

MOCVD를 이용한 Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/ n⁺-GaAs 태양전지의 개발

(Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs Solar Cell Grown by MOCVD)

張志根*, 林聖奎*

(Gee Keun Chang and Sung Kyoo Lim)

要 約

Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 태양전지를 해석하고 전지의 window와 에미터 영역의 물리적 파라미터(Al 함량비, 농도, 두께)가 효율 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과는 Heteroface 전지에서 window의 두께가(400~1000)Å이고, 에미터영역의 도핑 농도와 두께가 각각(1~7)×10¹⁷cm⁻³, (0.5~0.8)μm 범위일 때 최대효율 특성을 나타내었으며 간접 에너지갭을 갖는 window 영역에서(0.41 < x < 1.0) Al 함량비가 증가할수록 효율이 높게 나타났다.

MOCVD장치를 이용하여, 적절히 설계된 0.165cm² 면적의 Heteroface 전지를 제작한 결과, ELH-100mW/cm²의 입사광 전력아래 유효수광면적에 대한 효율이 17%로 나타났으며 이때의 단락전류밀도(J_{sc})는 21.2mA/cm², 개방전압(V_{oc})은 0.94V 충실도(F·F)는 0.75이었다.

Abstract

The influence of physical parameters (Al mole fraction, thickness, doping concentration) in the window and emitter on the efficiency characteristics of heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs solar cell is investigated.

The maximum efficiency theoretically calculated in this device is obtained when a thickness of the window is in a range of (400-1000) Å and a thickness/doping concentration of the emitter is in a range of (0.5-0.8)μm/(1-7)×10¹⁷cm⁻³, respectively.

Also is the efficiency improved according to the increase of Al mole fraction in the indirect gap window (0.41 < x < 1.0).

The optimum designed heteroface cell with an area of 0.165cm² fabricated using MOCVD exhibits an active area conversion efficiency of 17%, having a short circuit current density of 21.2mA/cm², an open circuit voltage of 0.94V, and a fill factor of 0.75 under ELH-100mW/cm² illumination.

*正會員, 檀國大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ.)

接受日字: 1990年 8月 2日

(※ 본 연구는 1989년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.)

I. 서 론

단위 전력당 제조가격이 일차적 문제가 되는 지상 응용(terrestrial application)의 태양전지에 비해 위

성 전원용 태양전지는 가격에 의한 제한요소 보다는 i) 높은 변환 효율 특성, ii) 고온 동작 특성, iii) 에너지 복사선에 대한 강한 저항성이 요구된다. 이러한 관점에서 space application용의 태양전지는 Si 보다 GaAs로 제작하는 것이 바람직하다고 알려져 있다.

그러나 1970년대 전반까지 GaAs 태양전지에 대한 연구는 중요한 관심의 대상이 되지 못하였으며 이에 대한 발전도 거의 이루어지지 않았다. (1973년에 발표된 자료¹⁾에 의하면 1Sun, AM1 상태에서 $\eta_{\max, \text{GaAs}} = 13\%$, $\eta_{\max, \text{Si}} = 15\%$.) 그 주된 원인으로는 제조가격의 상승과 함께 화합물반도체 공정기술이 발전하지 못해, GaAs 전지의 이론적효율(24%)이 Si 전지의 이론적효율(21%)보다 높음에도 불구하고 실제적 효율은 개선되지 않았기 때문이다. 1970년대 중반이후 MOCVD/MBE 기술의 발전은 GaAs-based 태양전지에 대한 연구를 새로운 차원으로 끌어 올렸으며 미·일등에서 이 기술을 이용하여 여러가지 형태의 화합물 반도체 태양전지를 제작, 발표하였다. 화합물 반도체 태양전지를 MOCVD/MBE 기술로 제작할때 종래의 LPE 방식에서보다 이중접합의 interface 상태, 에피층의 결합상태를 개선할 수 있고 에피층의 두께와 불순물 분포도 더욱 정밀히 조절할 수 있다.

오늘날 관심을 갖고 연구되는 GaAs-based 태양전지의 대표적 구조로는 Heteroface 전지²⁾와 Multijunction cascade 전지³⁾를 들 수 있다. Al_xGa_{1-x}As/GaAs heteroface 전지에서 지금까지 발표된 최대변환효율은⁴⁾ 1Sun 상태에서 21~22% (under AM0), 24~25% (under AM1.5) 이나 전지의 최적 설계가 계속 연구되고 공정여건이 좋아지면 효율은 더욱 높아지게 될 것이다. 국내에서는 그동안 MOCVD/MBE의 보급율이 낮아 화합물 반도체 태양전지의 개발이 거의 이루어지지 않았으며 MOCVD를 이용한 GaAs-based heteroface 전지의 연구는 아직까지 발표된 바가 없다.

이 논문에서는 heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지의 이론을 세우고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 전지의 window와 에미터영역의 물리적 파라미터(p-Al_xGa_{1-x}As 층의 Al 함량비와 두께, p-GaAs 층의 도우핑 농도와 두께)가 효율 특성에 미치는 영향을 조사한다.

또한, 적절히 설계된 heteroface 전지를 MOCVD 방식으로 제작하고 ELH-100mW/cm² 의 인공조명 아래 제작된 전지의 전기, 광학적 특성을 분석한다.

II. Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지

1. 전지의 구조

GaAs-based heteroface 전지는 GaAs 전지의 기본구조에서 전지의 표면을 Al_xGa_{1-x}As/GaAs의 이중구조로 나타낸 고효율 위성전원용 태양전지이다.

Al_xGa_{1-x}As와 GaAs의 재료적 특성에 의해⁵⁾ 전지의 표면을 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 이중 구조로 나타내면 Al_xGa_{1-x}As와 GaAs 사이 이중접합면에서 전도대 offset (ΔE_c)이 크고 격자 정합이 잘 이루어져 대부분의 자연광이 큰 손실없이 GaAs 영역으로 전달되고 접합면에서 재결합속도가 현저히 줄어든다는 잇점이 있다.

