

# 금속 마스크 스크린이 금속 재결합 전류와 태양전지 특성에 미치는 영향

이욱철<sup>1,2)</sup> · 정명상<sup>1)</sup> · 이준성<sup>3)</sup> · 송희은<sup>1)</sup> · 강민구<sup>1)</sup> · 박성은<sup>1)</sup> · 장호식<sup>2)\*</sup> · 이상희<sup>1)\*\*</sup>

<sup>1)</sup>한국에너지기술연구원 태양광 연구단, 대전시, 34129

<sup>2)</sup>충남대학교 에너지과학기술대학원, 대전시, 35015

<sup>3)</sup>한빅솔라(주), 충주시, 27469

## Effect of Metal Mask Screen on Metal-induced Recombination Current and Solar Cell Characteristics

Uk Chul Lee<sup>1,2)</sup> · Myeong Sang Jeong<sup>1)</sup> · Joon Sung Lee<sup>3)</sup> · Hee-eun Song<sup>1)</sup> · Min Gu Kang<sup>1)</sup> · Sungeun Park<sup>1)</sup> ·  
Hyo Sik Chang<sup>2)\*</sup> · Sang Hee Lee<sup>1)\*\*</sup>

<sup>1)</sup>Photovoltaics Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

<sup>2)</sup>Chungnam National University Graduate School of Energy Science And Technology, Daejeon 35015, Korea

<sup>3)</sup>Hanvixolar Inc., Chungju 27469, Korea

Received December 4, 2020; Revised January 14, 2021; Accepted January 14, 2021

**ABSTRACT:** The mesh mask screen, which is generally used for screen printing metallization of silicon solar cell, requires high squeegee pressure and low printing speed. These requirements are acting as a limiting factor in production yield in photovoltaic industries. In order to improve the productivity, a metal mask, which has high durability and high printing speed, has been researched. In this paper, the characteristics of each solar cell, in which electrodes were formed by using a metal mask and a mesh mask, were analyzed through recombination current density. In particular, the metal-induced recombination current density (Jom) representing the recombination of the emitter-metal interface was calculated using the shading method, and the resulting efficiency and open-circuit voltage were analyzed through the diode equation. As a result of analyzing the proportion of the metal-induced recombination current density to the total emitter recombination current density, it was analyzed that the reduction of the metal-induced recombination current density through the metal mask is an important factor in reducing the total recombination current density of the solar cell.

**Key words:** Screen printing, Metal mask, Metal-induced recombination, Solar cell characteristics, Shading method

### 1. 서론

현재 결정질 실리콘 태양광 산업은 발전단가가 지속적으로 하락하고 있고 태양전지의 성능이 이론적 한계에 점점 가까워지면서, 효율의 증대 보다는 장비/소재 개발 및 생산기술 개선을 통한 원가 절감을 목표로 연구 개발을 활발히 진행하고 있는 상황이다<sup>1,2)</sup>. 태양전지의 제조 공정 중, 금속 공정은 습식 식각 및 열 확산 등의 다른 제조 공정에 비해 상대적으로 제조능력(throughput, T/P)이 낮기 때문에 전체적인 생산성의 제한 요소로 작용하고 있다.

현재 대부분의 산업용 실리콘 태양전지의 금속 전극 공정은 저렴한 공정비용과 상대적으로 높은 제조능력으로 인해 스크린 인쇄 방법을 사용한다. 이를 통해, 태양전지의 광 생성 전류를 수집하고 이동시킬 수 있는 전면의 핑거 전극(finger electrode)와

버스바 전극(busbar electrode)을 형성할 수 있다. 특히, 핑거 전극의 선폭 미세화는 수광 면적 및 광 생성 전류 수집의 최적화를 위한 필수 요소이다. 그래서, 기존에 오랫동안 사용되던 망사 마스크(mesh mask)보다 선폭을 더욱 미세화할 수 있으면서 생산성도 향상시킬 수 있는 금속 마스크(metal mask) 개발에 대한 관심이 높아졌다<sup>3-9)</sup>.

