

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 20, No. 1, 2000

비정질 실리콘 태양전지의 p-a-SiC:H/i-a-Si:H 계면에 삽입된 P형 미세 결정 실리콘의 완충층 효과에 대한 수치해석

이창현*, 임광수*

*한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학 전공

Numerical Simulation on Buffering Effects of Ultrathin p- μ c-Si:H Inserted at the p-a-SiC:H/i-a-Si:H Interface of Amorphous Silicon Solar Cells

Chang Hyun Lee, Koeng Su Lim*

*Division of Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract

To get more insight into the buffering effects of the p- μ c-Si:H inserted at the p-a-SiC:H/i-a-Si:H interface, we present a systematic numerical simulation using Gummel-Scharfetter method. The reduced recombination loss at the p/i interface due to a constant bandgap buffer is analysed in terms of the variation of the p/i interface region with a short lifetime and the characteristics of the buffer such as mobility bandgap, acceptor concentration, and D-state density. The numerical modeling on the constant bandgap buffer demonstrates clearly that the buffering effects of the thin p- μ c-Si:H originate from the shrinkage of highly defective region with a short lifetime in the vicinity of the p/i interface.

1. 서 론

비정질 실리콘 태양전지의 성능은 p형 비정질 실리콘 카바이드막(p-a-SiC:H)을 창층 물질로 응용함으로써 10 %이상의 고효율이 가능해졌다. 2.0 eV이상의 높은 에너지 밴드갭 특성을 갖는 p-a-SiC:H을 창층으로 사용할 때에 i층과의 이종접합이 형성되어 전자에 대한 전위장벽효과로 개방전압이 증가하는 장점이 있다. 또한 창 효과(window effect)에 의해 400~500 nm부근의 단파장대의 수집효율향상이 기대된다. 그러나 실제로는 에너지 밴드갭이 서로 다른 p-a-SiC:H과 i층이 접합할 때 그 계면부근 수십 두께의 영역에 높은 재결합 준위밀도를 가지며 반송자의 수명이 짧은 결함층이 형성된다.¹⁾ 이 결함층을 통해 전자와 정공의 재결합 손실이 발생하게 되어 태양전지의 단파장대 수집효율이 예상했던 것 만큼 크게 증가하지는 않는다.

이러한 문제를 해결하기 위한 시도로서 경사형 밴드갭(graded bandgap)을 가지는 완충층 및 일정한 밴드갭(constant bandgap)을 가지는 무첨가 실리콘 카바이드막과 같은 완충층이 개발되어 왔다.^{2,3)} 본 연구팀에서도 이미 p형 미세결정 실리콘 박막(p- μ c-Si:H)을 p-a-SiC:H층과 i층사이의 계면에 새로운 형태의 완충층으로 삽입함으로써 12%의 고효율 특성을 가지는 비정질 실리콘 태양전지 제작에 성공하였다.⁴⁾ p- μ c-Si:H을 완충층으로 사용할 경우에 태양전지의 단파장대의 수집효율과 개방전압이 향상됨을 실험적으로 확인하였다. 그러나, p- μ c-Si:H 완충층 효과에 대한 이론적 이해는 아직 미비한 형편이다.

본 논문에서는 비정질 실리콘 태양전지의 수치해석적 연구를 통해 p- μ c-Si:H박막의 완충층 효과에 대한 그 원인을 이론적으로 규명하고자 한다. p- μ c-Si:H박막의 광학적 밴드갭, 억셉터(acceptor) 농도, D-상태(D-state) 결함밀도와 같은 물리적 특성과 p층과 i층 계면특성에 대한 물

리적 모델을 확립하고 이에 대한 모델 변수를 변화시킴으로써 완충층이 태양전지의 동작 특성에 미치는 효과를 고찰하고자 한다.

2. 이론적 모델

비정질 실리콘 태양전지의 동작 해석을 위해 J. L. Gray에 의해 소개된 수치해석적 방법을 따른다.⁵⁾ MATLAB에 의해 프로그램된 수치해석 과정은 아래에 기술된 Poission방정식(식1), 연속방정식(식2, 3), 전류 방정식(식4, 5)을 유한차분법으로 이산화하여 그 해를 동시에 구하는 Gummel-Sharfetter법을 이용한다.⁶⁾

$$\epsilon \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = -\rho(x) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} J_p(x) = q(G(x) - R(x)) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} J_n(x) = -q(G(x) - R(x)) \quad (3)$$

$$J_n(x) = -q\mu_n p(x) \frac{\partial}{\partial x} (\psi(x) + V_n(x)) + kT\mu_n \frac{\partial}{\partial x} p(x) \quad (4)$$

$$J_p(x) = -q\mu_p p(x) \frac{\partial}{\partial x} (\psi(x) - V_p(x)) - kT\mu_p \frac{\partial}{\partial x} p(x) \quad (5)$$

여기서 ϵ 는 유전상수, $\psi(x)$ 는 정공의 전위, q 는 전자의 전하량, μ_n 과 μ_p 는 각각 정공과 전자의 이동도, V_p 와 V_n 는 가전자대와 전도대의 전위, $J_p(x)$ 와 $J_n(x)$ 는 각각 정공과 전자의 전류밀도를 나타낸다.

또한 위의 상호 연관된 비선형 미분방정식을 풀기 위해 필요한 알짜 전하밀도($\rho(x)$), 재결합율($R(x)$), 그리고 빛에 의한 전자와 정공의 생성율($G(x)$)을 아래의 식으로 모델링한다.

$$p(x) = p - n + N^{D^+} - N^{A^-} + N^{tail} + N^{DS} + N^{SRH} \quad (6)$$

$$R(x) = R^{tail}(x) + R^{DS}(x) + R^{SRH}(x) \quad (7)$$

$$G(x) = \int_0^\infty \alpha(\lambda) F(\lambda) [1 - R(\lambda)] \exp[-\alpha(\lambda)x] d\lambda \quad (8)$$

Table 1. Simulated model parameters of p-i-n solar cells used in the analysis

	<i>p-a-SiC:H</i>	<i>p-μc-Si:H</i>	<i>p/i interface</i>	<i>i-a-Si:H</i>	<i>n-μc-Si:H</i>
Thickness (Å)	70	50	0~50	6000	400
Electron affinity (eV)	3.86	3.90	4.0	4.0	3.96
Mobility gap (eV)	2.0	1.9	1.72	1.72	1.9
Hole mobility (cm ² /Vs)	1	1	1	1	1
Electron mobility (cm ² /Vs)	10	10	10	10	10
N_A, N_D (cm ⁻³)	5×10^{18}	$1 \times 10^{18} \sim 7 \times 10^{19}$	-	-	5×10^{18}
D-state conc. (cm ⁻³)	1×10^{18}	3×10^{18}	5×10^{17}	5×10^{15}	1×10^{18}

