

Truncated DCPC를 이용한 저배율 태양광 모듈 개발

이동길* · 김양규 · 이광훈 · 장원근 · 박영식
한국광기술원 광응용연구사업본부, 광주광역시, 500-779

Development of Low Concentrated Photovoltaic using a Truncated DCPC

Dong Kil Lee* · Yang Gyu Kim · Kwang Hoon Lee · Won Gun Jang · Young Sik Park

Photonics Research & Business Division, Korea Photonics Technology Institute, Gwangju 500-779, Korea

ABSTRACT:

LCPV modules under 5 suns consist of reflective optics and receiver modules, similar to a typical fixed concentration PV module. If they are to be used as a compound parabolic concentrator, which is filled with a dielectric material, a compact plate structure of the fixed CPV can be designed and built at a large acceptance angle. These types of flat-plate μ -LCPV modules are suitable for building integrated photovoltaic modules, facade applications, mobile devices, and small home appliances. Therefore, in this study, the possibilities for other application devices were studied and presented by designing and fabricating LCPCs for CPV modules.

Key words: CPV, BIPV, EIPV, DCPC, DTM

Nomenclature

n : refractive index

a : entrance surface diameter of cpc, mm

a' : acceptance surface diameter of cpc, mm

L : length of cpc

C : concentrate rate of cpc

V_{oc} : open circuit voltage, V

I_{sc} : short circuit volage, mA

P_{max} : max power, mW

EIPV : electronic integrated photovoltaic

PC : polycarbonate

DTM : diamond turning machine

NCD : natural crystal diamond

MCPCB: metal print circuit board

subscript

DCPC : dielectric compound parabolic concentrator

CPV : concentrated photovoltaic

HCPV : high concentrated photovoltaic

BIPV : building integrated photovoltaic

1. 서론

세계적으로 비약적인 성장 추세를 보이고 있는 태양광에너지 시장은 이제 에너지 대안을 넘어서 세계 각국이 성장 동력으로 주목하고 있다. 1990년대 초반 독일을 중심으로 일어나기 시작한 BIPV는 지난 10년간 약 24.3% 성장하였으며, 2013년 세계시장은 수 MW에 달할 것으로 예상된다. 2013년 국내 시장도 1,500억 원에 이를 것으로 전망되며, 이중 고효율 화합물 반도체 태양전지인 III-V Cell은 1980년 중반 개발이 시작되어 현재는 최고 효율이 40%에 달하지만, 고가로 인하여 우주용 등 특수한 용도에 주로 쓰여 왔으나, 최근 반도체 제조 및 패키지 공정 기술이 발전에 힘입어 저가격화됨에 따라 지상 응용이 눈에 두드러지게 증가하고 있는 추세이다. 특히 고효율 Cell을 이용한 저가격 고신뢰성 CPV 모듈의 잠재 시장 규모는 매우 클 것으로 예견되며, 기술적으로도 아직 개발 초기단계이어서 III-V Cell을 이

*Corresponding author: dklee@kopti.re.kr

Received March 21 2013; Revised April 10 2013;

Accepted April 18 2013

용한 CPV 모듈의 개발은 시기적으로 적절하다고 사료된다. 건물통합형응용분야는 최근 나타나기 시작하는 HCPV 지상응용 시장으로 미국, 영국, 독일 등 태양광 선진국들은 동 시장을 선점하기 위하여 각자 고유 모델의 고효율 Cell과 BICPV 모듈 개발을 시작하고 있다.

소형 저배율 집광 태양광 모듈을 위한 광학계로 채택한 CPC는 1960년대 중반 문헌에 등장하여 1966년 Winston과 Hinterberger가 처음으로 CPC를 체렌코프 카운터 집광기로서 사용할 수 있음을 보였다^{1,2)}. 한편 1976년 Winston이 CPC의 내부를 유전체로 충전함으로써 집광율을 높일 수 있다는 것을 밝혔으나, 높은 가격 때문에 DCPC가 실제로 집광 태양광 혹은 태양광 모듈에 적용되지는 않았다. 1996년 Brunotte는 DCPC를 고배율 집광태양광모듈에서 이차광학계를 사용하여 약 89%의 광학효율을 얻었다²⁾. 최근 들어 BIPV, EIPV 등 저배율의 고정 집광 태양광 모듈 응용에서 직사광뿐만 아니라 산란광까지 집속할 목적으로 DCPC가 사용되기 시작하였다. DCPC는 광학계로서 뿐 아니라 태양광모듈의 Cover Glass 기능을 대신할 수 있어, EIPV와 같은 콤팩트한 구조가 요구되는 태양광 응용분야에 널리 사용되어지고 있다^{5,6)}.

