

테이퍼 구조를 이용한 플라즈모닉 도파로의 광학 특성

김두근^{1,a}, 김홍승², 오금윤², 김선훈¹, 기현철¹, 김태연¹, 김희종¹, Ping Ma³,
Christian Hafner³, 최영완²

¹ 한국광기술원 광바이오연구센터

² 중앙대학교 전기전자공학부

³ ETH Zurich

Optical Characteristics of Plamonic Waveguide Using Tapered Structure

Doo Gun Kim^{1,a}, Hong-Seung Kim², Geum-Yoon Oh², Seon-Hoon Kim¹, Hyun-Chul Ki¹,
Tae-Un Kim¹, Hwe Jong Kim¹, Ping Ma³, Christian Hafner³, and Young-Wan Choi²

¹ Korea Photonics Technology Institute, Photonic-Bio Research Center, Gwangju 500-779, Korea

² School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

³ Laboratory for Electromagnetic Field and Microwave Electronics, ETH Zurich, Zurich 8092, Switzerland

(Received January 23, 2014; Revised February 3, 2014; Accepted February 19, 2014)

Abstract: We have investigated the optical properties of plamonic waveguide with tapered structure based on InP material for photonic integrated circuit(PIC). The proposed plasmonic waveguide is covered with the Ag thin film to generate the plasmonic wave on metallic interface. The optical characteristics of plasmonic waveguide were calculated using the three-dimensional finite-difference time-domain method. The plasmonic waveguide was fabricated with the lengths of 2 to 10 μm and the widths of 400 to 700 nm, respectively. The plasmonic mode and optical loss were measured. The optimum plasmonic length is 10 μm and widths are 600 and 700 nm in the fabricated waveguide. This plasmonic waveguide can be directly integrated with other conventional optical devices and can be essential building blocks of PIC.

Keywords: Surface plasmon resonance, Plamonic waveguide, Tapered structure, PIC, FDTD

1. 서 론

최근 정보통신의 급속한 발전에 따른 정보량의 급증 현상으로 인해 초고속 정보통신의 기술에 대한 요구

가 기하급수적으로 늘어나고 있다. 이러한 요구를 수용하기 위해 광통신에 사용되는 광소자가 많이 개발되고 있는데, 더욱 빠른 속도로 보다 많은 정보량을 전달하기 위하여 기존의 광소자 기술에 다양한 분야의 기술이 융합되고 있는 것이 현실이다. 또한, WDM, TDM 등의 기술을 활용하여 초고속 광대역, 광 정보통신 전송, 스위칭 기술을 개발하고 있으나, Tbps 급 통신을 위해서는 고속화 송수신 모듈 등의 집적화, 미세화, 고밀도화가 구현되어야 하므로, 이러

a. Corresponding author; emblemdo@kopti.re.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 전송 데이터 처리의 한계를 극복하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 따라서 초고속 정보통신 시대에 걸맞은 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보 처리의 초고속화를 구현하기 위해서는 신개념의 전광소자 (All-optical) 및 부품들의 개발이 필요하다. 이는 현재까지 적용되고 있는 반도체, 유전체 및 금속선을 근간으로 한 기존의 전자 소자들이 속도나 전력 소모에서 거의 한계 성능을 보이고 있기 때문이다. 기존 전자 소자의 한계를 극복하면서 광집적화 (photonic integrated circuit, PIC)를 구현하기 위해서는 다른 광소자와 집적이 가능하면서 광신호를 변조할 수 있는 전광소자 구조이어야 한다. 이러한 전광소자로서 표면 플라즈몬 공명 (surface plasmon resonance, SPR) 현상을 응용하여 많은 연구가 진행되고 있는데 [4-6], 표면 플라즈몬 공명은 빛이 금속 표면과의 상호작용에 의해 발생하는 양자역학적 광전 현상을 말한다. 광자 (photon)에 의해 수송되는 에너지는 특정 조건하에서 금속 표면상의 전자, 즉, 플라즈몬으로 전달되는데, 에너지의 전달은 빛의 특정한 공명 파장에서만 이루어진다. 이때의 공진파장은 광자가 가진 양자 에너지와 플라즈몬의 양자 에너지 준위가 일치하게 되는 파장이다. 표면 플라즈몬 (surface plasmon)이란 유전상수의 실수항이 서로 반대의 부호를 가지는 경계면을 따라 진행하는 전하밀도의 진동파를 말한다. (-)극성을 갖는 금속과 (+)극성을 갖는 유전체의 경계에서 존재하며, 전하밀도 진동은 고속으로 가속된 전자나 광파에 의하여 여기될 수 있다. 표면 플라즈몬은 TM (transverse magnetic) 편광된 파이며, 필드는 금속표면에서 가장 큰 값을 가지면서 금속에서 멀어짐에 따라 지수적으로 감소한다. 이러한 특징 때문에 표면 플라즈몬 파는 금속 표면에 존재하는 다양한 물질을 이용하여 플라즈몬 파를 제어하거나, 또는 금속 표면에 존재하는 물질을 검출할 수 있는 센서 등으로 활용되어 왔다 [7].