기존의 망사 마스크는 페이스트를 마스크 개구부로 내보내는 토출성이 낮고, 파손방지를 위해 높은 압력에서 스퀴지를 천천히 이동시키며 인쇄하기 때문에 인쇄 주기 시간이 길다는 단점이 있다. 또한, 미세 선폭을 위해 개구부의 폭을 감소하면서, 망사로 인한 전극의 단선 문제도 증가하고 있다. 이러한 단점들을 개선하기 위해 제안된 금속 마스크는 토출성이 좋고 강한 내구성 때문에 적은 스퀴지 압력으로 빠르게 인쇄해도 높은 종횡비(aspect ratio)와 미세 선폭을 가지는 핑거 전극을 인쇄할 수 있는 장점이 있다<sup>10, 11)</sup>.

\*Corresponding author: hschang@cnu.ac.kr; aktkd88@naver.com

본 논문에서는 망사 마스크와 금속 마스크 스크린을 통해 형성된 전극이 태양전지의 재결합 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 각 마스크에 대한 인쇄전극의 전극 재결합을 정량적으로 계산하여 전체 에미터 재결합에서 차지하는 비중을 평가하였다.

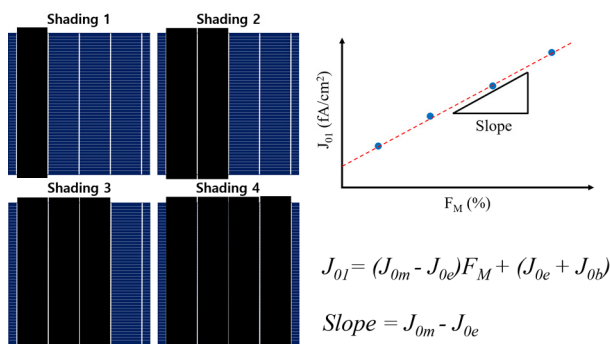
## 2. 샘플 준비 및 분석 과정

인쇄 전극의 특성분석을 위해 산업에서 주로 생산되는 passivated emitter and rear contact (PERC) 구조의 태양전지를 사용했다. PERC 태양전지 제작은 (100) 방향의 p형 실리콘 웨이퍼(252 cm<sup>2</sup>)의 RCA cleaning 및 양면 texturing 공정으로 시작되었다. 에미터 형성을 위해, 양면을 인 도핑하였고, 후면의 도핑 층은 선택적 에칭 및 polishing 공정을 통해 제거되었다. 표면의 PSG 및 산화막을 HF 용액을 통해 제거한 후, 전면과 후면을 PECVD와 ALD 장비를 통해 각각 SiNx, AlOx/SiNx로 passivation 하였다. 전극 공정은 기본적으로 후면 전극 인쇄, drying, 전면 전극 인쇄, drying, firing 순서대로 진행하였다.

우선, 현재 대부분의 태양 전지 전면 전극 인쇄 시에 사용되는 망사 마스크의 일반적인 스퀴지 속도와 압력 범위에서 조건에 따른 전면 전극 형상 변화의 크기를 파악하기 위해, Table 1에

**Table 1.** Squeegee pressure and speed for the front electrode screen printing

Sample Number	Pressure (kg)	Speed (mm/s)
1	10	100
2		200
3		300
4		400
5		500
6		600
7	5	600
8	10	
9	15	
10	20	



**Fig. 1.** Evaluation method for the metal-induced recombination current density

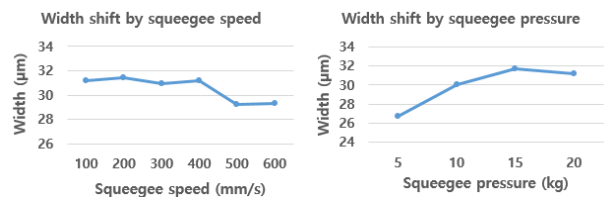
정리된 조건으로 인쇄를 진행했다.

