

태양전지의 반사방지막

김동섭, 이수홍

삼성종합기술원 태양전지팀, 수원, 440-600

Antireflection coatings for solar cells

Dong Seop Kim and Soo Hong Lee

Photovoltaic Devices Lab., Materials & Devices Research Center, Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon 440-600, Korea

요 약 반사방지용 코팅은 태양전지에 있어서 아주 중요한 부분중의 하나이다. 태양전지의 표면에서 반사된 빛은 전지의 효율감소와 직결되기 때문에 반사를 줄이기 위한 많은 노력이 진행되어 왔다. 본 논문은 반사방지막의 원리를 소개하고 태양전지에서 반사방지막으로 많이 사용되는 재료의 광학적 성질과 제조방법에 대해서 알아 보았다.

Abstract Antireflection (AR) coating has proven effective in providing substantial increase in solar cell efficiency. In this paper, we review the principles of antireflection coating, describe materials and methods of deposition used to provide antireflection coatings on solar cells.

1. 서 론

태양전지는 빛에너지를 직접 전기에너지로 바꿔주는 소자이다. 따라서 전지의 효율을 높이기 위해서는 최대한 많은 빛을 흡수시킬 수 있는 것이 중요하다. 굴절률이 큰 Si, GaAs, Cu₂S으로 만든 태양전지나 상층에 금속층을 사용하는 M-S 혹은 MIS 구조로 만든 태양전지에서는 입사된 빛의 20~30%

는 전하를 생성시키지 못하고 다시 반사된다 [1]. 빛의 반사를 줄이는 방법으로는 texturing과 antireflection coating이 있다. Texturing 기술로는 전체 입사된 빛의 약 10% 정도로 반사를 줄일 수 있으며 [2,3] antireflection coating으로 3% 정도까지로 반사를 줄일 수 있다. Antireflection coating으로 표면 반사를 줄이기 위해서는 반도체 표면에 투명하고, 굴절률이 반도체와 공기의 사이값을

갖는 박막층을 적당한 두께로 만들어 주며 이때의 박막층을 반사방지막이라고 한다. 실리콘은 긴 파장(1.1 μm)에서 34%, 짧은 파장(0.4 μm)에서 54%의 빛이 반사로 손실된다[4]. 그러나 여기에 반사방지막을 단층으로 입힐 경우에 이 파장 범위에서 평균 10%로 반사율을 줄일 수 있고 두 층으로 입힐 경우에는 평균 3%까지 반사율을 줄일 수 있다. 반사방지막은 빛의 반사율을 줄이는 외에 전지의 표면을 passivation하고 대기로부터 전지표면이 부식하는 것으로부터 보호한다. 반사방지막을 태양전지에 적용하는 기준은 전지표면의 굴절률이 입사되는 중간 매질, 공기 혹은 capsulation 물질 등의 굴절률과 어울려야 된다. 이러한 조화를 이루기 위해서 여러가지 디자인이 가능하며[5-10] 특정한 디자인의 선택은 최소의 반사율이 요구되는 파장범위와 요구되는 광학적 물질의 사용 가능성에 따라서 달라진다.

본 논문에서는 반사방지막이 반도체 표면에서 반사율을 줄이는 원리를 설명하고 주로 많이 사용되고 있는 반사방지막의 재료와 그 제조 방법을 소개하였다.

2. 이 론

반사방지막의 원리는 상층에서 반사된 빛과 하층에서 반사된 빛이 서로 상쇄간섭(destructive interference)을 일으키도록 하는 것이다. 이러한 상쇄간섭은 위상차가 180° 이거나 경로차가 파장의 절반이 되는 조건에서 일어나기 때문에 반사방지막의 두께와 굴절률값에 따라서 정해지는 제한된 범위의 파장에서만 일어난다. 굴절률이 n_1 과 n_2 인 물질에서 빛이 n_1 인 물질을 투과해서 n_2 인 물질에 수직으로 입사하면 경계면에서의 반사율은

다음과 같이 표시된다[11].

$$R = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2$$

여기서 상대굴절률 $n = n_2/n_1$. 즉, 공기중에서 반도체의 반사율은 굴절률이 클수록 크다.

