≪연구논문≫ 한국진공학회지 제19권 2호, 2010년 3월, pp.114~120

공정가스와 RF 주파수에 따른 웨이퍼 표면 텍스쳐 처리 공정에서 저반사율에 관한 연구

윤명수[b] · 현덕환[a] · 진법종[a] · 최종용[a] · 김정식[a] · 강형동[a] · 이준신[c] · 권기청[b]*

[a]주성엔지니어링, 광주 464-892

[b]광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

[c]성균관대 정보통신공학부, 수원 440-746

(2010년 1월 20일 받음, 2010년 3월 12일 수정, 2010년 3월 19일 확정)

일반적으로 결정질 실리콘 태양전지에서 표면에 텍스쳐링(texturing)하는 것은 알칼리 또는 산성 같은 화학용액을 사용하고 있다. 그러나 실리콘 부족으로 실리콘의 양의 감소로 인하여 웨이퍼 두께가 감소하고 있는 추세에 일반적으로 사용하고 있는 습식 텍스쳐링 방법에서 화학용액에 의한 많은 양의 실리콘이 소모되고 있어 웨이퍼의 파손이 심각한 문제에 직면하고 있다. 그리하여 습식 텍스쳐링 방법보다는 플라즈마로 텍스쳐링할 수 있는 건식 텍스쳐링 방법인 RIE (reactive ion etching) 기법이 대두되고 있다. 그리고 습식 텍스쳐링으로는 결정질 실리콘 태양전지의 반사율을 10% 이하로는 낮출 수가 없다. 다결정 실리콘 웨이퍼 표면에 텍스쳐링을 하기 위하여 125 mm 웨이퍼 144개를 수용할 수 있는 대규모 플라즈마 RIE 장비를 개발하였다. 반사율을 4% 이하로 낮추기 위하여 공정가스는 Cl_2, SF_6, O_2를 기반으로 RIE 텍스쳐링을 하였고 텍스쳐링의 모양은 공정가스, 공정시간, RF 주파수 등에 의해 조절이 가능하였다. 본 연구에서 RIE 공정을 통하여 16.1%의 변환효율을 얻었으며, RF 주파수가 텍스쳐링의 모양에 미치는 영향을 살펴보았다.

주제어 : 반응성 이온 식각, RF주파수, 텍스쳐링, 고 효율, 반사율

I. 서 론

태양전지의 효율을 감소시키는 요인에는 표면에서 빛이 반사되거나 흡수되지 않을 때 생기는 광학적 손실, 재결합 손실, 각종 저항성분에 의한 손실 등 여러 가지 요인들이 있다 [1]. 그중에서 광학적 손실을 줄이는 방법에는 빛을 가두는 역할이나 빛의 경로를 늘리는 반사방지막, 표면 텍스쳐링, 후면에 모든 전극을 일체화하는 구조, 서로 다른 에너지 밴드갭의 다층화된 태양전지 등이 있다. 이 중에서 표면 텍스쳐링은 이전에 태양전지에서 사용되는 PN 반도체의 표면과 달리 피라미드 모양이나 정사각형 벌집모양으로 표면을 식각 처리함으로써 반사율을 낮추고 빛을 모아주는 역할을 할 수 있도록 표면을 처리해주는 기술을 말한다 [2]. 텍스쳐링에는 습식 텍스쳐링 방식과 건식 텍스쳐링 방식이 있는데 기존의 결정질 태양전지의 텍스쳐링은 습식 텍스쳐링 방식을 많이 사용하였다. 그러나 습식 텍스쳐링은 단결정 실리콘 태양전지에서는 좋은 식각 균일도를 보여주지만 다결정 실리콘 태양전지에서는 텍스쳐 모양으로 식각되지 않고 식각 균일도가 많이 떨어진다. 그리하여 다결정 실리콘 태양전지를 텍스쳐링 할 때 습식 텍스쳐링이 아닌 플라즈마를 사용하는 건식 텍스쳐링의 한 방법인 RIE (Reactive Ion Etching)를 많이 사용하고 있다 [3-5]. 기존의 습식 텍스쳐링 방식은 식각을 할 때 화학물을 사용하여 폐기물이 발생하여 환경오염을 시키고 웨이퍼를 많이 파손시킨다. 또한 태양전지의 반사율을 10%이하로 낮추기가 힘들다는 단점이 있다 [6]. 그러나 RIE 텍스쳐링은 플라즈마를 발생시켜 텍스쳐링하는 방식으로서 환경오염이 비교적 적으며 태양전지의 반사율을 4% 이하로 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다 [7]. 본 연구에서 공정가스를 변화조건에 따른 반사율을 조절하면서 최적의 공정가스의 비율과 2 MHz와 13.56 MHz의 RF 주파수를 사용한 RIE 텍스쳐링 공정에 대하여 연구하였다.

