

근접장 주사 광학현미경을 이용한 광 도파로 특성 연구

지원수 · 김대찬 · 이승걸[†] · 오범환 · 이일항

인하대학교 정보통신공학부, 마이크로 포토닉스 연구 센터

(⊕) 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

(2001년 10월 22일 받음. 2002년 7월 25일 수정본 받음)

광 도파로를 따라 전파하는 빛의 특성을 측정하기 위해 근접장 주사 광학현미경(Near-field scanning optical microscope, NSOM)으로 광 도파로의 표면에 형성된 에바네슨트 파(evanescent wave)의 분포를 측정하였다. 사용된 NSOM은 photon scanning tunneling microscope 방식으로 본 연구의 목적에 적합하도록 직접 제작한 것이다. 광원 파장 1550 nm에서 단일 모드 다중 모드 채널형 광 도파로에 대해 도파로 표면에 형성된 에바네슨트 파의 분포를 측정하였으며, 3차원 빔전파방법(Beam Propagation Method)으로 계산된 수치 해석 결과와 비교하여 제작된 NSOM의 유용성을 확인하였다. 또한 다중 모드 채널형 광 도파로의 에바네슨트 파 분포를 측정하여 전파되는 두 모드 간의 간섭 현상을 직접적으로 확인할 수 있었다.

주제어 : NSOM, Photonic device, Waveguide, evanescent field.

I. 서 론

광자 소자의 개발에 있어서 광 도파로(optical waveguide)의 전파 특성을 정확히 이해하고 예측하는 것은 매우 중요하다. 그러나 기존 방식으로는 광 도파로의 전파 특성을 직접 측정한다는 것이 불가능하므로, 지금까지는 주로 수치 해석적 방법에 의존해 왔다. 그러나 어떠한 수치 해석적 방법이라도 부분적인 소자를 포함하므로 이를 통해 소자의 전파 특성을 정확히 예측한다는 것은 쉽지 않다. 더욱이 실제 제작된 소자의 형상이 당초의 설계와 완벽히 일치한다는 것은 기대하기 어려우므로, 설계된 형상을 가정하는 수치 해석적 방법의 예측 결과는 실제 소자의 특성과 일치할 수 없을 것이다. 따라서 보다 복잡하고 미세한 구조를 가지는 광자 소자의 연구 및 개발이 요구되고 있는 현실에서, 실제 제작된 소자의 특성을 정량적으로 정밀하게 측정할 수 있는 방법이 절실히 요구되고 있다.

최근, 근접장 주사 광학현미경(Near-field Scanning Optical Microscope: 이하 NSOM 이라 함.)을 이용하여 광자 소자의 전파 특성을 직접 측정하는 연구가 제안 시도되었으며,^[1-4] 이 방법은 광자 소자의 연구에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. NSOM은 광원 파장에 비하여 매우 작은 구경의 광섬유 탐침(optical fiber probe)으로 시료 표면에 근접한 영역을 주사함으로써, 시료 표면 근방에 존재하는 에바네슨트 파(evanescent wave)의 분포를 직접 측정할 수 있으며, 동시에 고전적인 광학현미경이 갖는 희질 한계를 뛰어넘는 높은 분해능을 얻을 수 있다.^[5-6] 이러한 특성을 이용하면 광자 소자의 광 도파로 표면에 형성되는 에바네슨트 파의 분포를 직접 측정하여 광 도파로의 모드 분포(mode profile)와 전파 특성을 결정할 수 있게 된다. 또한, NSOM을 이용한 측정 과정에서 시료 표면

형상도 동시에 측정할 수 있으므로 제작 공정에서 발생할 수 있는 소자의 형상 결함 등도 알 수 있게 된다.^[7]

지금까지의 관련 연구는 발광소자의 발광 특성을 측정하는 경우^[8-10]와 광 도파로의 표면에 형성되는 에바네슨트 파를 측정하여 전파 특성을 고찰하는 경우^[1-4]로 나누어볼 수 있다. 이러한 연구들은 PMT(photomultiplier tube)를 검출기로 사용할 수 있는 633 nm에서 830 nm의 파장 영역에 대부분 집중되었으며, 광통신용 광원 파장에 해당하는 1550 nm 파장 영역에 대한 연구는 반도체 도파로 연구를 제외하고는 거의 없는 형편이다.^[1-4] 따라서, 본 연구에서는 NSOM을 이용한 광통신용 실리카 도파로 소자의 전파 특성에 관심을 갖고, 이에 적합한 NSOM 측정 장치를 제작하였으며, 파장 1550 nm 영역에서 실리카 광 도파로 소자의 에바네슨트 파 분포를 측정하여 3D-FD BPM(3 Dimensional finite difference beam propagation method) 결과와 비교하여 보았다. 이러한 연구는 실질적으로 많이 사용되고 있는 광통신용 광자 소자에 대한 연구에 쉽게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

2장에서는 에바네슨트 파와 관련된 측정 원리를 간략히 다루며, 3장에서는 광자 소자 측정용 NSOM 측정 장치가 갖추어야 할 조건과 본 연구에서 제작 사용된 NSOM의 구성 및 특징을 설명하였다. 4장에서는 NSOM 측정 장치를 이용하여 단일 모드(single mode) 및 다중 모드(multimode) 광 도파로의 전파 특성을 조사하여 수치 해석 결과와 비교하였다.

