

Si 태양전지에서 SiO₂ 광반사 방지막의 처리 효과

장지근[†] · 임용규 · 황용운 · 조계욱

단국대학교 전자컴퓨터학부

Effect of SiO₂ Antireflection Coating on the Si Solar Cell

Gee-Keun Chang[†], Yong-Keu Lim, Yong-Woon Hwang and Jae-Uk Cho

Division of Electronics and Computer Science, Dankook University, Cheonan, Chungnam 330-714, Korea

(2003년 12월 3일 받음, 2004년 2월 6일 최종수정본 받음)

Abstract We have studied the effective optical absorption power of Si solar cell with SiO₂-antireflection layer based on a mathematical modelling of AM(air mass)1 spectrum and Si refractive index in the wavelength range(0.4 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.97 \mu\text{m}$). The effective optical absorption power obtained from the theoretical calculation was 450 and 520 W/m² for the Si solar cells with SiO₂-antireflection layer of 500Å and 1000Å, respectively. The optimum thickness of SiO₂-antireflection layer showing the minimum reflection loss was about 1000Å in the computer simulation. Two kinds of Si solar cells named EBS(500Å) and EBS(1000Å) were fabricated to evaluate the effect of SiO₂-antireflection layer thickness on the optical absorption. The epitaxial base Si cell with SiO₂-antireflection layer of 1000Å [EBS(1000Å)] showed the output power improvement of about 15% upon the EBS(500Å) cell due to larger absorption of effective optical power under illumination of AM1, 1 sun.

Key words antireflection, solar cell, effective optical absorption power, efficiency

1. 서 론

태양전지는 광기전력 효과에 의해 외부 부하에 전류를 공급하는 p-n 접합 구조의 반도체 소자이다. 태양전지는 원료의 무한성과 무공해 특성 등으로 인해 미래의 대체 에너지원으로 각광을 받고 있으며, 개발 방향으로는 저비용 생산기술과 높은 전력변환효율을 얻기 위한 연구가 집중되고 있다.¹⁻³⁾ Si 태양전지의 이론적 효율은 상온에서 약 28%에 이르고 있으나⁴⁾ 상업용 전지의 경우 실제 효율은 10-12%에 불과하게 나타나고 있다. 태양전지의 효율특성을 제한하는 주요 요인의 하나로는 빛이 입사되는 수광면에서 광반사 손실을 들 수 있다. AM(air mass)1 조건의 태양광 스펙트럼은 가시영역에 집중되어 있으며 Si 태양전지의 광생성 전류에 기여할 수 있는 빛의 유효 파장범위는 약 0.4-0.97 μm 정도로 나타난다. 0.4 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.97 \mu\text{m}$ 인 빛이 공기에서 Si로 수직 입사될 때 표면에서 평균 광 반사율은 30% 이상으로 나타난다.⁵⁾ 이에 따라 고효율 태양전지를 제작하기 위해서는 수광면을 texturing하거나⁶⁾ 광반사 방지막 (antireflection layer: AR 막)을 설치하여⁷⁾ 표면에서 광반사 손실을 줄여야 한다. Si 태양전지의 수광면에 광반사 방지막을 설치할 경우 광반사 손실은 AR 막의 굴절율과 두께에 따라 변화된다. Si 태양전지는 일반적으로 SiO₂ 산화막이나 Si₃N₄ 질화

막을 광반사 방지막으로 사용하는데, 이는 Si 표준공정 기술로 이들 막들을 쉽게 형성할 수 있기 때문이다. SiO₂ 막을 Si 태양전지의 광반사 방지막으로 사용할 경우 산화막 형성기술이 용이하고 Si-SiO₂ 계면특성이 우수하다는 장점이 있다.⁸⁾ 본 논문에서는 SiO₂ 막을 광반사 방지막으로 사용하는 Si 태양전지에서 SiO₂ 두께에 따른 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력을 전산 모사하였다. 또한 광반사 방지막의 처리에 따른 유효 광흡수 전력의 차이를 알아보기 위해 SiO₂ 막의 두께를 각각 500Å과 1000 Å으로 형성한 에피 텍셀 베이스(epitaxial base) Si 태양전지를⁹⁾ 제작하고 이들의 효율특성을 비교 분석하였다.