따라서 본 연구에서는 DCPC의 소형 EIPV 모듈에 적용을 위해, 유전체로 채워진 DCPC를 설계하고 태양광 모듈의 원형을 제작하여 시험함으로써, 앞서 기술한 태양광 응용 분야에서 DCPC가 저배율 태양광 모듈에서 적합하다는 것을 제시하고자 하였다.

2. 저배율 마이크로 집광모듈 원형 제작

2.1 DCPC 광학설계

본 연구에서는 DCPC 원형의 광학설계를 위해, LightTools® (Version 7.1, ORA社)의 Compound Concentrators Utility를 사용하여 수행하였다.

사용된 III-V Cell은 5 × 6 mm의 InGaP/ InGaAs/Ge Triple junction Cell(M-Com社, Taiwan)을 사용하였고, DCPC는 원형 제작의 가공성을 고려하여 유전체인 PC(n=1.5)가 채워진 형태를 기본으로 하여 설계하였다. 5 × 6 mm III-V Cell 위에 DCPC를 통해 들어온 입사광이 내접하기 위해서는 DCPC의 수광면 지름 a'은 3.356 mm가 되어야 하며, 또 이론적인 최대 집광율 C_{max}를 약 3.2로 상정하면 식 (1)³⁾에 의해 입광면의 지름 a는 11.32 mm가 된다. 국내 태양전지의 실증시험에 의하면 약 30°의 경사면에 설치된 태양광모듈이 가장 높은 연간 누적 발전출력을 낼 수 있다는 사실에 근거하여 최대 수용각θ_{max}을 서울의 위도 기준으로 36.4°로 설정하였다.

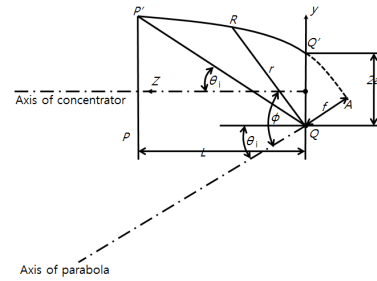


Fig. 1. Design of CPC

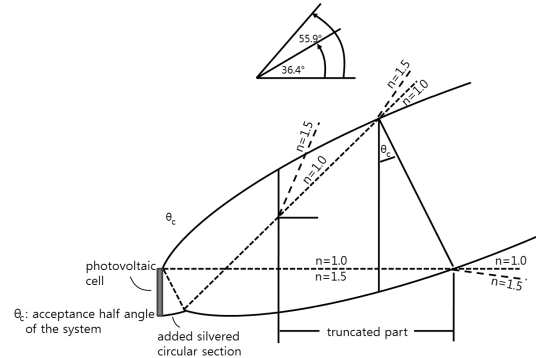


Fig. 2. Concept of Truncated DCPC

Table 1. Results of DCPC Design

Symmetric DCPC	
Material	Poly Carbonate (n=1.57)
θ _{max}	36.4°
a'	3.536 mm
a	11.320 mm
L	45.182 mm

$$C_{\max} = (a/a')^2 = [n' / (n \sin \theta)]^2 \tag{1}$$

따라서 앞서 결정된 수광면 지름 a', 입광면 지름 a, 그리고 최대 수용각을 식(2)³⁾에 대입하여 DCPC의 길이인 L을 구할 수 있었다.

$$L = (a + a') \cot \theta_i \tag{2}$$

$$z = r \cos(\Phi - \theta_i) = \frac{2a'(1 + \sin \theta_i) \cos(\Phi - \theta_i)}{1 - \cos \Phi} \tag{3}$$

DCPC의 포물면은 Fig. 1³⁾과 식(3)³⁾에 의해 결정하였고 설계된 결과를 Table 1에 나타내었다.