* [전자우편] gckwon@kw.ac.kr

Ⅱ. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 1에서 보이는 대면적의 플라즈마 RIE 텍스쳐링 장비를 사용하였다. 장비의 안에는 웨이퍼를 운반하는데 쓰이는 트레이라는 것이 있으며 이 트레이 위에 다결정 실리콘 웨이퍼를 올려 두고 공정을 한다. 트레이의 크기는 1,800×1,800 mm 정도이며 이 트레이는 챔버 안에서 롤러를 통하여 이동한다. 125×125 mm 크기의 웨이퍼 144개, 156×156 mm 크기의 웨이퍼 100개를 수용 할 수 있으며 알루미늄으로 양극처리 되어있다. 플라즈마는 CCP (capacitively coupled plasma) 타입으로서 2 MHz와 13.56 MHz의 RF주파수에 의한 10～15 kW의 RF 전력에 의해 발생한다. 공정가스는 Cl_2, SF_6, O_2 가스를 기반으로

Figure 1. Dry etching chamber system for texturing using plasma.

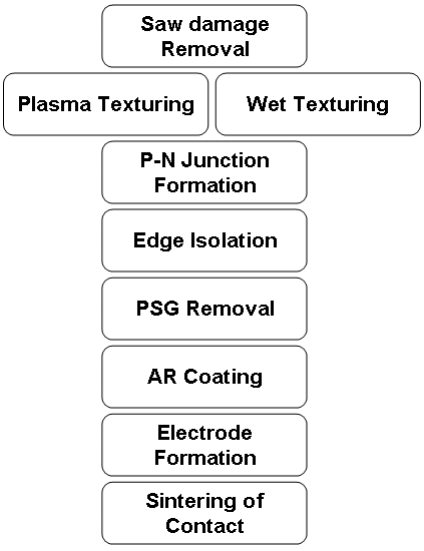

Figure 2. Fabricated process sequence of the c-Si solar cell used for plasma surface isotropic texturing.

사용하였다. 실리콘의 식각 비율은 약 2,000 Å/min이고 텍스쳐링의 공정속도는 5인치의 웨이퍼를 한 시간에 1,400여개 할 수 있는 분량이다. 웨이퍼는 P 유형의 다결정 실리콘을 사용하여 Fig. 2와 같은 순서대로 공정을 하였다. 표면 반사율(surface reflectance), 개방전압(V_{OC})과 단락전류(J_{SC}), 곡선인자(fill factor)를 포함한 변환효율, 텍스쳐링의 모양은 각각 자외선-가시광선 분광기(ultraviolet-visible spectroscopy), 인공태양조사장치(solar simulator), scanning electron microscopy (SEM)으로 측정하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

RIE 텍스쳐링 장비에서 텍스쳐링 모양은 공정가스, RF 전력, RF 주파수, 가스압력, 가스의 비율, RF 전극과 서셉터 전극간격과 같은 가공 매개변수에 의해 좌우된다. Table 1은 Cl_2 혼합 가스 공정에서 RF 전력의 증가, 가스의 압력 감소, RF 전극과 서셉터 전극 간격의 감소에 따라 표면 반사율과 식각 균일도(etch uniformity)의 증감을 나타내고 있다. Table 2는 SF_6 혼합 가스 공정에서 RF 전력, 가스압력, SF_6 혼합가스비율에 의한 표면 반사율과 식각 균일도의 증감을 나타낸다.

Table 1과 2에서 보이는 것처럼 RF 전력, 혼합가스의 압력, 전극 간의 간격을 조절하여 표면 반사율과 식각균일도

Table 1. Reflectance and uniformity with the process parameter at the Cl_2 gas mixture. − and − − of the experimental values represents decrease slightly and strongly and + and + + of the experimental values indicates increase slightly and strongly, respectively.

