

태양전지-지구 에너지원이자 우주항해의 시작

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmag.1.4.4>

한일기

Solar Cells – the Energy Source for Earth & the beginning of Space Exploration

Il Ki Han

About 170 years has been passed since the concept of photovoltaic has been suggested by French physicist Alexandre-Edmond Becquerel. Now the highest efficiency of solar cell has reached up to 44% by III-V multi-junction solar cells with concentrator. Those multi-junction solar cells are suitable as energy source for spaceships. On the other hand, the cell efficiency of solar cell for electric power generation as energy source for Earth has is going to be saturated although commercial solar cell efficiency is around 20%. In the part 1 of this article, the history of III-V multi-junction solar cells which have been adapted for spaceships is explained and in the part 2, new approach for the improvement of cell efficiency is suggested as the energy source for Earth.

Part 1. 우주와 태양전지

우주탐사의 에너지-태양전지

진공도가 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-17}$ Torr인 우주에서 태양전지는 우주선이나 우주인에게 에너지를 전달해 주는 원동력이다. 2014년 11월 12일 오전, 유럽 우주국에서 11년 전에 발사된 로제타호가 드디어 목성 주변의 혜성에 안착했다. 확률만 보면 실패하는 게 정상일 수 있었던 일을 성공했다는 점에서 유럽은 우주과학에서도 자존심을 회복했고, 인류는 러시아의 첫 우주인, 미국의 달 착륙 이후, 첫



[Fig. 1] Satellite Rosetta with solar cell (Copyright: ESA/AOES Medialab)

혜성 착륙이라는 또 다른 우주역사를 이루었다. 그러나 기쁨도 잠시, 로제타호는 음지에 착륙함으로써 태양전지로부터 에너지를 공급받지 못하게 되어 당분간 동면에 들어갔기 때문이다. 최근 국내 영화계를 뜨겁게 한 인터스텔라에는 태양전지를 에너지원으로 한 드론이 잠시 등장한다. 주인공은 드론을 해킹하여 농사에 사용할 에너지원으로 이용하려고 한다. 태양전지를 탑재한 드론은 먼 미



<저자 약력>

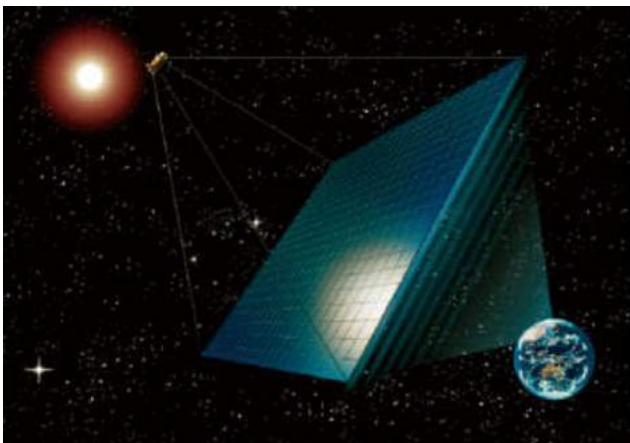
한일기 박사는 연세대학교 물리학과에서 고체물리 전공으로 이학박사학위를 취득하고, 미국 University of Maryland에서 post-doc. 과 방문연구를 수행하고 1988년부터 한국과학기술연구원에서 재직중이다. (hikoel@kist.re.kr)

래가 아닌 현재에도 가동되고 있다.

화석연료대신 새로운 에너지를 찾고자 하는 인류의 바람은 우주에서 전기를 얻고자 하는 꿈으로 이어진다. 2013년도에 일본의 한 건설회사는 달에 거대한 태양광 발전 기지를 건설해서 전 인류가 직면한 에너지 문제를 해결하겠다는 계획을 발표한 바 있고, 달의 적도에 설치한 태양광 패널로 발전한 전기를 레이저 빔이나 마이크로 파로 변환해서 지구로 보낸다는 원대한 계획이며, 지금부터 준비하여 2035년부터는 건설하겠다고 한다. 실제로 그때쯤이면 그런 계획이 꿈이 아닌 현실로 다가올 지도 모른다. 우주항공 분야의 선진국에서는 또한 지구 상공을 도는 태양광 발전 위성도 개발하려고 한다. 원자력 발전소와 맞먹는 1 GW 급 태양광 발전위성을 발사시킨다는 계획이다.

