

# 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지

글 \_ 장덕래, 부성재 || 한국생산기술연구원 광주연구센터  
drchang@kitech.re.kr

태양광에너지는 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 무공해이며 무한정한 청정에너지원이기 때문에, 환경친화적인 21세기 에너지원으로 각광받고 있다.

태양전지는 태양광의 반도체 성질을 이용하여 전기에너지로 변환시키는 장치로서 소재와 제조기술에 따라 실리콘계 태양전지와 화합물 반도체 태양전지로 나눌 수 있으며, 실리콘계 태양전지는 결정성 실리콘 태양전지와 비정질 태양전지로 구분된다. 또한 화합물 반도체 태양전지는 III-V족 화합물계 (GaAs, InP, GaAlAs, GaInAs 등) 태양전지와 II-VI족 화합물계(CdS, CdTe, CuInSe<sub>2</sub>, ZnS 등) 태양전지로 구분된다.

현재 태양전지 중에서 태양광발전용으로 주로 사용되는 것은 단결정과 다결정 실리콘 태양전지이며, 그 외의 것은 특수한 분야에 이용되고 있다. 국내기술개발로 실용화된 태양전지는 단결정 실리콘 태양전지를 들 수 있으며, 다결정 실리콘 태양전지나 다결정 실리콘 박막태양전지, 화합물 반도체 태양전지는 연구단계에 있다.

이러한 태양전지 중에서 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지는 직접천이형 에너지구조를 가지고 있고, 파장광에 대한 흡수계수가 크다. 따라서 III-V족 화합물 반도체를 광흡수 재료로 사용하면 반도체의 두께가 얇아도 되기 때문에 재료비를 낮출 수 있고, 과잉소수 캐리어의 확산길이가 짧아도 되기 때문에 반도체 품질에 대한 요구가 완화되어 제조가 용이한 장점이 있다. 따라서 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지는 오래전부터 유럽, 미국 등에서 연구가 진행되었고, 차츰 미래의 태양전지로서 각광을 받기 시작하면서 많은 연구가 진행되고 있다.

단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지 중에서 가장

많이 사용되고 있는 GaAs 태양전지의 단셀인 경우 25.1% 이상의 고효율이며, 내방사선 특성이 우수하여 위성용 태양 전지로서 위치를 확립하고 있다. 이와 같은 고효율 GaAs 태양전지의 경우 위성체 전원 외에도 집광형 태양 전지로 지상에서 사용할 경우 적층형 태양전지로 제조하면 이론적 변환효율이 35% 이상에 달할 수 있으며, 특히 적층형과 집광형 태양전지를 병행할 경우는 이론적인 변환효율이 45%선에 이를 것으로 전망하고 있다.

## 1. 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지의 특성

### 1.1 GaAs 태양전지의 특성

단결정 III-V족 화합물 반도체 중에서 태양전지 재료로서 가장 개발이 많이 진행된 것이 GaAs이며, 이론적으로 30% (1 Sun, AM 0, 25°C) 정도의 효율을 얻을 수 있다. 또한 다른 물질과의 이종접합을 통하여 두가지 이상의 p-n 접합을 광입사 방향으로 접합시킨 적층(Tandem)형 태양전지가 가능하다. 즉 GaAlAs/GaAs 태양전지는 27.5%, GaAs와 GaSb를 접합시킨 적층형은 집광사에 35.8%의 높은 변환효율이 가능하다. 이러한 GaAs의 기초적 물성이나 결정성장법은 이미 널리 알려져 있으며, GaAs 태양전지를 실리콘 태양전지와 비교하면 다음과 같은 특징을 지니고 있다.

#### 1.1.1 장점

- ① 흡수계수가 매우 커서 태양광의 90% 이상을 흡수하기 때문에 박막화가 가능하다.

- ② GaAs의 밴드갭은 1.43eV로 태양광의 광전변환에 적합하여 변환효율이 높다.
- ③ 금지대폭이 넓기 때문에 고온 동작이 가능하다. (GaAs 태양전지의 온도상승에 의한 변환효율의 감소율은 실리콘 태양전지의 50% 수준이다.)
- ④ 직접천이형 반도체이기 때문에 소수 캐리어의 수명이 짧고 방사선에 의한 열화가 작다.

