

# 금속 막 상의 나노 슬릿구조에서의 광 투과 특성 분석

이용민<sup>1,2</sup>, 최성수<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 디스플레이반도체공학과, <sup>2</sup>선문대학교 나노과학연구소, <sup>3</sup>NanoPore Korea

## Analysis of Light Transmission Characteristics in Nano-slit Structure on Metal Film

Yong-Min Lee<sup>1,2</sup>, Seong Soo Choi<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Display & Semiconductor Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Research Center for Nano-Bio Science, Sunmoon University

<sup>3</sup>NanoPore Korea

**요약** 본 논문은 Au금속 막에 형성된 싱글 슬릿 소자의 광 시뮬레이션 연구 관한 것이다. 나노 사이즈의 싱글슬릿 소자를 다양한 사이즈나 형태로 조건을 바꾸어 실험 제작해 보기에는 시간과 비용이 많이 소요된다. 우선 본 연구에서 사용하는 시뮬레이션 기법의 검증을 위해, 싱글 슬릿 소자를 제작 측정한 투과특성과 시뮬레이션 하여 얻은 투과 특성이 유사함을 확인하였다. 그리고 이 시뮬레이션 기법을 통해 Au금속 막 두께 변화 및 싱글 슬릿의 폭 변화에 대한 광 투과 특성이 어떻게 변화되는지를 검토하였다. 시뮬레이션 결과로, Au금속 막의 두께가 얇아질수록 또는 슬릿의 폭이 넓어질수록 광 투과도가 커지는 경향을 알 수 있었다. 반면에 슬릿이 없거나 Au금속 막의 두께가 100 nm이내로 얇아지면 500 nm파장대의 단일 피크 값만 투과되는 경향도 알 수 있었다. 본 시뮬레이션 기법을 사용하면 나노 슬릿 소자의 제작 시에 원하는 설계조건을 사전에 찾는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

**Abstract** This paper reports an optical simulation study of a single-slit device formed on an Au metal film. Manufacturing nano-sized single-slit devices with various sizes or shapes under different conditions is expensive and time-consuming. First, the simulation technique used in this study was verified by conducting experiments to confirm that the transmission characteristics measured by manufacturing a single-slit device and the transmission characteristics obtained through simulation were similar. Through this simulation technique, this study examined how the light transmission characteristics change in response to changes in the thickness of the Au metal film and the width of the single slit. The simulation showed that the light transmittance tended to increase as the thickness of the Au metal film became thinner or the slit width became wider. On the other hand, only a single peak in the 500 nm wavelength range was transmitted when there was no slit or the thickness of the Au metal film was thinner than 100 nm. Using this simulation technique may help find the desired design conditions in advance when manufacturing nano-slit devices.

**Keywords** : Nano-slit Device, Single Slit, Surface Plasmon, FDTD Simulation, Metal Film

---

\*Corresponding Author : Seong Soo Choi(NanoPore Korea)

email: sscphy1982@daum.net

Received March 4, 2024

Revised April 22, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

## 1. 서론

금속 막 상에 원형이나 슬릿 형태의 구멍을 갖는 나노 소자는 광학적으로 투과특성이 향상되는 것으로 알려져 그 동안 많은 연구가 이어져 왔다[1-5]. 이러한 투과특성의 향상은 금속 막 상에서 전파되는 표면 플라즈몬 입자들의 영향으로 해석하는 연구도 있고[6], 입사광과 슬릿 구조와의 커플링 효과에 기인한 것으로 해석하는 연구도 있다[7]. 그런데 나노 소자의 제작은 매우 정교한 제작과정을 거치게 되고 제작시간이 많이 소요된다. 따라서 다양한 설계 조건에 따라 일일이 소자를 제작하여 테스트해 보기가 어려운 실정이다. 본 연구는 나노 소자의 광 투과특성을 광 시뮬레이션을 통해 예측해 볼 수 있는 기법에 관한 것이다.

기존에 나노 소자에 대한 시뮬레이션 연구로는 유한요소법과 유효물성 박막 분석법을 이용한 금속 나노소자 광투과 분석 연구 [8] 이 있다. 이 연구는 일정한 간격으로 나열된 다중 슬릿을 대상으로 한 광 투과 시뮬레이션 연구로 나노 슬릿간의 중첩되는 효과가 존재하여 싱글 슬릿만의 광 투과효과를 제대로 파악하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 싱글 슬릿의 통과하는 광의 특성을 파악하기 위해 싱글 슬릿에 대한 광 시뮬레이션 연구를 진행하려는 것이다. 또한 실제 제작한 나노소자의 특성과 광 시뮬레이션의 결과치를 비교하여 본 시뮬레이션 기법의 적합성을 검증하려고 한다.

