
 논문

다결정 실리콘 웨이퍼 직접제조에 대한 공정변수 영향

위성민 · 이진석[†] · 장보윤 · 김준수 · 안영수 · 윤우영 *

한국에너지기술연구원 에너지융합소재연구단, *고려대학교 신소재공학부

Effect of Processing Parameters on Direct Fabrication of Polycrystalline Silicon Wafer

Sung-Min Wi, Jin-Seok Lee[†], Bo-Yun Jang, Joon-Soo Kim, Young-Soo Ahn and Woo-Young Yoon*

Energy Materials and Convergence Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-7, Korea

Abstract

A ribbon-type polycrystalline silicon wafer was directly fabricated from liquid silicon via a novel technique for both a fast growth rate and large grain size by exploiting gas pressure. Effects of processing parameters such as moving speed of a dummy bar and the length of the solidification zone on continuous casting of the silicon wafer were investigated. Silicon melt extruded from the growth region in the case of a solidification zone with a length of 1cm due to incomplete solidification. In case of a solidification zone with a length of 2 cm, on the other hand, continuous casting of the wafer was impossible due to the volume expansion of silicon derived from the liquid-solid transformation in solidification zone. Consequently, the optimal length of the solidification zone was 1.5 cm for maintaining the position of the solid-liquid interface in the solidification zone. The silicon wafer could be continuously casted when the moving speed of the dummy bar was 6 cm/min, but liquid silicon extruded from the growth region without solidification when the moving speed of the dummy bar was ≥ 9 cm/min. This was due to a shift of the position of the solid-liquid interface from the solidification zone to the moving area. The present study reports experimental findings on a new direct growth system for obtaining silicon wafers with both high quality and productivity, as a candidate for an alternate route for the fabrication of ribbon-type silicon wafers.

Key words: Solar cell, Silicon, Wafer, Solidification, Interface.

1. 서 론

태양전지는 1950년대부터 청정, 신재생 에너지 세대에 가장 적합한 기술 중 하나로 주목 받기 시작하였고, 이에 따른 수많은 기술들이 개발되어 현재에는 상용화 단계에 이르렀다[1]. 그러나 타 신재생 에너지원보다 비싼 태양전지의 발전단가는 태양광 산업 시장 확장에 걸림돌로 작용하고 있다[2]. 이러한 문제를 해결하고자 최근에는 태양전지의 제조단가를 줄이기 위한 연구들이 다양하게 진행되고 있다.

일반적으로 실리콘 태양전지의 제조단가 절감을 위한 방식은

크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환하는 변환효율을 향상시키는 방법이고, 두 번째는 태양전지 소재 및 제조공정의 단가를 절감하는 방법이다. 수십 여 년 동안 변환효율을 향상시키기 위해 많은 연구자들이 실리콘 셀의 표면 조직(texturing), 도핑 프로파일(doping profile), 전/후면 passivation, 금속전극 구조 개선 등 다양한 시각에서 접근하여 왔지만, 노력대비 효율 향상은 미비한 상황이다[3,4]. 그래서 최근에는 태양전지 소재 및 제조공정 단가 절감을 통한 저가화 연구가 많이 시도되고 있다. 특히 대부분의 태양광 시장을 점유하고 있는 결정질 실리콘 태양전지에서 가장 많은

Received: April 18, 2013 ; Revised: June 27, 2013 ; Accepted: July 29, 2013

[†]Corresponding author: Jin-Seok Lee (KIER)

Tel: +82-42-860-3745, Fax: +82-42-860-3133

E-mail: jslee@kier.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2013, Vol. 33 No. 4, pp. 157~161

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.4.157>

ISSN 1598-706X

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비중을 차지하고 있는 실리콘 소재의 저가화 공정기술 개발이 가장 많은 주목을 받고 있다. 일반적으로 태양광 모듈 제조단가의 약 50%를 태양광급 폴리실리콘(polysilicon) 및 이를 이용한 실리콘 웨이퍼(wafer) 제조단가가 차지하고 있다. 특히, 실리콘 웨이퍼의 경우 전체 제조단가의 1/3을 차지하고 있어 태양전지를 저가화하기 위한 방법으로 가장 먼저 대두되는 것이 웨이퍼 제조공정의 저가화이다.

