



프리즘 이미지 센서 개발에 관한 연구

박지연*, 김윤경**

A Study on Development of Prism Image Sensor

Jiyeon Park*, Yunkyung Kim**

이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 생애 첫 연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2017R1C1B5015844).

요 약

고해상도 카메라의 수요가 증가함에 따라 CMOS 이미지 센서의 픽셀 사이즈는 $1.0\mu\text{m}$ 이하로 작아지고 있다. 하지만 픽셀의 높이는 기존과 동일하게 유지되면서 픽셀의 크기만 작아지게 된다면, 감도의 저하와 크로스토크의 증가로 인해 이미지 센서의 성능 열화를 초래할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 $1.0\mu\text{m}$ 이하의 매우 작은 픽셀에 적용시키기 위한 프리즘 이미지 센서를 제안하였다. 광학 시뮬레이터를 사용하여 픽셀의 사이즈가 $0.75\mu\text{m}$ 인 경우에 대해서 프리즘의 굴절률과 높이에 대한 분광 특성을 시뮬레이션 하였다. 그 결과, 프리즘으로 컬러 필터를 대체하여 원하는 파장의 빛으로 분광시킴과 동시에 전체 픽셀의 높이를 줄일 수 있어 작은 픽셀 사이즈를 가지는 차세대 이미지 센서에 적용 가능성을 확인하였다.

Abstract

As the demand for high-resolution cameras increases, the pixel size of a CMOS image sensor is shrinking to less than $1.0\ \mu\text{m}$. However, if the pixel size is only reduced without changing the its height, it is expected that the pixel performance of the image sensor deteriorate due to the degradation of sensitivity and the increase of crosstalk. In this paper, a prism image sensor is proposed for adapting in very small pixels of $1.0\ \mu\text{m}$ and below. An optical simulator was used to simulate the spectral characteristics for the prism's refraction index and height when the pixels were $0.75\ \mu\text{m}$ in size. As a result, prism can be used to replace the color filters with desired wavelength of light and to reduce the height of the entire pixel, thus, it can be applicable to the next generation image sensor with a small pixel size.

Keywords

CMOS image sensors, prism, color separation, color filter, ftd simulation

* 동아대학교 전자공학과

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1267-0573>

** 동아대학교 전자공학과 조교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7509-357X>

· Received: Dec 29, 2017, Revised: Feb. 06, 2018 Accepted: Feb. 09, 2018

· Corresponding Author: Yunkyung Kim

Dept. of Electronics Engineering, Dong-A University, 550-gil 37,

Nakdong-daero, Saha-gu, Busan 49315, Korea

Tel.: +82-200-7684 Email: yunkkim@dau.ac.kr

I. 서 론

최근 UHD 등과 같이 고해상도 디스플레이 기술이 발전함에 따라 4K 또는 그 이상의 해상도가 요구되고 있다. 이로 인해 고해상도 카메라에 대한 요구가 커지고 있어 이러한 카메라를 구현하기 위한 이미지 센서가 개발되고 있다. 수 백 만개 이상의 픽셀로 이루어진 이미지 센서의 칩 면적은 카메라 모듈 사이즈의 한계에 따라 해상도가 높아진다고 해서 칩 면적을 넓힐 수가 없다. 그러므로 한정된 센서 칩 면적으로 이미지의 고해상도를 실현하기 위해 픽셀의 크기가 $1.0\mu\text{m}$ 이하로 작아지고 있는 추세이다[1]. 픽셀 사이즈가 감소함에 따라 크로스토크(Crosstalk)의 증가와 감도(Sensitivity)의 감소로 이미지 센서의 성능이 열화 될 것으로 예상되고 있다[2]. 또한 현재 이미지 센서에 사용되는 컬러 필터는 약 $5000 \sim 7000\text{\AA}$ 정도의 두께로 적층되어 있어 픽셀 사이즈가 작을수록 크로스토크를 야기시키는 원인이 될 수 있다. 이 때 크로스토크란 원하지 않는 영역, 즉 인접한 픽셀로 빛이 들어가 영향을 미치는 것을 의미한다. 크로스토크를 줄이기 위해 픽셀의 높이를 낮추고, 컬러 필터의 두께를 줄이는 것이 좋다. 하지만 컬러 필터 물질의 낮은 흡수 계수로 인해 현 상태의 수 천 \AA 보다 얇게 만들 수 없다고 알려져 있다[3]. 이처럼 이미지 센서의 픽셀 크기를 최소화하는데 한계가 있어, 이런 문제점들에 대한 대안을 제시하기 위해 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 그 예로 플라즈모닉 컬러필터를 이용한 CMOS 이미지 센서[4], 색 분리기(Color Splitter)를 사용한 CMOS 이미지 센서[5] 그리고 적층형 컬러 이미지 센서[6]가 있다. 플라즈모닉 컬러 필터에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있는데 이 중에서는 나노 크기의 구멍 배열(Hole Array)를 가진 금속 박막에서 플라즈몬 공명 현상을 이용하여 특정 파장을 선택적으로 투과시킬 수 있는 플라즈모닉 컬러 필터를 이용한 이미지 센서[4]를 개발하였다. Hole을 통해 빛이 투과됨으로 총 광량이 감소하는 한계가 생각된다. 또한 color splitter 이미지 센서[5]는 마이크로 렌즈 아래에 color splitter를 삽입하여 파장에 따라 회절 되는 정도의 차이로 색을 분리한