설계된 DCPC의 길이가 소형 EIPV에 적용되기에 너무 길기 때문에, Fig. 2와 같이 입광면에 대하여 최대 수용각인 36.4°만큼 기울어지도록 절단된 형태인 Truncated DCPC를 고려하기

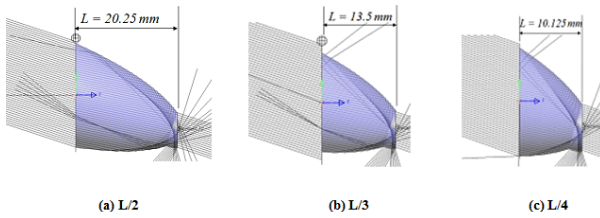


Fig. 3. Simulation Models of Truncated DCPC

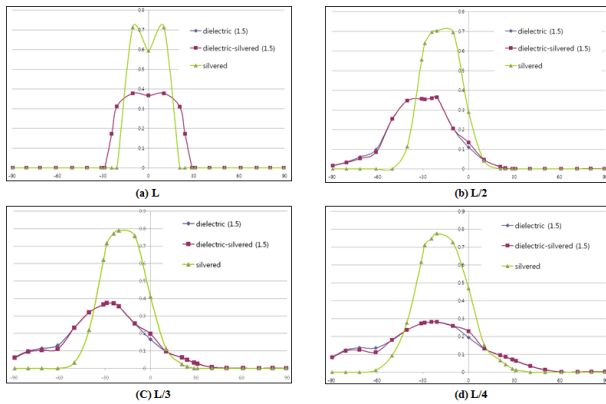


Fig. 4. Simulation Results of Truncated DCPC

로 하였다. 또한 DCPC의 수광면으로부터 수직으로 부착되는 Cell에 에너지를 원활하게 전달되도록 원형의 단면을 갖는 금속 반사코팅을 한 커플러를 수광면과 PV Cell 사이에 설치하였다.

DCPC의 길이에 따른 광학 성능의 효과를 알아보기 위하여, DCPC의 길이 L을 L/2, L/3, L/4로 나누어 Fig. 3과 같이 전사모사를 수행하였고, 또한 DCPC 표면의 반사 효과를 알아보기 위해, 내부가 유전체로 채워진 'Dielectric', 유전체가 없이 외벽 표면만 금속 코팅이 되어진 'Silvered', 그리고 유전체로 채워진에 DCPC의 외벽에 금속 코팅을 한 'Silvered Dielectric'의 모델을 선정하여 각각의 효과를 검증해 보았다.

전사모사의 결과 값을 Fig. 4에 나타내었다. DCPC의 길이에 따른 효과를 확인하기 위해 1×10^6 개의 전체 광속에 대한 수광 면으로 들어오는 총 광속수의 비율을 'Angular Acceptance'로 정의하여, 입사각의 변화에 따른 DCPC의 집광 특성을 확인하였다. 전사모사 결과로써, 자르지 않은 DCPC 원형에서 가장 좋은 Angular Acceptance 값을 얻을 수 있었고, L/2와 L/3은 비슷한 결과를 보였다. 그러나 최대 수광각 θ_{max} 는 L/3인 Truncated DCPC가 월등히 큰 값을 가지는 것을 보였다. DCPC 표면의 코팅에 따른 반사 효과는 전체적으로 유전체가 채워지지 않은 Silvered에서 가장 좋은 효과를 보였으나, 본 연구의 목표인 EIPV 적용에서 나타날 문제인 제품의 강도와 대량 생산시 금형 제작 그리고 생산단가 상승의 문제로 인하여 본 연구에서는 유전체가 채워지지 않은 형태의 CPC와 금속 박막이 코팅이 된 DCPC는 배제하기로 하였다. Dielectric과 Silvered Dielectric

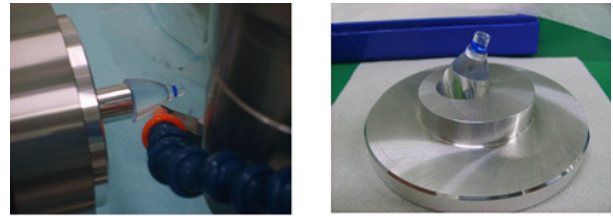


Fig. 5. Diamond Turning Machining of DCPC and Eccentric Jig for DTM

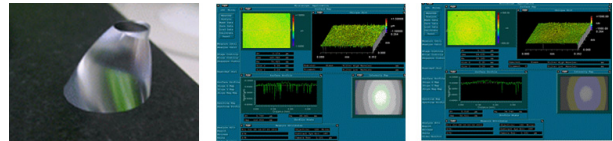


Fig. 6. Picture of DCPC Mock-up and Measurement Results of DCPC

의 Angular Acceptance 값들은 비슷한 값을 가져 DCPC표면의 금속 코팅에 따른 효과는 미미한 것으로 나타났다. 따라서, 소형 EIPV 적용을 위한 DCPC 원형은 표면에 금속 박막 코팅이 되지 않은 길이가 L/3인 Truncated DCPC로 선정하였다.