현재 사용되는 결정질 실리콘 웨이퍼는 초크랄스키법(Czochralski method) 또는 브릿지만법(Bridgeman method) 등을 이용하여 실리콘 잉곳(ingot) 또는 블록(block)을 제조한 후, 와이어(wire) 등을 이용하여 얇은 기판 형태로 절단하여 만드는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 절단공정에서 최소 40~50% 정도의 원료손실(kerf-loss)이 발생하여 웨이퍼 제조단가의 상승을 초래한다. 이런 원료손실을 극복하기 위한 가장 대표적인 웨이퍼 기술이 리본형 웨이퍼(ribbon-type wafer) 제조기술이다. 이는 기존의 웨이퍼 제조공정처럼 잉곳/블록을 성장/절단하는 공정없이 실리콘 용탕으로부터 연속적으로 결정질 실리콘 웨이퍼를 직접 제조함으로써 근본적으로 원료손실 발생이 없는 기술이다[5].

리본형 웨이퍼를 제조하기 위하여 다양한 성장기술들이 개발되고 있는데, 일반적으로 리본형 웨이퍼 성장기술은 고-액 계면과 성장 방향에 따라 수직성장법과 수평성장법으로 분류할 수 있다. 고-액 계면과 리본성장방향이 수직인 수직성장법에는 edge-defined film-fed growth (EFG)와 string ribbon (SR) 등이 있고, 고-액 계면과 리본성장방향이 거의 수평인 수평성장 기술로는 ribbon growth on substrate (RGS)와 crystallization on dipped substrate (CDS)가 있다[6,8,9]. 수직성장법인 EFG 같은 경우, 결정립 크기가 수 cm로 수평성장법에 비해 상대적으로 큰 결정립 크기를 가지고 있어 변환효율이 높다는 장점이 있지만 성장속도가 1~2 cm/min로 매우 느리다는 단점이 있다. 반면 수평성장법인 RGS같은 경우 성장속도가 EFG보다 최대 100배 이상으로 매우 빠르다는 장점이 있지만, 급속응고로 인한 수십 μm 의 미세한 결정립 크기로 최종 태양전지 변환효율 향상에 제한적인 단점이 있다[8,10].

본 연구는 수평성장법의 장점인 빠른 성장속도와 수직성장법의 장점인 조대한 결정립 크기를 동시에 갖는 리본형 웨이퍼를 제조하는 새로운 개념의 장치와 공정을 개발하는 것이다. 특히 공정변수 중 더미바(dummy bar) 이송속도(moving speed)와 응고구간(solidification zone) 길이 변화에 따른 웨이퍼 제조 거동을 실험적으로 관찰하였으며, 공정변수의 최적화를 통하여 연속적인 웨이퍼 제조 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

리본형 실리콘 웨이퍼를 제조하기 위하여 Fig. 1과 같이 새로운 개념의 웨이퍼 직접제조장치를 설계/제작하였다. 직접제조 장치는 크게 폴리실리콘을 용융시킬 수 있는 용융부(melting

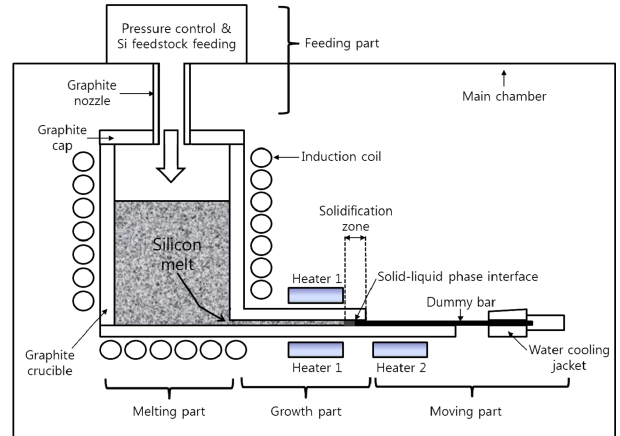


Fig. 1. Schematic diagram of a novel growth system for ribbon-type silicon wafer.

