

TLM 및 CTLM 을 이용한 실리콘 태양전지 전면전극소재의 접촉 비저항 측정 비교연구

신 동 윤*† · 김 유 리*

* 국립부경대학교 인쇄정보공학과

Comparison of Contact Resistivity Measurements of Silver Paste for a Silicon Solar Cell Using TLM and CTLM

Dong-Youn Shin *† and Yu-Ri Kim *

* Dept. of Graphic Arts Information Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received March 11, 2014 ; Revised April 21, 2014 ; Accepted April 22, 2014)

Key Words: Silicon Solar Cell(실리콘 태양전지), Silver Paste(실버 페이스트), Contact Resistivity(접촉 비저항), Circular Transmission Line Method(원형 접촉 비저항 측정법), Linear Transmission Line Method (선형 접촉 비저항 측정법)

초록: 실리콘 태양전지의 실버 전극과 이미터층 사이의 접촉 비저항은 원형 접촉 비저항 측정법과 선형 비저항 측정법을 이용하여 계측되어 왔다. 원형 접촉 비저항 측정법은 누설 전류를 차단하기 위한 메사 에칭 등의 부가적인 공정이 요구되지 않는 장점이 있으며, 선형 접촉 비저항 측정법은 완성된 태양전지로부터 직접 샘플을 취득하여 측정을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 측정법 들을 이용하여 실리콘 태양전지 전면 전극의 접촉 비저항을 계산하기 위한 저항값들을 측정할 때 수반 되는 문제점들에 대한 비교연구를 수행하였으며, 선형 접촉 비저항 측정법이 실버 전극의 선폭과 두께 에 따른 접촉 비저항 변화를 좀더 정확하게 묘사할 수 있는 요인에 대해 설명하였다.

Abstract: Contact resistivity between silver electrodes and the emitter layer of a silicon solar cell wafer has been measured using either the circular transmission line method or the linear transmission line method. The circular transmission line method has an advantage over the linear transmission line method, in that it does not require an additional process for mesa etching to eliminate the leakage current. In contrast, the linear transmission line method has the advantage that its specimen can be acquired directly from a silicon solar cell. In this study, measured resistance data for the calculation of contact resistivity is compared for these two methods, and the mechanism by which the linear transmission line method can more realistically reflect the impact of the width and thickness of a silver electrode on contact resistivity is investigated.

1. 서 론

신재생에너지 팽창정책에 더불어 일본 후쿠시마 원자력발전소 사고 이후, 신재생에너지에 대한 관심이 다시 증대되고 있으며, 그 중에서도 도심 내 발전이 가능한 태양광 발전이 주목을 받고 있다. 염료 감응형, 유기 태양전지와 같은 다양한 태양

광 발전 방식들 중에서 단결정 혹은 다결정 실리콘 웨이퍼를 이용한 벌크형 실리콘 태양전지가 제조비용의 저렴함과 높은 효율 때문에 시장에서 가장 높은 점유율을 보이고 있다.

벌크형 실리콘 태양전지의 효율을 결정하는 주요 저항 성분들은 Fig. 1 에 보인 바와 같이, 후면 전극 저항, 실리콘 웨이퍼 자체와 이미터층의 저항, 전극과 이미터층 사이의 접촉 비저항, 실버 전극의 저항 등으로 구성되는 직렬 저항들과 셉트 저항 등이 있다.

† Corresponding Author, dongyoun.shin@gmail.com
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

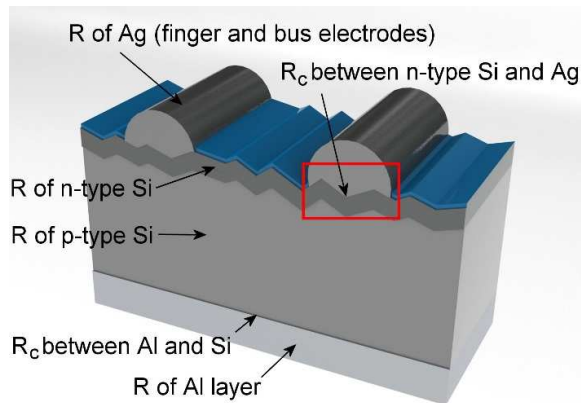


Fig. 1 Components of series resistance in a silicon solar cell

이러한 다양한 저항 성분들 중에서 실리콘 태양 전지의 전면 전극 형성기술에 대한 기술개발이 가장 활발한데, 전류밀도를 높이기 위해서 전극의 선폭을 줄이면서도 두께를 높이는 고종횡비 전극 형성 기술과,⁽¹⁻⁴⁾ 전극 소재와 실리콘 웨이퍼의 이미터층 사이의 접촉 비저항을 낮춤으로써 직렬 저항을 개선하기 위한 연구가 중요한 개발 방향이다.

