
실내조명 응용을 위한 투명 집광 렌즈를 이용한 태양전지 효율 향상

이유종*

Improvements in Solar Cell Efficiency using a PMMA Concentrator
Lens for Indoor Use

Yoo Jong Lee*

이 논문은 2006년도 동의대학교 교내 연구비를 지원받았음 (2006AA155)

요 약

실내조명하에서 유비쿼터스 센서 네트워크 태그 및 노드 전원으로 태양전지 사용 가능성을 실험하기 위해 PMMA(Poly-Methyl-Methacrylate) 렌즈를 단일접합 AlGaAs/GaAs 태양전지 위에 덧씌워서 렌즈로 사용한 결과 태양전지의 특성이 향상 되었다. PMMA 렌즈를 덧씌운 효과를 비교하기 위해 AlGaAs 단일접합 태양전지에 PMMA 렌즈를 덧씌우기 전과 후의 특성을 각각 one sun 조건 (100mW/cm^2) 하에서 측정하였으며, 실내의 탁상램프 조명 근접거리 조건(약 1200 루스)하에서 특성 측정 결과를 비교하였다. PMMA 렌즈를 덧씌운 결과 약 5% 정도의 효율이 향상되었고, 탁상용 형광램프 조건에서 $83 \mu\text{W/cm}^2$ 이상의 전기에너지가 발생됨을 확인하였다. 실내조명 조건에서는 one sun (100mW/cm^2) 에 비해서 광량이 매우 작으므로 발생전압과 발생 전류가 상당히 감소하게 된다. 하지만 $83 \mu\text{W/cm}^2$ 정도의 전기에너지가 발생되어 향후 렌즈효율 개선과 모듈 설계를 통해 USN 태그 및 노드용 전원으로 충분히 적용 가능할 것으로 사료된다.

ABSTRACT

Improvements in characteristics of a single junction AlGaAs/GaAs solar cell are observed by capping a PMMA lens on it. In order to show the effect of the lens, characteristics of a single junction AlGaAs/GaAs solar cell before and after the lens formation are compared under the one-sun illumination condition (100mW/cm^2). Characteristics of the solar cell under very weak illumination condition (about 1200 lux) is also measured with the lighting of a fluorescent desk lamp. About 5% of cell efficiency is improved after the capping of PMMA lens on the single junction AlGaAs solar cell and $83 \mu\text{W/cm}^2$ of electrical power was generated with the lighting of a desk lamp.

키워드

단일접합, 태양전지, 고분자 재료 렌즈, 유비쿼터스 센서 네트워크

Key word

Single Junction, Solar Cell, PMMA Lens, USN

* 동의대학교 공과대학 정보통신공학과

접수일자 : 2010. 03. 08

심사완료일자 : 2010. 03. 31

I. 서 론

RFID(radio frequency identification) 및 유비쿼터스 센서 네트워크(USN) 시스템 관리가 네트워크 및 지능화함으로써 기존의 유통 및 물품관리는 물론 보안, 방재, 안전관리, 환경관리, 의료, 교육, 가정/사무자동화 등 다양한 분야에서 혁신적 응용을 선도하여 막대한 관련 시장이 창출될 것이다[1, 2]. USN용 센서 태그 및 노드의 구동을 위해서는 규격에 적합한 초소형, 경량이며 긴 수명을 가지는 전원소자의 기술을 확보하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 전자태그는 자체전원 공급을 위한 전자가 추가되어 인식률과 인식거리를 개선한 능동형 방식의 센서 태그기술이 개발되고 있으며 USN용 센서노드의 전원으로는 자가충전 기능이 부가된 이차전지의 사용이 고려되고 있다[1, 2, 3]. 센서노드들이 장착되는 위치들이 유선 충전이 가능한 곳이 거의 없으며 주위환경 조건에 맞는 에너지 생성기능을 갖춘 소자와의 혼성화가 반드시 필요하여 최근 RFID 태그 및 USN 센서와 노드에 안정적인 무선 전원 공급용으로 태양전지를 사용하면 교체 없이 거의 반영구적 사용이 가능하고 환경 친화적인 태양에너지를 이용하는 장점이 있다[4, 5, 6, 7]. 따라서 태양광을 활용하는 실외 환경은 물론 조도량이 낮은 실내조명 환경에서 태양전지를 전원으로 사용하는 센서와 노드의 응용에 대한 연구결과가 활발히 보고되고 있다[6, 7, 8].

