

금속 후면 반사막이 GaAs 태양전지의 효율에 미치는 영향

최원정¹⁾ · 김창주²⁾ · 강호관²⁾ · 조성진^{1)*}

¹⁾경북대학교, 건설환경에너지공학부, 대구광역시, 702-701

²⁾한국나노기술원, 수원시, 443-270

The Effect of Metal Back-reflective Layers on the Performance of Transfer Printed GaAs Solar Cells

Wonjung Choi¹⁾ · Chang Zoo Kim²⁾ · Ho Kwan Kang²⁾ · Sungjin Jo^{1)*}

¹⁾School of Architectural, Civil, Environmental, and Energy Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

²⁾Korea Advanced Nano Fab Center, Suwon-si, 443-270, Korea

ABSTRACT: To investigate the effect of metal back-reflective layers (MBLs) on the performance of GaAs solar cells, we fabricated GaAs solar cells on Al and Ag metal layers using the transfer printing technique. We also investigated the effect of MBL texturing on the performance of transfer printed GaAs solar cells. Transfer printed solar cells with MBLs exhibited improved photovoltaic performance compared to solar cells without MBLs due to light trapping. We demonstrated GaAs solar cells with MBLs on a flexible substrate and performed systematic bending tests. All the measured characteristics of solar cells showed little change in performance.

Key words: Metal back-reflective layer, GaAs solar cell, Epitaxial lift-off, Flexible solar cell

1. 서론

태양전지는 빛 에너지를 직접 전기로 변환하는 소자이기 때문에 태양전지의 효율은 태양전지에 입사하는 빛의 흡수를 높여 증가시킬 수 있다. 태양전지에 입사하는 광량을 증가시키는 방법으로 반사방지막(Anti-Reflective Coating, ARC)¹⁻³⁾과 후면 반사막(back reflector)⁴⁾¹⁰⁾을 이용한 연구가 진행되고 있다. 반사방지막은 태양전지 표면에서 반사되는 태양빛을 줄여 입사광량을 증가시키는 방법으로 적절한 굴절률과 두께를 가지는 박막층을 반도체 표면에 형성해 제작한다. 후면 반사막은 태양전지로 흡수되지 못하고 투과된 태양빛을 태양전지 후면에서 반사시켜 태양전지 내부로 재입사시키는 역할을 한다. 주기격자에 의한 산란⁴⁾, 금속 나노입자에서의 반사⁵⁾, Bragg reflector^{6,7)} 등의 다양한 후면 반사막이 개발되어 연구가 진행 중이다.

비정질 실리콘태양전지는 얇은 활성층 두께 때문에 흡수되지 못하고 뒷면으로 투과되는 광량이 많아 빛의 손실이 크다. 일반적으로 비정질 실리콘 태양전지는 조직화된 투명전극을 이용

하거나 후면의 금속전극을 반사막으로 이용하여 태양전지로 입사되는 빛을 산란시켜 활성층 내 빛의 이동경로를 증가시키는 방법을 사용한다. 후면의 반사막을 이용하는 기술은 전극으로 사용하는 ZnO의 표면에 불균일하거나 혹은 균일한 패턴을 형성하고 그 위에 금속을 증착해 간단하게 조직화된 후면반사막을 제작한다. 그러나 금속과 ZnO계면에서 발생하는 플라즈몬 손실과 후면 반사막 위에 비정질 실리콘 태양전지 층을 성장했을 때 생기는 결함은 해결해야 할 문제로 남아있다⁹⁾.

III-V 화합물반도체 태양전지에서는 Bragg reflector를 이용한 후면 반사막이 일반적으로 사용되고 있다^{6,7)}. 화합물 반도체 태양전지의 경우 화합물 반도체 성장시 기관으로 사용되는 웨이퍼 때문에 후면 반사막을 활성층에 직접 형성하기가 어렵다. 따라서, 웨이퍼와 후면 전극접촉층 사이에 Bragg reflector를 형성하여 흡수되지 못하고 투과한 빛을 다시 반사시키는 방식을 사용한다. 그러나 Bragg reflector는 여러 겹의 화합물 반도체층을 이용하여 제작하기 때문에 제작과정이 복잡한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 epitaxial lift-off (ELO) 방법을 이용한 후면 반사막 기술이 개발되었다. GaAs 웨이퍼로부터 분리된 화합물 반도체 태양전지와 Si 웨이퍼 위에 증착된 금속을 반데르발스 결합을 이용하여 결합시키는 방법을 사용하였다. Si 웨이퍼의 금속층이 반사막으로 사용되어 내부 양자효율