이처럼 진공도가 극히 높은 우주에서 태양전지를 통한 에너지 생산은 우주탐사는 물론 지구에서 필요한 에너지원으로 새롭게 부각되고 있다. 이는 우주에서 태양광의 세기가 지상의 감절에 달하고, 태양광을 수집하는 시간도 최대 5배이어서 동일한 태양전지 셀 크기로 더 많은 전력 생산이 가능하기 때문이다.

그러면 우주에서는 어떤 종류의 태양전지가 사용될까? 반도체를 연구하는 사람들 중에 지구는 실리콘 별이라는 농담을 가끔 한다. 그래서 실리콘 칩이나 실리콘 태양전지가 판을 칠 수밖에 없다는 이야기다. 그러나 우주에서는 실리콘보다는 화합물반도체 기반 태양전지가 더 선호된다. 동일한 면적에서 최고 효율의 에너지를 얻을 수 있기 때문이다. 2012년 6월 중국이 발사한 '선저우 9호 유인우주선'은 GaAs 기반 3접합 태양전지를 탑재하였는데



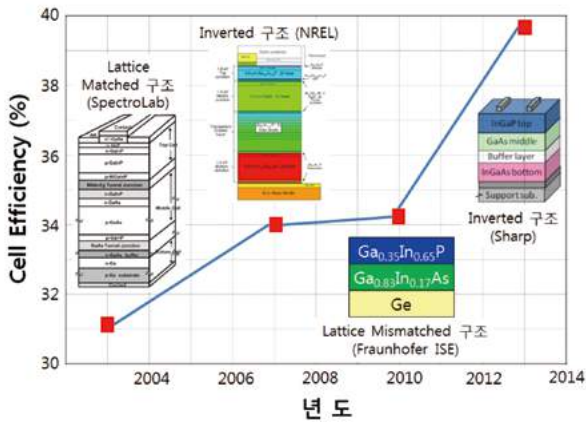
[Fig. 2] Concept of Solar Power System in space (Copyright: USEF: Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer, Japan)

기존 결정질 실리콘 태양전지에 비하여 에너지를 50% 가량 더 얻을 수 있었다고 한다. 이에 따라 탐승한 우주비행사가 생활하는 14일간 필요한 전력도 모두 태양전지로 공급할 수 있었고, 기존에는 우주비행사가 음식을 가열할 수 없어 찬 음식을 먹어야 했지만 이제는 가열된 음식을 먹을 수 있게 되었다고 한다.

혜성탐사선 로제타호, 영화 인터스텔라, 또는 우주에서의 에너지 개발 등의 예에서 설명하듯이 미래에는 지금보다 더 우주로 관심을 갖게 될 것이다. 관심이 증가할수록 더 많은 에너지를 우주로부터 생산해야 하는 이슈가 부각될 것이며 이에 따른 태양전지는 중요한 에너지원으로 부각될 수밖에 없을 것이다. 여러 종류의 태양전지 중에서 에너지 효율, 면적(이는 무게와 직결됨), 그리고 우주에서의 광자/전자 등에 의한 충돌에도 견디어내는 특성(radiation resistance) 등을 고려할 때 비록 가격측면에서 고가라는 단점이 있으나 화합물 반도체 기반 태양전지가 우주에서의 에너지원으로 가장 적합하다.