II. 측정 원리

광자 소자는 여러 종류의 광 도파로 들로 구성되며, 이러한 광 도파로의 전파 특성은 광 도파로의 구조, 물성 및 입사광의 파장 등에 의하여 결정된다. 전파 특성 즉, 전파 손실 및 모드 분포 등을 이해하기 위해 지금까지는 주로 수치 해석적

[†]E-mail: sglee@inha.ac.kr

방법에 의존하거나, 도파로 출력단에서의 near-field pattern을 관찰해 왔다. 그러나 도파로의 코어(core) 및 클래딩(cladding) 경계면에 형성되는 에바네슨트 파의 분포를 측정할 수 있다면, 도파로의 전파 특성을 파악할 수 있을 것이다.

내부 전반사가 일어나고 있는 유전체 경계면(코어-클래딩 경계면)으로부터 수직거리 z 에서의 전기장 진폭 $|E|$ 와 에바네슨트 파의 세기 I 는

$$|E| = |E_0| \exp\left(-\frac{2\pi z}{\lambda_0} \sqrt{\left(\frac{n_{eff}}{n_t}\right)^2 - 1}\right) \quad (1)$$

$$I(z) = I_0 \exp\left(-\frac{z}{d}\right) \quad (2)$$

과 같이 표현된다.^[4] 여기서 E_0 와 I_0 는 광 도파로 내부에서 도파로의 코어와 클래딩의 경계면으로 입사하는 빛의 전기장 진폭 및 빛의 세기이며, λ_0 는 진공에서 진행광의 파장, n_t 는 클래딩의 굴절률이고, n_{eff} 는 모드의 유효 굴절률이다.^[4] 따라서 광원 파장, 코어와 클래딩의 굴절률 비가 변하지 않는 경우, 도파로 표면에 형성되는 에바네슨트 파의 세기는 경계면으로부터의 수직 거리에만 의존하게 되며, 경계면으로부터 멀어질 수록 지수 함수적으로 감쇠되어 급격히 소멸된다. 식 (2)에서 d 는 경계면에서의 에바네슨트 파의 세기 I_0 와 비교해서 e^{-1} 배 감쇠 되는 거리로서 감쇠 길이(decay length)라고 하며

$$d = \frac{\lambda_0}{4\pi \sqrt{n_{eff}^2/n_t^2 - 1}} \quad (3)$$

로 다시 쓸 수 있다.

NSOM 탐침을 내부전반사가 일어나고 있는 유전체 경계면에 근접시키면, 경계면에 형성된 에바네슨트 파는 탐침에 의하여 산란되어 일부가 진행파로 변환되므로 탐침에 연결된 광섬유나 다른 수단에 의해 측정이 가능하게 된다. 이러한 원리의 NSOM 을 PSTM(Photon scanning tunneling microscope)이라고 한다. NSOM 탐침을 통해 검출되는 빛의 세기가 시료 표면에 형성된 에바네슨트 파의 세기에 비례한다면, 도파로의 코어와 클래딩의 경계면에 형성된 에바네슨트 파의 세기 분포를 직접 측정할 수 있으며, 이를 통해 도파로의 전파 특성을 파악할 수 있게 된다. 물론 탐침에 의해 에바네슨트 파의 분포가 교란될 수 있으므로, 엄밀하게는 식 (1)은 수정되어야 하지만, NSOM 탐침이 경계면에 아주 근접하지 않으며, 탐침이 매우 작다고 가정하여 본 연구에서는 이러한 효과를 고려하지 않았다.

III. 측정용 NSOM 장치의 구성

일반적인 NSOM 장치와 달리, 광자 소자 측정을 위한 NSOM 측정 장치는 다음과 같은 특성을 가져야 한다. 첫째 광도파로의 모드 분포나 전파 특성은 마이크론 단위의 변화이므로 높은 공간 분해능이 요구되지는 않지만, 비교적 넓은 영역을 측정 혹은 주사할 수 있어야 한다. 둘째, 광자 소자의 형상은 수백 혹은 수천 nm 이상의 큰 단차를 가지므로, 탐침 보호를 위해 정밀한 높이 제어 과정이 필요로 된다. 셋째, 외

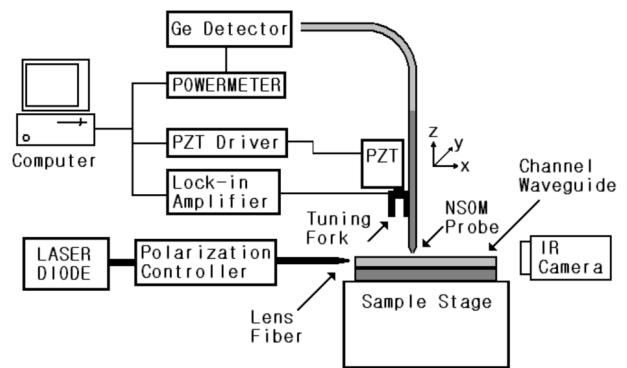


그림 1. NSOM 측정장치의 개략도(x축: 도파 방향, y축: 도파로 횡 방향, z축: 도파로 높이 방향).