본 논문에서는 금속 표면에 존재하는 플라즈몬 파를 외부 입력광을 이용하여 제어할 수 있는 플라즈모닉 광도파로 구조를 제안하였고, 이때 입출력 도파로는 기존의 일반적인 구조를 이용하였으며, 플라즈모닉 광도파로는 플라즈몬 파를 여기시킬 수 있는 수백 나노 두께의 도파로를 적용하였다. 제안된 플라즈모닉 광도파로에서 플라즈몬 파의 생성은 유한차분 시간 영역 (finite difference time domain, FDTD) 방법을 통해 모의 실험하였고, 또한, 제안된 플라즈모닉 광도파로 구조를 실험적으로 구현하여 전광소자로서 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 플라즈모닉 모드 분석

그림 1은 본 연구에서 제안하는 플라즈모닉 도파로 구조인데, 기본적으로 입출력 도파로와 가운데 플라즈모닉 도파로는 테이퍼 구조를 이용해서 연결하였고, 플라즈모닉 도파로에서 플라즈몬 파를 형성하기 위해서 플라즈모닉 도파로 양옆에 금속을 위치시켰다. 제작에 이용된 입출력 도파로의 폭은 $1.6\ \mu\text{m}$ 이고, 테이퍼의 길이는 $10\ \mu\text{m}$ 이다. 그리고 플라즈모닉 도파로의 폭은 400, 500, 600, 700 nm의 4가지 구조를 선택했고, 플라즈몬 도파로의 길이는 2, 4, 6, 8, $10\ \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 따라서 입출력 도파로에서 테이퍼의 폭은 $1.6\ \mu\text{m}$ 이고, 플라즈모닉 도파로에서 테이퍼의 폭은 400에서 700 nm까지 플라즈모닉 도파로 폭에 맞추어 가변이 되도록 하였다.

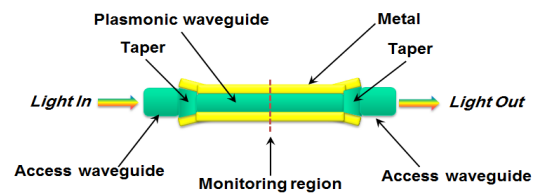


Fig. 1. Plasmonic waveguide.

제안된 구조를 제작하기 위해서는 플라즈모닉 도파로 구조에서 플라즈몬 파의 형성 및 도파 손실에 대한 구조적인 최적화가 선행되어야 하는데, 금속과 유전체의 경계면에서의 표면 플라즈몬 파를 유도하기 위해서 FDTD 방법을 이용해서 계산하였다. 금속과 유전체의 경계면에서의 표면 플라즈몬파라 불리는 표면 전자기파는 1950년대 처음 관측되었다 [8]. 빛에 대한 표면 플라즈몬파의 여기 현상은 감쇠 전반사의 원리를 사용하여 1968년 Otto와 Kretschmann, Raether에 의해 발견되었다 [9,10]. 일반적으로 금속 내의 자유 전자들은 $\sim 10^{23}\ \text{cm}^{-3}$ 정도의 높은 밀도를 가지는 전자 플라즈마로 설명된다 [11]. 전자기적 표면파는 도체내의 이러한 전자 플라즈마에 외부의 전자기파가 결합하여 같이 진동하는 현상을 말한다. 유전상수가 각각 $\epsilon_1(>0)$, $\epsilon_2(\epsilon_{1r}+i\cdot\epsilon_{1i})$ 인 유전체와 금속이 평행하게 접해 있는 구조에서 TM 편광된 전자기파 각각의 성분은 Maxwell 방정식을 통해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_{eff}(x,y,z,t)} \left[\frac{\partial \bar{H}_y}{\partial z} - \bar{J}(x,y,z,t) \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_{eff}(x,y,z,t)} \left[-\frac{\partial \bar{H}_y}{\partial x} - \bar{J}(x,y,z,t) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{H}_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} \right], \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff}(x,y,z,t) = \epsilon_0 \epsilon_r(\infty). \quad (4)$$