다. 기존의 이미지 센서는 컬러 필터의 투과율에 의존함으로 입사된 빛의 광량이 감소할 수 있으나 splitter를 통해 분리된 빛은 모두 투과되어 손실이 없다. 그러나 splitter의 사용으로 인해 렌즈의 높이를 낮출 수 없어, 이미지 센서의 높이가 오히려 높아지는 한계가 생각된다. foveon 센서[6]는 실리콘에서 파장에 따라 흡수되는 깊이가 다른 성질을 이용하여 색을 구분하는데 서로 다른 포토다이오드 3개를 수직으로 적층하여 컬러 필터 없이 색을 인식한다. 모든 픽셀이 색에 관한 정보를 가지고 있어 RGB(Red, Green, Blue) 이외에도 CYM(Cyan, Yellow, Magenta)과 같이 다양한 색을 재현할 수 있지만 포토다이오드를 적층으로 공정하는 과정이 힘들고 아직 BSI(BackSide-Illuminated) 구조는 존재하지 않는다고 알려져 있어 BSI와 비교하여 FSI(FrontSide-Illuminated)가 가지는 단점들을 극복할 필요가 있다. 그리고 이 적층형 컬러 이미지 센서를 유기물로 제작하는 연구도 소개되었다[7]. 이것은 두께가 굉장히 얇은 유기 광도전막을 사용하여 픽셀의 높이를 낮출 수 있으나 양자 효율이 12% 정도로 매우 낮은 한계가 보인다.

본 논문에서는 픽셀 사이즈가 $1.0\mu\text{m}$ 이하로 작아질 때 픽셀의 높이도 함께 작게 구현하면서 기존의 픽셀의 기능을 구현할 수 있는 픽셀 구조를 제안하였다. 기존의 픽셀 구조는 픽셀 사이즈가 $1.0\mu\text{m}$ 이하로 작아지더라도 컬러필터와 마이크로 렌즈의 높이는 낮출 수가 없다[8]. 그러므로 컬러필터와 마이크로 렌즈의 총 높이가 $1.0 \sim 1.4\mu\text{m}$ 인 것과 비교하여 본 연구에서 제안하는 프리즘의 높이는 $1.0\mu\text{m}$ 이하이며, 픽셀 사이즈가 아주 작은 $0.75\mu\text{m}$ 일 때, 프리즘 픽셀에 대해 검토하였다. 이러한 프리즘 픽셀을 실제 BSI 픽셀 구조에 적용하여 이미지 센서로서의 실현가능성을 광학 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