*Corresponding author: sungjin@knu.ac.kr

Received May 26 2014; Revised June 2 2014;

Accepted June 2 2014

이 크게 증가하였다¹⁰⁾. 이러한 방법은 후면반사막을 동시에 후면 전극으로 사용해야 한다. 태양전지와 금속간의 오믹 접합을 고려해 금속의 종류를 결정해야 하기 때문에 최적의 반사율을 가진 금속을 사용하지 못하며 후면전극과 반도체의 오믹접합을 위해 수행하는 고온의 열처리 과정 때문에 사용할 수 있는 기판의 종류에 제한이 있다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해 화합물 반도체 태양전지를 금속 후면 반사막(metal back-reflective layer, MBL)에 직접 트랜스퍼 프린팅하는 기술을 개발하였다. 금속전극 형성 및 열처리 공정을 포함한 모든 화합물 반도체 태양전지 제작공정이 웨이퍼 위에서 진행된 후 ELO 방법을 이용해 MBL로 트랜스퍼 프린팅되기 때문에 반사막으로 사용되는 금속의 종류 및 트랜스퍼 프린팅되는 기판의 제한이 없다. MBL의 표면에서 이루어지는 태양빛의 반사가 트랜스퍼 프린팅 된 화합물 반도체 태양전지에 미치는 영향을 조사하기 위해 반사율이 다른 금속을 기판 위에 각각 증착해 MBL을 제작하고 그 위에 태양전지를 트랜스퍼 프린팅하여 태양전지 효율을 분석하였다. 또한 표면 거칠기에 변화를 준 두 종류의 MBL을 제작해 투과도와 함께 태양전지 효율을 측정하고 더 적합한 형태의 MBL을 찾기 위한 실험을 진행하였다. MBL을 유연한 기판에 제작하고 화합물 반도체 태양전지를 트랜스퍼 프린팅하여 굽힘정도에 따라 태양전지의 특성변화를 살펴보았다.

2. 실험방법

GaAs 단일접합 태양전지 제작을 위해 GaAs 웨이퍼 위에 MOCVD(Metalorganic Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 GaAs 태양전지층을 성장시켰다. 웨이퍼 위에 AlGaAs 희생층을 먼저 성장시킨 후 n-contact layer (0.5 μm , n-GaAs), BSF (0.05 μm , n-GaInP), base (3.5 μm , n-GaAs), emitter (0.5 μm ,

p-GaAs), window layer (0.3 μm , p-GaInP), p-contact layer (0.3 μm , p-GaAs)를 차례로 성장시켰다. 이때 p형 도판트는 Zn를, n형 도판트는 Si를 각각 사용했다. 금속 전극을 형성하기 위해 포토리소그래피 공정을 이용해 금속전극이 증착될 부분을 패터닝한 후 태양전지 층을 습식 식각하였다. GaAs층은 인산용액($\text{H}_2\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:25$)을, GaInP층은 염산용액($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=3:1$)을 사용해 식각하였다. 전면, 후면 금속층은 Ti/Pt/Au, AuGe/Ni/Au를 전자선 증착기로 연속 증착하고 380°C에서 10분간 열처리하여 오믹 접합을 형성했다. 제작 완료된 태양전지를 MBL 위로 트랜스퍼 하는 과정이 Fig. 1에 나타나 있다. 태양전지층과 웨이퍼 분리는 태양전지층 아래쪽의 AlGaAs 희생층을 불산용액($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=1:15$)을 이용해 식각함으로써 이루어진다. 희생층을 식각하기 전에 먼저 제작한 태양전지층이 희생층 식각이 진행되는 동안 분리되지 않고 웨이퍼 위에 고정되도록 감광제를 이용해 태양전지를 웨이퍼 위에 부분적으로 고정시킨다. 희생층 식각이 끝나면 PDMS (polydimethylsiloxane)를 이용하여 태양전지층과 웨이퍼를 분리한다. 태양전지층을 트랜스퍼 프린팅 할 MBL는 기판 위에 전자선 증착기를 이용해 금속을 증착하여 제조하는데, 표면 거칠기에 따라 flat-MBL과 textured-MBL 두 종류로 제작하였다. 먼저 flat-MBL은 금속 종류에 따른 태양전지 효율변화 관찰을 위해 Al과 Ag 두 종류의 금속을 각각 평평한 기판 위에 증착해 완성했다. Textured-MBL의 경우는 MBL의 표면을 조직화하기 위해 FTO (Fluorine doped Tin Oxide)와 NOA61 (Norland Products, Inc.), PDMS를 이용하였다. 조직화된 FTO 표면을 복제하기 위해 FTO위에 PDMS를 부어 굳힌다. 이 PDMS 몰드를 이용해 NOA61을 누른 후 그대로 UV를 이용해 굳히면 NOA61의 표면에 FTO와 같은 형태 조직화가 이루어진다. 이렇게 만들어진 NOA 표면에 금속을 증착하여 textured-MBL을 만들 수 있다. NOA를 이용한 textured-MBL 제작과정과 각 단계의 SEM 이미지가 Fig. 2에 나타나 있다.