Al_xGa_{1-x}As는 Al의 함량비(X)에 따라 직접 에너지 갭과 간접 에너지 갭을 갖는 반도체로써 X가 증가하면 에너지 갭이 커지고, 입사 광선의 투과율이 높아져 환성층에 도달하는 빛의 양이 보다 많아진다. 전자의 베이스는 고농도로 도우핑된 n⁺-GaAs를 기관으로 사용하여 n-GaAs/n⁺-GaAs 접합구조로 나타낸다. n⁺-GaAs 기관의 사용은 전지의 직렬 저항을 감소시키며 n-GaAs/n⁺-GaAs 접합에서 농도차로 형성된 내부전계는 n-GaAs 영역내에서 생성된 소수캐리어에 대한 반사전위장벽을 형성한다.⁶⁾ 그리드 전극의 모양은 태양전지의 유효수평면적과 직렬저항을 고려하여 설계되며, 그리드 금속과 p-Al_xGa_{1-x}As 간에는 고농도의 '얇은 p⁺-GaAs 층을 삽입하여 오음성 접촉을 좋게 만든다. 또한 입사되는 빛의 반사량을 줄이고 전지의 표면을 보호하기 위해 광반사 방지막(A. R막)을 입혀줄 수 있다.⁷⁾

이러한 관점으로 만들어지는 heteroface p-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지의 단면구조와 에너지 밴드 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

2. 해석적 모델

그림 1에 주어진 heteroface 전지의 광생성전류밀도(J_{ph})를 계산하기위해 전지의 각 영역에서 물리적 상수들의 기호를 표 1과 같이 정의한다.

파장 λ 의 광속 F(λ)가 전지표면에 입사될 때, 표면 광반사율을 R이라 하면 표면으로 부터 p-Al_xGa_{1-x}As층내의 거리 X인 곳에서 전자-정공쌍의 생성율 G_1 은

$$G_1(\lambda, x) = \beta(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot [1 - R(\lambda)] \cdot \exp[-\beta(\lambda)x] \quad (1)$$

이고, GaAs 층에서의 전자-정공쌍의 생성율 G_2 는

$$G_2(\lambda, x) = F(\lambda) \cdot [1 - R(\lambda)] \cdot \exp[-\beta(\lambda)d_1] \alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)(x-d_1)] \quad (2)$$

이다.

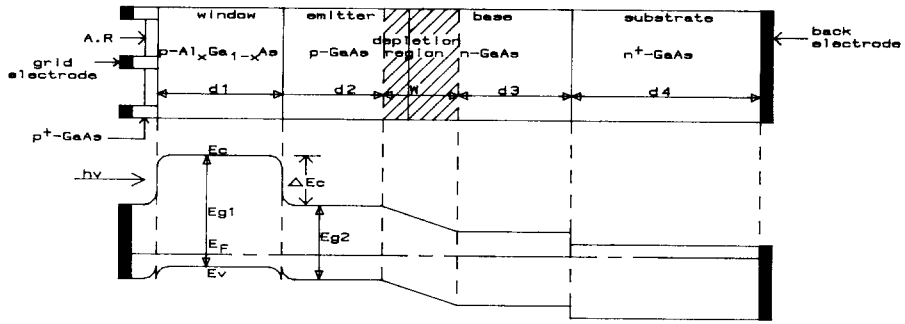


그림 1. Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지의 단면구조와 에너지밴드 다이어그램

Fig. 1. The cross section and energy band diagram of heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs cell.

표 1. 전지의 각 영역에서 물리적 상수들의 기호
Table 1. Symbols of physical constants in each cell region.

전지 영역	광흡수 계수	각영역의 두께	소수 캐리어 확산길이	소수 캐리어 확산계수	도우핑 농도	열평형상태의 소수 캐리어농도
p-Al _x Ga _{1-x} As	β	d_1	L_{n1}	D_{n1}	N_{A1}	n_{p0}
p-GaAs	α	d_2	L_{n2}	D_{n2}	N_{A2}	n_{p0}'
n-GaAs	α	d_3	L_{p2}	D_{p2}	N_{D2}	p_{n0}'
n ⁺ -GaAs	α	d_4	L_{p1}	D_{p1}	N_{D1}	p_{n0}

일차원 정상상태에서 소수캐리어들에 대한 연속방정식과 전류밀도 방정식으로 부터, 각 영역의 불순물 농도를 균일하게하고 공평영역의 밖에서 전계성분을 무시하면, p-Al_xGa_{1-x}As 층에서 전자의 연속방정식은

$$D_{n1} \frac{d^2 n_{p1}(x)}{dx^2} - \frac{n_{p1}(x) - n_{p0}}{\tau_{n1}} + \beta F(1-R) e^{-\beta x} = 0 \quad (3)$$

으로 나타난다.

Al_xGa_{1-x}As 층에서 광생성에 의한 소수캐리어 분포 [n_{p1}(x)]의 경계조건;

$$D_{n1} \frac{d[n_{p1}(x) - n_{p0}]}{dx} = S_{n1}[n_{p1}(x) - n_{p0}], \quad x=0 \quad (4a)$$

$$n_{p1}(x) - n_{p0} = 0, \quad x=d_1 \quad (4b)$$

으로 부터 식(3)의 해[n_{p1}(x)]를 구하여 x=d₁에서 광생성전자전류밀도[J_{n1}(λ)]를 계산하면

$$J_{n1}(\lambda) = q D_{n1} \left. \frac{dn_{p1}}{dx} \right|_{x=d_1} = \frac{q \cdot \beta \cdot F(1-R)L_{n1}}{\beta^2 \cdot L_{n1}^2 - 1}$$

$$\times \left[\frac{e^{-\beta d_1} \left[\frac{S_{n1}L_{n1}}{D_{n1}} \cosh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] + \sinh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] \right]}{\frac{S_{n1}L_{n1}}{D_{n1}} \sinh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] + \cosh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right]} - \frac{\left[\frac{S_{n1}L_{n1}}{D_{n1}} + \beta L_{n1} \right]}{\frac{S_{n1}L_{n1}}{D_{n1}} \sinh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] + \cosh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right]} + \beta L_{n1} e^{-\beta d_1} \right] \quad (5)$$

으로 주어진다.

