

적색검출 Si 포토다이오드의 광반사 방지막 처리

장지근[†] · 황용운 · 조재욱 · 이상열
단국대학교 전자컴퓨터학부

Antireflection Layer Coating for the Red Light Detecting Si Photodiode

Gee-Keun Chang[†], Yong-Woon Hwang, Jae-Uk Cho and Sang-Yeoul Yi
Department of Electronics and Computer Science, Dankook University
San 29, Anseo-dong, Cheonan, Chungnam 330-714, Korea

(2003년 4월 18일 받음, 2003년 6월 14일 최종수정본 받음)

Abstract The effect of antireflection layer on the reduction of optical loss has been investigated in Si photodiodes detecting red light with central wavelength of 670 nm. The theoretical analysis showed minimum reflection loss of 6% for the SiO₂ thickness of about 1100~1200 Å in the SiO₂-Si system with the single antireflection layer and no reflection loss for the Si₃N₄/SiO₂ thickness of 2000Å/1200Å in the Si₃N₄-SiO₂-Si system with double antireflection layer. In our experiments, Si photodiodes with the web-patterned p⁺-shallow diffusion region were fabricated by bipolar IC process technology and the devices were classified into three kinds according to the structure of Si₃N₄/SiO₂ antireflection layer. The fabricated devices showed maximum spectral response in the optical spectrum of 650~700 nm. The average photocurrents of the devices with the Si₃N₄/SiO₂ thickness of 1000Å/1800Å, 1500Å/1800Å, and 2000Å/1800Å under the incident power of -17 dBm were 3.2 uA, 3.5 uA, and 3.1 uA, respectively.

Key words Si photodiode, antireflection layer (SiO₂, Si₃N₄/SiO₂), reflectance, photocurrent.

1. 서 론

광을 이용한 정보통신기술과 멀티미디어 산업이 급속도로 발전함에 따라 광전소자 기술은 오늘날 핵심 반도체 기술로 자리잡고 있다. 광전소자는 광신호와 전기신호간의 변환 관계에 따라 발광소자와 수광소자로 구분된다. 광신호를 전기적 신호로 변환하는 수광소자로는 광도전체, 포토다이오드, 포토트랜지스터, 광유전소자 등을 들 수 있다.¹⁻³⁾ 포토다이오드는 일반적으로 입사광에 대한 광전류의 직선성이 뛰어나고 응답속도가 빨라 광신호 검출에 가장 널리 이용되는 수광소자이다. 광신호 처리 시스템은 송수신 거리에 따라 원거리용과 근거리용으로 나눌 수 있으며 optical link나 CD/DVD ROM과 같은 근거리 응용 분야에서는 주로 적색광을 사용한다.^{4,5)}

적색광을 수광하는 포토다이오드는 Si 반도체로 만들어지며 포토다이오드의 성능은 입사광에 대한 광전류 크기와 응답 속도로 결정된다.

Si 포토다이오드가 높은 광전류 특성을 갖기 위해서는 일차적으로 수광면에서 입사광의 광반사 손실을 줄여야 한다. 본 논문에서는 적색 검출 Si 포토다이오드 구조에서 표면반사 손실을 줄이기 위한 광반사 방지막(antireflection layer: AR막)처리를 연구하였다. 실험에서는 바

이플라 집적회로용 Si 포토다이오드에 Si₃N₄/SiO₂ 이중막을 광반사 방지막으로 사용하여 AR막 처리에 따른 광전류 변화를 조사하였다.

2. 광반사 방지막과 손실

빛이 한 매질에서 다른 매질로 입사될 때 그 경계면에서 입사광의 일부는 반사된다. 이때 반사율은 입사광의 파장과 입사각도 그리고 매질의 구성에 따라 달라진다. 가시광이 공기에서 Si으로 수직 입사될 경우 반사율은 약 30%의 높은 값을 나타냄으로 Si 포토다이오드에서 입사광의 반사손실을 줄이기 위해서는 수광면에 적절한 광반사 방지막을 설치할 필요가 있다.^{6,7)}

