

# 광 결합 및 집속도 향상을 위한 금속 슬릿 프레넬 렌즈의 설계

박동원 · 정영진 · 구석모 · 유선규 · 박남규<sup>†</sup>

서울대학교 전기컴퓨터 공학부  
☎ 151-742 서울시 관악구 관악로 599

전영민 · 이 석

한국과학기술연구원  
☎ 136-791 서울시 성북구 월송길 5

(2009년 1월 14일 받음, 2009년 2월 12일 수정본 받음, 2009년 2월 16일 게재 확정)

최근 광 격자구조나(photonic crystal) 표면 플라즈몬파(surface plasmon) 혹은 실리콘을 이용한 나노(nano) 스케일의 광 회로 시스템에 대한 연구가 활발한데, 이는 이미 한계에 다다른 전자회로속도의 한계를 극복하고 지금보다도 훨씬 작은 회로를 구성할 수 있는 이점이 있기 때문이다. 현재까지 보고된 바 있는 광 결합 시스템들은 그 크기가 나노 스케일의 광 회로 시스템에 비해 커서 광 결합 시스템으로서의 의미가 퇴색되고 있는데 본 논문에서는 매우 짧은 초점 거리를 가지며 매우 얇은 구조를 가지는 프레넬 렌즈를 이용한 광 결합 시스템을 제안하여 광 결합 시스템을 나노 스케일 광 회로 시스템과 비교할 수 있을 정도로 소형화 하는 방법을 모색하였다. 본 논문에서는 금 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈를 제안하여 설계하고 그 구조를 이용해 2차원 전산모사를 수행하였다. 그 결과, 일반 프레넬 렌즈의 광 결합 효율이 약 43%인데 반해, 금 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈의 광 결합 효율은 가장 효율적인 구조로 설계하였을 경우에 최대 약 65%의 광 결합 효율을 보인다. 일반 프레넬 렌즈에 비해 50% 이상의 광 결합 효율의 향상을 달성하였다.

주제어: Metal slit, Fresnel lens, Optical coupling

## I. 서 론

최근 광 격자구조나(photonic crystal) 표면 플라즈몬파(surface plasmon) 혹은 실리콘을 이용한 나노(nano) 스케일의 광 회로 시스템의 구현이 활발하게 진행되고 있다. 이는 전자회로 속도의 한계를 극복하고 지금보다도 훨씬 작은 회로를 만들 수 있도록 하기 위함이다. 한 예로 최근에는 광 격자 구조를 이용한 광 아날로그 디지털 변환기(photonic analog-to-digital converter) 보고되었다.<sup>[1]</sup> 이 변환기 회로의 크기는 100  $\mu\text{m}^2$  수준인데 반하여 지금까지 보고된 바에 의하면 단일모드 광 섬유로부터 광 회로로 광 신호를 주입하기 위해 필요한 길이도 수십  $\mu\text{m}$ 에서 수백  $\mu\text{m}$  수준으로 변환기 회로의 크기와 비슷하다.<sup>[2-6]</sup>

지금까지 보고된 광 결합 시스템들에 비해서 그 크기 즉 단일모드 광섬유와 광 회로 내부 도파로의 연결 길이를 줄일 수 있는 방법으로 생각해 볼 수 있는 것이 마이크로 렌즈를 이용하여 그 렌즈의 두께가 매우 얇고 초점거리도 매우 짧다면 광 결합 시스템의 크기는 획기적으로 줄일 수 있을 것이다. 이때 렌즈를 얇게 디자인 하기 위해서는 프레넬 렌즈(Fresnel lens)구조를 가져야 한다. 그리고 프레넬 렌즈의 초점거리를 매우 짧게 하기 위해서 일반적인 디자인 방법과 달리 빛의 진행 경로를 생각하여 새로운 방법이 이용되어야 한다.<sup>[7]</sup> 그러나 유리나 실리콘 등의 일반적 물질을 이용한 프레넬 렌즈에서 초점거리를 극단적으로 짧게 할 경우 예상치 못

한 문제가 발생하는데 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 초점 거리가 극단적으로 짧아서 입사한 빛이 프레넬 렌즈 영역의 일부에서 초점으로 굴절되어 진행할 때 프레넬 렌즈영역과 자유공간(Free Space)사이에서 전반사가 일어나는 문제이다. 이러한 문제는 금속 슬릿을 이용해 렌즈를 설계할 경우에 해결할 수 있는데, 본 논문에서는 금속 슬릿의 도움으로 매우 짧은 초점거리를 가지는 프레넬 렌즈를 처음으로 제안하고 디자인 하여 일반적인 프레넬 렌즈와의 차이를 유한차분법을(FDTD: finite difference time domain) 이용한 전산모사를 통해 비교해 본다.

