

論文 91-28A-9-13

MOCVD를 이용한 화합물 반도체 Solar Cell의 개발 - Field Aided Heteroface 전지

(Design and Fabrication of Compound Semiconductor Solar Cells
Grown by MOCVD-Field Aided Heteroface Cell)

張志根*, 嚴于鎔**, 林聖奎*

(Gee Keun Chang, Woo Yong Ohm, and Sung Kyoo Lim)

要 約

컴퓨터 해석을 통해 uniformly doped heteroface 전지의 물리적 파라미터값(window, 에미터, 베이스 영역의 두께와 도핑 농도, 등)에 대한 최적 범위를 추출하고, 이를 토대로 새로운 구조의 field aided heteroface 전지를 설계하였다. MOCVD 기술로 제작된 field aided heteroface 전지는 낮은 직렬저항 [$R_s=0.94\Omega/\text{cm}^2$]과 높은 스펙트럼 반응[S. R. (ext.) $>90\%$; $7700\text{\AA} < \lambda < 8500\text{\AA}$] 특성을 보였으며 효율은 $56.2\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 자연광 아래 EFF. (tot.) (전체면적에 대한 효율) = 18.9%, EFF. (act.) (유효수광면적에 대한 효율) = 21.4%로 나타났다.

Abstract

The computer aided analysis is performed to investigate the influence of physical parameters (thickness and doping concentration, etc.) in the window, emitter, base on the efficiency characteristics of a uniformly doped heteroface cell.

A field aided heteroface cell is newly designed on a basis of optimum data obtained from the theoretical analysis. The field aided heteroface cell fabricated using MOCVD exhibits a total/active area conversion efficiency of $\text{EFF. (tot.)} = 18.9\%$ / $\text{EFF. (act.)} = 21.4\%$ under the natural incident light of $56.2\text{mW}/\text{cm}^2$, having a low series resistance of $R_s = 0.94\Omega/\text{cm}^2$ and a high spectral response of S. R. (ext.) $>90\%$ in a range of $7700\text{\AA} < \lambda < 8500\text{\AA}$.

I. 서 론

위성전원용(space application) 태양전지는 지상용(terrestrial application)의 Si 태양전지에 비해 제조가격에 의한 제한요소 보다는 높은 변환효율, 온도

안정성, 그리고 에너지 복사선에 대한 강한 저항성이 요구된다.

이러한 관점에서 위성전원용 태양전지는 보통 GaAs 기판을 사용하여 제작하며 대표적 GaAs related 태양전지로는 heteroface $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 전지를 들 수 있다.¹⁻³ heteroface $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 전지는 H. J. Hovel 등에⁴ 의해 연구되기 시작하였으며, 1970년대 이후 화합물 반도체의 공정과 MBE/MOCVD 기술의 발전에 따라 최근에는 20% 이상의 고효율

*正會員, **準會員, 檀國大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ.)

接受日字: 1991년 7월 11일

(※ 이 연구는 1991년도 교육부 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음.)

heteroface 전지가 발표·보고되고 있다. (heteroface $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 전지에서 지금까지 발표된 최대 변환효율은^[5], sun 상태 아래 21~22% (AMO) & 24~25% (AM1.5); Applied Solar Energy Corp., 1991.)

이에 비해 국내에서는 그동안 MBE/MOCVD의 보급률이 낮아 화합물 반도체 태양 전지의 개발이 거의 이루어지지 않았으며 MOCVD를 이용한 heteroface 전지의 국내 연구는 본 과제에서 처음으로 시도되고 있다.

이 연구는 “MOCVD를 이용한 화합물 반도체 Solar Cell의 개발”이란 과제로 미래 한국의 우주산업 시대에 대비한 고효율($\geq 20\%$) GaAs related 위성전원용 태양전지의 국산화 개발을 목적으로 하며, 1차년도에서 uniformly doped heteroface 전지의 이론을 세우고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 heteroface $p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n^+-GaAs$ 전지를 설계·제작하였다^[6] (EFF. _{act} = 17% under the ELH - 100mW/cm² illumination). 본 논문에서는 uniformly doped heteroface 전지의 물리적 파라미터 값(window, 에미터, 베이스 영역의 두께와 농도, 등)에 대한 최적 범위를 확장·추출하고 이를 토대로 새로운 구조의 field aided heteroface를 설계한다. 또한 적절히 설계된 field aided heteroface 전지를 MOCVD 방식으로 제작하고 56.2mW/cm²의 자연입사광 아래서 제작된 전지의 전기·광학적 특성을 분석한다.

II. Uniformly Doped Heteroface 전지의 물리적 파라미터와 효율 특성

표면에서 광생성된 캐리어의 재결합 손실을 방지하기 위해 전지의 에미터 위에 에너지갭이 큰 window 층을 얇게 부가한 것이 heteroface 태양전지이다.