Parameter	Reflectance	Uniformity
Increase RF power	−	−
Decrease gas pressure	− −	− −
Decrease the gap	+	− −

Table 2. Reflectance and uniformity with the process parameter at the SF_6 gas base mixture.

Parameter	Reflectance	Uniformity
Increase RF power	−	− −
Decrease gas pressure	+	−
Decrease the ratio of gas flow	+	+ +

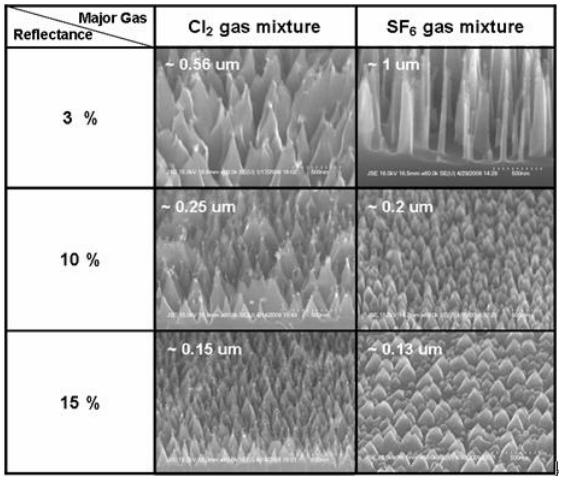

Figure 3. The surface texturing shape and height of wafers as a function of gas chemistry and the reflectance of 3%, 5%, and 15%, respectively.

를 제어 가능함을 알 수가 있다. 이는 RF 장비로 웨이퍼 표면에 텍스쳐링 함으로써 웨이퍼에 최대한 많은 량의 빛을 흡수할 수 있도록 제어 가능하다는 것을 의미한다. Fig. 3에서는 Cl_2 가스 혼합물과 SF_6 가스혼합물을 이용하여 다결정 실리콘 표면을 텍스쳐링하여 표면 반사율을 제어하는 것을 보여준다. SEM 사진에서 보는 바와 같이 텍스쳐링 모양에 따라 가중치 평균한 반사율이 변하는 것을 알 수 있다. 표면 텍스쳐링은 반사율을 감소시켜 최대한의 빛을 많이 흡수하도록 하는 것이 중요하다. 실리콘 표면 텍스쳐링의 기본높이는 0.1~0.3 um이고 텍스쳐링의 모양은 피라미드 형태와 표면 기울기가 급한 바늘형태로 나타낸다. 텍스쳐링 모양에 따라 표면 기울기가 급할수록 표면 반사율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 표면 반사율은 텍스쳐링의 모양과 높이에 따라 좌우된다.

텍스쳐링의 높이가 높고 기울기가 급격할수록 반사율이 감소하는데 특히 기본적인 텍스쳐링보다 더 큰 높이의 텍스쳐링을 했을 때 반사율은 거의 0에 가까이 가는 것 을 볼 수 가 있다. 텍스쳐링의 높이는 Cl_2 가스혼합물, SF_6 가스혼합물, RF 전력, 가스압력 등으로 조절할 수가 있다. SF_6 가스혼합물을 기반으로 하는 플라즈마 식각은 텍스쳐링의 모양이 예리하기 때문에 곡선인자(FF : Fill Factor)를 증가시키는 좋은 효과가 있다. 그러나 이러한 모양은 계면의 PN 접합이나 반사방지막의 균일한 증착에는 좋지 않기 때문에 반사율이 낮음에도 불구하고 태양전지의 변환효율은 좋지 않았다.

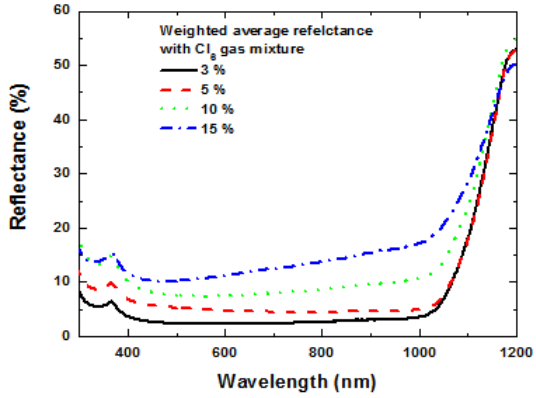

Figure 4. Reflectance of the weighted average using Cl_2 gas mixture in multi-crystalline wafers.

