

플라즈마 제트 도핑 장치의 대기 및 기체의 압력 변화에 대한 방전 특성

김종길 · 이원영 · 김윤중 · 한국희 · 김동준 · 김현철 · 구제환 · 권기청 · 조광섭*

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2012년 9월 20일 받음, 2012년 10월 25일 수정, 2012년 11월 9일 확정)

결정질 태양전지 등의 도핑 공정에 적용하기 위한 플라즈마 제트 장치의 기초 방전 특성을 조사한다. 대기압에서의 아르곤 플라즈마 제트와 대기 압력변화에 대한 대기 플라즈마 제트, 그리고 아르곤 분위기 압력 변화에 대한 플라즈마 제트의 전류-전압은 전형적인 정상 글로우 방전의 특성을 갖는다. 대기압 플라즈마 제트의 방전 전압은 약 2.5 kV의 높은 전압이 요구되며, 대기 및 아르곤 플라즈마 제트는 200 Torr 이하의 낮은 압력에 대한 방전 전압은 약 1 kV가 된다. 도핑용 실리콘 웨이퍼에 조사되는 단일 채널 플라즈마 제트의 전류는 인가전압의 조절에 의하여 수 10~50 mA의 고 전류를 용이하게 얻는다. 플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하는 경우에 웨이퍼의 온도 상승은 정상상태에서 약 200°C가 된다. 실리콘 웨이퍼에 도핑 용재인 액상의 인산을 도포하여 플라즈마를 조사한 결과 얻어진 인 원자의 도핑 분포는 플라즈마 제트 도핑의 가능성을 보여준다.

주제어 : 플라즈마, 플라즈마 제트, 도핑, 태양전지

I. 서 론

태양전지용 도핑공정에서는 주로 소성로와 레이저를 사용한다 [1]. 소성로에 의한 도핑은 고온에 의하여 웨이퍼의 전면층을 도핑하게 된다 [2]. 소성로의 경우는 고온에 의하여 웨이퍼가 약화되는 문제가 있다. 레이저 장비를 사용한 도핑 방법은 부분적인 웨이퍼의 표면을 레이저를 조사하여 열처리한다. 따라서 소성로에 의한 고온의 공정으로 인하여 웨이퍼의 약화를 최소화 할 수 있다 [3-5]. 또한, 도핑 레벨과 확산 깊이의 조절이 용이하다 [6]. 이들 소성로나 레이저 도핑 공정 장치들은 도핑 농도 및 깊이 조절이 가능하고, 높은 농도의 도핑이 가능하며, 자동화 공정라인상의 설치가 가능하다는 장점이 있다. 다만 이들 도핑 장치는 고가의 장비이며, 도핑 공정의 비용과 공정 시간 등의 문제가 있다. 태양전지의 가격과 관련하여 도핑 공정비용을 낮추고 도핑의 질을 높이기 위한 새로운 공정기술의 개발이 요구되고 있다.

플라즈마 제트 도핑장치는 태양전지용 웨이퍼에 플라즈마를 조사하여 플라즈마의 전류를 웨이퍼에 흘려서 발생하는 열과 플라즈마 입자의 작용 등을 이용하여 p-n 접합이 형성되도록 하는 장치이다. 플라즈마 제트 장치의 전극 구

조는 대부분 침형 비늘 전극 구조로 전원 장치에 따라 다양한 방식들이 연구되고 있다 [7-14]. 플라즈마 제트 도핑장치는 고가의 진공 소성로 및 레이저 장비를 사용하지 않으므로 저 비용의 공정으로 전면 도핑 및 부분 도핑에 의한 에미터 형성이 가능하다. 또한 국부적인 면적의 도핑이 가능하므로 태양 전지 제조 공정 외에도 도핑공정을 필요로 하는 TFT, OLED, 전자 인쇄 등의 모든 기술에 응용할 수 있다. 레이저 도핑 장치와 마찬가지로 국부적인 도핑은 고온에 의한 웨이퍼의 약화를 줄일 수 있다. 이러한 목적으로 플라즈마 제트를 도핑 장치에 응용하기 위한 기초 연구를 소개한다.

본 연구는 도핑용 플라즈마 제트 장치에 대한 기초 방전 특성이다. 세 가지 방식의 플라즈마 제트 장치를 조사한다. 대기압에서의 아르곤(Ar)-플라즈마 제트 장치, 진공 챔버 내에서 대기의 압력을 변화한 대기-플라즈마 제트, 그리고 진공 챔버 내에서의 Ar 분위기 압력을 조절한 Ar-플라즈마 제트의 특성을 조사한다. 본 연구에서는 단일 채널의 플라즈마 제트의 특성을 조사하며, 향후 다중 채널의 제트 장치를 이용한 대 면적 도핑의 연구로 이어질 수 있다.

* [전자우편] gscho@kw.ac.kr

II. 실험

플라즈마 도핑 장치용 단일 채널 플라즈마 제트의 특성을 조사한다. 도핑용 웨이퍼에 플라즈마 제트를 조사하기 위하여 제트 장치를 가로 및 세로 방향으로 움직여서 국부적인 도핑공정에 이용한다. 단일 채널 이외에 다중 채널의 제트 장치를 사용하여 대면적의 전면 도핑도 가능하다. 본 연구는 플라즈마 제트 장치의 웨이퍼 조사에 의한 방전 특성에 국한한다.

본 실험에서 플라즈마 제트 장치의 전극은 원통형 금속 재질의 주사기용 바늘을 사용한다 [15-17]. 바늘 전극은 외경 1.47 mm, 내경 1.07 mm, 길이 30 mm이다. 바늘 전극을 외경 5 mm, 내경 3 mm, 그리고 길이 35 mm인 유리관에 삽입한다. 바늘 전극의 뒤쪽 끝은 테프론 튜브를 삽입하여 방전 기체를 주입한다. 플라즈마 제트 장치의 바늘 전극에 인가하는 전원은 DC-AC 자력식 인버터를 사용한다. 인버터의 출력은 최대 5 kV이며, 주파수는 수십 kHz인 사인파형의 전압이다.

본 실험은 세 가지 형태의 도핑용 플라즈마 제트를 조사한다. II-1절에서는 대기 중에서 Ar-플라즈마 제트의 특성을 조사한다. II-2절은 진공 챔버 내에서 대기 압력의

변화에 대한 대기 플라즈마 제트의 특성이다. II-3절은 진공 챔버 내에서 Ar 가스의 분위기 압력변화에 대한 Ar-플라즈마 제트의 특성을 조사한다. 그리고 II-4절에서는 대기압 분위기에서 Ar-플라즈마 제트 장치를 이용하여 태양 전지용 시료에 대한 도핑 결과를 소개한다.