일반적인 마이크로파의 해석이 아닌 표면 플라즈몬 공명을 해석하기 위해서는 금속의 유전율의 적용이 중요한 고려사항이 된다. 하지만 1966년 K. S. Yee에 의해 제안되어진 FDTD 알고리즘은 [12] 음의 유전율을 적용하는데 적합하지 않으므로 [13], 금속의 음의 유전율을 FDTD에 적용시키기 위해서는 금속에 대한 매개 변수가 필요하게 된다. 이러한 금속의 음의 유전율을 FDTD에 적용하기 위해서 Drude model를 이용하여 해석하였다 [14]. Drude model로 유전율을 다시 표시하게 되면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_0)} \approx \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} + i \frac{\gamma_0 \omega_p^2}{\omega^3}. \quad (5)$$

여기서 ω_p 는 플라즈마 주파수이고, γ_0 는 전자 감쇠율이다. 이를 적용하여 Maxwell 방정식 중 전류밀도 \bar{J} 에 관한 식을 다시 정리하면,

$$\frac{\partial \bar{J}}{\partial t} + \gamma_0 \bar{J} = \epsilon_0 \omega_p^2 \bar{E}, \quad (6)$$

와 같이 된다. 그림 2는 플라즈모닉 도파로 구조에서 입력 도파로에 입사된 광이 테이퍼를 통해서 플라즈모닉 도파로 영역에 입사되어 플라즈몬 파를 형성하는 결과를 FDTD 방법으로 계산한 그래프이다. 계산에 사용된 매개 변수로 플라즈모닉 도파로는 InP 기판에 광도파로 구조가 성장된 구조이며 전체 유효굴절률은 3.291이고, 플라즈모닉 파를 형성하기 위한 금속 박막의 유전율은 $\epsilon_m = -116.9 + 11.67i$ 이다. 이때 금속의 물질은 은 (Ag)이고, 두께는 50, 200 nm이며, 입사된 빛은 광통신에서 사용되는 1,550 nm의 파장을 가지는 레이저라고 가정했다. 이때 플라즈모닉 도파로의

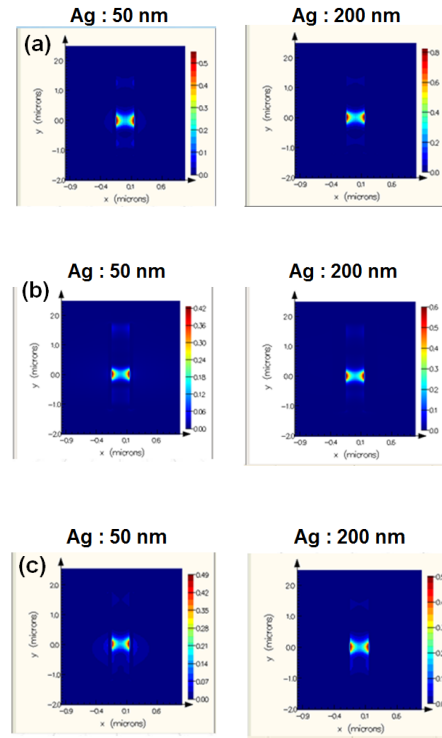


Fig. 2. Guiding mode of plasmonic waveguide. (a) plasmonic length of 2 μm , (b) plasmonic length of 4 μm , and (c) plasmonic length of 6 μm .