본 연구에서는 KIST에서 분자선 에피층 성장법(MBE)으로 성장된 기판으로 직접 제작한 AlGaAs/GaAs 단일접합 화합물 반도체 태양전지 위에 투명한 고분자 수지인 PMMA 렌즈를 부착하여 태양전지의 효율을 증대시켜서 조도가 낮은 실내조명 조건에서 USN 센서 및 노드용 전원에 응용하고자 기초 연구를 수행하였다.

II. AlGaAs/GaAs 단일접합 태양전지의 제작

III-V 화합물 반도체 태양전지는 직접 친이형 밴드갭을 가지고 있어서 간접 친이형 밴드갭을 갖는 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 높아서 실리콘 태양전지보다 활성층의 두께가 얕아도 입사되는 태양에너지를 더

잘 흡수하는 장점을 가지고 있다. 또한 유기금속화학증착법(MOCVD)이나 분자선 에피층 성장법(MBE) 등 에피층 성장기술의 발달로 다중접합(multi-junction) 구조의 성장이 가능하여 태양 스펙트럼의 이용 효율이 증대되고, 그 결과 초고효율 태양전지 제작이 가능하다. 아울러 III-V 화합물 반도체는 고온 특성이 우수하여 온도 안정성 및 신뢰성이 높은 장점을 가지고 III-V 화합물 반도체 태양전지에 대한 관심이 고조되고 있다[9, 10]. 태양전지의 USN 센서 및 노드용 전원 응용 시 합리적인 가격, 전지의 면적이 가능한 좁으며 높은 효율을 가질것 등이 요구된다. 이에 구조제작이 매우 용이하고 효율이 높은 AlGaAs/GaAs 단일접합 화합물 반도체 태양전지를 저가의 플라스틱 또는 고분자 렌즈 통해 집광하여 구현하고자 하였다. 상용화된 Si 태양전지는 가격면에서 유리하지만 효율이 낮아 대면적 사용이 필요하다. 반면에 상용화된 AlGaAs/GaAs 단일접합 화합물 반도체 태양전지는 효율이 높고 집광(concentration) 사용 시 광전 변환 효율이 상승하는 특성이 있어 좁은 면적의 고배율 집광형 태양광 발전 시스템에 가장 적합하다.

본 연구에서는 KIST에서 MBE법으로 성장시킨 AlGaAs/GaAs 단일접합 태양전지 구조의 기판 상에 Au-Ge/Ni/Au 및 Pt/Ti/Pt/Au 전극을 증착, 형성하고 RTA(rapid thermal annealing) 방법으로 열처리 하여 직접 태양전지 소자를 제작하였다.

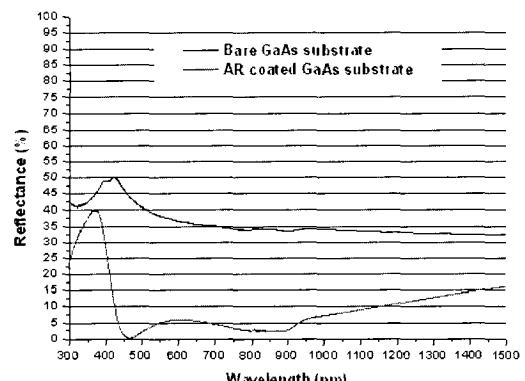


그림 1. AlGaAs/GaAs 태양전지 수광면에 무반사(AR) 코팅 시행 전, 후의 반사율 차이를 파장에 따라 측정한 결과 비교

Fig. 1 Comparison of Reflectance vs. Wavelength Characteristics before and after ZnS/MgF₂ Anti-Reflection Coating on AlGaAs/GaAs Solar Cells

제작된 태양전지의 전면에 ZnS/MgF₂ 박막을 사용하여 무반사 코팅(AR)을 시행하였다. 그림 1에는 본 실험에서 제작된 AlGaAs/GaAs 태양전지에 ZnS/MgF₂ 박막을 무반사 코팅하기 전, 후의 반사율(reflectance) 차이를 Varian사의 UV-Vis-NIR spectrophotometer를 사용하여 파장에 따라 측정한 결과를 제시하였다. 그림에서 높은 효율을 가지는 무반사막의 코팅으로 300nm - 1500nm의 전체 측정 파장구간에서 현저한 반사율의 감소를 보이고 있으며 특히 실내조명의 주 파장대역인 가시광 영역에서는 5% 정도의 낮은 반사율 특성을 보이고 있다.