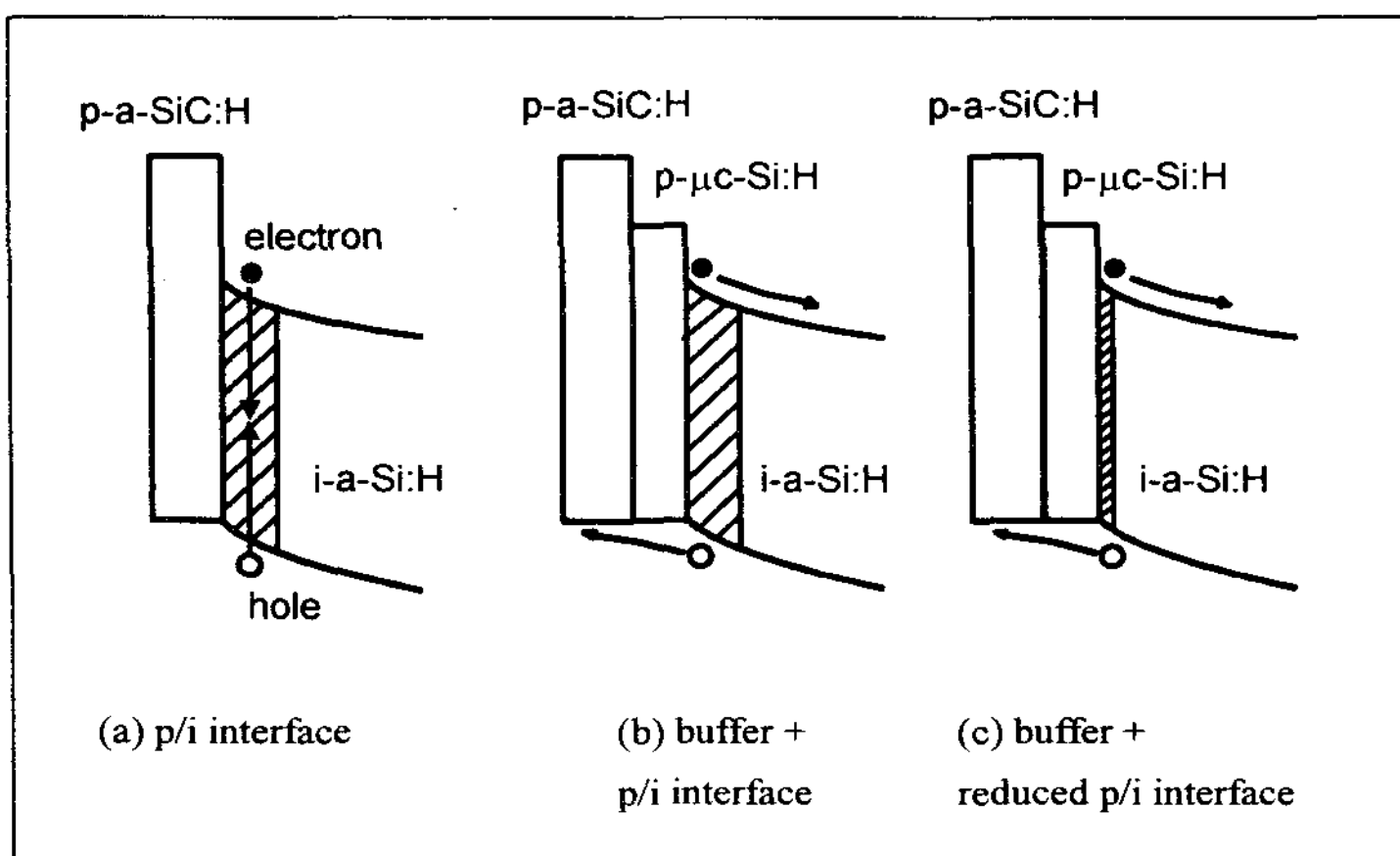


Fig 1. Simplified band diagrams of the cells. The shadowed regions indicate a highly defective zone near the p/i interface. (a) the cell with a p/i interface zone and without a buffer. (b) the cell with the same thick p/i interface zone as the bufferless cell and with a constant band gap buffer. (c) the cell with the reduced p/i interface zone and with a constant band gap buffer.

여기서 p 와 n 은 각각 자유 정공과 전자의 농도, N_D 와 N_A 는 이온화된 도우너와 억셉터 농도, N_{tail} 와 N_{DS} 는 꼬리 상태(tail state)와 D-상태(D-states ; D^+ , D^0 , D^-)를 통해 포획된 알짜 전하밀도, N_{SRH} 는 Shockley-Read-Hall (SHR) 공식에 의해 주어지는 도우너형(donor-like) 단일 준위 트랩(single-level trap)에 포획되는 알짜 전하밀도, 그리고 $\alpha(x)$ 는 p, i, n층에서의 흡수 계수를 나타낸다. $F(\lambda)$ 는 AM 1.5 조건하에서 100 mW/cm²를 가지며, $R(x)$ 는 glass/TCO/a-Si:H 구조에서의 표면 반사율을 적용하였다. 최종적인 재결합율($R(x)$)은 꼬리 상태, Gaussian분포를 가

지는 D-상태, 그리고 SHR 트랩 준위(trap level)에 의한 각각의 재결합율의 합으로 계산된다. (식1)에서 (식 6)까지의 기본방정식을 Gummel-Sharfetter법을 사용하여 각각의 망점(mesh point)에서 전자와 정공의 농도, 전위, 재결합율이 계산된다. 최종적으로 구해진 해로부터 광전류-전압 특성, 암전류-전압 특성, 수집효율이 산출된다.

p/i 계면층에서의 재결합 현상을 모델링하기 위해 p/i 계면층은 짧은 반송자 수명(2×10^{-13} sec)을 가지며 i층과 동일한 물리적 특성과 에너지 밴드 구조를 가지는 것으로 모사화되었다. 또한 미세결정 실리콘 완충층의 물리적 변수로 억셉터

농도(NA)는 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 이동도 갭(mobility gap)은 1.9 eV, 전자 친화도는 3.90 eV로 모델링하였다. 수치해석에 사용된 태양전지의 밴드 구조는 그림 1에 나타나 있으며, 태양전지의 각 층의 물리적 변수는 표 1에 나타나 있다.

3. 수치해석 결과

H. Tasaki는 p/i 계면층에 경사화된 밴드 형태의 a-SiC:H 완충층의 효과에 대한 수치해석을 제시한 바 있다.⁷⁾ H. Tasaki는 개방전압과 단파장대의 수집효율을 향상시키는 완충층 효과를 규명하기 위해 세가지의 기본적인 가정을 도입하였다. 첫번째 가정은 p-a-SiC:H의 밴드갭인 2.0 eV값에서 i-a-Si:H의 1.72 eV값으로 선형적으로 경사화되는 밴드 구조를 완충층이 가진다는 것이다. 이러한 경사구조의 완충층이 삽입될 경우, p/i 계면층의 내부전계가 강화되어서 빛에 의해 생성된 전자와 정공(광전자-정공)이 p/i 계면층에서 재결합하기전에 빠른 속도로 그 계면층을 통과하게 되는 효과를 산출한다. 그들의 두번째 가정은 태양전지 동작 특성에 매우 민감한 영향을 미치는 p/i 계면층의 물리적인 특성이 완충층을 가지지 않는 태양전지에서의 그 계면층의 물리적 특성과 동일하다고 둔 것이다. 세번째 가정은 p-a-SiC:H의 끝나는 점과 경사화된 구조를 가지는 완충층의 밴드갭이 큰 쪽사이에 p/i 계면층이 위치한다는 점이다. 이러한 가정의 결과로서 필연적으로 발생하는 것은 결합층인 p/i 계면층의 밴드갭이 넓어지게 되고 이로 인해 그 계면층에서의 전자-정공의 농도가 감소하는 효과가 나타난다는 점이다. 아울러 첫번째와 세번째 가정으로부터 형성된 경사화된 완충층 구조 때문에 p/i 계면층에서의 재결합 손실이 감소하게 된다. 그들의 수치해석에서는 비록 재결합 손실의 주 원인인 p/i 계면층의 물리적 성질이 완충층을 가지지 않는

태양전지에서 가정된 p/i 계면층의 물리적 성질과 동일하다고 가정되었음에도 불구하고, 완충층을 삽입할 때는 개방전압과 단파장대 수집효율이 증가하는 결과를 얻었다. 그들의 수치해석의 결과에 의하면, 완충층의 효과는 p/i 계면층의 상태밀도나 완충층의 물리적 성질에 기인한 것이 아니라 완충층의 경사화된 밴드 구조로부터 발생하는 것으로 결론지어진다.

그러나 그들의 접근방법은 일정한 밴드갭 구조를 가지는 완충층 효과를 설명하기에는 타당하지 않다는 문제점이 있다. 왜냐하면 일정한 밴드갭 구조를 가지는 완충층을 가지는 태양전지에 있어서 그들이 상정한 첫번째와 세번째 가정은 적용될 수가 없기 때문이다. 본 논문에서는 일정한 밴드갭 구조를 가지는 완충층의 도입으로부터 발생하는 효과에 대해 체계적인 해석을 새롭게 제시한다. 이를 위해서는 실험적으로 확인된 완충층 효과가 완충층의 물리적 성질로부터 기인한 것인지 아니면 p/i 계면층의 재결합 현상의 변화에 기인한 것인지를 규명하는 것이 필수적이다.

