청색광 검출 Si Photodiode에서 SiO_2/Si_3N_4 광반사 방지막의 최적두께 설계

서동균*, 황용운*, 장지근*

*단국대학교 전자컴퓨터 학부

초록

400~450nm 파장 범위의 청색광을 검출하는 Si 포토다이오드에서 SiO_2, Si_3N_4, SiO_2/Si_3N_4를 광반사 방지막으로 사용하는 경우 광반사 방지막의 두께에 따른 표면 광반사 손실을 이론적으로 계산하였다. 400~450nm 청색 파장에서 SiO_2, Si_3N_4 단일막에 대한 최소 광반사 손실은 각각 $d(SiO_2)$=700~750Å 와 $d(Si_3N_4)$=500Å에서 나타났으며, SiO_2/Si_3N_4 이중막에 대한 최소 광반사 손실은 $d(SiO_2/Si_3N_4)$=750Å/(180~200)Å에서 나타났다.

1. 서 론

최근에 이르러 광정보처리 장치의 소형화, 고성능화에 따라 청색광을 이용한 고배속 CDROM이나 DVD 장치의 개발이 추진되고 있다.[1,2] 디지털 광신호 처리에서 청색광을 이용할 경우 광신호 빔의 크기를 줄일 수 있고 PDIC(photodetector integrated circuit)의 신호응답 시간이 빨라 많은 양의 정보를 고속으로 처리할 수 있다는 장점이 있다. 이에 따라 청색 광신호를 검출하기 위한 새로운 고성능 Si 포토다이오드의 개발은 매우 중요한 연구 가치를 갖는다. 일반적으로 포토다이오드의 성능은 입사광에 대한 광전류 크기와 응답 속도로 결정되며, 포토다이오드가 높은 감도 특성을 갖기 위해서는 우선적으로 수광면에서 입사광의 광반사 손실을 줄여야 한다. 본 논문에서는 λ = 400~450nm의 빛을 이용하는 광정보처리 장치용 Si PDIC의 개발을 목표로 SiO_2와 Si_3N_4 단일막, 그리고 SiO_2/Si_3N_4 이중막을 광반사 방지막(antireflection layer: AR 막)으로 사용하는 청색 검출 Si 포토다이오드에서 AR 막의 두께에 따른 표면 광반사 손실을 이론적으로 계산하고 광반사 손실을 최소로 줄이기 위한 최적 AR 막의 두께를 알아보았다.

2. 광반사 방지막과 표면손실

빛이 한 매질에서 다른 매질로 입사될 때 그 경계면에서 입사광의 일부분은 반사된다. 이때 반사율은 입사광의 파장과 입사각도 그리고 매질의 구성에 따라 달라진다. 파장이 λ인 단색광이 공기에서 Si으로 수직 입사될 경우 표면 반사율은

$$R=\frac{(n-1)^2+(\lambda\alpha/4\pi)^2}{(n+1)^2+(\lambda\alpha/4\pi)^2} \quad (1)$$

로 나타난다.[3] 여기서 α는 반도체의 흡수계수이고, $n=n_s/n_o$ 이며 n_s와 n_o는 각각 공기와 Si 반도

체의 굴절율이다. 식 (1)로부터 청색광이 Si 포토다이오드에 입사될 때 표면에서 광반사 손실을 50% 이상으로 높게 나타남을 알 수 있다. 이에 따라 청색광을 검출하는 Si 포토다이오드에서 입사광의 반사손실을 줄이기 위해서는 수광면에 적절한 AR 막을 Fig.1 과 같이 설치할 필요가 있다.[4] Si 표준 공정에서는 SiO_2-산화막이나 Si_3N_4-질화막을 형성하는 기술이 잘 발달되어 있어 이들의 단층 또는 다층구조를 이용하여 광반사 방지막을 설치하기가 용이하다. Si 포토다이오드 제작에서 SiO_2막을 AR 막으로 사용할 경우 SiO_2-Si 계면특성이 우수하고 산화막 형성이 쉬워 현재 단일 AR 막으로는 SiO_2막이 가장 널리 이용되고 있다.[5] 그러나 SiO_2막은 Si에 비해 굴절율이 매우 낮기 때문에 단일막 구조로는 표면에서 광반사 손실을 충분히 줄일 수 없다. 반면 Si_3N_4막은 SiO_2막에 비해 광반사 손실을 줄일 수 있으나 Si 표면에 많은 결함을 유발함으로 반도체 표면에서 광생성된 캐리어들을 재결합 소멸시켜 감도 특성을 오히려 저하 시킬 수 있다.[6]