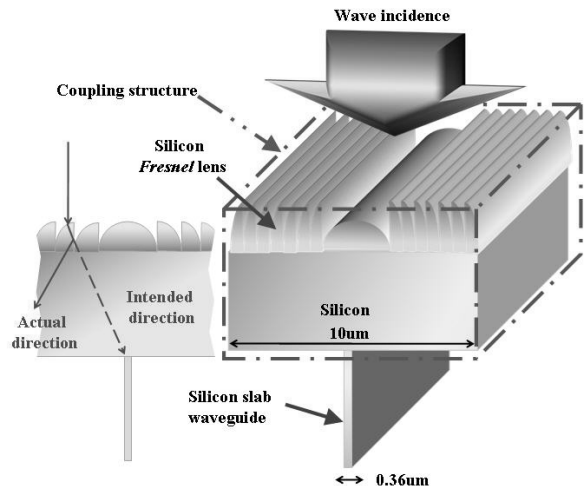


그림 1. 매우 짧은 초점 거리의 프레넬 렌즈의 문제점.

<sup>†</sup>E-mail: nkpark@snu.ac.kr

## II. 이 론

금속 슬릿의 플라즈몬 현상에 의한 굴절률 차이를 이용해 빛의 방향을 조절할 수 있다는 사실이 최근에 많이 보고 되고 있다.<sup>[8-9]</sup> 즉 금속 슬릿 내부를 통과하는 빛은 플라즈몬 현상에 의해 굴절률 값이 더 커지게 되며 그에 따라 슬릿 내부의 파동진행상수  $\beta_3$ (propagation constant)가 변하게 되는데 이 상수는 식 (1)을 통해 계산 할 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$\tanh(\sqrt{\beta_3^2 - k_0^2 \epsilon_d} w_d / 2) = \frac{-\epsilon_d \sqrt{\beta_3^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\beta_3^2 - k_0^2 \epsilon_d}} \quad (1)$$

여기서  $k_0$ 는 자유공간에서의 파동벡터(wave vector),  $\epsilon_m$ 와  $\epsilon_d$ 은 금속과 슬릿 사이에 채워진 물질의 상대 유전율이며 (relative dielectric constant),  $w_d$ 는 슬릿 사이의 거리이다. 계

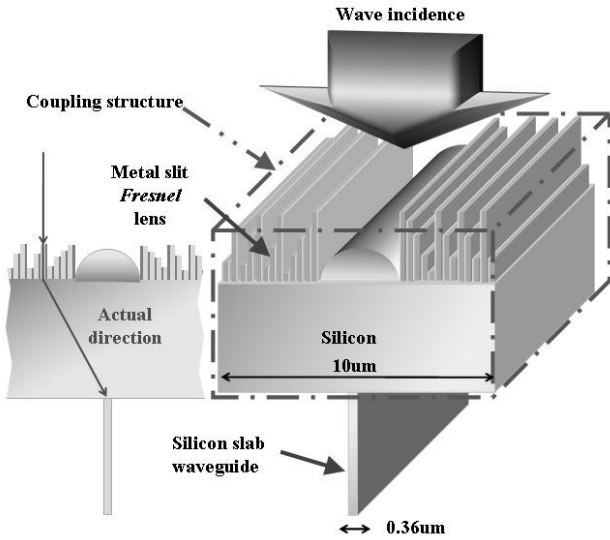


그림 2. 금속 슬릿을 이용한 전반사 문제 해결.