또한 p-GaAs 층에서 광생성된 소수캐리어의 연속방정식은

$$D_{n2} \frac{d^2 n_{p2}(x)}{dx^2} - \frac{n_{p2}(x) - n_{p0}'}{\tau_{n2}} + \alpha F(1-R) e^{-\beta d_1} e^{-\alpha(x-d_1)} = 0 \quad (6)$$

으로 나타나고 n_{p2}(x)에 대한 경계조건은, p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs 계면에서 재결합 속도를 S_{n2}라고 할때,

$$D_{n2} \frac{d[n_{p2}(x) - n_{p0}']}{dx} = S_{n2}[n_{p2}(x) - n_{p0}'] + \frac{J_{n1}}{q}, \quad x=d_1 \quad (7a)$$

$$n_{p2}(x) - n_{p0}' = 0, \quad x=d_1 + d_2 \quad (7b)$$

이 된다.

식(7)의 경계조건으로 부터 식(6)의 해[n_{p2}(x)]를 구하고 x=d₁+d₂에서 광생성 전자전류밀도[J_{n2}(λ)]를 계산하면 다음과 같다.

$$J_{n2}(\lambda) = qD_{n2} \left. \frac{dn_{p2}}{dx} \right|_{x=d_1+d_2} = \frac{q \cdot \alpha \cdot F(1-R) \cdot e^{-\beta d_1} L_{n2}}{\alpha^2 \cdot L_{n2}^2 - 1}$$

$$\times \left[\frac{e^{-\alpha d_2} \left[\frac{S_{n2} L_{n2}}{D_{n2}} \cosh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right] + \sinh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right] \right]}{\frac{S_{n2} L_{n2}}{D_{n2}} \sinh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right]} \right]$$

$$- \left[\frac{[\alpha L_{n2} + \frac{S_{n2} L_{n2}}{D_{n2}}]}{\frac{S_{n2} L_{n2}}{D_{n2}} \sinh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right]} + \alpha L_{n2} e^{-\alpha d_2} \right]$$

$$+ \frac{J_{n1}}{\frac{S_{n2} L_{n2}}{D_{n2}} \sinh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_2}{L_{n2}} \right]} \quad (8)$$

빛이 조사된 상태에서의 재결합속도 S_{n2} ^[8]는

$$S_{n2} = \frac{N_{A2}}{N_{A1}} \frac{D_{n1}}{L_{n1}} \exp \left[\frac{-\Delta E}{kT} \right] \left[\frac{\sinh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] + \frac{S_{n1} L_{n1}}{D_{n1}} \cosh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right]}{\cosh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right] + \frac{S_{n1} L_{n1}}{D_{n1}} \sinh \left[\frac{d_1}{L_{n1}} \right]} \right] \quad (9)$$

으로 주어지며 여기서, ΔE 는 p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs 계면에서 소수캐리어의 반사장벽에 대한 유효높이를 나타낸다.

같은 방법으로 n⁺GaAs 영역에서 경계조건;

$$D_{p1} \frac{d[p_{n1}(x) - p_{n0}]}{dx} = -S_{p1}[p_{n1}(x) - p_{n0}], \quad x=d_1+d_2+W+d_3+d_4 \quad (10a)$$

$$p_{n1}(x) - p_{n0} = 0, \quad x=d_1+d_2+W+d_3 \quad (10b)$$

를 이용하고, n⁺-GaAs 영역의 두께(d_4)와 뒷면 재결합속도(S_{p1})를 충분히 크다고 가정하면 $x=d_1+d_2+W+d_3$ 에서 광생성정공밀도 [$J_{p1}(\lambda)$]를 구할 수 있다.

$$J_{p1}(\lambda) = -qD_{p1} \left. \frac{dp_{n1}}{dx} \right|_{x=d_1+d_2+W+d_3}$$

$$= \frac{qF(1-R)e^{-\beta d_1} \alpha L_{p1}}{\alpha^2 L_{p1}^2 - 1} e^{-\alpha(d_2+W+d_3)}$$

$$\times \left[\coth \left[\frac{d_4}{L_{p1}} \right] - \frac{e^{-\alpha d_4}}{\sinh \left[\frac{d_4}{L_{p1}} \right]} - \alpha L_{p1} \right] \quad (11)$$

또한, n-GaAs 영역에서 빛에 의해 생성된 정공들에 대한 경계조건은, n-GaAs/n⁺-GaAs 계면에서 재결합속도를 S_{p2} 라고 하면,

$$D_{p2} \frac{d[p_{n2}(x) - p_{n0}']}{dx} = -S_{p2}[p_{n2}(x) - p_{n0}'] - \frac{J_{p1}}{q}, \quad x=d_1+d_2+W+d_3 \quad (12a)$$

$$p_{n2}(x) - p_{n0}' = 0, \quad x=d_1+d_2+W \quad (12b)$$

으로 주어지고, $x=d_1+d_2+W$ 에서 정공전류밀도 [$J_{p2}(\lambda)$]는

$$J_{p2}(\lambda) = -qD_{p2} \left. \frac{dp_{n2}}{dx} \right|_{x=d_1+d_2+W} = \frac{q \cdot F(1-R)e^{-\beta d_1} \alpha L_{p2}}{\alpha^2 \cdot L_{p2}^2 - 1} e^{-\alpha(d_2+W)}$$

$$\times \left[\frac{\frac{S_{p2} L_{p2}}{D_{p2}} \cosh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right] + \sinh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right]}{\frac{S_{p2} L_{p2}}{D_{p2}} \sinh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right]} \right]$$

$$+ \left[\frac{[\alpha L_{p2} - \frac{S_{p2} L_{p2}}{D_{p2}}] e^{-\alpha d_3}}{\frac{S_{p2} L_{p2}}{D_{p2}} \sinh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right]} - \alpha L_{p2} \right]$$

$$+ \frac{J_{p1}}{\frac{S_{p2} L_{p2}}{D_{p2}} \sinh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right] + \cosh \left[\frac{d_3}{L_{p2}} \right]} \quad (13)$$

으로 나타난다.