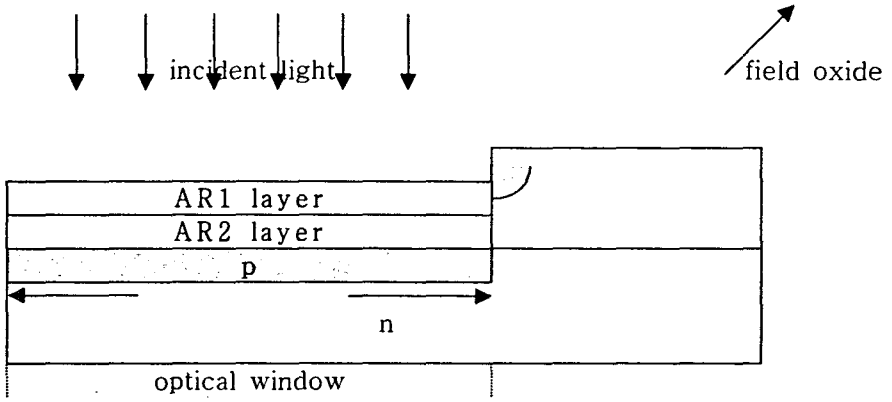

Fig .1. Antireflection coating on the Si photodetector.

따라서 Si 표면에 현저한 결함의 유발 없이 표면 광반사 손실을 크게 줄일 수 있는 방안으로 SiO_2/Si_3N_4 이중막의 사용이 새롭게 시도되고 있다. 광학이론에 의하면[7,8] 단일 AR막을 갖는 Si 포토다이오드에서 AR막의 굴절율과 두께를 각각 n_1, d_1 이라고 할 때, 수직 입사광에 대한 반사율은

$$R=\frac{r_1^2+r_2^2+2r_1r_2\cos(4\pi n_1d_1/\lambda)}{1+r_1^2+r_2^2+2r_1r_2\cos(4\pi n_1d_1/\lambda)} \tag{2}$$

로 나타난다. 여기서 $r_1=(n_0-n_1)/(n_0+n_1)$, $r_2=(n_1-n_s)/(n_1+n_s)$ 이다. 또한 이중 AR 막을 갖는 air-AR1-AR2-Si 계에서 AR1 막의 굴절율과 두께를 n_1과 d_1, AR2 막의 굴절율과 두께를 n_2, d_2 라고 할 때 수직 입사광에 대한 반사율은

$$R=\frac{r_1^2+r_2^2+r_3^2+r_1^2r_2^2r_3^2+2r_1r_2(1+r_3^2)\cos2\theta_1+2r_2r_3(1+r_1^2)\cos2\theta_2+2r_1r_3\cos2(\theta_1+\theta_2)+2r_1r_2^2r_3\cos2(\theta_1-\theta_2)}{1+r_1^2r_2^2+r_1^2r_3^2+r_2^2r_3^2+2r_1r_2(1+r_3^2)\cos2\theta_1+2r_2r_3(1+r_1^2)\cos2\theta_2+2r_1r_3\cos2(\theta_1+\theta_2)+2r_1r_2^2r_3\cos2(\theta_1-\theta_2)} \tag{3}$$

로 나타난다. 여기서 $r_1=(n_0-n_1)/(n_0+n_1)$, $r_2=(n_1-n_2)/(n_1+n_2)$, $r_3=(n_2-n_s)/(n_2+n_s)$, $\theta_1=2\pi n_1d_1/\lambda$, $\theta_2=2\pi n_2d_2/\lambda$ 이다. 식 (1)과 (2)의 계산에서 SiO_2막과 Si_3N_4막 그리고 Si의 굴절율이 알려지면 주어진 입사광의 파장에 대해 AR 막의 두께에 따른 표면 반사율을 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