Heteroface 전지를 $p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n^+-GaAs$ 구조로 나타낼 때 $Al_xGa_{1-x}As$ 와 GaAs의 재료적 특성에 의해 이종접합면에서 전도대 offset(ΔE_c)이 크고 격자정합이 잘 이루어져 대부분의 자연광이 큰 손실없이 GaAs 영역으로 전달되고 접합면에서 재결합속도가 현저히 줄어든다는 잇점이 있다. $Al_xGa_{1-x}As$ 는 Al의 함량비(x)에 따라 직접 에너지 갭과 간접 에너지 갭을 갖는 반도체로서 Al함량이 증가하면 에너지 갭이 커지고, 입사 광선의 투과율이 높아져 활성층에 도달하는 빛의 양이 보다 많아진다. 전지의 베이스는 고농도로 도우핑된 n^+-GaAs 를 기관으로 사용하여 $n-GaAs/n^+-GaAs$ 접합구조로 나타낸다. n^+-GaAs 기관의 사용은 전지의 직렬저항을 감소시키며 $n-GaAs/n^+-GaAs$ 접합에서 농도차로 형성된

내부전계는 $n-GaAs$ 영역내에서 생성된 소수캐리어에 대한 반사전위장벽을 형성한다^[7] 앞면 전극의 모양은 태양전지의 유효수광면적과 직렬저항을 고려하여 설계되며, 금속전극과 $p-Al_xGa_{1-x}As$ 간에는 고농도의 얇은 p^+-GaAs 층을 삽입하여 오염성 접촉을 좋게 만든다. 또한 입사되는 빛의 반사량을 줄이고 전지의 표면을 보호하기 위해 광반사 방지막(AR막)을 입혀줄 수 있다^[8]

이러한 관점으로 만들어지는 heteroface $p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n^+-GaAs$ 전지의 단면구조를 그림1에 나타내었다.

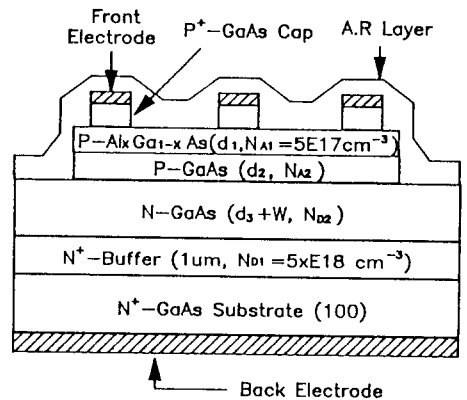


그림 1. Heteroface $p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n^+-GaAs$ 전지의 단면

Fig. 1. Cross section of a heteroface $p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n^+-GaAs$ cell.

Heteroface 전지(그림1의 구조)의 각 영역이 균일하게 도우핑된 경우, 소자의 물리적 파라미터 변화가 효율특성에 미치는 영향을 알아본다. 컴퓨터 해석에서 사용된 물리적 파라미터의 기호와 변화범위를 표1에 수록하였다. 표1에서 $p-Al_xGa_{1-x}As$ 의 도우핑농도(N_{A1}), n^+-GaAs 의 두께와 도우핑 농도(d_4, N_{D1})는 실험 여건을 고려하여 적절한 선택된 값들이며 W는 p-n 접합부의 공핍폭을 나타낸다. 1차년도 연구에서도 window와 에미터 영역의 물리적 파라미터가 효율에 미치는 영향을 조사한 바 있으나 본 연구에서는 베이스 영역에 이르기까지 확장하고 해석에 이용된 입력변수의 일부($F(\lambda), \alpha(\lambda), AR$ 막의 조건)를 다소 수정하여 계산하였다. (표2)^[9,10]

해석에 필요한 uniformly doped heteroface 전지의 이론은 1차년도 연구(참고문헌^[6])에서 수행되었으며 표1과 표2의 값을 이용한 시뮬레이션의 결과물

표 1. 전지의 각 영역에서 물리적 파라미터의 기호와 변화 범위

Table 1. Symbols and ranges of physical parameters in each cell region.

Cell Regions	Thickness	Doping Concentrations	Physical Parameter Ranges
Window (p-Al _x Ga _{1-x} As)	d ₁	N _{A1}	x=0.5, 0.7, 0.9 d ₁ =0~2000Å N _{A1} =5E17cm ⁻³
Emitter (p-GaAs)	d ₂	N _{A2}	d ₂ =0.1~2.0μm N _{A2} =1E16~1E19cm ⁻³
Base (n-GaAs)	d ₃ +W	N _{D2}	d ₃ =1~10μm N _{D2} =1E16~1E18cm ⁻³
Buffer & Substrate (n ⁺ -GaAs)	d ₄	N _{D1}	d ₄ =200μm N _{D1} =5E18cm ⁻³

표 2. 해석에 이용된 입력변수 (참고문헌 [6]의 입력 변수들로부터 수정된 사항만을 나타내었음)

Table 2. Input parameters used in the analysis. (Only the revised ones from input parameters of the reference[6] are listed).

Input Parameters	Values
Photon Flux under AMO Spectrum [F(λ)]	3.2E18 exp(-1.354hν)cm ⁻² s ⁻¹ ;hν > 2.5eV (5.08-1.6hν) × 10 ¹⁷ cm ⁻² s ⁻¹ ;1.37eV ≤ hν ≤ 2.5eV
Absorption Coefficient in GaAs[α(λ)]	5.4 × 10 ⁶ exp(-9.91/hν)cm ⁻¹ ;hν > 1.48eV 2 × 10 ⁴ √hν - 1.37cm ⁻¹ ;1.37eV ≤ hν ≤ 1.48eV
AR Layer	refractive index (n) = 2.05 thickness (d) = 800Å Si ₃ N ₄

그림2~그림6에 제시하였다.