2. 광반사 손실과 유효 광흡수 전력

일반적으로 p-n 접합구조를 갖는 Si 태양전지의 이미터 영역은 고농도로 얇게, 베이스 영역은 저농도로 두껍게 만들어진다. Si 태양전지에서 이미터 영역을 통해 태양광이 전달되면 $h\nu \geq E_g(\text{Si})$ 인 빛은 반도체 내부에서 흡수되어 전자-정공 쌍을 생성한다. 상온에서 Si 반도체의 금지대 폭은 1.12 eV로 Si에 흡수될 수 있는 빛의 파장범위는 $\lambda \leq 1.1 \mu\text{m}$ 로 나타나며, 전지의 각 영역에서 생성된 소수캐리어들은 전계와 확산에 의해 분리되는 광기전력 효과를 나타낸다. Si에 입사되는 빛의 흡수길이는 광흡수 계수와 연관되며 $\lambda \leq 0.4 \mu\text{m}$ 의 빛은 이미터 표면에서, $\lambda \geq 0.97 \mu\text{m}$ 의 빛은 베이스 깊은 곳에서 대부분 흡

[†]E-Mail : semicgk@dankook.ac.kr

수된다. 이 때 이미터 표면이나 베이스 깊은 곳에서 생성된 소수캐리어들은 이동 과정에서 대부분 재결합 소멸됨으로 실제적으로 Si 태양전지의 광전류 형성에 기여하는 유효 스펙트럼 범위는 0.4~0.97 μm 정도로 주어진다. AM0와 AM1, 1sun 조건에서 실제 태양광의 전력밀도 스펙트럼은 Fig. 1과 같이 나타나며 AM1 스펙트럼의 주된 분포는 가시영역과 근적외선 영역에 걸쳐 있다.⁴⁾

Fig. 2는 Si에 흡수될 수 있는 임계파장(λ_c = 1.1 μm) 이하에서 AM1, 1 sun 분포에 대한 근사적 모델이다.

Fig. 2의 음영영역은 전지의 기전력 형성에 기여할 수 있는 유효 파장범위(0.4 μm ≤ λ ≤ 0.97 μm)를 나타내고 있다. 광학이론에 의하면 Si 태양전지가 단일 광반사 방지막을 가질 경우 수직입사광에 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 나타낸다.^{10,11)} 여기서 n₁과 d₁은 광반사 방지막의 굴절율과 두께이고 r₁ = (n₀ - n₁)/(n₀ + n₁), r₂ = (n₁ - n_s)/(n₁ + n_s)이며, n₀와 n_s는 각각 공기와 Si 반도체의 굴절율이다. Si 태양전지가 태양광으로부터 흡수할 수 있는 유효 광전력은 입사광의 전력밀도 스펙트럼을 I(λ), 표면 광반사율을 R(d, λ)라고 할 때

$$P(d) = \int_{0.4\mu m}^{0.97\mu m} I(\lambda)[1 - R(d, \lambda)]d\lambda \quad (2)$$

로 표현된다. 따라서 Si 태양전지의 효율특성을 개선하기 위해서는 우선적으로 광반사 방지막의 적절한 처리를 통해 R(d, λ)을 줄이고 Si이 흡수할 수 있는 유효 광전력을 높여야 한다. 0.4 μm ≤ λ ≤ 0.97 μm인 입사광에 대

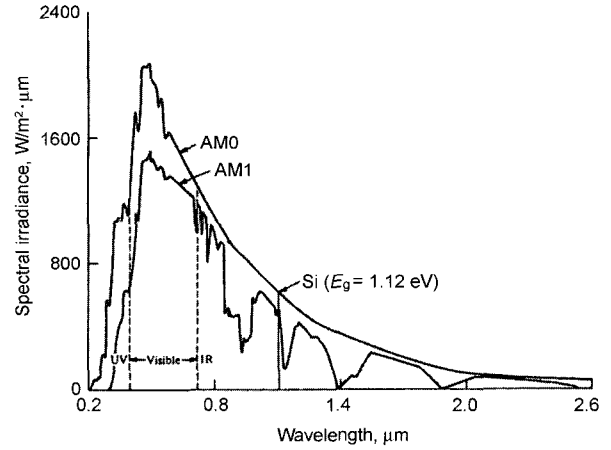


Fig. 1. Solar spectra of AM0 and AM1 at 1 sun with energy cutoff point in Si.