### 1.1.2 단점

- ① GaAs 단결정 기판의 가격이 높다.
- ② 실리콘에 비해 무겁기 때문에 무게당 출력이 낮다.
- ③ 기계적 충격에 약하다.

이러한 GaAs 태양전지의 특성은 Si 태양전지에 비하여 상대적으로 변환효율이 높고, 방사선 충격에도 강하여 우주전원으로 사용시 8년 이상의 장수명을 보장할 수 있다. 그러나 GaAs는 물성자체가 기계적인 충격에 약하고 단위 출력당 무게가 무겁기 때문에 인공위성의 전원용으로 사용하기에는 기술적, 경제적으로 많은 제약을 받아 왔다. 이러한 GaAs의 취약한 물성을 대처하기 위하여 기계적인 충격에 강하고, 가벼우며, 변환효율을 높게 얻을 수 있는 새로운 형태의 태양전지 재료가 필요하게 되었다.

따라서 기존의 고효율 GaAs 태양전지의 기판(substrate)을 GaAs 대신 IV족의 Ge, Si 등을 사용한 이종접합(heterojunction) 구조의 태양전지를 고안하게 되었다.

Ge는 주기율표상에 Ga와 인접해 있어 격자상수가 비슷한 값을 가지기 때문에 이종접합시 발생하는 접합부의 균열이나 물리적인 뒤틀림이 거의 없다. 열팽창계수 역시 비슷하여 높은 복사열로 인한 열화에도 강하며, 특히 기계적 강도가 강하기 때문에 GaAs 경우 직경 3" 기판의 두께가 400 μm 이상이 되어야 하지만, Ge 기판은 200 μm 정도로도 충분하다. 따라서 넓은 면적의 태양전지 제작도 가능하다. 또한 태양전지의 변환효율 측면에서도 GaAs 단셀의 태양전지 변환효율이 25.1%인데 비해 GaInP/GaAs 태양전지를 Ge 단결정 기판위에 형성한 GaInP/GaAs/Ge 3 접합 태양전지의 경우 30% 이상 높은 변환효율이 가능하며, 현재 우주용으로 실용화되고 있다.

이는 P형 Ge 위에 GaAs를 성장시킬 때 As가 확산하여 Ge에도 p-n 접합이 형성되기 때문에 상층부는 GaInP, 중간층은 GaAs 및 하층부는 Ge로 이루어진 3접합 태양전지이다.

그러나 현재까지의 연구 결과로는 GaAs 태양전지를 Ge 기판 위에 형성시키는 과정에서 열확산(thermal diffusion) 현상 때문에 접합부의 결합 밀도가 높아지고, 이로 말미암아 GaAs에서 생성된 전류가 Ge층으로 전달되는 과정에서 많은 손실이 생기므로 실제 GaAs/Ge 다층 접합 태양전지는 GaAs 단층 태양전지보다 효율이 감소하는 기이한 현상을 보이고 있다.

반면 Si을 기판으로 사용하는 GaAs/Si 태양전지는 값이 싸고, 가벼우며 견고성이 뛰어나 대면적의 태양전지를 만들 수 있다. Si은 밀도가 GaAs나 Ge과 비교할 때 1/2 이하이고 (GaAs : 5.32 g/cm<sup>3</sup>, Si : 2.33 g/cm<sup>3</sup>) 기계적인 강도에서도 다른 재료에 비하여 상대적으로 강하기 때문에 대기권 밖에서 사용할 때 단위 무게당 출력이 가장 크다. 그러나 Si 기판 위에 GaAs 박막을 형성시키는데 있어 GaAs의 격자 상수가 Si에 비해 4% (GaAs: 0.565325nm, Si: 0.54305nm)가량 작기 때문에 기판과 박막 사이에 균열이 생기고 많은 결정 결함이 수반된다. 특히 열주기 시험에서 나타나는 효율의 급격한 감소 현상은 GaAs 박막과 Si 기판 사이의 균열이 가속화되면서 발생하는 문제점으로 아직까지 뚜렷한 해결 방안이 제시되지 않고 있는 실정이다. 따라서 GaAs/Si 태양전지는 고온/저온 주기가 되풀이되는 대기권 밖보다는 비교적 안정된 온도에서 사용되는 지상용 태양전지로 연구하는 것이 바람직하다고 여겨지고 있다.