그림2에서는 Al 함량(x)의 함수로써 p-Al_xGa_{1-x}As의 두께 변화(d₁)에 따른 전지의 상대 효율을 보였다. 이 그림으로부터 Al_xGa_{1-x}As 층이 간접 에너지 갭을 가질때 window 층의 최적 두께 범위는 100~600Å이고 Al함량비가 커질 수록 전지의 효율이 증가함을 알 수 있다. 전지의 상대효율은 dot 지점(d₁=0.06μm, x=0.9)에 대해 정규화 되었으며 에미터, 베이스 영역의 물리적 파라미터(d₂, d₃, N_{A2}, N_{D2})는 그림상의 내삽된 값을 사용하였다.

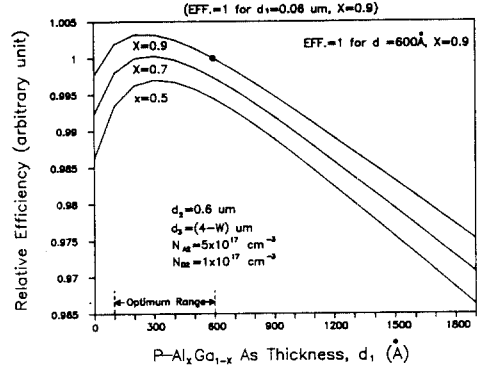


그림 2. Al 함량(x)의 함수로써 P-Al_xGa_{1-x}As 두께에 따른 상대효율

Fig. 2. Relative efficiency vs. p-Al_xGa_{1-x}As thickness for different Al mole fractions.

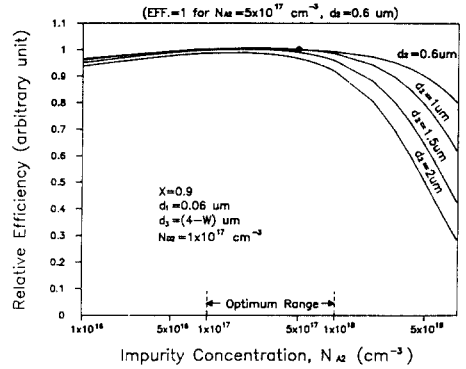


그림 3. p-GaAs 두께의 함수로써 p-GaAs 농도에 따른 상대효율

Fig. 3. Relative efficiency vs. p-GaAs concentration for different p-GaAs thicknesses.

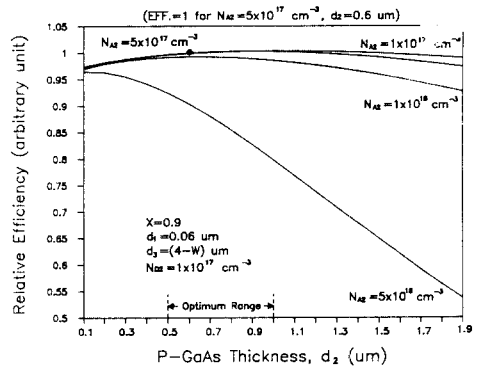


그림 4. p-GaAs 농도의 함수로써 p-GaAs 두께에 따른 상대효율

Fig. 4. Relative efficiency vs. p-GaAs thickness for different p-GaAs concentrations.

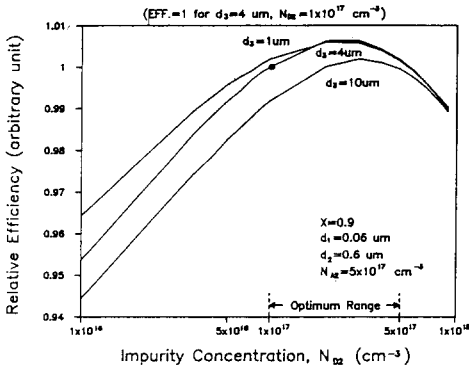


그림 5. n-GaAs 두께의 함수로써 n-GaAs 농도에 따른 상대효율

Fig. 5. Relative efficiency vs. n-GaAs concentration for different n-GaAs thicknesses.

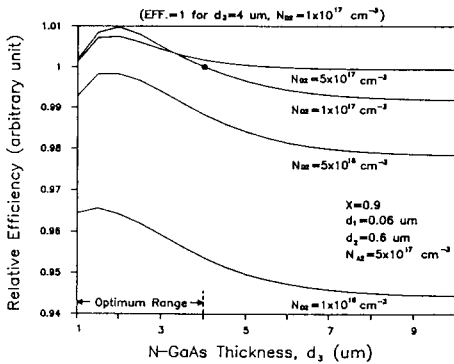


그림 6. n-GaAs 농도의 함수로써 n-GaAs 두께에 따른 상대효율

Fig. 6. Relative efficiency vs. n-GaAs thickness for different n-GaAs concentrations.

그림3과 그림4는 p-GaAs의 두께(d_2)와 농도(N_{A2}) 변화에 따른 상대효율특성을 나타낸 것이며 window와 베이스의 파라미터값(x, d_1, d_3, N_{D2})은 그림상의 내삽된 값을 사용하였다. 그림3은 p-GaAs 두께의 함수로써 p-GaAs 농도에 따른 상대효율을 $d_2=0.6\mu\text{m}$, $N_{A2}=5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 의 경우에 대해 정규화하여 나타내었다. 이 그림에서 p-GaAs 농도의 최적 범위는 $1\times 10^{17}\sim 1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 으로 나타나고 있다. 그림4는 p-GaAs 농도의 함수로써 p-GaAs 두께에 따른 상대효율을 보인것으로 p-GaAs 두께의 최적 범위는 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 가 됨을 보여주고 있다.

