

광학 박막을 채용한 CMOS 이미지 센서 픽셀의 수광 효율

강명훈[†] · 고은미 · 이제원 · 조관식

인제대학교 대학원 나노시스템공학과
☎ 621-749 경상남도 김해시 어방동 607번지

(2008년 12월 23일 받음, 2009년 2월 6일 수정본 받음, 2009년 2월 9일 게재 확정)

CMOS 이미지 센서의 수광 효율을 높이기 위해서 픽셀의 광 통로 벽에 광학 박막의 도입을 제안하고자 한다. Essential Macleod를 이용하여 시뮬레이션해 본 결과, 전반사가 일어나는 범위가 현저히 증가하였다. 특히 공기 박막을 도입할 경우에, 그 효과가 가장 현저하여, 광 통로 벽에서의 전반사 임계각이 50도까지 확대되었다.

주제어: CMOS image sensor, Optical thin films, Optical crosstalk, Reflectance

I. 서 론

가시광선 대역의 광 신호를 전기적 신호로 전환하는 이미지 센서로는 흔히 CCD 이미지 센서와 CMOS 이미지 센서가 사용된다. CCD 이미지 센서는 우수한 영상 품질을 제공하지만 제조단가가 높은 편이다. 이에 비하여 CMOS 이미지 센서는 다양한 노이즈가 발생하여 영상 품질이 떨어진다. 하지만 저렴한 가격과 작은 크기 그리고 낮은 소비 전력 등의 장점으로 인하여, 모바일 기기를 중심으로 채용 분야가 급격하게 확대되고 있다.^[1-3]

CMOS 이미지 센서의 영상 품질 저하의 원인은 대체로 두 가지로 분류할 수 있다. 픽셀 내부 구조에서의 광학적인 손실과 내부 회로에서의 전기적인 손실이 그것이다.^[1-6] 전기적인 손실은 CMOS 이미지 센서의 동작원리에 의해 발생하는 손실로서 꾸준히 그 해결책이 제안되고 있다.^[1-5] 최근에 제작되고 있는 CMOS 이미지 센서의 경우, 입사 광량이 충분한 환경에서는 CCD 이미지 센서에 필적하는 영상을 출력하기도 한다.^[2] 광학적인 손실은 초기 CMOS 이미지 센서에서도 발생하였으나 전기적인 손실에 의한 문제가 더 심각하여 크게 부각되지는 않았었다.^[1-3] 회로 공정이 어느 정도 안정화된 2000년도 이후 컬러 영상 출력을 위한 컬러 필터가 채용된 CMOS 이미지 센서가 제작되었다.^[2-3] 컬러 필터는 각 픽셀마다 다른 파장의 빛이 들어가게 하는 역할을 하는데, 픽셀 크기가 점점 작게 설계됨에 따라서, 인접 픽셀 사이에서 빛이 서로 투과하여 색 섞임 현상도 문제가 되고 있다.^[6]

본 논문에서는, 픽셀 크기와 간격의 축소에 따른 수광 효율 저하 현상을 최소화 하기 위한 방안으로서, 광통로 벽에 광학 박막이 채용된 픽셀 구조를 제안한다. 광통로 벽에 위치한 광학 박막에서의 다중간섭 현상에 의하여, 화소 분리막을 투과하는 빛을 현저하게 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

이 주제와 유사한 기존의 발표 논문으로는, T. H. Hsu 등이 “Air-Gap-Guard Ring”을 도입하여 제작한 픽셀에 대한

것이 있다.^[7-10] 이들은 럭비공 모양의 공기 버블을 광통로 벽 안에 형성한 다음, 포토다이오드에 감지되는 결과적인 신호를 측정하였다. 여기서는 광통로 벽에서의 반사 외에도 광통로 벽 안의 금속 배선의 영향, 인접 픽셀로부터 침투하는 빛 등의 다양한 요인들이 종합적으로 반영된 결과이며, 럭비공 모양의 기하 구조는 광학이론적으로 접근하기가 너무 어려운 구조이다.