InP의 경우는 다층 태양전지의 하층 전지로서 에너지 밴드갭은 적당하나 GaAs 보다 기계적 강도가 약하고 격자 상수의 차이가 커서 실제 태양전지 제작에는 많은 문제가 따른다.

### 1.2 III-V족 질화물계 화합물 반도체 태양전지 특성

최근 10여년 사이에 질소를 포함하는 III-V족 화합물 반도체인 질화물계 반도체가 전 세계적으로 주목을 받고 있다. 이는 Wurtzite 구조를 가진 III-V족 질화물 반도체

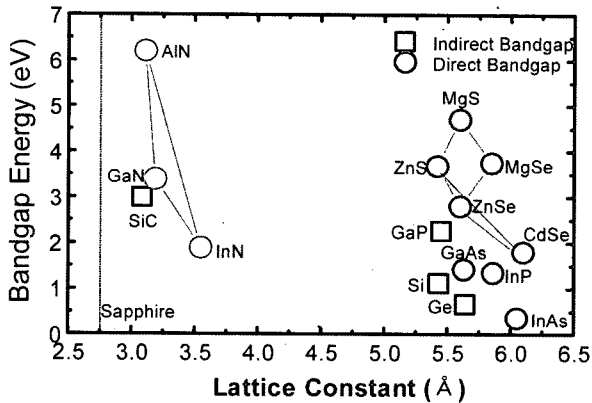


Fig. 1. 반도체의 밴드갭과 실현 가능한 빛의 관계.

는 1.9eV(InN)에서 3.4eV(GaN), 6.2eV (AlN)에 이르는 직접천이형 금지대 폭을 가지고 있어, 질화물 조성에 따라 가시광선에서 자외선의 전 파장영역에서의 Bandgap Engineering이 가능하기 때문이다(Fig. 1).

이러한 질화물계 III-V족 화합물 반도체는 ZnS, InP, GaAs 등 기존의 화합물 반도체에 비해 고온에서 구조적 안정성이 매우 우수하고, 높은 경도와 열전도도, 화학적 안정성등과 같은 특성을 가지고 있기 때문에 고온 고출력 전자소자로도 각광을 받고 있다. 이러한 이점들 때문에 전 세계의 거의 모든 기업체 또는 학교 연구소에서 활발한 연구를 진행하였지만, 현재까지 고품질의 III-V족 질화물계 화합물 반도체의 기술개발이 안되는 이유는 고품질의 III-V족 질화물계 화합물 반도체의 성장이 매우 어렵다는 것을 말하는 것으로 아직도 개발의 여지가 많다는 것을 의미한다. Table 1에 III-V족 질화물계 화합물 반도체 에피성장 기술발전에 대해 보인바와 같이 초기의 성장은 HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy), MBE(Molecular Beam Epitaxy), OMVPE(Organo-Metallic Vapor Phase Epitaxy)등 여러 방법이 시도되었지만, 지난 수년간 GaN 박막은 사파이어 기판위에 유기금속 기상화학증착법(OMVPE)에 의해 가장 많이 증착되어 왔다.

이러한 화합물 반도체 소자를 제조하기 위해서는 반드시 필요한 기술이 바로 화합물 반도체 에피성장 기술이다. 모든 화합물 반도체 소자는 에피성장을 통해 원하는 구조를 적층하고 이를 기본으로 하여 후속공정을 통해 제작된다. 따라서 소자의 성능은 성장된 에피층의 품질

Table 1. III-V족 질화물계 반도체 에피성장 기술개발

연도	연구그룹	연구내용
1983	ETL	Two step growth with AlN buffer
1986	Nagoya Univ.	Successful epitaxial GaN growth by APMOCVD
1989	Nagoya Univ.	LEEBI to obtain p-type doping
1992	Nichia	Thermal annealing to obtain p-type doping
1994	Nichia	Candela-class InGaN/AlGaIn DH blue LED
1996	High Pressure Research Center	GaN single crystal growth
1996	Nichia	CW operated InGaIn/InGaIn MQW LD at RT
1996	NCSU	Low dislocation density via lateral epitaxial growth
1997	Nichia	Violet LD with lifetime of longer than 10,000h
2001	Nichia	Blue LD with lifetime of longer than 3,000h

에 의해 크게 결정되며 조성, 두께 및 계면특성 등 정밀한 제어가 소자 성능 향상을 위한 핵심기술이다.