특히, 전면 전극과 실리콘 태양전지 상부의 이미터층 사이의 접촉 비저항을 낮추기 위한 전극 소재의 개발이 중요한 현안인데, 이를 위해서는 적합한 접촉 비저항 측정법의 사용이 필수적이다. 관련 문헌상에 나타나는 다양한 접촉 비저항의 측정법들은 주로 반도체 제조와 관련된 것들로서, 원형 접촉 비저항 측정법(circular transmission line method or circular transfer length method, CTLM)과⁽⁵⁻⁷⁾ 선형 접촉 비저항 측정법(transmission line method or transfer length method, TLM)이⁽⁸⁻¹⁰⁾ 있다. 이들 접촉 비저항 측정법들은 특정 거리만큼 떨어져 있는 특정 형태의 전극들을 형성한 후, 전극들간의 거리에 따른 일련의 저항값들을 측정하는 방식을 취하고 있다. 전극들간의 거리에 따른 저항값들의 변화에 대한 추세를 구한 후, 전극 간의 거리가 가상적으로 0 m 가 될 때의 저항값을 추론함으로써 접촉 비저항을 계산할 수 있다. 이때, 일련의 전극들을 동심원 형태로 구성하는 경우에는 원형 접촉 비저항 측정법, 직선 형태로 구성하는 경우에는 선형 접촉 비저항 측정법으로 구분된다.

그러나, 반도체 제조와 관련되어 사용되어 왔던 측정법들은 전극의 형성을 스퍼터링과 같은 균일한 계면접착을 형성할 수 있는 증착법을 사용하였기에 신뢰할만한 결과를 도출할 수 있었지만, 태양전지의 전극에는 접촉 비저항을 결정하는 주요 인자인 글라스 프리팅과 같은 입자들이 불연속적으

로 포함되어 있을 뿐만 아니라, 실리콘 웨이퍼의 표면에 형성되어 있는 텍스처링에 의하여 전극과 이미터층 사이의 접촉이 균일하지 않기 때문에 측정된 저항값들에 많은 편차가 발생할 수 있으며, 이로 인해 접촉 비저항 측정법의 신뢰성에 대한 재평가가 요구된다.

본 논문에서는 원형 접촉 비저항 측정법과 선형 접촉 비저항 측정법을 소개하고, 각 측정법의 장점과 단점을 비교하도록 하며, 태양전지 전면 전극의 접촉 비저항을 측정할 때 나타나는 현상들에 대해 논의하도록 한다.

2. 실험

실험에 사용된 스크린 인쇄용 실버 페이스트는 상업적 용도로 개발된 것과 실험을 위해 자체 개발한 것을 사용하였다. 실험을 위해 자체 개발한 실버 페이스트의 주요 구성성분은 실버 입자들(HP-0702, D50=0.13~0.35 μm , 희성금속㈜)과 글라스 프리팅(V0981, D50=1.06 μm , Ceradyne, Inc., USA)이다. 실버 입자들 및 글라스 프리팅의 분산을 보조하고 점도를 조절함과 동시에 실버 페이스트의 건조 시 도막 균열을 방지하기 위해 유기 바인더를 첨가하는데, 본 연구에는 에틸 셀룰로스(CAS No. 9004-57-3, Sigma-Aldrich Corp., USA)를 유기 바인더로 사용하였다. 실버 입자와 글라스 프리팅을 분산하기 위해 고분자 계열의 분산제(Zephyrym PD 2246 SF, Croda International Plc., UK)를 사용하였으며, 용제로는 butyl carbitol acetate (BCA) (2-(2-butoxyethoxy) ethyl acetate, CAS No. 124-17-4, 삼전화학㈜)와 xylene(o-xylene, CAS No. 95-47-6, SK 케미칼㈜)을 7:3 으로 혼합하여 사용하였다.

조제된 실버 페이스트는 스페큘라를 이용하여 대략적으로 혼합을 한 후에, 3 롤 밀(EXAKT 50, EXAKT Technologies, Inc., Germany)을 이용하여 수 차례 반복하여 수 분간 분쇄 및 분산을 하였다. 이때, 3 롤 밀의 피드 롤과 센터 롤의 간극은 20 μm , 센터 롤과 에이프론 롤의 간극은 10 μm 로 설정하였으며, 에이프론 롤을 통해 나오는 페이스트의 색상이 균질하다고 판단될 때까지 작업을 반복하였다.