반사방지막을 사용할 경우 반사율이 줄어드는 원리를 설명하기 위해서 Fig. 1에는 반사방지막에 입사되는 빛의 경로를 나타내었다. 반사방지막을 입힌 물질로부터의 총 반사율은 다음과 같이 주어진다[12,13].

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}$$

여기서 r_1 과 r_2 는 각각의 반사율로서 다음과 같이 주어지며,

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

θ 는 반사방지막의 phase thickness로서 다음과 같이 주어진다.

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda}$$

여기서 n_1 은 반사방지막의 굴절률이고 d_1 은

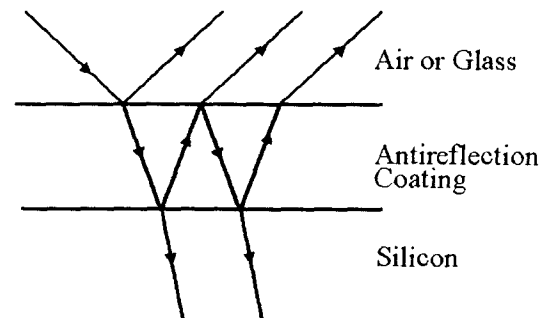


Fig. 1. Interference effects created by a quarter-wavelength antireflection coating.

두께이며 n_2 는 반도체의 굴절률이다.

반사율은 $n_1d_1 = \lambda_0/4$ 나 $\lambda_0/4$ 의 홀수배일 때 최소가 되며 그 최소값은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad \lambda = \lambda_0$$

위 수식에서 알 수 있듯이 반사방지막의 굴절률이 반사방지막의 양쪽에 있는 굴절률의 기하평균값($n_1^2 = n_0 n_2$)이며, $n_1d_1 = \lambda_0/4$ 일 때 반사율은 0이 된다. 빛의 파장이 4분의 1 파장보다 작거나 크면 cosine 함수와 파장에 따른 굴절률의 변화에 의해서 반사율이 증가하게 된다. 파장이 600 nm인 빛의 파장에 대한 실리콘의 굴절률은 약 3.8에 해당되므로 대기중에서($n_0 = 1$) 실리콘 태양전지의 경우 반사방지막의 적당한 굴절률값은 1.9가 된다. 유리나 비슷한 굴절률($n_0 \sim 1.5$)을 가진 물질로 encapsulation을 할 경우는 반사방지막으로 적당한 굴절률값은 2.3으로 증가하게 된다. Fig. 2에는 태양전지를 encapsulation하기 전후에 굴절률이 1.9와 2.3인 물질을 반사방지막으로 사용하였을 경우의 파장에 따른 반사율을 bare 실리콘의 경우와 같이 나타내었다. 단층으로 반사방지막을 입힐 경우 굴절률이 1.9($\sqrt{n_{Si}}$)보다 큰 경우보다 작은 경우가 더 큰 폭으로 반사율이 증가하므로 되도록 반사율이 작은 것을 사용하는 것은 피해야 한다. 서로 다른 굴절률을 가진 반사방지막을 2층으로 입히면 더욱 넓은 파장 범위에서 굴절률을 감소시킬 수 있다[14, 15]. 이 경우 반도체에 붙어있는 첫번째 층의 굴절률은 2.2~2.6이고 윗층의 굴절률은 1.3~1.6을 사용한다. 두 층을 반사방지막으로 사용할 경우 반사율은 다음과 같이 나타낼 수 있다[16].

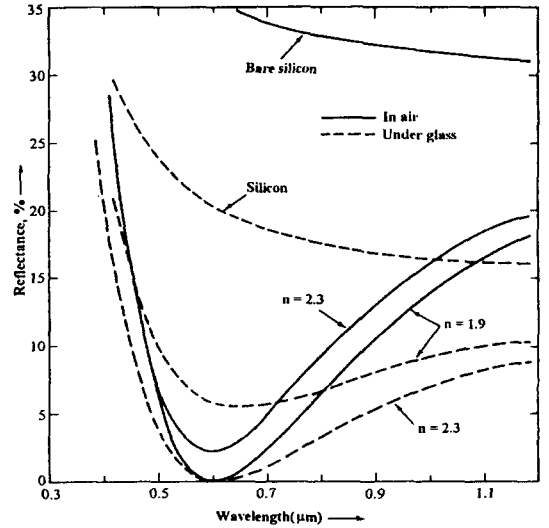


Fig. 2. Percentage of normally incident light reflected from bare silicon and silicon with antireflection coatings of refractive indices of 1.9 and 2.3 as a function of wavelength.