우주에 적합한 화합물반도체 태양전지

태양전지는 1839년 프랑스 물리학자 Alexandre-Edmond Becquerel에 의하여 처음 제안된 이후 1977년도에 이르러서야 효율 20% 초반의 GaAs 화합물반도체 태양전지가 개발된 후 2012년도에 Alta Devices라는 태양전지 회사에서 박막으로 28.8%를 개발한 것이 최대이다. 그러나 GaAs 단일접합 태양전지로는 태양전지의 효율을 증대시키는데 한계가 있다. 태양으로부터 오는 태양 스펙트럼의 일부만을 에너지로 전환하는데 사용하기 때문이다. 따라서 화합물 반도체 기반 태양전지의 효율을 더 증대시키기 위하여 GaAs 단일접합 셀에 추가로 2개의 셀을 더하여 총 3개의 셀로 구성된 태양전지(3접합 태양전지)를 1983년도에 미국 North Carolina 주립대학에서 처음 개발하였다. 당시에 InGaP/GaAs/Ge 물질구조로 이루어진 3접합 태양전지를 개발하였는데 효율은 16%여서 이미 1977년도에 개발된 GaAs 단일접합 태양전지의 효율보다 낮은 특성을 나타내었다. 그러나 1988년도에 지나면서 3접합 태양전지의 효율은 GaAs 단일접합 태양전지의 효율과 비슷한 수준에 도달하고 이후 1993년도에 이르러 마침내 GaAs 단일접합 태양전지의 효율을 크게 웃돌기 시작하였고 현재는 집광기 없이 37.9%에 이르고 있다.



[Fig. 3] Development of 3-junction InGaP/GaAs/Ge solar cell

InGaP/GaAs/Ge로 구성된 3접합 태양전지는 격자상수가 거의 일치하여 (In 51%, Ga 49%인 InGaP 일 경우) Ge를 기판으로 할 때 그 위에 Ge 셀, GaAs 셀, InGaP 셀 구조를 성장하기 쉽다는 장점이 있고, 물질의 에너지 밴드 갭이 0.7eV(Ge), 1.4eV(GaAs), 1.9eV(InGaP)와 같이 다르기 때문에 태양의 스펙트럼을 최대한 받을 수 있다는 장점이 있어서 많은 관심을 받아 왔다. 그림 3은 연도별 3접합 태양전지의 효율 증대 변화를 나타낸 것이다. 2003년도에 미국 Spectrolab에서 격자정합(lattice matched) 구조로 효율 30.1%에 도달하였고, 2008년도에 미국 NREL에서 inverted 구조로 효율 34%에 도달하였다. 앞서 언급한 격자정합구조는 Ge를 기판으로 Ge, GaAs, InGaP 셀 구조를 순차적으로 성장시키는 방식이라면, Inverted 구조는 GaAs를 기판으로 하여 역으로 에너지가 큰 InGaP, GaAs, 그리고 InGaAs (에너지 밴드갭 1.0eV) 순서로 셀 구조를 성장하는 방식이다. 마지막으로 성장된 InGaAs 셀 에피층을 Si, 금속 박막, 유리 등 다른 기판과 접합시킨 후 기판으로 사용된 GaAs를 제거하면 InGaP, GaAs, InGaAs 셀을 가진 3접합 태양전지가 제작된다. 이와 같은 구조는 GaAs 기판을 재활용한다는 점에서 가격을 절감할 수 있고, InGaAs 셀 층을 금속박막으로 접합시킬 경우 flexible 태양전지도 가능하다는 점에서 관심을 받아 왔다.

3접합 태양전지 외에 효율을 더 증대시키기 위해서 4접합 태양전지에 대한 연구도 진행되었다. 초기의 4접합 태양전지는 InGaP/GaAs/Ge 3접합에서 GaAs와 Ge 사이에 에너지 밴드 갭이 1.1 eV인 InGaAs 물질을 이용한 4번째 셀을 삽입하는 것이었다. 초기의 이 4접합 태양전지의 효율은 오히려 3접합 태양전지보다 낮게 제작되