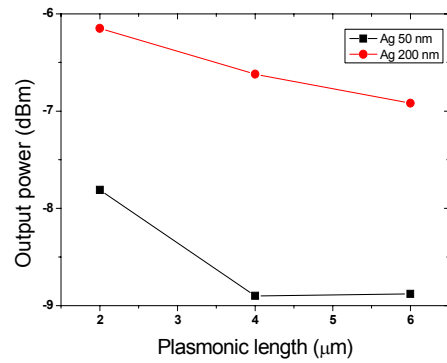


Fig. 3. Output power of plasmonic waveguide.

폭은 500 nm이고, 플라즈모닉 도파로의 길이를 2 μm 에서 6 μm 까지 가변해서 계산하였다. 플라즈모닉 도파로 제작에서는 길이가 10 μm 까지 제작했지만 3차원 FDTD 계산 시간을 고려해서 6 μm 까지 계산하였다. FDTD 방법을 통해서 제안된 구조에서 플라즈몬 모드가 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3은 플라즈모닉 도파로 구조에서 플라즈몬 파가 형성되었을 때, 출력되는 파워를 플라즈모닉 도파로의 길이에 따라서 계산한 결과이다. 플라즈모닉 도파로의 양옆을 둘러싸고 있는 금속의 두께가 너무 얇을 때에는 플라즈몬 파의 손실로 인해서 길이에 따라서 선형적인 결과를 얻기가 어려웠고, 200 nm의 두께에서는 플라즈모닉 도파로의 길이가 클수록 손실이 증가하는 선형적인 결과를 얻을 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 본 연구에서 사용된 플라즈모닉 도파로 에피 구조도이다. 광도파로의 가이드 부분은 InGaAsP 물질로 두께는 0.35 μm 이고, 1.4 μm 에 해당하는 밴드 갭을 가진다. 위와 아래의 클래딩 영역은 n과 p형의 InP물질로 되어있다. 제안된 구조에서 0.1 μm InGaAs 전극 콘택 층이 있는데, 이 층은 향후 광집적화 시스템에서 능동 광소자나 수동 광소자와 집적화를 위해서 필요한 부분이다. 플라즈모닉 도파로의 주변은 2.5 μm 까지 식각이 되었고, 주변에 Ag를 이용해서 코팅을 하였다.

0.1 μm p⁺InGaAs
1.5 μm p InP
500 Å u- InP
100 Å u- InP
3500 Å Q(1.4 μm)
1.0 μm n InP
n⁺ InP Substrate

Fig. 4. Epi-structure of plasmonic waveguide.

그림 5는 플라즈모닉 도파로의 제작 공정이다. 초기에 IAD (ion beam-assisted deposition) 증착 장비를 이용해서 웨이퍼에 SiO₂를 200 nm를 증착하고, E-beam lithography 공정을 이용해서 플라즈모닉 도파로의 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성된 웨이퍼를 RIE (reactive-ion etching) 장비를 이용해서 CF₄ 플라즈마로 SiO₂를 식각하고, ICP (inductively coupled

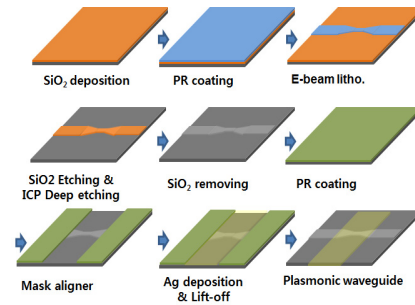


Fig. 5. Fabrication process of plasmonic waveguide.

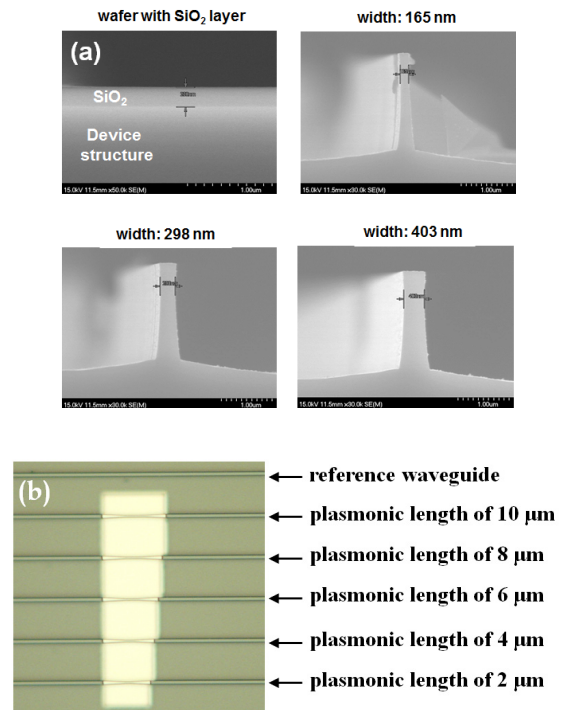


Fig. 6. Fabricated plasmonic waveguide. (a) SEM and (b) fabricated waveguide.