부 광원의 출력광을 광자 소자에 입력시켜야 하므로, 측정 과정에서 정렬상태가 정밀하게 유지되어야 한다. 그러므로 시료를 주사하는 방식 대신 탐침을 주사하는 방식이 적용되어야 할 것이다. 넷째, 내부전반사가 일어나는 광 도파로 표면의 에바네슨트 파를 측정해야 하므로 PSTM방식으로 동작해야 한다. 따라서 도파로에 대한 입사 광원 외에 별도의 조명을 필요로 하지 않는다. 끝으로 광통신용 광자 소자의 경우, 광원 파장이 1550 nm로 비교적 길기 때문에 보통의 PMT를 검출기로 사용할 수 없게 된다. 그러므로, 1550 nm대역의 검출기 성능을 고려할 때 입사 광원의 출력이 일반적인 다른 측정 방식에 비해 상대적으로 높아야만 한다.

본 연구에서 사용된 광 소자 측정용 NSOM 장치는 상술한 요구 조건을 만족시키도록 설계 되었다. 그림 1에 실험 장치의 개략도를 보였다. 광원으로부터 출력된 빛은 편광조절기를 통과한 후 편광유지 광섬유에 연결된 lens fiber를 이용하여 시료로 사용된 채널형 광 도파로에 결합한다. 광 도파로의 전파 특성을 측정하는 것이 목적이므로 빛을 도파로 측면으로부터 도파로 내로 결합(butt coupling)시키기 위해 광 도파로를 5축 정밀 결합장치(precision 5 axis coupling system) 위에 장착하고 도파로 출력단을 적외선 카메라로 관찰하면서 정밀하게 정렬하였다. 이러한 시료 고정 장치는 매우 복잡한 구성을 가지며 측정과정에서 정렬상태가 유지되어야 하므로, NSOM 탐침이 3차원 방향으로 주사되는 방식을 채택하였으며, 이때 탐침을 주사하기 위하여 컴퓨터에 의하여 제어되는 PZT translator를 이용하였다. 사용된 탐침은 측면에 Al-Cr이 증착된 tapered optical fiber(Nanonic; Al/Cr-100)이며 그 구경은 100 nm이다. 일반적으로 높은 분해능을 얻기 위한 NSOM 탐침은 구경이 수십 nm 이지만 본 연구에서는 높은 분해능이 요구되지 않으며, 1550 nm의 근적외선 레이저를 광원으로 사용하기 때문에 큰 구경의 탐침을 사용하여 검출신호의 세기를 높임으로써 PMT를 사용하지 못하는 대신 IR 검출기(Newport; 818-IR)를 사용할 수 있도록 하였다. 측정 과정에서 도파로에 입사하는 빛의 편광상태는 TM인 경우로 한정하였다.

시료 표면과 탐침 사이의 거리제어에는 수정 진동자를 이용한 shear force feedback 방법^[11-13]이 적용되었다. 본 연구에서 사용된 시료의 단자는 2 μm 내외로 일반적인 NSOM측정

시료에 비해 큰 불연속을 가진다. 따라서 탐침 손상을 막기 위해 높이제어에 관한 다양한 방법들을 시험하고 적용할 수 있도록 수정 진동자로부터 얻은 신호를 바로 되먹임하는 회로를 구성하지 않고, 탐침을 일정 높이로부터 시료에 근접시키면서 측정된 shear force에 대한 정보를 컴퓨터로 비교하면서 제어하는 방식을 채택하였다. 물론 이로 인해 주사시간이 길어지는 단점은 있지만, 보다 정교한 거리제어를 할 수 있게 된다.

Shear force를 이용하는 탐침의 높이 제어에서 시료 표면과 탐침 사이의 간격을 절대적으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 실험에서는 간격에 관한 절대적 기준을 얻기 위해 탐침이 시료 표면과 접촉할 때까지 탐침을 시료 표면에 근접시키면서 수정 진동자로부터 얻은 신호가 어떻게 감소하는지를 조사하였다. 이렇게 측정된 값과 실제 높이 제어과정에서 측정된 수정 진동자 신호를 상대 비교하여 현재 시료 표면과 탐침 사이의 간격이 얼마인지를 간접적으로 유추하였다. 물론 이러한 유추과정의 정확성은 광섬유 탐침과 수정진동자의 부착 상태, 부착 지점과 광섬유 탐침까지의 길이, 시료 표면 상태 등에 영향을 받을 수 있지만, 간격에 따른 shear force의 변화 경향으로 미루어 볼 때 5 nm 이상의 오차가 발생되지