었는데 2013년도에 들어와 독일 Fraunhofer ISE로부터 spin-off 된 Soitec에 의하여 297 suns에서 44.7%에 도달하였고 비로소 3접합 태양전지 효율 44.4%(942 suns)를 앞서게 되었다(참고로 앞에서 언급한 3접합 태양전지는 모두 집광기를 사용하지 않은 1sun에서 비교한 것인데 반하여 여기에서는 집광기를 사용한 결과를 비교하였음, 이는 4접합 태양전지에 대한 1sun효율이 알려지지 않았기 때문에 부득이 집광기를 사용한 결과를 비교한 것임). 여기에서 재미있는 것은, 앞에서 언급한 바와 같이 GaAs 단일접합 태양전지보다 더 높은 효율의 태양전지를 위해서 시도한 3접합 태양전지의 초기 효율이 오히려 단일접합 GaAs 태양전지보다 낮게 나온 것처럼 4접합 태양전지도 초기에는 3접합 태양전지보다 낮은 효율을 보였지만 결국에는 3접합 태양전지의 효율을 능가하는 결과를 얻었다는 것이다. 1 sun에서 현재까지 공인된 가장 높은 효율은 Boeing-Spectrolab에서 개발한 5접합 태양전지로서 38.8%의 효율을 나타내었으나 집광기를 사용한 결과는 보고되지 않아서 집광기를 사용한 5접합 태양전지에 의한 최고효율은 아직 도달하지 못한 상황이다.

일반적으로 화합물반도체 태양전지는 크게 2가지 큰 장점이 있어서 집광기를 사용한다. 첫째, 집광기를 사용하게 되면 태양전지의 효율은 그대로 유지되면서(사실은 효율은 좀 더 올라가는데 아래 두 번째 장점에서 설명된다) 집광기의 배율만큼 태양전지의 면적을 감소시킬 수 있는 점이다. 이는 동일한 효율에서 면적을 감소시킬 수 있으므로 그만큼 원가를 감소시킬 수 있다는 장점이 있게 된다. 둘째, 집광기를 사용하면 단위면적에 집광비율만큼 더 많은 광자가 입사되어 그만큼 전자-홀의 개수가 늘어나 open circuit voltage의 증가를 가져오고 이는 오히려 태양전지의 효율을 증대시키는 결과를 가져온다는 점이다. 화합물반도체 외에 가장 많은 시장을 형성하고 있는 Si 태양전지의 경우도 집광기를 사용할 수 있다. 그러나 Si 태양전지의 경우 최대 20배 정도까지는 효율이 증가하는 현상이 나타나지만 이후에는 오히려 효율이 감소하는 특성이 나타나 사실 Si 태양전지에는 집광기를 사용하지 않는 것이 일반적이다. 반면 GaAs등 III-V 화합물반도체의 경우 수백 배 이상까지 집광이 가능하므로 화합물반도체 태양전지는 집광기를 사용하여 효율을 증대시키고 동시에 가격을 절감하는 방향으로 가게 된다. 다만, 우주에서의 경우 집광기 자체가 또 다른 무게 요소가 되므로 집광기를 사용하지 않는 대신 가급적 단위면적당 고효율의

태양전지를 활용하는 방향으로 진행되고 있다.

Part 2. 지구와 태양전지

200년 가까이 개발된 태양전지

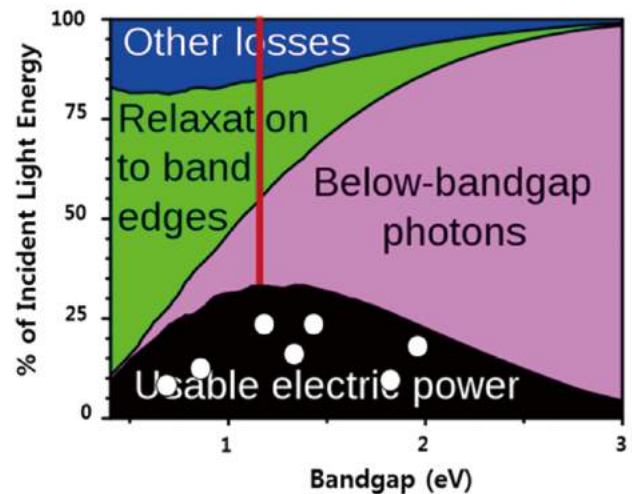
태양전지는 지구 환경을 보존하면서 지구 밖의 에너지 원으로부터 에너지를 얻을 수 있는 가장 좋은 방법 중의 하나이다. 태양전지는 1839년 Becquerel에 의해 처음 개념이 제시된 후 지금까지 200여 년간 꾸준히 연구개발되어 온 오래된 기술이지만 지구의 에너지 문제를 해결하는데 일부 기여할 것이라는 점에서 앞으로도 계속 국가적/인류적 관심과 연구의 대상이 될 것이다.