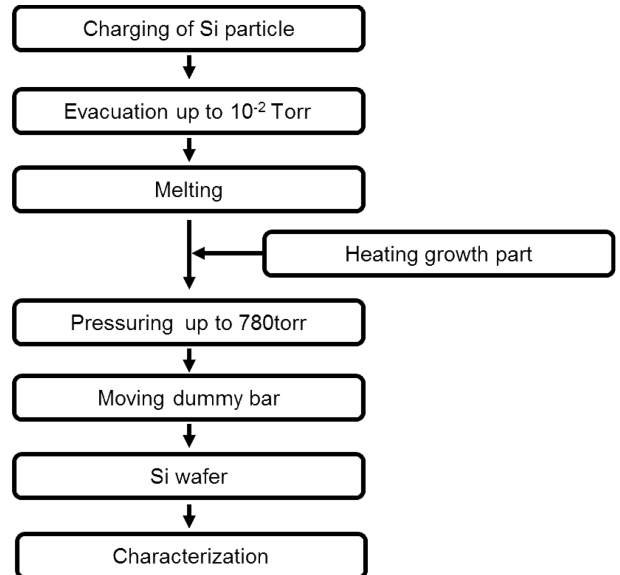


Fig. 2. Flow chart for the fabrication of ribbon-type silicon wafer.

part), 원하는 형상으로 웨이퍼를 제조/성장시키는 고온 성장부(growth part), 연속적인 실리콘 웨이퍼 제조를 위한 기판 이송부(moving part)와 용융부 가압 및 폴리실리콘 원료(feedstock) 투입을 위한 원료 주입부(feeding part)로 구분할 수 있다. 고온 성장부에서는 기판제에 핵심적인 역할을 하고 있는 응고구간(solidification zone)이 존재한다. 이 구간에서 실리콘 웨이퍼의 형상과 미세구조가 제어되기 때문에 더미바(dummy bar) 등에 의한 응고 구간의 온도 조건을 최적화하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 2는 제작한 장치를 기반으로 한 공정 순서도를 나타낸 것이다. 세척한 폴리실리콘 원료 200 g을 용융부 내 도가니에 장입시켰으며, 챔버 내에 존재하는 불순물과 산소를 저감하기 위하여 10^{-2} Torr까지 감압하였다. 이후 용융부에 전자기 유도

현상을 이용한 가열방식을 적용하여 RF 전력을 5분당 10 A씩 100 A까지 상승시켜 주었으며, 100 A에 도달하였을 때 용융부의 온도는 1500°C 이상이 되어 실리콘이 용융되기 시작하였다. 폴리실리콘이 용융되기 시작할 때, 고온 성장부의 온도를 흑연 발열체(Heater 1)에 의한 저항가열방식을 적용하여 1600°C까지 상승시켜 주었다. Heater 1 발열체와 근접한 부분의 고온 성장부는 1600°C로 유지되었지만, 응고구간과 같이 상대적으로 이격되어 있는 부분은 주변으로의 열손실이 발생하여 1600°C 보다 낮은 온도로 유지되었다. 고온 성장부 내 실리콘이 응고되는 응고구간(solidification zone)의 길이를 1, 1.5, 2 cm로 변화를 주어 실험을 진행하였으며, 이때 응고구간의 온도가 각각 1250, 1240, 1235°C를 형성하는 것으로 측정되었다. 한편 기관 이송부의 Heater 2는 1100°C까지 가열되어, 제조된 웨이퍼의 잔류응력을 해소하는 역할을 하게 된다. 응고구간을 포함한 고온 성장부의 온도가 안정화되었을 때, 메인챔버의 압력은 별도의 Ar 가스 가압장치에 의해 상압까지 상승되었으며 실리콘 용탕이 존재하는 용융부는 원료 주입부를 통한 Ar 가스의 가압으로 780 Torr까지 압력이 상승하였다. 상압으로 유지되고 있는 메인챔버의 압력보다 웨이퍼 제조모듈(용융부, 고온 성장부) 내의 압력이 높아질 때 실리콘 용탕은 고온 성장부 내부로 장입되었고, 냉각되고 있는 더미바(dummy bar)와 접촉하면서 응고되기 시작하였다. 용탕의 잡열 제거와 연속적인 웨이퍼 제조를 위한 더미바는 이송속도를 6, 9, 12 cm/min로 변화시키면서 웨이퍼를 제조하였다. 제조된 웨이퍼의 표면과 단면을 연마하고 45% KOH 수용액을 사용하여 80°C에서 15초 간에칭한 후, 광학 현미경(BX60MF, Olympus, Japan)을 사용하여 미세구조를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 실리콘 웨이퍼 제조공정 중 응고구간의 온도를 응고구간의 길이와 공정시간으로 표현한 것이다. 여기서 공정시간은 제조장치에 유도전류가 인가된 총 시간을 의미한다. 고온 성장부(growth part)가 가열되지 않았는데 7250초까지 응고구간의 온도가 약 1100°C까지 상승한 이유는 용융부가 1500°C 이상으로 가열된 것에 기인한 간접가열로 판단된다. 실험공정이 개시된 후 7250초가 되었을 때 고온 성장부의 Heater 1과 이송부의 Heater 2를 각각 1600°C와 1100°C가 될 때까지 작동