GaN 박막의 에피성장은 현재 GaN와 격자 정합하는 기판이 없기 때문에 주로 사파이어 기판을 사용하고 있지만 격자상수 부정합이 13.8%이고, 열팽창계수 차이가 25%나 되기 때문에 사실상 이러한 수치는 반도체 소자를 제품화하기에는 어려운 물질의 특성이다. 그러나 GaNP는 기판과 격자상수의 부정합이 크에도 불구하고 광특성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보고 되었고, Table에서 보인 바와 같이 1986년 일본의 아카사키 교수가 사파이어 기판위에 저온 AlN 버퍼층의 사용기술로 결정성이 높은 GaN 박막성장을 성공시킴으로써 GaN 이중박막성장(Heteroepitaxy)이 가능했다. 또한 GaN의 최대 문제점의 하나인 GaN의 P형 도핑은 1989년에 Mg를 도핑한 GaN을 전자선 조사에 의해 처음으로 실현되었고, 1992년에 일본 니치아화학의 나카무라에 의해 열처리만으로도 용이하게 GaN을 P형으로 도핑이 가능하다. 한편 고품위 InGaIn의 성장에서 In의 조성비에 의해 파장이 결정되는데 In의 증기압은 Ga의 증기압에 비해 상대적으로 높기 때문에 균일하고 정확한 양을 조성시키기 어렵고 성장온도가 GaN보다 섭씨 300도 낮기 때문에 성장온도 조절도 하나의 문제점으로 대두되었다. 또한 In의 조성비가 증가함에 따라 활성층의 결정성이 저하되고, GaN/InGaIn층의 격자 부정합 때문에 고품위 InGaIn 성장 방법 자체가 고난도 기술이다. 그러나 일본 니치아화학의 나카무라는 1992년 새로운 Two-Flow 유기금속화학 증착방법(MOCVD)라는 독창적인 방법을 이용해 처음

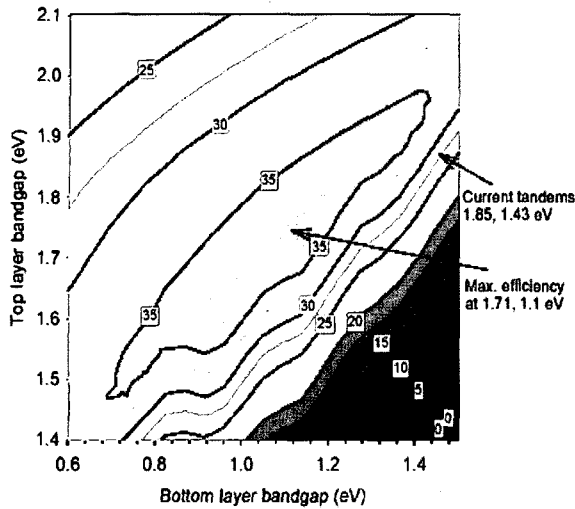


Fig. 2. 탄뎀형 태양전지의 최대효율 예측 모델링 (Kurtz, et al., 1990).

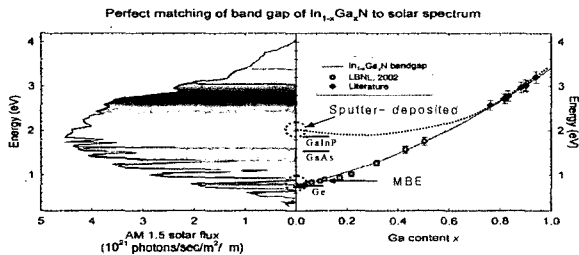


Fig. 3. 태양광 에너지와  $In_{1-x}Ga_xN$  질화물계 3원화합물의 밴드갭과의 관계.