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

여기서 r_1 과 r_2 는 앞식에서와 같고 r_3 는 다음과 같이 주어진다.

$$r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$$

n_3 는 반도체의 굴절률이고, θ_1, θ_2 는 2층의 반사방지막의 phase thickness로서 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda}, \quad \theta_2 = \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda}$$

반사율은 $n_1d_1 = n_2d_2 = \lambda_0/4$ 일 때 최소값 혹은 최대값을 가지며 그 값은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \left(\frac{n_1^2 n_3 - n_2^2 n_0}{n_1^2 n_3 + n_2^2 n_0} \right)^2, \quad \lambda = \lambda_0$$

이 값은 $\lambda = \lambda_0$ 에서 $n_1^2 n_3 = n_2^2 n_0$ 일 때 0이 되며 $n_1 n_2 = n_0 n_3$ 일 때 최대값을 가지며 양쪽으로 0값이 존재한다. 두 경우 다 평균 반사율은 단층 반사방지막을 사용하는 경우보다 더 넓은 파장범위에서 작은 값을 가진다. Fig. 3에는 두가지 형태의 2층 반사방지막을 사용할 때의 반사율을 나타내었다[17]. 2층을 사용하게 되면 넓은 범위에서 "U"자나 "W"자 모양을 가지면서 낮은 반사율을 나타낸다. 물질의 반사율을 결정하는 요소는 이러한 굴절률 외에도 표면처리나 태양광의 입사각들을 들 수 있다. 표면이 매끄럽지 못하면 표면에서 다중반사가 일어남으로써 반사율을 줄일 수 있기 때문에 최근의 거의 모든

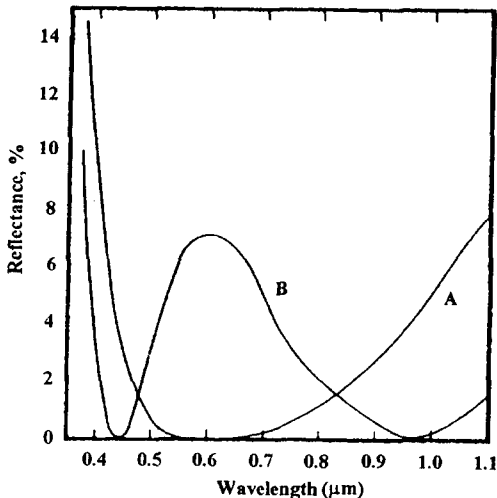


Fig. 3. Reflectance of double layer coatings on high index substrates ($n = 3.45$) such as Si, A : $n_1 = 1.38$; $n_2 = 2.56$. B : $n_1 = 1.56$; $n_2 = 2.21$.

실리콘 태양전지에서는 선택적 에칭이나 photolithography 작업으로 표면을 텍스처링한다. 반사방지막을 설계할 때는 반도체의 native oxide, 태양광의 파장에 따른 에너지 변화와 태양전지의 파장에 따른 분광반응도를 고려해야 한다. 일반적으로 태양광 스펙트럼은 고정되어 있지만 태양전지의 분광반응도는 p-n 접합의 깊이, 도핑농도, surface state의 농도 등에 따라서 달라지게 된다.

3. 재 료

반사방지막 물질은 태양전지의 표면에서 전지 표면과 반응을 하지 말아야 하고 전지 표면을 보호할 수 있어야 한다. 또한 장기간 안정성이 유지되어야 하고 전지 표면과 접착성이 좋아야 하며, 수분과 온도에 대해서도 안정해야 한다. 우주용으로 사용되는 전지에 있어서는 UV light나 전하를 띤 입자들에 노출되었을 때도 안정성이 있어야 한다.