다음으로, 금속 마스크를 사용한 태양전지의 특성을 망사 마스크와 비교 분석하기 위해, 동일한 스퀴지 속도 및 압력 조건을 통해(400 mm/s, 10 kg) 마스크 종류별로 각각 5개의 PERC 태양 전지에 인쇄전극을 형성했다. 전극이 형성된 PERC 태양전지는 solar simulator를 통해 기본적인 특성을 평가했고, 금속-실리콘 계면 재결합 전류밀도(Jom)도 평가되었다. Jom 평가 방법은 Fig. 1과 같이 태양전지의 shading 면적을 증가시키면서 Suns-Voc를 측정하는 것이다. Suns-Voc 측정을 통해 얻어진 Jo1 값을 shading된 면적 비율에 대해 그래프로 나타내고 선형으로 fitting 하면, 기울기를 계산할 수 있다. 기울기에 해당하는 식에 따라, Jom은 기울기에 Joe를 더하여 구하였다.

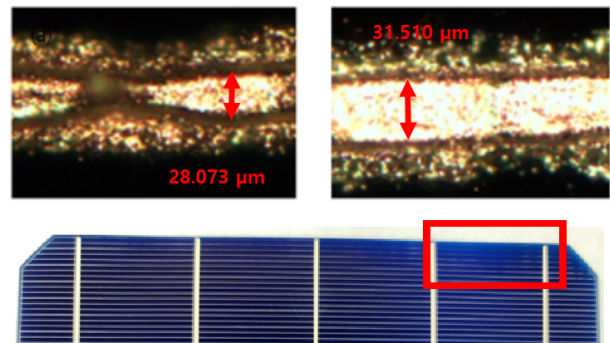
## 3. 결과

### 3.1 망사 마스크의 스퀴지 속도 및 압력에 따른 태양 전지 전면 전극 형상 평가

우선, 스퀴지 속도에 따른 태양 전지 전면 전극의 형상 변화를 Fig. 2 (왼쪽)에 나타내었다. 인쇄 속도가 증가함에 따른 전면 전극의 선포 변화는 거의 없었다. 500~600 mm/s 인쇄 속도 조건에서 약 2 μm 정도 감소했으나, 일반적으로 스퀴지 속도가 증가하면 전단속도 증가에 따라 토출된 페이스트가 낮은 점성도를 가져 전극의 퍼짐성이 증가하므로 인쇄 속도 증가로 인한 선포 감소라고 보기는 어렵다<sup>12)</sup>.



**Fig. 2.** Metal finger width depending on the squeegee speed (left) and pressure (right) of screen printing with mesh mask



**Fig. 3.** Optical microscope view of the metal fingers printed with squeegee pressure with 5 kg (left) and 20 kg (right). Photo of the metal finger disconnection (bottom)

스퀴지 압력에 대한 태양전지 특성은 Fig. 2 (오른쪽)에 나타 내었다. 스퀴지 압력이 높을수록 태양 전지의 전면 전극 선풍이 증가하는 경향을 보이며, 이는 스퀴지 압력이 증가함에 따라 페 이스트의 퍼짐현상이 증가했기 때문으로 보인다. 하지만, Fig. 3 에서와 같이 낮은 압력에서 인쇄된 태양 전지에서는 전극 형상 에 굴곡이 심하며 모서리부분에서 부분적으로 페이스트 토출이 완벽하지 않은 상태로 인쇄되기 때문에 일정 이상의 압력이 요 구된다.

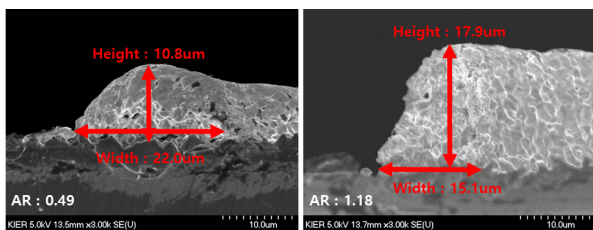
생산성 향상과 인쇄 안정성 측면에서 스퀴지 속도를 증가시 키고, 압력을 증가시킬 필요가 있으나, 높은 스퀴지 압력과 속도 로 인한 인쇄 제판의 파손율을 줄이기 위해서<sup>13)</sup> 망사 마스크 보 다는 금속 마스크를 사용하는 것이 안정적인 태양전지 생산 측 면에서 더 유리하다고 볼 수 있다.