접촉 비저항 측정을 위한 샘플은 KPE(주)에서 공급받은 단결정 실리콘 태양전지 웨이퍼를 20 mm \times 20 mm 로 절단하여 사용하였으며, 원형 접촉 비저항과 선형 접촉 비저항 측정을 위한 전극 패턴은 Fig. 2 에 보인 바와 같이 실버 페이스트를 스크린 인쇄하여 형성하였다.

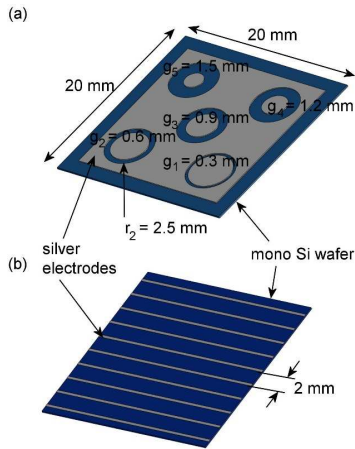


Fig. 2 Configurations of the specimens for the comparison of resistance measurement methods, (a) CTLM, and (b) TLM

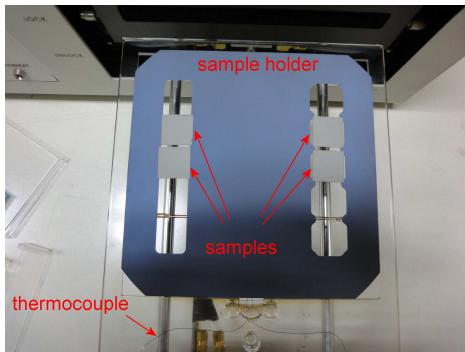


Fig. 3 The used rapid thermal processor, AccuThermo AW 610 and sample locations

원형 접촉 비저항 측정을 위한 전극 패턴은 5 개의 동심원으로 구성되는데, 외부 원형전극의 반경 r_2 는 2.5 mm 로 고정하고, 내부 원형전극의 반경 r_1 을 변화시켜, 외부와 내부 원형전극의 간극을 0.3 mm 에서 1.5 mm 까지 0.3 mm 씩 변화시켰다.

선형 접촉 비저항 측정을 위한 전극패턴은 2 mm 간격으로 길이가 W 이고 선폭이 d 인 선형 실버 전극을 인쇄한 형태이다.

원형 및 선형 접촉 비저항을 측정하기 위한 전극 패턴을 인쇄한 후, 150 °C 로 설정된 가열기 (DHSL.HP2020300, 대한과학(주))에서 10 분간 건조시켰으며, 건조된 샘플들은 Fig. 3 에 보인 바와 같이 급속 열처리기(AccuThermo AW 610, Allwin21 Corp., USA)를 이용하여 소성하였다. 급속 열처리기를 이용하여 20 mm × 20 mm 크기의 샘플들을 균일하게 소성하기 위하여, 샘플과 동일한 재질인 태양전지 웨이퍼를 가공하여 샘플 홀더를 제작하였으며, 열전대가 샘플 홀더의 하부면에 직접 접촉하도록 함으로써 소성온도가 정확하게 피드백 제어될 수 있도록 하였다. 급속 소성을 위한 소성

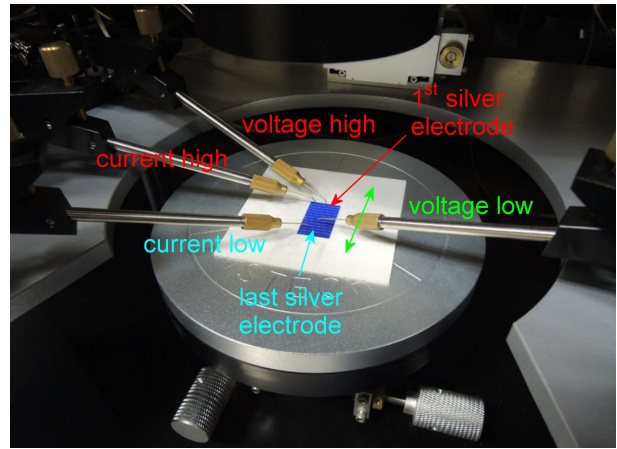


Fig. 4 Probe setup for the resistance measurements of a TLM sample

프로파일은 대략 소성 시작 후 7.5 초에 상온에서 467 °C 에 도달하도록 하였으며, 이후 500 °C 까지 21.5 초에 걸쳐 완만히 온도를 상승시킴으로써 실버 입자들과 글라스 프리트를 제외한 실버 페이스트의 구성성분들이 열분해 되어 제거되도록 한다. 마지막으로 800 °C 까지 4 초만에 상승시킨 후 자연 냉각되도록 함으로써 소성을 마쳤다.