1. 대기압 플라즈마 제트

도핑용 대기압 Ar-플라즈마 제트의 특성을 조사한다. Fig. 1은 대기압 Ar-플라즈마 제트 장치의 구조이다. 원통형 주사기 바늘을 유리관에 삽입하고, 바늘 전극 후미에 테프론 튜브를 연결하여 Ar 기체를 주입한다. Ar 기체의 유량은 1 lpm (liter per minute)이다. 바늘 전극에 15 pF의 안전 캐패시터(Ballast capacitor)를 부착한다. 도핑용 실리콘 웨이퍼 시료대는 두 가지의 구성에 대하여 조사한다. Fig. 1(a)의 시료대는 석영판 위에 구리 재질의 금속 시트 전극을 부착하여 접지하고, 그 위에 Si-웨이퍼가 위치한다. 웨이퍼는 가로 및 세로가 각각 30 mm이고, 두께가 0.2 mm이다. 접지 전극의 크기는 40×40 mm²이다. Fig. 1(b)는 구리재의 시트형 전극이 Si-웨이퍼보다 작은 경우이며, 접지 전극의 크기는 5×5 mm²이다. 두 가지 형태의 시료대에 대하여 플라즈마를 조사하여 접지 전극으로 흐르는 전류를 비교한다. 플라즈마 제트의 바늘 끝과 웨이퍼 사이의 간격을 5 mm로 유지하고 웨이퍼 위에 플라즈마 제트를

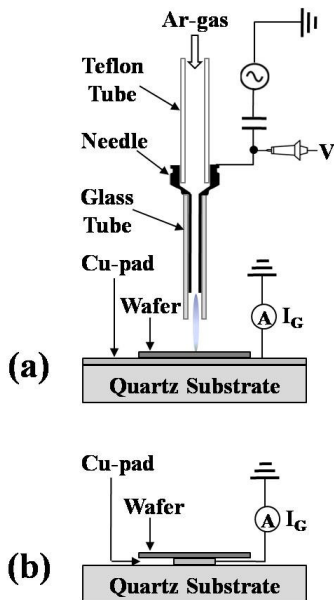


Figure 1. Schematics of atmospheric Ar-plasma jet device for doping on the wafer-substrate. The substrate of large area ground electrode in (a) and that of small area ground electrode in (b).

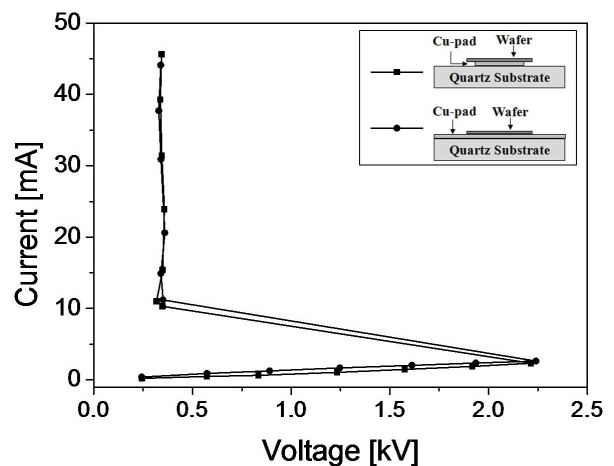


Figure 2. Current-voltage characteristics of atmospheric pressure plasma jet device for the substrate of different ground electrode shown in Fig. 1(a) and Fig. 1(b).

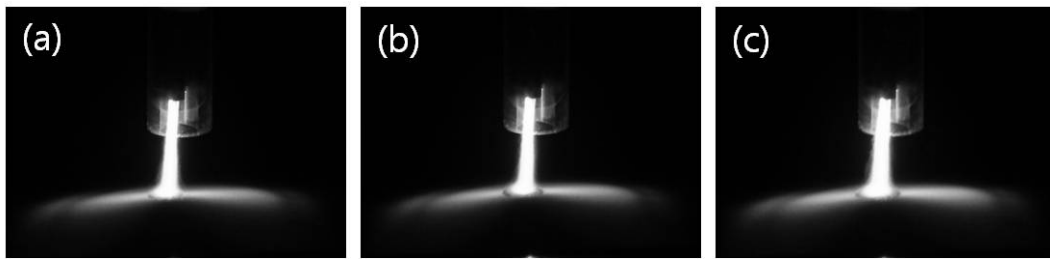


Figure 3. Photographs of atmospheric pressure plasma jet irradiation on the wafer are shown. (a) $V=0.35$ kV, $I=11.2$ mA. (b) $V=0.36$ kV, $I=20.6$ mA. (c) $V=0.34$ kV, $I=30.9$ mA.

조사하여 전류-전압 특성을 비교한다.

Fig. 2는 대기압 Ar-플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하여 측정한 전류-전압 특성 곡선이다. 비늘 전극에 인가되는 전압은 고전압 프로브를 사용하여 측정하고, 웨이퍼 하부에 위치한 접지 전극에서 전류를 측정한다. 접지 전극의 넓이가 웨이퍼보다 넓은 경우와 좁은 경우, 전류-전압 특성은 거의 동일하다. 이로부터 플라즈마 전류는 웨이퍼 표면으로 흐르지 않고 웨이퍼를 통과하여 접지 전극으로 흐른다는 것을 보여준다. 두 가지 경우의 전류-전압 특성은 전형적인 글로우 방전(glow discharge)의 특성을 보인다. 암전류(dark current) 영역과 타운젠드 방전(Townsend discharge)을 거쳐서 정규 글로우 방전(normal glow discharge)의 특성이 나타난다. 접지 전극이 웨이퍼보다 클 경우, 방전 개시 전압은 2.24 kV이며, 방전 개시 전류는 2.65 mA이다. 접지 전극이 웨이퍼보다 작을 경우, 방전 개시 전압은 2.21 kV이며, 방전 개시 전류는 2.35 mA이다. 두 경우 모두 정규 글로우 방전의 전압은 0.34 kV로 거의 일정하게 유지되며, 인가전압을 조정하여 약 10 mA에서 수 십 mA의 플라즈마 전류를 얻는다. 일반적으로 생체에 적용하기 위한 플라즈마 제트 장치에서는 전기적인 충격을 방지할 목적으로 1~2 mA의 저 전류가 요구된다. 그러나 본 실험에서는 플라즈마 도핑을 목적으로 하여 수 십 mA의 대 전류를 얻도록 제트 장치와 구동 장치를 설계하였다.