3.1. p/i 계면층에서의 재결합 현상

그림 2는 p- μ c-Si:H 완충층을 가지는 태양전지에 있어서 p- μ c-Si:H와 i-a-Si:H사이의 p/i 계면층의 두께 변화에 따른 태양전지의 특성 변화를 나타낸 것이다. 굵은 직선은 완충층이 있는 구조와 없는 구조의 차이점을 명시화하기 위해, 50 Å 두께의 p/i 계면층을 가지는 완충층이 없는 태양전지의 특성을 표시한 것이다. 그림 2에서 나타나듯이 완충층이 있는 구조에서 p/i 계면층의 두께가 감소할 수록 모든 특성이 향상되는 것을 알 수가 있다. 이것은 단파장대의 빛에 의해 발생하는 광정공-전자가 p/i 계면층 영역의 감소로 인해 그 재결합이 줄어들기 때문이다. 그림 3에서 보듯이 p/i 계면층 두께의 감소는 단파장대의 수집효율의 향상과 직접적으로 연관됨을 알 수가 있다. 빛에 의해 발생한 전자-정공의 재결합 현

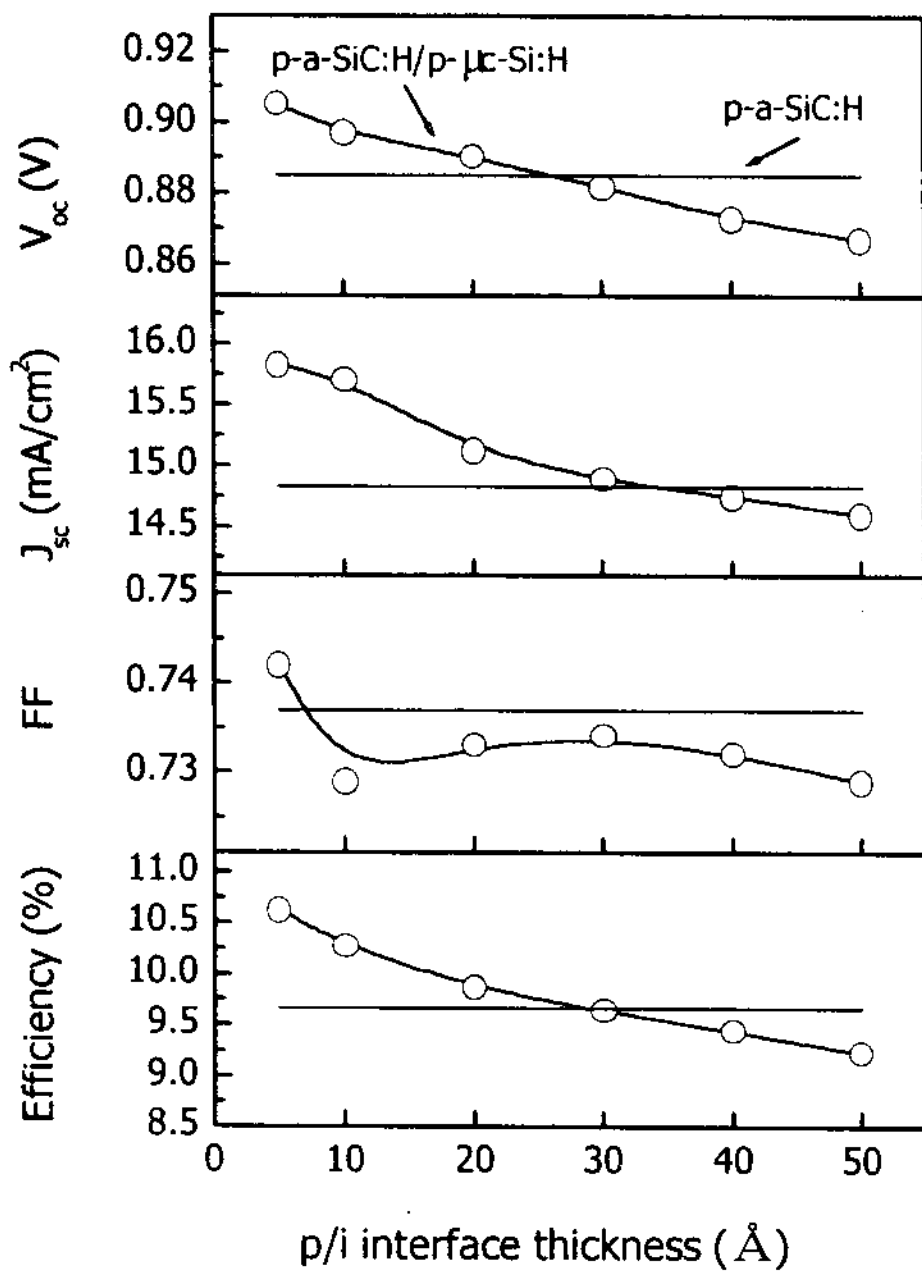


Fig. 2. Simulated cell performance as a function of the thickness of a highly defective region near the p-mc-Si:H/i-a-Si:H interface in the buffered cell. A solid line indicates the bufferless cell with 50 Å-thick interface layer.

상과 직접적으로 관련되어 있는 단과장대의 수집 효율의 강화는 두가지 관점에서 이해되어져 왔다. 첫번째는 p/i 계면층에서의 내부전계 강화는 그 계면층에서의 광전자-정공의 이동 속도를 빠르게 한다는 점이다. 두번째는 p/i 계면층의 재결합 상태 밀도의 감소로 인해 광반송자가 재결합 손실을 겪지 않고 수집된다는 점이다. 그림 4에 나타난 결과를 살펴 보면, p/i 계면층의 두께가 감소할 때 계면층 영역뿐만 아니라 i층의 내부전계는 그다지 크게 변화하지 않고, 단지 높은 재결합율을 가지는 그 영역이 줄어든다는 사실을 알 수가 있다. 따라서 일정한 밴드갭 구조를 가지는 완충층의 효과는 p/i 계면층에서의 내부전계의 변화와 연관된 것이 아니라 p/i 계면층의 상태 변화와 깊이 연관된 현상임을 알 수가 있다.

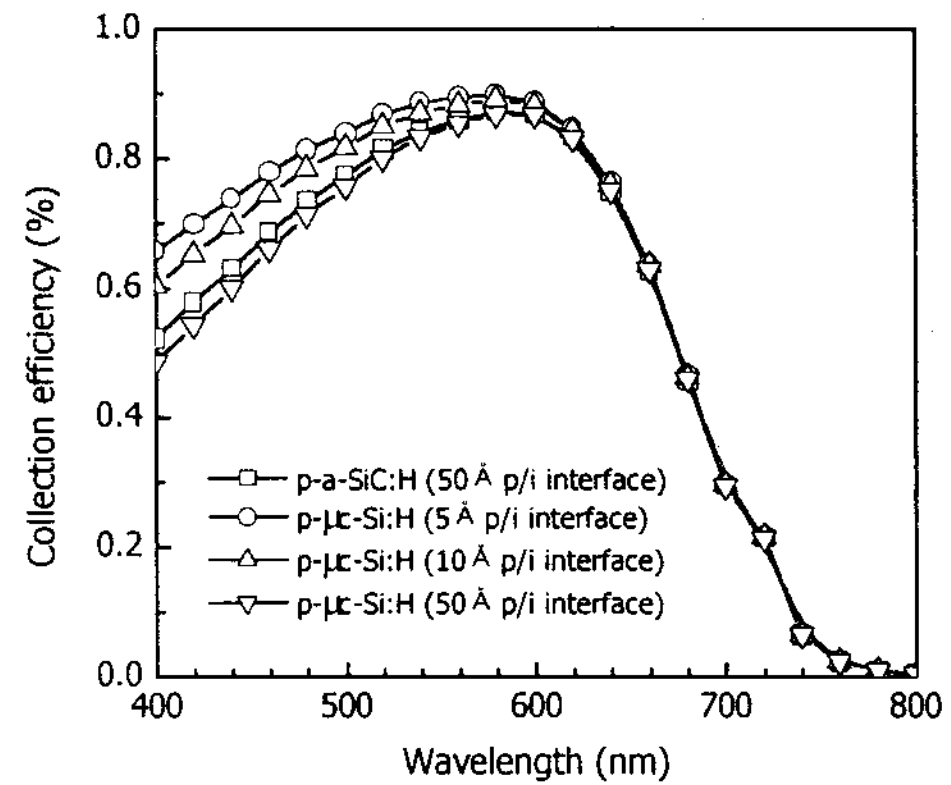


Fig. 3. The dependence of calculated spectral responses of the buffered cells on a function of the thickness of a highly defective region near the p-mc-Si:H/i-a-Si:H interface. The thicknesses of the p/i interface are 5 Å (\circ), 10 Å (\triangle), 50 Å (∇) for the buffered cells, and 50 Å (\square) for the bufferless cell.