## 2-junction cell

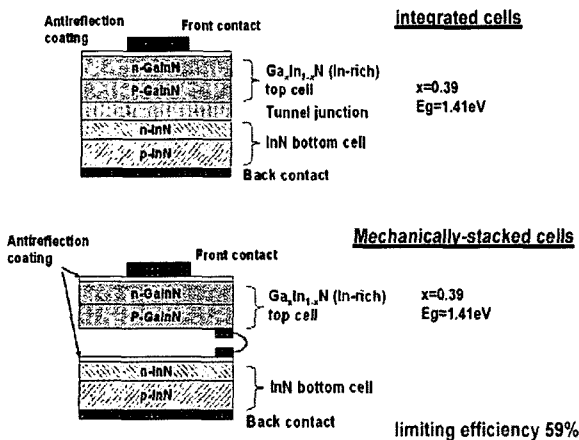


Fig. 4.  $In_{1-x}Ga_xN$  질화물계 3원화합물의 2-접합 탄뎀형 태양전지의 구조

으로 고품질의 InGaN 박막의 성장에 성공했다.

현재까지 태양전지의 최고효율은 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지로 GaInP/GaAs(2 접합)과 GaInP/GaAs/Ge (3 접합), GaInP/GaAs/GaInNAs/Ge (4 접합)으로 두가지 이상의 p-n 접합에 의해 이론적으로 35%이상의 높은 효율이 가능할 수 있다. 이러한 다접합 태양전지의 효율에 있어 중요한 인자는 다른 화합물 밴드갭의 선택이다. Fig. 2에 보인바와 같이 NREL의 Bertness et al. 등은 다층접합에 의한 밴드갭과 효율과의 관계에서 GaAs 태양전지의 단셀경우 25.1% (Green et al., 2003)이지만, 다층 접합에 의해 셀을 디자인하면 맨위 상층부의 밴드갭이 1.7eV이고, 하층부의 밴드갭이 1.1eV일때 이론적으로 35%의 최대효율을 나타낼 수 있음을 보고하였다(Fig. 2). 특히 MBE에 의한 고품위 박막성장기술의 발달로 2001년에 InN의 밴드갭이 0.8eV로 새로이 알려졌고, 미국의 Lawrence Berkely Lab (LBNL, Wu et al., 2002)에서는 InN의 전자밀도가  $10^{17}$  이하이며, 300K에서 hall mobility가 2000 이상임을 확인하였다. 이는  $In_{1-x}Ga_xN$  질화물계 3원 화합물에서 Ga량을 증가시킴으로써 밴드갭을 조절할 수 있으며, 이러한 밴드갭은 태양광 방사스펙트럼 전 영역인 적외선부터 자외선까지 모든 스펙트럼 영역을 사용할 수 있기 때문에 태양전지로 사용할 경우 높은 변환효율을 얻을 수 있음을 제안했다(Fig. 3). 즉, LBNL에서는  $In_{1-x}Ga_xN$  질화물계 3원 화합물을 사용할 경우 Ga 양이 0.39일때 2 접합 탄뎀형 태양전지의 이론적 변환효율은 59% 이상 얻을 수 있음을 제안하였다(Fig. 4).

현재 국내에서 화합물 반도체 에피 성장을 위하여 MOCVD를 보유하고 있는 기업은 삼성종합기술원, LG 전자기술원, LG전선, 삼성전자, 나리지온, 에피밸리, 에피플러스, 옵토웰등이며, 그 외 국내에서 MOCVD 에피 성장을 하고 있는 연구기관 및 학교로서는 KIST, ETRI, 서울대, 경북대, 성균관대 등이 있다.

## 3. 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지의 연구개발 동향

단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지는 오래전부터

유럽, 미국 등에서 인공위성용으로 많은 연구가 진행되어 왔다.