Si 표준공정에서는 SiO₂-산화막이나 Si₃N₄-질화막을 이용하여 이들의 단층 또는 다층구조로 광반사 방지막을 설치한다. SiO₂막을 AR막으로 사용할 경우 SiO₂-Si 계면 특성이 우수하고 산화막 형성기술이 용이하여 단층 AR막으로는 SiO₂막이 가장 널리 이용되고 있다. 반면 Si₃N₄막은 SiO₂막에 비해 광반사 손실을 줄일 수 있으나 Si 표면에 많은 결함을 유발하므로 Si₃N₄막을 이용한 단층 AR막의 형성은 반도체 표면에서 광생성 캐리어들을 재결합 소멸시켜 감도 특성을 저하시킬 수 있다.^{8,9)} 따라서 Si₃N₄막을 AR막으로 사용할 경우, 일반적으로 SiO₂막 위에 Si₃N₄막을 성장시킨 Si₃N₄-SiO₂ 이중막 구조를

[†]E-mail: semicgk@dankook.ac.kr

이용한다. 광학이론에 이하면¹⁰⁾ 단층 AR막을 갖는 Si 포토다이오드에서 AR막의 굴절율과 두께를 각각 n_1 , d_1 이라고 할때, 수직 입사광(파장: λ)에 대한 반사율은

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos(4\pi n_1 d_1 / \lambda)}{1 + r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos(4\pi n_1 d_1 / \lambda)} \quad (1)$$

로 나타난다. 여기서 $r_1 = (n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)$, $r_2 = (n_1 - n_s)/(n_1 + n_s)$ 이며, n_0 와 n_s 는 각각 공기와 Si 반도체의 굴절율이다. Fig. 1은 SiO₂막을 이용하여 단층 AR막을 형성할 때 SiO₂-Si계에서 SiO₂막의 두께에 따른 적색광(λ : 650, 670, 700 nm)의 반사율을 나타내고 있다.

Fig. 1로 부터 단층 SiO₂막을 갖는 Si 포토다이오드의 적색광에 대한 최소반사율은 약 6%로 나타나며 최적 AR막의 두께는 약 1100~1200 Å 범위로 주어짐을 알 수 있다. 또한 이중 AR막을 갖는 air-AR1-AR2-Si계에서 AR1막의 굴절율과 두께를 n_1 와 d_1 , AR2막의 굴절율과 두께를 n_2 와 d_2 라고 할때 수직 입사광(파장: λ)에 대한 반사율은

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)}{1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\theta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\theta_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1 r_2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

로 나타난다. 여기서 $r_1 = (n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)$, $r_2 = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$, $r_3 = (n_2 - n_s)/(n_2 + n_s)$, $\theta_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$, $\theta_2 = 2\pi n_2 d_2 / \lambda$ 이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 Si₃N₄-SiO₂-Si계에서 $\lambda = 670$ nm 빛에 대한 광반사율이다. Fig. 2는 Si₃N₄막의 두께가 1000Å, 1500Å, 2000Å일때 SiO₂막의 두께에 따른 광반

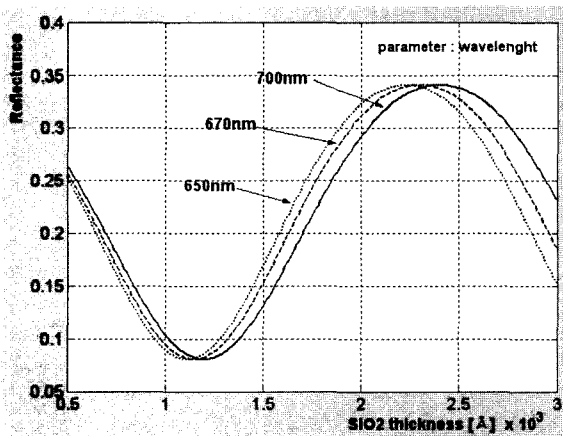


Fig. 1. Light reflectance in the SiO₂-Si system as a function of SiO₂ thickness.