완성 제작된 태양전지의 입사면(window layer)에 굴절률 1.49인 PMMA 렌즈를 부착하여 태양전지의 집광 효율을 증대시키는 연구를 수행하였다. PMMA 렌즈를 부착한 AlGaAs/GaAs 단일접합 태양전지를 태양광의 one sun 조건 (100mW/cm²)과 실내의 탁상 조명등 근접 거리 (약 1200 룩스) 조건 하에서 태양전지 특성 변화를 비교하였다. 1200 룩스는 일반 실내조명의 조도보다 다소 높은 값이지만 실제 태양전지의 전원 이용 시 가능한 조명에 가장 가까운 곳에 센서 및 노드 본체를 위치시키게 될 것이므로 합리적인 값으로 보았다.

제작된 태양전지의 1 sun 조건에서 변환효율을 측정을 위해 태양광 시뮬레이터를 이용하였으며 Xe 램프를 광원으로 채택한 일본 San-EI Electric사의 제품인 XES-301S를 사용하였다. 그림 2에는 AM1.5 자연 태양광의 출력 스펙트럼과 솔라 시뮬레이터의 출력광 스펙트럼을 비교하고 있다.

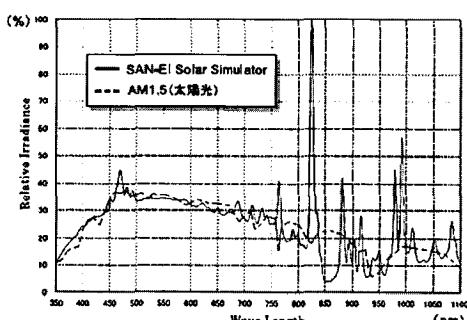


그림 2. 태양광(AM 1.5) 조건에서 변환효율을 측정을 위해 사용된 XES-301S 태양광 시뮬레이터와 자연 태양광의 출력 스펙트럼 비교[11]

Fig. 2 Comparison of the AM 1.5 Solar Emission Spectra to the San-EI XES-301S Solar Simulator Emission Spectra

그림에서 시뮬레이터의 출력광은 825 nm 대역의 첨두값을 제외하고는 자연광과 유사한 스펙트럼을 보인다. 실내 탁상 조명의 광 조도는 휴대형 TES 1335 light meter를 사용하여 측정하였고 탁상 조명등의 출력광 스펙트럼을 파장변화에 대하여 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 사용하여 측정한 결과 일반 탁상 조명등의 출력광 스펙트럼의 주요 범위가 약 330nm - 800nm임을 알 수 있었다.

III. 태양전지 제작 및 태양전지 위에 PMMA 렌즈 부착 방법

MBE로 성장된 AlGaAs/GaAs 단일접합 구조의 기판에 그리드 전극과 베이스 전극을 진공 증착한 후 RTA로 열처리하여 태양전지를 제작하고 스퍼터링(sputtering) 방법으로 ZnS/MgF₂ 박막을 사용 무반사막을 형성하였다.

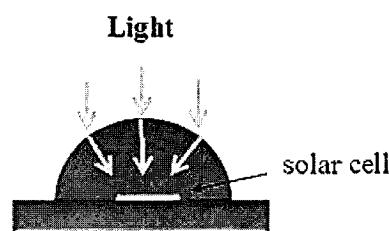


그림 3. PMMA 렌즈를 덧씌운 태양전지의 개념도
Fig. 3 Profile of a Solar Cell with a PMMA Concentrating Lens

제작된 AlGaAs/GaAs 단일접합 화합물 반도체 태양전지 위에 집광용 PMMA 렌즈를 덧씌운 후 렌즈를 덧씌우기 전과 태양전지 특성을 비교하였다. 그림 3은 PMMA 렌즈를 덧씌운 화합물 반도체 태양전지의 개념도를 보여주는 그림이다.