선형 접촉 비저항 측정을 위한 샘플들의 경우, 전극 양쪽의 가장자리 면들을 통해 누설되는 전류를 소거하기 위해 양쪽 가장자리를 레이저로 절단하였다. 따라서, 최종적인 선형전극의 길이는 대략 15 mm 정도였다. 원형 접촉 비저항 측정용 샘플의 외부 원형전극 반경 r_2 를 2.5 mm 로 설정한 것은 편의상 선형전극의 길이와 유사한 원주를 가지도록 하기 위함이었다.

실버 전극 간의 저항값들은 프로브 스테이션 (MST 4000A, 엠에스테크(주))과 소스 미터(Model 2401, Keithley Instruments, Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 원형 접촉 비저항 측정을 위한 저항값들을 측정할 경우에는 프로브 스테이션에 설치된 4 개의 프로브 중 2 개를 전류 하이 및 전압 하이로 지정하여 동심원의 내부 혹은 외부에 연결하고, 나머지 프로브 2 개는 전류 로우 및 전압 로우로 지정하여 동심원의 반대측 전극에 연결하였다. 선형 접촉 비저항 측정을 위한 저항값들을 측정할 경우에는 Fig. 4 에 보인 바와 같이 프로브 2 개를 전류 하이 및 로우로 지정하여 샘플의 첫 번째 및 마지막 실버 전극에 연결하였으며, 프로브 1 개를 전압 하이로 지정하여 첫 번째 실버 전극에 연결하였다. 마지막 프로브는 전압 로우로 지정하여 두 번째 실버 전극부터 마지막 전극까지 하나씩 옮겨가며 저항값들을 측정하도록 한다.

실버 전극의 폭은 광학현미경(JSZ-7XT, 삼원과학산업㈜)을 이용하여 측정하였으며, 원형 접촉 비저항 측정법으로 측정한 저항값들은 오리진랩사의 오리진을 이용하여 접촉 비저항을 계산하였고, 선형 접촉 비저항 측정법으로 측정한 저항값들은 마이크로소프트사의 엑셀을 이용하여 접촉 비저항을 계산하였다.

3. 결과 및 토의

원형 혹은 선형 접촉 비저항 측정을 위한 샘플을 석영 판 위에서 급속 열처리기로 소성을 할 경우, Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 균일하게 소성이 되지 않는 문제가 발생하였다. 석영 판에 샘플이 면 접촉의 형태로 직접 접촉할 경우 석영 판과 샘플의 접촉면 사이에 열이 축적되어 과도한 소성이 발생하거나, 샘플로부터 석영 판으로 열전달이 발생하여 소성온도가 낮아지는 문제라고 판단되어, 샘플 모서리 네 곳에만 석영 기둥으로 지지한 후 소성을 시도하였으나, 동일한 소성 불균일 문제가 발생하였다. 다양한 시도를 하던 중, 샘플의 재질과 두께가 동일한 태양전지 실리콘 웨이퍼로 샘플 홀더를 제작하여 소성을 할 경우 Fig. 5(b)와 같이 균일한 소성결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 소성 균일도 문제를 해결한 후, 원형 접촉 비저항 측정을 위한 샘플 3 개를 소성하고 저항값들을

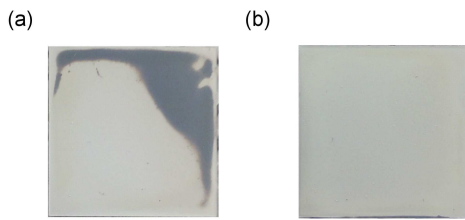


Fig. 5 RTP sintering uniformity with (a) a quartz sample holder, and (b) a sample holder made with a silicon solar cell wafer

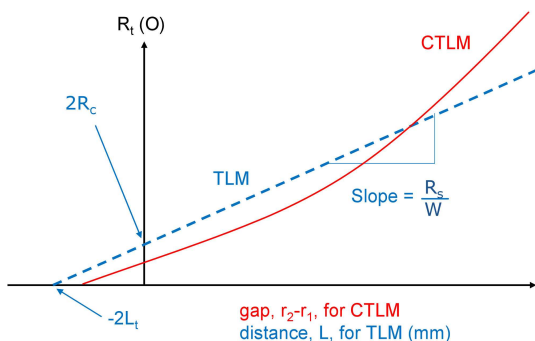


Fig. 6 Illustration of typical CTLM and TLM plots

측정하였다. 원형 접촉 비저항 샘플로부터 측정된 저항값들을 R_t , 동심원의 내부전극과 외부전극의 반경을 각각 r_1 과 r_2 , 트랜스퍼 길이를 L_t , I_n 과 K_n 을 각각 제 1 종 및 2 종 변형 베셀 함수라고 하였을 때, 식 (1)에 대입함으로써 면저항 R_s 와 L_t 를 오리진의 비선형 커브 핏팅(curve fitting) 기능을 이용하여 구할 수 있으며, 식 (2)를 이용하여 접촉 비저항 ρ_c 를 계산할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$R_t = \frac{R_s}{2\pi} \left\{ \ln \frac{r_2}{r_1} + L_t \left(\frac{1}{r_1} \frac{I_0(r_1/L_t)}{I_1(r_1/L_t)} + \frac{1}{r_2} \frac{K_0(r_1/L_t)}{K_1(r_1/L_t)} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\rho_c = R_s L_t^2 \quad (2)$$