p- μ c-Si:H 완충층 다음에 위치한 p/i 계면층이 완충층이 없는 구조의 그것과 같은 두께를 가진다고 가정할 때에는 단락전류와 개방전압은 완충층 삽입에 의해 오히려 감소한다. 이러한 단락전류의 감소는 완충층에서의 빛의 흡수 손실에 기인한 것이다. 아울러 발생하는 개방전압의 감소는 완충층이 p-a-SiC:H보다 더 낮은 밴드갭을 가짐으로 발생하는 내부전계의 감소로 인한 것이다. 그렇다면 완충층의 다음에 위치하고 있는 p/i 계면층이 완충층을 가지지 않는 구조의 그것과 동일하다는 가정에서 출발할 때, 위에서 언급된 완충층의 효과가 그 계면층 영역이 감소와 연관되어 있다는 사실을 제외하고는 다른 이유로부터 완충층 효과를 기대할 수는 없는가하는 질문이 제기된다. 직관적으로 p/i 계면층과 상관없이 p- μ c-Si:H 완충층 자체의 특성 변화가 완충층 효과를 발생시킬 수도 있다. 이러한 사고를 검증하기 위해 완충층의 역셉터 농도, 이동도 갭, D-상태, 그리고 전자와 정공의 이동도의 변화가 태양

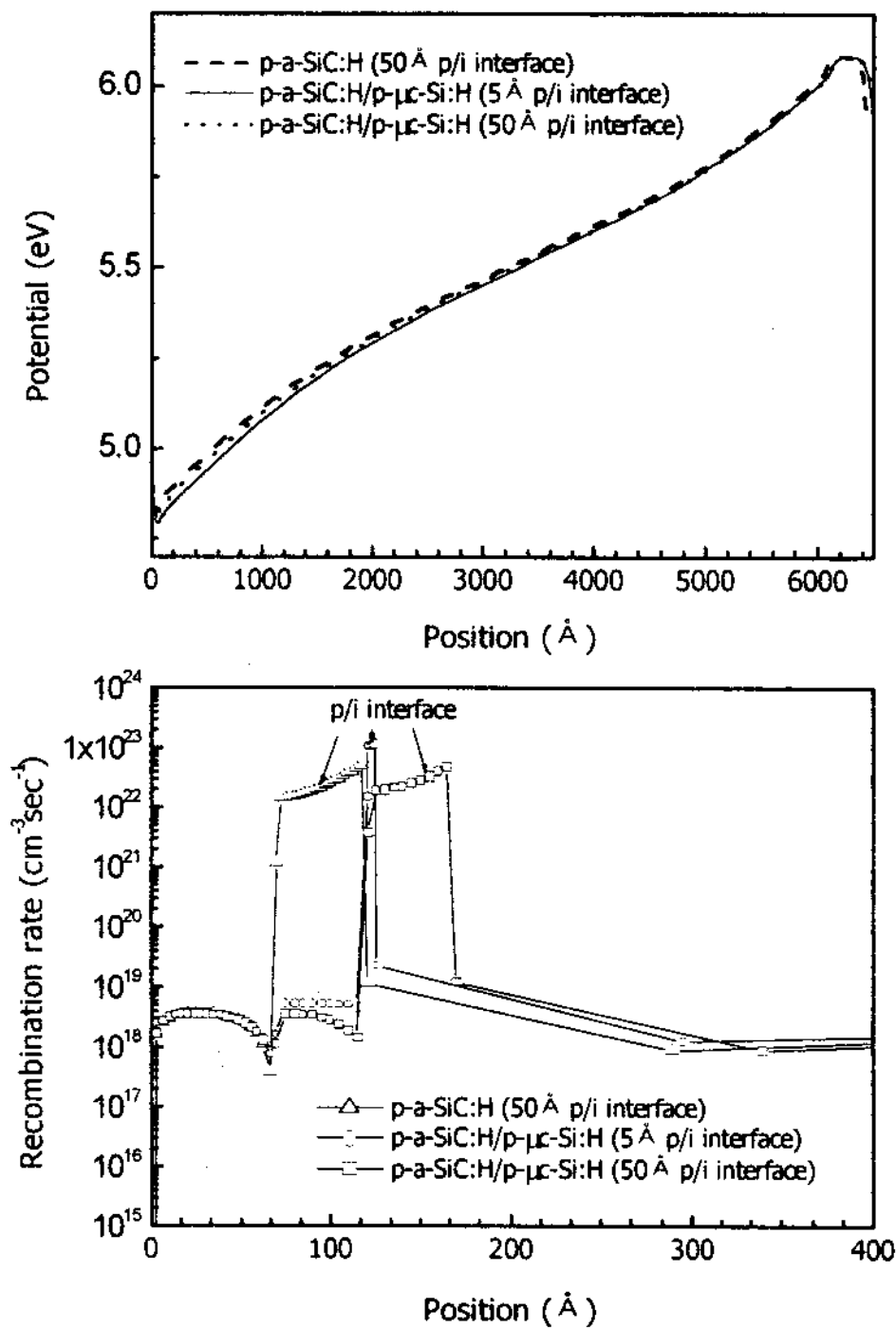


Fig. 4. Simulated potential profiles and recombination rates in the cells with p-a-SiC:H/50 Å-thick p/i interface, p-a-SiC:H/p-μc-Si:H/5 Å-thick p/i interface, and p-a-SiC:H/p-μc-Si:H/50 Å-thick p/i interface.

전지의 재결합 현상에 미치는 영향을 이어서 고찰한다.

3.2. 완충층의 억셉터 농도 변화

그림 5는 p/i 계면층의 두께가 각각 5 Å과 50 Å일 때 p-μc-Si:H 완충층의 억셉터 농도 변화에 따른 태양전지의 특성 변화를 나타낸 것이다. 굵은 직선은 50 Å 두께의 p/i 계면층을 가지는 완충층이 없는 태양전지의 특성을 표시한 것이다. 억셉터 농도가 p-a-SiC:H($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)의 도핑농도보다 낮을 때는 완충층은 전계 약화로 인해 태양전지의 동작에 나쁜 영향을 주어 개방 전압과 충실도가 완충층이 없는 구조보다 더 감