II. 프리즘 이미지 센서

본 연구에서 제안하는 프리즘 픽셀 구조의 분광 기능을 확인하기 위해 광학 시뮬레이터를 이용하였다[9]. 이미지 센서의 광학 해석에 널리 사용되고

있는 방법 중에 하나인 FDTD(Finite-Difference Time-Domain, 유한 차이 시간 영역) 방법을 통하여 제안한 구조의 광학 해석에 사용하였다[10][11]. 그림 1은 시뮬레이션에 사용된 구조를 나타내었다. 그림 1(b)에 나타내었듯이, w 는 프리즘 아래 변의 길이이고, α 는 프리즘의 꼭지각을 의미한다. 하나의 픽셀 사이지는 $0.75\mu\text{m} \times 0.75\mu\text{m}$ 이고, 실리콘(포토다이오드)의 두께는 $3.0\mu\text{m}$ 이다. 픽셀의 배열은 3×3 의 배열로 구성하였기 때문에 전체 시뮬레이션 구조의 사이지는 $2.25\mu\text{m} \times 2.25\mu\text{m}$ 이고 프리즘의 폭은 $2.25\mu\text{m}$ 이다. 이 때 프리즘의 구조와 굴절률의 변화에 따른 특성을 해석하기 위해 프리즘의 높이와 물질을 바꾸어 시뮬레이션 하였다. 프리즘의 높이(h)는 기존 컬러필터와 마이크로 렌즈의 총 높이 보다 훨씬 낮은 $0.5\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 으로 변화시키고, 프리즘 물질을 ML(MicroLens), SiO_2 , HfO_2 , $\text{HfO}_2(2)$ 로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 이 물질들의 경우 CMOS 이미지 센서의 평탄층과 절연막, 그리고 마이크로 렌즈에 주로 사용되는 물질들로 이것들의 굴절률을 표 1에 나타내었다.

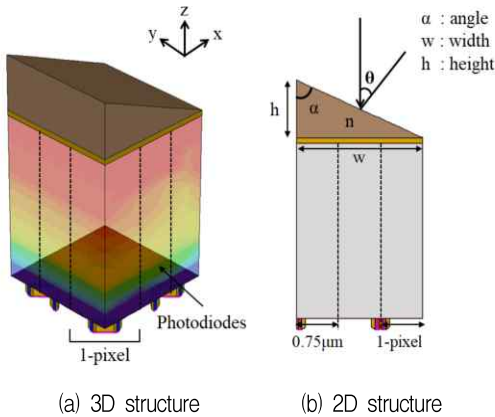


그림 1. 시뮬레이션에 사용된 구조
Fig. 1. Simulated structure

표 1. 프리즘에 사용된 물질들의 굴절률
Table 1. Ractive index of materials used in prism

	SiO_2 [9]	ML	HfO_2 [9]	$\text{HfO}_2(2)$ [12]
450nm	1.47	1.60	1.95	2.14
540nm	1.46	1.58	1.95	2.12
650nm	1.46	1.57	1.95	2.10

되도록 다양한 굴절률을 사용하기 위하여 선택하였으며, SiO 와 HfO 는 본 연구에서 사용된 범용 시플레이터[9]에 사용되고 있는 굴절률을 사용하였으며, $\text{HfO}_2(2)$ 의 경우에는 일반적으로 알려진 물질의 굴절률[12]을 사용하였다. 또한 ML은 범용 시플레이터에서 CMOS 이미지 센서의 마이크로 렌즈용으로 사용하는 물질을 일컫는다. 입사광은 수직으로 입사되었을 때로 가정하였으며, 프리즘이 기존의 컬러 필터와 같이 입사광을 R, G, B로 분광시키는 것을 확인하기 위해 입사광을 세 가지 파장(650nm , 540nm , 450nm)으로 사용하였다.

III. 시뮬레이션 결과

프리즘의 분광 결과를 확인하기 위하여 우선 실리콘 표면에서 빛이 어떤 부분에 흡수되는 가를 먼저 확인하였다. 이를 위하여 실리콘 표면에서의 전속력 밀도(Power Flux Density)를 그림 2에 나타냈다. 이때 분광된 빛의 크기가 색으로 표현되어 있는데 흡수되는 빛의 크기가 클수록 빨간색으로 표현되어 있다고 생각할 수 있다. 그러므로 빨간색으로 표현된 위치가 실제로 분광된 빛이 흡수되는 위치로 간주된다. 먼저 프리즘 물질의 종류와 프리즘의 높이에 따라 분광 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 표 1에 나타낸 물질을 사용하고, 프리즘의 높이를 $0.5\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 로 변화시켰을 경우 가장 분광이 우수하다고 판단되는 구조의 결과를 그림 2에 나타내었다.