그림5와 그림6은 n-GaAs의 두께(d_3)와 농도(N_{D2}) 변화에 따른 상대효율 특성을 나타낸 것이며 window

와 에미터의 파라미터 값(x, d_1, d_2, N_{A2})은 그림상의 내삽된 값을 사용하였다. 그림5는 n-GaAs의 두께의 함수로써 n-GaAs 농도에 따른 상대효율을 $d_3=4\mu\text{m}$, $N_{D2}=1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 의 경우에 대해 정규화하여 나타내었다. 이 그림에서 n-GaAs 농도의 최적 범위는 $1\times 10^{17}\sim 5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 으로 나타나고 있다. 그림6은 n-GaAs 농도의 함수로써 n-GaAs 두께에 따른 상대효율을 보인 것으로 n-GaAs 두께의 최적범위는 $1\sim 4\mu\text{m}$ 가 됨을 보여주고 있다.

이상의 결과를 종합하면 p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 구조를 갖는 uniformly doped heteroface 전지는 window 층의 Al 함량비가 높고($x\geq 0.9$) 두께가 $100\sim 600\text{\AA}$ 일 때 에미터 영역의 두께와 농도가 각각 $0.5\sim 1\mu\text{m}$, $1\times 10^{17}\sim 1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 범위에서 베이스 영역의 두께와 농도는 각각 $1\sim 4\mu\text{m}$, $1\times 10^{17}\sim 5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 범위에서 전지의 최적구조가 실현된다고 볼 수 있다.

III. Field Aided Heteroface 전지의 설계

1. Field Aided Heteroface 전지

Uniformly doped heteroface 전지에서 광생성된 캐리어는 확산에 의해 에미터와 베이스 영역을 흐르게 된다. 그러나 에미터와 베이스 영역의 도우핑 분포를 경사형으로 만들어주면 전지의 내부에서 built-in 전계가 형성되어 캐리어의 흐름은 전계에 영향을 받게된다. 확산과 전계가 함께 캐리어의 흐름에 작용할 때 일차원 전류밀도식은

$$J_p = q(\mu_p p \epsilon - D_p \frac{dp}{dx}) \dots \dots \dots \text{정공 전류 밀도 (1a)}$$

$$J_n = q(\mu_n n \epsilon + D_n \frac{dn}{dx}) \dots \dots \dots \text{전자 전류 밀도 (1b)}$$

으로 표현할 수 있다. 또한 한 영역에서 도우핑 분포가 위치에 따라 변화될 때 그 영역의 built-in 전계는⁽¹¹⁾

$$\epsilon(x) = - \frac{V_T}{N_{D2}(x)} \frac{dN_{D2}(x)}{dx} \dots \dots \dots \text{n-GaAs 영역 (2a)}$$

$$= \frac{V_T}{N_{A2}(x)} \frac{dN_{A2}(x)}{dx} \dots \dots \dots \text{p-GaAs 영역 (2b)}$$

으로 주어진다.

식(1)에서 built-in 전계에 의한 전지전류의 증감은 전계의 방향에 따라 결정되며 전계방향은 식(2)로부터 불순물 분포의 경사 특성에 의존함을 알 수 있다.

따라서 전지의 에미터와 베이스 영역의 도우핑 분포를 경사형으로 적절히 잘 설계하면 uniformly doped heteroface 전지에 비해 built-in 전계에 의한 광생성 전류의 증가를 기대할 수 있다.

이와같이 heteroface 구조의 에미터와 베이스에 소수캐리어의 흐름에 대한 도움 전계를 제공한 전지를 field aided heteroface 전지라고 부른다. (이 명칭은 편의상 저자가 부여한 것임)

2. 설계 관점 및 사양

Field aided heteroface 전지는 1차년도 연구에서 수행한 uniformly doped heteroface 전지에 비해 구조적인 측면에서 다음의 두가지 근본적 차이를 갖는다.

(i) 앞면 전극의 오음성 접촉; uniformly doped heteroface 전지는 금속 전극과 window 사이 p⁺-GaAs cap 층을 삽입하여 오음성 접촉을 시도하였다. 이러한 구조는 직렬저항이 증가하게되며 결과적으로 전지의 효율특성이 나빠진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 field aided heteroface 전지에서는 Al_xGa_{1-x}As 층을 에칭하여 금속전극과 에미터간의 직접 접촉을 시도한다.

(ii) 에미터와 베이스 영역의 경사형 도우핑 분포; 전지의 에미터와 베이스 영역에 소수캐리어의 흐름에 대한 도움 전계를 제공하기 위해 에미터(p-GaAs) 영역의 도우핑 분포는 decreasing gradient로, 베이스(n-GaAs) 영역의 도우핑 분포는 increasing gradient로 만든다. 에미터와 베이스 영역의 농도변화 범위는 컴퓨터 해석을 통해 얻은 uniformly doped heteroface 전지의 최적값을 기준하여 한 order 차이가 나도록 설계한다.

기타 영역의 물리적 파라미터(window & buffer 층의 두께와 농도, Al함량비)는 uniformly doped heteroface 전지의 해석에서 얻어진 최적값을 이용하고 광반사 방지막은 표면 광반사 손실을 가능한 줄이기 위해 SiO₂/Si₃N₄의 이중층을 사용한다.

이러한 관점으로 설계된 field aided heteroface 전지의 사양을 표3에 수록하였으며 그림7에서는 단면 구조를 제시하였다. 또한 그림8과 그림9에서는 이 전지의 도우핑 분포와 열평형 상태에서의 에너지대 구조를 각각 보였다.