**3.2 마스크 종류에 따른 전극 재결합 전류 밀도 평가**

Table 2는 태양전지 인쇄공정에 사용된 마스크의 종류별로 shading 방법을 통해 계산된 Jom의 개별 값과 평균값이다. 금속 마스크를 사용한 셀의 Jom은 평균 31.1 fA/cm<sup>2</sup>로 평가되었고, 망사 마스크를 사용한 셀의 평균 Jom 값(48.5 fA/cm<sup>2</sup>)보다 약 17 fA/cm<sup>2</sup> 정도 낮았다. 이는 Fig. 4의 전극 형상에서 확인할 수 있 듯이, 망사 마스크에 비해 금속 마스크를 사용하였을 때 금속 전 극이 실리콘 에미터 층과 접촉하는 면적이 감소하였고(22 μm →

**Table 2.** Results of the Jom evaluation depending on the mask type of screen printing

Mask type	Sample Number	Jom (fA/cm <sup>2</sup> )	Average (fA/cm <sup>2</sup> )
Metal	1	33.0	31.1
	2	34.1	
	3	29.6	
	4	26.4	
	5	32.5	
Mesh	6	57.5	48.5
	7	54.2	
	8	45.8	
	9	53.9	
	10	31.2	



**Fig. 4.** Scanning electron microscope (SEM) images of finger electrode printed by mesh mask (left) and metal mask (right)

**Table 3.** Average values of solar cell parameters and bulk lifetime

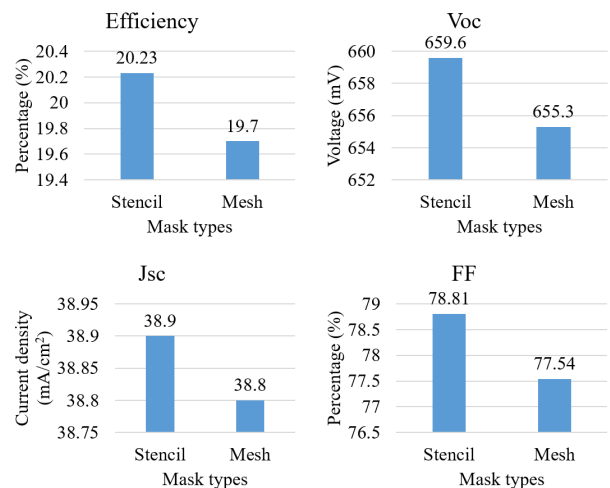
Parameter	Metal screen mask	Mesh screen mask
pEff (%)	21.97	21.75
Voc (mV)	660.1	654.4
pFF (%)	83.2	83.1
Jom (fA/cm <sup>2</sup> )	31.1	48.5
Jo1 (fA/cm <sup>2</sup> )	291.4	358.4
Jo2 (nA/cm <sup>2</sup> )	1.8	2.2
τbulk (μs)	362	370

15 μm), 이로 인해 소성과정 중 발생하는 실리콘-금속 표면의 결 함이 감소했기 때문이다.

또한, Suns-Voc 측정을 통해 얻어진 평균 재결합 전류밀도 (Jo1, Jo2) 값과 다이오드 방정식을 사용하여 단락전류를 고려 하지 않은 태양전지 파라미터를 Table 3로 정리하여 비교해 보 았다. 인쇄 마스크 종류에 따른 junction 재결합(Jo2)의 차이는 미미하였고, 금속공정 전 quasi steady state photo-conductance (QSSPC)를 통해 측정한 bulk lifetime (τbulk)도 큰 차이가 없었다. 따라서, 금속 마스크 사용을 통한 Jom 감소가 Voc 향상에 영향을 미친 것으로 판단된다. 효율의 경우도, 금속 마스크를 사용할 셀 이 평균적으로 약 0.2%p 높은 절대효율을 가질 것으로 예상되었 고, junction 누설 전류로 인한 충진률 차이는 거의 없었다.