사율이며, Fig. 3은 SiO₂막의 두께가 각각 1600Å, 1800Å, 2000Å일때 Si₃N₄막의 두께에 따른 광반사율을 나타내고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 Si₃N₄/SiO₂ 이중막을 AR막으로 사용할 경우, 이중막의 적절한 두께 조합으로 적색광에 대한 반사율을 거의 0으로 만들 수 있음을 살펴볼 수 있다. 예로 Si₃N₄(2000Å)/SiO₂(1200Å)의 AR막을 구성할 경우 $\lambda = 670$ nm 중심의 적색광은 거의 반사손실 없이 Si 내부로 흡수된다.

3. 바이폴라 집적회로형 Si 포토다이오드의 제작

optical link나 optical pick-up 장치에서 사용되는 광수신 집적회로(PDIC)는 광신호를 받아들이는 포토다이오드나 포토다이오드의 전류를 전기적 출력신호로 변환하는 회로 소자들이 하나의 기판상에 집적된다.¹¹⁻¹³⁾ 본 실험에서는 Fig. 4의 단면구조를 갖는 바이폴라 집적회로형

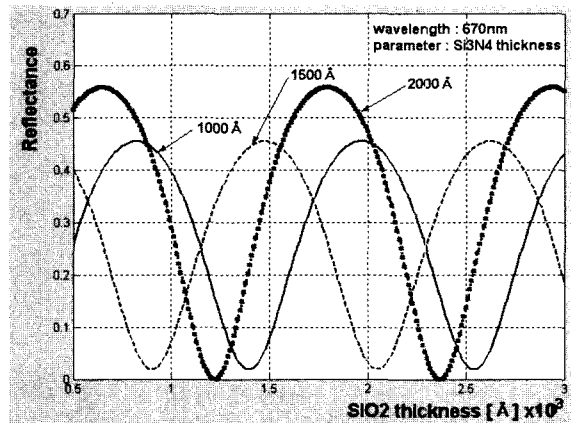


Fig. 2. Light($\lambda = 670$ nm) reflectance for the Si₃N₄ thickness of 1000Å, 1500Å and 2000Å in the Si₃N₄-SiO₂-Si system as a function of SiO₂ thickness.

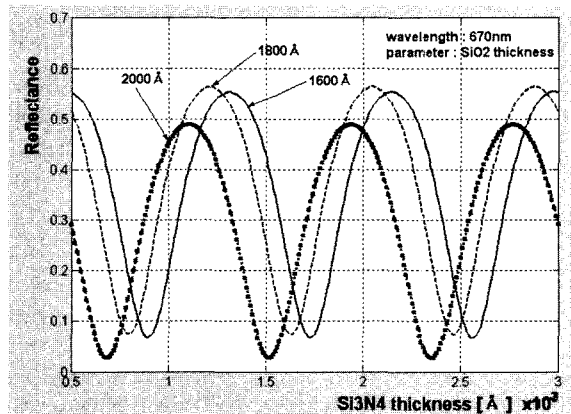


Fig. 3. Light($\lambda = 670$ nm) reflectance for the SiO₂ thickness of 1600Å, 1800Å, and 2000Å in the Si₃N₄-SiO₂-Si system as a function of Si₃N₄ thickness.

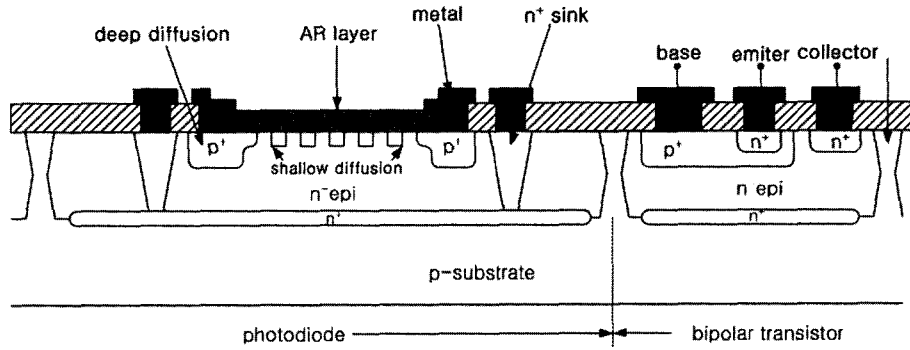


Fig. 4. Bipolar integrated Si photodiode.