그림 4에는 PMMA 렌즈를 화합물 반도체 태양전지 위에 덧씌우는 제작 순서의 개요도를 나타내었다. 먼저 원하는 형상을 갖는 몰드를 제작한 후 PMMA 렌즈 재료를 채우고 100°C에서 1시간동안 PMMA를 curing하여 렌즈를 제작한다. 태양전지를 제작된 렌즈 위에 옮겨 놓아서 태양전지에 렌즈를 부착 시킨다. 몰드에서 태양전지

를 분리하면 그림에서와 같이 태양전지 위에 PMMA 렌즈가 덧씌워진 소자를 얻을 수 있다.

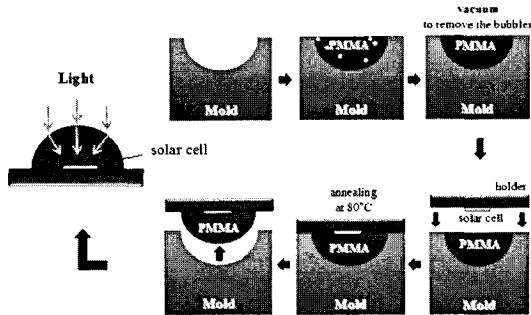


그림 4. 단일접합 태양전지의 입사면에 PMMA 렌즈를 제작하여 덧씌우는 과정도

Fig. 4 Drawings Illustrating the Sequence of PMMA Lens Formation Steps on a Single Junction Solar Cell

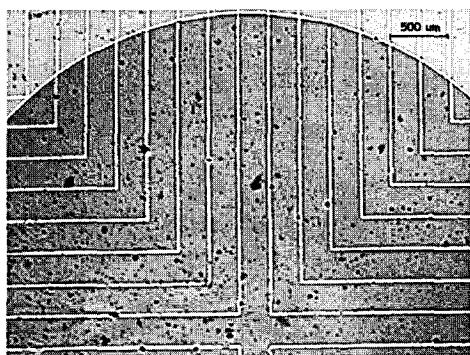


그림 5. PMMA 렌즈를 덧씌운 태양전지 사진의 예
Fig. 5 Photograph of a Fabricated Solar Cell Capped with a Slightly Smaller PMMA Lens Showing the Dimension and the Structure of the Device

제작된 태양전지는 최소 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 의 크기를 가지며 전지의 배열 개수가 많아짐에 따라 큰 면적의 전지 제작이 가능하다. PMMA 렌즈의 크기 및 형태는 다양하게 제작되었으며 통상 전지의 수광부(window) 면적보다 다소 커서 집광된 빛을 모두 받을 수 있도록 하였다. 그림 5에는 이해를 돋기 위해서 전지위에 수광부 면적보다 조금 작은 납작한 반구형 렌즈를 덧씌운 사진을 제시하였다.

IV. PMMA 투명 렌즈를 이용한 태양전지 효율 향상 비교 실험

PMMA 렌즈를 단일접합 AlGaAs/GaAs 태양전지 위에 덧씌운 결과 태양전지의 특성이 향상 되었다. 그림 6은 렌즈의 덧씌움 유/무에 따라 태양광 simulator를 사용 100mW/cm²의 one sun 조건 하에서 측정하였을 때의 특성 결과를 비교하여 보여주는 결과이다. 그림 6에서 점선은 렌즈가 부착되지 않은 태양전지의 특성이며, 실선은

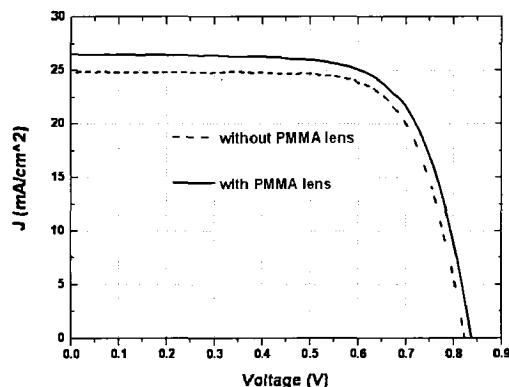


그림 6. One-Sun(AM 1.5) 광량 조건에서 PMMA 렌즈를 덧씌우기 전, 후의 단일접합 AlGaAs/GaAs 태양전지의 수광 변환 특성 비교

Fig. 6 Characteristics of a Single Junction AlGaAs/GaAs Solar Cell With and Without the PMMA Lens are Compared under One-Sun Illumination Condition (100mW/cm²).