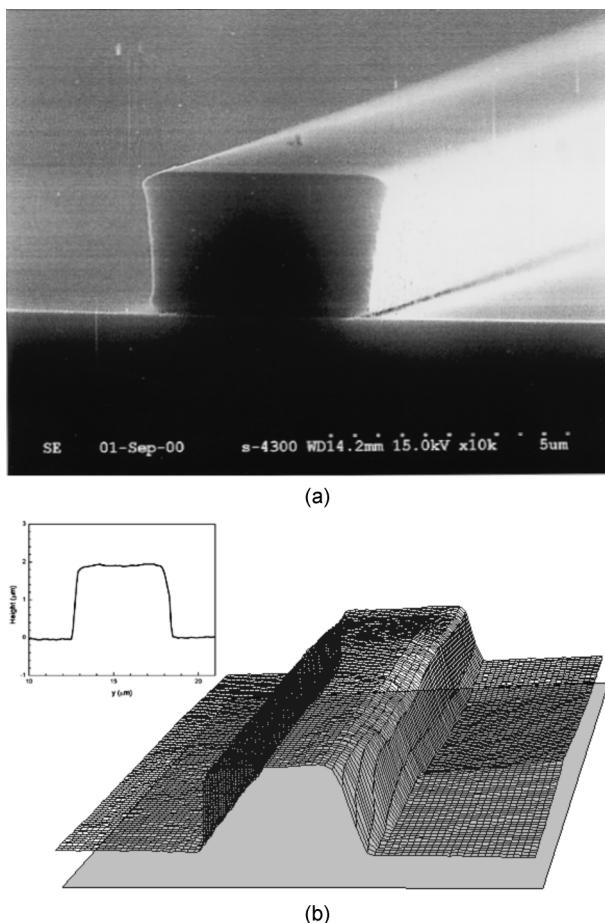


그림 2. 도파로 높이가 2 μm 인 채널형 광 도파로의 (a) 주사전자 현미경 영상과 (b) 2차원 shear force image($10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$).

않는 것으로 판단된다. 이러한 기준을 통해 주사과정 동안 시료 표면과 탐침 사이의 간격은 25 nm로 유지하였다.

본 연구에 사용된 시료는 콜-겔(sol-gel) 방법으로 제작된 채널형 실리카 광 도파로이며, 기판은 굴절률이 1.444(@1550)인 용융 석영이고, 도파로의 코어는 Zr이 첨가된 실리카로서 프리즘 커플러(Metricon 2010)로 측정한 굴절률은 1.5007(@1550)이었다. 그럼 2는 다중 모드 도파로의 형상을 주사전자 현미경과 NSOM으로 각각 측정한 결과이다. 주사전자 현미경으로 측정된 결과인 그림 2(a)로부터 도파로의 폭은 약 5 μm 이고 기판으로부터의 높이는 2.0 μm 임을 알 수 있었다. 그림 2(b)는 NSOM의 광섬유 탐침을 시료 표면과 약 25 nm거리로 유지하면서 도파로를 횡, 종 방향으로 주사하여 얻은 2차원 shear force image이고, 포함된 작은 그림은 도파로의 단면 구조를 나타낸다. 두 가지 측정 결과를 비교하여 시료 표면과 탐침 사이의 거리제어가 적절히 이루어짐을 확인할 수 있었다.

IV. 측정 결과 및 고찰

먼저, NSOM 장치로 측정한 신호가 에바네슨트 파를 측정한 것인 지의 여부를 판별하기 위하여, 단일 모드 도파로의 코어-클래딩 경계면과 탐침 사이의 거리(z)에 따른 측정 신호의 변화를 조사하였다. 만일 에바네슨트 파를 측정한 것이라면, 거리가 증가함에 따라 측정 신호는 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보일 것이며, 진행파를 측정한 것이라면, 거리 변화에 대하여 측정 신호는 거의 변화하지 않을 것이다.

그림 3은 도파로 경계면으로부터 탐침을 점차 멀어지게 하면서, 탐침에 연결된 광섬유를 통해 측정한 빛의 세기 변화를 대수 눈금으로 표시한 것이다. 빛을 도파로 입력단의 코어로 입사시키는 과정 중에 일부의 빛이 코어 이외의 영역으로 전파될 수 있다. 그러므로 이러한 빛을 차단하기 위해 입력단 근방에 가리개를 설치하였으며, 빛이 입사한 위치로부터 약 20 mm 떨어진 지점에서 측정을 시도하였다. 빛의 측정은 도파로의 중심 축을 지나는 한 점(점 B)과 이 점을 중심으로 도파

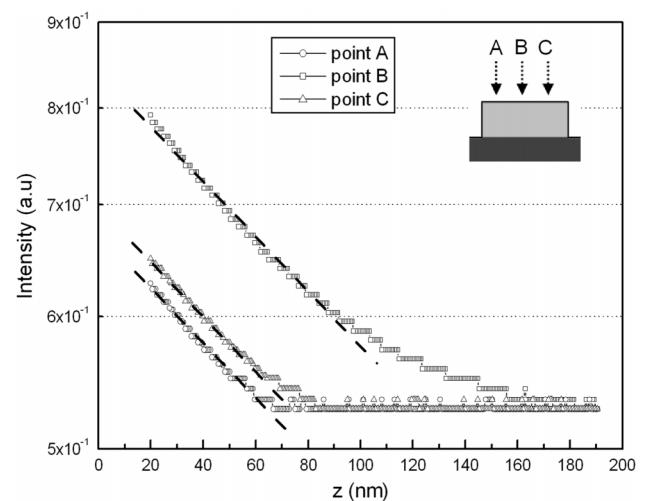


그림 3. 시료 표면과 탐침 사이의 거리 증가에 따른 측정된 광 신호 크기 변화.