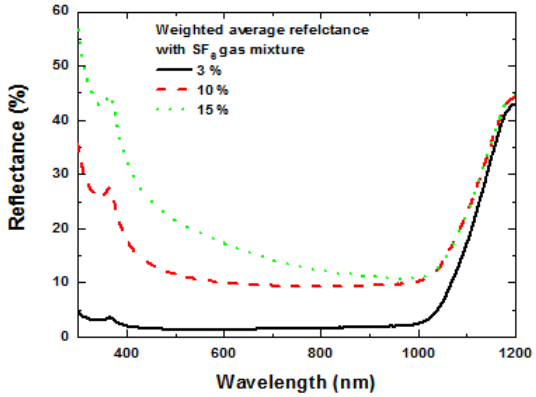

Figure 5. Reflectance of the weighted average with SF_6 gas mixture at the multi-crystalline wafers.

Fig. 4와 5를 보면 300~1,100 nm에서 가중 평균 반사율은 공정가스를 조정하여 3~20% 사이로 제어할 수 있다는 것 을 알 수가 있다. Cl_2 혼합가스를 기반으로 하는 RIE 텍스쳐링 공정을 하였을 때, 높은 가중 평균 반사율(Weighted Average Reflectance)에서 웨이퍼의 반사율이 단파장에서 감소하고 장파장영역으로 갈수록 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 SF_6 혼합가스를 기반으로 RIE 텍스쳐링 공정을 한 웨이퍼의 경우에는 Cl_2와는 다르게 단파장영역에서는 높은 반사율을 일으키지만 장파장영역으로 가면서 반사율이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

Table 3에 따르면 개방전압(V_{OC}) 및 단락전류(J_{SC}), 곡선인자(FF), 효율의 변화는 혼합가스에 따라 변화하는 모습을 보여준다. Cl_2 혼합가스를 사용한 RIE 공정을 하면 10%의 가중 평균 반사율을 가진 태양전지의 경우에는 V_{OC} 및 FF가 각각 가장 작은 것을 보여준다. SF_6 혼합가스를 사용하면 15%의 가중 평균 반사율을 가지는 태양전지의 V_{OC}와

Table 3. Typically weighted average reflectance, V_{OC}, J_{SC}, Fill Factor (FF) and Efficiency by the process parameter without mask structure at the wet chemical and gas mixtures of Cl_2 and SF_6.

	R (%)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm^2)	FF (%)	Eff (%)
Wet Chemical	–	607.4	32.3	78.2	15.2
Cl_2 gas mixture	10	603.8	32.1	78.1	15.1
Cl_2 gas mixture	15	606.5	32.3	78.2	15.2
SF_6 gas mixture	15	608.0	32.1	78.7	15.4

FF가 가장 높을 것을 보여준다. 건식 식각의 화학반응은 Cl_2와 SF_6의 혼합가스에 따라서 달라진다.

실리콘 식각에서는 반응 부산물에 유래하는 SiO_x 박막이 실리콘의 마스크 역할을 하여 다결정실리콘의 피라미드형태의 텍스쳐모양으로 가공한다. 혼합가스(SF_6, Cl_2, O_2 등)가 플라즈마로 해리될 때 강력한 이온으로 물리적, 화학적 식각을 통해 각각 실리콘과 SiO_x을 선택적으로 식각할 수가 있다. 또한, Table 3을 통해 웨이퍼의 반사율이 효율에는 절대적인 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 앞에서 Fig. 3과 Table 3에 언급한 다결정질 실리콘 웨이퍼 표면 텍스쳐링의 모양에 따라 태양전지의 변환효율에 영향이 있다는 것을 알 수 있다. 예리한 모양보단 피라미드형과 유사한 모양을 지닌 표면 텍스쳐링이 된 태양전지의 변환효율이 높다는 것을 알 수 있다.