Si 포토다이오드를 설계하고 표준IC 공정기술로 이를 제작하였다.

Fig. 4에서 포토다이오드와 바이폴라 트랜지스터는 동일 기판상에서 형성되며 포토다이오드의 p⁺-deep diffusion 영역과 트랜지스터의 베이스 영역은 동시에 만들어진다. 격리 영역은 포토다이오드와 트랜지스터 사이에 회로적 단락을 방지하며 n⁺-sink는 n⁺-매몰층과 함께 포토다이오드 수광면을 완전히 둘러싸고 있다. 포토다이오드의 수광면에서 p⁺-shallow diffusion 영역은 그물망 형태를 가지며 Si₃N₄/SiO₂ 이중막이 AR막으로 사용된다.

제작된 소자는 Si₃N₄/SiO₂ 이중막의 두께(1000Å/1800Å, 1500Å/1800Å, 2000Å/1800Å)에 따라 3종류로 구분된다. Fig. 5는 제작된 소자의 사진이다.

4. 결과 및 고찰

제작된 소자를 투명 packaging하고 housing하여 전기 광학적 특성을 조사하였다.

Fig. 6은 포토다이오드의 전기광학적 특성을 측정하기 위한 시스템 블록도이다. 전류-전압(I-V)측정에는 HP4156B

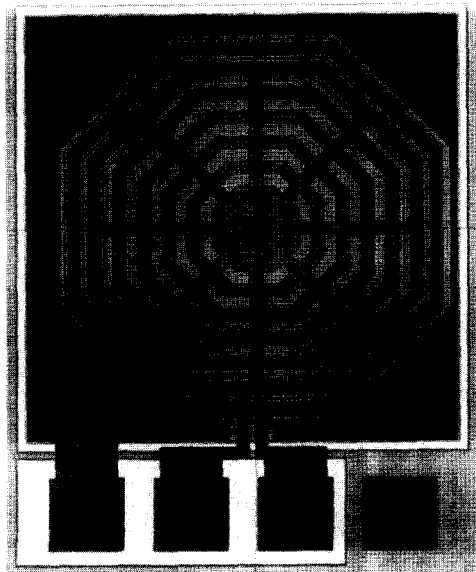


Fig. 5. Photograph of the fabricated device.

장비를 이용하였으며, 입사되는 빛의 세기와 spectrum의 측정에는 Ando AQ1966/1135E optical sensor/power meter와 Anritsu MS-9030A/9701C optical. spectrum analyzer를 이용하였다.

포토다이오드에 입사되는 광세기는 transmitter(Sharp T83, peak wavelength: 670 nm)의 입력전압(V_{in})과 optical fiber의 길이에 따라 조절된다.

Fig. 7은 transmitter단으로 부터 방출된 빛이 optical fiber를 통해 photodiode에 입력되는 입사광의 스펙트럼을 보여주고 있다.

Fig. 7에서 optical system에 이용되는 광신호 스펙트럼은 약 670 nm의 중심파장으로 부터 약 25 nm 범위내에서 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이에 따라 광신호 입력시 높은 출력전류를 얻기 위해서는 포토다이오드가 약 650~700 nm 범위에서 높은 spectral response를 갖도록

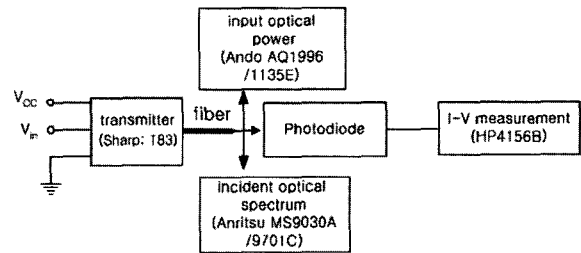


Fig. 6. Block diagram of the measurement system.