여기서, 재결합속도 S_{p2} 는 다음의 관계식을 갖는다.

$$S_{p2} = \frac{N_{D2}}{N_{D1}} \frac{D_{p1}}{L_{p1}} \coth \left[\frac{d_4}{L_{p1}} \right] \quad (14)$$

또한 공핍영역(W)내에서도 빛에 의해 약간의 전류가 생성되며, 이 영역에서의 전계는 일반적으로 높아서, 광생성된 캐리어들은 재결합하기전에 공핍영역 밖으로 드리프트 된다. 공핍영역에서의 광생성 전류는 흡수된 광자들의 수와 같다고 볼 수 있으므로 이 영역에서 발생하는 광생성전류밀도 [$J_w(\lambda)$]는

$$J_w(\lambda) = qF(1-R)e^{-\beta d_1} (1 - e^{-\alpha W}) e^{-\alpha d_2} \quad (15)$$

이 된다.

따라서 입사광 $F(\lambda)$ 에 대한 전체광생성 전류밀도 [$J_{ph}(\lambda)$]와 스펙트럼 반응 [$SR(\lambda)$]는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{ph}(\lambda) = J_{n2}(\lambda) + J_w(\lambda) + J_{p2}(\lambda) \quad (16)$$

$$SR(\lambda) = \frac{J_{n2}(\lambda) + J_w(\lambda) + J_{p2}(\lambda)}{qF(\lambda) [1-R(\lambda)]} \quad (17)$$

식 (17)의 스펙트럼반응이 각 입사파장에 대해 구해지면 전체 태양 스펙트럼 분포로부터 얻어지는 총 광생성전류밀도는

$$J_{ph} = q \int_0^\infty F(\lambda) \cdot SR(\lambda) \cdot [1-R(\lambda)] d\lambda \quad (18)$$

와 같이 계산된다.

전지의 전류-전압특성은 유효수광면적을 A_{act} 전 계면적면적을 A_{tot} 라 할때 태양전지의 일반 등가회로로부터 병렬누설전류성분을 무시하면

$$I = A_{act} J_{ph} - A_{tot} J_0 \left[\exp\left(\frac{q(R_s I + V)}{KT}\right) - 1 \right] \quad (19)$$

으로 표현된다. 여기서 J_0 ⁶⁾와 R_s 는 각각 전지의 역포화 암전류밀도와 직렬저항이고 K , T 는 Boltzmann 상수와 절대온도를 나타낸다.

전지의 효율(η)은 전압-전류의 특성곡선으로 부터 얻어지는 $|IV|_{max}$ 를 단위면적당 입사광전력(P_{in})과 전지면적(A)의 곱으로 나누어 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{|IV|_{max}}{P_{in} \cdot A} = \frac{F \cdot F \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in} \cdot A} \quad (20)$$

여기서 F , F , I_{sc} , V_{oc} 는 각각 전지의 충실도(fill factor)⁹⁾와 단락전류 및 개방전압이다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

Computer Aided Analysis에 의해 앞서 논의된 식들로부터 heteroface 전지의 window와 에미터영역의 물리적 파라미터가 효율 특성에 미치는 영향을 알아본다.

컴퓨터 시뮬레이션에서 $Al_xGa_{1-x}As$ 층의 Al 함량비와 두께의 범위를 각각 $(10^{16} \sim 10^{19})cm^{-3}$, $(0 \sim 4.0)\mu m$ 로 설정하였으며, 해석에 이용된 입력 변수들의 값을 표 2에 수록하였다.

표 2. 해석에 이용된 각 입력 변수들의 값
Table 2. Input parameters used in the analysis.

$F(\lambda)$; AMO Spectrum
$R^{[6]}$; A, R막($1000 \text{ \AA} - Si_3N_4$)
$L_{n2}^{[10]} = 8 \times 10^{-4} / (1 + 8 \times 10^{-19} N_{a2}) \text{ cm}$
$L_{n1}^{[12]} = 0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$
$L_{p2}^{[10]} = 3 \times 10^{-4} / (1 + 1.2 \times 10^{-18} N_{d2}) \text{ cm}$
$L_{p1}^{[10]} = 3 \times 10^{-4} / (1 + 1.2 \times 10^{-18} N_{d1}) \text{ cm}$
$D_{p2}^{[10]} = (380 / (1 + 3.17 \times 10^{-17} N_{d2}^{0.266})) \times 0.0259 \text{ cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$
$D_{n2}^{[10]} = (7000 / (1 + 5.51 \times 10^{-17} N_{a2}^{0.233})) \times 0.0259 \text{ cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$
$D_{p1}^{[10]} = (380 / (1 + 3.17 \times 10^{-17} N_{d1}^{0.266})) \times 0.0259 \text{ cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$
$D_{n1}^{[10]} = 2.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{S}^{-1}$
$S_{n1}^{[10]} = 10^6 \text{ cm} \cdot \text{S}^{-1}$
$E_{gGaAs}^{[11]} = 1.43 \text{ eV}$
$E_{gAlGaAs}^{[11]} = 1.92 + 0.17x + 0.07x^2; 0.41 \leq x \leq 1.0$
$\alpha^{[13]} = 5.4 \times 10^4 \sqrt{h\nu - 1.43} \text{ cm}^{-1}; h\nu \geq E_{gGaAs}$
$\beta^{[13]} = 2 \times 10^4 \sqrt{h\nu - E_{gAlGaAs}} \text{ cm}^{-1}; h\nu \geq E_{gAlGaAs}$
Active area/Total area = 90%
R_s (직렬저항) = 0
AlGaAs층의 농도 (N_{a1}) = $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
n-GaAs층의 농도 (N_{d2})와 두께 = $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $5 \mu m - W$
n-GaAs층의 농도 (N_{d1}) = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $200 \mu m$