과거에 반사방지막으로 가장 많이 사용되던 물질은 SiO로서 굴절률은 1.8~1.9로서 최소의 반사율은 1% 미만이지만 가시광선 영역에서의 흡수에 의한 손실이 생긴다. SiO의 대체 물질로 CeO₂가 제안 되었지만 제조방법이 어렵고[18] 굴절률이 약간 높다는 단점이 있다. Si₃N₄와 함께 Al₂O₃는 SiO의 대체물질로 적합한 물질이다. SiO₂는 굴절률이 1.5로서 실리콘에 쉽게 형성시킬 수 있고 texturing된 실리콘 표면에 적당하며 반사율을 10%에서 2%로 줄일 수 있다. BCSC (Buried Contact Solar Cell)에서 SiO₂는 반사방지막 역할 뿐만 아니라 실리콘 표면의 passivation 역할도 한다[19,20]. 다결정 실리콘과 같이 texturing을 할 수 없는 표면이나 cover glass를 사용하는 경우는 더 큰 굴절률

Table 1
Refractive indices of materials used in single or multiple-layer antireflection coating.

Al_2O_3	1.8 ~ 1.9
Glasses	1.5 ~ 1.7
MgF_2	1.3 ~ 1.4
MgO	1.74
Si_3N_4	~ 1.9
SiO	1.8 ~ 1.9
SiO_2	1.4 ~ 2.5
$\text{Si}_3\text{O}_{2x}\text{N}_{4-x}$	1.8 ~ 2.0
TiO_2	~ 2.3
Ta_2O_5	2.1 ~ 2.3
ZnS	2.3 ~ 2.4
CeO_2	2.2 ~ 2.35

이 필요하다. 태양전지의 radiation degradation을 줄이기 위해서 사용하는 cover glass도 접착제와 함께 굴절률이 1.3 ~ 1.5 값을 가지므로 반사율을 줄이는 역할을 할 수 있다[21-23]. Cover glass를 사용할 경우는 TiO_2 가 SiO 보다 가시광선 영역에서 굴절률이 높고 광흡수가 적기 때문에 더 좋다. TiO_2 는 dielectric constant가 커서[24] 마이크로อิเล็กทรอนิกส์에 많이 사용될 뿐만 아니라 물리적 화학적으로 안정하고 공기중에서 간단하게 spray 방법으로 제조할 수 있기 때문에 최근에 태양전지의 반사방지막으로 많이 이용되고 있다. 하지만 이들 모두 $0.4 \mu\text{m}$ 이하의 파장에서 빛을 강하게 흡수하기 시작한다. Ta_2O_5 [25]는 굴절률이 2.2 ~ 2.26이고 에너지 금지대폭이 4.2 eV로서 단파장에서의 투과도가 크기 때문에 blue-violet 영역의 빛에서의 반응도를 높이려는 violet cell[26]에 Nb_2O_5 와 함께 사용되었으며 굴절률 값이 quartz cover glass(1.5)와 함께 사용할 때

반사율을 최소로 할 수 있는 값이다. 또한 CNR(Comsat nonreflective) 전지는 실리콘 표면을 피라미드 형태로 texturing하고 그 위에 Ta_2O_5 를 코팅하여 대부분의 유용한 파장 범위에서 반사율을 약 2% 정도로 줄였다[27]. Texturing하지 않은 실리콘과 texturing을 실리콘에 반사방지막을 코팅하였을 때의 반사율을 알아보기 위해서 CNR 전지의 반사율을 Fig. 4에 나타내었다. 단파장에서의 반사방지막의 광투과도를 비교하기 위해서 Fig. 5에는 Ta_2O_5 , SiO , TiO_x 의 파장에 따른 광투과도를 나타내었다. Rothwarf 등[28]은 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 태양전지에 600 \AA 의 ZnS 와 1000 \AA 의 MgF_2 를 코팅하였다. Apfel[29]은 실리콘에 119 \AA 의 MgF_2 와 61 \AA 의 ZnS 를 코팅하였다.

