

초고효율 III-V 화합물반도체 태양전지 연구동향 및 전망



김영조
한국나노기술원
소자기술개발본부



정상현
한국나노기술원
소자기술개발본부



김현성
한국나노기술원
소자기술개발본부



신은영
한국나노기술원
소자기술개발본부



김창주
한국나노기술원
융합공정기술본부



신현범
한국나노기술원
융합공정기술본부



강호관
한국나노기술원
소자기술개발본부

초 록

III-V족 화합물반도체 기반의 다중접합 태양전지는 광전변환 효율이 매우 높고 내열, 내방사선 특성이 우수하여 인공위성이나 우주 탐사선의 태양광 패널에 주로 활용되어 왔다. 최근에는 III-V 태양전지의 활용범위가 지상 발전용으로 점차 확대되고 있으며, 가격 경쟁력 확보를 위한 고효율화 기술과 저가화 기술이 활발히 연구되고 있다. 본고에서는 현재 세계 최고 효율(46%)을 기록하고 있는 집광형 III-V 태양전지와 무인 항공기 및 전기 자동차의 보조 동력원으로 주목받고 있는 플렉시블 III-V 태양전지의 국내외 연구동향을 소개하고, 초고효율 III-V 태양전지의 향후 전망에 대해 논의하고자 한다.

서론

2015년 12월 지구 온도 상승폭 제한과 탄소 배출 감축을 목표로 하는 파리 기후변화 협약이 체결되면서, 195개국 모두 2020년 신기후체제 출범 전까지 국가별 온실가스 감축 목표를 설정하고 이행하기로 합의하였다. 특히, 세계 7위의 온실가스 배출국인 대한민국은 2030년 온실가스 배출량을 전망치 대비 37% 감축하는 것을 목표로 설정하였으며, 2016년 12월 제1차 기후변화대응 기본계획을 발표하고 신재생에너지 보급 확대를 첫 번째 과제로 제시하였다.^[1]

신재생에너지는 수소, 연료전지, 석탄가스/액화 등의 신에너지와 태양광, 태양열, 풍력, 지열, 수력, 수열, 해양, 바이오, 폐기물 등의 재생에너지를 일컫는 말로 오염물질이나 이산화탄소를 배출하지 않는 친환경 에너지원이다. 그중에서도 태양광 발전이 일반인들이 가장 쉽게 접근할 수 있는 신재생에너지 기술로 주목받고 있는데, 정부에서도 2030년까지 신규 발전설비의 63%를 태양광 발전으로 보급하는 계획을 수립하였다.^[2]

태양광 발전의 핵심은 태양의 빛 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 태양전지 소자로서, 소음이나 오염을 유발하는 기계 부품이 없어 신뢰성이 높고 수명이 긴 장점이 있다.^[3] Si, GaAs, CIGS, CdTe, Perovskite, 염료 감응, 유기박막 등 다양한 재료를 이용한 태양전지 기술이 경쟁적으로 연구되고 있으며, 이에 따라 태양전지의 세계 최고 효율 기록도 그림 1에서 볼 수 있듯이 매년 갱신되고 있다.^[4,5]

1972년 20% 효율의 AlGaAs/GaAs 태양전지가 개발된 이후^[6] GaAs 계열의 III-V 태양전지가 가장 높은 효율 기록을 유지하고 있는데, 이는 재료 자체의 광흡수 특성이 우수하고 다양한 구조의 다중접합 구현이 가능하기 때문이다. 2013년 지표면 조사 조건(AM1.5G)에서 38.8%의 효율을 갖는 5중접합 태양전지가 개발되었으며,^[7] 2014년 집광 조사 조건(AM1.5D, 508 suns)에서 46.0%의 효율을 갖는 4중접합 태양전지가 개발되었다.^[8] III-V 다중접합 태양전지는 이론상 50% 이상의 효율 달성도 가능하기 때문에,^[9] 향후 수년간은 계속해서 효율 기록이 갱신될 것으로 예상된다.