IV. 소자의 제작

표3과 같이 설계한 field aided heteroface 전지를 그림10의 공정 순서도에 따라 제작하였으며 소자 제작에 사용된 고정 마스크를 메사 마스크, 그리드 마

표 3. Field aided heteroface 전지의 설계 사양
Table 3. Designed specifications of the field aided heteroface cell.

Cell Regions	Physical Parameters	Estimated Optimum Ranges (Conventional Heteroface Cell)	Designed Specifications (Field Aided Heteroface Cell)	Unit
P-Al _x Ga _{1-x} As	Al mole fraction (x)	~0.9	0.9	—
	Doping Concentration (N _{A1})	5 × 10 ¹⁷	5 × 10 ¹⁷	cm ⁻³
	Thickness (d ₁)	100~600	600	Å
P-GaAs	Doping Concentration (N _{A2})	1 × 10 ¹⁷ ~1 × 10 ¹⁸	1 × 10 ¹⁸ →1 × 10 ¹⁷	Decreasing Gradient cm ⁻³
	Thickness (d ₂)	0.5~1.0	0.6	μm
N-GaAs	Doping Concentration (N _{B1})	1 × 10 ¹⁷ ~5 × 10 ¹⁷	5 × 10 ¹⁶ →5 × 10 ¹⁷	Increasing Gradient cm ⁻³
	Thickness (d ₃ + W)	1 ~ 4	4	μm
N ⁺ -Buffer	Doping Concentration	5 × 10 ¹⁸	5 × 10 ¹⁸	cm ⁻³
	Thickness	1	1	μm

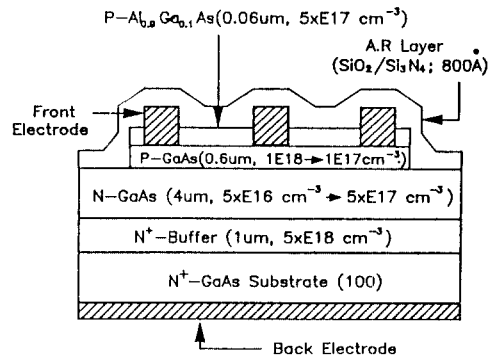


그림 7. 설계된 전지의 단면
Fig. 7. Cross section of the designed cell.

스크, 및 패드 마스크로 구분하였다. 메사 마스크는 한장의 웨이퍼에 수개의 전지를 집적 시킬때 소자간의 분리를 위해 사용되며, 패드 마스크는 AR 막으로 덮혀있는 금속전극으로부터 외부로 도선을 끌어내기 위한 것이다. 그리드 마스크는 앞면 전극의 형태를 결정해주며 이를 통해 전지의 전체 면적에 대한 유효수광면적의 비가 정해진다. 여기서 전지의 전체면적은 0.165cm²이고, 그리드 전극이 차지하는 면적(0.019cm²)을 제외한 유효수광면적은 0.146cm²으로 나

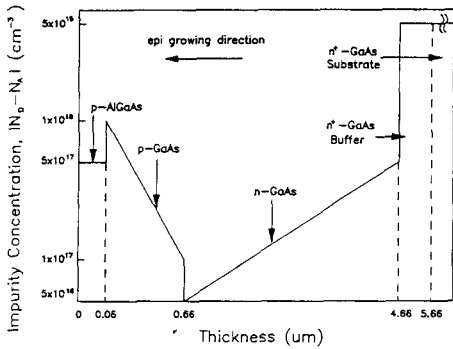


그림 8. 설계된 전지의 도우핑 분포
Fig. 8. Doping profile of the designed cell.

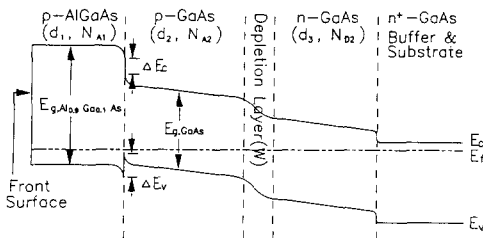


그림 9. Field aided heteroface 전지의 열적 평형상태에서 에너지대 구조
Fig. 9. Energy band diagram of the field aided heteroface cell under thermal equilibrium.

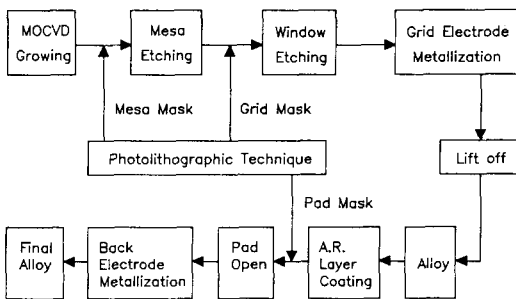


그림 10. 공정 순서도
Fig. 10. Process flow chart.

타난다.