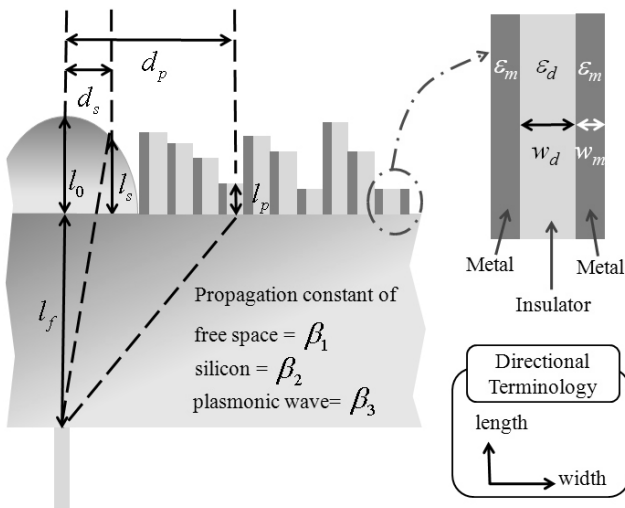


그림 3. 금속 슬릿을 채용한 구조의 설계 변수와 금속 슬릿 도파로.

산으로 얻어지는 파동진행상수로부터 렌즈를 디자인 할 수 있으며, 이 때 슬릿 사이를 통과하는 빛은 슬릿을 따라 직진으로 통과하기 때문에 매우 짧은 초점거리를 가지는 렌즈에서 나타나는 전반사 문제를 해결할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있다. 그림 2와 같이 전반사 문제가 일어나는 프레넬 렌즈 영역을 금속 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈구조로 설계하여 전반사 문제를 해결하고자 하였다.

## III. 렌즈 설계

금속 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈구조의 설계는 크게 두 부분으로 나뉜다. 그림 3에서와 같이 전반사 문제를 해결하기 위한 구조로서 금속 슬릿 도파로로 구성된 영역과 전반사 문제가 일어나지 않는 일반적인 프레넬 렌즈 영역인데 각 영역의 설계의 기본원리는 Phased array antenna 개념을 적용한다.

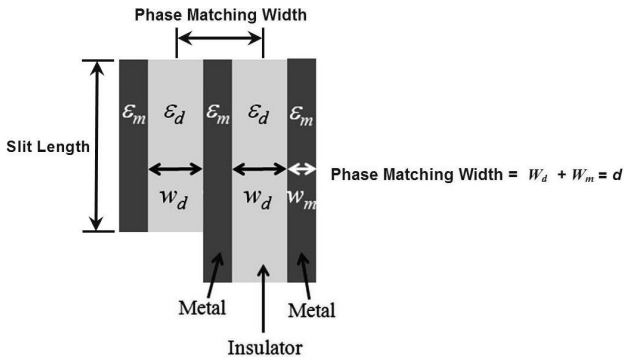
금속 슬릿 도파로로 구성된 영역의 설계는 식 (2)와 같은 위상 정합 조건을 이용하여 각 금속 슬릿 도파로의 길이 (length)를 결정한다.

$$\beta_2(l_f + l_0) + (m \times 2\pi) = \beta_1(l_0 - l_p) + \beta_3 l_p + \beta_2 \sqrt{l_f^2 + d_p^2}, \quad m \text{은 정수} \quad (2)$$

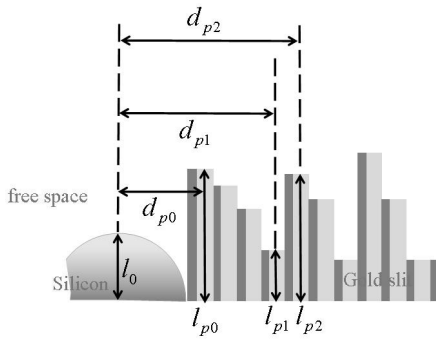
식 (2)에서  $l_f$ 는 초점거리,  $l_0$ 는 실리콘 영역의 렌즈의 가장 두꺼운 부분의 길이,  $l_p$ 는 금속 슬릿 도파로의 길이,  $d_p$ 는 렌즈 중앙과 금속 슬릿 도파로가 놓여지는 위치 사이의 거리를 나타내며 파동진행상수  $\beta_1$ 은 free space의 파동진행상수로  $k_0$ 에 해당하고  $\beta_2$ 는 실리콘 영역의 파동진행상수로( $3.5 \times k_0$ )에 해당하고,  $\beta_3$ 은 식 (1)에서 계산된 파동진행상수인데 이 값은 금속 슬릿 사이의 거리, 즉 금속 슬릿 사이에 채워진 유전물질의 너비에 따라 그 값이 달라진다. 식 (1)에서  $\epsilon_3$ 을 계산하기 위해 이용된 값  $\epsilon_d$ 는 금속 슬릿 사이에 채워진 실리콘의 상대 유전율로( $3.5^2$ )이다.  $\epsilon_m$ 은 금속의 상대 유전율이며 본 논문에서는 금(gold)을 이용하였다. 금의 유전율은 금을 통과하는 빛의 파장에 따라 달라지며 본 논문에서는 1550 nm 파장에 대하여 전산모사 함에 따라 1550 nm에서의 유전율인  $-140+i10$ 을 이용하였다.<sup>[10]</sup>