효율이 높고 내열, 내방사선 특성이 우수한 III-V 태양

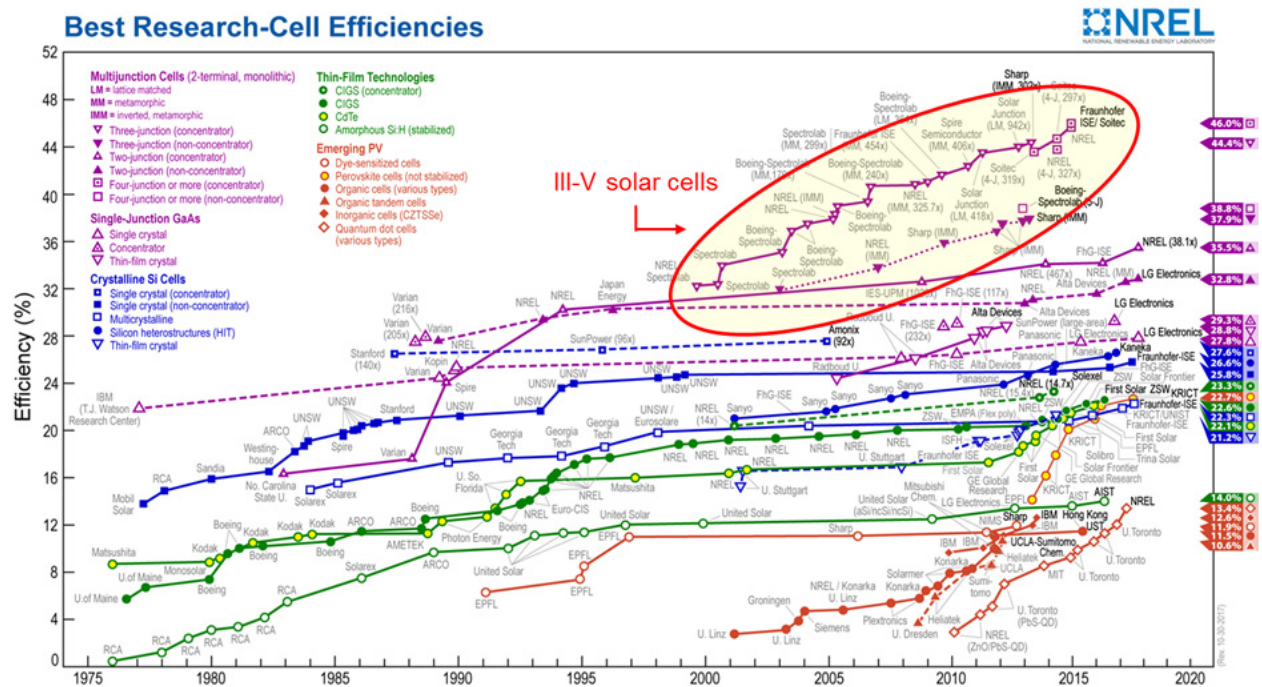


그림 1. 태양전지 효율기록 차트(NREL, 2017.10.30.)^[5]

전지는 1990년대 초부터 우주용 태양광 패널로 활용되어 왔으며,^[10] 2000년대 초에는 지상용 집광형 태양광 발전(CPV) 시스템의 핵심 소자로 활용되기 시작하였다. 2012년에는 28.8%(AM1.5G)의 플렉시블 박막형 GaAs 태양전지가 개발되어,^[11] 무인 항공기 및 전기 자동차용 고효율 플렉시블 태양광 모듈 기술이 주목받고 있다.

III-V 태양전지의 활용범위가 우주용에서 지상용으로 확대됨에 따라 가격 경쟁력 확보를 위한 고효율화 및 저가화 기술에 대한 연구가 미국, 독일, 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 집광형 III-V 태양전지와 플렉시블 III-V 태양전지를 중심으로 초고효율 III-V 태양전지의 국내외 연구동향을 소개하고, 향후 전망에 대해 논의하고자 한다.

집광형 III-V 태양전지 연구동향

CPV 시스템은 III-V 태양전지를 지상 발전용으로 활용하는 대표적인 응용제품이며, 그림 2와 같은 프레넬 렌즈 방식과 반사형 미러 방식의 CPV 시스템이 설치되고 있다.^[12,13] 집광형 태양전지 모듈 구조를 살펴보면, 그림 3과 같이 태양광을 모으기 위한 광학계와 전기를 생산하기 위한 태양전지로 구성된다.^[14] 이상적인 경우 태양전지의 출력 전류는 입사광의 세기에 비례하기 때문에,^[15] 고가의 태양전지 셀 면적을 집광배율만큼 줄일 수 있다. 현재 500배

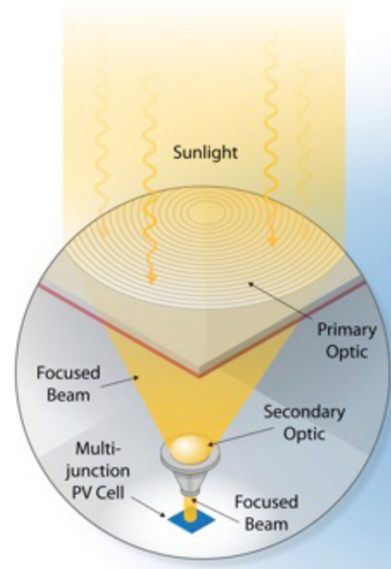


그림 3. 집광형 태양전지 모듈 구조^[14]

이상의 고집광 조건에서 40% 이상의 고효율 특성을 유지할 수 있는 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지가 CPV 시스템용으로 많이 사용되고 있다.

InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지는 그림 4와 같이 밴드갭이 다른 세 종류의 태양전지가 연결된 적층구조로 되어 있다. 밴드갭 크기 순으로 적층된 각각의 태양전지 셀이 그림 5와 같이 서로 다른 파장영역의 빛을 순차적으로 흡수하여 전기를 생산하는 것이다. 전기적으로 직렬 연결 구조이기 때문에 총 전류는 제한되지만, 총 전압은 각 태양전지 전압의 합만큼 증가하여 단일접합 태양전지 이상의 효율 달성이 가능하다.



그림 2. 프레넬 렌즈 방식(좌)과 반사형 미러 방식(우)의 CPV 시스템 설치 사례^[12,13]

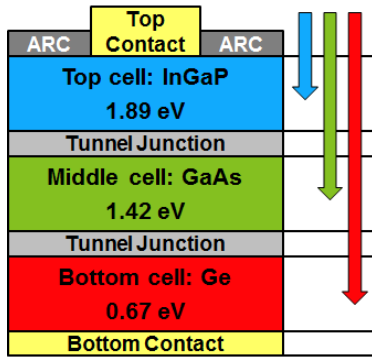


그림 4. InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지 구조

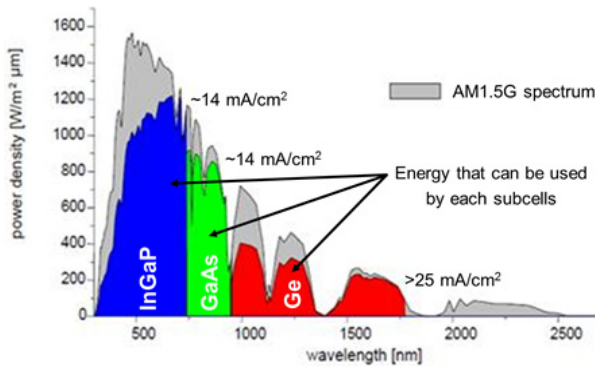


그림 5. InGaP/InGaAs/Ge 3중접합 태양전지의 태양광 흡수 스펙트럼

또한, InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지는 GaAs 기판과 격자상수가 모두 일치하는 재료로 구성되어 있기 때문에, 에피성장 시 고품질의 박막 품질을 얻을 수 있다는

장점이 있다. 하지만 1.9/1.4/0.7 eV의 밴드갭으로 구성된 3중접합 구조는 최적의 밴드갭 조합으로 볼 수 없다.^[16] 최하층의 Ge 태양전지 셀이 상대적으로 낮은 개방회로 전압 (~0.25 V)과 필요 이상의 단락회로 전류(~25 mA/cm²)를 생성하기 때문이다.