2.2 DCPC 제작

DCPC의 원형 제작은 $\varnothing 30\text{mm}$ 의 PC 봉을 DTM으로 직접 초정밀 절삭 가공하여 제작하였다. DTM 가공에 사용된 장비는 NCD 바이트를 사용하여 1.4nm의 가공분해능으로 $\varnothing 350\text{mm}$ 사이즈의 피삭재를 초정밀 선삭으로 가공을 할 수 있는 Precitech社의 Nanoform 350 사용하였다.

Fig. 5에 Nanoform 350을 이용한 DCPC의 DTM 가공과 입광면과 수광면 절단을 위한 편심 Jig를 나타내었다. Truncated DCPC는 회전 비대칭이기 때문에, 이를 직접 초정밀 절삭가공을 하기 위해, 회전대칭형 지그를 사용하여 DCPC의 포물면을 먼저 가공을 한 후, 편심형 지그를 사용하여 입광면과 커플러의 수광면을 초정밀 절단가공을 하였다. 일반적으로 DTM 가공 시에는 NCD 바이트의 마모를 방지하기 위해 Oil mist를 분사하여 가공을 하지만, 본 연구에서는 DCPC의 소재인 PC가 유분을 흡수하기 때문에 Oil mist를 분사하지 않는 Dry Cutting법으로 절삭 가공을 하였다.

DTM 가공은 황삭과 중삭 가공에서는 R 0.2 mm NCD 바이트를 이용해 빠르게 절삭가공을 한 후, R 0.1mm NCD 바이트를 이용하여 정삭가공을 하였다. 정삭 가공된 DCPC 원형의 모습과 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 태양광이 직접적으로 III-V Cell에 전달되는 DCPC 원형의 입광 면과 수광면의 표면조도는 간접계 종류인 Zygo社의 Newview 5000을 사용하여 측정하였으며, 초정밀 절삭가공 된 입광면의 표면조도(Ra)는 68.46nm였으며, 수광면 표면조도(Ra)는 34.25nm로 매우 우수한 결과를

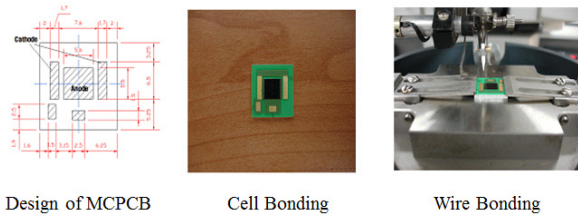


Fig. 7. Process of Test Board for DCPC Module

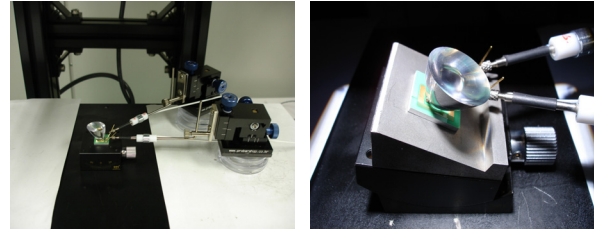


Fig. 9. Measurement of LCPV Module

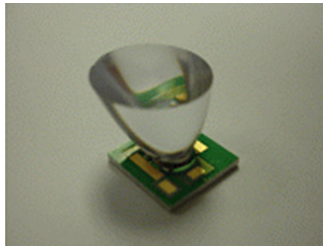


Fig. 8. Picture of LCPV Module

보였다.

앞서 기술한 바와 같이 DCPC와 Cell을 연결하는 연결부는 350~1900nm 파장영역에서 평균 반사율이 94% 정도가 되도록 Sputtering 방법으로 알루미늄 반사코팅을 하였다.