Fig. 3은 웨이퍼에 대기압 Ar-플라즈마 제트를 조사하였을 때의 사진이다. 각각의 사진은 정상상태(steady state)의 방전 전류에 대하여 (a)는 11.2 mA, (b)는 20.6 mA, 그리고 (c)는 30.9 mA이다. 플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하면, 플라즈마가 웨이퍼 표면에서 약간 퍼진다. 플라즈마 제트의 전류가 증가할수록 웨이퍼 표면에서 퍼지는 플라즈마의 면적은 다소 증가한다. 전류가 11.2 mA일 때 플라즈마 조사 영역의 직경은 2.3 mm이고, 20.6 mA일 때

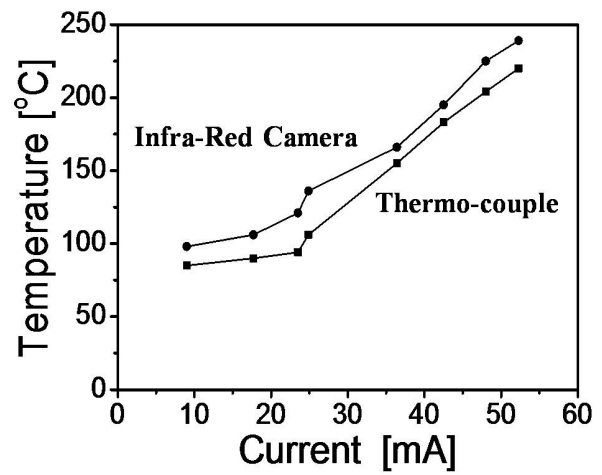


Figure 4. Substrate temperature according to the exposure of plasma current.

는 2.5 mm, 30.9 mA일 때는 2.8 mm이다.

일반적으로 웨이퍼의 도핑은 도핑 물질의 열적인 확산에 의해 발생한다. 본 연구는 플라즈마를 조사하여 도펀트를 Si-웨이퍼에 도핑하는 것을 목적으로 한다. 플라즈마 도핑의 경우는 플라즈마 전류 흐름에 의한 저항성 열(Joule heat)에 의한 도펀트의 확산작용을 일차적으로 고려한다. 그 외에 플라즈마 입자들과 도펀트와의 상호 작용도 고려된다. 본 실험에서 웨이퍼에 플라즈마 제트를 조사하였을 때, 정상상태에서의 웨이퍼의 온도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 웨이퍼의 온도를 적외선 카메라(Infra-Red camera)와 열전대(thermo couple)를 사용하여 측정하였다. 플라즈마 제트의 전류 값에 따라 온도 변화를 측정한다. 플라즈마 제트의 전류가 10 mA인 경우, 적외선 카메라로 측정된 온도는 98°C이며, 열전대로 측정된 온도는 85°C이다. 플라즈마 전류가 25 mA인 경우는 적외선 카메라는 136°C, 열전대는 106°C이었으며, 40 mA인 경우에는 적외선 카메라가 195°C, 열전대가 183°C로 측정되었다. 플라즈마 제트

의 전류량에 따라서 웨이퍼의 온도가 증가한다. 적외선 카메라와 열전대로 측정된 각각의 경우, 측정된 온도가 10~30°C의 차이를 보이고 있으며, 적외선 카메라로 측정된 온도가 더 높게 측정되었다.

2. 진공 챔버의 대기 압력별 플라즈마 제트

앞 절 II-1에서 도핑용 대기압 Ar-플라즈마 제트 장치의 기본 개념을 제시하였다. 대기압 도핑 장치를 도핑 공정에 적용할 때 여러 가지 문제점이 있을 수 있다. 첫째, Ar 가스가 도핑 공정에서 지속적으로 주입되어야 한다. 대기 중에서 도핑이 이루어지므로 진공 챔버를 사용하지 않는다는 장점이 있으나, 지속적인 Ar 가스의 소모는 비효율적이다. 둘째, 대기 중에서의 방전은 플라즈마 제트 장치의 구동 전압이 높다. 높은 구동 전압은 인버터의 구성이나 향후 다중 채널의 구성에서 어려운 문제가 있다. 그 외에 도핑의 균일성 등이 있다. 본 실험에서는 Ar-기체를 사용하지 않고, 직접 대기를 이용한 플라즈마 제트 장치의 방전 특성을

조사한다. 대기압에서 대기의 플라즈마 제트 방전은 매우 큰 전압이 요구되고 쉽게 아크 방전으로 변환된다. 따라서 대기로 방전시키기 위하여 진공 챔버 내에서 대기의 압력을 조정하여 대기-플라즈마 제트의 방전 특성을 조사한다.

본 실험은 진공 챔버 내에서 대기의 압력 변화에 대한 대기-플라즈마 제트의 특성을 조사한다. 이 실험에서는 Ar 가스를 주입하지 않고, 직접 대기를 사용하여 플라즈마를 발생한다. Fig. 5는 실험 장치의 구조이다. 플라즈마 제트 장치는 Fig. 1과 동일하며, 시료대는 유리관 위에 접지 전극을 부착하고 그 위에 웨이퍼를 설치한다. 전원 장치는 대기압 플라즈마 제트 실험과 동일한 DC-AC 인버터를 사용한다. 구동 주파수와 최대 출력 전압은 각각 60 kHz 및 5 kV이다. 플라즈마 제트의 유리관 끝단과 시료 사이의 거리는 5 mm이다. 진공 챔버 내부의 초기 진공은 로터리 펌프를 사용하여 약 10^{-3} Torr의 진공도를 유지한다.

Fig. 6은 진공 챔버 내부의 대기 압력에 따른 대기-플라즈마 제트의 전류-전압 특성 곡선이다. 전압은 비늘 전극 입력단에서 고전압 프로브를 사용하여 측정한다. 전류는 시료대의 접지 전극에서 측정한다. 대기 압력은 50 Torr, 150 Torr, 250 Torr로 100 Torr씩 증가하며 플라즈마 제트를 발생한다. 대기 압력이 350 Torr일 경우는 전원 장치로 사용한 인버터의 최대 출력 전압으로 방전이 일어나지 않는다. 대기 압력 변화에 따른 플라즈마 제트의 전류-전압 특성은 Fig. 2와 마찬가지로 전형적인 글로우 방전 (glow discharge)의 형태를 갖는다. 진공 챔버 내부의 대