자세한 공정 내용으로는 먼저 결정면이 (100)인 n⁺-GaAs 기판위에 MOCVD 방식으로 n⁺-GaAs buffer, n-GaAs, p-GaAs, 그리고 p-Al_xGa_{1-x}As의 에피층을 차례대로 형성하였다. MOCVD로 성장된 에피

층의 두께와 도우핑 분포는 표3의 설계사양과 같이 처리되었으며, n-type 도우판트로는 Si이, p-type 도우판트로는 Zn가 사용되었다. 이후, 메사 마스크를 사용하여 격리창구를 개방하고 H₂SO₄:H₂O₂:H₂O=1:8:80의 etchant로 표면으로부터 n-GaAs 영역에 이르기까지 메사에칭을 실시하였다. 다음으로 그리드 마스크를 사용하여 앞면 전극의 자리를 개방하고 NH₄OH:H₂O₂:H₂O=1:1:100의 etchant로 p-Al_xGa_{1-x}As window 층을 에칭하였다. 이후 Au/AuZn/Au의 금속을 진공증착하여 lift off 기술에 의해 그리드 전극을 형성하였으며 금속과 반도체간의 오염성 접촉을 좋게 하기위해 RTA 방식으로 T=500°C에서 80초간 alloy하였다. 다음으로 sputtering 방식에 의해 두께 400Å/400Å의 SiO₂/Si₃N₄ 막을 광반사방지막으로 형성하였으며 이후 패드 마스크를 사용하여 외부로 그리드 전극이 연결될 자리를 개방하였다. 마지막단계로 전지의 뒷면에 AuGe/Ni/Au를 진공증착하고 RTA 방식으로 T=370°C에서 90초간 최종 열처리를 하였다.

V. 측정 및 결과 분석

제작된 field aided heteroface 전지의 특성을 자연광 아래에서 측정하였으며 측정상태에서의 입사광전력은 56.2mW/cm²였다. 입사광전력은 Optoelectronics Co., Ltd의 SSW-3/6N (1/2) 전지 (60mW/cm²의 입사광 아래 규격상의 최대출력이 20.7mW인 Si 태양전지)를 기준하여 이 전지의 최대 출력 (19.4mW)을 측정하고 60mW/cm² × (19.4mW/20.7mW) = 56.2 mW/cm²로 계산하여 얻어졌다. 제작된 전지의 전류-전압 특성곡선을 56.2mW/cm²의 자연 입사광 아래에서 Tektronix 576curve tracer로 측정한 것이 그림11이며 빛을 차단한 상태에서 전지의 암전류-전압특성을 HP4145로 측정한 것이 그림12이다.

그림11의 전류-전압 특성곡선으로부터 전지의 개방전압 (V_{oc})은 0.7V, 그리고 단락전류 (I_{sc})는 3.2mA로 나타남을 직접 알 수 있고 충실도 (F.F)는 I-V 특성 곡선상에서 최대전력을 주는점 (P_{max}=1.76mW)을 찾아 P_{max}/I_{sc} × V_{oc}로 계산하여 0.78임을 알 수 있었다. 전지의 효율은,

$$FEF_{(act)} (\text{유효수광면적에 대한 효율}) = \frac{1.76mW}{0.146cm^2 \times 56.2mW/cm^2} = 21.4\%$$

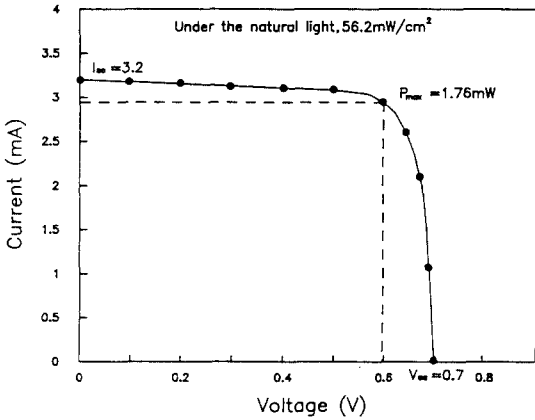


그림11. Field aided heteroface 전지의 전류-전압 특성(Tektronix 576)

Fig.11. The current-voltage characteristics of the field aided heteroface cell. (Tektronix 576)

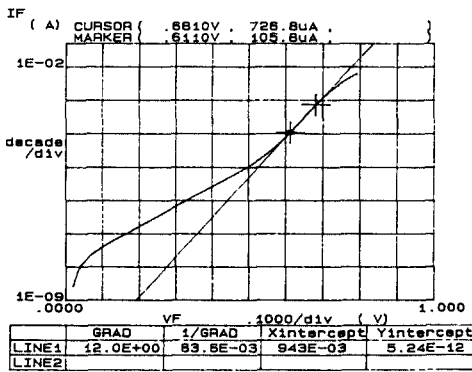


그림12. 순방향 암전류-전압 특성(HP 4145)

Fig.12. The forward dark current-voltage characteristics. (HP4145)

EFF. _{tot.} (전체면적에 대한 효율)

$$= \frac{1.76\text{mW}}{0.165\text{cm}^2 \times 56.2\text{mW/cm}^2} = 18.9\%$$

로 계산된다. 빛을 차단한 상태에서 전지의 암전류 특성은 순방향 전압이 nKT/q 보다 충분히 클때는 schockley 방정식으로부터 암전류-전압의 관계식이 $I_0 = I_0 \exp(qv/\eta KT)$ 로 표현된다. 따라서 그림12에서 두개의 (+)표를 잇는 직선이 전류축과 만나는 점의 좌표가 역포화전류의 크기가 된다. ($I_0 = 5.24\text{pA}$ from Y-intercept).