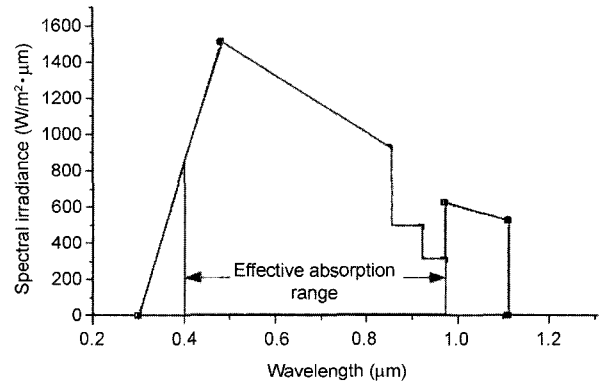


Fig. 2. AM1(1 sun) spectrum model below cutoff wavelength of Si : the shadow region shows spectral irradiance in the effective absorption range.

Table 1. Expressions of incident optical power spectrum and Si refractive index used in the calculation of effective absorption power under AM1, 1 sun condition

wavelength range [μm]	expressions	
	optical power spectrum, I(λ)[W/m ² μm]	Si refractive index, n _s
0.4~0.44	$\frac{7.54 \times 10^4}{9}(\lambda - 0.3)$	$-\frac{41}{2}(\lambda - 0.4) + 5.57$
0.44~0.48	$\frac{7.54 \times 10^4}{9}(\lambda - 0.3)$	$-\frac{35}{4}(\lambda - 0.44) + 4.75$
0.48~0.57	$\frac{5.85 \times 10^4}{9}(\lambda - 0.48) + 1508$	$-\frac{40}{9}(\lambda - 0.48) + 4.40$
0.57~0.7	$\frac{5.85 \times 10^4}{9}(\lambda - 0.48) + 1508$	$-\frac{30}{13}(\lambda - 0.57) + 4.00$
0.7~0.85	$\frac{5.85 \times 10^4}{9}(\lambda - 0.48) + 1508$	$-\frac{5}{11}(\lambda - 0.7) + 3.7$
0.85~0.92	486	$-\frac{5}{11}(\lambda - 0.7) + 3.7$
0.92~0.97	308	$-\frac{1}{5}(\lambda - 0.92) + 3.6$

해 SiO₂ 막의 굴절율은 1.46으로 거의 일정하게 나타나고, Si의 굴절율은 Fig. 3과 같이 빛의 파장에 따라 달라진다.¹²⁾

따라서 SiO₂ 막을 광반사 방지막으로 사용하는 Si 태양전지에서 입사광 전력의 스펙트럼과 Si의 굴절율이 수학적으로 모델링 되면 AR막의 두께에 따른 유효 광흡수 전력의 변화를 구할 수 있다.

본 논문에서는 처음으로 입사광 전력의 스펙트럼과 Si 굴절율의 변화에 따라 적분구간을 Table 1에서와 같이 구분하고 구간별 적분 값의 합으로 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력을 계산하였다. AMI, 1 sun 조건에서 적분구간에 따른 입사광 전력의 스펙트럼과 Si 굴절율의 수학적 표현을 Table 1에 수록하였다.

Fig. 4는 SiO₂ 막을 광반사 방지막으로 사용한 경우, SiO₂ 막의 두께에 따른 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력을 보여주고 있다. Fig. 4로부터 AMI, 1 sun 아래에서 Si 태양전지의 유효 광흡수전력은 SiO₂-AR 막의 두께가 500Å과 1000Å일 때 각각 520 W/m²와 450 W/m²로 나타나며, d(SiO₂)=1000Å에서 광흡수가 최대로 나타남을 볼 수 있다.