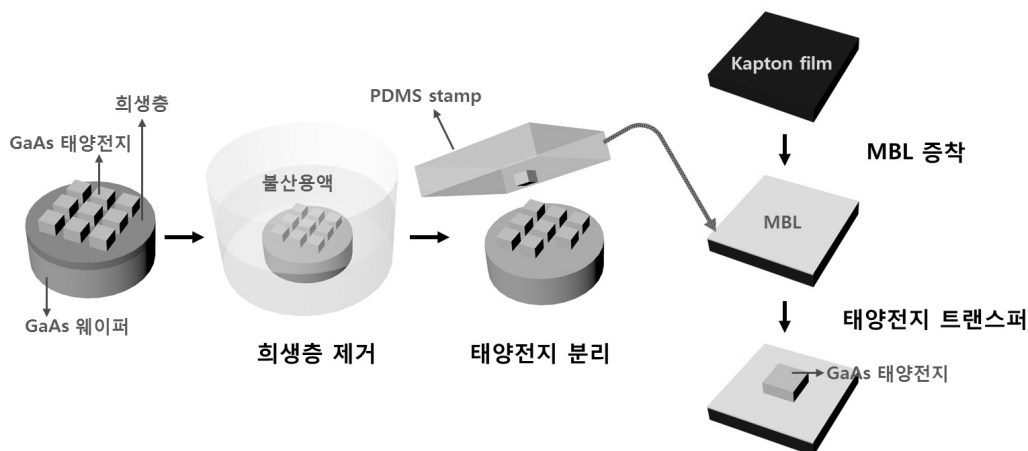


Fig. 1. 트랜스퍼 프린팅을 이용한 MBL 태양전지 제작 과정 모식도

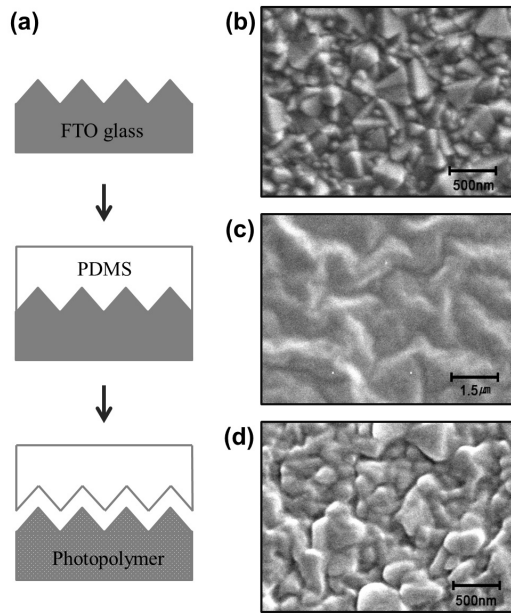


Fig. 2. (a) Textured-MBL 제작 과정, (b) FTO 표면 SEM 이미지, (c) PDMS 표면 SEM 이미지, (d) Photopolymer(NOA) 표면 SEM 이미지