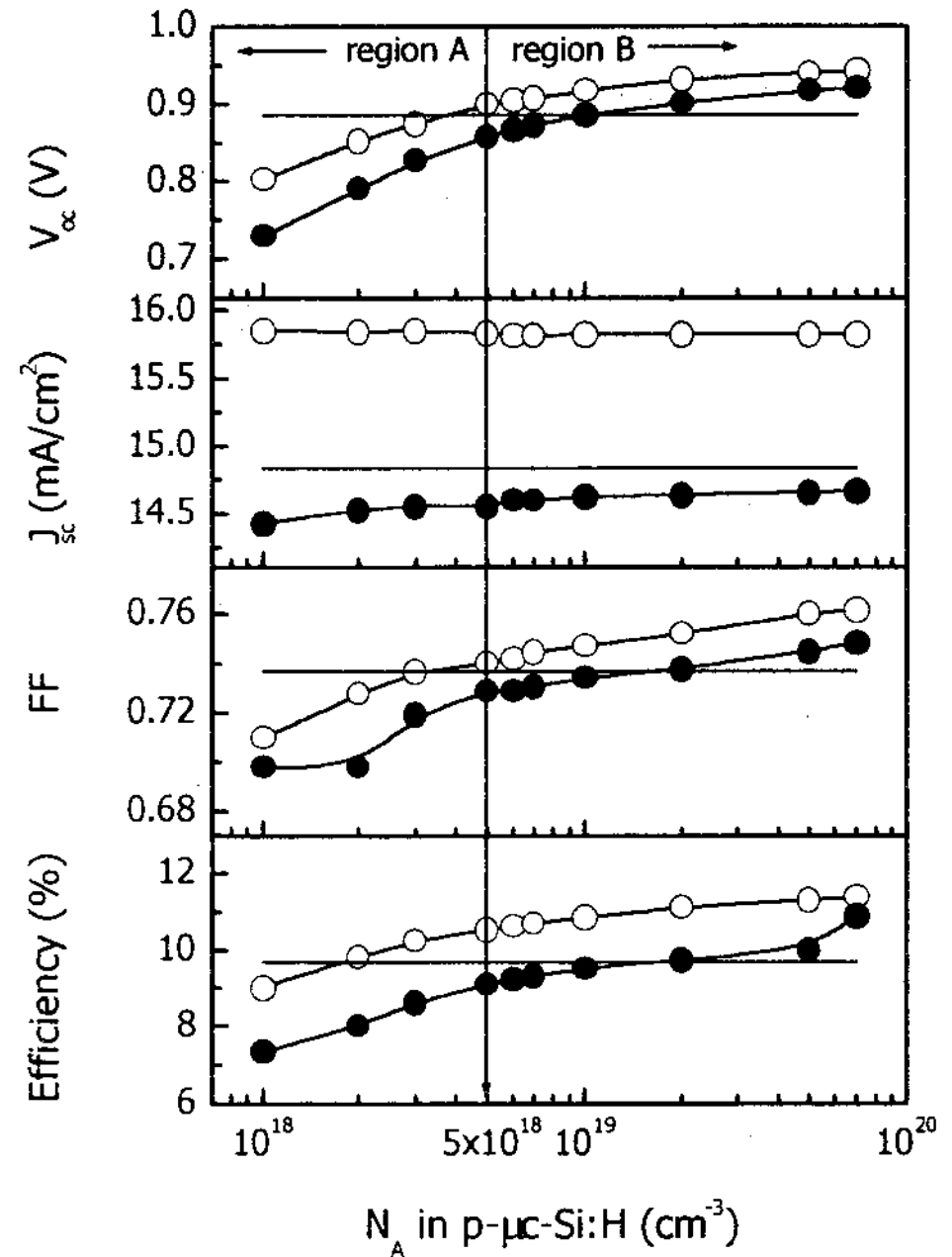


Fig. 5. Simulated cell performance as a function of the acceptor concentration (N_A) of the buffer in the buffered cells with a 5 Å-thick p/i interface zone (○) and a 50 Å-thick p/i interface zone (●). A solid straight line indicates the bufferless cell with a 50 Å-thick interface layer.

소되는 것을 알 수가 있다. 또한 50 Å 두께의 p/i 계면층을 가지며 완충층을 가지는 구조에서는 그 억셉터 농도가 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 에서 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 으로 변할 때 단락전류가 다소 증가하는 현상을 보인다. 그러한 단락전류 상승효과는 억셉터 농도 증가에 의한 전계 강화에 기인한 것이다. 그러나 이러한 사실이 완충층의 효과가 완충층의 더 높은 억셉터 농도로 부터 발생하는 i층의 전계 강화로부터 기인한다는 것을 말하는 것은 아니다. 왜냐하면 그림 5에서 억셉터 농도가 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 인 지점을 표시하는 굵은 직선을 기준으로 좌측에 있는 A영역에서의 태양전지의 특성은 완충층을 가지지 않는 태양전지의 특성보다 현저히 나쁘기 때문이다. 즉 수치해석 결과와 실험으로

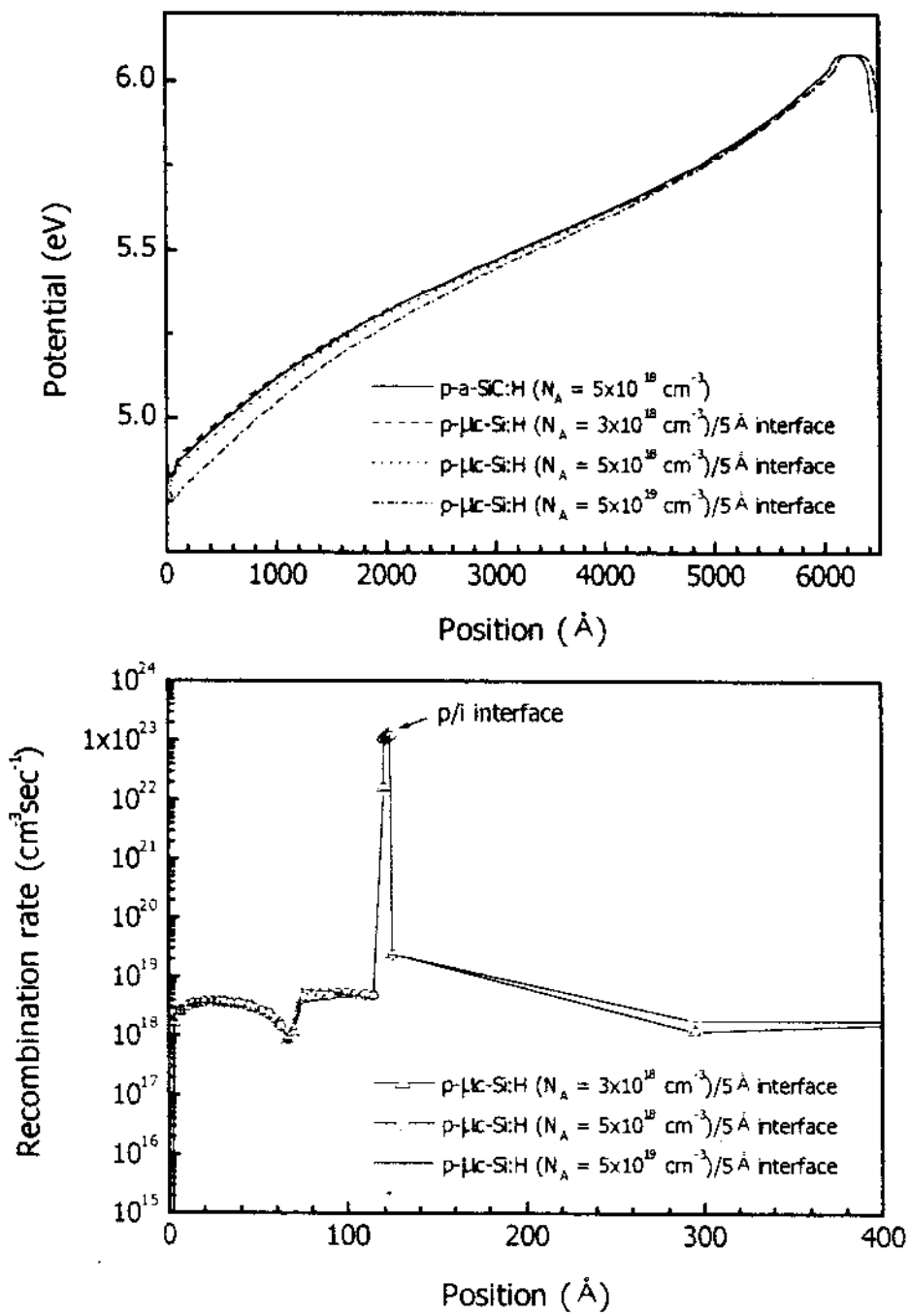


Fig. 6. Simulated potential profiles and recombination rates in the cells with p-a-SiC:H/5 Å-thick p/i interface and p-a-SiC:H/p-μc-Si:H/5 Å-thick p/i interface. N_A of p-a-SiC:H is $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. N_A of p-μc-Si:H are $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