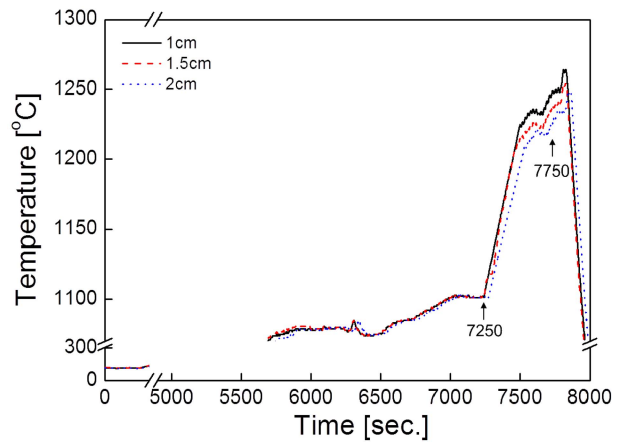


Fig. 3. Temperature variations of solidification zone depending on processing time and the length of solidification zone.

시켰다. 7750초에 두 개의 Heater 모두가 목표 온도에 도달하였고, 응고구간의 온도는 1, 1.5, 2 cm 응고구간 길이에 따라 각각 1250, 1240, 1235°C가 되었다. 응고구간의 길이가 길어짐에 따라 온도가 감소하는 이유는 고온 성장부 내 Heater 1의 직접가열구간과 떨어져 있는 응고구간의 영역이 넓어져 주변으로의 열손실이 많아졌기 때문으로 해석된다. Heater가 목표온도까지 도달했을 때, 용융부 내 실리콘 용탕 표면으로 Ar 가스가 주입되었고 7750초에 용융부 내 압력이 780 Torr가 되었다. 이때 고온의 액상 실리콘이 응고구간까지 주입되었고, 응고구간의 온도는 순간 최고치를 기록하였다. 응고구간의 순간 최고온도는 1, 1.5, 2 cm 응고구간 길이에 따라 각각 1264, 1254, 1248°C이었다. 이는 응고구간으로 용탕이 주입되기 전에 나타냈던 길이에 따른 온도편차와 거의 동일한 것으로, 응고구간의 순간 온도는 용탕의 주입 전에 형성된 응고구간의 온도에 의존적이라는 것을 알 수 있다. 이는 용탕 주입 전 응고구간의 온도 설정이 리본형 웨이퍼 제조에 중요하다는 것을 의미한다.