금속 슬릿 도파로로 구성된 영역은 금속 슬릿을 연속적으로 배치하여 MIM(Metal+Insulator+Metal) 구조를 가지는데 각 금속 슬릿 도파로의 길이는 식 (2)을 통해 결정되고 각 금속 슬릿 도파로의 위치는 그림 4(a)에서 정의한 위상 정합 너비에 따라 그 위치가 결정되고 그림 4(b)와 같이 배치된다. 예를 들어 그림 4(b)에서 네 번째 금속 슬릿 도파로의 위치는 " $d_{p1} = d_{p0} + (3 \times \text{위상정합너비})$ "와 같고 다섯 번째 금속 슬릿 도파로의 위치는 " $d_{p2} = d_{p0} + (4 \times \text{위상정합너비})$ "와 같이 결정된다.

전반사 문제가 일어나지 않는 실리콘 영역의 프레넬 렌즈의 설계는 식 (3)과 같은 위상 정합 조건을 이용하여 렌즈의 곡면을 결정한다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 위상 정합 너비와 슬릿 길이의 정의 (b)금속 슬릿의 위치와 위상 정합 너비.

$$\beta_2(l_f + l_0) + (m \times 2\pi) = \beta_1(l_0 - l_s) + \beta_2 \sqrt{(l_f + l_s)^2 + d_s^2},$$

$m$ 은 정수

(3)

2차원 전산모사를 위해 실리콘 영역의 프레넬 렌즈의 곡면도 금속 슬릿 영역의 각 도파로의 배치와 비슷하게 그림 5와 같이 계단 형태로 설계하였는데 식(3)의  $l_s$ 는 실리콘 영역의 각 도파로의 길이,  $d_s$ 는 렌즈 중앙과 실리콘 도파로가 놓여지는 위치 사이의 거리를 나타낸다.

#### IV. 전산 모사 결과

전산모사는 1550 nm 파장의 Gaussian Beam을 이용하였으며 spot size는 10  $\mu\text{m}$ 로 일반적인 단일모드 광섬유의 코어 size와 비슷한 수준으로 수행하였다.

그림 6은 일반 프레넬 렌즈와 금속 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈에 대한 전산모사 결과를 비교한 그림이다. 렌즈를 진행하는 빛의 포인팅 벡터(Poynting Vector)의 크기를 서로 비교하였다. 여기서 수행한 전산모사는 2차원 전산모사이며 설계된 렌즈의 구조 역시 2차원적인 구조임을 밝혀둔다. 그림6(a)에서 볼 수 있듯이 일반적인 프레넬 렌즈의 경우는 렌즈구조 가장자리에서 전반사 문제로 인해 초점으로 모이지 않고 퍼져나가는 빛이 발견되는데 이와 같은 문제로 인해 일반적인 프레넬 렌즈에서는 최대 43%의 광 결합 효율이 달성되는 것

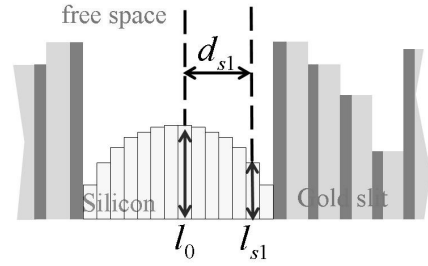


그림 5. 실리콘 영역의 설계 개념도.