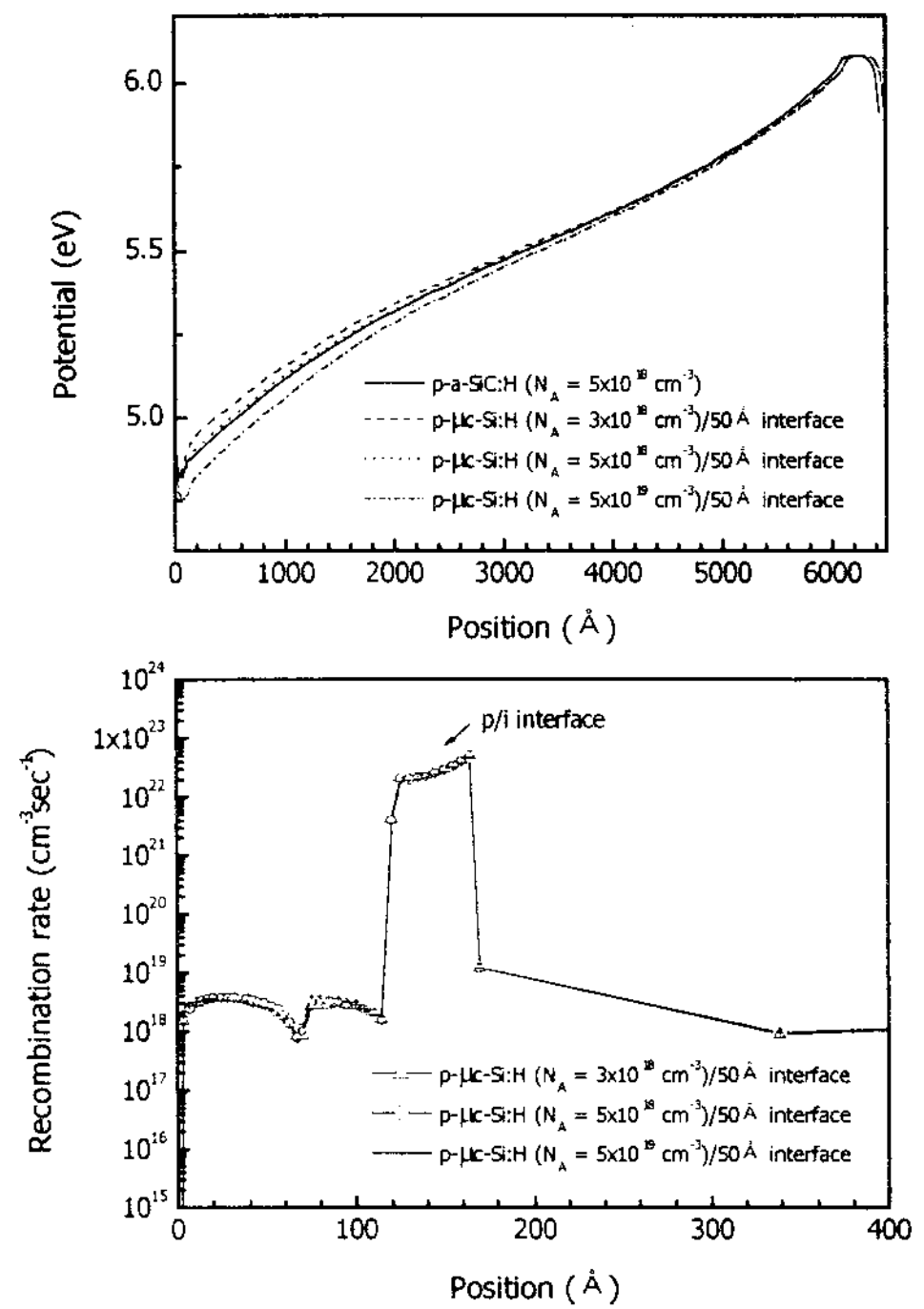


Fig. 7. Simulated potential profiles and recombination rates in the cells with p-a-SiC:H/50 Å-thick p/i interface and p-a-SiC:H/p-μc-Si:H/50 Å-thick p/i interface. N_A of p-a-SiC:H is $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. N_A of p-μc-Si:H are $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

확인된 완충층 효과가 부합되기 위해서는 완충층의 억셉터 농도가 p-a-SiC:H의 그것을 초과한 B 영역에 존재해야 하기 때문이다.

그림 6과 7은 p/i 계면층의 두께가 각각 5 Å 와 50 Å 일 때 p-μc-Si:H 완충층의 억셉터 농도에 따른 전계 분포와 재결합을 변화를 나타낸 것이다. 완충층의 억셉터 농도가 증가할 수록 전계의 차이가 심화되어 그 개방전압과 충실도가 증가하지만 p/i 계면층에서의 재결합율의 하락으로는 이어지지 않아서 단락전류는 그 억셉터 농도에 무관하게 일정하다는 사실을 알 수 있다. 따라서 완충층의 억셉터 농도의 증가로 인한 내부전계의 강화는 p/i 계면층에서의 재결합 손실을 감소시키

지 못하며, 완충층 효과는 그 계면층에서의 내부 전계 변화의 관점으로는 설명될 수 없다고 결론지어진다.

3.3. 완충층의 밴드갭 변화

지금까지의 수치해석에서는 완충층의 밴드갭이 1.9 eV로 가정되었다. p/i 계면층의 물리적 성질이 완충층이 없는 구조에서의 그것과 동일하다는 가정하에서 완충층의 밴드갭 증가는 p/i 계면층에서의 재결합 손실을 감소시킬 지도 모른다. 이러한 발상은 완충층의 밴드갭의 증가는 완충층과 i 층사이의 전도대의 불연속성에 의해 발생하는 내부전계 강화와 전자의 역확산 효과를 가져오리라

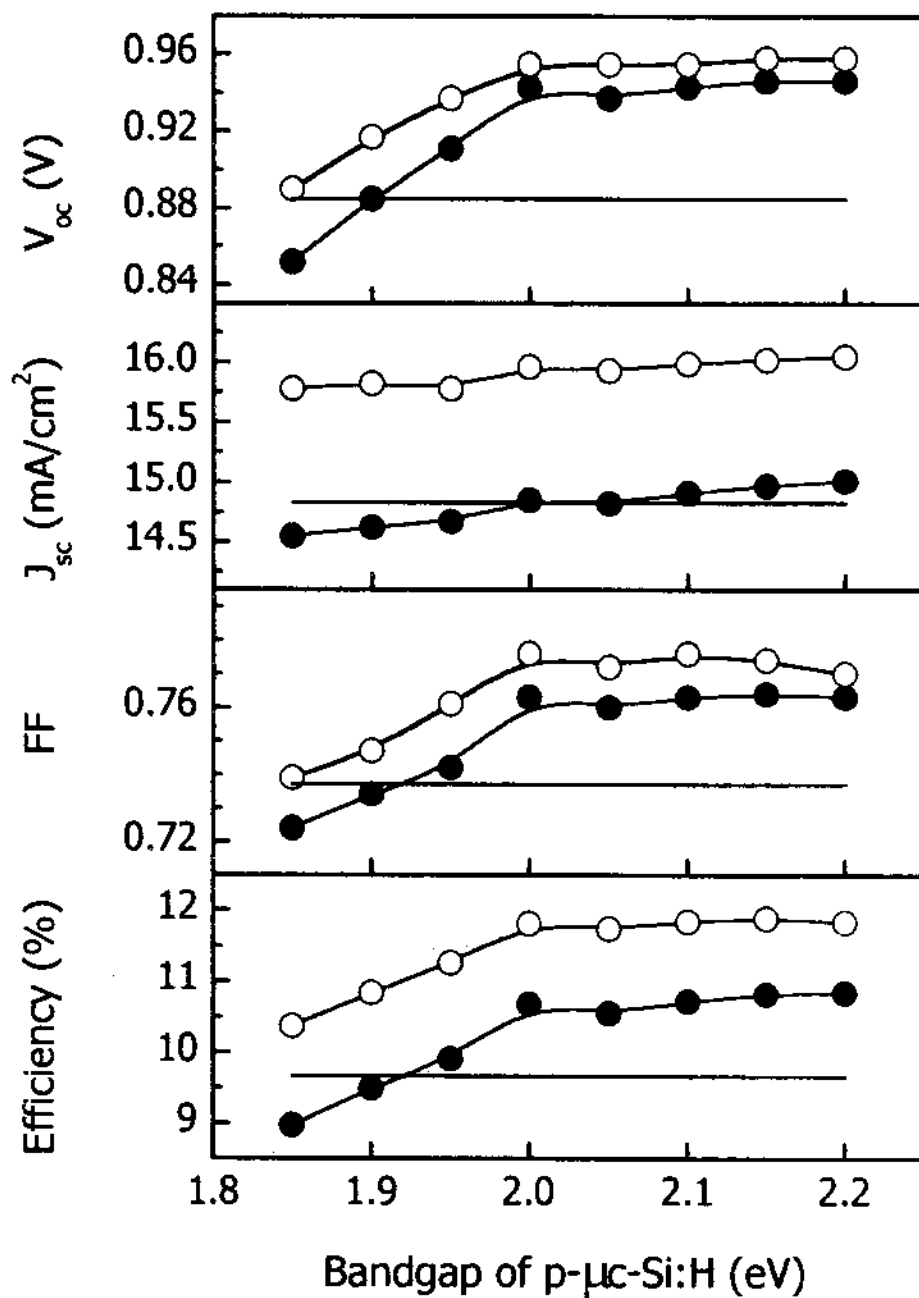


Fig. 8. Simulated cell performance as a function of the bandgap in the buffered cells with a 5 Å-thick p/i interface zone (○) and a 50 Å-thick p/i interface zone (●). A solid straight line indicates the bufferless cell with a 50 Å-thick interface layer.

는 물리적인 이해에서 출발한 것이다.