본 논문의 구성은 우선 금속 막 위에 싱글 슬릿을 제작하여 투과특성을 측정하고, 금속의 광학적 반응을 모델링하는 boundary-integral method [9] 를 사용한 시뮬레이션을 수행하여 실제 제작된 소자의 측정치와 비교하는 실험을 진행한다. 그리고 싱글 슬릿소자의 설계 파라미터들을 변경하면서 시뮬레이션을 수행하여 각 파라미터들이 광 출력 특성에 어떠한 영향을 주는지 파악한다.

## 2. 본론

### 2.1 싱글 슬릿소자 제작 및 특성측정

싱글 슬릿 형상에서의 실제 광의 투과 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 싱글 슬릿 소자를 제작하였다. Fig. 1(a)는 제작하려는 싱글 슬릿 소자의 단면도이다. Fig. 1(b)는 집속 이온 빔(FIB: Focused ion-beam) 방식으로 실제 제작한 싱글 슬릿 소자인데, SiN 소재의 멤

브레인 기판위에 Au금속 막을 증착한 후, Ga 이온빔 테크닉과 Field emission electron microscopy(FESEM)으로 나노 급의 싱글 슬릿형태를 형성하였다. 멤브레인 기판(SiN)의 두께는 20 nm이며 Au금속 막의 두께는 130 nm이다. 싱글 슬릿의 폭은 50 nm이며 길이는 5 um로 제작하였다.

제작한 싱글 슬릿소자의 광 특성을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 장치를 구성하였다. XY 스테이지상에 측정하려는 싱글 슬릿소자를 놓고 683 nm 중심파장의 가운시안 분포를 갖는 할로겐램프(Witec, KL1500)를 비추어 소자를 투과하는 광 특성을 측정한다. 분광계(Princeton Instrument, SpectraPro 2300)를 통해 투과되는 광을 측정하여 Fig. 3과 같은 측정결과를 얻었다. 할로겐램프의 입력파장은 683 nm 중심파장이지만 싱글 슬릿소자로 투과된 스펙트럼을 보면 500 nm와 685 nm에서 높은 투과도를 보이고 있다. Fig. 3의 그래프에서 보는 바와 같이 두 개의 광 투과 피크 값이 나타남을 알 수 있다. 첫 번째 피크 값은 500 nm파장 근처에서 표면 플라즈몬 폴라리톤 (SPPs: Surface Plasmon Polaritons)에 의한 영향으로 나타나며 두 번째 피크 값은 입사된 할로겐램프의 중심파장 683 nm에 의한 영향으로 나타나는 피크 값을 알 수 있다.

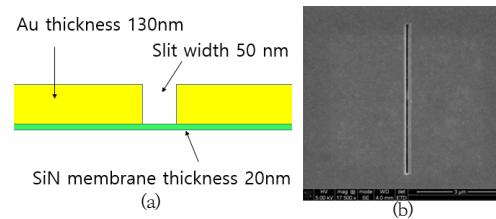


Fig. 1. Single-slit device structure  
(a) Cross section of the single-slit device  
(b) Fabricated single-slit device