PMMA 렌즈를 태양전지위에 덧씌운 경우의 특성이 다. 제작된 단일접합 태양전지위에 PMMA 렌즈로 덧씌운 결과 태양전지의 효율이 14.81%에서 15.56%로 효율 증가의 비율로 보아 약 5% 정도 향상되었다. 직접 제작한 태양전지의 비교적 낮은 효율값은 향후 구조 최적화와 접촉지향 최소화를 통해 증가할 것이며 이 경우 태양전지위에 PMMA 렌즈를 덧씌운다면 한층 실용적인 효율증가가 예견된다.

굴절률 1.49인 투명한 고분자 수지 PMMA로 제작한 집광용 광학 렌즈를 태양전지 위에 덧씌운 AlGaAs/GaAs 단일접합 태양전지를 탁상 조명등 조건 아래에서 특성 측정하였다. 그림 7은 PMMA 렌즈를 사용한 화

합물 반도체 태양전지의 탁상램프 조명 조건(약 1200 루스)에서 측정한 특성이다. 이 때 발생하는 전기에너지는 $83 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 이상이었다. 따라서 태양전지 면적을 크게 하거나 렌즈의 집광도를 높여 실내조명에서 충분한 전기에너지를 발생, 유비쿼터스 센서 네트워크의 센서 및 노드용 에너지원으로 사용할 수 있으리라 판단된다.

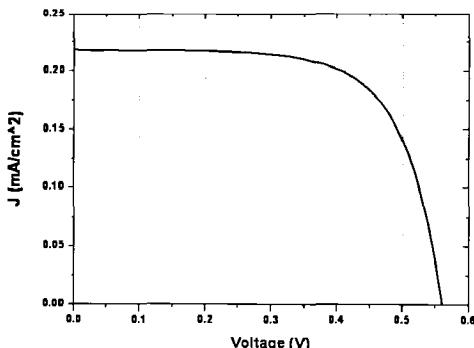


그림 7. 1200 루스의 탁상 조명등 밝기의 실내조명 조건에서 측정한 PMMA 렌즈가 덧씌워진 태양전지의 수광 변환 특성

Fig. 7 Characteristics of the Solar Cell Capped with PMMA Lens under Very Weak Illumination Condition (about 1200 lux) by the Lighting of a Fluorescent Desk Lamp.

표 1에는 지금까지 서술한 (1) 기본적인 AlGaAs 단일 접합 태양전지, (2) PMMA 렌즈를 덧씌운 경우 one sun 조건에서의 특성 측정 결과, (3) 탁상용 형광램프 조명 등 조건 하에서 특성 측정 결과를 비교하였다. 앞에서 서술한 것처럼 PMMA 렌즈를 덧씌움으로서 약 5% 정도의 효율이 향상되었고, 탁상램프 조명등 조건에서 $83 \mu\text{W}$ 이상의 전기에너지가 발생됨을 확인 하였다. 탁상램프 조명등 조건에서는 실외 태양광 조건(one sun, $100\text{mW}/\text{cm}^2$)에 비해서 광량이 매우 작으므로 태양전지에서 생성되는 전자-정공 쌍의 생성률이 입사된 광량에 비례하여 줄어들게 되어 발생전압과 발생 전류가 현저하게 감소하게 된다. 그러나 $83 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 정도의 전기에너지가 발생되면 전지 면적을 크게 하고 집광도를 높여 USN 센서 및 노드용 전원으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

표 1. PMMA 렌즈 유/무에 따라 자연광 및 실내광 조건에서 측정한 화합물 반도체 태양전지 특성 비교

Table. 1 Summary of Single Junction AlGaAs/GaAs Solar Cell Characteristics under One-Sun and Very Weak (about 1200 lux) Illumination Conditions w/wo PMMA Lens