λ=400~450nm 범위의 입사광에 대해 SiO_2 막과 Si_3N_4 막의 굴절율은 각각 1.46과 2.07로 거의 일정한 값을 갖는다. Si 굴절율은 입사광의 파장에 따라 다소 변화되는데,[9] λ=400nm,450nm에서 Si 굴절율을 각각 5.57, 4.67로 두고 식 (1)과 (2)를 이용하여 입사광의 파장과 AR 막의 두께에 따라 Si 광검출기의 표면 광반사 손실을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. SiO_2 막과 Si_3N_4 막을 이용하여 단층 AR 막을 형성할 때 Fig.2는 SiO_2 -Si 계에서, Fig.3는 Si_3N_4 -Si 계에서 SiO_2와 Si_3N_4 두께에 따른 청색 입사광(λ=400nm, 450nm)의 반사율을 나타내고 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 SiO_2와 Si_3N_4를 이용한 단일 광반사 방지막을 갖는 Si 포토다이오드의 λ=400nm에 대한 최소 광반사 손실은 각각 20%와 3%로 나타나며 최적 AR막의 두께는 SiO_2 의 경우 약 700~750Å, Si_3N_4 의 경우는 약 500Å 정도로 나타남을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 SiO_2-Si_3N_4-Si 계에서 λ=405nm 빛에 대한 광반사율이다. Fig. 4는 Si_3N_4막의 두께가 50Å,100Å,200Å 일 때 SiO_2 막의 두께에 따른 광반사율이며, Fig. 5는 SiO_2 막의 두께가 500Å,750Å,1000Å 일 때 Si_3N_4막의 두께에 따른 광반사율을 나타내고 있다. Fig. 4와 Fig. 5 로부터 SiO_2/Si_3N_4 이중막을 광반사 방지막으로 사용하는 경우 최대 광흡수는 d(SiO_2/Si_3N_4)=750Å/(180~200)Å 조건에서 주어지며 이 때의 광반사 손실을 2% 이하로 나타남을 볼 수 있다.

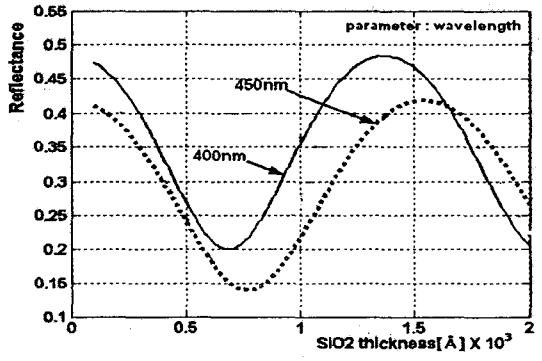

Fig .2. Light reflectance in the SiO_2-Si system as a function of SiO_2 thickness for the wavelength of 400nm and 450nm.

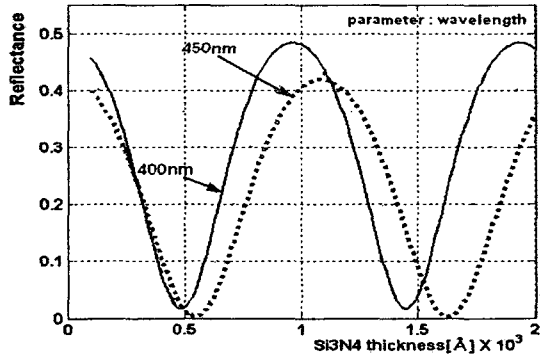

Fig .3. Light reflectance in the Si_3N_4-Si system as a function of Si_3N_4 thickness for the wavelength of 400nm and 450nm.

결과적으로 Si 광검출기 제작에서 SiO_2/Si_3N_4 이중막에 대한 최적 처리는 750Å/(180~200)Å 으로 나타나며, 단일 SiO_2 막의 최적처리에 비해 약 1.25 배의 광흡수 개선을 기대할 수 있다. 또한 SiO_2/Si_3N_4 이중막 처리는 단일 Si_3N_4막을 사용하는 경우 약[$d(Si_3N_4)$=500Å] 보다 Si_3N_4의 두께를 얇게 [$d(Si_3N_4)$=200Å] 형성할 수 있어 Si 표면상의 결함 발생을 줄일 수 있다는 장점도 지니게 된다.

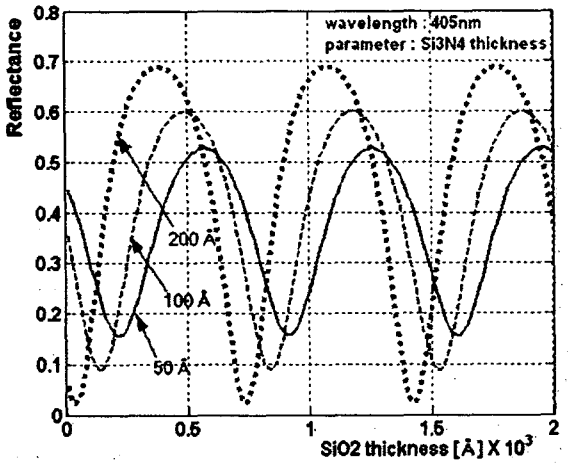

Fig. 4. Light(λ=405nm) reflectance for the Si_3N_4 thickness of 50Å, 100Å and 200Å in the SiO_2 -Si_3N_4-Si system as a function of SiO_2 thickness.