다중접합 태양전지는 접합 수가 늘어날수록 개방회로 전압과 광전변환 효율이 증가한다. GaAs(1.4 eV) 태양전지 셀과 Ge(0.7 eV) 태양전지 셀 사이에 1.0 eV 밴드갭의 태양전지 셀을 추가하여 4중접합 이상의 태양전지 구조를 구현할 경우, AM1.5G(1000 W/m²) 조건에서 50% 이상의 효율 달성도 이론적으로 가능하다.[9,16] 하지만 GaAs와 격자상수가 일치하는 1.0 eV 밴드갭 물질이 자연적으로 존재하지 않기 때문에(그림 6), InGaAs, InGaAsN, InGaAsP 등의 화합물반도체 에피성장 기술과 이를 이용한 다중접합 태양전지 제작 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국의 Solar Junction은 MBE(molecular beam epitaxy) 기반의 1.0 eV InGaAsN 에피성장 기술을 연구하여, 2012년 집광효율 44.0%(AM1.5D, 942 suns)의 InGaP/GaAs/InGaAsN 3중접합 태양전지 개발에 성공하였다.^[18] InGaAsN 물질은 그림 7과 같이 In과 N의 조성비를 조절하여 GaAs와 격자상수가 일치하는 1.0 eV 박막을 성장할 수 있기 때문에, 기존 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 구조에 바로 적용

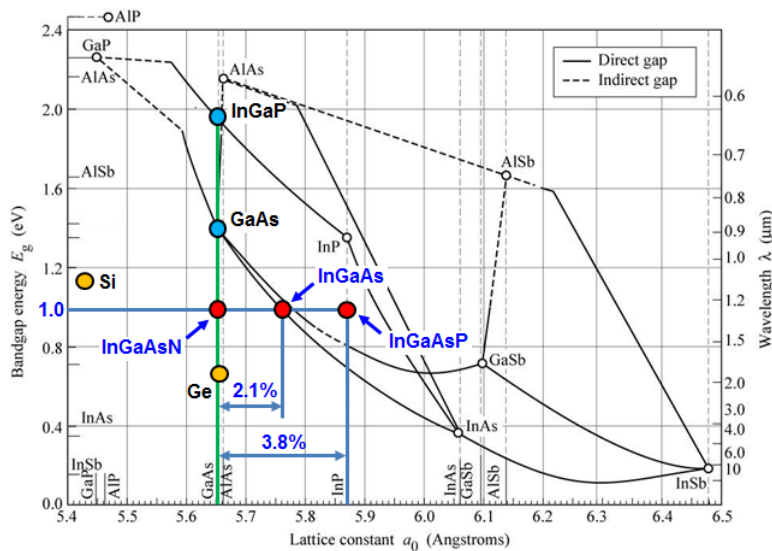


그림 6. GaAs계 III-V족 화합물반도체의 격자상수와 밴드갭 에너지 관계도^[17]

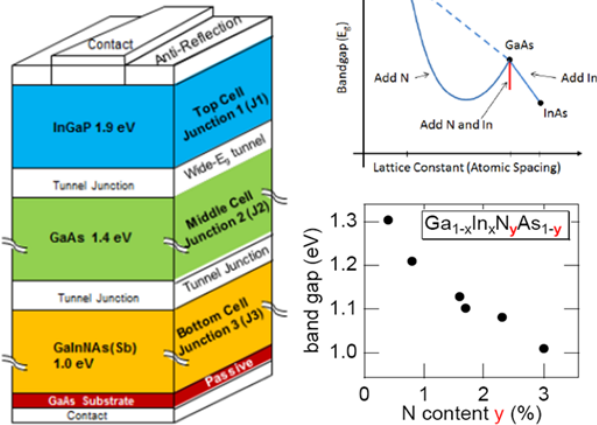


그림 7. InGaP/InGaAs/InGaAsN 3중접합 태양전지 기술^[19]

하여 4중접합 구조를 구현할 수 있다는 장점이 있다.^[19] Solar Junction은 2016년 격자정합 구조의 InGaP/GaAs/InGaAsN/Ge 4중접합 태양전지를 개발하였으며, 우주 환경 조사 조건(AM0)에서 33%의 효율을 기록하였다.^[18]

일본의 Sharp는 MOCVD(metalorganic chemical vapor deposition) 기반의 1.0 eV InGaAs 에피성장 기술을 연구하여, 2013년 지표면 조사 조건에서 37.9%(AM1.5G),^[20] 집광 조사 조건에서 44.4%(AM1.5D, 302 suns) 효율의 InGaP/GaAs/InGaAs 3중접합 태양전지 개발에 성공하였

다.^[21] In 조성 30%의 1.0 eV InGaAs 물질은 상대적으로 제어가 쉬운 3성분계 화합물이지만 GaAs 기판에 비해 격자상수가 2.1% 정도 더 크기 때문에, 에피성장 시 관통 전위 결함(threading dislocation defect)이 생성되어 태양전지 효율이 저하되는 문제가 있다. 이를 극복하기 위해 Sharp는 InGaAs 박막의 격자상수를 단계적으로 변화시키는 metamorphic 성장 기술과 태양전지 구조를 역순으로 성장시키는 inverted 성장 기술을 연구하여, 그림 8과 같은 IMM(inverted metamorphic) 구조의 InGaP/GaAs/InGaAs 3중접합 태양전지를 제작하고 격자부정합 결함 발생에 의한 효율 저하 문제를 최소화하였다.^[20]

미국의 신재생에너지 연구소 NREL은 격자상수를 두 번 변화시키는 metamorphic 성장 기술을 연구하여, 2014년 집광효율 45.7%(AM1.5D, 234 suns)의 InGaP/GaAs/InGaAs/InGaAs 4중접합 태양전지 개발하였다.^[22] 그림 9와 같이 InGaP 기반의 graded buffer 층을 두 번 사용하여 In 조성 30%의 1.0 eV InGaAs 태양전지 셀과 In 조성 53%의 0.7 eV InGaAs 태양전지 셀 구조를 성공적으로 구현하였는데,^[23] 이는 IMM 다중접합 태양전지 기술의 발전 가능성을 보여준 결과로 볼 수 있다.