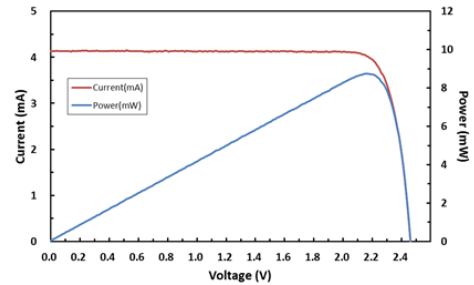
2.3 LCPV 모듈 제작

LCPV 모듈의 성능 평가를 위해 Cell은 알루미늄 재질의 MCPCB Test Board의 중앙 패드 위에 Solder Paste를 사용하여 접합하였다. 셀을 접합하기 위해 Anode 패드 위에 솔더 페이스 트를 도포하고 가열 플레이트 위에서 100°C로 가열하여 페이스 트가 용융된 후 셀을 올리고 가압하여 접합하였다. Cell의 Cathode 연결은 ϕ 1 mil Gold Wire를 사용하여 네 모서리로부터 바깥쪽 패드로 접합하였다. Fig. 7에 설계한 MCPCB Test Board 도면과 Cell과 Test board 간의 접합한 결과를 보였다.

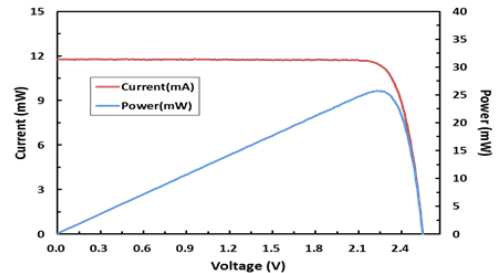
최종적으로 MCPCB Test Board에 접합된 Cell표면 위에 초 정밀 가공된 DCPC를 접합하기 위하여, 광학적으로 투명한 UV Curable Epoxy (OG146-178, EPO-TEC社)를 사용하여 DCPC 원형의 수광면을 III-V Cell 위에 Fig. 8과 같이 접합하여 LCPV 모듈을 완성하였다.

3. LCPV 모듈 평가

LCPV 모듈의 성능 검증을 위하여, Bare Cell 형태의 III-V Triple-Junction Cell과 DCPC가 장착된 LCPV 모듈의 I-V 특성을 Solar Simulator BXE-F-300-Std(Brightech Co., Ltd)를 사용하여 비교 측정하였다. Solar Simulator BXE-F-300-Std는 100 mW/cm²의 광 조사 강도와 3%의 조사 균일도로 입사광을



(a) bare cell



(b) LCPV

Fig. 10. I-V Characteristic of Bare Cell and LCPV

시료가 설치된 스테이지에 수직으로 조사하여 I-V 특성을 측정할 수 있는 장비이다. 또한 LCPV 모듈의 각도 의존성을 측정하기 위해 모듈의 원형을 Goniometer Stage에 장착하고 $\pm 20^\circ$ 의 각도 범위에서 입사각에 변화를 줌으로써 각도 변화에 따른 I-V 특성 변화를 Fig. 9와 같이 측정할 수 있었다.

Bare Cell과 LCPV 모듈의 I-V 특성 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. I-V 특성 측정은 입사면으로 들어오는 광의 수용각을 0°로 하여 수용각에 의한 영향을 최대한 배제하였다. Bare Cell의 측정결과로, P_{max}가 8.745 mW, V_{oc}가 2.48V, I_{sc}는 4.138mA, 그리고 Active Cell Area에 대한 에너지 변환 효율은 28.909%였다. LCPV의 측정결과는 P_{max}가 25.753 mW, V_{oc}가 2.56V, I_{sc}는 11.787mA 그리고 Active Cell Area에 대한 에너지 변환 효율은 83.613%로 Bare Cell 보다 우수한 결과를 보였다.