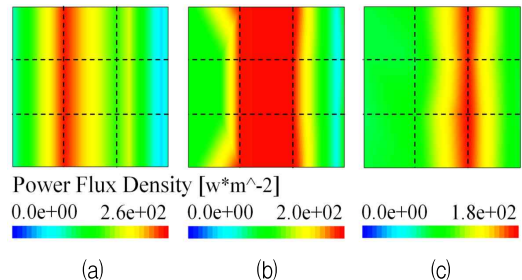


그림 2. 실리콘 표면에서의 beam profile (전속력 밀도)
Fig. 2. Beam profile of silicon surface(Power Flux Density),
(a) $\lambda=450\text{nm}$, $h=0.6\mu\text{m}$, material= HfO_2 , (b) $\lambda=540\text{nm}$,
 $h=0.5\mu\text{m}$, material= HfO_2 , (c) $\lambda=650\text{nm}$, $h=0.6\mu\text{m}$,
material= $\text{HfO}_2(2)$

이때, 하나의 프리즘 아래에 있는 3×3 배열의 0.75μm 픽셀의 위치를 점선으로 표시해 두었다. 기존의 컬러필터가 Red(650nm), Green(540nm), 그리고 Blue(450nm)의 세 가지 색을 구현하기 때문에 동일한 파장의 빛을 투과시켰을 때 분광이 우수한 구조는 아래와 같았다. 450nm 파장의 빛이 입사되었을 경우(그림 2(a)) 프리즘의 물질이 HfO₂(2)이고 높이가 0.6μm일 때 왼쪽의 픽셀과 오른쪽 픽셀 사이에서 분광되어 흡수됨을 보였다. 540nm 파장(그림 2(b))에서는 프리즘의 물질이 HfO₂이고 높이가 0.9μm인 경우 중간 픽셀로 분광되었다. 또한 650nm 파장(그림 2(c))에서는 물질이 HfO₂이고 높이가 0.8μm일 때 가장 오른쪽 픽셀과 중간 픽셀 사이의 흡수 되었으며 이 결과를 통해 서로 다른 파장의 빛이 서로 다른 위치에서 흡수됨을 확인할 수 있다.

그림 3에는 프리즘 높이, 물질, 그리고 입사 파장의 모든 경우에 대해 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 입사광의 파장에 따라 분광되어 실리콘에 흡수되는 위치와 범위를 블록으로 나타낸 것으로, 그림 2에서 빨간 색으로 나타난 위치와 크기만큼 블록으로 그림 3에 나타내었다. 세 가지 파장(450nm - 파란색 블록, 540nm - 초록색 블록, 650nm - 빨간색 블록)의 빛이 입사된 경우에 대해 프리즘의 높이가 0.5μm ~ 1.0μm일 때 y축으로 구분하고, 0.75μm사이의 픽셀의 구분을 x축으로 나타내었다. 이 때, 시뮬레이션의 픽셀의 배열은 3×3이나 그림 2에서와 같이 분광의 차이는 가로 방향으로만 존재하기 때문에 세로 방향은 평균을 구하여 가로방향의 분광

특성에 대해서만 그래프로 나타내었다. 그러므로 그림 3의 x축은 그림 2의 가로 방향의 특성에 따라 주로 변한다. 프리즘의 물질이 SiO₂일 때의 결과를 보면, 가운데 픽셀이 가장 많이 흡수 되는데 그 중에서도 높이가 0.5μm일 때는 540nm 파장의 빛이, 0.6μm일 때는 450nm 파장의 빛이, 0.8μm인 경우에는 650nm 파장의 빛이 분광되어 나타났다. 또한 프리즘의 물질이 ML인 경우에서도 0.7μm인 경우를 제외하고 중앙의 픽셀에서 분광 특성이 잘 나타났으며 0.5μm, 0.8μm인 경우 450nm 파장의 흡수가 두드러지게 잘 나타났다. 그리고 프리즘의 물질이 HfO₂인 경우에는 왼쪽의 픽셀이 가운데 픽셀보다 분광이 잘 드러났다. 높이가 증가함에 따라 0.5μm ~ 0.6μm에서는 450nm 파장이 분광되었고, 0.6μm ~ 0.9μm에서는 650nm 파장의 분광이 두드러졌다. 그 중에서도 높이가 0.7μm 일 때 다른 결과들과 달리 세 파장의 빛이 모두 분광되어 흡수되는 것을 알 수 있다. 하지만 하나의 픽셀 안에 두 개의 파장이 흡수되기 때문에 프리즘 픽셀로서의 유용성은 불가능 할 것으로 판단된다. 그리고 굴절률이 2.0μm 이상인 HfO₂(2)에서는, 450nm 파장은 높이가 0.6μm에서 분광 특성이 잘 나타났고, 540nm 파장은 0.6μm, 0.8μm, 0.9μm에서, 650nm 파장은 0.5μm ~ 0.7μm, 1.0μm에서 분광 특성이 잘 보였다. 이러한 결과 중 프리즘 픽셀로 가장 사용이 유용할 것으로 판단되는 구조는 물질이 HfO₂(2)이면서 높이가 0.6μm일 때로, 세 개의 파장의 빛이 서로 다른 픽셀에 잘 흡수되는 것을 볼 수 있었다.