마지막으로 수행한 굽힘 실험은 Ag flat-MBL을 kapton film 위에 제작하고 태양전지를 트랜스퍼 프린팅하여 반지름 3.5 mm 로 100회 굽힘 후 굽힘 전 후의 특성을 비교했다. 제작한 모든 태양전지의 특성은 solar simulator (Oriel, Sol2A)와 DC source meter (Keithley, 2400)를 사용해 AM 1.5G, 1 Sun 조건에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에 금속으로 Ag를 사용한 flat-MBL과 textured-MBL의 투광도 측정 결과가 나타나있다. 투광도 측정을 통해 반사도의 경향성을 예측할 수 있다. 390 nm 이상 영역에서 flat-MBL이 textured-MBL에 비해 낮은 투광도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 종류의 flat-MBL에 사용된 금속인 Al과 Ag의 경우 이미 과거에 반사도 측정이 많이 이루어졌다¹¹⁾. 비교 결과 단파장에서는 Al의 반사도가 더 크게 나타나지만 500 nm보다 장파장 영역에서는 Ag의 반사도가 더 크게 유지된다.

Fig. 4에 MBL을 적용한 태양전지와 MBL을 사용하지 않은 기준 태양전지의 J-V 측정결과를 나타내었다. MBL을 사용하지 않은 태양전지에 비해 MBL 위에 트랜스퍼 프린팅 된 태양전지의 경우 J_{sc} 가 증가함에 따라 태양전지의 효율이 향상되었으며 자세한 태양전지 특성을 Table 1에 요약하였다.

Al flat-MBL과 Ag flat-MBL의 효율은 각각 12.01%, 12.81%로 측정되었으며 이 결과는 MBL이 적용되지 않은 태양전지의 효율 대비 18.33%와 26.21% 상승한 결과이다. Al보다 Ag를 사

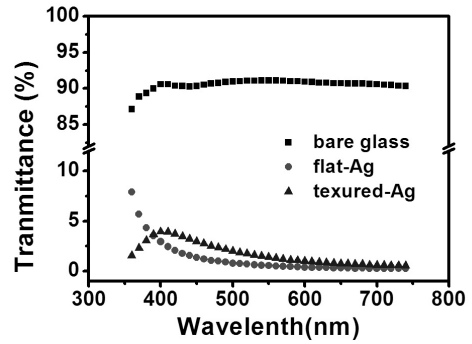


Fig. 3. Ag flat-MBL과 Ag textured-MBL의 투광도 그래프

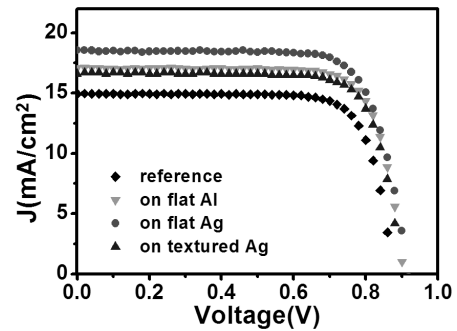


Fig. 4. 다양한 MBL을 적용한 태양전지의 J-V 곡선

Table 1. 다양한 MBL을 적용한 태양전지의 특성

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Fill factor	Efficiency (%)
Reference	14.93	0.87	0.78	10.15
On flat Al MBL	17.06	0.90	0.78	12.01
On flat Ag MBL	18.55	0.92	0.75	12.81
On textured Ag MBL	16.65	0.90	0.78	11.65

용한 MBL에서 효율이 더 크게 증가하는 원인은 두 금속의 반사도 차이 때문이다. Ag의 반사도가 Al보다 우수한 500 nm 이상의 영역에서 GaAs가 더 강한 흡수를 보이기 때문에¹¹⁾ MBL에 의한 태양전지 효율 상승 효과가 Ag-MBL을 사용했을 때 더 크게 나타난다.