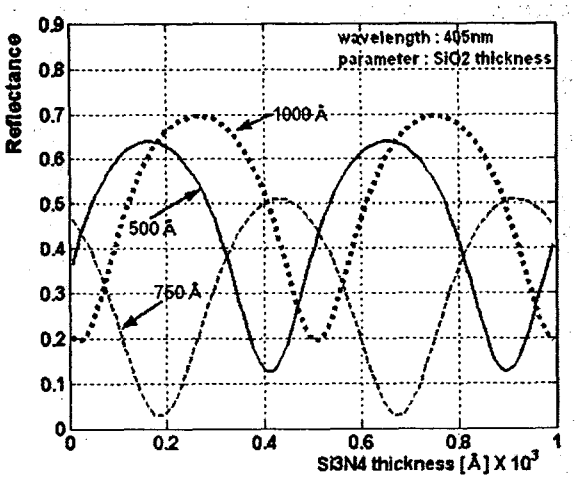

Fig. 5. Light(λ=405nm) reflectance for the SiO_2 thickness of 500Å, 750Å and 1000Å in the SiO_2-Si_3N_4-Si system as a function of Si_3N_4 thickness.

4. 결 론

Si 광검출기의 감도특성을 개선하기 위해서는 광반사 방지막을 설치하여 표면에서의 광반사 손실을 줄여야 한다. 본 논문에서는 입사광의 스펙트럼과 SiO_2, Si_3N_4, SiO_2/Si_3N_4 AR 막의 두께 변화에 따라 청색 Si 광검출기의 표면 반사율을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. Si 광검출기의 표명 광반

사율은 광반사 방지막의 처리에 따라 다르게 나타나며 $\lambda \fallingdotseq 400nm$ 의 청색 입사광에 대해 광반사 방지막으로 SiO_2 막을 이용할 경우 700Å~750Å 두께에서 약 20%, Si_3N_4 막을 이용할 경우 500Å 두께에서 약3%, SiO_2/Si_3N_4 이중막을 이용할 경우 750Å/(180~200)Å 두께에서 약 2%의 최소 광반사 손실이 나타났다. 청색 Si 광검출기 제작에서 SiO_2/Si_3N_4 이중 AR막에 대한 최적처리는 단일 SiO_2 막의 최적처리에 비해 약 1.25배의 광흡수 개선을 기대할 수 있다. 또한 SiO_2/Si_3N_4 이중막 처리는 단일 Si_3N_4 막을 사용하는 경우보다 Si_3N_4 의 두께를 얇게 형성할 수 있어 Si 표면에서의 결함 발생을 제거할 수 있는 이점도 갖게 된다.

참고 문헌

[1] H. Zimmermann, T. Heide and A. Ghazi, IEEE Photon. Technol. Lett.,11, 254 (1999).

[2] T. Takimoto, N. Fukunaga, M. Kubo and N. Okabayash, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 44(1), 132(1988)

[3] E . S. Yang, Microelectronic Devices, McGraw Hill, p.369 (1988).

[4] Wang, E. Y., F. T. S., Simms, V. L., Brandhort, H. W., Jr. and Broder, J. D., Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf., 10th , Palo Alto , 168 (1973).

[5] I. Magdo and A. Bogh, J. Electochem. Soc., Vol.125, p.932 (1987).

[6] S. Wolf , Silicon Processing for the VLSI Era-Vol.2: Process Integration, Lattice Press, 19 (1990).

[7] D.E. Aspnes, Properties of Silicon, INSPEC, The Institution of Electrical Eng., London and New York, p.72 (1988)

[8] Harold J. Hovel, Semiconductors and Semimetals, Vol.11 : Solar Cells, Academic Press,
p.203 (1975).

[9] Louis F. Drummeter, Jr. and Georg Hass, Physics of Thin Films Advanced in Research and Development, Academic Press, Vol.2, pp.242-250 (1964).