우리는, 광통로 벽에서의 반사를 개선하는 방안에 대해서만 고려해 보려고 한다. 광학 박막의 내부에 입사한 빛은 양쪽 면에서의 다중 반사를 겪게 된다. 여기서 반사할 때마다 일부가 투과하여 나오게 된다. 박막의 두께가 일정한 조건을 만족시킬 경우에는 출사 광선들 사이의 보강간섭으로 인하여, 외부로부터 입사한 빛의 반사율이 현저하게 증대될 수 있다. 그리고, 두 매질의 경계면에 얇은 막이 형성된 구조에 대해서는 광학이론이 아주 잘 정립되어 있고,^[11] 시뮬레이션 소프트웨어도 발달되어 있어서, 어렵지 않게 그 효과를 예측해 볼 수 있다. 우리는 Essential Macleod(Thin Film Center)를 이용하여 시뮬레이션하였다.

II. 기존 CMOS 이미지 센서 픽셀에서의 광학적 손실

CMOS 이미지 센서에서 빛을 흡수하는 역할을 하는 픽셀은 그림 1에서 알 수 있듯이 마이크로 렌즈, 컬러 필터, 광통로, 화소 분리막, 포토다이오드 등으로 구성되어 있다. 외부에서 입사하는 빛은 마이크로 렌즈로 모아진 후에 컬러 필터에서 선택적인 파장의 빛만 걸러져서 들어간다. 그리고 광통로를 거쳐 포토 다이오드에서 흡수되어 전기적 신호로 바뀐다. 최근 CMOS 이미지 센서 픽셀의 크기가 점점 축소됨에 따라 마이크로 렌즈와 광통로 벽에서의 광학적 손실이 문제되고 있다.^[3,6-10]

이 중에서 광통로 벽에서의 광학적인 손실은 CMOS 이미지 센서에 비스듬하게 입사하는 광선들이 광통로 벽을 투과하여 나감으로써 발생한다.^[3,6-10] 그 결과 각 포토 다이오드에서 흡수되는 빛의 세기가 줄어들게 되어 광감도가 저하된다.

[†]E-mail: whunmk@gmail.com

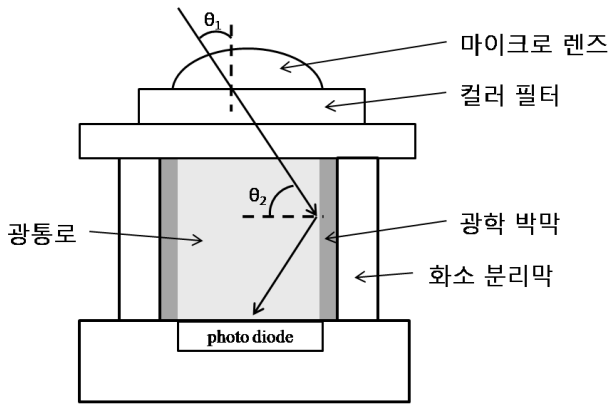


그림 1. 광학 박막을 도입한 CMOS 이미지 센서 픽셀 구조. θ_1 은 마이크로 렌즈에서의 입사각. θ_2 는 광통로 벽에서의 입사각.

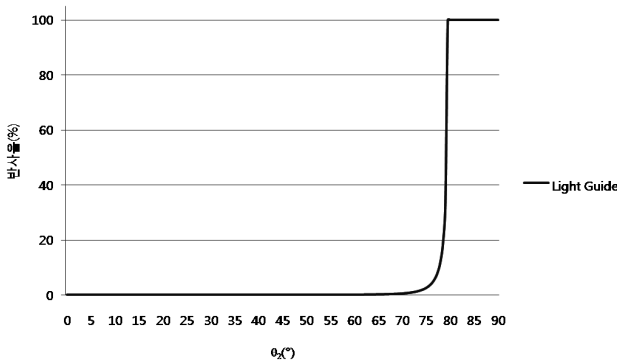


그림 2. Light Guide Pixel의 광통로 벽에서 반사율. 가로축 θ_2 는 광통로 벽에서의 입사각. 기준 파장은 633 nm.