같은 금속을 사용하고 표면 거칠기만 변화시킨 flat-MBL과 textured-MBL의 비교에서도 역시 같은 경향성이 관찰되었다. Textured-MBL 태양전지의 효율은 11.65%로 기준 태양전지에 비해 14.78% 상승하였다. Textured-MBL보다 대체로 낮은 투광도를 보이는 flat-MBL 태양전지의 값과 비교하면 투광도가 낮은 flat-MBL에서 더 높은 J_{sc} 값과 효율이 관찰됨을 확인할 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 위와 같은 결과로 MBL을 적용했을 때 태양전지의 효율이 상당히 상승한다는 것을 볼 수 있었으며 그 정도는 사용한 금속의 반사도가 클수록 크게 나타남을 확인할 수 있었다. MBL이 태양전지에 적용되면 태양전지에 입사하지 못한 태양광이 MBL에서 반사되어 태양전지의 후면으로 재

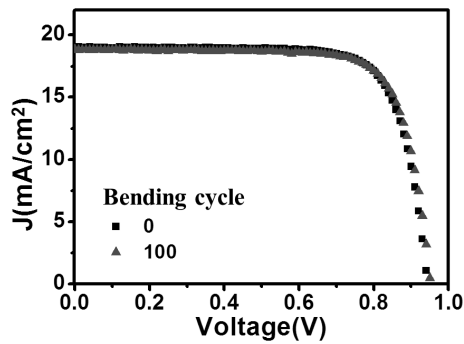


Fig. 5. Ag flat-MBL이 적용된 태양전지의 굽힘 전 후 J-V 곡선

Table 2. Ag flat-MBL이 적용된 태양전지의 특성

Bending cycle (number)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Fill factor	Efficiency (%)
0	19.21	0.94	0.73	13.20
100	19.21	0.95	0.73	13.27

입사하게 된다. 따라서 MBL이 없는 태양전지에 비해 투과된 태양빛의 반사량이 증가하여 J_{sc} 가 더 크게 나타나며 효율도 높게 나타난다. 실험하기 이전에는 textured-MBL를 적용한 태양전지의 경우 태양전지를 투과한 태양광이 반사되어 재입사되는 것뿐만 아니라 태양전지 어레이의 각 태양전지 사이의 빈 공간으로 들어오는 빛도 무작위로 조직화 되어있는 MBL표면에서 일어나는 난반사에 의해 일부가 태양전지로 입사할 것이라고 생각했다. 하지만 실험 결과 난반사에 대한 영향보다는 MBL의 반사율이 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

Ag flat-MBL을 적용한 GaAs 단일접합 태양전지를 반지름 3.5 mm로 100회 굽힘 테스트하기 전과 후의 J-V곡선과 태양전지 특성 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 굽힘 전후에 태양전지 특성이 일정하게 유지되는 것으로 태양전지 성능이나 MBL의 반사도가 태양전지의 손상이나 후면 반사금속의 손상 등의 이유로 굽힘 테스트 후에도 변화하지 않은 것을 확인할 수 있었다. MBL을 이용하여 유연성 화합물 반도체 태양전지를 제작할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 MBL이 GaAs 단일접합 태양전지의 효율에 미치는 영향을 관찰하고자 GaAs 태양전지를 MBL위에 ELO 공정을 통해 트랜스퍼 프린팅하여 태양전지 특성의 변화를 조사하고 그 경향성을 MBL에 사용한 금속의 투과도와 비교하였다. MBL은 Al flat-MBL, Ag flat-MBL, Ag textured-MBL의 세 종류가 제작되었으며 Al flat-MBL과 Ag flat-MBL이 적용된 태양전지 효율 비교를 통해 금속의 종류에 따라 태양전지 효율에 미

치는 영향을 조사했고, Ag flat-MBL과 Ag textured-MBL의 비교를 통해 MBL 표면의 거칠기가 태양전지 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 반사도가 높은 금속을 사용한 MBL위의 태양전지가 보다 높은 효율 상승을 보였고 textured-MBL보다 투과도가 낮게 관찰된 flat-MBL 위의 태양전지가 textured-MBL에서 보다 더 높은 효율 상승을 보였다. 두 실험 모두에서 태양전지의 효율 상승은 금속의 반사도에 더 크게 영향을 받는다는 결과를 도출할 수 있었다.