독일의 태양에너지 연구소 Fraunhofer ISE는 2014년

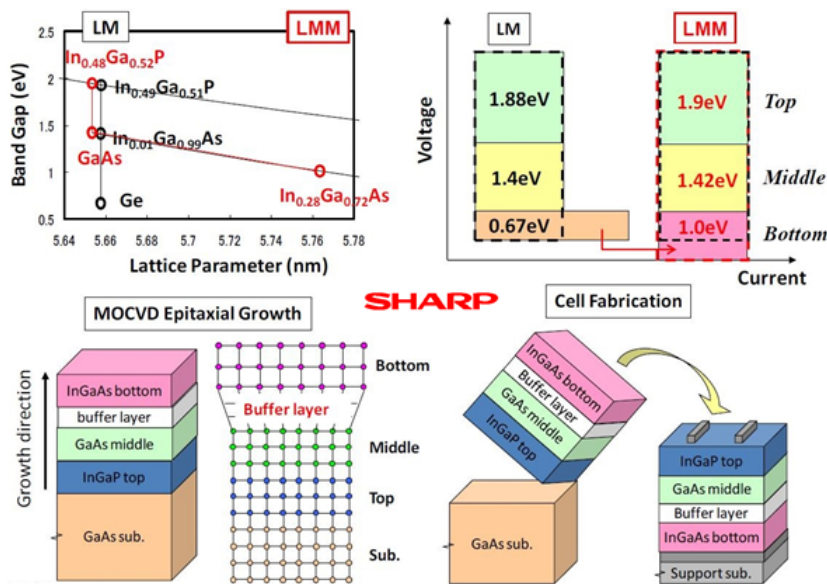


그림 8. IMM 3중접합 태양전지 기술^[21]

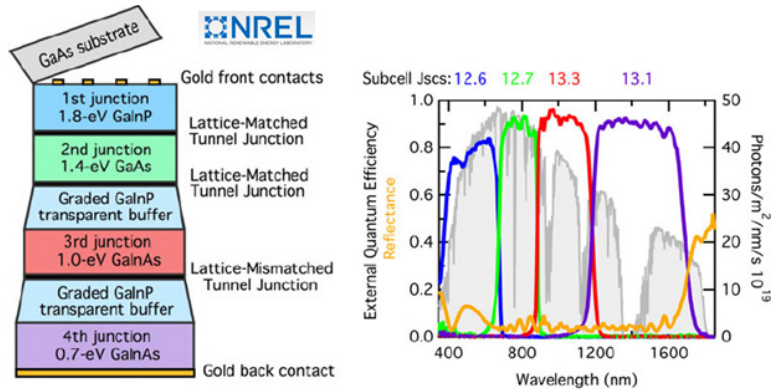


그림 9. IMM 4중접합 태양전지 기술^[23]

프랑스의 Soitec과 함께 wafer bonded InGaP/GaAs/InGaAsP/InGaAs 4중접합 태양전지를 개발하여 46.0% (AM1.5D, 302 suns)의 집광효율을 기록하였는데, 이는 현재까지 세계 최고 효율 기록으로 유지되고 있다.^[24] Surface activated wafer bonding 기술을 이용하여 그림 10과 같이 GaAs 기판에 역방향으로 성장한 InGaP/GaAs 2중접합 태양전지와 InP 기판에 정방향으로 성장한 InGaAsP/InGaAs 태양전지를 표면결함 없이 접합하고 GaAs 기판을 다시 떼어내는 것이 핵심 기술이다.^[25] 이러한 wafer

bonded 태양전지의 최대 장점은 두 개의 기판을 사용할 수 있기 때문에, 격자부정합에 의한 에피결함 발생과 효율 저하 문제로부터 자유롭다는 점이다.

우주용 태양전지 전문 업체인 미국 Spectrolab에서도 이러한 wafer bonded 태양전지 기술을 연구하고 있으며, 2013년 그림 11과 같은 2.17/1.68/1.40/1.06/0.73 eV 밴드갭 조합의 5중접합 태양전지를 개발하여 AM1.5G 기준 세계 최고 효율 기록(38.8%)을 달성하였다.^[26] 2015년에는 AM0 기준 36.0% 효율의 우주용 5중접합 태양전지를 개발하였는데,^[27] 이 역시 세계 최고 효율의 우주용 태양전지로 기록되고 있다. Spectrolab은 현재 wafer bonded 6중접합 태양전지 기술을 연구하고 있으며, AM0 기준 38.0% 효율 달성을 목표로 하고 있다.^[27]

국내에서는 한국나노기술원, 한국광기술원, 한국과학기술

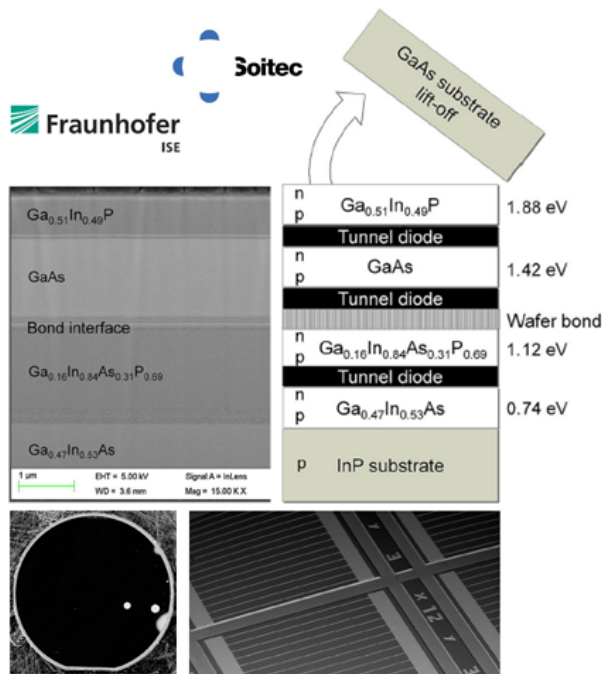


그림 10. Wafer bonded 4중접합 태양전지 기술^[25]