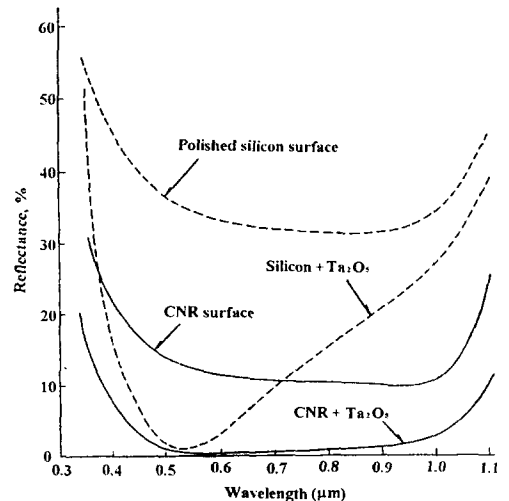


Fig. 4. Reflectance as a function of wavelength for normally incident light. (Upper and lower dashed curves) Flat, polished Si surface without and with quarter-wave AR coating (Ta_2O_5), respectively. (Upper and lower solid curves) CNR textured Si surface without and with quarter-wave AR coating (Ta_2O_5), respectively.

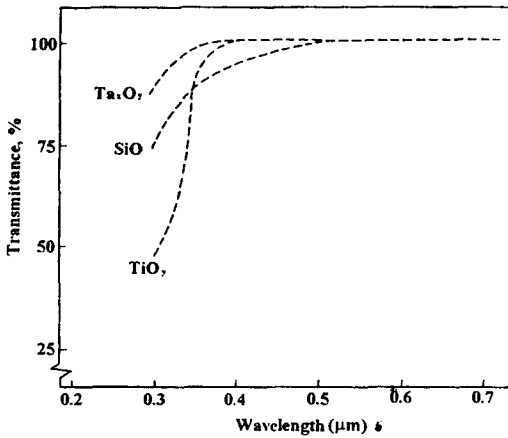


Fig. 5. Characteristics of antireflection layers.

4. 제 조

반사방지막을 제조할 때 중요한 요소는 정확한 굴절률 조절과 막의 두께 조절, 그리고 광흡수를 줄이는 구조 등이다. 반사방지막을 제조하는 방법으로는 spraying, screen printing, spinning, dipping, CVD(chemical vapor deposition), vacuum deposition, thermal oxidation of Si과 같은 여러가지 방법이 있다. 반사방지막으로서 가져야 할 성질은 적당한 굴절률 뿐만 아니라 투명해야 한다. 결정립에서의 빛의 산란을 막아 투명도를 증가시키기 위해서 비정질이나 아몰퍼스 형태로 막을 증착한다. Short range order는 광흡수를 줄이는데 아주 유용하다[30]. 반사방지막을 제조하는 방법으로는 진공증착, 스퍼터링, anodization, 기상증착, 스펀코팅 등이 있다. 진공증착으로 제조한 박막은 일반적으로 UV파장에 해당되는 빛을 흡수하는 경향이 있다. 그러나 화학적으로 증착된 막이나 증착된 막을 산화시키거나 anodizing시켜서 제조한 박막은 vitreous구조(short-range order를 가진 아몰퍼스)를 가지는 경향이 있으며 UV흡수