ELO를 이용해 태양전지를 트랜스퍼 프린팅하여 MBL을 적용하는 방법은 MBL에서 이루어지는 태양빛 반사를 통해 태양전지의 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 태양전지를 분리하고 남은 웨이퍼를 재사용할 수 있어^{12,13} III-V 화합물반도체 태양전지의 제조 가격을 절감할 수 있다. 또한 보다 얇은 두께의 활성층을 사용하여도 투과된 빛을 후면 반사막을 이용해 다시 흡수할 수 있기 때문에 화합물 반도체의 두께를 줄일 수 있어 공정비용을 더욱 절감할 수 있을 것이다.

물리적으로 변형 가능한 기판 위에서도 MBL에 의한 효율 상승이 유지되는지 관찰하기 위한 굽힘 실험에서 태양전지의 성능과 MBL에 의한 효과 모두 굽힘 테스트 전후에 변화가 없음을 확인할 수 있었다. MBL은 두께 최적화와 단일 금속뿐만 아니라 다양한 합금으로 MBL을 제작해 원하는 파장영역에서 최대의 반사도를 가질 수 있게 조절할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2013년 동일문화과학재단의 학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. P. Yu, C. Chang, C. Chiu, C. Yang, J. Yu, H. Kuo, S. Hsu, and Y. Chang, "Efficiency enhancement of GaAs photovoltaics employing antireflective indium tin oxide nanocolumns," *Advanced Materials*, vol. 21, no. 16, pp. 1618-1621, 2009.
2. B. Su, Y. Su, Z. Tseng, M. Shih, C. Cheng, T. Wu, C. Wu, J. Yeh, P. Ho, and Y. Juang, "Antireflective and radiation resistant ZnO thin films for the efficiency enhancement of GaAs photovoltaics," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 158, no. 3, pp. H267-H270, 2011.
3. L. Yeh, K. Lai, G. Lin, P. Fu, H. Chang, C. Lin, and He Jr, "Giant efficiency enhancement of GaAs solar cells with graded antireflection layers based on syringelike ZnO nanorod arrays," *Advanced Energy Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 506-510, 2011.
4. C. O. McPheeters and E. T. Yu, "Computational analysis of thin film InGaAs/GaAs quantum well solar cells with back side light trapping structures," *Optics Express*, vol. 20, no. 106, pp.

- A864-A878, 2012.
5. J. Lee and P. Peumans, "The origin of enhanced optical absorption in solar cells with metal nanoparticles embedded in the active layer," *Optics Express*, vol. 18, no. 10, pp. 10078-10087, 2010.
 6. S. M. Durbin, "A computational approach to the analysis of distributed Bragg reflectors in direct-gap solar cells," pp. 69-72, 1996.
 7. M. Shvarts, O. Chosta, I. Kochnev, V. Lantratov, and V. Andreev, "Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 68, no. 1, pp. 105-122, 2001.
 8. K. Söderström, F. Haug, J. Escarré, C. Pahud, R. Biron, and C. Ballif, "Highly reflective nanotextured sputtered silver back reflector for flexible high-efficiency n-i-p thin-film silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 12, pp. 3585-3591, 2011.
 9. G. Yue, L. Sivec, J. M. Owens, B. Yan, J. Yang, and S. Guha, "Optimization of back reflector for high efficiency hydrogenated nanocrystalline silicon solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 26, pp. 263501, 2009.
 10. G. Lush, M. Patkar, M. Young, M. Melloch, M. Lundstrom, S. Vernon, E. Gagnon, L. Geoffroy, and M. Sanfacon, "Thin-film GaAs solar cells by epitaxial lift-off," pp. 1343-1346, 1993.
 11. Bass, M., Van Stryland, E.W. (eds.), "Handbook of Optics," 1994.
 12. A. Van Geelen, P. Hageman, G. Bauhuis, P. Van Rijsingen, P. Schmidt, and L. Giling, "Epitaxial lift-off GaAs solar cell from a reusable GaAs substrate," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 45, no. 1, pp. 162-171, 1997.
 13. G. Bauhuis, P. Mulder, E. Haverkamp, J. Schermer, E. Bongers, G. Oomen, W. Köstler, and G. Strobl, "Wafer reuse for repeated growth of III-V solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 18, no. 3, pp. 155-159, 2010.