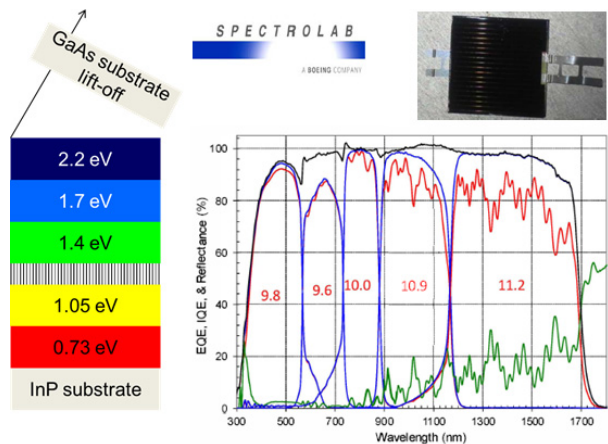


그림 11. Wafer bonded 5중접합 태양전지 기술^[26]

TC	n-ohmic	n-GaAs
	Window	n-AlInP
	Emitter	n-InGaP
	Base	p-InGaP
	BSF	p-AlGaInP
MC	TJ	p-AlGaAs
	TJ	n-InGaP
	Window	n-InGaP
	Emitter	n-GaAs
	Base	p-GaAs
BC	BSF	p-InGaP
	TJ	p-GaAs
	TJ	n-GaAs
	Window	n-InGaP
	Emitter	n-Ge
		p-Ge (100) substrate

InGaP/GaAs/Ge 3J structure

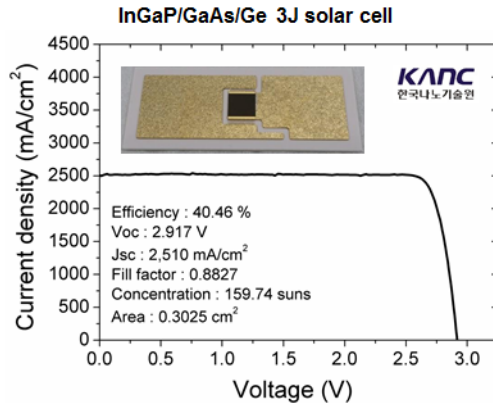


그림 12. 국내의 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지 기술^[28]

술연구원 등의 연구기관과 광주과학기술원, 아주대학교, 경북대학교 등의 대학교, LG 전자 등의 기업을 중심으로 III-V 태양전지 연구를 진행하고 있으며, 해외 연구그룹과의 기술 격차를 줄여나가고 있다. 특히, 한국나노기술원은 2015년 그림 12와 같은 집광효율 40.46%(AM1.5D, 160 suns)의 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지를 개발하여, 세계 수준의 집광형 태양전지 제작에 성공하였다.^[28] 또한, LG 전자는 2016년 29.3%(AM1.5D, 50 suns)의 GaAs 단일접합 태양전지와 21.4%(AM1.5G)의 InGaP 단일접합 태양전지를 개발하고, 2017년 32.8%(AM1.5G)의 InGaP/GaAs 2중접합 태양전지를 개발하여 각 구조별 세계 최고 효율 기록을 갱신하였다.^[4,29]

플렉시블 III-V 태양전지 연구동향

앞에서 기술한 집광형 III-V 태양전지는 대부분 기판을 포함한 벌크 형태로 제작되어 왔지만, 최근 ELO(epitaxial

lift-off) 기술을 이용한 플렉시블 박막형 III-V 태양전지 제작 기술이 개발되어 주목받고 있다. ELO 기술은 그림 13과 같이 희생층(sacrificial layer)이 삽입된 반도체 소자 에피구조를 성장한 후, 선택적 식각 용액으로 희생층만 제거하여 GaAs 기판을 분리시키는 것이다.^[30] 이러한 방법을 이용하여 효율 특성과 소자 안정성이 우수한 III-V 태양전지를 얇은 필름 형태로 제작할 경우, 자동차나 항공기, 선박 등 제한된 면적의 유선형 동체에 적합한 태양광 패널로 활용할 수 있다. 또한, 분리된 GaAs 기판은 표면처리 과정을 거쳐 재사용할 수 있기 때문에, III-V 태양전지의 저가화 기술로도 주목받고 있다.

고효율 III-V 태양전지를 이용한 플렉시블 태양전지 제작 기술은 미국과 일본의 기업을 중심으로 개발되고 있다. 미국의 Alta Device는 2012년 세계 최고 효율(28.8%, AM1.5G)의 플렉시블 GaAs 태양전지를 개발하였으며, AeroVironment의 무인기(Puma) 비행 실험에서 플렉시블 GaAs 태양전지 장착 시 비행시간이 2.5시간에서 9시간으로 증가하는 것을 확인하였다.^[11] 또한, 2014년에는 그림 14

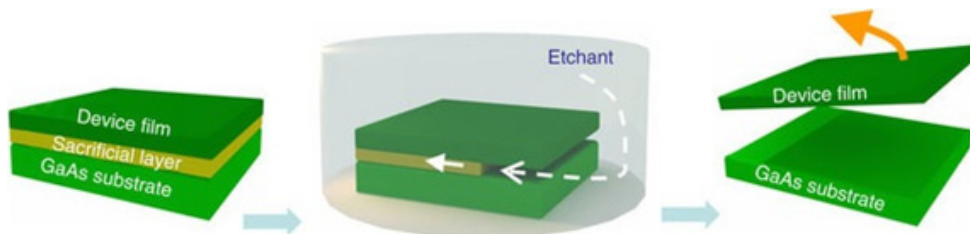


그림 13. GaAs 기판 분리를 위한 ELO 기술^[30]