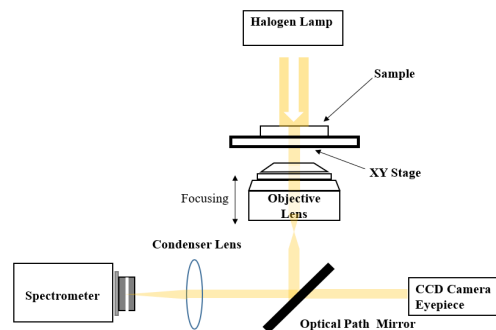


Fig. 2. Transmitted light measurement setup

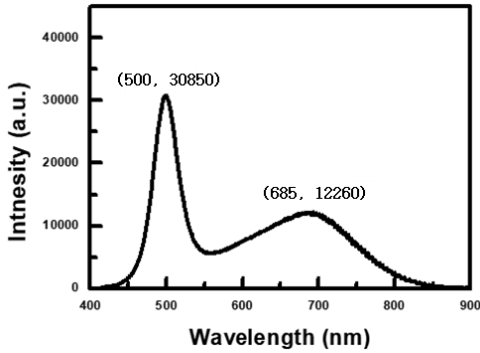


Fig. 3. Transmitted light spectrum of the single-slit device

## 2.2 싱글 슬릿소자 시뮬레이션

Au금속 막상의 나노슬릿 구조의 광 투과 특성을 검토하기 위한 시뮬레이션 도구로는, 맥스웰 방정식을 바탕으로 유한 차분 시간 영역법 (FDTD: Finite Difference Time Domain) [10]을 사용하는 Synopsys사의 RSoft Photonic Device Tools를 사용하였다. Fig. 4는 시뮬레이션에 사용하기 위해 싱글 슬릿소자의 설계도를 보여주고 있다. 멤브레인 기판(SiN)의 두께는 20 nm이며 Au금속 막의 두께는 130 nm, 싱글 슬릿의 폭은 50 nm로 설계하였다. 광원의 입력파장은 683 nm 중심파장의 가우시안 분포의 광원을 채택하여 슬릿소자로 투과된 광 스펙트럼은 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서도 Fig. 3의 경우와 유사하게 두개의 피크 값 (474 nm와 757 nm)을 나타내고 있다. 이와 같이 실제 싱글 슬릿소자를 제작하여 측정된 광 특성과 시뮬레이션에 의한 광 특성이 상당한 유사성을 갖는 것을 확인하였다. 본 실험에서 사용하려는 시뮬레이션 툴의 성능을 검증한 후, 금속 막 두께 변경, 슬릿 폭 변경 등의 설계 파라미터 값을 변경하며 시뮬레이션 실험을 진행하였다.

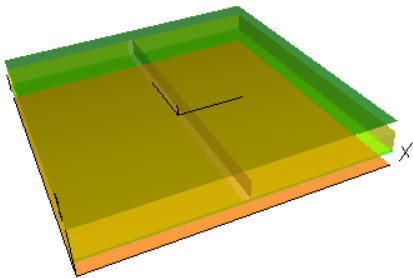


Fig. 4. Simulation design of the single-slit device

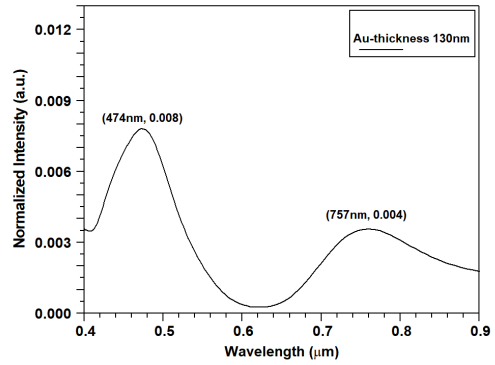


Fig. 5. Transmitted light spectrum of the simulation

## 2.3 실험결과 및 토의

Fig. 6은 슬릿의 폭을 50 nm로 고정된 상태에서 Au 금속 막의 두께를 각각 50 nm, 70 nm, 100 nm, 130 nm로 변경하면서 광 투과도를 비교한 실험이다. Fig. 6에서 Au금속 막의 두께가 얇아질수록 500 nm 근처의 광 투과도가 점점 증가함을 알 수 있다. 이는 표면 플라즈몬 공명 (SPR: Surface Plasmon Resonance) 현상 [11]에 의해 빛과 나노크기의 슬릿의 상호작용에 기인하기 때문이다. 또한 Au금속 막 두께가 두꺼워질수록 500 nm 근처에서 발생하는 피크 값이 점점 파장이 짧은 쪽으로 이동하고 있다. 그리고 Au금속 막의 두께가 100 nm 이하인 경우에는 500 nm 파장대의 단일 피크 값만 존재하며, Au금속 막의 두께가 130 nm일 때는 두 개의 피크 값이 생성됨을 알 수 있다.

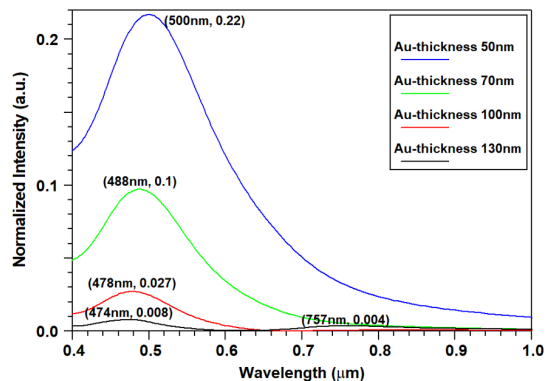


Fig. 6. Experiment on changing Au-film thickness with fixed slit width 50 nm

이번에는 Au금속 막의 두께를 40 nm로 고정된 상태에서 슬릿의 폭을 각각 0 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm로 변경하면서 광 투과도를 비교하는 실험을 진행하

였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. Au금속 막이 40 nm일 경우 막 두께가 매우 얇기 때문에 500 nm파장 대에서 단일 피크로 광 투과도가 매우 높게 나타나며, 슬릿 폭의 변화에는 거의 영향을 받지 않는다.