표 2에서 에너지($h\nu$, E_g)와 농도(N_a , N_d)는 각각 [eV]와 [cm^{-3}]을 단위로 하여 나타낸 값이다.

입력 변수에서 n-GaAs/n⁺-GaAs 층의 농도와 두께, $Al_xGa_{1-x}As$ 층의 농도는 관련 논문들을 참고하여 적절히 선택된 값들이다. 전지의 직렬저항(R_s)은 실제로 0이 아니지만 $R_s=0$ 로 두어도 효율값에는 변화를 주지만 heteroface 구조에서 window와 에미터 영역의 최적 파라미터를 구하는 데에는 별다른 차이가 발생하지 않는다. 따라서 편의상 $R_s=0$ 로 두고 시뮬레이션한 결과를 그림 2~그림 6에 제시하였다.

그림 2는 Al함량비의 함수로써 p- $Al_xGa_{1-x}As$ 의 두께에 따른 효율특성을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 $Al_xGa_{1-x}As$ 층이 간접에너지갭을 가질때 ($400 \sim 1000$) \AA 정도의 window 두께에서 최대 효율 특성을

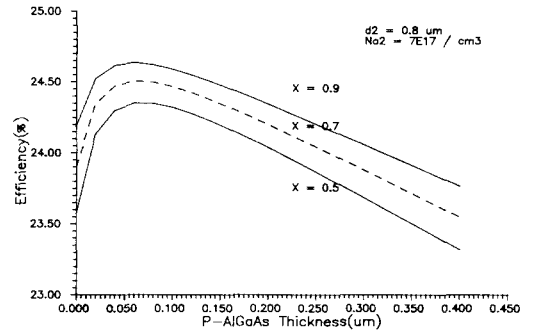


그림 2. Al 함량비의 함수로써 p- $Al_xGa_{1-x}As$ 두께에 따른 변환효율

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

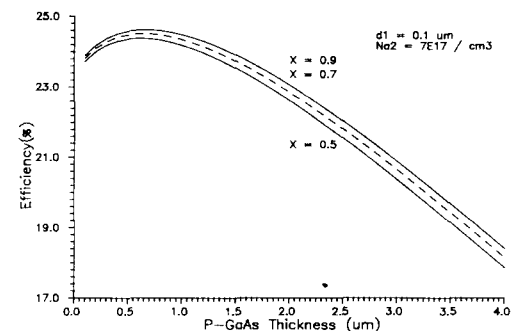


그림 3. Al 함량비의 함수로써 p-GaAs 두께에 따른 변환효율

Fig. 3. Computed efficiency vs p-GaAs thickness for different Al mole fractions.

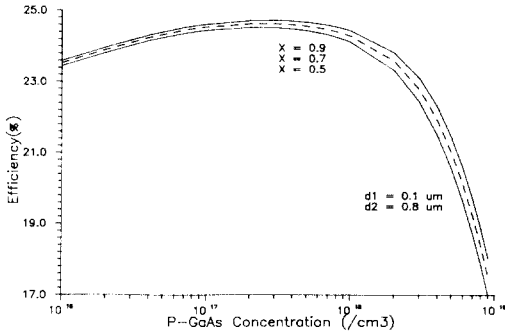


그림 4. Al 함량비의 함수로써 p-GaAs 농도에 따른 변화효율

Fig. 4. Computed efficiency vs p-GaAs concentration for different Al mole fractions.

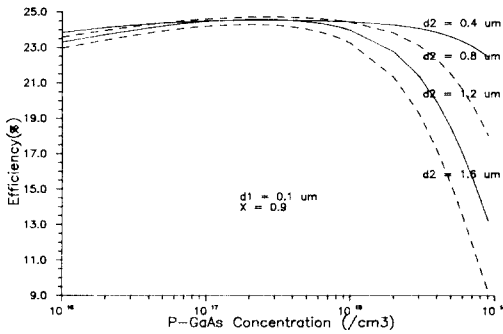


그림 5. p-GaAs 두께의 함수로써 p-GaAs 농도에 따른 변화효율

Fig. 5. Computed efficiency vs p-GaAs concentration for different p-GaAs thicknesses.

나타내고, Al함량비가 커질수록 전지의 효율이 증가함을 알 수 있다.

그림 3 과 그림 4 는 Al함량비를 파라미터로 하여 p-GaAs의 두께와 농도에 따른 효율특성을 나타낸 것이며 이들 그림으로부터 p-GaAs 층의 최적조건은 두께가 (0.5~0.8)μm, 농도가 (1~7) × 10¹⁷cm⁻³ 으로 주어짐을 알 수 있다.

그림 5는 Al_xGa_{1-x}As 층의 두께와 Al 함량비를 각각 0.1μm, 0.9로 두고 p-GaAs 층의 두께를 파라미터로 하여 농도의 변화에 따른 효율특성을 나타낸 것이다.