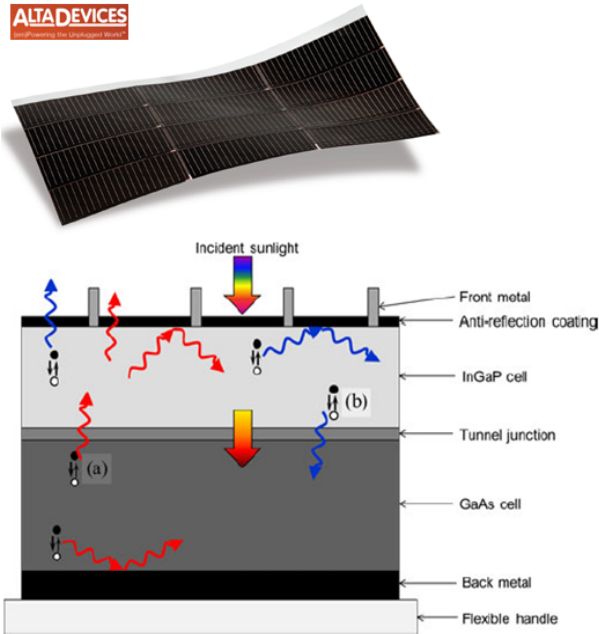


그림 14. 플렉시블 InGaP/GaAs 2중접합 태양전지 기술^[11,31]

와 같은 플렉시블 InGaP/GaAs 태양전지를 개발하여, 박막형 2중접합 태양전지 세계 최고 효율(31.6%, AM1.5G)을 기록하였다.^[31] 효율 29%(AM1.5G), 단위 무게 114 g/m²의 플렉시블 InGaP/GaAs 태양전지 셀과 모듈을 제품화하였으며,^[11] 2016년 Hanergy의 태양광 자동차에 탑재하여 주목을 받았다.^[32]

미국의 MicroLink Device는 2012년 그림 15와 같은 6인치 wafer ELO 공정을 개발하고,^[33] IMM AlGaInP/GaAs/InGaAs 3중접합 구조의 플렉시블 태양전지 제작하였다.^[34] 2017년 미국 에너지성(Department of Energy)으로부터 NREL의 IMM 태양전지 기술에 대한 사용 권한을 획득하고, 우주용 플렉시블 IMM 태양전지 기술을 개발하고 있다.^[35] 최근 효율 31%(AM1.5G), 단위 무게 250 g/m²의 플렉시블 AlGaInP/GaAs/InGaAs 태양전지 셀과 모듈을 제품화하였으며, 37.7%(AM1.5G), 32.3%(AM0) 효율의 IMM 3중접합 태양전지 개발 결과를 발표하였다.^[36]

InGaP/GaAs/InGaAs 3중접합 태양전지 세계 최고 효율 기록(37.9%, AM1.5G)을 보유하고 있는 일본의 Sharp는 그림 16과 같은 우주용 플렉시블 IMM 3중접합 태양전지 셀과 모듈 제작 기술을 개발하였다.^[37] 2017년 효율

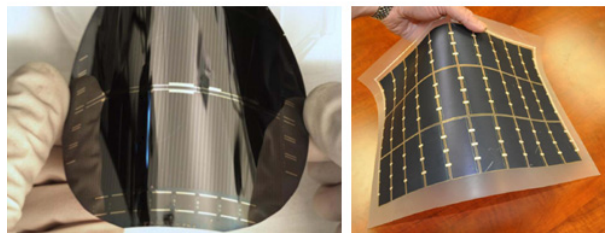
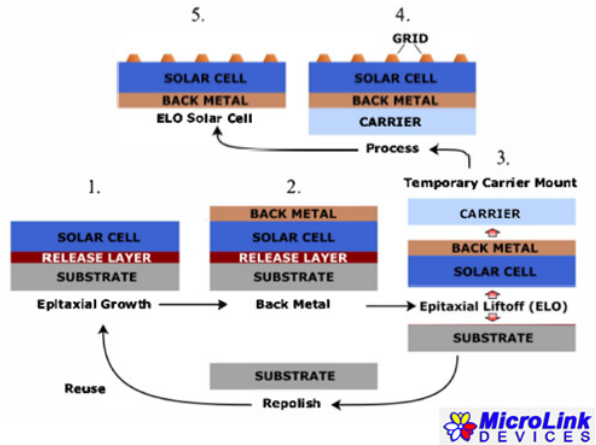


그림 15. 6인치 wafer 기반의 플렉시블 IMM 3중접합 태양전지 공정 기술^[33,34]

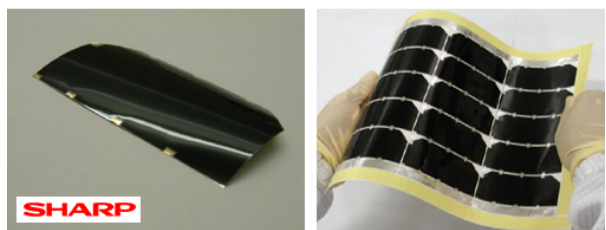
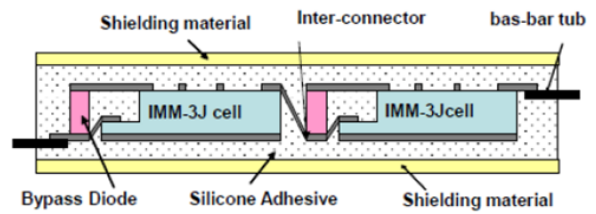


그림 16. 우주용 플렉시블 IMM 3중접합 태양전지 기술^[37]

32.1%(AM0), 비출력 150 W/kg의 우주용 플렉시블 태양전지 셀과 모듈을 제작하고, 방사선, 온도, 습도, 진동 등의 신뢰성 테스트를 진행하여 우주 환경 사용에 문제가 없음을 확인하였다.^[37]

국내에서도 일부 대학과 연구기관에서 그림 17과 같은 플렉시블 III-V 태양전지 제작 기술에 대한 연구를 진행하고 있다. 광주과학기술원은 2015년 효율 13.2%(AM1.5G)