**3.3 마스크 종류에 따른 태양전지 특성 평가**

Fig. 5는 Table 2에서 제판 마스크 종류에 따라 인쇄전극이 형 성된 태양전지의 효율 및 세부 특성을 light I-V 측정을 통해 분석 한 결과이다. 그래프에 비교된 값은 각 마스크 종류별 5개 셀의 평균값이다. 계산을 통해 평가되었던 태양전지 분석결과와 동 일하게 금속 마스크를 사용한 태양전지의 특성이 전체적으로 높았다. 평균적으로 평가했을 때, 개방전압은 4.3 mV가 향상되



**Fig. 5.** Solar cell properties depending on the mask type of screen printing

**Table 4.** Efficiency and Voc loss analysis results

Mask type	Sample Number	Jom (fA/cm <sup>2</sup> )	Efficiency Loss (%p)	Voc Loss (mV)	Jom/Joe
Metal	1	33.0	0.21	5.6	0.17
	2	34.1	0.26	6.6	0.18
	3	29.6	0.16	4.0	0.16
	4	26.4	0.13	3.4	0.14
	5	32.5	0.16	4.1	0.17
	Average	31.1	0.18	4.7	0.16
Mesh	6	57.5	0.22	5.8	0.30
	7	54.2	0.26	6.7	0.29
	8	45.8	0.20	5.0	0.24
	9	53.9	0.27	6.9	0.29
	10	31.2	0.14	3.6	0.17
	Average	48.5	0.22	5.6	0.26

Jom으로 인한 평균적인 절대효율 및 개방전압의 손실은 각각 0.22%p, 5.6 mV 로 평가되었다. 특히, 전체 에미터 재결합에서 전극 재결합이 차지하는 비중(Jom/Joe)은 26%로 평가되었고, 금속 마스크(16%)에 비해 10%p 더 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 Jom의 높은 비중은 태양전지의 전면 전극 면적 비율이 약 3% 내외인 것을 감안하면 상당한 것이다.

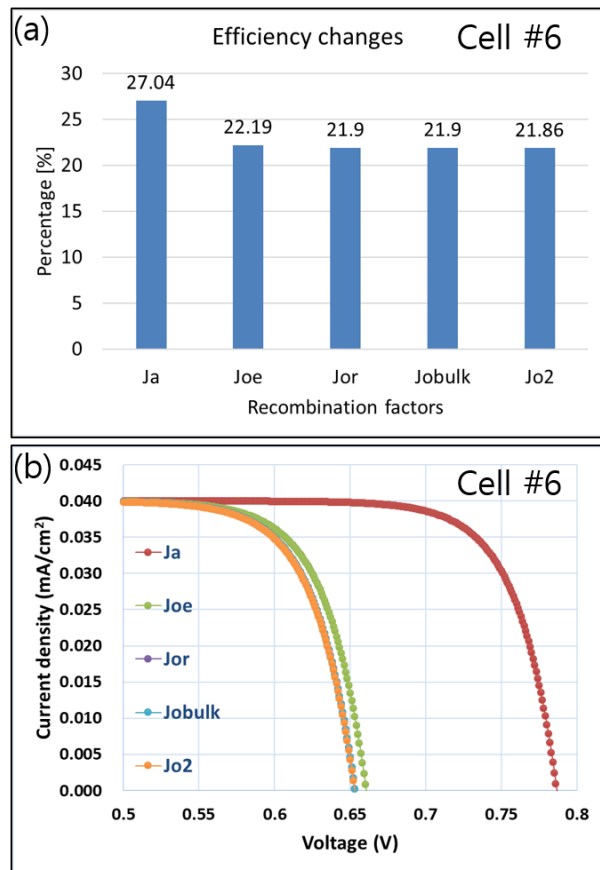
Fig. 6은 누적 재결합 요인에 따른 절대 효율 손실을 나타낸다. 재결합 요인은 각각 Auger (Ja), 에미터(Joe), 후면(Jor), SRH (Jobulk), 전하공핍층(Jo2)으로 나타내었다. 절대효율 손실을 보면, 많은 양의 손실이 에미터에서도 기인함을 알 수 있다. 여러 가지 기술 발전으로 인해, 후면 재결합이 많이 감소한 상황에서 전면 에미터 재결합을 줄이는 것이 효율 향상에 핵심이 될 수 있다. 따라서, 금속마스크 제판의 지속적인 연구개발을 통해서 에미터 재결합의 25% 이상을 차지하고 있는 전극 재결합을 줄이는 것은 실리콘 태양전지 효율 향상에 큰 기여를 할 것으로 판단 된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존 실리콘 태양전지 금속 인쇄전극에 사용되는 망사 마스크 제판과 금속 마스크 제판을 사용한 태양전지의 특성을 세부적으로 분석하였다. 금속 마스크를 사용한 태양전지는 망사 마스크를 사용한 태양전지보다 접촉 면적이 적어 전극 재결합이 감소하는 것을 확인했다. 기존 망사 마스크를 사용한 셀의 평균 전극 재결합 전류밀도는 전체 에미터의 재결합 전류밀도의 약 26%를 차지하는 것으로 나타났고, 개방전압의 손실을 유발하여 효율 감소에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 하지만, 금속 마스크를 사용하면, Jom의 비중이 16%로 감소하여 금속전극형성으로 인한 재결합이 개선되는 것을 확인했다. 또한, 실제 light I-V 측정을 통한 태양전지 특성이 금속 마스크를 사용했을 때 전체적으로 더 높게 나타났다. 금속 마스크는 망사 마스크에 비해 물리적 내구성도 뛰어나고 인쇄 속도 측면에서 고생산성에 유리하다. 뿐만 아니라, 태양전지 특성 향상 측면에서도 장점이 있어 앞으로 산업적용을 위한 기술개발이 더욱 활발할 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 논문의 내용은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2018 3030019460, c-Si 태양전지용 고속 인쇄 전극 공정에 의한 7,000 wph급 제조능력을 갖는 고생산성 프린터 개발).