이와 같은 꾸준한 관심과 연구 개발 속에서 그 동안, Si, III-V, CIGS, DSSC, 유기태양전지, 그리고 최근에 폭발적인 관심을 갖게 된 페로브스카이트 태양전지 등 다양한 종류의 태양전지가 개발되어 왔다. 그러나 어느 종류의 태양전지 물질이 사용되든 기본적으로 모든 태양전지는 태양의 스펙트럼의 특성에 의지하고 영향을 받을 수밖에 없다. 태양으로부터 오는 태양광의 스펙트럼은 우주를 지나 지구 대기권에 진입하면서 수분, 산소, 질소 등 다양한 물질에 의하여 흡수·변형되고 지구 표면에 도달된 태양광은 그 크기가 감소되어 동일한 태양전지라도 우주에 비하여 지상에서의 효율은 작아질 수밖에 없다. 그러면 지구에 도달한 스펙트럼을 이용해서 얻어질 수 있는 태양전지의 효율은 얼마나 될까?

태양전지 효율은 이론적으로 어떻게 정해지나?

그림 4는 에너지 밴드 갭에 따라 태양전지에 입사될 수 있는 최대 태양광의 크기를 나타내는 개념도로서 Shockley-Queisser limit라 한다. 그림 4에서 x축은 태양전지의 에너지 밴드 갭이고 y축은 태양으로부터 입사되는 광의 크기를 나타내고 있다. 따라서 에너지 밴드 갭이 1.1 eV인 Si 태양전지의 경우 그림에서 적색 수직선이 Si 태양전지로 입사되는 태양광에 해당된다. 태양광이 Si 태양전지에 입사될 때 청색영역에 해당되는 약 15% 내외의 빛은 Si 표면에서 반사 등의 손실로 없어지고(그림 4에서 other loss부분), 그림에서 녹색영역에 해당되는 약 25% 내외의 빛은 Si 에너지 밴드 갭보다 에너지가 큰데 그 차이가 thermal loss로 손실되고(relaxation to

band edges), 분홍색 영역에 해당하는 약 20% 내외의 빛은 Si의 에너지 밴드 갭보다 작아서 투과로 손실된다(below-bandgap photons). 따라서 실제로 Si 태양전지에서 에너지로 변환될 수 있는 광은 입사광의 약 31% 내외가 되는데 이는 단일 Si 단결정 태양전지에서 얻을 수 있는 최대효율이라고 할 수 있다. 그림 4에서 흑색영역은 에너지 밴드 갭이 각각 다른 태양전지에서 얻을 수 있는 최대효율을 나타내고 있다. 흑색영역 내의 백색 점은 에너지 밴드 갭이 다른 태양전지에서 지금까지 개발된 최대효율을 나타낸 것인데 어느 에너지 밴드 갭에서도 이론적인 최대효율에 미치지 못하고 있고, 대부분 실험적 도달한계에 머물고 있다고 할 수 있다. 물론 그림 4의 적색 부분에 나타난 이론적 한계치는 단일 셀의 태양전지에 대한 것이다. 앞서 언급한 2접합, 3접합 태양전지를 활용할 경우에는 그림 4의 특성을 따르지 않고 따라서 효율은 더 증대될 수 있다. 그러나 2접합, 3접합 같이 다중접합 태양전지를 개발할 경우 효율은 증대하나 에너지 밴드 갭이 다른 이종물질을 적층해서 성장해야만 하므로 대단히 정밀한 성장기술과 설계기술을 요구하고 있다. 따라서 기존



[Fig. 4] Breakdown of causes for the Shockley-Queisser limit. The black height is energy that can be extracted as useful electrical power (the Shockley-Queisser efficiency limit); the pink height is energy of below-bandgap photons; the green height is energy lost when hot photogenerated electrons and holes relax to the band edges; the blue height is energy lost in the tradeoff between low radiative recombination versus high operating voltage. Designs that exceed the Shockley-Queisser limit work by overcoming one or more of these three loss processes. (Copyright: Wikipedia, the free encyclopedia)

에 잘 개발된 단일접합 태양전지로 그림 4의 흑색영역에 나타난 이론치를 넘을 수 있는 새로운 방법을 도입하는 것도 최근에 큰 주목을 받고 있으며 이에 대하여 아래 설명하고자 한다.