로의 횡 방향으로 좌우 각 한 점(점 A와 C)씩 모두 세 점에서 이루어졌다. 빛의 세기는 도파로 중심점에서 가장 크게 측정되었고 좌우의 두 점은 이보다 작은 값으로 측정되었다. 세 경우 모두 탐침과 시료 표면간의 거리가 60 nm 이내인 범위에서는 측정 신호가 지수 함수적으로 감쇠하는 경향을 보였으며 이 구간의 측정값을 식 (2)에 곡선 맞춤(curve fitting)하여 구한 감쇠 거리도 서로 일치되는 경향을 보였다. 그림에서 측정값은 위에 점선 형태로 그려진 직선들은 세 경우의 평균 감쇠거리 112.7 nm에 해당하는 감쇠 곡선을 의미한다. 식 (3)으로부터 구한 이론적인 감쇠거리 114.1 nm와 실험적으로 결정된 감쇠 거리는 거의 일치함을 알 수 있다.^[1] 따라서 제작된 NSOM 측정장치는 도파로의 코어-클래딩 경계면에 분포하는 에바네ஸ트 파를 제대로 측정할 수 있음을 알 수 있다. 다만, 시료 표면과 탐침 사이의 거리가 60 nm 이상인 경우에는 검출된 신호가 더 이상 변화하지 않음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 에바네ஸ트 파의 세기가 아주 약해져서 사용된 검출기로는 더 이상 빛을 검출할 수 없게 된 때문이다. 따라서 탐침과 시료표면의 거리는 일정한 값 이하로 근접되어야 함을 알 수 있다.

다음으로 빛이 광 도파로를 따라 전파하는 과정에서 빛의 손실 및 모드 분포를 알아보기 위해 빛이 도파로에 입사하는 지점으로부터 10 mm에서 22 mm까지 2 mm 간격의 각 위치에서 탐침을 단일 모드 도파로의 횡 방향으로 주사하여 각 위치에서의 에바네ஸ트 파의 분포를 측정하였다.

그림 4(a)와 (b)는 입사광이 TM 편광일 때, 각 위치에서 측정한 에바네ஸ트 파의 분포와 각 점에서 횡 방향으로 주사하여 얻은 도파로의 단면 구조이다. 이때 광 도파로의 높이는 1.7 μm 으로서 광장 1550 nm에 대하여 단일모드로 설계된 것이다. 한편, 그림 4(c)는 동일 조건에 대해 전파과정에서 손실이 없다고 가정한 3D-FD BPM의 계산 결과이다. 측정 결과는 수치 해석결과와 마찬가지로 도파로의 코어 영역 내에서는 삼각함수 분포를 나타내고 있으며, 도파로의 양 경계로부터 멀어질수록 지수 함수적으로 감쇠하는 거동을 보이고 있다. 또한, 도파로 측면 경계에서 세기 분포의 불연속점이 있음을 확인할 수 있다. 다만, 그림 4(a)의 각 결과에 대한 곡선에서 잡음 성분들이 일부 나타나는데, 시료 표면의 미세한 오염 또는 형상의 결함에서 발생하는 산란과 높이 제어의 불확실성에 의한 것으로 생각된다. 한편, 그림 4(a)의 결과는 광 도파로 축을 따라 서로 다른 점에 대한 에바네ஸ트 파의 크기를 측정된 것이므로, 이로부터 광 도파로의 전파 손실을 결정할 수 있게 된다. 전파 손실은 각각의 곡선에 대하여 빛의 세기를 적분한 결과를 비교하여 결정해야 하지만, 측정된 지점에서의 모드 분포가 같은 모양을 가지므로 단순히 최고점의 값 만을 비교하여 전파 손실을 계산하였으며, 그 결과는 약 1.3 dB/cm 이었다.

그림 5는 도파로 높이가 2.03 μm 인 다중 모드로 설계된 광 도파로의 측정 결과이다. 그림에서 (a)와 (b)는 도파로 축을 따라 측정된 에바네ஸ트 파의 2차원 분포와 도파로 형상을 나타내는 2차원 shear force image를 나타낸다. 이 결과는 입력 단으로부터 약 10 mm 정도 떨어진 지점으로부터 100 μm 구간에 걸쳐 측정된 것이므로, 입력광이 도파 모드들로 모두 전