상기의 혼합가스를 이용하여 최적의 SF_6와 Cl_2 혼합가스를 만든 공정 조건에서 최고의 효율을 얻을 수가 있었다. 이 조건에서 주파수에 따른 텍스쳐링 영향을 알아보기 위해, 2 MHz와 13.56 MHz의 RF 주파수를 사용하여 RIE 텍스쳐링을 해보았다.

Fig. 6은 13.56 MHz 와 2 MHz를 사용하여 RIE 텍스쳐링을 한 웨이퍼의 표면을 보여준다. Fig. 6(a)는 13.56 MHz의 RF 주파수를 사용한 것으로서 이중 형태의 텍스쳐링의 모양인 어금니 모양을 하고 있고, Fig. 6(b)는 2 MHz의 RF 주파수에서 작은 피라미드 모양으로 텍스쳐링된 것을 볼 수 있다. 최적의 혼합가스 공정조건에서 RIE 공정에서 태양전지 기판에 영향을 주는 반응성 이온에너지가 2 MHz의 RF 주파수보다 13.56 MHz에서 낮아, 물리적인 반응보다 화학적인 반응이 상대적으로 커서, 어금니 모양의 이중 텍스쳐링을 형성하는 것으로 보인다. Fig. 6에서 보면, 13.56 MHz 보다는 2 MHz의 RF 주파수를 사용하여

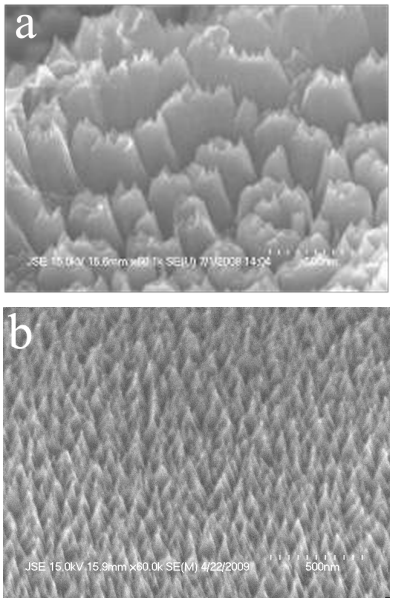

Figure 6. The surface texturing shape of texturing of wafers using 13.56 MHz (a) and 2 MHz (b) RF frequency.

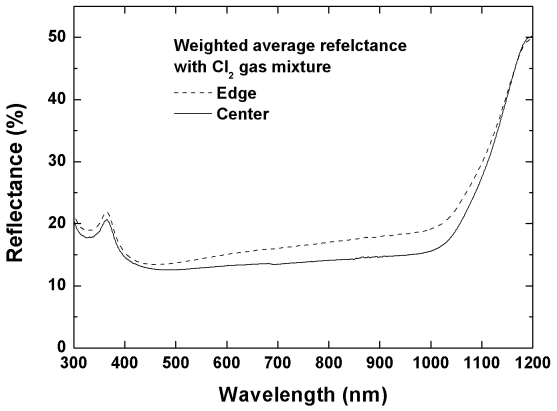

Figure 7. Reflectance of center and edge of the weighted average using 13.56 MHz RF frequency in the multi-crystalline wafer.

RIE 텍스쳐링을 한 웨이퍼의 표면 텍스쳐링 균일도가 상대적으로 좋은 것을 확인할 수 있다. 이는 2 MHz의 파장이 13.56 MHz보다 크기 때문에 기인하는 것으로 보여 대면적의 공정에서 각 웨이퍼간의 식각 균일도는 13.56 MHz를 사용하였을 때보다 2 MHz에서 상대적으로 높다.

Fig. 7과 8은 각각 13.56 MHz와 2 MHz의 RF 주파수를 사용하여 RIE 텍스쳐링 공정을 한 웨이퍼의 반사율을 보여준다. Fig. 7에서 보면 알 수 있듯이 텍스쳐링의 공정을 마친 웨이퍼의 중심부분과 가장자리(156×156 mm 웨이퍼 끝에서 약 10 mm 안쪽부분)의 반사율을 측정한 것으로서

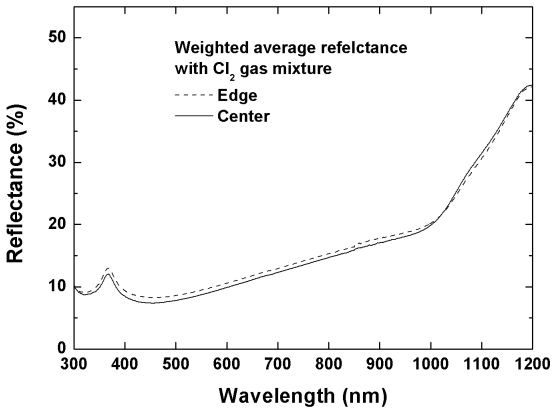

Figure 8. Reflectance of center and edge of the weighted average with 2 MHz RF frequency in the multi-crystalline wafer.