특히 컬러 이미지 센서의 경우에는, 각 픽셀에 선택된 파장의 빛만 흡수되어야 하는데, 인접한 픽셀로부터 다른 파장의 빛이 섞여 들어오게 된다. 최근 공정 기술의 발달로 픽셀 간격이 2 μm 이하로 축소되어 이러한 문제점이 더욱 부각되고 있다.^[3,5]

종래에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 광통로와 화소 분리막의 굴절률 차이를 이용한 Light Guide 픽셀 구조,^[7] 마이크로 렌즈와 컬러 필터 사이에 Shield PR을 위치시켜 인접한 단위 화소로 입사하는 빛을 억제 하는 방법,^[12] 화소 분리막에 두꺼운 금속을 증착하고 경사 식각하여 그 끝 단에 일정한 개구폭을 갖는 tapered 홈 형태의 마이크로 렌즈를 가지는 이미지 센서^[13] 등이 제안되어 있다.

이들 중에서 흔히 채용되고 있는 Light Guide 픽셀 구조에서는, 비스듬하게 입사한 빛이 마이크로 렌즈와 컬러 필터를 지나 광통로 벽에 도달하였을 때, 전반사가 일어날 것을 기대한다. 그러나 실제의 CMOS 제조 공정에서 사용하고 있는 Si 산화물 계열 물질들은 굴절률의 차이가 너무 작아서 내부 전반사 임계각이 거의 80 도 부근이 된다(그림 2 참조). 실제 입사광의 입사각 범위를 고려하건대, 임계각이 50 도 부근이 되어야, 상당한 효과를 기대할 수 있다. 또한, Shield PR 방법에서는, PR의 위치 상의 문제로 인하여 광통로 내부에서

표 1. CMOS 센서 픽셀의 각 부분의 후보 물질들의 광학 상수 (기준 파장: 633 nm)^[7]

픽셀 부분	후보 물질	굴절률(n)	소멸계수(k)
광학 박막	Air	1.00	0.00
	TiO ₂	2.28	0.00015
	MgF ₂	1.38	0.00
광 통로	PE-oxide	1.46	0.00
화소 분리막	FSG-oxide	1.44	0.00

발생하는 공간적인 혼선을 크게 줄일 수 없는 단점이 있다. 마지막으로, 화소 분리막에 두꺼운 금속을 증착하는 경우에는, CMOS 이미지 센서가 동작하는 동안 전기적인 노이즈가 발생하여서, 디바이스 동작 시 처리 속도가 저하되고, 영상 품질이 떨어지는 단점이 있다.

III. 광학 박막을 채용한 CMOS 이미지 센서

광학 박막은 두께 혹은 박막의 층수에 따라 반사율, 투과율 등을 조절할 수 있다. 여기서는 광통로 벽에 광학 박막을 형성하여 반사율을 높임으로써, 인접 픽셀로의 투과를 최소화하려고 한다.

광학 박막의 물질은 실리콘 기반 CMOS 제조 공정 특성과 CMOS 디바이스의 동작 특성을 고려하여 선택해야 한다. 즉,

- 금속은 CMOS 디바이스 동작 시 노이즈의 원인 될 수 있으므로 반드시 유전체를 사용해야 한다.
- 굴절률은 화소 분리막과 광통로 매질의 굴절률과 적당한 차이가 있어야 한다.
- 표준 CMOS 공정에서 사용되는 물질을 이용하거나, 공정 과정 중에서 생성되는 부산물을 이용하는 것이 좋다.
- 수십 nm 정도의 폭과 수 μm 깊이로 공정할 수 있어야 한다.

이러한 점들을 고려하여, 공기(Air), MgF₂, TiO₂ 등을 선택하여 시뮬레이션해 보았다. 선택 된 매질의 광학 특성은 표 1과 같다.

반사율을 이론적으로 계산하기 위해 Essential Macleod (ver. 8.9.55) 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 기존의 Light Guide 픽셀 구조의 경계면에서의 반사율과 광학 박막이 채용된 픽셀에서의 반사율을 계산하였다. 기준 파장은 633 nm로 하였다. 그리고 그림 1에서 알 수 있듯이 마이크로 렌즈에서의 입사각 θ_1 과 광통로 벽에서의 입사각 θ_2 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$90 - \theta_1 \approx \theta_2 \tag{1}$$