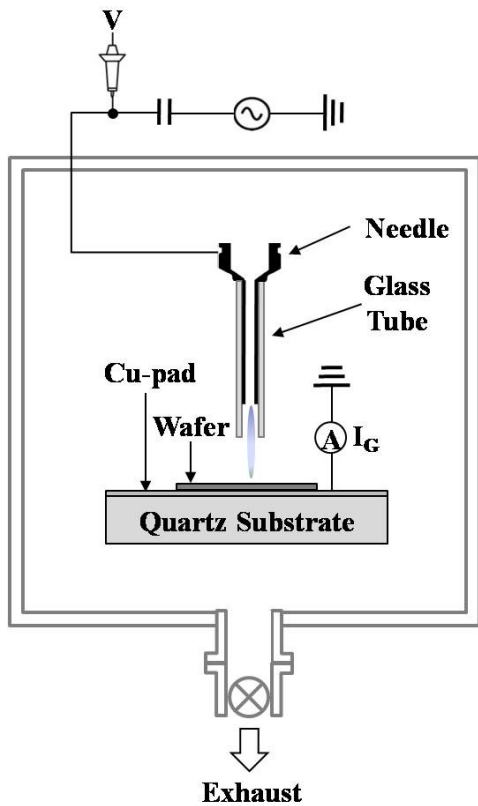


Figure 5. Schematics of plasma doping with air-plasma jet in the different ambient pressures.

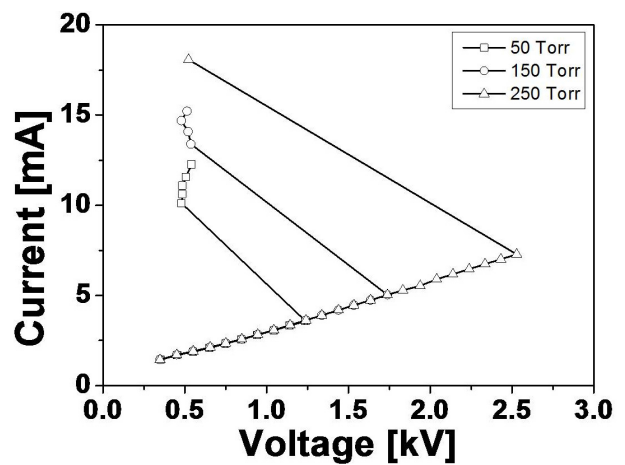


Figure 6. Current-voltage characteristics of plasma jet according to the ambient pressure of 50, 150, and 250 Torr in the chamber.

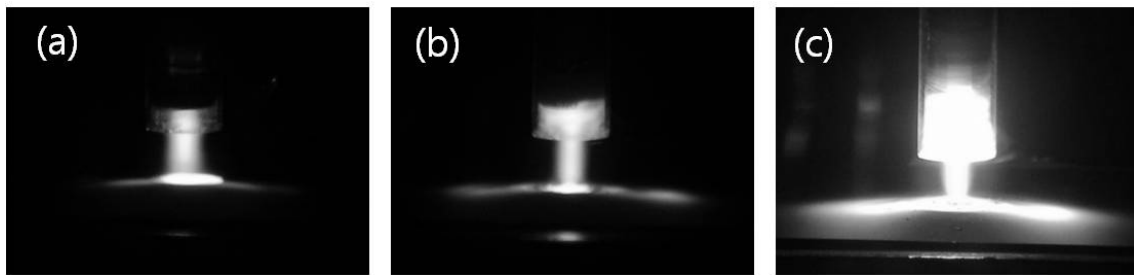


Figure 7. Photographs of plasma jet dependent on the atmospheric pressure. (a) 50 Torr, $V=0.48$ kV, $I=10.11$ mA. (b) 150 Torr, $V=0.54$ kV, $I=13.39$ mA. (c) 250 Torr, $V=0.52$ kV, $I=18.07$ mA.

기 압력이 낮을수록 방전 전압이 낮다. 각각의 방전 개시 전압은 대기 압력이 50 Torr일 경우 1.24 kV, 150 Torr일 경우 1.74 kV, 250 Torr일 경우 2.53 kV이다. 대기 압력이 증가할수록 방전 개시 후의 플라즈마 제트의 전압 및 전류는 증가한다.

Fig. 7은 대기 압력변화에 대한 대기-플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하였을 때의 방전사진이다. 압력에 따라 (a) 50 Torr, (b) 150 Torr, (c) 250 Torr이다. 각 압력에 대하여 방전 직후의 사진이다. 50 Torr에서의 방전 개시 전압은 1.24 kV이며, 방전 개시 직후 0.48 kV로 전압이 낮아진다. 이때의 전류는 10.11 mA이다. 150 Torr의 방전 개시 전압은 1.74 kV이고, 방전 개시 직후 0.54 kV로 전압이 강하된다. 이때의 전류는 13.39 mA이다. 250 Torr의 경우는 방전 개시 전압이 2.53 kV이고, 방전 직후 0.52 kV로 전압 강하가 일어난다. 전류는 18.07 mA로 측정되었다. 플라즈마 빔의 반경, 약 2 mm에 대하여 웨이퍼 위에 조사되는 플라즈마의 확산 영역도 약 2 mm이며, 전류 증가에 따라서 확산 영역이 다소 커진다.

3. 진공 챔버 Ar 분위기 압력별 Ar-플라즈마 제트

앞 두 절의 실험은 대기에서의 Ar-플라즈마 제트와 진공 챔버 내에서의 대기 압력변화에 대한 대기-플라즈마 제트의 방전 특성이다. 이 절에서는 진공 챔버 내부에 Ar 가스를 주입하여 챔버 내부의 Ar 분위기에서 Ar-플라즈마 제트의 특성이다. 진공 챔버의 초기 진공도는 10^{-3} Torr로 하고, 적당한 압력의 Ar 가스를 주입하여 Ar 분위기를 만들어 준다. Ar 가스 분위기이므로 바늘 전극 후미에 Ar 가스를 별도로 주입하지 않는다. 플라즈마 제트 장치의 전극에 고전압을 인가하여 플라즈마 제트를 발생한다. Fig. 8

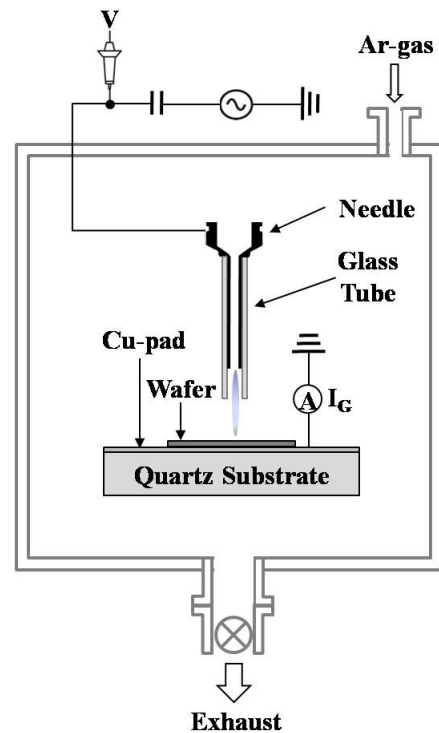


Figure 8. Schematics of argon plasma jet device for the wafer doping.