Table 4. V_{OC}, J_{SC}, FF and efficiency by wet chemical and RIE texturing process using 2 MHz and 13.56 MHz RF frequency.

RF frequency	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm^2)	FF (%)	Eff (%)
2 MHz	607	31.7	77.3	14.87
13.56 MHz	619	33.37	77.9	16.1

13.56 MHz를 사용하여 공정을 한 웨이퍼의 중심 반사율은 15.7%이며 가장자리의 반사율은 17%로서 중심부분과 가장자리의 반사율이 1.3% 차이가 나는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 2 MHz를 사용하여 RIE 텍스쳐링 공정을 한 웨이퍼의 중심과 가장자리 반사율로서 중심부분은 15.4%, 가장자리의 반사율은 15.9%로서 중심부분과 가장자리의 반사율이 0.5% 차이가 나는 것을 알 수가 있다. 위 반사율 그림으로서 2 MHz를 사용한 RIE 텍스쳐링 공정이 텍스쳐링 균일도가 13.56 MHz를 사용한 공정보다 좋다는 것을 더욱 확실하게 확인할 수 있었다. 그러나 텍스쳐링의 균일도는 상대적으로 좋은 반면에 2 MHz는 식각 대상막의 아래층까지 과도하게 식각하거나 물리적 손상을 일으켜 PN 접합의 불량을 일으키는 플라즈마 데미지 현상이 발생하여 효율을 상대적으로 저하시키는 단점을 가지고 있다.

Table 4와 Fig. 7과 8에서 보면 알 수 있듯이 텍스쳐링의 균일도가 좋은 2 MHz를 사용한 웨이퍼로 만든 태양전지의 효율은 14.87%, 균일도가 상대적으로 안 좋은 13.56 MHz를 사용한 웨이퍼로 만든 태양전지의 효율은 16.1%가 나왔다. 이를 통하여 텍스쳐링의 균일도는 웨이퍼의 평균 반사율에는 영향을 주지만 태양전지의 효율에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구를 통해서 기존의 화학적 식각은 실리콘의 심각한 파손으로 새로운 대안을 모색하게 했으며 그 결과 플라즈마를 이용한 RIE system을 개발 연구하였다. 공정가스, RF 전력, RF 주파수, 가스압력, 가스의 비율, 전극간격과 같은 가공 매개변수로 조절하여 반사율을 조절할 수가 있었고 낮은 반사율과 높은 변환효율을 얻기 위해 SF_6 와 Cl_2 가스혼합물을 사용해야 한다는 것을 알 수 있었다. 기존에 사용하던 13.56 MHz의 RF 주파수보다는 2 MHz를 사용하였을 때 식각 균일도가 좋은 것을 확인할 수 있었으나 보다 좋은 변환효율을 얻기 위해서는 2 MHz보다는 13.56 MHz의 RF 주파수를 사용해야 한다는 것을 알 수 있었다. 이로서 실리콘 태양전지의 반사율을 3～20% 사이로 제어 할 수 있게 되었으며 SF_6와 Cl_2 가스혼합물, 13.56 MHz의 RF 주파수를 사용하여 습식 텍스쳐링으로 하였을 때보다 다결정 태양전지의 변환효율을 0.9%향상시킨 16.1%의 변환효율을 얻을 수가 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국 지식경제부 신재생에너지 기술개발 사업과 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 수행됨.