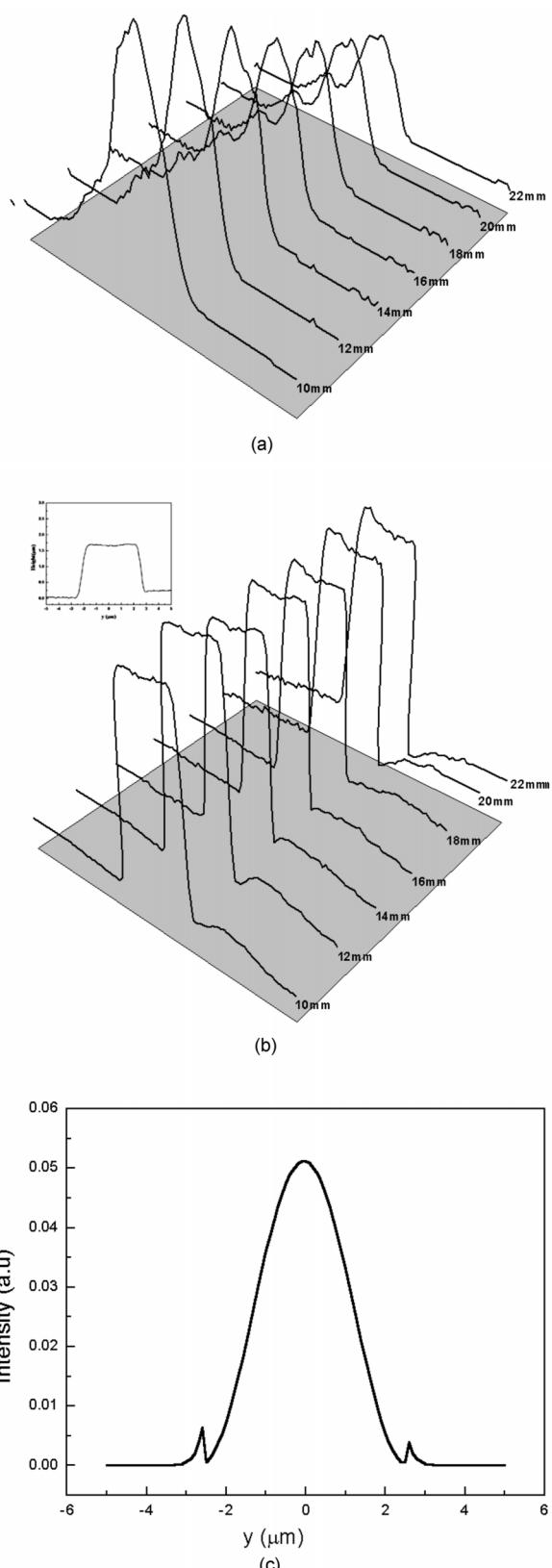


그림 4. (a) 입사광의 편광상태가 TM모드일 때 광 도파로를 횡 방향으로의 주사하여 측정한 에바네ஸ트 파의 세기 분포와 (b) 각 점에 대한 횡 방향 shear force image (c) 동일 조건에 대해 3D-FD BPM으로 계산한 에바네ஸ트 파의 세기 분포.

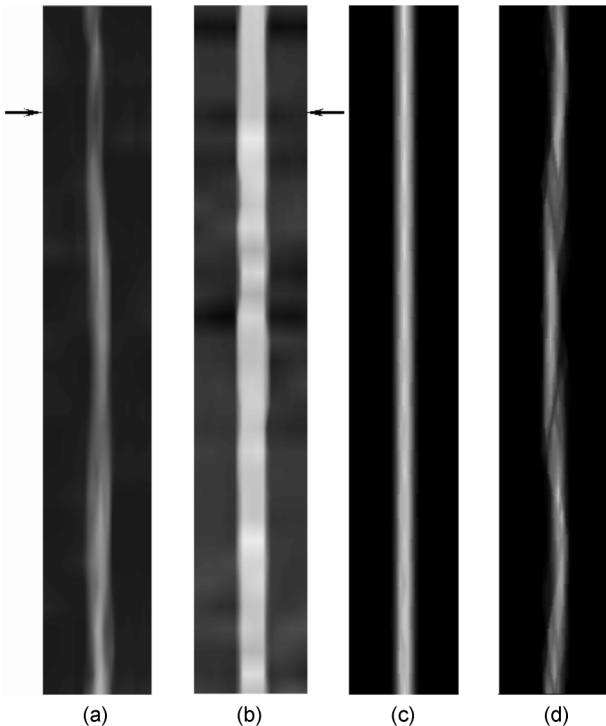


그림 5. (a) 도파로 높이가 $2.03\text{ }\mu\text{m}$ 인 다중 모드 광 도파로에서 $100\text{ }\mu\text{m}$ 전파거리에 대한 시료 표면 에바네슨트 파의 2차원 분포와 (b) 2차원 shear force image ($20\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$). 입사 조건에 따른 3D-BPM의 계산 결과, (c) Lens fiber가 도파로 중앙에 위치할 때와 (d) Lens fiber가 오른쪽 $1\text{ }\mu\text{m}$ 에 위치 할 때(진행거리 $900\text{ }\mu\text{m}\sim 1000\text{ }\mu\text{m}$).

환된 이후의 결과에 해당한다. 그림 4의 결과와 달리, 에바네슨트 파의 단면 분포가 도파로 축을 따라 변화하는 것으로 볼 수 있다. 이를 통해 측정된 도파로는 단일 모드가 아니라 다중 모드 도파로임을 알 수 있고, 간단한 모드 해석을 통해서도 이러한 구조를 갖는 채널형 실리카 도파로는 2개의 전파모드가 존재하는 다중 모드 광 도파로임을 확인할 수 있었다.