미국의 경우 GaAs 태양전지와 관련하여 ASEC, Spire, NASA 등의 관련 기관에서 많은 연구를 진행하고 있다. 미국의 항공우주국(NASA : National Aeronautics & Space Administration)이나 국방부(DOD : Department of Defence)에서 제시하고 있는 미래의 태양전지 개발 방향은 10년 안에 단위 무게당 초기(BOL : beginning of life) 출력을 130W/kg, 말기(EDL : end of life) 출력을 110W/kg 까지 올리는 것을 목표로 하고 있다. 미국의 Varian사에서는 GaAs기판을 사용하여 상층부에는 Ga(Al)As 태양전지를, 하층부에는 Ga(Al)As 또는 Ge 태양전지를 가진 3 접합 탄덤형 태양전지의 개발을 추진하고 있다. 특히 GaAs/Ge 태양전지의 경우는 미국의 Motorola에서 '95년에 이동통신 사업인 이리둠 프로젝트의 주 전원용 태양전지로 개발하여 사용중에 있다. 그리고 현재는 상용화된 GaAs 태양전지의 변환효율은 19% 선이며, GaAs/Ge 태양전지는 변환효율이 20% 이상 얻기 위해 주안점을 두고 있다.

또한 미국의 LBNL에서는  $In_xGa_{1-x}N$  질화물계 3원 화합물이 태양에너지의 전 스펙트럼을 이용할 수 있으므로 높은 변환효율을 나타낼 수 있음을 제안하였고, 2 접합 탄덤형 태양전지의 이론적 변환효율이 59%를 얻을 수 있음을 제안하였다. 또한 MBE를 이용한  $In_xGa_{1-x}N$ 의 에피성장에 성공한 후 이를 실용화 하기위하여 MOCVD로  $In_xGa_{1-x}N$  3원 화합물에 대한 고효율 태양전지기술 개발을 진행하고 있다.

유럽의 경우 아리안 프로젝트와 관련하여 영국의 EEV에서 GaAs/Ge 태양전지를 생산하고 있다. 프랑스의 국립중앙연구소 CNRS(Centre National de la Recherche Scientifique) 산하의 LPSES(Laboratoire de Physique du Solide et Energic Solaire)에서는 두개의 다층 태양전지를 적층시켜서 4개의 밴드갭을 가진 태양전지를 제안하였다. 이 태양전지의 구성은 단일적층(monolithic tandem) 구조의 태양전지인 Ga(In)As/GaAs 태양전지를 만들고, 아래층에 Ga(In)As/(P) + Ga(In)As/InP 구조로 하층 태양전지를 구성한다. 이와 같은 태양전지의 장점은 각각의

태양전지가 적절한 두께와 최대 변환 효율을 갖도록 만들고 이를 다시 적층시킴으로써 40% 이상의 높은 변환 효율을 실현할 수 있다는 점이다. 그러나 그 제조 공정이 복잡하고 고가의 소재를 사용해야 하므로 태양전지의 가격이 고가라는 단점이 지적된다.

일본의 경우 NTT 연구소에서는 Si 기판 위에 여러 종류의 III-V족 화합물반도체, 즉 GaAs, InP, GaP 또는 InGaP 등을 이용한 고효율의 태양전지(효율 20%)를 개발 중에 있으며, 미쯔비시에서 Si 또는 GaAs를 생산하고 있다.

국내의 경우 GaAs 관련 반도체 소자 연구가 ETRI, KIST, KAIST 등에서 MOCVD, MBE등을 이용하여 연구되고 있으나, 대면적의 균일한 박막을 요구하는 GaAs/GaAs 태양전지 연구는 지금까지 미미한 실정이다.

#### 4. 향후 전망

현재 가장 널리 상용화되어 있는 태양전지는 단결정과 다결정 실리콘계 태양전지이다. 이러한 결정질 실리콘 태양전지는 고품질의 실리콘 결정을 사용하기 때문에 신뢰성과 전력변환효율이 높다는 장점을 지니고 있지만 단결정을 성장시키는 공정등 제조 공정이 복잡하고 고품질의 실리콘을 사용하므로 제조가격이 비싸다는 단점이 있다. 이를 위한 해결책으로 저가 태양전지로서의 기대를 갖고 활발히 연구 개발되고 있는 비정질실리콘 태양전지의 경우 가격 하락 폭이 기대에 미치지 못하고 있으며, 특히 성능면에서도 초기 열화현상에 따른 효율 감소를 극복하지 못하여 8% 이내의 낮은 변환효율을 갖는 태양전지 모듈만이 제품화되고 있는 실정이다.