참고문헌

[1] 최준영, 김도완, 이홍수, 실리콘 태양전지의 전면 grid 간격 변화에 따른 광 변환 특성평가, 한국전기전자재료학회 2006추계학술대회 논문집, pp.5, 2006

[2] D. Sarti, Q. N. Le, S. Bastide, G. Goater, and D. Ferry, Proc, dry plasma texturing-an alternative technique for industrial production of thin mc-si solar cells, **13**th EUPVSEC, pp.25, 1995

[3] A. R. Burgers, J. H. Bultman, C. Benking, W. A. Nositschka, O. Voigt, and H. Kurz, Silicon solar cells textuured by reactive ion etching with natural lithogaphy, **16**th EUPVSEC, 2000

[4] J. S. Kim, D. Hyun, B. J. Jin, J. Y. Choi, G. C.

Kwon, and J. Hong, Low Reflectance in Crystalline Si Solar cell using RIE Texturing, **23**th EUPVSEC, pp.1499-1502, 2008.

[5] J. Yoo, K. H. Kim, M. Thamilselvan, N. Lakshminarayn, Y. K. Kim, J. H. Lee, K. J. Yoo, and J. S. Yi, RIE texturing optimization for thin c-Si solar cells in SF_6/O_2 plasma, J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 2008.

[6] H. Saha, S. K. datta, K. Mukhopadhyay, S. Banerjee, and M. K. Mukherjee, Influence of surface texturization on the light trapping and spectral response of silicon solar cell, IEEE Trans. Electron Devices, pp.1100, 1992.

[7] W. A. Nositschka, O. Voigt, P. Manshanden, and H. Kurz, Texturisation of multicrystalline silicon solar cells by RIE and plasma etching, solar energy materlals & solar cell, pp.227-237, 2003

[8] 노영수, 박동희, 김태환, 최지원, 버퍼 층을 이용한 RF 마그네트론 스퍼터 방법에 의한 Al:ZnO 박막의 성장, 한국진공학회지 **18**, 213-220 (2009).

[9] 이제원, 주영우, 박연현, 노호섭, O2/SF6/CH4 플라즈마를 이용한 플렉시블 Polycarbonate와 PMMA의 건식, 한국진공학회지 **18**, 85-91 (2009).

[10] 조신호, 조선욱, 라디오파 마그네트론 스퍼터링으로 성장한 질소와 알루미늄 도핑된 ZnO 박막의 특성, 한국표면공학회지 **41**, 129-133 (2008).

[11] D. M. Manos and D. L. Flamm, “Plasma Eching”, Academic Press, InC., 1989

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.19 No.2, March 2010, pp.114~120

Study of Low Reflectance and RF Frequency by Rie Surface Texture Process in Multi Crystall Silicon Solar Cells

Myoung Soo Yun[b], Deoc Hwan Hyun[a], Beop Jong Jin[a], Jong Young Choi[a], Joung Sik Kim[a], Hyoung Dong Kang[a], Junsin Yi[c], and Gi Chung Kwon[b]*

[a]*Jusung Engineering, Gwangju 464-892*
[b]*Department of Electrophysics, Kwngwoon University, Seoul 139-701*
[c]*School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746*

(Received January 20, 2010, Revised March 12, 2010, Accepted March 19, 2010)

Conventional surface texturing in crystalline silicon solar cell have been use wet texturing by Alkali or Acid solution. But conventional wet texturing has the serious issue of wafer breakage by large consumption of wafer in wet solution and can not obtain the reflectance below 10% in multi crystalline silicon. Therefore it is focusing on RIE texturing, one method of dry etching. We developed large scale plasma RIE (Reactive Ion Etching) equipment which can accommodate 144 wafers (125 mm) in tray in order to provide surface texturing on the silicon wafer surface. Reflectance was controllable from 3% to 20% in crystalline silicon depending on the texture shape and height. We have achieved excellent reflectance below 4% on the weighted average (300～1,100 nm) in multi crystalline silicon using plasma texturing with gas mixture ratio such as SF_6, Cl_2, and O_2. The texture shape and height on the silicon wafer surface have an effect on gas chemistry, etching time, RF frequency, and so on. Excellent conversion efficiency of 16.1% is obtained in multi crystalline silicon by RIE process. In order to know the influence of RF frequency with 2 MHz and 13.56 MHz, texturing shape and conversion efficiency are compared and discussed mutually using RIE technology.

Keywords : RIE (reactive ion etching), RF frequency, Texturing, High efficiency, Reflectance

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