3. 전지의 제작

광반사 방지막의 처리에 따른 유효 광흡수 전력의 차이를 알아보기 위해 Fig. 5와 같은 1.1 cm² 면적의 에피택셜 베이스 Si 태양전지(epitaxial base Si solar cell: EBS cell)를 설계하고 소자 구조에서 SiO₂-AR 막의 두께를 각각 500Å과 1000Å으로 달리한 2종류의 EBS(500Å) 전지와 EBS(1000Å) 전지를 제작하였다. Fig. 5의 구조에서 전지의 베이스는 p⁺/p⁺ 에피 구조를 갖는다. 또한 광이 입사되는 수광면이 textured 되며 이미터-상부전극 간에 n⁺ 매몰층이 삽입된다. EBS 전지의 특징은 textured 표면에 의한 광반사 손실을 최소화 하고 광이 흡수되는 유효영역의 길이 정도만을 저농도로 에피 성장시켜 p⁻ 영역에서 소수캐리어의 드리프트 이동에 의한 수집효율을

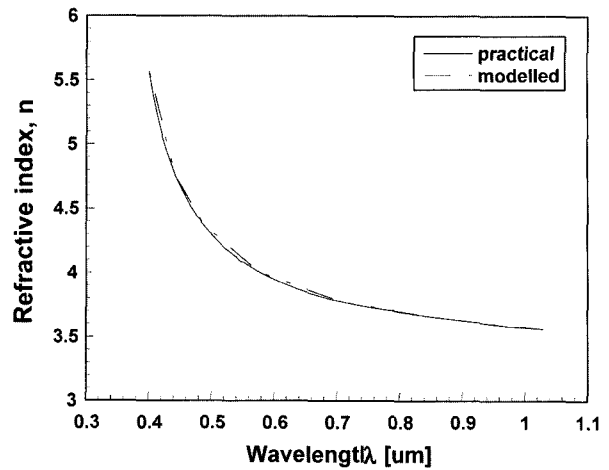


Fig. 3. Refractive index of Si as a function of wavelength.

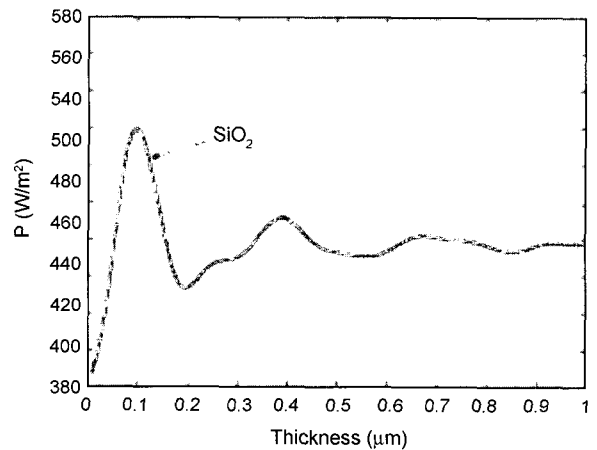


Fig. 4. Effective absorption power in the SiO₂-Si system as a function of antireflection layer thickness at AMI, 1 sun.

높이는 데 있다. 또한 고농도로 도핑된 기판을 사용함으로써 기판에서 낮은 직렬저항과 효과적인 배면전계가 자연스럽게 형성된다. 이미터- 금속전극 간의 매몰층 삽입은 전지의 이미터 직렬저항을 최대한 줄이고 있다. 전지의 제