그림 2는 Light Guide 픽셀 구조에서의 반사율을 계산한 결과를 나타낸다. 광통로는 PE-Oxide(PECVD Oxide, n=1.46), 화소 분리막은 FSG-Oxide(Fluorinated silica glass oxide, n=1.435)이다.^[7] 결과에서 알 수 있듯이 임계각(79.38도) 이하의 입사각 θ_2 에서는 반사율이 급격히 낮아지는 것을 알 수 있

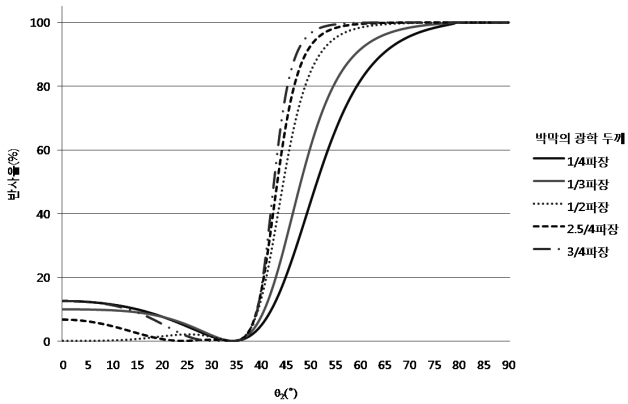


그림 3. 공기 박막을 도입한 경우의 입사각에 따른 반사율. 기준 파장은 633 nm.

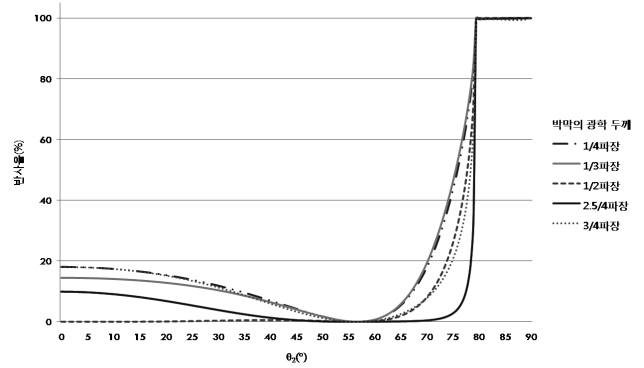


그림 4. TiO₂ 박막을 도입한 경우의 입사각에 따른 반사율. 기준 파장은 633 nm.

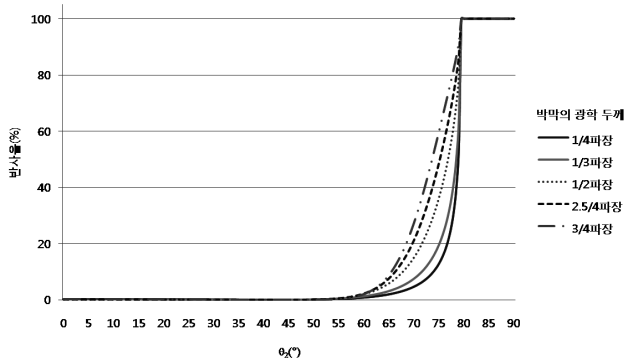


그림 5. MgF₂ 박막을 도입한 경우의 입사각에 따른 반사율. 기준 파장은 633 nm.

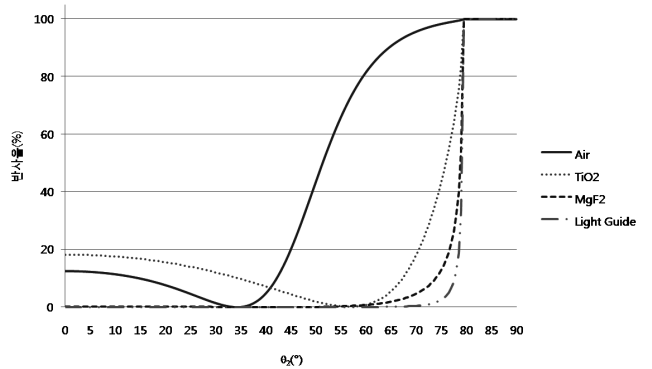


그림 6. 동일한 광학두께(1/4 파장)의 여러 가지 박막에 따른 반사율 비교. 기준 파장은 633 nm.