**Fig. 6.** (a) Efficiency loss analysis and (b) calculated I-V curve depending on the accumulated recombination factors

있고, 직렬저항의 소폭 감소로 인해 충전량이 1.27%p 증가하여 최종적으로 평균 절대효율이 0.53%p 향상되었다. Aspect ratio 향상으로 인한 전류밀도 증가는 크지 않았으나, 이는 공정의 최적화를 통해 더 향상될 수 있다고 판단된다.

Table 4는 다이오드 방정식을 통해 분석한 Jom으로 인한 효율과 개방전압의 손실이다. 망사 마스크를 사용한 태양전지의

## References

1. Kerr, M. J., Cuevas, A., and Campbell, P., "Limiting efficiency of crystalline silicon solar cells due to Coulomb-enhanced Auger recombination," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 97-104, 2003.
2. Richter, A., Hermle, M., and Glunz, S. W., "Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, No. 4, pp. 1184-1191, 2013.
3. Kerschaver, E. V., et al., "Stable and Reliable Metallization by Application of Electro-Formed Ni Stencils," *Conference Proceedings, 16th EU PVSEC, Glasgow, UK, 2000*.
4. Yao, G., "High Efficiency Metal Stencil Printed Silicon Solar Cells," Ph.D. Thesis, Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW, Australia, 2005.
5. Edwards, M. B., "Screen and Stencil Print Technologies for Industrial N-Type Silicon Solar Cells," Ph.D. Thesis, Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW, Sydney, Australia, 2008.
6. Cotter, J. E., et al., "Laser-formed stencils for printed silicon solar cells," *Conference Proceedings, 31st IEEE PVSC, 2005*.
7. Yao, G., et al., "Metal Stencil-Printed Selective Emitter Solar Fabrication on Cz Wafer," *Conference Proceedings, 20th EU PVSEC, Barcelona, Spain, pp. 749-752, 2005*.
8. Yao, G., et al., "Comparison of Stencil and Screen Printed Solar Cells" *Conference Proceedings, 15th Int. PV SEC, Shanghai, China, pp. 299-300, 2005*.
9. Edwards, M., et al., "Metallisation for N-type, Stencil Printed Silicon Solar Cells," *Conference Proceedings, 15th PVSEC, Shanghai, China, pp. 710-711, 2005*.
10. Hannebauer, H., et al., "Single print metal stencils for high-efficiency PERC solar cells," *6th Workshop on Metallization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells, Constance, Germany, pp. 40-45, 2016*.
11. Shanmugam, V., et al., "Analysis of Fine-Line Screen and Stencil-Printed Metal Contacts for Silicon Wafer Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 5, No. 2, pp. 525-533, 2015.
12. Tepner, S., Wengenmeyr, N., Linse, M., Lorenz, A., Pospischil, M., and Clement, F., "The Link between Ag-Paste Rheology and Screen-Printed Solar Cell Metallization," *Advanced Materials Technologies*, Vol. 5, No. 10, 2000654, 2020.