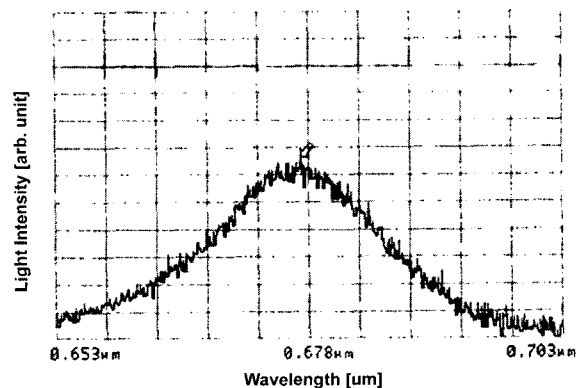


Fig. 7. Incident optical spectrum.

설계, 제작되어야 한다.

Fig. 8은 제작된 소자들의 spectral response이다. Fig. 8에서 최대 spectral response를 나타내는 파장영역은 650~700 nm로 나타내고 있으며 이는 입력광의 스펙트럼 범위와 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 -17 dBm(20 uW) 광력에서 측정된 3종류 표본들(Si₃N₄/SiO₂ 두께; 1000Å/1800Å, 1500Å/1800Å, 2000Å/1800Å)에 대한 광전류 분포곡선이다.

표 1에서는 AR막의 처리에 따른 3가지 표본들의 전기광학적 특성을 요약하였다.

실험결과, 광반사 방지막으로 사용된 Si₃N₄/SiO₂막의 두께 구성이 1000Å/1800Å, 1500Å/1800Å, 2000Å/1800Å 일 때, -17 dBm의 입사광 아래에서 광전류의 평균값은

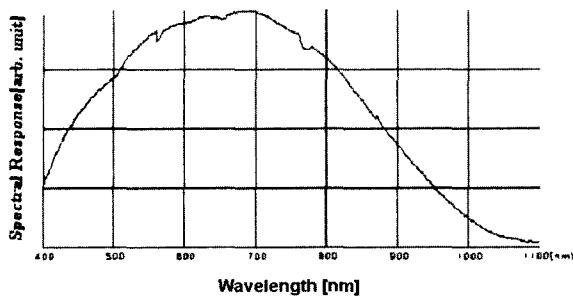


Fig. 8. Spectral response of the fabricated devices.

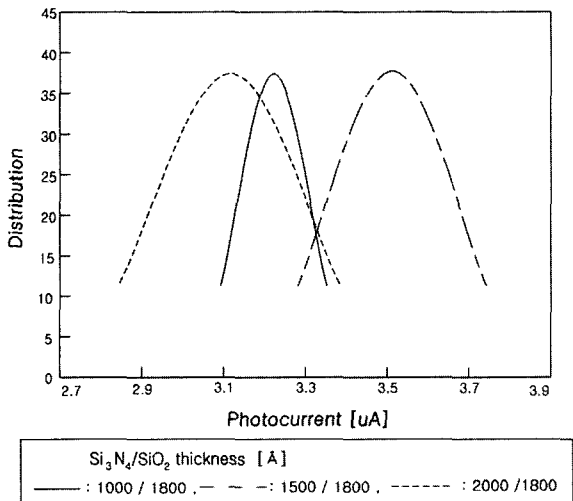


Fig. 9. Photocurrent distributions of the samples with different AR layers.

3.2 uA, 3.5 uA, 3.1 uA로 표준편차는 0.15 uA, 0.17 uA, 0.19 uA로 각각 나타났다.

Fig. 3으로 부터 λ=670 nm인 빛이 Si 속으로 전달되는 율(1-R)을 살펴보면 0.78(1500Å/1800Å) > 0.64(1000Å/1800Å) > 0.47(2000Å/1800Å)으로 나타난다.

주어진 AR막의 조건에서 전체 스펙트럼(650~700 nm)을 고려한 종합적 입사광의 전달율은 단일 파장의 경우와는 다소 차이가 있으나 대소 비교에 대한 기본적인 관계는 그대로 성립될 것으로 예상된다.

실제로 포토다이오드의 광전류 크기가 입사광의 전달율과 비례적인 관계에 있다고 볼 때, Si₃N₄/SiO₂의 두께가 1500Å/1800Å인 표본에서 가장 높은 광전류 특성을 나타내는 것은 다른 두께의 AR막을 갖는 표본들에 비해 광반사 방지막의 처리가 효과적으로 이루어진 결과로 판단된다.