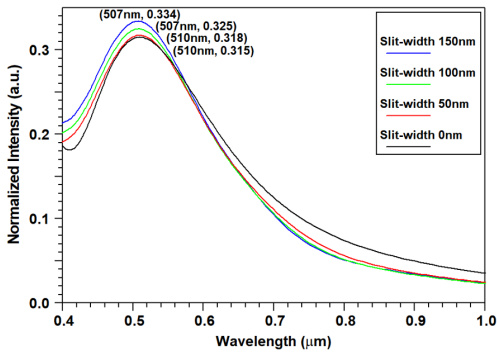


Fig. 7. Experiment on changing slit width with fixed Au-film thickness 40 nm

Fig. 8은 Au금속 막의 두께를 130 nm로 고정된 상태에서 슬릿의 폭을 각각 0 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm로 변경하면서 광 투과도를 비교한 실험이다. Fig. 8에서는 슬릿의 폭이 넓어질수록 광 투과도가 점점 커지며 또한 첫 번째 피크 값 파장이 점점 작은 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 그리고 슬릿이 없는 경우는 단일 피크 값만 나타나며 슬릿이 있는 경우는 2개의 피크 값이 나타남을 알 수 있다.

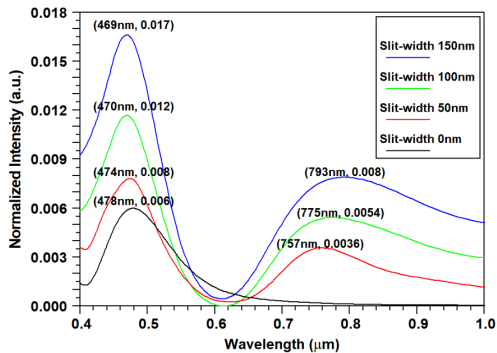


Fig. 8. Experiment on changing slit width with fixed Au-film thickness 130 nm

Fig. 9는 Au금속 막의 두께를 200 nm로 고정된 상태에서 슬릿의 폭을 각각 0 nm, 50 nm, 100 nm, 150 nm로 변경하면서 광 투과도를 비교한 실험이다. Fig. 9에서는 슬릿의 폭이 넓어질수록 광 투과도가 상대적으로 커짐을 알 수 있으며 슬릿이 없는 경우에만 단일 피크 값

만 나타남을 알 수 있다.

위의 실험내용을 종합해 보면, Au금속 막의 두께가 얇아질수록, 또는 슬릿의 폭이 넓어질수록 광 투과도가 커짐을 알 수 있다. 반면에 슬릿이 없거나 Au금속 막의 두께가 100 nm이내로 얇아지면 500 nm파장대의 단일 피크 값만 투과됨을 알 수 있다.

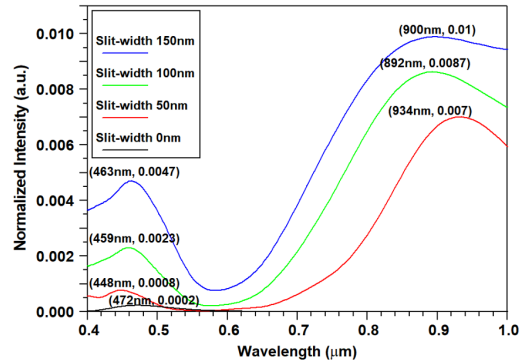


Fig. 9. Experiment on changing slit width with fixed Au-film thickness 200 nm

### 3. 결론

Au금속 막에 제작한 싱글 슬릿의 광 투과특성을 검토하기 위해, 유한 차분 시간영역 법을 적용한 광 시뮬레이션 기법을 도입하였다. 실제 싱글 슬릿소자를 제작하여 측정된 광 특성과 시뮬레이션에 의한 광 특성이 상당한 유사성을 갖는 것을 확인하였다. 본 시뮬레이션 기법을 사용하여 Au금속 막의 두께 변화 시 및 슬릿 폭 변화 시의 광 투과특성을 사전에 특성파악이 가능함을 증명하였다. 따라서 본 시뮬레이션 기법을 사용하면 다양한 나노 소자 제작 시 시간 및 비용 절감이 가능할 것이다. 향후 연구로는 싱글 슬릿구조 대신에 더블 슬릿 구조 및 원형 개구부에서의 투과특성 실험을 진행할 예정이다.