은 진공 챔버 내부에서의 Ar-플라즈마 제트 도핑장치를 나타낸 것이다. 시료대 및 제트 장치는 Fig. 1과 Fig. 5와 동일하다. 챔버 내 Ar 분위기의 압력에 따른 방전 특성을 조사한다.

챔버 내 Ar 가스 압력에 따른 Ar-플라즈마 제트의 전류-전압 특성 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. II-1절의 대기압 Ar-플라즈마 제트 및 II-2절의 대기 압력별 대기-플라즈마 제트 특성과 마찬가지로 전형적인 글로우 방전 (glow discharge)의 곡선 형태를 갖는다. II-2절과 마찬가지로 챔버 내 Ar 가스의 압력이 낮을수록 방전 전압이 낮

다. 각 압력별 방전 개시 전압은 Fig. 10에 별도로 나타내었다. 정상 글로우 방전(normal glow discharge)에서 전극에 인가되는 전압은 약 0.3~0.4 kV로 유지된다.

Fig. 10에 Ar 가스의 압력에 따른 방전 개시 전압을 나타내었다. 챔버 내 Ar 가스의 압력이 50 Torr일 때, 방전 개시 전압은 0.66 kV이다. 이후 압력 증가에 따라서 방전 전압이 선형적으로 증가하며, 650 Torr에 이르러서 1.68 kV까지 상승한다. II-2절의 Fig. 6의 대기 압력별 방전 개시 전압과 대조하여 방전 전압이 비교적 낮고, 350 Torr 이상의 높은 압력에서도 용이하게 플라즈마 제트가 방출된다.

챔버의 Ar 가스의 압력이 50, 150, 250, 450 Torr일 때, 방전 개시 전압 직후 사진을 Fig. 11에 나타내었다. (a)는

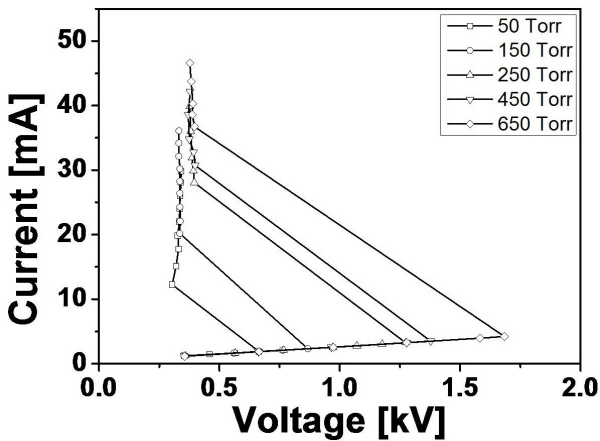


Figure 9. Current versus voltage curve of argon at-atmosphere plasma jet device dependent on the ambient argon pressure.

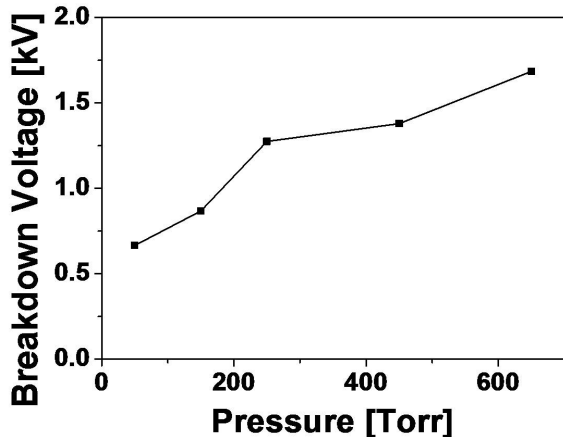


Figure 10. The breakdown voltage curve of argon at-atmosphere plasma jet dependent on the ambient argon pressure.

압력이 50 Torr이며, 방전 개시 전압은 0.66 kV이고, 이후 0.30 kV로 전압이 강해진다. 전류는 12.26 mA이다. (b)는 150 Torr이며, 방전 개시 전압은 0.87 kV, 이후 0.34 kV로 전압이 강해진다. 전류는 20.19 mA이다. (c)는 챔버 내 Ar 가스 압력이 250 Torr이다. 방전 개시 전압은 1.27 kV이고, 방전 개시 직후 0.39 kV로 낮아지며, 전류는 28.05 mA이다. (d)는 450 Torr, 전압은 방전 전 1.68 kV에서 방전 후 0.40 kV로 낮아지며, 전류는 36.71 mA이다.

챔버 내 Ar 가스의 압력이 증가할수록 방전 전압 및 전류는 증가한다. 반면, 압력이 증가함에 따라 방출되는 플라즈마의 웨이퍼에서의 확산 면적은 다소 줄어드는 경향이 있다. 그러나 전압 및 전류가 증가함에 따라 플라즈마의 웨이퍼에서의 확산 면적은 앞의 II-2절의 결과와 같이 약간 늘어난다.

4. 도핑 분포

태양전지용 실리콘 웨이퍼의 도핑 결과를 소개한다. II-1절의 Fig. 1의 장치인 대기압 Ar-플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하였다. Fig. 12는 대기압 Ar-플라즈마 제트 장치에서의 도핑 결과와 종래에 도핑용으로 사용하는 소성로(Furnace)에 의한 도핑 결과를 비교하였다. 웨이퍼에 도핑된 인(Phosphorus) 원자의 밀도를 비교한다. 웨이퍼 표면

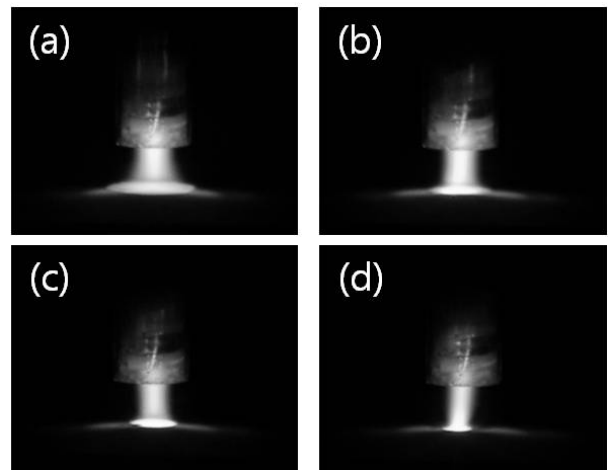


Figure 11. Photographs of argon atmosphere plasma jet dependent on the argon pressure. (a) 50 Torr, $V=0.30$ kV, $I=12.26$ mA. (b) 150 Torr, $V=0.34$ kV, $I=20.19$ mA. (c) 250 Torr, $V=0.39$ kV, $I=28.05$ mA. (d) 450 Torr, $V=0.40$ kV, $I=30.72$ mA.