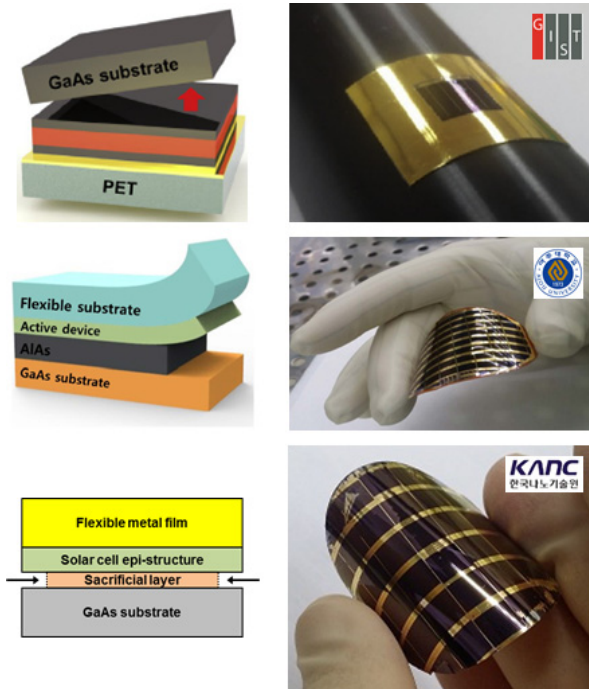


그림 17. 국내의 플렉시블 III-V 태양전지 기술^[37]

의 플렉시블 GaAs 태양전지를 PET 필름 위에 제작하였으며,^[38] 아주대학교는 2016년 2인치 wafer ELO 공정을 개발하고 효율 22.08%(AM1.5G)의 플렉시블 GaAs 태양전지를 제작하였다.^[39] 한국나노기술원에서는 2016년 효율 27.79%(AM1.5G)의 플렉시블 InGaP/GaAs 2중접합 태양전지를 금속 박막 위에 제작하였으며, 1 cm 반경의 굽힘 테스트를 통해 유연 소자 동작에 문제가 없음을 확인하였다.^[40]

초고효율 III-V 태양전지 향후 전망

III-V족 화합물반도체 기반의 다중접합 태양전지는 앞으로의 발전이 더 기대되는 차세대 광전변환 소자이다. 현재까지 개발된 4중접합 태양전지 구조를 최적화하거나 고품위 6중접합 태양전지 구조를 구현할 경우, 50% 이상의 초고효율 태양전지 개발도 실현 가능할 것으로 예상되기 때문이다. 실제로 NREL에서는 1000배 이상 집광 시 50% 이상의 효율 달성을 목표로 IMM 6중접합 태양전지 에피성장 기술과 wafer bonded 6중접합 태양전지 제조공정 기술을 연구하고 있다.^[41]

고효율화를 위한 다중접합 기술과 더불어 III-V 태양전지의 저가화를 위한 기판 재사용 기술도 많이 연구되고 있다.^[42] NREL의 InGaP/GaAs/Ge 3중접합 태양전지 제조단가 분석 자료(그림 18)를 살펴보면, 2015년 기준 제조단가가 약 $\$40/W_{p(DC)}$ 이며 그중에서 Ge 기판이 차지하는 비용이 $\$33.86/W_{p(DC)}$ 로 매우 높은 것을 알 수 있다.^[14] 따라서 ELO 공정을 통해 박막형 소자를 제작하고 분리된 기판을 재사용할 경우, III-V 태양전지의 셀 가격을 현재의 25% 수준으로 낮추는 것이 가능하다.

최근에는 III-V 태양전지의 에피성장 비용을 줄이고 양산성을 높일 수 있는 고속 성장 기술도 활발히 연구되고 있다. NREL은 MOCVD에 비해 소스 사용량이 적고 에피

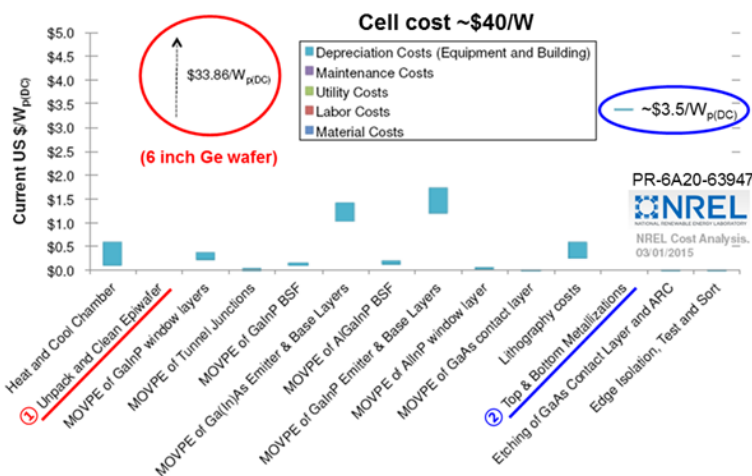


그림 18. InGaP/GaAs/Ge 태양전지 제조단가 분석 자료^[14]

성장 속도가 10배 이상 빠른 HVPE(hydride vapor phase epitaxy)를 차세대 에피성장 기술로 주목하고 있으며, 이를 이용한 III-V 태양전지 에피성장 연구를 진행하고 있다.^[43] 일본 AIST에서도 III-V 태양전지 저가화를 위한 HVPE 성장 기술을 연구하고 있으며,^[44] 동경대의 RCAST에서는 MOCVD reactor를 개조하여 성장속도를 극대화시키는 연구를 진행하고 있다.^[45]

이러한 연구동향과 그 동안의 발전 속도를 생각해보면, 머지않은 미래에 III-V 태양전지의 초고효율화 및 저가화가 실현될 것으로 짐작해볼 수 있다. 초고효율 III-V 태양전지의 가격 경쟁력이 확보될 경우, 항공기, 자동차, 선박, 건축물, 모바일 기기 등 설치 면적이 제한된 태양광 발전 분야에 광범위하게 사용될 것으로 전망된다. 특히, 기존 화석연료를 대체할 수 있는 차세대 태양전지 기술로 발전하여 신기후체제 출범 후의 에너지 위기 문제를 극복하는 원동력이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

This research was supported by the Technology Development Program to Solve Climate Changes of the National Research Foundation(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(2017M1A2A2087580). This work was also supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20163030013980).