### References

- [1] S. S. Choi, S. Oh, Y. M. Lee, H. T. Kim, S. B. Choi, B. S. Bae, "Fabrication of Plasmonic Optical Nanopore Platform for Single Molecule Sensing", *J. Electrochem. Soc.*, Vol.167, pp.27503-27507, 2020  
DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab615e>
- [2] Fuzi Yang and J. R. Sambles, "Resonant Transmission of Microwaves through a Narrow Metallic Slit", *Phys.*

- Rev. Lett., Vol.89, No.6, p.063901 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.063901>
- [3] S. S. Choi, M.J. Park, C.H. Han, S.J. Oh, H.T. Kim, S.B. Choi, and Y.S. Kim, "Plasmonic Nanopore Fabrication for Single Molecule Bio sensor Using Electron Beam Irradiation", *ECS Tran.*, Vol.85, No.9, pp.69-76, 2018  
DOI: <https://doi.org/10.1149/08509.0069ecst>
- [4] T. Thio, K. M. Pellerin, R. A. Linke, H. J. Lezec, and T. W. Ebbesen, "Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture", *Opt. Lett.*, Vol.26, pp.1972-1974, 2001.  
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.26.001972>
- [5] A. Ammara, G. Abbas, F. V. Pepe, M. Afzaal, M. Qamar, and A. Ghuffar, "The Influence of Substrate on the Optical Properties of Gold Nanoslits", *J. Imaging*, Vol. 9, No.12, pp.269-281, 2023  
DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging9120269>
- [6] J. A. Porto, F. J. Garcia-Vidal, and J. B. Pendry, "Transmission Resonances on Metallic Gratings with Very Narrow Slits", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.83, pp.2845-2848, 1999.  
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.2845>
- [7] S. Astilean, Ph. Lalanne, and M. Palamaru, "Light transmission through metallic channels much smaller than the wavelength", *Opt. Commun.*, Vol.175, pp.265-273, 2000.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(00\)00462-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(00)00462-4)
- [8] D. Jeong and K. Kim, "Characterization of near Infrared Light Transmission in Periodic Subwavelength Nanoslit Array by Using Effective Medium Theory", *New Physics: Sae Mulli*, Vol.70, No.9, pp.804-809, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.3938/NPSM.70.804>
- [9] J. Wiersig, "Boundary element method for resonances in dielectric microcavities", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, Vol.5, No.53, pp.53-60, 2003.  
DOI: <http://doi.org/10.1088/1464-4258/5/1/308>
- [10] S. Gedney, Introduction to the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for Electromagnetics, Springer Nature, 2022.
- [11] T. Neumann, M.-L. Johansson, D. Kambhampati, and W. Knoll, "Surface-Plasmon Fluorescence Spectroscopy", *Adv. Funct. Mater.*, Vol.12, pp.575-586, 2002.  
DOI: [https://doi.org/10.1002/1616-3028\(20020916\)12:9<575::AID-ADFM575>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1616-3028(20020916)12:9<575::AID-ADFM575>3.0.CO;2-4)

이 용 민(Yong-Min Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
- 2005년 1월 : Univ. of Edinburgh 전기전자공학 (PhD)
- 1985년 12월 ~ 2007년 2월 : 삼성SDI 수석연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 디스플레이반도체공학과 교수

<관심분야>

디스플레이, 광통신소자 응용

최 성 수(Seong Soo Choi)

[정회원]



- 1973년 8월 : 서울대학교 물리학과 학사
- 1987년 5월 : Univ. of North Carolina at Chapel Hill, Ph.D in Physics.
- 1992년 3월 ~ 2020년 2월 : SunMoon University, Professor of Physics and Nanoscience
- 2020년 3월 ~ 현재 : NanoPore Korea, Representative

<관심분야>

Au NanoPore Fabrication, and Nanofabrication, Nanocharacterization, Self-Cooling using Mid IR Thermal Emission and Nearfield Thermal Emission