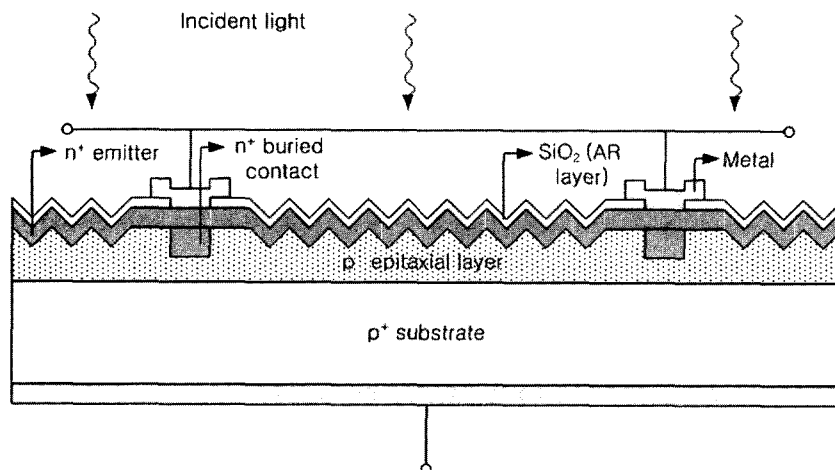
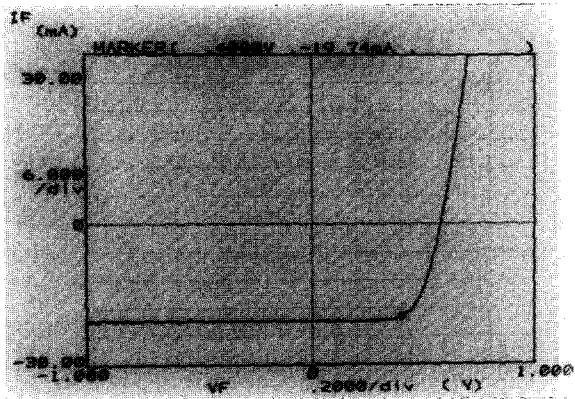
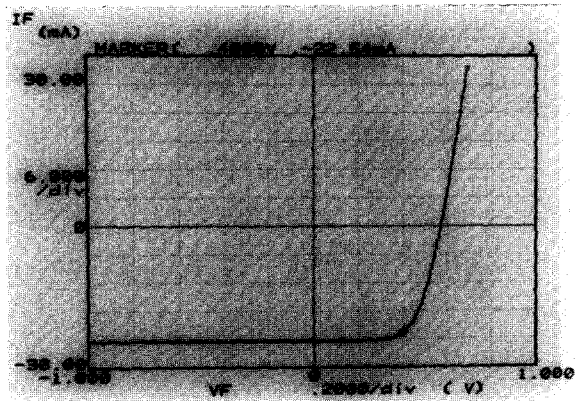


Fig. 5. Cross-sectional structure of EBS solar cell.



(a)



(b)

Fig. 6. Photocurrent-voltage characteristics: (a) EBS(500Å) cell, (b) EBS(1000Å) cell under illumination of AM1, 1 sun.

작과정에서는 p⁺(111) 구조($\rho \approx 0.01 \Omega\text{-cm}$) 상에 약 $16 \mu\text{m}$ 두께의 p 에피층($\rho \approx 100 \Omega\text{-cm}$)을 갖는 Si 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 공정 순서로는 먼저 기판의 표면을 등방성으로 식각하여 texturing한 후 약 5000Å의 field oxide를 형성하였다. 이후 소자간의 격리영역에 붕소(boron)를 확산하고 캐리어의 효율적인 수집을 위해 반도체-금속 접합부에 n⁺ 매몰층 영역을 형성하였다. 다음으로 전지의 이미터 영역을 개방하여 인(phosphorous)을 고농도로 얇게 확산한 후 전지를 구별[EBS(500Å)과 EBS(1000Å)]하여 각각 500Å과 1000Å 두께의 SiO₂ 광반사 방지막을 형성하였다. 공정의 마지막 단계로 금속-반도체 접촉 창구를 개방하여 Al 전극을 형성하고 금속-반도체간의 오염성 접촉을 위한 alloy 공정을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

Spectral Energy Corp.의 ss 1000× solar simulator 장치와 HP 4145B semiconductor parameter analyzer를 이용하여 제작된 소자들의 전기광학적 특성을 조사하였다. ss 1000× solar simulator 장치의 조명 스펙트럼은 AM-1(air mass-1)이며 입사광의 세기를 1 sun으로 조절