응고구간의 길이에 따른 리본형 웨이퍼 제조 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 응고구간 길이가 1 cm이고 온도가 1250°C인 (a)의 경우, 더미바가 고온 성장부 밖으로 이동하는 동시에 실리콘 용탕이 토출되는 현상을 보여주었다. 이는 응고구간 내에서 충분한 응고반응이 진행되지 않은 상태에서 더미바 이송이 진행되었기 때문으로 사료된다. 반면 응고구간 길이가 각각

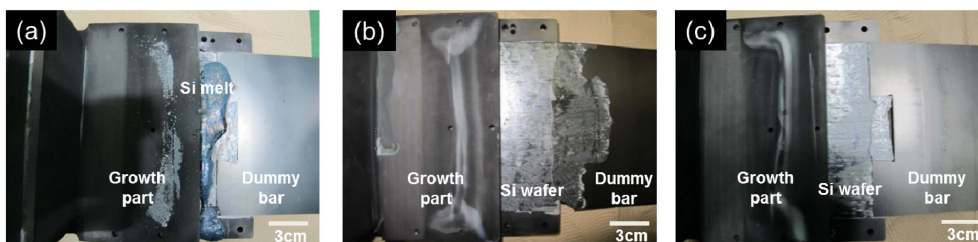


Fig. 4. Photo images for silicon wafers fabricated by the various lengths of solidification zone such as (a) 1 cm, (b) 1.5 cm and (c) 2 cm.

1.5와 2 cm이면서 온도가 1240과 1235°C인 (b)와 (c)의 경우는 더미바 이송과 함께 실리콘 용탕의 토출없이 응고된 리본형 웨이퍼가 제조되었다. 하지만 (c)의 경우는 리본형 웨이퍼가 3 cm 가량 연속적으로 제조되다가 정지되는 현상을 보여주었다. 고액계면이 응고구간 내에서 계속 유지되어야 연속적인 웨이퍼 제조가 가능한데, (c)의 경우는 초기에는 응고구간 내에서 고액계면이 형성되었다가 일정시간 이후에는 고액계면이 용융부 방향으로 이동하여 응고구간 내에서는 실리콘 고상만이 형성되었기 때문에 판단된다. 실리콘 소재는 액상에서 고상으로 상변태를 수반할 시 약 10%의 부피팽창을 수반하기 때문에 제한된 공간에서 상변태가 완료되면 부피팽창으로 인해 웨이퍼가 몰드에 끼여 더 이상 연속적인 웨이퍼 제조가 불가능하다[11]. 이는 응고구간의 길이에 따라 리본형 웨이퍼의 연속제조 여부가 결정된다는 것을 의미하는데, 실험결과와 같이 연속제조가 가능한 공정 윈도우(processing window)가 매우 좁다는 것을 확인할 수 있었다. 응고구간의 길이가 (a)처럼 1 cm 이하일 경우는 완전한 응고반응이 일어나지 않아서 용탕이 토출되는 문제가 있었고, (c)처럼 2 cm 이상일 경우는 응고구간 내에서 고액상변태가 완료되어 부피팽창을 수반하기 때문에 연속적인 웨이퍼 제조가 불가능하였다. 따라서 (b)처럼 1-2 cm 사이의 응고구간 길이가 고액계면을 응고구간 내에서 유지할 수 있는 최적의 길이라고 판단된다.

최적의 응고구간 길이인 1.5 cm는 고정된 채, 더미바 이송속도를 6-12 cm/min로 변화시키면서 웨이퍼 제조실험을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타냈었다. 웨이퍼 제조 공정 중 고액계면은 1.5 cm의 응고구간에서 계속 유지되어야 한다. 하지만 더미바의 이송속도에 따라 고액계면의 형상과 위치는 변화