다. 그 결과로 θ_i 가 10도 이상인 입사 광선은 대부분 인접 픽셀로 투과하여 버린다.

그림 3, 4, 5는 각각 공기, MgF₂, TiO₂ 등의 박막을 광통로 벽에 추가한 경우의 반사율을 계산한 결과이다. 그림 6은 같은 두께(1/4 파장)에서 여러 종류 박막들의 반사율을 비교한 것이다. 이에 의하면, 공기 박막이 가장 탁월한 성능을 보이는데, 이는 굴절률이 가장 낮은 점에 기인한다. 근래의 0.18 μm 공정을 고려할 때 의미 있는 두께인 1/3~1/4 파장 두께의 공기 박막에 의하여, 전반사 임계각이 50 도 부근으로까지 낮아지는 효과를 확인할 수 있다.

IV. 논 의

광학 박막을 채용한 시뮬레이션 모델에서는, 광학 박막의 면적이 무한히 넓다는 가정이 사용되는 점을 고려하여야 한다. 따라서, 본 논문의 결과는 실제보다 지나치게 좋은 성능 예측이 될 수 있다. 시판되고 있는 CMOS 이미지센서의 픽셀 구조에서는 광통로 벽의 깊이와 폭이 수 마이크로 미터 정도로서, 박막 두께로서 현실적인 값인 수 백 나노 미터에 비하여, 열 배 정도에 지나지 않는다. 이러한 실제 규격에 근접한 모델을 이론적으로 다루는 것은 현재의 이론과 시뮬레

이션 도구들로는 실현하기 어려운 과제라고 할 수 있다.

이러한 효과를 실제적으로 확인하기 위하여는 실험이 필요하다. 여기서 공기 박막을 형성하는 데에는 트렌치를 얇고 깊게 파는 것과 그 위를 덮는 것이 요구된다. 이는 이른바 에칭(etching) 공정과 캐핑(capping) 공정으로서 현재로서 이미 가능한 반도체 공정들이라고 할 수 있다. 이와 같이 얇고 깊은 트렌치 위쪽에 증착을 시도하면, 물질이 트렌치 내부로 거의 유입되지 못하고 위에 쌓여서 자연스럽게 캐핑이 이루어진다.

이러한 실험을 통하여 얻는 결과로부터 이론적 모델의 수정을 위한 힌트를 얻게 될 것이다. 한편, 가시광에 비하여 파장이 훨씬 긴 적외선을 이용하는 군사용 적외선 감지 센서에서는 픽셀을 보다 크게 설계할 수 있으므로, 본 논문의 결과가 더 잘 응용될 수 있다고 본다.

V. 결 론

광통로 벽에 광학 박막이 추가된 픽셀 구조에서는 광학 박막에서의 간섭 효과에 의하여 빛의 반사율이 현저히 높아질 수 있다. 그 결과로, 인접한 픽셀로 투과하여 들어가 혼선을 일으키는 효과를 줄이게 된다. 이를 확인하기 위해 광학 박막 설계 프로그램인 Essential Macleod를 이용하여 시뮬레

선 하여, 공기와 몇 가지 반도체 공정에서 고려할만한 물질에 대한 결과를 얻어내었다. 특히 공기 박막을 이용할 경우에, 전반사가 일어나는 입사각 범위가, 80~90도로부터, 50~90도로 넓혀질 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 인제대학교 학술연구비 지원으로 수행된 것이다.