선형 접촉 비저항 샘플을 이용하여 접촉 비저항 ρ_c 를 계산하는 것은 Fig. 6 에 보인 바와 같이 샘플의 실버 전극 사이의 거리 L 에서 측정된 저항값들 R_t 를 직선으로 연결한 후, 식 (3)과 (4)를 이용하여 접촉 저항 R_c 와 트랜스퍼 길이 L_t , 면저항 R_s 를 취득하였다. 이와 같이, 선형 접촉 비저항 측정법은 원형 접촉 비저항 측정법에 비해 기하학적 특성을 이용하기 때문에 좀더 직관적이라는 장점이 있다.⁽¹²⁾

$$R_t = \frac{R_s}{W} (L + 2L_t) \quad (3)$$

$$R_c = \frac{\rho_c}{L_t W} \coth \left(\frac{d}{L_t} \right) \quad (4)$$

만약 선형 접촉 비저항 측정을 위한 샘플에 인쇄된 실버 전극들의 가장자리를 통해 전류가 누설될 경우 면저항 R_s 가 낮게 측정되는 문제가 있기 때문에, 메사 에칭 등의 부가적인 반도체 공정을 통해 누설 전류를 차단하여야 한다. 본 연구에서는 메사 에칭 대신 선형 접촉 비저항 측정용 샘플의 양 끝단을 절단하여 누설전류를 차단하였다. 반면, 원형 접촉 비저항 측정을 위한 샘플은 동심원 형태의 외부 실버 전극과 내부 실버 전극 패턴을 이용함으로써 전류가 누설될 여지가 원천적으로 존재하지 않기 때문에, 선형 접촉 비저항 측정용 샘플에서와 같이 누설 전류를 차단하기 위한 메사 에칭 혹은 절단 등과 같은 부가적인 공정이 필요하지 않다는 장점이 있다. 그러나, 선형 접촉 비저항 측정용 샘플은 태양전지 전면 전극의 일부를 절단함으로써 직접 태양전지로부터 샘플을 취득할 수 있는데 반하여, 원형 접촉 비저항 측정용 샘플은 태양전지 전면 전극과는 전혀 다른 형태, 즉 동심원 형태의 실버 전극들을 이용하기 때문에 태양전지로부터 샘플을 직접 취득할 수 없고, 별도

로 샘플 작업을 하여야 한다. 따라서, 원형 접촉 비저항 측정용 샘플의 저항값들로 계산한 접촉 비저항이 실제 태양전지의 실버 전극들의 특성을 정확히 반영할 수 있는가에 대한 검증이 요구된다.

따라서, 동일한 실버 페이스트로 3 개의 원형 접촉 비저항 측정용 샘플들과, 5 개의 선형 접촉 비저항 측정용 샘플들을 제작한 후 저항값들을 측정하여 Fig. 7 에 도시하였다. 원형 접촉 비저항 측정용 샘플들의 저항값들에 대한 추세선은 식 (1)을, 선형 접촉 비저항 측정용 샘플들의 저항값들에 대한 추세선은 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