그림 8은 p/i 계면층의 두께가 각각 5 Å 와 50 Å 일 때 p-μc-Si:H 완충층의 밴드갭 변화에 따른 태양전지의 특성 변화를 나타낸 것이다. 여기서는 완충층의 밴드갭 증가는 전도대의 불연속치를 증가시키지만 가전도대의 불일치는 고정되는 것으로 가정하였다. 개방전압과 충실도는 그 밴드갭 변화에 따라 동일한 경향성을 보인다. 완충층의 밴드갭이 1.85 eV에서 2.0 eV로 확장될 때 개방전압과 충실도는 함께 증가하지만 그 이상의 증가에 대해서는 더 이상 반응하지 않는다. 그것은 그림 9와 10에서 볼 수 있듯이 완충층의 밴드갭이 2.0 eV이상 증가할 때는 더 이상 내부전계가 강화되지 못하기 때문이다. 단락전류는 그 밴

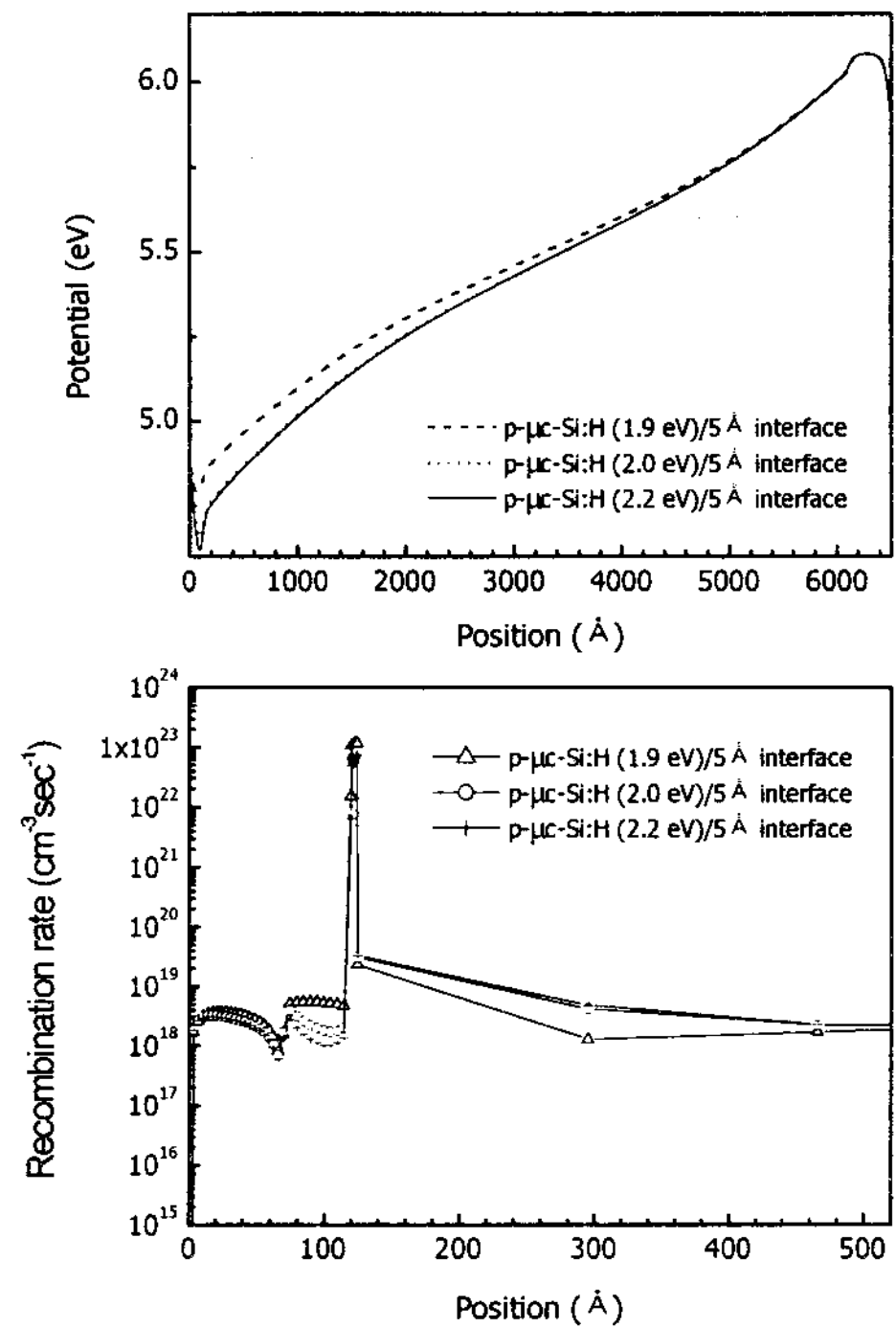


Fig. 9. Simulated potential profiles and recombination rates in the buffered cells with p-a-SiC:H/p-μc-Si:H/5 Å-thick p/i interface. The bandgap of the buffer are 1.9 eV, 2.0 eV, and 2.2 eV, respectively.

드갭의 증가에 따라 선형적으로 증가하는데 이것은 완충층에서의 흡수 손실의 감소에 기인한 것이다.

5 Å 두께의 p/i 계면층을 동일하게 가지는 완충층이 있는 구조와 없는 구조에 있어서의 태양전지 동작 비교는 완충층의 밴드갭이 p-a-SiC:H의 그것을 초과해서 증가하더라도 그 계면층에서의 심각한 재결합 손실은 줄이지 못하다는 것을 보여준다. 비록 그림 9와 10에서는 완충층의 밴드갭의 증가가 p/i 계면층에서의 재결합율을 다소 감소시키고 있는 것으로 나타나지만, 그 효과는 미미하여 단파장대의 급격한 상승을 가져오는 완충층 효과에 대한 직접적인 원인으로 생각될 수는 없다.

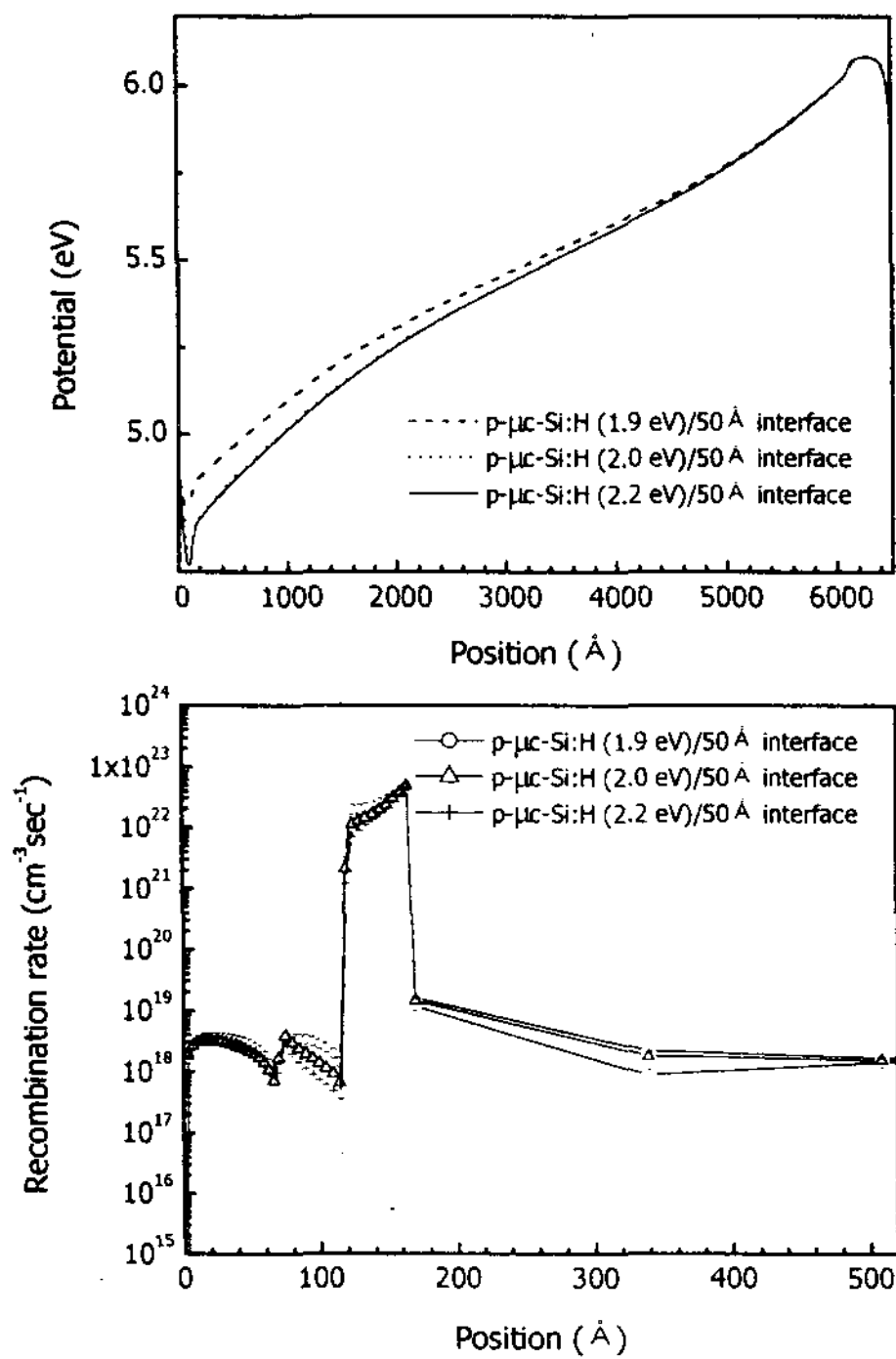


Fig. 10. Simulated potential profiles and recombination rates in the buffered cells with p-a-SiC:H/p-mc-Si:H/50 Å-thick p/i interface. The bandgap of the buffer are 1.9 eV, 2.0 eV, and 2.2 eV, respectively.