앞에서도 언급한 바와 같이 지금까지 200여 년에 가깝게 고효율 태양전지 개발에 관심을 가져왔으나 단일 셀의 경우 아직 이론적인 최대효율에 미치지 못하고 어느 정도 한계에 도달한 현 상황을 고려할 때, 즉 흑색영역에서 이론적인 한계치에 도달하기가 어려운 점을 고려할 때 이제는 태양전지 자체의 개선을 통하여 효율을 더 증대시키려는 노력보다는 손실로 없어지는 광 (그림에서 청색/녹색/분홍색 영역)을 태양전지로 보내서 에너지 증대에 기여하는 것이 더욱 바람직한 것으로 판단된다.

어떻게 하면 태양전지 효율을 더 높일 수 있을까?

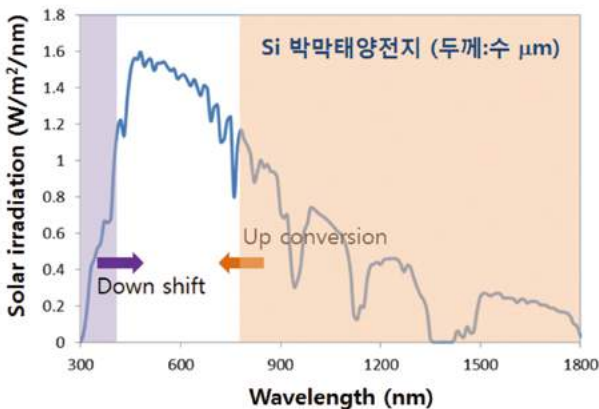
Si 박막태양전지를 예로 들어보자. Si 박막태양전지의 경우 태양광을 활용하는 범위는 그림 5에서와 같이 400 nm ~ 750 nm 범위에 지나지 않는다. 태양전지 종류마다 다르지만 지금까지 많은 태양전지 연구는 그림 5와 같이 태양광을 받아들이는 범위 내에서 전극, 반사, 재료 등의 차원에서 효율을 높이는 방법을 진행해왔고, 어느 정도 효율 증대에 한계에 도달하였다. 이제는 태양광을 활용하지 않은 영역의 파장범위를 태양전지에 활용하는 방법도 고려되어야 한다. 다시 Si 박막 태양전지의 경우 400 nm 보다 짧은 파장을 갖는 UV나 750 nm 보다 긴 파장을 갖는 적외선 등은 Si 박막태양전지에서 에너지를 얻는데 활용되지 못하고 손실이 된다. 따라서 손실되는 UV를 400 nm ~ 750 nm 범위의 빛으로 파장을 변

환시켜주는 Down shift 또는 down conversion, 투과되는 적외선을 400 nm ~ 750 nm로 파장을 변환시켜주는 Up conversion 기술을 사용하면 Si 박막태양전지의 효율은 더욱 증가될 것이다. 이와 같이 태양광 중 손실되는 빛을 태양전지에 유용한 빛으로 변환시켜 효율을 향상시킨다는 개념은 이미 오래된 개념이다. Dexter등은 1953년에 down conversion 개념을, 이보다 6년 후인 1959년에 Bloembergen은 Up conversion 개념을 제안하였다. 그러나 그로부터 70여 년이 지난 지금까지도 파장변환에 의한 효율 증대 결과는 여전히 난제로 남아있다.

파장변환 난제, 어떻게 해결할 것인가?