가 적다[31]. SiO, TiO₂, Ta₂O₅ 등의 투과도와 반사율은 막을 제조하는 조건에 따라서 크게 변한다. SiO와 TiO₂는 주로 진공증착법으로 제조하며 기판의 온도[32], 증착속도 그리고 증착시 산소분압 등에 따라서 막의 물성이 달라진다. 대체로 증착속도는 1~5 Å/sec 정도로 낮고 기판온도는 100~250°C 정도로 높게 한다. TiO₂를 지상용으로 값이 싸고 용이하게 제조하기 위해서 수증기와 tetraisopropyl titanate를 공기중에서 150°C의 온도에서 반응시키면서 spray 코팅을 하여 제조할 수 있으며[33], Werner는 titanium isopropoxide를 spray-deposition 방법으로 증착하여 전지의 효율을 42% 이상 증가시켰다[34]. N. Rausch는 고순도의 tetraisopropyl titanate(TPT)를 precursor로 사용하여 300~500°C의 hot wall type의 수직형 furnace에서 LPCVD 방법으로 TiO₂를 아주 균일하게 제조하였다[35]. 이러한 종류의 제조방법은 지상용으로 태양전지를 대량 생산할 때는 아주 중요한 방법이다. Durand는 TiO₂를 II-VI, III-V 태양전지에 대면적으로 적용할 목적으로 eximer laser sputtering 방법으로 증착하였다[36]. 그외에도 reactive evaporation[37], screen printing[38], pyrolysis[39,40] 방법 등이 사용되고 있다. Comsat에서는 violet cell에 반사방지막으로 Ta₂O₅를 기상증착법으로 코팅하여 좋은 광학적 성질을 얻었다. 그러나 스퍼터링으로 제조하였을 경우는 가시광선 영역에서 상당한 광흡수가 일어난다. InP 태양전지의 경우 액상전해질에서 anodic oxidation는 native oxide를 형성하여 반사방지막으로 사용될 수 있다[41]. Zhao는 PERL 태양전지에 2층 반사방지막을 형성하기 위해서 SiO₂ 두께를 200 Å으로 줄이고 그 위에 MgF₂와 ZnS를 진공증착법으로 코팅하여 전지의 효율을 24%까지 얻

었으며[42,43], Peyman은 이 두 층의 반사방지막을 다결정실리콘 태양전지에 적용하여 17.1 %의 효율을 얻었다[44]. SiO_2/SiN 이중 반사방지막을 PECVD 방법으로 제조하여 실리콘 태양전지에 적용하면 MgF_2/ZnS 보다 반사율과 흡수율은 약간 높지만 증착도중에 defect/surface passivation에 의한 개방전압 증가로 인해서 효율이 더 증가한다는 보고도 있다[45].

5. 결 론

태양전지의 반사율을 줄이기 위해서 최근에는 표면을 texturing하는 방법과 반사방지막을 코팅하는 기술을 동시에 사용하고 있으며 이 경우는 단층의 반사방지막을 사용하더라도 반사율을 3% 이하로 낮출 수 있다. 반사방지막으로 사용되는 물질을 선택하는 기준은 기본적으로 원하는 파장영역에서 광투과도가 높고 굴절률이 태양전지에 사용되는 물질과 비교하여 반사율이 최소가 되도록 하는 값을 가지는 것이다. 그러나 이러한 광학적 성질을 개선하기 위해서 사용하는 반사방지막이 전지의 전기적 성질에 미치는 영향도 고려해야 한다. 실리콘 태양전지에서는 texturing한 표면구조에서 단층으로 반사방지막을 사용할 때는 Si_3N_4 와 SiO_2 가 적당하며 반사율을 더 줄이기 위해서 2층으로 반사방지막을 사용할 경우는 실리콘 표면에서의 전하의 재결합을 줄이기 위해서 300 Å 이하의 얇은 산화막을 입히고 그 위에 ZnS/MgF_2 층이나 SiO_2/SiN 층을 코팅한다.

참 고 문 헌

- [1] K.L. Chopra and S.R. Das, Thin Film Solar Cell (Plenum Press, New York, 1983) p. 515.
- [2] A.I. Stoller, The Etching of Deep Vertical Walled Pattern in Silicon (RCA Review, June 1970).
- [3] O.B. Lee, J. Appl. Phys. 40 (1969).
- [4] H.J. Hovel, Semiconductors and Semimetals (Academic Press, New York, 1975) p. 203
- [5] H.A. MacLeod, Thin Film Optical Filters (Adam Hilger, London, 1969).
- [6] O.S. Heavens, Optics of Thin Films (Dover, London, 1965).
- [7] K. Kern and E. Tracy, RCA Review 41 (1980) 133.
- [8] Y.C.M. Yeh, F.P. Ernest and R.J. Stirn, J. Appl. Phys. 47 (1976) 4107.
- [9] B. Gandham, R. Hill, H.A. MacLeod and M. Bowden, Solar Cells 1 (1979) 3.
- [10] L. Chambouleyron and E. Saucedo, Solar Energy Materials 1 (1979) 299.
- [11] G.R. Fowles, Introduction to Modern Optics (Holt, Rinehart and Winston, New York Chicago) p. 44
- [12] E.Y. Wang, F.T.S. Yu, V.L. Simms, H. W. Brandhorst, Jr. and J.D. Broder, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th, Palo Alto (1973) 168.
- [13] H. Anders, Thin Films in Optics, Chapter 1 (Focal Press, London, 1967).
- [14] J.P. Schwartz, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 8th, Seattle (1970) 173.
- [15] A. Musset and A. Thelen, Progress in Optics, E. Wolf, ed., Chapter 4 (North-Holland, Amsterdam, 1970).