plasma) 장비를 이용해서 플라즈모닉 도파로를 2.5 μm 까지 식각하였다. 다음 공정으로는 일반 콘택 노광 장비를 이용해서 은이 증착될 부분의 패턴을 형성하고, E-beam evaporator 장비를 이용해서 Ag를 500 nm를 증착하고, 마지막으로 lift-off 공정을 통해서 제작을 완료하였다. 증착된 Ag는 상부에는 500 nm를 증착하였지만 플라즈몬 파가 형성되는 플라즈모닉 도파로의 양옆에는 100 nm가 증착되는 것을 확인하였다.

그림 6(a)는 플라즈모닉 도파로의 식각된 사진이다.

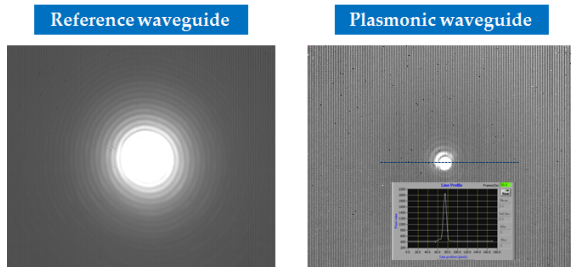


Fig. 7. Optical mode of fabricated plasmonic waveguide.

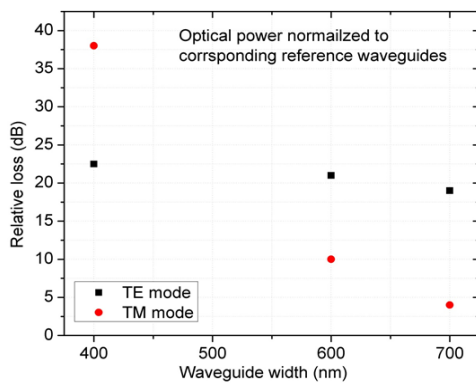


Fig. 8. Optical loss of fabricated plasmonic waveguide.

플라즈모닉 도파로를 제작하기 위해서 초기에 IAD 증착 장비를 이용해서 에피 구조에 SiO_2 를 200 nm를 증착했는데, 실제로는 230 nm가 증착이 된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 플라즈모닉 도파로의 폭은 E-beam lithography 공정을 통해서 초기에 400, 500, 600 nm로 패턴을 하였지만, 식각되는 깊이가 깊어서 원래의 폭보다는 많이 줄어든 플라즈모닉 도파로를 얻을 수 있었다. 제작된 구조에서 초기 플라즈모닉 도파로의 설계 값이 400 nm일 때, 제작된 도파로 폭은 165 nm가 되었고, 설계 값이 500 nm일 때, 298 nm로 제작이 되었고, 설계 값이 600 nm일 때, 403 nm의 도파로 폭을 얻을 수 있었다. 플라즈모닉 도파로의 폭이 300 nm 이하에서는 RIE와 ICP의 식각 조건에 따라서 재연성 있는 결과를 얻기가 어려웠다. 그림 6(b)는 최종적으로 제작된 플라즈모닉 도파로 사진이다. 플라즈모닉 도파로는 2 μm 에서 10 μm 까지 길이를 가변해서 제작되었고, 플라즈모닉 도파로의 모드 비교를 위해서 기준 도파로가 같이 제작되었다.

그림 7은 플라즈모닉 도파로의 측정된 TE (transverse electric) 모드 사진이다. 왼쪽 사진은 광도파로의 폭

이 1.6 μm 로 플라즈모닉 도파로와 비교하기 위해서 측정된 모드 사진이다. 오른쪽 사진은 플라즈모닉 도파로의 길이가 4 μm 이고, 폭이 초기에 600 nm로 제작된 도파로의 모드 측정 사진이다. 실제 제작된 도파로 폭은 대략 400 nm로 유추할 수 있으며, 측정 결과를 통해서 플라즈모닉 도파로 가능성을 확인하였다.