이 그림에서도 또한 p-GaAs 층의 두께와 농도가

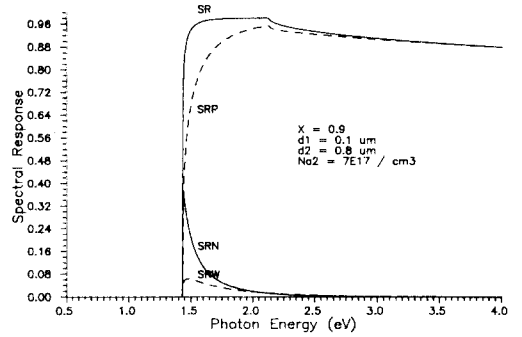


그림 6. 스펙트럼 반응 (SR, SRP, SRN, SRW)

Fig. 6. Spectral response. The relative contributions of the p-region, n-region, and depletion region, as well as the total, are shown.

0.8μm부근과 (1~7) × 10¹⁷cm⁻³ 범위에서 최대효율특성이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

그림 6에서는 각 영역의 스펙트럼 반응과 함께 전지의 전체 스펙트럼 반응을 보였으며, hν ≥ 2.0eV이상의 높은 광자에너지에서는 p영역에서의 스펙트럼 반응 (SRP)이 지배적으로 나타남을 볼 수 있다. Al_{0.9}Ga_{0.1}As 층의 광흡수계수 (β)에 대한 문턱에너지 [약 2.1(eV)]부근에서 스펙트럼 반응 곡선의 변곡이 생기는데, 이는 hν > E_{g, AlGaAs}에서부터 입사광속의 일부가 p-Al_xGa_{1-x}As window 층에 흡수되기 때문이다.

이상의 결과로 부터 Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지는 p-Al_xGa_{1-x}As 층의 Al함량비가 높고 두께가 (400~1000) Å정도이며, p-GaAs층의 두께와 농도가 각각 (0.5~0.8) μm, (1~7) × 10¹⁷cm⁻³ 범위일때, Window와 에미터의 최적구조가 실현된다고 볼 수 있다.

Ⅲ. 전지의 제작

1. 전지의 설계

시뮬레이션의 결과를 이용하여 전지의 구조를 그림 7 과 같이 설계하고 3종류의 공정 마스크(격리 마스크, 전극 마스크, 패드 마스크)를 그림8과 같이 제작하였다. 그림 8의 격리 마스크는 한장의 웨이퍼에 수개의 전지를 집적 시킬때 소자간의 분리를 위해 사용되며 패드 마스크는 A. R막으로 덮여있는 금속전극으로부터 외부로 도선을 끌어내기 위한 것이다. 전극 마스크는 그리드 전극의 형태를 결정해주며 이를 통해 전지의 전체 면적에 대한 유효수광면적의 비가 정해진다. 여기서 전지의 전체면적은

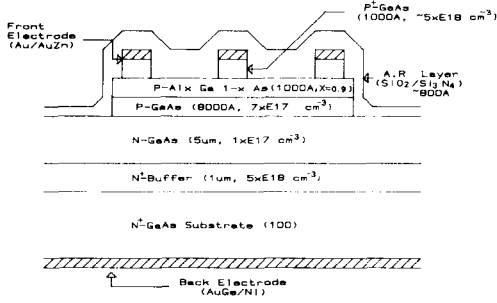


그림 7. 설계된 전지의 단면구조
Fig. 7. The cross section of the designed cell.

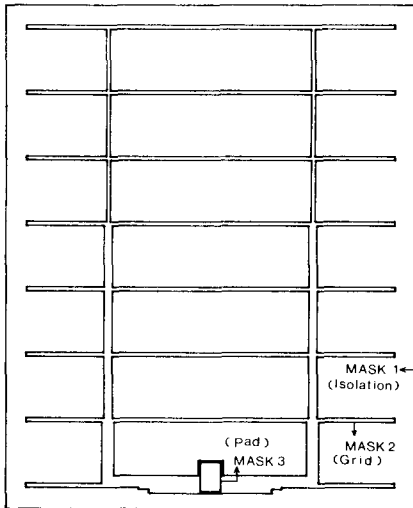


그림 8. 전지의 모양
Fig. 8. Cell pattern.

0.165cm² 이고, 금속이 차지하는 면적(0.019cm²)을 제외한 유효수광면적은 0.146cm²으로 나타난다.

2. 공정 처리

그림 7로 설계된 전지를 그림 9의 공정 순서도에 따라 제작하였으며, 기관으로는 결정면이(100)인 n⁺-GaAs를 사용하였다.

자세한 공정 내용으로는 먼저 n⁺-GaAs 기관위에 MOCVD방식으로 n⁺-GaAs buffer(두께;1μm, 도우핑농도;5×10¹⁸cm⁻³), n-GaAs(두께;5μm, 도우핑농도;1×10¹⁷cm⁻³), p-GaAs(두께;0.8μm, 도우핑농도;7×10¹⁷cm⁻³), p-Al_xGa_{1-x}As(두께;0.1μm, 도우핑농도 1×10¹⁷cm⁻³, Al함량비;0.9), p⁺-GaAs(두께;0.1μm,

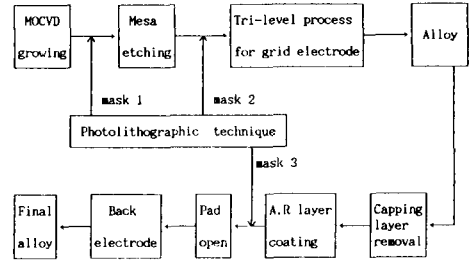


그림 9. 공정 순서도
Fig. 9. Process flow chart.

도우핑농도;5×10¹⁸cm⁻³)의 에피층을 차례대로 형성하였다.

이후 공정마스크 1을 사용하여 격리 창구를 개방하고 H₂SO₄:H₂O₂:H₂O=1:8:40의 etchant로 표면으로부터 p-GaAs층에 이르기까지 mesa etching을 실시하였다. 다음으로 공정마스크 2를 사용하여 Tri-level 기술로 Au/AuZn의 그리드 전극을 형성하고 T=500°C에서 N₂분위기로 100초간 열처리하였다.