또한, 전지의 직렬저항 (R_s)는

$$R_s = 2 \left[\frac{V_{oc}}{I_{sc}} - \frac{A_p}{I_{sc}^2} - \frac{\eta kT}{q} \frac{1}{I_{sc}} \right] \quad (5)$$

로 계산되며⁽¹²⁾ 여기서 A_p 와 η 는 각각 동작 영역의 loop power와 ideality factor을 나타낸다. 전지의 ideality factor를 $V_{oc} = (\eta kT/q) \ln(I_{sc}/I_0)$ 의 관계식으로부터 구하면 $R_s = 0.94\Omega/\text{cm}^2$ 과 $\eta = 1.33$ 을 얻을 수 있다. 그림13에서는 $0.4\mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.0\mu\text{m}$ 의 파장영역에 걸쳐 m_c PHERSON 270장비로 측정된 전지의 external 스펙트럼 반응을 나타내었고 표면 광반사율 [$R(\lambda)$]을 이용하여 계산한 internal 스펙트럼 반응을 그림14에 제시하였다.

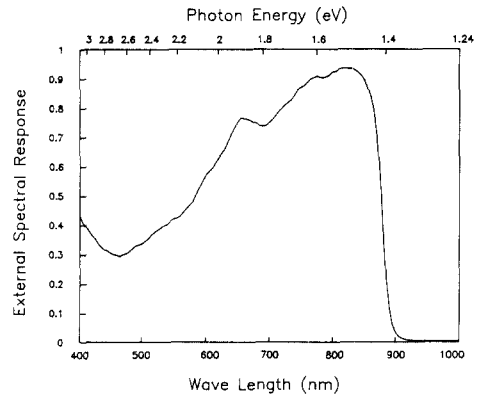


그림13. external 스펙트럼 반응 (m_c PHERSON 270)

Fig.13. External spectral response. (m_c PHERSON 270)

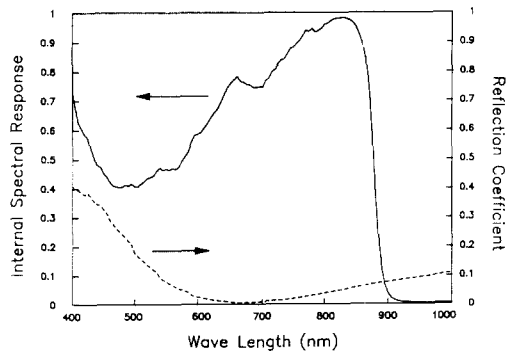


그림14. internal 스펙트럼 반응과 반사계수

Fig.14. Internal spectral response and reflection coefficient.

그림14에서 internal 스펙트럼 반응[S. R. _(int.)]은

$$S. R._{(int.)} = \frac{S. R._{(ext.)}}{1-R} \quad (3)$$

로 계산되며 여기서 R은 표면 광반사계수, S. R. _(ext.)는 external 스펙트럼 반응을 나타낸다. 또한 표면 광반사계수[R(λ)]는 다음의 식으로 구할 수 있다.^[13]

$$R(\lambda) = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1+r_3^2) \cos(2\theta_1) + 2r_2 r_3 (1+r_1^2) \cos(2\theta_2) + 2r_1 r_3 \cos(2(\theta_1 + \theta_2)) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos(2(\theta_1 - \theta_2))}{1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1+r_3^2) \cos(2\theta_1) + 2r_2 r_3 (1+r_1^2) \cos(2\theta_2) + 2r_1 r_3 \cos(2(\theta_1 + \theta_2)) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos(2(\theta_1 - \theta_2))} \quad (4)$$

여기서, $r_1 = (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1)$, $r_2 = (n_1 - n_2) / (r_1 + n_2)$
 $r_3 = (n_2 - n_3) / (n_2 + n_3)$
 $\theta_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$, $\theta_2 = 2\pi n_2 d_2 / \lambda$
 $n_0 = 1$, $n_1 = 2.05$, $n_2 = 1.46$, $n_3 = f(\lambda)$,
 $d_1 = 400\text{\AA}$, $d_2 = 400\text{\AA}$

의 관계를 갖는다.

표4에는 제작된 전지의 효율파라미터값을 요약하였다.

표 4. Field aided heteroface 전지의 효율 파라미터

Table 4. Efficiency parameters of the field heteroface cell.

(Under the natural incident light of 56.2 mW/cm²)

EFF. Parameters	Symbols	Values	Units
Reverse Saturation Current (Dark)	I ₀	5.24 × 10 ⁻¹²	A
Series Resistance	R _s	0.94	Ω/cm ²
Ideality Factor	η	1.33	-
Open Circuit Voltage	V _{oc}	0.7	V
Short Circuit Current	I _{sc}	3.2	mA
Fill Factor	F·F	78	%
Max. Output Power	P _{max}	1.76	mW
Efficiency (Active Area)	EFF. (act.)	21.4	%
Efficiency (Total Area)	EFF. (tot.)	18.9	%

본 연구에서 얻어진 field aided heteroface 전지는 넓은 파장영역에 걸쳐 낮은 광반사손실(R(λ) < 2%; 6100Å < λ < 7500Å)과 높은 스펙트럼반응 특성(S. R. _(ext.) > 90%; 7700Å < λ < 8500Å)을 나타내며 EFF. _(act.) = 21.4%의 높은 변환 효율을 갖는다. EFF. _(act.) =

21.4%의 효율은 현재 보고되는 세계적 수준의 값에 이르고 있으며 이러한 결과는 field aided heteroface 전지가 다음의 과정

(i) 그리드 전극과 에미터간의 직접접촉 - 직렬저항의 감소

(ii) 에미터/베이스 영역에 경사형 불순물 분포 - 소수캐리어 흐름에 대한 도움 전계를 제공

(iii) 전지의 각 영역에서 물리적 파라미터에 대한 최적 설계

(iv) AR 막(SiO₂/Si₃N₄ - double layer)효과적 처리 - external 스펙트럼 반응의 증가와 표면 광반사손실을 최소화 줄임

(v) MOCVD 공정기술 - 전지의 각 영역에 대한 도우핑분포와 두께를 설계된 값으로 정밀히 실현 - 을 통해 실현되었기 때문이다.