하기 때문에, 본 실험에서 고정된 공정변수 하에서 1.5 cm의 응고구간 내에 고액계면을 정상상태로 유지하는 최적의 더미바 이송속도를 실험적으로 도출하는 것은 매우 중요하다. Fig. 5에서 더미바의 이송속도가 6 cm/min인 (a) 경우, 연속적인 웨이퍼 제조가 가능하였지만, 9 cm/min 이상인 (b)와 (c)의 경우는 더미바가 고온 성장부 밖으로 움직이는 순간 실리콘 용탕이 토출되는 결과를 보여주었다. 이는 고정된 응고구간 내에 고액계면이 존재하지 않고 더미바가 움직이는 방향으로 이동(shift)되었기 때문에 발생한 현상이라 판단된다. 결론적으로 본 실험에서 고정된 공정변수 하에서는 최적의 더미바 이송속도는 6 cm/min이었고, 이는 응고구간 내에서 고액계면의 위치를 유지시킬 수 있는 최적의 응고속도라고 생각된다. 또한 이 속도는 상용 EFG 웨이퍼의 성장속도(1-2 cm/min) 보다 3배 이상 빠른 성장속도이다. 더미바의 이송속도가 최종 리본형 웨이퍼의 생산속도에 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 좀 더 빠른 더미바 이송속도를 달성하기 위해서는 더미바의 냉각효율을 향상시켜 고액계면의 위치를 응고구간 내에서 유지시켜야 한다.

Fig. 6은 응고구간 길이 1.5 cm, 더미바 이송속도 6 cm/min으로 제조된 웨이퍼와 제조된 웨이퍼의 단면 및 표면의 미세구조를 나타낸 것이다. (a)는 156 × 210 mm 크기의 리본형(ribbon type) 다결정 실리콘 웨이퍼를 나타낸다. (b)와 같은 웨이퍼 단면 사진은 매끄러운 표면거칠기, 약 300 μm의 웨이퍼 두께와 약 45도 정도 기울어진 결정립들로 이루어진 미세구조를 보여준다. 공정변수들이 아직 완벽하지 않아서 수직성장법으로 제조된 EFG처럼 결정성장 방향이 웨이퍼 제조방향과 정확하게 평행하지는 않지만, 수평성장법으로 제조된 RGS와 비교 시 종횡비가 매우 크고 수 백 μm이상의 상당히 큰 결

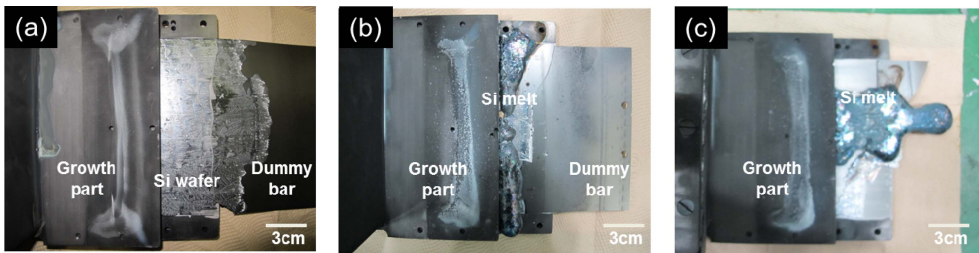


Fig. 5. Photo images for silicon wafers fabricated by the various moving speeds of dummy bar such as (a) 6 cm/min, (b) 9 cm/min and (c) 12 cm/min.

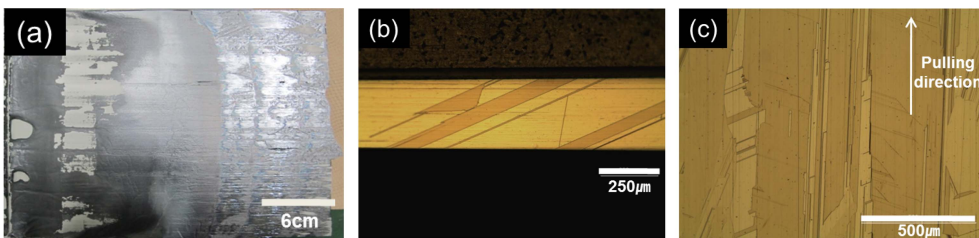


Fig. 6. (a) Photo image of as-grown silicon wafer and optical microscope images for (b) cross section and (c) surface of silicon wafer fabricated by solidification zone of 1.5 cm and moving speed of dummy bar of 6 cm/min.