그러나 단결정 III-V족 화합물 반도체인 GaAs와 AlGaAs등을 이용한 태양전지는 실리콘 계의 태양전지에 비해 이론적으로 높은 변환효율을 가지고 있으면서, 저비용인 태양전지 재료로서 박막화가 용이하고, 높은 광흡수 계수를 가지며, 광학적 밴드갭의 선택성이 있기 때문에 높은 온도에서도 동작이 가능하고 우주공간에서 결정이 우수한 내방선성 가진다. 따라서 이러한 장점들을 지닌 고효율 단결정 III-V족 화합물 반도체 태양전지의 개발은 현재 정보통신분야의 폭발적인 성장과 인공위

성용 에너지원으로 사용되고 있는 실리콘계열의 태양전지가 GaAs 계의 화합물 태양전지로 대체되면서 그 수요가 급격히 증가 되고 있다.

따라서 III-V 족 화합물 반도체 태양전지는 미래의 태양전지로서 인공위성용 뿐아니라 고효율 지상용 태양전지로서 활용이 기대되기 때문에 태양전지의 개발을 선도하는 선진국에서는 여러 장점을 가지고 있는 새로운 구조를 갖는 고효율 화합물 반도체 태양전지를 개발 중에 있다. 특히, 미국 NASA에서는 InGaAs/InP 다층구조를 이용한 고효율 태양전지(27%)를 개발하였으며, 일본의 NTT 연구소에서는 Si 기판 위에 여러 종류의 III-V족 화합물반도체, 즉 GaAs, InP, GaP 또는 InGaP 등을 이용한 고효율의 태양전지(효율 20%)를 개발 중에 있다.

그러므로 고효율 태양전지인 GaAs, AlGaAs, InGaAs 등의 III-V 화합물을 이용한 미래의 태양전지는 다가오는 우주화 시대에 발맞추어 인공위성에 탑재할 태양전지의 국산화를 위해서 반드시 연구되어야 한다. 특히 고효율 화합물 반도체 태양전지의 개발은 고온 고출력의 광전자소자, TFT-LCD, 메모리 반도체등의 반도체 산업과 Solar Car, 인공위성 등 관련산업에 대한 기술적 파급효과가 클 것으로 생각된다.

◎◎ 장덕례



- 1992년 전남대학교 공업화학과(학사)
- 1994년 전남대학교 공업화학과(석사)
- 2003년 아주대학교 분자과학기술학과(화학공학)(박사)
- 1994년-1999년 고등기술연구원, 주임연구원
- 2000년-2002년 (주)네스, 선임연구원
- 2003년-현재 한국생산기술연구원, 선임연구원

참고문헌

1. 이일형, 강상규, 서주환, 김현식, “나노태양전지”, 한국과학기술정보연구원 보고서, 2003.
2. 유권중외, 2003년도 세계 태양광발전 기술 R&D 현황과 전망, 대한전기학회, 2003.
3. 이만근, 고효율 GaAl/GaAs/Ge, GaAs/Si 화합물 태양전지연구, 한국에너지기술연구원 보고서, 2000.
4. Kurtz, S.R., P. Faine, and J. M. Olson, “Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter”, J. Appl. Phys. 68, 1890-1895 (1980).
5. J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J.W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, W.J. Schaff, Y. Saito, and Y. Nanishi, “Unusual properties of the fundamental band gap of InN”, *Appl. Phys Lett.* 80,3967-3939(2002).
6. T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Takahata, T. Mitate, S. Mizuno, H. Harima, and T.Makimoto, “MOVPE Growth of Wurtzite InN and Experimental consideration of its Optical Characteristics, International InN workshop, 80, Australia, 2004.
7. Abhishek Jain, Srinivasan Raghavan and Joan M. Redwing, “Evolution of Surface Morphology and Film Stress During MOCVD Growth of InN on Sapphire Substrate”, International InN workshop, 82, Australia, 2004.

◎◎ 부성재



- 1991년 독일 Christian-Albrecht 대학교 물리학(학사)
- 1996년 독일 Christian-Albrecht 대학교 물리학(석사)
- 2002년 독일 Bw. München 대학교 전자공학(박사)
- 1996년~2001년 독일 BwM 정보통신연구소 연구원
- 2002년~2003년 광우과학기술원 정보통신과 연구교수
- 2003년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원