VI. 결 론

위성전원용 고효율 GaAs related 태양전지를 개발하기 위해 새로운 구조의 field aided heteroface 전지를 제작하였다. Field aided heteroface 전지는 uniformly doped heteroface 전지의 물리적 파라미터값에 대한 최적 범위를 기준하여 전지의 에미터와 베이스 영역에 소수캐리어의 흐름에 대한 도움 전계를 제공하고 직렬저항을 최소화 줄일 수 있는 구조적 방안을 모색하여 설계되었다.

컴퓨터 시뮬레이션의 결과, uniformly doped heteroface 전지는 window 층의 Al 함량비가 높고 두께가 100~600Å일 때, 에미터 영역의 두께와 농도가 각각 0.5~1μm, 1 × 10¹⁷~1 × 10¹⁸cm⁻³일때, 그리고 베이스 영역의 두께와 농도가 각각 1~4μm, 1 × 10¹⁷~5 × 10¹⁷cm⁻³일때 최적구조가 실현되는 것으로 나타났다. 표 3의 설계 사양을 갖는 field aided heteroface 전지를 MOCVD로 제작한 결과 넓은 파장영역에 걸쳐 높은 스펙트럼 반응특성(S. R. _(ext.) > 90%; 7700Å < λ < 8500Å)을 보였으며 56.2mW/cm²의 자연 입사광아래 전지의 개방전압은 0.7V, 단락전류는 3.2mA, 충실도는 78%로, 그리고 효율특성은 EFF. _(tot.) = 18.9%, EFF. _(act.) = 21.4%로 나타났다. 본 연구에서 얻어진 EFF. _(act.) = 21.4%의 효율은 현재 보고되는 세계적 수준의 값에 이르고 있으며 이러한 고효율특성은 field aided heteroface 전지의 구조적 개선을 통해 이루어 진다고 볼 수 있다.

參 考 文 獻

[1] James A. Hutchby and Richard L. Fudurch, "Theoretical analysis of Al_{1-x}As-GaAs

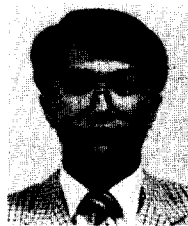
- graded bandgap solar cell," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 7, pp. 3140-3151, July 1976.
- [2] R.R. Saxena, et al., "High-efficiency AlGaAs/GaAs concentrator solar cells by organometallic vapor phase epitaxy," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 8, pp. 4501-4503, Aug. 1980.
- [3] G.F. Virshup, C.W. Ford, and J.G. Werthen, "A 19% efficient AlGaAs solar cell with graded band gap," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 47, no. 12, pp. 1319-1321, Dec. 1985.
- [4] H.J. Hovel and J.M. Woodall, "Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs P-P-N heterojunction solar cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 120, no. 9, pp. 1246-1252, Sept. 1973.
- [5] P.A. Iles, Yea-Chuan M. Yeh, F.H. Ho, Chaw-Long Chu, C. Cheng, "High efficiency (> 20% AMO) GaAs solar cells grown on inactive-Ge substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 140-142, April 1990.
- [6] G.K. Chang and S.K. Lim, "Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs solar cell grown by MOCVD," *J. of the Korean Institute of Telematics and Electronics*, vol. 28-A, no. 1, pp. 30-39, Jan. 1991.
- [7] S.R. Dhariwal, "Theory of back surface field silicon solar cells," *Solid State Electronics*, vol. 24, no. 12, pp. 1161-1165, 1981.
- [8] P.A. Iles, "Antireflection coatings for solar cells," *J Vac. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 1100-1105, Sept./Oct. 1977.
- [9] Hideyuki Takakura, *Optimum design of heteroface solar cells*, Oskaa Univ., Faculty of Eng. Sci., Toyonaka, Osaka, Sept. 1979.
- [10] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Willey and Sons, Inc., 1981.
- [11] W.M. Bullis and W.R. Runyan, "Influence of mobility and lifetime variation on drift-field effects in silicon-junction devices," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-14, no. 2, pp. 75-81, Feb. 1967.
- [12] Gerardo L. Araujo, et al., "A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-29, no. 10, pp. 1511-1513, Oct. 1982.
- [13] H.J. Hovel, *Solar Cells, vol. 11 of Semiconductors and Semimetals*, Academic Press, New York, 1975.

 著者紹介

張志根 (正會員) 第28卷 A編 第1號 参照
 현재 단국대학교 공학대학
 전자공학과 부교수



林聖奎 (正會員) 第27卷 第1號 参照
 현재 단국대학교 공학대학
 전자공학과 부교수



嚴于鎔 (準會員)
 1967年 9月 18日生. 1990年 2月
 단국대학교 전자공학과 졸업.
 1990年 3月~현재 단국대학교
 대학원 전자공학과 석사과정. 주
 관심분야는 화합물 반도체 소자
 의 개발과 응용 등임.