진행 광의 분포가 도파로 축을 따라 변화하는 실험적 결과는 빔전파방법에 의한 전산 시늉을 통해 간단히 설명될 수 있다. 그림 5에서 (c)와 (d)는 도파로 축을 따라 전파하는 진행 광의 분포를 빔전파방법으로 계산한 결과이다. (c)는 도파로 입력단의 코어 중심에 입력광이 정확히 입력된 경우의 결과로서, 도파로 축에 따른 진행 광의 단면 분포가 변하지만, 축에 대해 좌우 대칭적인 분포를 유지한다. 하지만, (d)에서처럼 입력광이 도파로 코어 중심으로부터 약 $1\text{ }\mu\text{m}$ 정도 벗어난 지점으로 입사하는 경우는 도파로 축을 따라 진행하는 진행 광의 분포가 측정 결과처럼, 도파로 축을 따라서도 변하지만, 빛의 변화가 주기적으로 좌, 우측에 쏠리는 현상을 예측할 수 있다. 이로부터 측정된 도파로가 다중 모드임을 알 수 있고, 입력 조건에 따라서 동일한 도파로의 진행 상황이 달라질 수 있음을 예측할 수 있다. 참고로 그림 5(a)에서 화살표로 표시된 부분의 에바네슨트 파의 단면 분포와 바로 그 위치에서 도파로의 단면 형상은 그림 6(a), (b)에 각각 표시하였다.

산란에 의한 효과라면 전파과정 중에 도파로 양 측면에서

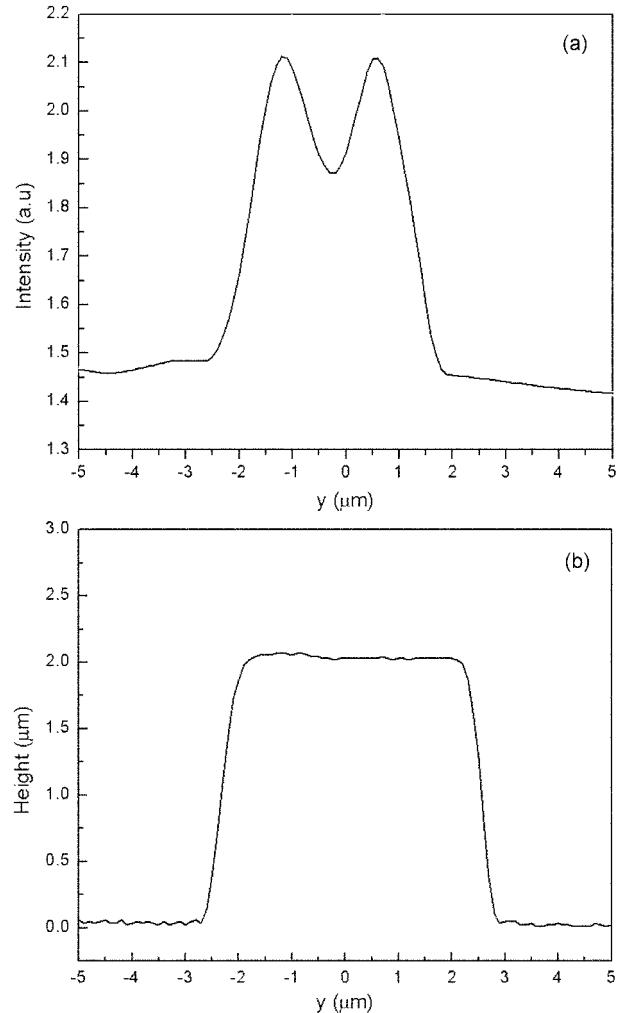


그림 6. (a) 도파로 높이가 $2.03\text{ }\mu\text{m}$ 인 다중 모드 광 도파로를 횡 방향으로 주사한 에바네슨트 파 분포와 (b) 대응하는 횡 방향 shear force image(그림 5에서 화살표로 표시된 영역).

에바네슨트 파의 세기가 높은 구역이 유지되어야 하겠지만 측정 결과는 모드간 간섭에 의해 보강 혹은 소멸 간섭을 일으키며 전파되는 특징을 확인할 수 있다. 이러한 측정 결과는 NSOM을 이용한 광자 소자의 특성 연구가 다중모드 광 간섭 소자(Multi-Mode Interference Device) 등의 특성을 직접 측정하는 경우에 활용될 수 있음을 보여준다.

V. 결 론

광자 소자의 전파 특성을 직접 측정할 목적으로 측정용 NSOM 장치를 제작하였으며, 이를 이용하여 채널형 광 도파로 표면의 에바네슨트 파의 분포를 측정하였다. 파장 1550 nm 에서 단일모드 광 도파로의 에바네슨트 파의 분포를 측정함으로써 도파 모드의 모드 분포와 전파 손실과 같은 전파 특성을 결정할 수 있었으며, 이는 수치해석 결과와도 일치하였다. 또한, 다중모드 도파로에 대한 측정 결과로부터 다중모드 도파로를 전파하는 모드들 사이의 간섭 현상을 직접 관찰할

수도 있었다. 근적외선 영역에서 측정이 이루어졌기 때문에 검출기로 PMT 대신 IR 검출기를 사용할 수 밖에 없었다. 따라서, 측정 신호가 매우 약하기 때문에 탐침을 시료 표면에 최대 60 nm 이내로 접근 시켜야만 했다.