이후, H₂SO₄:H₂O₂:H₂O=1:8:160의 etchant로 p⁺-GaAs의 capping 층을 제거하고 sputtering 방식으로 두께 800Å의 SiO₂/Si₃N₄ 막을 광반사방지막으로 형성하였다.

마지막 단계로 공정마스크를 사용하여 Pad를 개방하고 전지의 뒷면에 AuGe/Ni을 진공증착 한후 T=500°C에서 N₂분위기로 100초간 최종 열처리하였다.

IV. 측정 및 결과 분석

ELH(G. E. Co) 램프를 이용하여 solar simulator를 만들고 optoelectronics Co.,Ltd의 SSW-3/6N 전지를 기준하여 전지의 표면에 입사되는 광전력을 100mW/cm²가 되도록 조절하였다. ELH 램프는 스펙트럼이 자연광과는 다소 상이하나 solar simulator의 광원으로 흔히 이용되는 램프이다.

ELH-100mW/cm²의 인공조명 아래 전지의 전류-전압 특성곡선을 Tektronix, 576 curve trace로 측정 한 것을 그림10에 제시하였다.

그림10의 전류-전압특성곡선으로부터 전지의 개방전압(V_{oc})은 0.94V, 단락전류(I_{sc})는 3.5mA로 나타남을 직접알 수 있고 충실도(F.F)는 I-V 특성곡선상에서 최대전력(P_{max})을 주는점(V_{max}=0.75V, I_{max}=3.3mA)을 찾아 F·F=I_m·V_m/I_{sc}·V_{oc}로 계산하여 0.75를 얻을 수 있다. 전지의 효율은 식 (20)에 의

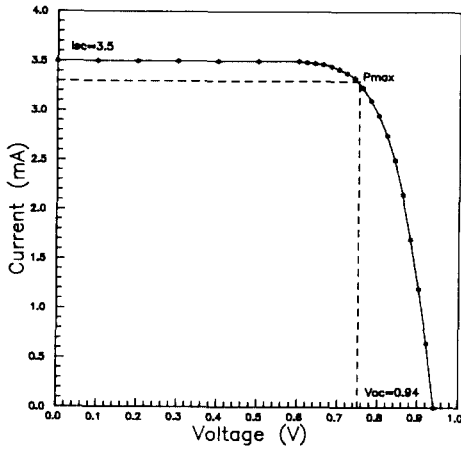


그림 10. 전지의 전류-전압 특성 (ELH-100mW/cm)
 Fig. 10. The current-voltage characteristics of the fabricated cell (under ELH-100mW/cm²)

해, η_{act} (유효수광면적에 대한 효율) = 17%, η_{tot} (전체면적에 대한 효율) = 15%로 계산된다. 또한 빛이 조사되지 않은 상태에서 전지의 순방향 전류-전압특성 곡선을 HP-4145 측정할 것이 그림 11이다. 빛을 차단한 상태에서 전지의 암 전류 특성은 순방향 전압이 nKT/q 보다 충분히 클때는 shockley 방정식으로 부터 암전류-전압의 관계식이 $I_D = I_0 \exp(qv/nKT)$ 로 표현된다. 따라서 그림 11에서 두개의 (+)표를 잇는 직선이 전류축과 만나는 점의 좌표가 역포화전류의 크기 (I_0)가 된다. 역포화 전류밀도의 크기 (J_0)는 I_0 를 전지면적으로 나누어 계산할 수 있으며 그 크

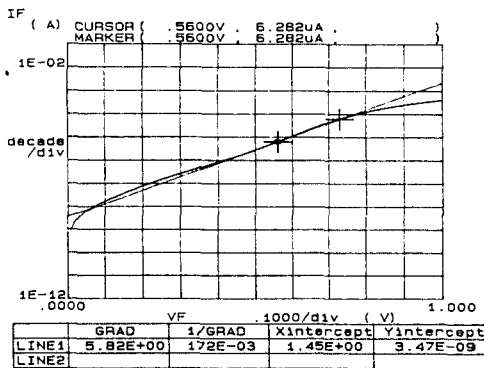


그림 11. 전지의 순방향 암전류-전압 특성
 Fig. 11. The forward dark current-voltage characteristics of the fabricated cell.

표 3. 제작된 전지의 물리적 파라미터와 효율 파라미터 (ELH-100mW/cm²)

Table 3. Physical and efficiency parameters of the fabricated cell (under ELH-100mW/cm²).

efficiency parameters		physical parameters	
details	values	region	values
V _{oc}	0.94V	p-Al _x Ga _{1-x} As	N _a ~ 10 ¹⁹ cm ⁻³ , t = 0.1 μm, x = 0.9
I _{sc}	3.5mA	p-GaAs	N _{a1} ~ 7 × 10 ¹⁷ cm ⁻³ , t = 0.8 μm
V _{max}	0.75V	n-GaAs	N _{d1} ~ 10 ¹⁹ cm ⁻³ , t = 5 μm
I _{max}	3.3mA	n ⁺ -GaAs buffer	N _{d1} ~ 5 × 10 ¹⁸ cm ⁻³ , t = 1 μm
P _{max}	2.475mW	n ⁺ -GaAs substrate	(100) orientation
J ₀	21nA/cm ²	A. R layer	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ layer; ~800 Å
F. F	0.75	grid electrode	Au/AuZn
η_{tot}	15%	back electrode	AuGe/Ni
η_{act}	17%	Capping layer	N _{ac} ~ 5 × 10 ¹⁸ cm ⁻³ , t = 0.1 μm

기는 21nA/cm²로 나타난다. 표 3에서는 제작된 전지의 물리적 파라미터와 효율 파라미터의 값들을 요약하였다.