참고문헌

- [1] E. R. Fossum, "CMOS Image Sensors: Electronic Camera-On-A-Chip," *IEEE transaction on electron devices*, vol. 44, no.10, pp. 1689-1698, 1997.
- [2] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, and J. Salvi, "Review of CMOS image sensors," *Microelectronics Journal*, vol. 37, pp. 433-451, 2006.
- [3] H. Rhodes, G. Agranov, C. Hong, U. Boettiger, R. Mauritzson, J. Ladd, I. Karasev, J. McKee, E. Jenkins, W. Quinlin, I. Patrick, J. Li, X. Fan, R. Panicacci, S. Smith, C. Mouli, and J. Bruce, "CMOS Imager Technology Shrinks and Image Performance," 2004 IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, pp. 7-18, 2004.
- [4] Y. Chae, K. Choe, B. Kim, and G. Han, "Sensitivity Controllable CMOS Image Sensor Pixel Using Control Gate Overlaid on Photodiode," *Electron Device Letters. IEEE*, vol. 28, Issue 6, pp. 495-498, 2007.
- [5] C. H. Koo, H. K. Kim, K. H. Paik, D. C. Park, K. H. Lee, Y. K. Park, C. R. Moon, S. H. Lee, S. H. Hwang, D. H. Lee, and J. T. Kong, "Improvement of Crosstalk on 5M CMOS Image Sensor with $1.7 \times 1.7 \mu\text{m}^2$ pixels," *Proc. of SPIE*, vol. 6471, pp. 647115-1-5, 2007.
- [6] G. Agranov, V. Berezin, and R. H. Tsai, "Crosstalk and Microlens Study in a Color CMOS Image Sensor," *IEEE transaction on electron devices*, vol. 50, no. 1, pp. 4-11, 2003.
- [7] T. H. Hsu, Y. K. Fang, C. Y. Lin, S. F. Chen, C. S. Lin, D. N. Yaung, S. G. Wu, C. H. Tseng, J. S. Lin, and C. S. Wang, "Light Guide for Pixel Crosstalk Improvement in Deep Submicron CMOS Image Sensor," *IEEE electron device letters*, vol. 25, no. 1, pp. 22-24, 2004.
- [8] D. N. Yaung, S. G. Wu, H. C. Chien, T. H. Hsu, C. H. Tseng, J. S. Lin, J. J. Chen, C. H. Lo, C. Y. Yu, C. S. Tssi, and C. S. Wang, "Air-Gap Guard Ring for Pixel Sensitivity and Crosstalk Improvement in Deep Sub-micron CMOS Image Sensor," *IEEE IEDM*, vol. 401, pp. 16.5.1-16.5.4, 2003.
- [9] T. H. Hsu, Y. K. Fang, D. N. Yaung, S. G. Wu, H. C. Chien, C. S. Wang, J. S. Lin, C. H. Tseng, S. F. Chen, C. S. Lin, and C. Y. Lin, "Color Mixing Improvement of CMOS Image Sensor With Air-Gap-Guard Ring in Deep-Submicrometer CMOS Technology," *IEEE electron device letters*, vol. 26, no. 5, pp. 301-303, 2005.
- [10] T. H. Hsu, Y. K. Fang, D. N. Yaung, S. G. Wu, H. C. Chien, C. H. Tseng, L. L. Yao, W. D. Wang, C. S. Wang, and S. F. Chen, "A High-Efficiency CMOS Image Sensor With Air Gap in situ MicroLens (AGML) Fabricated by $0.18\text{-}\mu\text{m}$ CMOS Technology," *IEEE electron device letters*, vol. 26, no. 9, pp. 634-636, 2005.
- [11] 황보창권, *박막광학*(테크 미디어, 서울, 2005).
- [12] 김은지, "광 집적도를 향상시킨 시모스 이미지센서의 제조방법," 대한민국 특허 10-2004-0069224, 2004.
- [13] 황충호, "금속막 마이크로렌즈를 구비한 이미지 센서," 대한민국 특허 10-2003-0098504, 2003.

Enhancement of Light Guiding Efficiency in CMOS Image Sensor by Introducing an Optical Thin Film

Myung Hoon Kang[†], Eun Mi Ko, Jewon Lee, and Guan Sik Cho

Department of Nano Systems Engineering, Inje University, 607, Obang-dong, Gimhae, Gyeongnam, 621-749, Korea

[†]E-mail: whunmk@gmail.com

(Received December 23, 2008; Revised manuscript February 6, 2009; Accepted February 9, 2009)

We consider introducing an optical thin film to the light guiding wall of a pixel in order to enhance the light guiding efficiency of a CMOS image sensor. Simulating the reflectance as a function of the incidence angle using the Essential Macleod program, we find that the range of total internal reflection is greatly increased for several materials. Particularly when air is chosen as the thin film material, the critical angle of total internal reflection could be shifted to about 50 degrees.

OCIS codes: (310.0310) Thin Films; (040.0040) Detectors; (310.6860) Thin Films, optical properties.