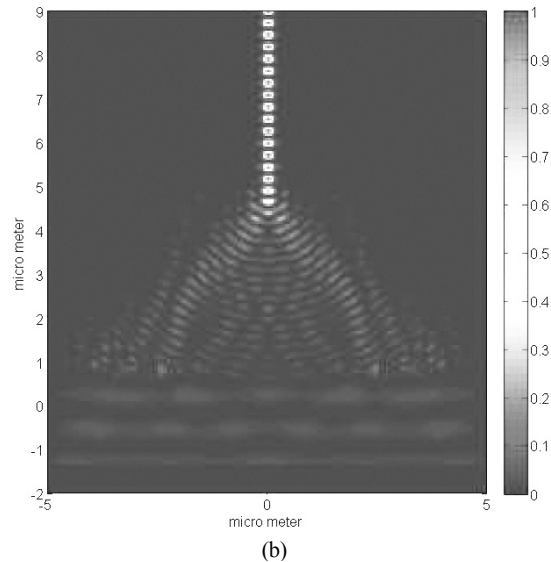
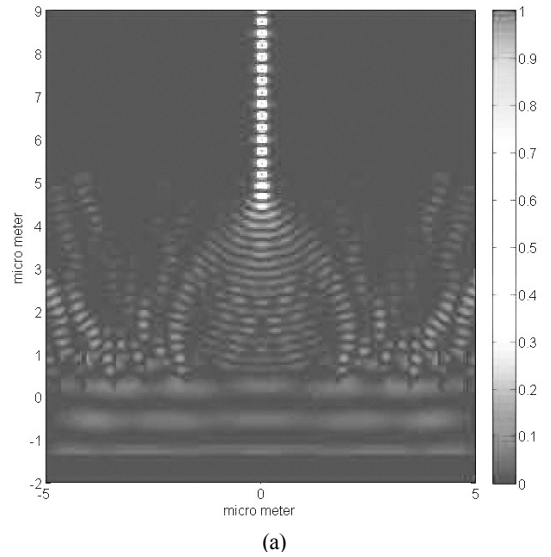


그림 6. (a) 일반적인 프레넬 렌즈를 통해 진행되는 빛의 포인팅 벡터 (b) 금속(금) 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈를 통해 진행되는 빛의 포인팅 벡터.

을 확인할 수 있다. 이에 반해 그림 6(b)의 금속 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈의 경우는 전반사 문제에 발생하는 영역에 금속 슬릿을 채용함으로써 전반사 문제를 해결하였음을 확인

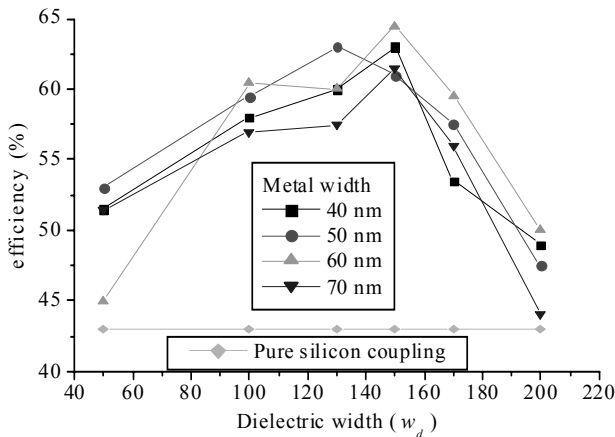


그림 7. dielectric width에 따른 광 결합 효율.

할 수 있고 가장 최적의 렌즈 구조에서 최대 65%의 광 결합 효율을 달성하였다.

금속 슬릿을 채용한 프레넬 렌즈는 그 설계 구조에 따라 광 결합 효율이 달라지게 되는데 광 결합 효율에 영향을 미치는 요인으로는 그림 4(a)에서 정의한 위상 정합 너비와 금속 슬릿의 사이에 존재하는 dielectric의 width( $w_d$ )와 금속 자체의 두께( $w_m$ )이다. 본 연구에서는 최적화된 금속 슬릿 프레넬 렌즈 구조를 찾기 위해 그림 7과 같이 여러 경우에 대해 설계하고 전산모사 하여 최적 구조의 금속 슬릿 프레넬 렌즈를 실현하기 위해 노력하였다. 그 결과 가장 최적화된 금속 슬릿 프레넬 렌즈의 경우인 위상 정합 너비가 210 nm, dielectric width가 150 nm, metal width가 60 nm일 때 가장 높은 65%의 광 결합 효율을 보였으며 이는 전반사 문제가 존재하는 일반 프레넬 렌즈의 43%에 비해 약 50%이상의 광 결합 효율 향상을 실현하였다. 본 논문의 이론을 바탕으로 한 소자의 공정은 상당히 어려울 것으로 판단 되지만 제안한 이론을 바탕으로 적절한 파라미터와 물질들을 이용하고 공정 방법에 맞는 디자인을 한다면, 제안된 소자는 최근 계속해서 많은 사람들이 연구하며 발전시키고 있는 나노 스케일의 공정을 통한 플라즈몬파 이용의 가장 적절한 활용처가 될 것으로 기대 된다.