- [16] E.Y. Wang, F.T.S. Yu, V.L. Simms, H. W. Brandhorst, Jr. and J.D. Broder, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th, Palo Alto (1973) 168.
- [17] A. Musset and A. Thelen, Progress in Optics, E. Wolf, ed., chapter 4 (North-Holland, Amsterdam, 1970).
- [18] R.L. Carbb and A. Atzei, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th, Palo Alto (1973) 168.
- [19] C.M. Chong, S.R. Wehnam and M.A. Green, Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 407.
- [20] S.R. Wehnam, Progress in Photovoltaics : Research and Applications 1 (1993) 3.
- [21] P.M. Stella and H. Somberg, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 9th, Silver Spring (1972) 179.
- [22] V. Magee, H.G. Webb, A.D. Haigh and R. Freestone, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 9th, Silver Spring (1972) 6.
- [23] R.L. Crabb and A. Atzei, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 8th, Seattle (1970) 78.
- [24] J. Yugami, T. Mine, S. Iijima and Hiraiwa, in Extended Abstracts of 20th Conference on Solid State Devices Materials Tokyo (1980) p. 173.
- [25] W.H. Knausenberger and R.N. Tauber, J. Electrochem. Soc. 120 (1973) 927.
- [26] A.G. Reuesz, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th (1973) 181.
- [27] R.A. Arndt, J.F. Allison, J.G. Haynos and A. Meulenberg, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 11th (1975) 40.
- [28] A. Rothwarf, J. Phillips and N.C. Wyeth, Proc, 13th IEEE Photo. Spec. Conf. Washington, D.C., (1978).
- [29] J.H. Apfel, Proc. Sym. Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion, Tueson (1974) 276.
- [30] A.G. Revesz, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th, Palo Alto (1973) 180.
- [31] E.Y. Wang, et al., Solar Energy 22 (1972), 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Palo Alto (1973) 168.
- [32] J. Roger and P.I. Colardelle, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 8th, Seattle (1970).
- [33] H.J. Hovel, J. Electrochem. Soc. 125 (1978) 983.
- [34] W. Kern and E. Tracy, J. Vac. Sci. Tech. 17 (1980) 374.
- [35] N. Rausch and E.P. Burte, J. Electrochem. Soc. 140 (1993) 145.
- [36] H.A. Durand, et al., Applied Surface Sci. 86 (1995) 122.
- [37] H.K. Pulker, G. Paesold and E. Ritler, Appl. Opt. 15 (1976) 2986.
- [38] J. Szlufcik, etc, Solar Energy Materials 18 (1989) 241.
- [39] W.W. Xu, R. Kershaw, K. Dwight and A. Wold, Mater. Res. Bull. 25 (1990) 1385.
- [40] G.W. Rice, J. Am. Ceram. Soc. 70 (1980) 117.
- [41] C. Hu and R.M. White, Solar Cells (McGraw-Hill Book Com., New York, 1983).

- [42] J. Zhao, A. Wang and M.A. Green, IEEE Trans. Electron Devices, ED-41 (1994) 1592.
- [43] J. Zhao, et al., 1st World Conference on Photo. Energy Conv., Hawaii, 1994.
- [44] P. Sana, J. Salami and A. Rohatgi, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, No. 8 (1993) 1461.
- [45] Z. Chen, P. Sana, J. Salami and A. Rohatgi, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, No. 6 (1993) 1161.