Bare Cell의 효율이 광 조사에 대하여 일정하고⁴⁾, DCPC의 매질에서 광 손실을 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하면, 식(4)에 의해서 집광율 약 2.945가 되며, CPC의 설계에서 설정한 집광율인 3.2보다 다소 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이것은 DCPC의 길이가 L/3로 줄어들어, 입광면의 면적이 줄어든 효과

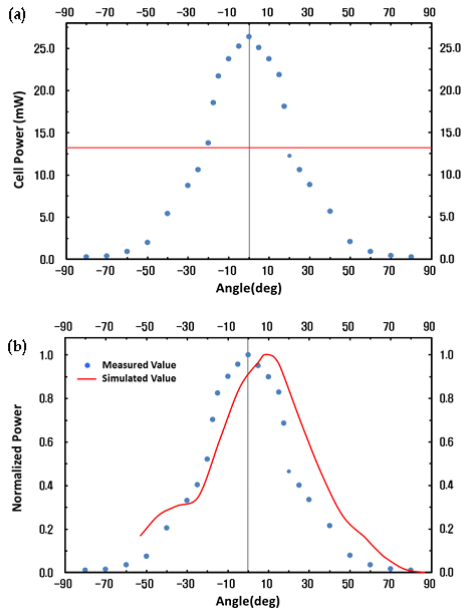


Fig. 11. Angular Dependence of LCPV

에 의한 것으로 보인다.

$$C_{\max} = \frac{P^{pro}}{P^{bare}} \quad (4)$$

LCPV 모듈의 수용각 변화에 대한 I-V 특성 측정의 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11의 (a)에서 Cell 출력이 최대 출력 ($P_{\max} = 25.753 \text{ mW}$)의 반이 되는 점은 각각 -20.92° 와 17.89° 로서 FWHM, 즉 수용각은 38.81° 였다. Fig. 11 (b)에 보인 원형의 측정값은 최대 출력 P_{\max} 에 대하여 정규화한 것으로, LightTools[®]를 사용하여 전사모사를 한 Truncated DCPC($L' = L/3$, $n_{\text{optic}} = 1.50$)의 Angular Acceptance(적색 실선)와 유사한 형태를 보여 측정에 사용된 DCPC가 잘 제작되었음을 보였다. 그러나 전사모사와 실제 측정간의 6° 정도의 차이는 전사모사에서 사용한 굴절률 값과 실제 사용한 광학계 원재료의 굴절률간의 차이로 인해 나타난 것으로 생각할 수 있다. 따라서, LCPV의 전사모사에 사용할 DCPC의 소재를 미리 선정하여 선정된 소재의 정

확한 굴절률 값을 반영을 한다면 보다 정확한 결과 값을 가져 올 것이라 예상이 된다.

4. 결론

본 연구에서는 소형 EIPV에 적용하기 위해 Truncated DCPC를 설계하고 초정밀 절삭 가공하여 LCPV 모듈의 원형을 제작하여 그 성능을 검증하였다.

소형 EIPV에 실제 적용하기 위하여, 여러 가지 모델을 설정하고 각각의 모델별로 전사모사를 수행하여, 현장 적용과 생산성을 고려하여 우수한 성능을 보인 길이가 $L/3$ 인 Truncated DCPC를 선정하였고, 그 결과 값을 이용하여 LCPV 모듈을 제작하였다. 제작된 LCPV 모듈은 전사모사의 결과를 잘 반영하였고 EIPV 적용을 위해 적합함을 보였다.

References

1. W.T. Welford and R. Winston, The Optics of Nonimaging Concentrators, Academic Press, New York, 1978.
2. W.T. Welford and R. Winston, High Collection Nonimaging Optics, Academic Press, New York, 1989.
3. R. Winston, J.Minano and P.Benitez, Nonimaging Optics, pp.50 - 68, Academic Press,2005.
4. J. F. Geisz, D. J. Friedman, J. S. Ward, A. Duda, W. J. Olavarria, T. E. Moriarty, J. T. Kiehl, M. J. Romero, A. G. Norman, and K. M. Jones, Appl. Phys. Lett. 93, 123505 (2008)
5. H. Dieker, C. Miesner, D. Püttjer, B. Bachl, Proc. of SPIE Vol. 6797, pp. 679701-12 (2007)
6. R. Loeckenhoff, G. Dibowski, F. Dimroth, M. Meusel, S. V. Riesen, A.W. Bett, Proc. 2006 IEEE 4th World Conf. Photov. Energy Conv. Vol. 1, pp. 737 - 740, (2006)
7. Antonio L. Luque, Viacheslav M. Andreev, Concentrator Photovoltaics, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2007
8. M. Wanlass, et. al, Thin III-V Solar Cells, 2009 Peer Review Meeting March 9-10, 2009 Denver, Colorado