5. 결 론

670 nm 중심의 적색광을 검출하는 Si 포토다이오드를 제작하고 광반사 손실을 줄이기 위한 AR막의 처리를 연구하였다. 단층 AR막 구조를 갖는 SiO₂-Si 계에서 광반사 손실의 이론적 해석은 약 6%의 최소값을 보였으며, 광반사 손실을 줄이기 위한 SiO₂막의 최적 두께는 1100~1200 범위로 나타났다. 또한 이중 AR막을 갖는 Si₃N₄-SiO₂-Si 계에서는 Si₃N₄/SiO₂막의 두께가 2000Å/1200Å일 경우 광반사 손실은 거의 0으로 나타났다. 실험에서는 그물망형 p+-shallow diffusion 영역을 갖는 Si 포토다이오드를 설계하여 bipolar IC 공정기술로 Si₃N₄/SiO₂막의 두께를 달리한 (1000Å/1800Å, 1500Å/1800Å, 2000Å/1800Å) 3종류의 표본들을 제작하였다. 제작된 소자들은 입사광의 스펙트럼(λ=650~700 nm)영역에서 최대 spectral response를 나타내었으며 AR막의 처리에 따른 평균 광전류 값은 -17 dBm의 입사광 아래에서 3.2 uA (1000Å/1800Å), 3.5 uA(1500Å/1800Å), 3.1 uA(2000Å/1800Å)로 나타났다. 본 연구에서 Si₃N₄(1500)/SiO₂(1800) 두께의 AR막을 갖는 표본이 가장 높은 광전류 특성을 나타내는 것은 Si₃N₄-SiO₂ 이중막을 갖는 구조에서 = 670 nm인 빛의 이론적 전달율이 0.78(1500Å/1800Å) > 0.64(1000Å/1800Å) > 0.47(2000Å/1800Å)임을 고려할 때, 광반사 방지막의 처리가 다른 표본들의 경우보다 더 잘 이루어진 결과로 판단된다.

Table 1. Electro-optical characteristics of the fabricated devices.

(λ = 670 nm, P_m = -17 dBm)

Samples	antireflection layers (Si ₃ N ₄ /SiO ₂)		
	1000Å/1800Å	1500Å/1800Å	2000Å/1800Å
average photocurrent	3.2 uA	3.5 uA	3.1 uA
sensitivity	0.16 A/W	0.175 A/W	0.155 A/W
standard deviation	0.15 uA	0.17 uA	0.19 uA
light transmittance for λ= 670 nm	0.64	0.78	0.47

감사의 글

이 연구는 2002학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chen, C.Y., Appl. Phys. Lett., **43**, 308 (1983).
2. H. Melchior, A. R. Hartman, D. P. Schinke, and T.E. Seidel, Bell Syst. Tech. J. z, **57**, 1791 (1978).
3. W. Shockley, M. Sparks and G. K. Teal, Phys. Rev., **83**, 151 (1951).
4. Fiber Optic Device Data Book, Thoshiba, **36** (1994).
5. A. Ghazi, T. Heide and H. Zimmermann, Proc. 43rd Int. Scientific Colloquium Ilmenau, **2**, 380 (1998).
6. 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).
7. E. S. Yang, Microelectronic Devices, McGraw Hill, **369** (1988).
8. I. Magdo and A. Bogh, J. Electrochem. Soc., **125**, 932 (1987).
9. S. Wolf, Silicon Processing for the VLSI Era-Vol.2 : Process Integration, Lattice Press, 19 (1990).
10. Harold J. Hovel, Semiconductors and Semimetals-Vol.11 : Solar Cells, Academic Press, 203 (1975).
11. M. Yamamoto, M. Kubo and K. Nakao, IEEE Transactions on Electron Devices, **42**(1), 58 (1995).
12. T. Takimoto, N. Fukunaga, M. Kubo and N. Okabayashi, IEEE Transactions on Consumer Electronics, **44**(1), 137 (1998).
13. N. Fukunaga, M. Yamamoto, M. Kubo and N. Okabayashi, IEEE Transactions on Consumer Electronics, **43**(2), 157 (1997).