참고문헌

[1] 정부 관계부처 합동, *제1차 기후변화대응 기본계획*, p. 28, 2016.

[2] 정부 관계부처 합동, *재생에너지 3020 이행계획(안)*, p. 2, 2017.

[3] C. Honsberg, C. Bowden, PVCDROM, (<http://www.pveducation.org/pvcdrom>)

[4] M. A. Green et al., *Solar cell efficiency tables (version 51)*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 26, 3–12, 2018.

[5] National Renewable Energy Laboratory, (<http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>).

[6] J. M. Woodall and H. J. Hovel, *High-efficiency Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs solar cells*, Appl. Phys. Lett. 21, 379–381, 1972.

[7] P. T. Chiu et al., *Continued progress on direct bonded 5J space and terrestrial cells*, Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2014.

[8] Press Release, *Fraunhofer Institute for solar energy systems*, 2014, (<http://www.ise.fraunhofer.de/en>)

[9] M. Bosi and C. Pelosi, *The potential of III-V semiconductors as terrestrial photovoltaic devices*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 15, 51–68, 2007.

[10] Spectrolab Inc., a Boeing company, (<https://www.spectrolab.com>)

[11] Alta Devices Inc., a Hanergy company, (<https://www.altadevices.com>)

[12] Arzon Solar LLC. (<http://arzon solar.com>)

[13] Suncore. (<http://suncoreus.com>)

[14] K. A. W. Horowitz et al., *A Bottom-up Cost Analysis of a High Concentration PV Module*, Proceedings of the 11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, 2015.

[15] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, p. 106, 2011: John Wiley & Sons, Ltd.

[16] S. R. Kurtz et al., *Projected performance of three- and four-junction devices using GaAs and GaInP*, Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997.

[17] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, p. 206, 2005: Cambridge University Press.

[18] Solar Junction Corporation, (<http://www.sj-solar.com>)

[19] M. Wiemer, V. Sabnis, and H. Yuen, *43.5% Efficient Lattice Matched Solar Cells*, Proceedings of SPIE 8108,

- 810804, 2011.
- [20] K. Sasaki et al., *Development of InGaP/GaAs/InGaAs Inverted Triple Junction Concentrator Solar Cells*, Proceedings of the 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, 2013.
- [21] Sharp Corporation, (<http://www.sharp-world.com/corporate/news/130614.html>)
- [22] National Renewable Energy Laboratory, (<https://www.nrel.gov/news/press/2014/15436.html>)
- [23] R. M. France et al., *Quadruple-Junction Inverted Metamorphic Concentrator Devices*, IEEE J. Photovoltaics 5, 432–437, 2015.
- [24] Fraunhofer ISE, (<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>)
- [25] F. Dimroth et al., *Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 22, 277–282, 2014.
- [26] P. T. Chiu et al., *35.8% space and 38.8% terrestrial 5J direct bonded cells*, Proceedings of the 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2014.
- [27] P. T. Chiu et al., *High performance 5J and 6J direct bonded (SBT) space solar cells*, Proceedings of the 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2015.
- [28] Y. Kim et al., *Efficiency Enhancement of InGaP/InGaAs/Ge Solar Cells with Gradually Doped P-N Junction Active Layers*, Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017.
- [29] M. A. Green et al., *Solar cell efficiency tables (version 49)*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 25, 3–13, 2017.
- [30] C. W. Cheng et al., *Epitaxial lift-off process for gallium arsenide substrate reuse and flexible electronics*, Nat. Commun. 4, 1577, 2013.
- [31] B. M. Kayes et al., *Flexible Thin-Film Tandem Solar Cells With >30% Efficiency*, IEEE J. Photovoltaics 4, 729–733, 2014.
- [32] Hanergy Holding Group Limited, (http://www.hanergy.com/en/content/details_37_3602.html)
- [33] C. Youtsey et al., *Epitaxial Lift-Off of Large-Area GaAs Thin-Film Multi-Junction Solar Cells*, Proceedings of CS MANTECH Conference, 2012.
- [34] J. Adams et al., *Demonstration of multiple substrate reuses for inverted metamorphic solar cells*, Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012.
- [35] MicroLink Devices Inc. (<http://mldevices.com>)
- [36] C. Youtsey et al., *High-efficiency and Light-weight Epitaxial Lift-off Multi-junction Solar Cells for Aero-space Applications*, Proceedings of Global Photovoltaic Conference, 2018.
- [37] M. Imaizumi et al., *Qualification Test Results of IMM Triple-Junction Solar Cells, Space Solar Sheets, and Lightweight&Compact Solar Paddle*, E3S Web of Conferences 16, 03012, 2017.
- [38] Y. H. Lee et al., *Fabrication and analysis of thin-film GaAs solar cell on flexible thermoplastic substrate using a low-pressure cold-welding*, Curr. Appl. Phys. 15, 1312–1317, 2015.
- [39] S. M. Moon et al., *Highly efficient single-junction GaAs thin-film solar cell on flexible substrate*, Sci. Rep. 6, 30107, 2016
- [40] S. Moon et al., *Flexible InGaP/GaAs Double-Junction Solar Cells Transferred onto Thin Metal Film*, Curr. Photovoltaic Res. 4, 108–113, 2016
- [41] J. F. Geisz et al., *Building a Six Junction Inverted Metamorphic Concentrator Solar Cell*, Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017.
- [42] K. Lee et al., *Non-Destructive Wafer Recycling for Low-Cost Thin-Film Flexible Optoelectronics*, Adv. Funct. Mater. 24, 4284–4291, 2014.
- [43] K. L. Schulte et al., *GaInP Solar Cells Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy*, Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017.
- [44] R. Oshima et al., *Characterization of GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy in horizontal reactor*, Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017.
- [45] H. Sodabanlu et al., *Extremely high-speed GaAs growth by MOVPE for low-cost PV application*, Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017.