## 참고문헌

- [1] Sunkyu Yu, Sukmo Koo, and Namkyoo Park, "Coded output photonic A/D converter based on photonic crystal slow-light structures," *Opt. Exp.*, vol. 16, no 18, pp. 13752-13757, September 2008.
- [2] Paul E. Barclay, Kartik Srinivasan, Matthew Borselli, and Oskar Painter, "Efficient input and output fiber coupling to a photonic crystal waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 7, pp. 697-699, 2004.
- [3] L. Vivien, S. Laval, E. Cassan, X. Le Roux, and D. Pascal, "2-D taper for low-loss coupling between polarization-insensitive microwaveguides and single-mode optical fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 2429-2433, 2003.
- [4] V. Nguyen, T. Montalbo, C. Manolatou, A. Agarwal, C. Hong, J. Yasaitis, L. C. Kimerling, and J. Michel, "Silicon-based highly-efficient fiber-to-waveguide coupler for high index contrast systems," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, 081112, 2006.
- [5] F. Van Laere, G. Roelkens, M. Ayre, J. Schrauwen, D. Taillaert, D. Van Thourhout, T. F. Krauss, and R. Baets, "Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides," *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp.151-156, Jan. 2007.
- [6] D. Michaelis, C. Wachter, S. Burger, L. Zschiedrich, and A. Brauer, "Micro-optically assisted high-index waveguide coupling," *Appl. Opt.*, vol. 45, no. 8, pp. 1831-1838, 2006.
- [7] M. Ken McGaugh, Carl M. Verber, and Richard P. Kenan, "Modified integrated optic Fresnel lens for waveguide-to-fiber coupling," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 9, pp. 1562-1568, March 1995.
- [8] Zhijun Sun and Hong Koo Kim, "Refractive transmission of light and beam shaping with metallic nano-optic lenses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 4, pp. 642-644, July 2004.
- [9] Haofei Shi, Changtao Wang, Chunlei Du, Xiangang Luo, Xiaochun Dong, and Hongtao Gao, "Beam manipulating by metallic nano-slits with variant widths," *Opt. Exp.*, vol. 13, no. 18, pp. 6815-6820, September 2005.
- [10] Rakic A. D., Djuricic A. B., Elazar J. M., and Majewski M. L., "Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22, pp. 5271-5283, 1998.

## Design of Metal-Slit Fresnel Lens for Enhanced Coupling Efficiency

Dongwon Park, Young Jin Jung, Sukmo Koo, Sunkyu Yu, and Namkyoo Park<sup>†</sup>

*School of Electrical Engineering and Computer Sciences, Seoul National University, 599 Gwanak-ro, Gwanak-Gu, Seoul 151-742, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: nkpark@snu.ac.kr*

Young Min Jhon and Seok Lee

*Korea Institute of Science and Technology, 5 Wolsong-gil, Seongbuk-Gu, Seoul 136-791, Korea*

(Received January 14, 2009; Revised manuscript February 12, 2009; Accepted February 16, 2009)

Recently, much research has been done for realizing nano-scale photonic circuits based on photonic crystal, plasmonics and silicon photonics in order to overcome fundamental limits of electronic circuits. These limits include such as bottleneck of speed, and size that cannot be reduced. Even though several kinds of coupling schemes have been reported, coupling structures are still large when it is compared with the nano-scale optical circuit. In this paper, we proposed using a very thin Fresnel lens while shortening the focal length of the Fresnel lens as much as possible. We proposed, for the first time, to utilize metal slits that are able to use the optical coupling system between a nano-scale optical circuit and the standard single mode optical fiber for overcoming the limitation of focal length shortening of the Fresnel lens. Comparative study has been carried out with a FDTD simulation between normal and metal slit assisted Fresnel lens. From the result of simulation, we can achieve 65% coupling efficiency for the metal-slit Fresnel lens when the focal length of metal-slit Fresnel lens is just 4  $\mu\text{m}$ . On the other hand, the coupling efficiency of the normal Fresnel lens is about 43%.

OCIS codes: (060.1810) Couplers, switches and multiplexers; (080.3620) Lens design; (240.6680) Surface plasmons.