	Normal (1 sun)	PMMA 렌즈 (1 sun)	탁상램프 (1200루스)
V_{oc} (V)	0.823	0.837	0.560
I_{sc} (mA)	2.236	2.395	0.0196
J_{sc} (mA/cm^2)	24.84	26.611	0.218
Fill-factor	0.724	0.698	0.677
Efficiency (%)	14.81	15.55	0.083
V_{max} (V)	0.642	0.657	0.437
J_{max} (mA/cm^2)	22.01	22.86	0.189
P_{max} (mW/cm^2)	14.81	15.62	0.083
R_s (ohm)	38.19	35.85	2089.33

V. 결 론

유비쿼터스 센서 네트워크의 전원으로 사용하기 위해 직접 제작한 단일접합 III-V 화합물반도체 태양전지 위에 PMMA 투명 렌즈를 제작하여 덧씌운 후 태양광 (one sun, $100\text{mW}/\text{cm}^2$) 조건과 탁상램프 조명 근접거리 조건 하에서의 특성을 비교하였다. 제작된 단일접합 태양전지위에 PMMA 렌즈로 덧씌움을 한 결과 효율이 14.8%에서 15.6%로 효율 증가의 비율로 보아 약 5% 정도 태양전지의 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 탁상램프 조명 근접거리 조건(약 1200 루스)에서 $83 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 이상의 전기에너지가 발생됨을 확인 하였다. 탁상램프 조명 조건에서는 one sun ($100\text{mW}/\text{cm}^2$)에 비해서 입사되는 광량이 매우 작으므로 출력 전압과 출력 전류값이 현저하게 감소하게 된다. 하지만 $83 \mu\text{W}$ 정도의 전기에너지가 발생되어 차후 렌즈효율 개선과 모듈 설계를 통해 유비쿼터스 센서 네트워크 태그 및 노드용 전원으로 적용 가능하다고 사료된다. 이의 적용 시 시판 중인 USN 센서 및 노드의 battery 장착공간(housing) 크기로 렌즈 및 태양전지와 2차전지 장착이 가능할 것이다. 직접 제작한 AlGaAs/GaAs 단일접합 태양전지의 비교적 낮은 효율값은 향후 구조 최적화와 접촉저항 최소화를 통해 개선 가능

능하며, 태양전지위에 PMMA 렌즈를 덧씌운 사용 시 고무적인 효율증가가 예견된다.

Cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 90, pp. 3068-3077, 2006.

- [11] <http://www.san-eielectric.co.jp/> San-EI Electric Web-page

참고문헌

- [1] 이영기, 김광만, 김종대, "RFID/USN용 전원소자", 전자통신동향분석 제23권 제6호, pp.32-37, 2008.
- [2] 김지은, 김세한, 정운철, 김내수, "USN 센서 노드 기술동향", 전자통신동향분석 제22권 제3호, pp.90-103, 2007.
- [3] 정재영, 여준호, 이형섭, 표철식, "센서 태그 기술 동향", 전자통신동향분석 제22권 제3호, pp.38-45, 2007.
- [4] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, and V. Peiris, "WiseNET: An Ultra-low Power Wireless Sensor Network Solution," *IEEE Computer*, Vol. 37, Issue 8, pp. 62-70, 2004.
- [5] Y. He, Y. Li, L. Liu, and L. Wang, "Solar Micro-Power System for Self-Powered Wireless Sensor Nodes," *SPIE Proc. 4th Intl. Symposium on Instrument. Sci. and Tech.*, Vol. 7133, pp. 71333Z-71333Z-8 (2008)
- [6] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, "Indoor Solar Energy Harvesting for Sensor Network Router Nodes," *Micro-processors and Microsystems*, Vol. 31, No. 6, pp. 420-432, 2007.
- [7] J. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics", *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, Issue 1, pp. 18-27, 2005.
- [8] S. Roundy, P. Wright, and J. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibration*, ISBN 1-4020-7663-0, Kluwer Academic, 2004.
- [9] F. Dimorth and S. Kurtz, "High-Efficiency Multijunction Solar Cells," *MRS Bulletin*, Vol. 32, pp. 230-235, 2007.
- [10] M. Yamaguchi, T. Takamoto, and K. Araki, "Super High-efficiency Multijunction and Concentrator Solar

저자소개



이유종 (Yoo Jong Lee)

1985 한국항공대 전자공학과 석사

1998 콜로라도주립대 전기공학 박사

1985~1992 KIST 연구원

1998 ~ 현재 동의대학교 정보통신공학과 재직