하였다. Fig. 6는 제작된 전지들의 광전류-전압 특성곡선이다. Fig. 6에서 EBS(500Å) 전지[Fig. 6(a)]의 개방전압(Voc)은 0.58 V로, 단락전류(Isc)는 21 mA로, 충실도(FF)는 0.65로 나타나고 있으며, EBS(1000Å) 전지[Fig. 6(b)]의 경우 개방전압(Voc)은 0.58 V로, 단락전류(Isc)는 24 mA로, 충실도(FF)는 0.65로 나타나고 있다. 또한 EBS(500Å) 전지와 EBS(1000Å) 전지의 최대전력은 각각 7.92 mW와 9.05 mW로 나타나며 유효 광흡수 전력에 대한 전력변환효율은 모두 16%로 나타난다. EBS(1000Å) 전지의 최대전력은 EBS(500Å) 전지의 최대전력에 비해 약 1.15배로 높게 나타나고 있는데, 이는 EBS(1000Å) 전지에서 유효 광흡수 전력의 증가에($520 \text{ W/m}^2 : 450 \text{ W/m}^2 = 1.15 : 1$) 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

태양전지의 전력변환효율 특성을 개선하기 위해서는 수광면을 texturing하거나 광반사 방지막을 설치하여 표면에서의 광반사 손실을 줄여야 한다. 본 논문에서는 처음으로 AM1 스펙트럼과 Si 굴절율을 수학적으로 모델링하여 SiO₂ 막을 광반사 방지막으로 사용하는 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력을 계산하였다. 또한 광반사 방지막의 처리에 따른 유효 광흡수 전력의 차이를 알아보기 위해 표본 소자로 에피텍셜 베이스 Si 태양전지(epitaxial base Si solar cell: EBS cell)를 설계하고 소자 구조에서 SiO₂-AR 막의 두께를 각각 500Å과 1000Å으로 나타낸 2종류의 EBS(500Å) 전지와 EBS(1000Å) 전지를 제작하였다. $0.4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.97 \mu\text{m}$ 의 파장 범위에서 광반사 방지막(SiO₂)의 두께에 따른 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력을 전산 모사한 결과 Si 태양전지의 유효 광흡수 전력은 SiO₂ 막의 두께가 500Å과 1000Å일 때 각각 520 W/m^2 와 450 W/m^2 로 나타났으며, $d(\text{SiO}_2) = 1000\text{Å}$ 에서 최대 광흡수 특성을 보였다. 표본 소자로 제작된 Si 태양전지들의 효율특성을 분석한 결과, AM1, 1 sun 조건에서 EBS(1000Å) 전지는 EBS(500Å) 전지에 비해 최대전력이 약 15% 높게 나타났다. EBS(500Å) 전지에 대한 EBS(1000Å) 전지의 효율특성 개선은 유효 광흡수 전력의 증가에($520 \text{ W/m}^2 : 450 \text{ W/m}^2 = 1.15 : 1$) 그 원인이 있다.

감사의 글

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. A. Green, J. Zhao and S. R. Wenham, IEEE Electron Devices, **13**(6), 317(1992).
2. S. R. Dhariwal, Solid State Electronics, **24**(12), 1162

- (1981).
3. R. A. Sinton, Y. Kwark, J. Y. Gan and R. M. Swanson, IEEE Trans. Electron Devices, EDL-7 567 (1986).
 4. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., p.798, John Wiley & Sons, Inc., (1981).
 5. E. S. Yang, Microelectronic Devices, p. 359, Mc Graw-Hill Book Company, (1988).
 6. R. A. Arndt, J. F. Allison, J. G. Haynos, and A. Meulenberg Jr., Conf. Rec. 11th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., (IEEE, New York, 1975) p. 40.
 7. P. A. Iles, J. Vac. Sci. Technol., **14**(5), 1100 (1977).
 8. Richard Williams, J. Vac. Sci. Technol., **14**(5), 1106 (1977).
 9. G. K. Chang, Y. K. Lim and J. C. Jeong, J. of the Microelectronics & Packaging Soc., **10**(2), 33 (2003).
 10. H. J. Hovel, Semiconductors and Semimetals, p. 203, Academic Press, (1975).
 11. L. F. Drummeter, Jr. and G. Hass, Physics of Thin Films Advanced in Research and Development, Ind ed., p. 242, Academic Press (1964).
 12. D. E. Aspnes, Properties of Silicon, p. 72, INSPEC, The Institution of Electrical Eng., London and New York, (1988).