제작된 전지의 효율은 이론적 효율 (~24.7%)에 비해 많이 떨어지나 이론적 효율은 직렬저항을 0으로 취하였고 표면누설전류성분을 무시하여 구한 값이다. 실제적인면에서 이들의 영향은 전지의 효율특성을 크게 저하시킨다. 본 연구에서 얻어진 η_{act} = 17%의 효율은, 그러나, 그동안 국내에서 발표된 Si 태양전지의 최대효율에 필적하고 있으며¹⁴⁾ Heteroface p-Al_xGa_{1-x}As/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 전지의 공정이 체계화되고 앞으로 베이스영역에 대한 최적 연구가 추가되면 효율은 더욱 높아질 것이다.

V. 결 론

GaAs 태양전지의 단점을 보완하여 높은 효율을 얻을 수 있는 Heteroface p-Al_xGa_{1-x}/p-GaAs/n-GaAs/n⁺-GaAs 태양전지를 설계하였다. 설계된 패턴에서 전지의 전기적 특성에 대한 이론들을 유도한 후, 태양 전지의 물리적 파라미터의 값들, 즉, p-Al_xGa_{1-x}As 층의 Al함량비, p-Al_xGa_{1-x}As와 p-GaAs층의 두께, 그리고 p-GaAs 층의 불순물농도 변화가 전지의 효율특성에 미치는 영향을 조사하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과, AMO, 1Sun 조건하에서 직렬저항을 고려하지 않는 경우, Al함량비는 증가할수록 p-GaAs 첨가불순물 농도는 (1~7) × 10¹⁷cm⁻³, p-Al_xGa_{1-x}As 두께는 (400~1000) Å, 그리고 p-GaAs의 두께는 (0.5~0.8) μm인 범위에서 최대 변환효율 특성을 얻었고,

이때 전지의 이론적 최대효율은 약 25%로 나타났다. 시뮬레이션의 결과로 부터 적절히 설계된 0.165cm^2 면적의 전지를 MOCVD 방식으로 제작한 결과, 실제 효율특성은 $\eta_{\text{act}}=17\%$, $\eta_{\text{tot}}=15\%$ 로 나타났으며 개방전압은 0.94V , 단락전류밀도는 $21.2\text{mA}/\text{cm}^2$, 충실도는 0.75로 주어졌다. 제작된 전지의 효율이 이론치에 비해 떨어지는 것은 직렬저항성분(이론적 값에서는 $R_s=0$ 를 취함)과 poor passivation으로 인한 누설전류성분의 영향에 기인한다고 생각된다. 그러나 이 결과는 지금까지 국내에서 발표된 Si태양 전지의 최대효율에 필적하고 있으며 충분치 못한 실험횟수를 감안할 때 위성전원용 GaAs-based heteroface 전지의 성공적 연구로 평가된다.

앞으로 공정이 체계화되고 베이스영역의 최적설계와 A.R막의 효과적처리, 활성영역에서 불순물 분포의 gradient 효과가 병행 연구되면 전지의 효율특성은 더욱 개선될 것이다.

參 考 文 獻

- [1] H.J. Hovel and J.M. Woodall, " $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs P-P heterojunction solar cells}$," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 120, no. 9, pp. 1246-1252, Sept. 1973.
- [2] 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.
- [3] C.H. Henry, "Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 8, pp. 4494-4500, Aug. 1980.
- [4] 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, Apr. 1990.
- [5] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., 1981.
- [6] H.J. Hovel, *Solar Cells, vol. 11 of Semiconductors and Semimetals*, Academic Press, New York, 1975.
- [7] P.A. Iles, "Antireflection coatings for solar cells," *J. Vac. Sci. Technol.* vol. 14, no. 5, pp. 1100-1105, Sept./Oct. 1977.
- [8] Wen Zen Shen, et al., "The open circuit voltage of $\text{N}^+ \text{NP}$ high low emitter(ELH) junction solar cells in concentrated sunlight," *J. Appl. Phys.* vol. 51, no. 1, pp. 466-473, Jan. 1980.
- [9] Martin A. Green, "Solar cell fill factor: General graph and empirical expressions," *Solid State Electronics*, vol. 24, no. 8, pp. 788-789, Aug. 1981.
- [10] Y. Gazaleh and F. Therez, "Optical absorption in the window layer and its contribution to the spectral response of a $\text{p-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As/p-GaAs/n-GaAs}$ solar cell," *IEEE Proceedings* vol. 141, pt. 1, no. 6, pp. 183-187, Dec. 1984.
- [11] James A. Hutchby and Richard L. Fudurch, "Theoretical analysis of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ graded bandgap solar cell," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 7, pp. 3140-3151, July 1976.
- [12] 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.
- [13] Hideyuki Takakura, *Optimum design of heteroface solar cells*, Osaka Univ., Faculty of Eng. Sci., Toyonaka, Osaka, Sept. 1979.
- [14] G.K. Chang and B.R. Kim, "A study on the efficiency improvement of HLE solar cell using surface charge accumulated layer," *J. of the Korean Institute of Telematics and Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 395-403, July 1985.

著 者 紹 介



張 志 根 (正會員)

1952年 1月 26日生. 1975年 2月
경북대학교 공과대학 전자공학과
졸업 (공학사). 1980年 8月 연세대
학교 산업대학원 전자공학과 졸
업 (공학석사). 1984年 8月 연세대
학교 대학원 전자공학과 졸업 (공
학박사). 1975年~1977年 한국과학기술연구소(연구원),
1977年~1980年 한국전자기술연구소(연구원), 1988年
~1989年 University of California, Los Angeles 객원
교수. 1981年~현재 단국대학교 단과대학 전자공학
과 부교수. 주관심분야는 화합물 반도체소자, 고속
전자 및 광 전자 소자의 모델링과 개발분야 등임.

林 聖 奎 (正會員) 第27卷 第1號 參照

현재 단국대학교 공과대학
전자공학과 부교수