앞에서 살펴본 대로 완충층의 밴드갭과 엑셉터 농도의 증가가 동일하게 내부전계를 증가시켜 개방전압과 충실도를 향상시키지만 이 두가지 물리적 특성으로 발현되는 재결합 양상은 분명히 구별되는 특징을 지니고 있다. 완충층의 밴드갭 증가는 i층이 시작되는 부분에서 발생하는 전자의 역확산을 강화시키고 이로 인해 p/i 계면층과 p층에서의 전자 밀도를 감소시켜 그 영역에서의 SRH 재결합율을 감소시킨다. 그러나 그 계면층에 가까운 i층 부근에서는 역확산에 의해 오히려 전자가 쌓이게 되어 그 영역에서의 재결합은 오히려 증가한다. 이와 비교하여 완충층에서의 엑셉터 농도의 변화는 p/i 계면층 영역에서의 재결합 현상을 변화시키지 못하는

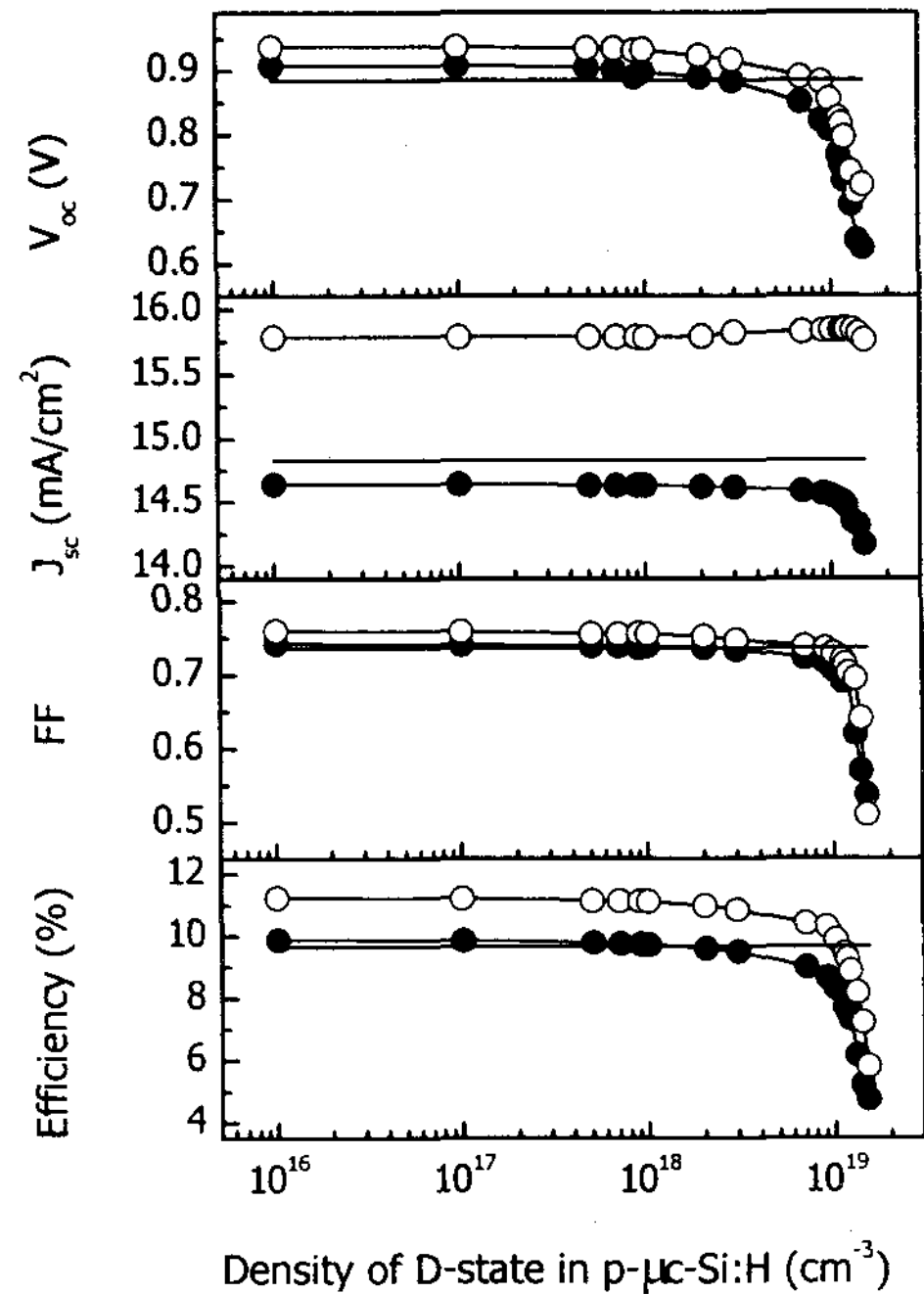


Fig. 11. Simulated cell performance as a function of the D-state density of the buffer in the buffered cells with a 5 Å-thick p/i interface zone (○) and a 50 Å-thick p/i interface zone (●). A solid straight line indicates the bufferless cell with a 50 Å-thick interface layer.

것으로 드러난다.

3.4. 완충층의 D-state 농도 변화

완충층의 엑셉터 농도와 밴드갭 변화 효과이외에도 완충층의 D-상태 농도와 전자-정공의 이동도의 변화도 p/i 계면층의 재결합 현상을 변화시키지 못함을 수치해석을 통해 확인하였다. 그림 11은 완충층의 D-상태 농도가 10^{16} cm^{-3} 에서 10^{18} cm^{-3} 으로 변할 때 태양전지의 특성은 완충층에서의 재결합 증가를 의미하는 D-상태의 농도 증가로 인해 거의 영향을 받지 않는다는 것을 보여준다.

4. 결 론

위에서 얻은 수치해석 결과를 근거로 해서, 일정한 밴드갭 구조를 가지는 완충층 효과는 p- μ c-Si:H 완충층의 특성과 연관된 것이 아니라 p/i 계면층의 영역 감소로 인한 재결합 손실 감소에 의한 것으로 결론지어진다. 즉 완충층을 삽입할 경우 i층이 서로간의 격자 불일치가 큰 p-a-SiC:H층이 아닌 동질성의 p- μ c-Si:H층 위에서 형성되기 시작하기 때문에 이종 접합시 발생하는 치명적인 p/i 계면층의 형성이 저지된다. 이로 인해 완충층이 없는 구조에 비해 p/i 계면층이 줄어들어서 그 재결합 손실이 감소하고 최종적으로 태양전지의 개방전압과 단파장대의 수집효율의 향상이 이루어진다고 할 수 있다. 아울러 완충층의 억셉터 농도와 밴드갭의 강화는 내부전계를 향상시키고 이로 인해 개방전압과 충실도의 향상이 이루어짐을 수치해석을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

1. S. Komuro, Y. Aoyagi, Y. Segawa, S. Namba, A. Masuyama, H. Okamoto, and Y. Hamakawa: Appl. Phys. Lett. 43 (1983) 968.
2. K. S. Lim, M. Konagai, and K. Takahashi: J. Appl. Phys. 56 (1984) 538.
3. W. Y. Kim, H. Tasaki, M. Konagai, and K. Takahashi: J. Appl. Phys. 61 (1987) 3071.
4. C. H. Lee and K. S. Lim: Proceedings of Material Research Society Symposium, San Francisco, USA, (1999) p. 507.
5. J. L. Gray: IEEE Trans. Electron Devices ED-36 (1989) 906.
6. D. L. Scharfetter and H. K. Gummel: IEEE Trans. Electron Devices ED-16 (1969) 64.
7. H. Tasaki, W. Y. Kim, M. Hallerdt, M. Konagai, and K. Takahashi: J. Appl. Phys. 63 (1998) 550.