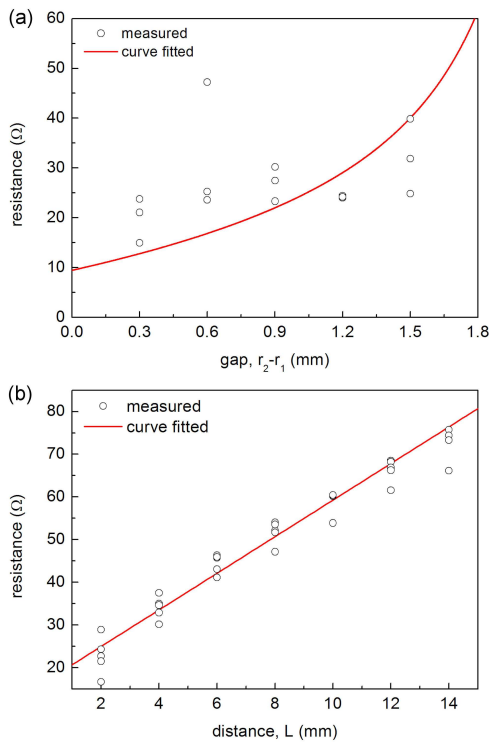


Fig. 7 Resistance data and trend lines measured with (a) CTLM, and (b) TLM

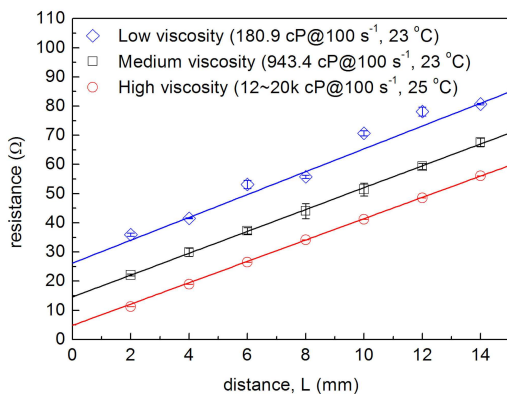


Fig. 8 Comparison of the measured resistance data with the diluted silver pastes

선형 접촉 비저항 측정용 샘플들로부터 측정된 저항값들은 원형 접촉 비저항 측정용 샘플들로부터 측정된 저항값들에 비해 강한 추세 경향성을 나타내기 때문에 관련 수식들을 이용하여 접촉 비저항을 용이하게 계산할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 같은 20 mm × 20 mm 크기의 원형 접촉 비저항 측정용 샘플은 동심원 형태의 전극 패턴을 배치할 수 있는 공간적 제약이 있기 때문에 5 개의 저항값들만을 측정할 수 있는데 반해, 선형 접촉 비저항 측정용 샘플에서는 최대 9 개까지 저항값들을 측정할 수 있다는 장점이 있다.

선형 접촉 비저항 측정용 샘플들로부터 측정된 저항값들이 원형 접촉 비저항 측정용 샘플들로부터 측정된 저항값들보다 추세 추종성이 좋으며 상대적으로 편차가 적다는 장점이 있으나, 절대적인 편차는 아직 크다는 문제점이 발견되었다. 이에 대한 요인을 분석하기 위해 태양전지 전면 전극용 상용 실버 페이스트를 BCA 와 혼합하지 않은 것(고점도), 실버 페이스트와 BCA 를 10:1 의 비율로 혼합한 것(중점도), 그리고 4:1 의 비율로 혼합한 것(저점도)으로 나누어 선형 접촉 비저항 측정용 샘플들을 재제작하여 저항값들을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 8 에 도시하였다. 고점도의 실버 페이스트는 점도계로 측정할 수 있는 점도 측정범위를 넘어서기 때문에 제조사의 측정값을 이용하였다.

점도가 낮아질수록, 즉 실버 페이스트가 희석될수록 저항값들과 함께 접촉 비저항도 110.5 mΩ·cm²에서 1420.8 mΩ·cm²을 거쳐 4627.3 mΩ·cm²으로 높아지는 현상이 발생하였다. 실버 전극과 실리콘 태양전지의 이미터층과의 접합에 있어서 가장 중요한 요소는 글라스 프릿이다. 글라스 프릿은 소성 시에 실리콘 태양전지의 반사방지막인 실리콘 나이트라이드층(SiN_x)을 에칭하여 실버 전극이 실리콘 태양전지의 이미터층과 접합되도록 하기 때문에 실버 페이스트에서 글라스 프릿의 조성비가 낮은 접촉 비저항을 얻는데 중요한 역할을 한다.^(13,14)

그러나, BCA 를 이용하여 실버 페이스트를 희석을 하더라도 실버 입자들과 글라스 프릿의 조성비 자체는 변하지 않으므로, 희석이나 점도 그 자체로 인해 접촉 비저항이 높아지는 현상을 설명할 수는 없다. 이에 대한 가장 적절한 설명은 실버 전극의 단면에 포함되어 있는 글라스 프릿의 절대량이다. Fig. 9 는 실버 페이스트를 인쇄 후 건조된 상태를 나타낸 일러스트레이션이다. A 로 표시된

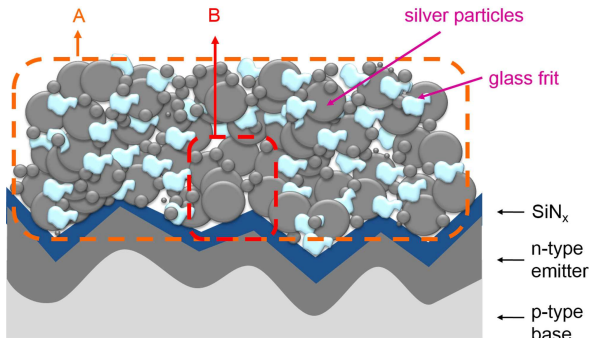


Fig. 9 Influence of the absolute amount of glass frit in the cross section of a silver electrode