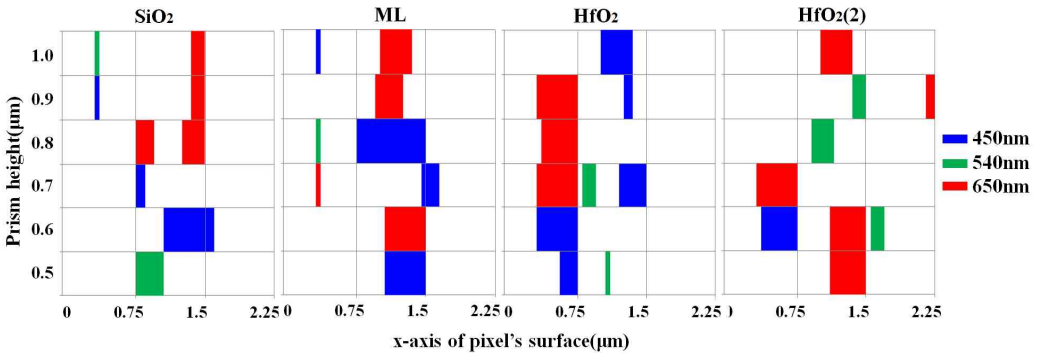


그림 3. 실리콘 표면에서의 분광 시뮬레이션 결과
 Fig. 3. Color separation simulation results of silicon surface

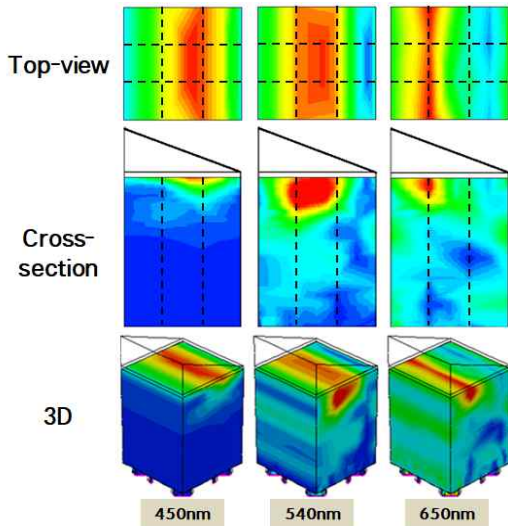


그림 4. 실리콘에서의 Beam profile (표면/단면/3D)
Fig. 4. Beam profile of silicon (surface/cross-section/3D)

지금까지는 실리콘 표면의 결과를 통해 분광 결과를 해석해 보았는데, 이것이 실리콘 내부에도 동일한 위치에 흡수되는 것을 확인하기 위해 그림 4와 같이 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 프리즘 물질의 굴절률이 2.0이고 프리즘의 높이가 $0.9\mu\text{m}$ 인 구조에서의 전속력 밀도의 결과로, 각 파장별로 픽셀의 표면(Top-view)에서 흡수 결과와 단면에서의 흡수 결과 그리고 3차원 픽셀 구조에서의 흡수 결과이다. 점선은 각 픽셀의 위치를 구분해 둔 것으로 450nm, 540nm, 650nm 파장의 빛이 입사되었을 때 프리즘 아래에 분광된 패턴과 동일하게 실리콘 내부에서도 흡수되었다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 프리즘 이미지 센서 구조를 제안하여 이미지 센서의 컬러 필터를 사용하지 않고 분광 가능한 광학 구조를 제안하였다. 픽셀 사이즈가 $0.75\mu\text{m}$ 일 때, 픽셀 상부의 프리즘은 높이를 기존의 마이크로 렌즈와 컬러 필터를 포함한 높이보다 낮은 $0.5\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ 으로 하였고 이미지 센서에 주로 사용되고 있는 물질들을 프리즘에 적용해 보았다. 그 결과 프리즘의 물질이 굴절률 2.1 정도인 HfO_2 (2)이면서 높이가 $0.6\mu\text{m}$ 일 때 세 개의 파장의 빛이