이러한 측정방법을 활용하면 최근 활발히 연구되고 있는 마이크로 링 레이저(micro ring Laser), 배열 도파로 소자(AWG), 다중모드 광 간섭소자(MMI), 방향성 결합기(directional coupler), 광자 결정 소자(photonics crystal) 등, 다양한 광자 소자의 특성을 정량적으로 평가할 수 있게 될 것이며, 보다 정확한 광자 소자의 설계 및 연구 개발에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 현재 다양하게 연구되고 있는 수 많은 수치 해석적 기법들에 대한 실제적인 검증 수단으로도 활용될 수 있을 것이다. 향후, 응용범위의 확대를 위해 시료의 종류에 따른 탐침의 접근 방법이 다양한 각도에서 연구되어야 할 것으로 보이며, 본 연구에 이어, 고체 상태의 클래딩을 갖는 경우, 코어 클래딩 경계의 에비네슨트 파의 분포를 NSOM으로 측정할 수 없음에 착안하여, 향후 고체 클래딩과 같은 굴절률의 유체를 코어에 도포한 경우에 대한 연구가 수행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 2000학년도 인하대학교의 교수 연구진홍비(INHA-21445) 지원과 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 1999-2-302-012-5) 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] H. E. Jackson, S. M. Lindsay, C.D. Poweleit, D. H. Naghski, G. N. De Brabander, and J. T. Boyd "Near field measurements of optical channel waveguide structures," *Ultramicroscopy*, 61, pp. 295-298, 1995.
- [2] S. Bourzeix, "Near-field optical imaging of light propagation in semiconductor waveguide structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 8, pp. 1035-1037, 1998.
- [3] C. D Poweleit, "Near-field scanning optical microscopy measurements of optical intensity distributions in semiconductor channel waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 23, pp. 3471-3473, 1996.
- [4] X. Borrise, D. Jimenez, N. Barniol, F. Perez-Murano, and X. Aymerich, "Scanning near-field optical microscope for the characterization of optical integrated waveguides," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 370-374, 2000.
- [5] E. Betzig, J. K. Trautman, T. D. Harris, J. S. Weiner, and R. L. Kostelak, "Breaking the diffraction barrier-optical microscopy on a nanometeric scale," *Science* 251, pp. 1468-1470, 1991.
- [6] E. Betzig and R. J. Chichester, "Single molecules observed by near-field scanning optical microscopy," *Science* 262, pp. 1422-1425, 1993.
- [7] M. A. Paesler, and P. J. Moyer, "Near-field optics: theory, instrumentation, and applications," New York, Wiley-Interscience, 1995.
- [8] B. B. Goldberg, M. S. Unlu, W. D. Herzog, H. F. Ghaemi, and E. Towe, "Near-field optical studies of semiconductor heterostructures and laser diodes," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal on*, vol. 1, no. 4, pp. 1073-1081, 1995.
- [9] G. Beister, F. Bugge, G. Erbert, J. Maege, P. Ressel, J. Sebastian, A. Thies, and H. Wenzel, "Monomode emission at 350 mW and high reliability with InGaAs/AlGaAs (/spl lambda=/1020 nm) ridge waveguide laser diodes," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 8, pp. 778-779, 1998.
- [10] W. D. Herzog, B. B. Goldberg, and M. S. Unlu, "Beam steering in narrow-stripe high-power 980-nm laser diodes," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, no. 12, pp. 1604-1606, 2000.
- [11] Khaled Karrai, and Robert D. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Appl. Phys.* vol. 66, no. 14, pp. 1842-1844, 1995.
- [12] Y. T. Yang, D. Heh, P. K. Wei, and W. S. Fann, "Vibration dynamics of tapered optical fiber probes," *J. Appl. Phys.* vol. 81, no. 4, pp. 1623-1627, 1997.
- [13] Konstantin B. Shelimov, Dmitri N. Davydov, and Martin Moskovits, "Dynamics of a piezoelectric tuning fork/optical fiber assembly in a near-field scanning optical microscope," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 2, pp. 437-443, 2000.
- [14] S. Xu, X. Wu, W. Guo, and Z. Li. "Scattering characteristics of rectangular coaxial line discontinuities," *IEE Proc-Microw. Antennas Propag.*, vol. 142, no. 3, pp. 257-264, 1995.

Characterization of optical waveguides with near-field scanning optical microscope

Wonsoo Ji, Dae-Chan Kim, Seung-Gol Lee[†], Beom-hoan O, and El-hang Lee

School of Information and Communication Engineering, Inha University, Inchon 402-751, KOREA

[†]E-mail: sglee@inha.ac.kr

(Received October 22, 2001 ; revised manuscript received July 25, 2002)

The propagation characteristic of an optical waveguide was investigated by measuring with a near-field scanning optical microscope (NSOM) the evanescent field formed at the neighbor of its core-cladding interface. For this purpose, the NSOM system was developed specially as a form of Photon scanning tunneling microscope. The evanescent-field distributions of several channel waveguides were measured at the wavelength of 1550 nm, and the usefulness of the system was verified by comparing experimental results with simulation results. In particular, the interference phenomena of the guided modes during their propagation along a multimode channel waveguide could be observed directly from the measured evanescent-field distribution.

Classification codes : OE.010, SM.030.