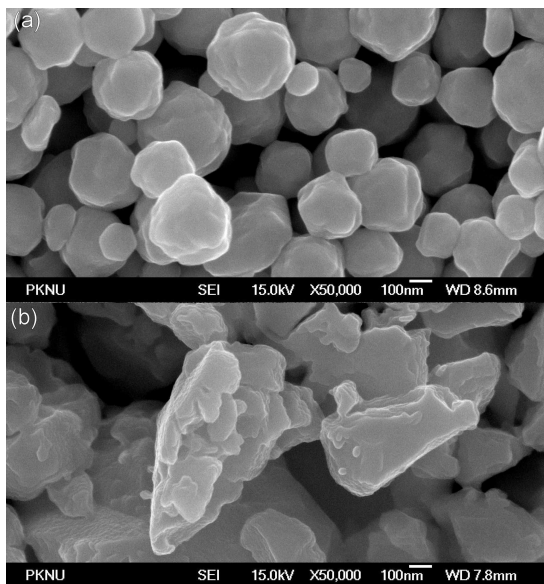


Fig. 10 Microscopic images of (a) silver particles, and (b) glass frit

영역 내부에는 충분한 양의 글라스 프릿이 존재하고 있으며, 소성 온도가 글라스 프릿의 연화점 이상으로 올라갈 경우 글라스 프릿이 실리콘 나이트라이드층으로 유동하여 에칭을 수행한다.

그러나, 글라스 프릿은 Fig. 10 에 보인 바와 같이 마이크로미터급의 입자들이기 때문에, 건조된 실버 전극 내부에 불연속적으로 분포되어 있으며, 만약 B 로 표시된 영역 정도로 실버 전극의 폭과 두께가 얇아질 경우 실리콘 나이트라이드층을 에칭할 수 있을 정도로 충분한 글라스 프릿이 실버 전극에 포함되어 있지 않을 확률이 높아진다. 이와 같은 설명은 실버 전극의 선폭이 일정 이하일 경우 접촉 비저항이 급격히 상승한다는 Pysch 의 실험 결과와도 일치한다.⁽¹⁵⁾ 따라서, 실버 전극의 선폭과 두께에 의해 실버 전극 단면에 포함된 글라스 프릿의 절대량이 다르기 때문에 접촉 비저항이 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

원형 접촉 비저항 측정법의 경우 외부 동심원 전극의 면적은 내부 동심원 전극의 면적과 동일하지 않기 때문에 내부 동심원 전극의 면적이 일정 이하가 되면 글라스 프릿의 불균일 분포에 의한 영향이 외부 동심원 전극에 비해 현저하게 다르게 나타날 수 있으며, 이로 인해 접촉 비저항을 정확하게 계산할 수 없다. 태양전지의 실버 전극과 전혀 다른 형태의 패턴을 이용하는 원형 접촉 비저항 측정법은 이러한 실버 전극의 단면에 포함되어 있는 글라스 프릿의 영향을 직접적으로 반영하지 못하므로, 선형 접촉 비저항 측정법이 실버 페이스트의 인쇄 후 접촉 비저항을 정확하게 계측하는데 더 유리하다.

4. 결 론

본 연구에서는 태양전지 상부에 형성된 실버 전극들 간의 저항값들을 측정함으로써 접촉 비저항을 측정하는 방법인 원형 접촉 비저항 측정법과 선형 접촉 비저항 측정법을 비교하고, 실버 전극의 선폭 및 두께가 접촉 비저항에 미치는 요인에 대하여 논의하였다.

원형 접촉 비저항 측정법은 전극의 가장자리를 통해 누설되는 전류가 없기 때문에 샘플을 제작하기 간단하다는 장점이 있으나, 동심원 형태의 전극을 인쇄하여야 하기 때문에 태양전지를 절단하여 직접 샘플을 취득할 수가 없으며, 별도의 샘플을 제조작업을 수행해야 한다는 단점이 있다. 또한, 공간의 제약 때문에 20 mm × 20 mm 크기의 샘플에서는 동심원을 최대 5 개 밖에 배치할 수 없고, 이로 인해 추세선을 파악하기 힘들다는 단점이 있다. 이에 반해, 선형 접촉 비저항 측정법은 태양전지를 절단함으로써 직접 샘플을 취득할 수 있으며, 저항 데이터의 개수를 늘이기가 용이하므로 추세선을 쉽게 파악할 수 있다는 장점이 있다.