그림 8은 플라즈모닉 도파로 폭의 변화에 따라 측정된 광손실이다. 측정에 이용된 플라즈모닉 도파로의 길이는 10 μm 이다. 그리고 도파로 폭이 500 nm인 소자는 제작 중에 손상이 되어 측정할 수 없었다. 일반적으로 광도파로에서 TE 모드는 진행하는 면에 전기장 (electric field)가 존재하는 경우를 말하고, TM 모드는 진행하는 면에 자기장 (magnetic field)가 존재하는 경우를 말한다. 제작된 도파로 구조는 양옆에 Ag로 코팅이 되어 있어서 TE 모드를 이용하여 빛으로 전하밀도 진동을 일으켜 플라즈모닉 특성이 유도되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 TE 모드에 대해서는 폭에 따라서 일정한 손실을 갖는 것을 확인할 수 있었지만, TM 모드에 대해서는 도파로 폭이 600 nm 이상에서는 손실이 적지만 도파로 폭이 400 nm에서는 광손실이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 금속 표면에 존재하는 플라즈몬 파를 외부 입력광을 이용하여 제어할 수 있는 플라즈모닉 광도파로 구조를 제안하였고, 제안된 플라즈모닉 광도파로에서 플라즈몬 파의 생성은 FDTD 방법을 통해 분석하였다. 플라즈모닉 도파로의 미세 패턴은 E-beam lithography를 이용하여 제작하였고, 금속 코팅 공정은 일반 컨택 노광 장비를 이용해서 패턴을 제작하였다. 플라즈모닉 도파로의 길이는 2에서 10 μm 까지 가변하고, 도파로 폭은 400 nm에서 700 nm까지 가변해서 제작하였다. 제작된 플라즈모닉 도파로에서 광 모드를 확인하였으며, 또한 도파로 폭에 따른 광손실도 측정하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 최적화된 플라즈모닉 광도파로의 길이는 10 μm 이고 폭은 600과 700 nm임을 알 수 있었다.

본 연구에서 구현된 플라즈모닉 광도파로 구조는 향후 전광 소자를 구현하는데 활용될 수 있을 것이며, 다른 광소자와 집적화를 가능케 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. NRF-2012R1A1A2004894 및 No. 2011-0012023)을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] W. Bogaerts, D. Taillaert, B. Luyssaert, P. Dumon, J. Van Campenhout, P. Bienstman, D. Van Thourhout and R. Baets, V. Wiaux, and S. Beckx, *Optics Express*, **12**, 1583 (2004).
- [2] Mo Li, W. H. P. Pernice, C. Xiong, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, and H. X. Tang, *Nature*, **456**, 480 (2008).
- [3] A. Argyris, M. Hamacher, K. E. Chlouverakis, A. Bogris, and D. Syvridis, *PRL*, **100**, 194101 (2008).
- [4] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, J. Y. Laluet, and T. W. Ebbesen, *Nature*, **440**, 508 (2006).
- [5] J. Montoya, K. Parameswaran, J. Hensley, M. Allen, and R. Ram, *J. Appl. Phys.*, **106**, 023108 (2009).
- [6] J. A. Dionne, K. Diest, L. A. Sweatlock, and H. A. Atwater, *Nano Letters*, **9**, 897 (2009).
- [7] J. Homola, S. S. Yee, and G. Gauglitz, *Sensor. Actuat., B-Chemical*, **54**, 3 (1999).
- [8] U. Fano, *J. Opt. Soc. Amer.*, **31**, 213 (1941).
- [9] A. Otto, *Z. Phys.*, **216**, 398 (1968).
- [10] E. Kretschmann and H. Raether, *Z. Naturforsch.*, **23**, 2135 (1968).
- [11] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, 1996)
- [12] K. S. Yee, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **14**, 302 (1966).
- [13] T. O. Korner and W. Fichtner, *Opt. Lett.*, **22**, 1586 (1997).
- [14] P. Drude, *Annalen der Physik*, **3**, 369 (1900).