약 2°이고 overlap 길이가 약 33 μm로 설정하였고 그 결과는 그림 4(c)와 같이 O-밴드는 물론 C-밴드에서 모두 고효율을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 매우 광대역인 것을 알 수 있다. 이러한 광대역 커플링 효율의 결과를 얻을 수 있는 것은 OFT 및 실리콘 도파관의 광 커플링이 파장의 정확한 위상(phase)

을 요구하는 커플링 방법이 아니기에 공간적 측면에서의 고차원뿐 아니라 광대역 작동 파장 범위의 공차를 보인다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는, 화학적 식각을 이용한 새로운 방법의 OFT 제작법을 설명하였고 그 결과물의 아디아바틱 성질 및 특성을 파악하기 위해 이론적 분석뿐 아니라 결과물의 영상 처리, 시뮬레이션 및 측정을 통한 far field 검증을 하였다. 그 결과 제작한 OFT는 아디아바틱 성질이 우수할 뿐 아니라, 동시에 복수의 다발을 제작하여도 모두 아디아바틱 조건에 부합하기에 대량 생산에 큰 장점을 보인다고 할 수 있다.

이렇듯 HE₁₁ 모드가 매우 효과적으로 OFT의 단부까지 잘 전달되고 소산파의 발생이 잘 되는 성질을 이용하여 광 센싱, 바이오 조작, 집적광학 패키징 등 다양한 응용에 큰 기여할 수 있는 발판이 되었다고 볼 수 있다. 특히, 제시한 OFT의 광학적 성질을 검증한 이후 응용의 한 예로 HE₁₁ 모드의 실리콘 도파관의 TE₀₀ 모드와의 결합이 매우 효과적으로 잘 이루어지는 것을 공간적 허용 오차가 큰 것을 확인함과 동시에 추후 광통신의 핵심인 파장 분할 다중화에 기여할 수 있는 광대역 커플링의 가능성을 보여주었고 제시하는 OFT와 실리콘 도파관 사이의 커플링 방식이 제작비 절감 가능성 및 기능적으로 우수할 가능성을 모두 보여주었다고 할 수 있다. 이를 바탕으로 OFT는 집적 광학 분야에서의 새로운 빌딩블록(building block)이 될 가능성이 높다고 저자들은 생각한다.

감사의 글

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

References

1. T. G. Tiecke, K. P. Nayak, J. D. Thompson, T. Peyronel, N. P. de Leon, V. Vuletić, and M. D. Lukin, "Efficient fiber-optical interface for nanophotonic devices," *Optica* **2**, 70-75 (2015).
2. S. Zhu, F. Pang, S. Huang, F. Zou, Y. Dong, and T. Wang, "High sensitivity refractive index sensor based on adiabatic tapered optical fiber deposited with nanofilm by ALD," *Opt. Express* **23**, 13880-13888 (2015).
3. P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambarian, and M. Mansuripur, "Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels," *Opt. Lett.* **30**, 1273-1275 (2005).
4. G. Son, Y. Jung, and K. Yu, "Liquid droplet sensing using twisted optical fiber couplers fabricated by hydrofluoric acid

- flow etching,” in *Proc. 25th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS25)* (Jeju, Korea, Apr. 2017) pp. 1-4.
5. G. Son, Y. Jung, and K. Yu, “Tapered optical fiber couplers fabricated by droplet-based chemical etching,” *IEEE Photon. J.* **9**, 7105208 (2017).
 6. F. Pisanello, L. Sileo, I. A. Oldenburg, M. Pisanello, L. Martiradonna, J. A. Assad, B. L. Sabatini, and M. De Vittorio, “Multipoint-emitting optical fibers for spatially addressable in vivo optogenetics,” *Neuron* **82**, 1245-1254 (2014).
 7. F. Pisanello, G. Mandelbaum, M. Pisanello, I. A. Oldenburg, L. Sileo, J. E. Markowitz, R. E. Peterson, A. D. Patria, T. M. Haynes, M. S. Emara, B. Spagnolo, S. R. Datta, M. De Vittorio, and B. L. Sabatini, “Dynamic illumination of spatially restricted or large brain volumes via a single tapered optical fiber,” *Nat. Neurosci.* **20**, 1180-1188 (2017).
 8. T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut, W. P. Bowen, A. S. Parkins, T. Kippenberg, K. J. Vahala, and H. J. Kimble, “Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator,” *Nature* **443**, 671-674 (2006).
 9. V. I. Balykin, K. Hakuta, F. Le Kien, J. Q. Liang, and M. Morinaga, “Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber,” *Phys. Rev. A* **70**, 011401 (2004).
 10. T. G. Tiecke, J. D. Thompson, N. P. de Leon, L. R. Liu, V. Vuletić, and M. D. Lukin, “Nanophotonic quantum phase switch with a single atom,” *Nature* **508**, 241-244 (2014).
 11. T. A. Birks, W. J. Wadsworth, and P. S. J. Russell, “Super-continuum generation in tapered fibers,” *Opt. Lett.* **25**, 1415-1417 (2000).
 12. M. A. Foster, A. C. Turner, M. Lipson, and A. L. Gaeta, “Nonlinear optics in photonic nanowires,” *Opt. Express* **16**, 1300-1320 (2008).
 13. G. Son, S. Han, J. Park, K. Kwon, and K. Yu, “High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits,” *Nanophotonics* **7**, 1845-1864 (2018).
 14. L. Tong, R. R. Gattass, J. B. Ashcom, S. He, J. Lou, M. Shen, I. Maxwell, and E. Mazur, “Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding,” *Nature* **426**, 816-819 (2003).
 15. J. M. Ward, A. Maimaiti, V. H. Le, and S. N. Chormaic, “Contributed Review: Optical micro-and nanofiber pulling rig,” *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 111501 (2014).
 16. G. Son and K. Yu, “High-efficiency power transfer for silicon-based photonic devices,” *Proc. SPIE* **10526**, 1052616 (2018).
 17. P.-G. De Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré, *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves* (Springer, NY, USA, 2013).
 18. P. N. Moar, S. T. Huntington, J. Katsifolis, L. W. Cahill, A. Roberts, and K. A. Nugent, “Fabrication, modeling, and direct evanescent field measurement of tapered optical fiber sensors,” *J. Appl. Phys.* **85**, 3395-3398 (1999).
 19. J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, and F. Gonthier, “Tapered single-mode fibres and devices. I. Adiabaticity criteria,” *IEE Proc. J - Optoelectron.* **138**, 343-354 (1991).