2013년 Chemical Society Review 지에 게재된 review article, 2009년도에 Energies 지에 게재된 review article 등은 태양전지의 효율을 더 증대시키기 위하여 ‘파장변환’ 이슈를 다시 내놓기 시작했다. 지난 70년 동안 여러 시도가 있었지만 해결하지 못한 문제를 다시 거론한 것이다. 이는 두 가지 방향에서 이해할 수 있다. 하나는 이미 앞에서 언급한 바와 같이 더 이상은 태양전지의 효율 증대를 기대하기 어려우니 다시 해묵은 주제를 꺼내어 재시도를 해보자는 것으로 이해된다. 태양전지의 효율 한계에 봉착한 요즘 시기적절한 연구주제일 것이다. 또 하나는 새로운 기술과 방법이 개발되어 이제는 그동안의 난제를 해결할 수 있는 가능성을 보았기 때문일 것이다.

파장변환을 통한 효율증대가 어려웠던 가장 큰 이유는 파장변환을 만들어 주는 재료의 변환효율에 기인한다. 파장변환 재료의 가장 대표적인 것은 백색 LED에 사용되는 형광체이다. YAG 계통의 형광체는 청색 LED로 여기되어 황색광을 발광하는데 그 변환효율은 90% 이상일 정도로 높다. 그러나 그 크기가 마이크로미터 범주여서 태양전지의 파장변환재료로 사용하기에는 적절하지가 않다. 예를 들면 Down shift (conversion)용 파장변환 재료는 일반적으로 태양전지 표면 위에 놓이게 되는데 크기가 마이크로미터 수준이면 태양광의 많은 부분을 반사시켜 오히려 태양전지의 효율을 더 감소시키기 때문이다. 결국 반사효과를 줄이기 위해서는 형광체의 크기를 마이크로미터에서 나노미터 수준으로 작게 하여야 하는데 이 부분이 지난 수십 년간 어려웠던 주제라 할 수 있다. 2000년대 나노기술의 중요성이 대두되고 연구가 활발히 진행



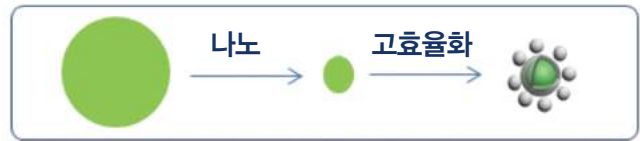
[Fig. 5] Absorption spectra of Si thin film solar cell (thickness: 400 ~ 750μm)

되면서 나노크기의 파장변환재료의 합성이 가능하여졌고 이에 따라 다시 파장변환 개념의 도입이 부각되기 시작하였다. 나노크기의 형광체 합성이 이루어졌다고 해도 아직 문제가 남아있다. 형광체가 마이크로미터 수준에서 나노미터 수준으로 작아지면서 표면/부피 비율이 증가하여 표면에 의한 효과가 커지면서 형광체의 변환효율이 감소하였기 때문이다. 변환효율의 감소는 태양전지 효율 증대에 전혀 도움이 될 수 없다. 따라서 재료의 측면에서 어떻게 하면 나노크기화와 동시에 높은 변환효율을 갖는 파장변환재료를 만드느냐가 파장변환 태양전지의 중요한 이슈 중 하나이다.

Down shift (conversion) 개념을 적용하기 위한 또 하나의 중요한 이슈는 저에너지로 파장 변환 된 빛을 어떻게 태양전지로 많이 보내느냐 하는 것이다. 일반적으로 파장변환재료를 통하여 파장 변환 된 광의 1/2은 대기중으로 빠져나가고 나머지 1/2만 태양전지로 흡수된다. 이는 에너지가 큰 1개의 광자를 Down shift (conversion)를 통하여 에너지가 작은 1/2개의 광자로 변환시킨 것이므로 태양전지의 효율 증대에 오히려 방해가 된다. 따라서 어떻게 하면 파장 변환 된 빛을 태양전지로 많이 (1/2보다 크게) 보내느냐가 중요한 이슈가 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 Down shift (conversion)에 의하여 태양전지의 효율을 증대시키기 위해서는 두 가지 중요한 이슈, 즉 나노크기의 고효율 파장변환 재료, 그리고 파장 변환 된 광을 대부분 태양전지로 흡수시키는 방법이 해결되어야 한다. 최근에 이르러 나노크기의 파장변환재료가 개발되고 나노포토닉스를 통한 흡수 증가에 대한 초기연구들이 발표되고 있다. 이와 같은 선행결과들은 파장변환을 통한 태양전지 효율 증대라는 난제를 해결하는데 긍정적인 전망을 주고 있다.