실버 페이스트의 조성이 동일하더라도 농도가 낮아질 경우 실버 전극들 사이의 측정 저항값이 증가할 뿐만 아니라 변동이 심해지는 문제가 있는데, 이와 같은 현상은 실버 전극 내부에 함유된 글라스 프릿의 절대량이 부족해서 나타나는 현상임을 알았다.

따라서, 선형 접촉 비저항 측정법은 실버 전극의 인쇄 결과, 즉 실버 전극의 선폭과 두께에 따른 접촉 비저항 영향을 정확하게 저항값에 반영하기 때문에 태양전지 전면 전극과는 상이한 동심원 형태의 전극들을 이용하여 접촉 비저항을 계산하는 원형 접촉 비저항 측정법보다 정확한 접촉 비

저항 측정이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년:C-D-2013-0495)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, Y. K., Jeong, T. E., Oh, D. H. and Kim, N. S., 2010, "Synthesis of Top Connector for Solar Cells by Using Silver Paste," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, pp. 1837~1842.
- (2) Pospischil, M., Zengerle, K., Specht, J., Birkle, G., Koltay, P., Zengerle, R., Henning, A., Neidert, M., Mohr, C., Clement, F. and Biro, D., 2011, "Investigations of Thick-Film-Paste Rheology for Dispensing Applications," *Energy Procedia*, Vol. 8, pp. 449~454.
- (3) Lee, C.-J. and Shin, D.-Y., 2012, "Mask Patterning for Two-Step Metallization Processes of a Solar Cell and Its Impact on Solar Cell Efficiency," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, pp. 1135~1140.
- (4) Kim, D.-H., Ryu, S.-S., Shin, D., Shin, J.-H., Jeong, J.-J., Kim, H.-J. and Chang, H. S., 2012, "The Fabrication of Front Electrodes of Si Solar Cell by Dispensing Printing," *Mat. Sci. Eng. B*, Vol. 177, pp. 217~222.
- (5) Xu, C., Wang, J., Wang, M., Jin, H., Hao, Y. and Wen, C. P., 2006, "Reeves's Circular Transmission Line Model and Its Scope of Application to Extract Specific Contact Resistance," *Solid State Electron.*, Vol. 50, pp. 843~847.
- (6) Lewis, L., Maaskant, P. P. and Corbett, B., 2006, "On the Specific Contact Resistance of Metal Contacts to p-Type GaN," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 21, pp. 1738~1742.
- (7) Kato, H., Takeuchi, D., Tokuda, N., Umezawa, H., Okushi, H. and Yamasaki, S., 2009, "Characterization of Specific Contact Resistance on Heavily Phosphorus-Doped Diamond Films," *Diam. Relat. Mater.*, Vol. 18, pp. 782~785.
- (8) Vinod, P. N., Chakravarty, B.C., Lal, M., Kumar, R. and Singh, S.N., 2000, "A Novel Method for the Determination of the Front Contact Resistance in Large Area Screen Printed Silicon Solar Cells," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 286~290.
- (9) Vinod, P. N., 2011, "Specific Contact Resistance Measurements of the Screen-Printed Ag Thick Film Contacts in the Silicon Solar Cells by Three-Point Probe Methodology and TLM Method," *J. Mater. Sci.-Mater. El.*, Vol. 22, pp. 1248~1257.
- (10) Vinod, P. N., 2013, "The Electrical and Microstructural Properties of Electroplated Screen-Printed Ag Metal Contacts in Crystalline Silicon Solar Cells," *RSC Adv.*, Vol. 3, pp. 14106~14113.
- (11) Lee, C. L., 2004, "Investigations on Ohmic Contact to p-Doped Gallium Nitride," MSc Dissertation, National University of Singapore.
- (12) Goetzberger, A., Knobloch, J. and Voss, B., 1998, "Crystalline Silicon Solar Cells," John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- (13) Jeon, S. J., Koo, S. M., and Hwang, S. A., 2009, "Optimization of Lead- and Cadmium-Free Front Contact Silver Paste Formulation to Achieve High Fill Factors for Industrial Screen-Printed SI Solar Cells," *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, Vol. 93, pp. 1103~1109.
- (14) Hong, K.-K., Cho, S.-B., Huh, J.-Y., Park, H. J., and Jeong, J.-W., 2009, "Role of PbO-Based Glass Frit in Ag Thick-Film Contact Formation for Crystalline Si Solar Cells," *Met. Mater. Int.*, Vol. 15, pp. 307~312.
- (15) Pysch, D., Mette, A., Filipovic, A. and Glunz, S. W., 2009, "Comprehensive Analysis of Advanced Solar Cell Contacts Consisting of Printed Fine-Line Seed Layers Thickened by Silver Plating," *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol. 17, pp. 101~114.