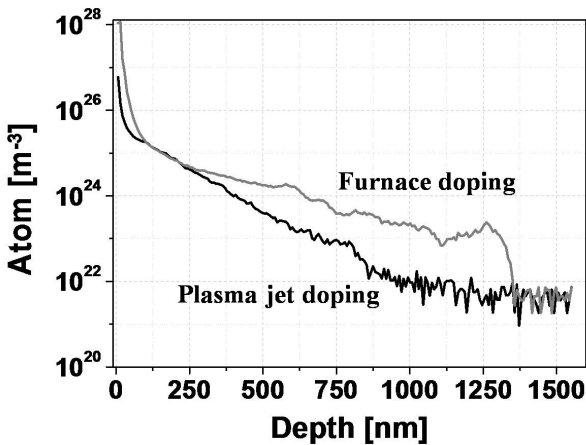


Figure 12. Phosphorus doping profiles of the furnace doping and of the atmospheric pressure plasma jet doping.

에서 250 nm까지의 깊이에서는 대기압 플라즈마 제트 장치와 소성로가 비슷한 도핑 밀도분포를 보인다. 250 nm부터 1,350 nm까지는 소성로를 사용한 경우의 도핑 밀도가 더 높다. 깊이 1,350 nm 이상의 도핑 밀도는 대기압 플라즈마 제트 장치와 소성로 장치가 거의 같은 값을 보여준다. 소성로에서는 1,350 nm 이상에서 인 원자의 밀도가 급격하게 줄어든다. 대기압 Ar-플라즈마 제트 도핑은 깊이 30 nm에서 인의 밀도가 서서히 감소한다. 플라즈마 제트 도핑은 소성로에 비하여 인의 밀도가 낮지만 웨이퍼의 깊이 1,500 nm 이상에도 상당량의 인의 원자가 확산된다. 따라서 대기압 Ar-플라즈마 제트 도핑의 경우에 상당한 깊이의 도핑이 가능함을 보여준다.

대기압 Ar-플라즈마 제트를 이용하여 도핑된 웨이퍼의 산화막(Phospho-silica glass, PSG)을 제거하여 측정된 이차이온질량 분석(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS) 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 도펀트는 인산(H_3PO_4)이 각각 10%, 40% 함유된 것을 사용하였다. 인산 10% 도펀트를 사용한 경우는 인산 40% 도펀트를 사용한 경우와 비교하여 웨이퍼 표면에서 0.4 μm 까지 인의 밀도가 상대적으로 높게 측정된다. 0.4 μm 이하에서는 인산 40% 도펀트를 사용하였을 때, 인의 밀도가 더 높다. 도펀트 용재의 인산 함유량이 높을수록 웨이퍼에 도핑 깊이가 다소 깊다.

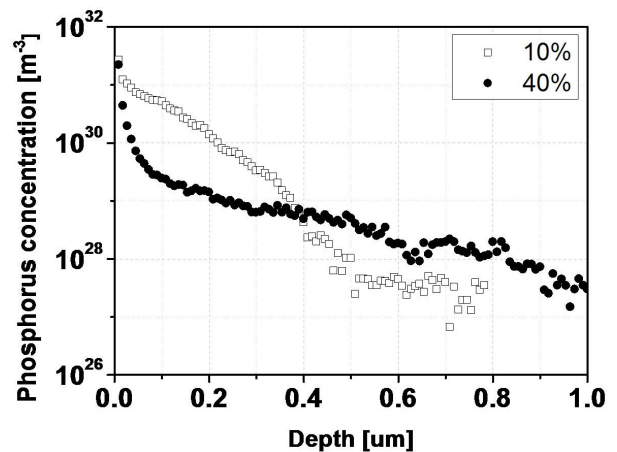


Figure 13. SIMS graph of doped wafers by atmospheric pressure plasma jet device with H_3PO_4 of 10% and 40%.

III. 실험결과 및 고찰

생체 및 의료용 대기압 플라즈마 제트 장치는 전기적 충격과 열적인 손상을 피하기 위하여 수 mA의 저전류가 요구된다. 따라서 대부분의 플라즈마 제트 장치는 저전류 영역에서 연구되었다 [12,15-20]. 그러나 플라즈마 제트를 이용한 도핑은 도펀트의 확산을 위하여 고온이 요구되며 도핑 공정 시간도 고려되어야 한다. 본 실험에서는 웨이퍼 도핑을 위한 대 전류 플라즈마 제트의 발생 관점에서 조사되었다.

단일 채널 플라즈마 제트는 원통형 바늘 전극에 고전압을 인가하는 간단한 구조로 구성된다. 바늘 전극은 유리관에 삽입되어 유리관 내부에 방전 플라즈마 칼럼을 형성한다. 바늘 전극에 인가하는 고전압 전원은 DC-AC 자력식 인버터를 사용한다. 본 실험에서 사용하는 인버터는 최대 출력 전압 5 kV, 주파수 60 kHz의 사인파형을 출력한다. 출력 전압 5 kV의 인버터는 넓이 100×100 mm² 및 두께 수십 mm의 소형 인버터가 가능하다. 인버터의 출력 파워는 수백 W이고, 단일 채널뿐만 아니라 다중 채널 플라즈마 제트의 구동이 가능하다.

대기압 Ar-플라즈마 제트 장치를 이용하여 도핑 웨이퍼 표면에 조사되는 플라즈마 전류는 10~50 mA의 범위에서 조절이 용이하다. 대기압 Ar-플라즈마 제트의 방전 개시 전압은 약 2.5 kV이다. 방전 개시 이후의 정상 글로우 방전에서의 전류는 약 10 mA이다. 플라즈마 전류가 증가함에

따라 웨이퍼 표면에 조사되는 플라즈마의 확산 직경은 유리관의 직경과 동일하게 약 2 mm이며, 전류의 증가로 확산 직경이 0.2 mm 범위로 약간 증가한다. 웨이퍼에 조사되는 플라즈마의 전류량에 따라서 웨이퍼의 온도가 증가한다. 상대적으로 저 전류인 10 mA에서는 웨이퍼 온도가 100°C로 상승한다. 전류가 50 mA이면 수 초 이내에 웨이퍼의 온도는 약 200°C가 된다. 이러한 빠른 온도의 증가는 도핑 공정 시간을 단축할 것으로 예상된다. 플라즈마 도핑은 전류에 의한 온도 상승 이외에 플라즈마 입자들에 의한 도핑 효과도 기대된다. 이러한 입자들의 도펀트와의 관계는 추후의 연구 과제이다.