Up conversion의 경우에 가장 큰 이슈는 Down shift (conversion)와 마찬가지로 변환효율을 증대시키는 것이다. Up conversion의 경우 에너지가 작은 광자 2개가 1개의 에너지가 큰 광자로 변환되어야 하는데 이 가능성이 가장 좋아야 0.1%에 지나지 않는다. 이런 낮은 변환효율로는 태양전지 효율증대에 거의 도움이 되지 않는다. 따라서 Up conversion 파장변환재료의 효율을 현재보다 100배 이상 증대시키는 것이 주요한 이슈 중 하나가 될 것이다. 최근 Up conversion의 변환효율 증대를 위하여 Up conversion 파장변환 재료와 나노포토닉스를 융합하는 연구가 진행되고 있으며 어느 정도 가능성을 제시하고



[Fig. 6] High efficient nano-particle for the concept of down-conversion

있다.

KIST에서도 2012년부터 기존 태양전지의 효율증대를 위하여 앞에서 언급한 파장변환 이슈, 즉 Down shift (conversion)과 Up conversion 난제를 해결하는 연구를 수행하고 있다. Down shift (conversion)의 경우, 50 nm 이하의 파장변환용 형광체를 개발하였고 현재 개발된 형광체의 고효율화를 위한 다양한 연구를 진행하여 GaAs 단일 셀로 효율 29%에 근접한 성과를 도출하였다.

지구에서의 에너지는 언제든 부각될 수 있는 문제로 태양전지는 그 중 일부를 해결할 수 있는 중요한 방안이 될 것이다. 지난 200여 년 동안 태양전지의 효율을 증대시키기 위해 부단한 연구개발이 진행되었고 이제는 물질의 순도, 태양전지의 설계, 공정 등의 최적화로 더 이상의 효율 증대는 한계에 도달하게 되었다. 따라서 새로운 개념의 태양전지가 개발되거나 또는 기존에 잘 개발된 태양전지에 추가로 외부 기술을 적용하여 효율을 증대시키는 방법이 필요한 시점이다.

References

- [1] R. Williams, J. Chem. Phys. **32**, 1505 (1960).
- [2] J.M. Woodall and H.J. Hovel, Appl. Phys. Lett. **30**, 492 (1977).
- [3] E. Yablonovitch, O.D. Miller, S.R. Kurtz, 38th IEEE Photovoltaic Specialists Con. 001556 (2012).
- [4] <http://sustainnovate.ae/en/innovators-blog/detail/history-of-solar-power>
- [5] http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- [6] R.R. King et al., 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18, 2003, Osaka, Japan.
- [7] J.F. Geisz, S. Kurtz, M.W. Wanlass, J.S. Ward, A. Duda, D.J. Friedman, J.M. Olson, W.E. McMahon, T.E. Moriarty, and J.T. Kiehl, Appl. Phys. Lett. **91**, 023502 (2007).
- [8] F. Dimroth, M. Grave, P. Beutel, U. Fiedeler, C. Karcher, T.N.D. Tibbits, E. Oliva, G. Siefert, M. Schachtner, A. Wekkeli, A.W. Bett, R. Krause, M. Piccin, N. Blanc, C. Drazek, E. Guiot, B. Ghyselen, T. Salvetat, A. Tauzin, T. Signamarcheix, A. Dobrich, T. Hannappel and K. Schwarzburg, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **22**, 277 (2014).
- [9] P.T. Chiu, D.C. Law, R.L. Woo, S.B. Singer, D. Bhusari, W.D. Hong, A. Zakaria, J. Boisvert, S. Mesropian, R.R. King, N.H. Karam, IEEE J. Photovoltaics, **4**, 493 (2014).
- [10] W. Shockley and H.J. Queisser, J. Appl. Phys. **32**, 510 (1961).
- [11] D. L. Dexter, J. Chem. Phys. **21**, 836 (1953).
- [12] N. Bloembergen, Phys. Rev. Lett. **2**, 84 (1959).