서로 다른 픽셀에 잘 흡수되는 것을 볼 수 있었다. 그러므로 이 구조가 프리즘 픽셀에 적용될 수 있다고 생각된다. 이는 기존의 컬러필터와 마이크로 렌즈의 높이는 $1.0 \sim 1.4\mu\text{m}$ 정도로 더 이상 낮추기 힘든 구조와 비교하면 본 연구에서 제안하는 프리즘 구조가 훨씬 픽셀의 높이가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 통해 본 논문에서 제안하는 프리즘 구조가 소형화되는 CMOS 이미지 센서의 픽셀에 적용하여 컬러 필터와 동일한 기능을 할 수 있는 구조임이 확인되었다.

References

- [1] T. Hirayama, "The evolution of CMOS image sensors", 2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, pp. 5-8, Nov. 2013.
- [2] Y. W. Cheng, T. H. Tsai, and C. H. Chou, "Optical performance study of BSI image sensor with stacked grid structure", 2015 IEEE International Electron Devices Meeting, pp. 30.4.1-30.4.4, Dec. 2015.
- [3] S. Yokogawa, S. P. Burgos, and H. A. Atwater, "Plasmonic Color Filters for CMOS Image Sensor Applications", Nano Letters, Vol. 12, No. 8, pp. 4349-4354, Jul. 2012.
- [4] S. P. Burgos, S. Yokogawa, and H. A. Atwater, "Color imaging via nearest neighbor hole coupling in plasmonic color filters integrated onto a complementary metal-oxide semiconductor image sensor", American Chemical Society Nano, Vol. 7, pp. 10038-10047, Oct. 2013.
- [5] S. Nishiwaki, T. Nakamura and M. Hiramoto, "Efficient colour splitters for high-pixel-density image sensors", Nature Photonics, Vol. 7, pp. 240- 246, Feb. 2013.
- [6] R. B. Merrill, "Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array using a Triple-Well Structure", U.S. Patent No.5,965,875, Oct. 1999.
- [7] J. Cheon, J. Kim, and H. J. Chung, "Study on Fabrication and Characteristics Analysis of a Red

- Light-Sensitive Organic Photoconductive Film for a Stacked Color Image Sensor", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 13, No. 2, pp. 7-15, Feb. 2015.
- [8] S. Takahashi, Y. M. Huang, and J. J. Sze, "A 45 nm Stacked CMOS Image Sensor Process Technology for Submicron Pixel", Sensors, Vol. 17, No. 12, pp. 2816, Dec. 2017.
- [9] www.synopsys.com [Accessed: Jan. 27, 2018].
- [10] C. C. Fesenmaier, Y. Huo, and P. B. Catrysse, "Optical confinement methods for continued scaling of CMOS image sensor pixels", Optics Express, Vol. 16, No. 25, pp. 20457-20470, Dec. 2008.
- [11] Y. K. Kim, "A Double-Layered Microlens for High-Sensitivity CMOS Image Sensors", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 8, pp. 29-34, Aug. 2016.
- [12] refractiveindex.info [Accessed: Jan. 27, 2018].

저자소개

박 지 연 (Jiyeon Park)



2016년 2월 : 동아대학교
전자공학(공학사)
2016년 3월 ~ 현재 : 동아대학교
전자공학과 석사과정
관심분야 : CMOS 이미지 센서

김 윤 경 (Yunkyung Kim)



2010년 3월 : 동경대학교
전자공학(공학박사)
2010년 ~ 2014년 : 삼성전자
System LSI 사업부 책임 연구원
2014년 3월 ~ 현재 : 동아대학교
전자공학과 조교수
관심분야 : CMOS 이미지 센서,

픽셀 광학 구조 개발