대기압 Ar-플라즈마 제트는 진공 챔버를 사용하지 않으므로 공정 준비의 간편함과 공정 비용절감측면에서 유리하다. 그러나 대기압에서의 방전은 방전전압이 2.5~3.5 kV로 다소 높다. 높은 방전전압은 전류의 제어의 측면에서 불리하다. 특히, 다중 채널의 경우는 균일한 도핑의 실현에 어려움이 있을 것으로 예상된다. 또한 대기압 방전에서는 Ar를 지속적으로 주입하기 때문에 Ar의 소모에 대한 비용 문제가 대두된다. 따라서 Ar를 주입하지 않고 진공 챔버 내에서 대기 압력을 조절하여 대기-플라즈마 제트 특성을 조사하였다. 대기의 압력 변화에 대한 대기-플라즈마 제트는 압력이 낮을수록 방전 전압이 낮다. 대기 압력이 50~150 Torr인 경우, 방전 개시 전압은 1.2~1.7 kV이다. 이는 대기압 Ar-플라즈마 제트의 방전 개시 전압인 2.5 kV보다 상당히 낮다. 대기 압력이 250 Torr이면, 대기압 Ar-플라즈마 제트와 동일한 방전 개시 전압을 갖는다. 이러한 낮은 압력에서의 낮은 방전 전압은 수십 mA의 방전전류를 용이하게 제어할 수 있으므로 유리하다.

진공 챔버 내의 Ar 분위기에서의 Ar-플라즈마 제트는 대기압 및 대기 플라즈마 제트들 보다 상대적으로 방전 전압이 더 낮다. Ar 압력이 50 Torr일 때, 방전 개시 전압은 0.6 kV이다. 대기압에 가까운 650 Torr일 때의 방전 개시 전압은 1.6 kV이다. 이러한 낮은 방전 전압에서 전압의 조정에 의하여 Ar 분위기 플라즈마 제트의 전류는 10~50 mA의 대 전류를 얻는다. Ar 분위기 압력 변화에 대한 웨이퍼 표면에서 플라즈마의 확산 반경은 대체적으로 유리관의 반경과 동일한 반경을 갖는다. 다만, 압력이 증가하면 확산 반경이 약간 줄어드는 경향이 있으며, 전류의 증가에 따라서 확산 반경은 약간 늘어난다.

대기압 Ar-플라즈마 제트를 이용하여 Si-웨이퍼에 인

(Phosphorus) 원자를 도핑한 결과, 소성로(furnace)에서의 도핑과 비교하여 전체적으로 도핑 밀도는 낮다. 두 경우 모두 웨이퍼 표면으로부터 깊이 250 nm까지는 도핑 밀도는 10^{25} 개/ m^3 이다. 소성로의 경우 도핑 깊이 250~1,250 nm에 도핑 된 인 원자 밀도는 10^{23} ~ 10^{24} 개/ m^3 이다. 반면 플라즈마 제트 도핑은 인 원자 밀도 10^{22} 개/ m^3 이며, 깊이에 따라서 감소한다. 도핑 용재 인산(H_3PO_4) 10% 및 40%를 스프인 코팅에 의하여 웨이퍼에 도포하여 플라즈마 제트를 조사하여 도핑한 결과를 비교하였다. 인산(H_3PO_4)이 10%인 경우에 표면 근처에서 도핑 밀도 약 10^{25} 개/ m^3 의 분포를 갖는다. 웨이퍼의 깊이가 증가할수록 약 10^{21} 개/ m^3 로 급격하게 감소한다. 인산(H_3PO_4)이 40%에 대하여 웨이퍼 표면에서 10%인 경우와 비슷하며, 깊이 0.8 μm 에 이르기까지 도핑 밀도가 1.0^{22} 개/ m^3 으로 감소한다. 인산(H_3PO_4)이 10%인 경우 깊이 0.8 μm 이하는 도핑되지 않는다. 인산 40%에서는 깊이 0.8 μm 이하에서도 인 원자가 도핑된다.

IV. 결 론

태양전지 도핑 공정에 적용하기 위한 플라즈마 제트 장치의 특성으로부터 플라즈마 제트 도핑 장치의 가능성을 살펴보았다. 플라즈마 제트는 반경 2 mm의 유리관에 원통형 바늘 전극을 삽입하고, 전극에 고전압을 인가하여 구성한다. 전원장치는 최대 출력 전압 5 kV, 주파수 60 kHz의 사인파형을 출력하는 소형 인버터를 사용한다.

대기압 Ar-플라즈마 제트는 정상 글로우 방전의 특성을 갖는다. 방전 개시 전압은 약 2.5 kV이며, 정상 글로우 방전에서 10~50 mA의 플라즈마 전류를 얻는다. 플라즈마 제트 빔의 직경은 유리관의 직경을 갖는다. 웨이퍼에 조사되는 플라즈마의 확산도 유리관의 직경과 동일한 분포를 갖는다.

진공 챔버 내부에서 대기 압력을 변화하여 대기-플라즈마 제트의 특성을 조사하였다. 대기의 압력이 50, 150, 250 Torr일 때, 방전 개시 전압은 각각 1.2 kV, 1.7 kV, 2.5 kV이다. 인가전압을 조절하여 정상 글로우 방전에서 10~20 mA의 플라즈마 전류를 얻는다. 진공 챔버내부의 Ar 분위기에서 Ar의 압력 변화에 대한 Ar-플라즈마 제트의 방전 특성을 조사하였다. Ar의 압력이 50 Torr일 때, 방전 개시 전압은 0.6 kV이다. 대기압에 가까운 650 Torr일

때의 방전 개시 전압은 1.6 kV이다. 정상 글로우 방전에서 10~50 mA의 대 전류를 얻는다.

웨이퍼에 조사되는 플라즈마의 전류량에 따라서 웨이퍼의 온도가 증가한다. 상대적으로 저 전류인 10 mA에서는 웨이퍼 온도가 100°C로 상승한다. 전류가 50 mA이면 수 초 이내에 웨이퍼의 온도는 약 200°C가 된다.

플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하여 인 원자를 도핑한 결과 소성로(furnace) 도핑 밀도 $10^{23} \sim 10^{25}$ 개/ m^3 의 값에 비하여 플라즈마 제트 도핑 밀도는 다소 낮은 $10^{22} \sim 10^{24}$ 개/ m^3 의 값을 갖는다. 플라즈마 제트 도핑은 소성로 도핑보다 깊이 1,500 nm 이상의 깊이로 인 원자가 확산된다. 도펀트 용액 인산(H_3PO_4)의 농도가 높을수록 인 원자의 도핑은 800 nm 이상의 깊이로 확산된다.

플라즈마 제트 장치를 사용한 도핑 가능성을 확인하였다. 웨이퍼에 조사되는 플라즈마 제트 전류량은 인가전압을 조정하여 수십 mA의 전류 제어가 가능하다. 이러한 대 전류를 웨이퍼에 조사하여 웨이퍼의 온도가 순간적으로 200°C 이상으로 상승한다. 플라즈마 제트 전류와 도펀트의 성분을 조정하여 도핑 깊이와 도핑 밀도의 조절이 가능하다.

본 논문에서 플라즈마 제트 도핑공정장치는 웨이퍼의 국부 면적의 도핑과 웨이퍼 전체의 대면적 도핑이 가능하다. 플라즈마 제트 장치를 가로 및 세로 방향으로 움직여서 웨이퍼에 플라즈마를 조사한다. 단일 채널의 플라즈마 제트를 웨이퍼에 조사하여 웨이퍼의 일부분을 도핑한다. 대면적의 도핑은 다중 채널의 플라즈마 제트를 이용한다. 다중 채널 플라즈마 제트는 각 채널의 플라즈마 제트로부터 균일한 전류를 얻는 것이 중요하다. 그 외에도 플라즈마에 의한 도핑 매카니즘의 연구 등이 추후의 연구 대상이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(지식경제부)의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 신재생 에너지기술개발 사업(No. 20113020010080) 지원을 받아 수행한 연구 과제임.

참고문헌

[1] G. Poulaina, C. Boulord, D. Blanc, A. Kaminski,

- M. Gauthier, C. Dubois, B. Semmachec, and M. Lemiti, *Appl. Surf. Sci.* **257**, 5241 (2011).
- [2] K. Kim, H. Kim, D. Hwang, J. Lim, and S. Park, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 63 (2003).
- [3] J. Hermann, M. Benfarah, S. Bruneau, E. Axente, G. Coustillier, T. Itina, J.-F. Guillemoles, and P. Alloncle, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 453 (2006).
- [4] S. Hermann, T. Dezhdar, N.-P. Harder, R. Brendel, M. Seibt, and S. Stroj, *J. Appl. Phys.* **108**, 114514 (2010).
- [5] G. Heise, M. Domke, J. Konrad, S. Sarrach, J. Sotrop, and H. P. Huber, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 315303 (2012).
- [6] Z. Hameiri, L. Mai, A. Sproul, and S. R. Wenham, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 222111 (2010).
- [7] R. E. J. Sladek and E. Stoffels, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 1716 (2005).
- [8] M. Laroussi, C. Tendero, X. Lu, S. Alla, and W. L. Hynes, *Plasma Process. Ploym.* **3**, 470 (2006).
- [9] X. Lu, Y. Cao, P. Yang, Q. Xiong, Z. Xiong, Y. Xian, and Y. Pan, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37**, 668 (2009).
- [10] X. Lu, Z. Xiong, F. Zhao, Y. Xian, Q. Xiong, W. Gong, C. Zou, Z. Jiang, and Y. Pan, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 181501 (2009).
- [11] T. Nosenko, T. Shimizu, and G. E. Morfill, *New Journal of Physics* **11**, 115013 (2009).
- [12] H. W. Lee, S. H. Nam, A. H. Mohamed, G. C. Kim, and J. K. Lee, *Plasma Process. Polym.* **7**, 274 (2010).
- [13] G. Daeschlein, T. Woedtke, E. Kindel, R. Brandenburg, K. D. Weltmann, and M. Junger, *Plasma Process. Ploym.* **7**, 224 (2010).
- [14] H. S. Uhm, E. H. Choi, and G. S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **60**, 897 (2012).
- [15] H. K. Lim, D. J. Jin, J. H. Kim, S. H. Han, and G. S. Cho, *J. Korean Vac. Soc.* **20**, 14 (2011).
- [16] G. S. Cho, H. G. Lim, J. H. Kim, D. J. Jin, G. C. Kwon, E. H. Choi, and H. S. Uhm, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39**, 1234 (2011).

- [17] J. Y. Jeong, Y. J. Kim, M. K. Lee, G. H. Han, H. C. Kim, D. J. Jin, J. H. Kim, E. H. Choi, H. S. Uhm, and G. S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.* **61**, 557 (2012).
- [18] D. B. Kim, B. Gweon, S. Y. Moon, and W. Choe, *Thin Solid Films* **518**, 6700 (2010).
- [19] A. V. Nastuta, I. Topala, C. Grigoras, V. Pohoata, and G. Popa, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 105204 (2011).
- [20] J. S. Oh, J. L. Walsh, and J. W. Bradley, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 034020 (2012).

Discharge Characteristics of Plasma Jet Doping Device with the Atmospheric and Ambient Gas Pressure

J. G. Kim, W. Y. Lee, Y. J. Kim, G. H. Han, D. J. Kim,
H. C. Kim, J. H. Koo, G. C. Kwon, and G. S. Cho*

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

(Received September 20, 2012, Revised October 25, 2012, Accepted November 9, 2012)

Discharge property of plasma jet devices is investigated for the application to the doping processes of crystalline solar cells and others. Current-voltage characteristics are shown as the typical normal-glow discharge in the various gas pressure of plasma jets, such as in the atmospheric plasma jets of Ar-discharge, in the ambient pressure of atmospheric discharge, and in the ambient Ar-pressure of Ar-discharge. The discharge voltage of atmospheric plasma jet is required as low as about 2.5 kV while the operation voltage of low pressure below 200 Torr is low as about 1 kV in the discharge of atmospheric and Ar plasma jets. With a single channel plasma jet, the irradiated plasma current on the doped silicon wafer is obtained high as the range of 10~50 mA. The temperature increasement of wafer is normally about 200°C. In the result of silicon wafers doped by phosphoric acid with irradiating the plasma jets, the doping profiles of phosphorus atoms shows the possibility of plasma jet doping on solar cells.

Keywords : Plasma, Plasma jet, Doping, Solar cell

* [E-mail] gscho@kw.ac.kr