미세구조를 관찰한 결과, 새롭게 설계한 장치와 공정 목적에 맞게 웨이퍼 제조방향과 더미바 이송방향이 평행한 것을 관찰할 수 있었다. 이는 웨이퍼 결정 성장방향과 수직하게 고액계면이 형성되었다는 것을 의미한다. 결론적으로 본 연구는 EFG처럼 태양전지 변환효율에 영향을 미치는 결정립 크기를 증가시키는 동시에 RGS처럼 빠른 웨이퍼 생산속도를 구현할 수 있는 새로운 개념의 장치와 공정을 개발하였으며, 기술적 측면에서의 발전 가능성을 성공적으로 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평성장법의 장점인 빠른 성장속도와 수직성장법의 장점인 조대한 결정립 크기를 동시에 갖는 리본형 웨이퍼를 제조하는 새로운 개념의 장치와 공정을 개발하였다. 특히 공정변수 중 더미바(dummy bar) 이송속도(moving speed)와 응고구간(solidification zone) 길이 변화에 따른 웨이퍼 제조 거동을 실험적으로 고찰하였다. 응고구간의 길이가 1 cm 이하일 경우는 완전한 응고반응이 일어나지 않아서 용탕이 토출되는 문제가 있었고, 2 cm 이상일 경우는 응고구간 내에서 고액 상변태가 완료되어 부피팽창을 일으켰기 때문에 연속적인 웨이퍼 제조가 불가능하였다. 따라서, 1.5 cm의 응고구간 길이가 고액계면을 응고구간 내에서 유지시킬 수 있는 최적의 길이였다. 또한 더미바의 이송속도가 6 cm/min인 경우, 연속적인 웨이퍼 제조가 가능하였지만, 9 cm/min 이상인 경우는 더미바가 고온 성장부 밖으로 움직이는 순간 실리콘 용탕이 토출되는 결과를 보여주었다. 이는 고정된 응고구간 내에 고액계면이 유지되지 않고 더미바가 움직이는 방향으로 이동되었기 때문으로 판단된다. 1.5 cm의 응고구간 길이와 6 cm/min으로 제조된 실리콘 웨이퍼는 약 300 μm 의 웨이퍼 두께와 약 45도 정도 기울어진 결정립들로 이루어져 있었다.

감사의 글

본 연구는 2010년 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생 에너지 기술개발 사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20103020010060).

참고문헌

- [1] A.M. Lipinski, P. Pane, R. Cia and J. Optoelectron, Adv. Mater, "The Industrial technology of crystalline silicon solar cells", **5** (2003) 1365-1371.
- [2] Lee GH, Rhee CK and Lim KS, Solar Energy "A Study on the fabrication of polycrystalline Si Wafer by direct casting for solar cell substrate", **80** (2006) 220-225.
- [3] D. S. Ruby, S. H. Zaihi and S. Narayanan, PVSC "Plasma texturization for multicrystalline solar cells", **28** (2000) 75-78.
- [4] Lee WS, Moon IY and Lee JS, J. Korean Inst. Electri. Electron.Mater. Eng., "PC1D simulation for optimization of single crystalline silicon solar cell", (2007) 57-58.
- [5] Jang BY, Kim JS and Ahn YS, Ceramist, "Low-Cost polysilicon technologies for photovoltaics", **13** (2010) 41-46.
- [6] J. P. Kalejs, B. H. Mackintosh and T.Surek, J. Cryst. Growth, "High speed of wide silicon ribbon", **50** (1980) 175-192.
- [7] R. L. Wallace, J. I. Hanoka, A. Rohatgi and G. Crotty, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, "Thin silicon string ribbon", **48** (1997) 179-186.
- [8] J. I. Hanoka, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, "An overview of silicon ribbon growth technology", **65** (2001) 231-237.
- [9] H. Lange and I. A. Schwirtlich, J. Cryst. Growth, "Ribbon growthon substrate(RGS) - A new approach to high speed growth of Silicon ribbons for photovoltaic", **104** (1990) 108-112.
- [10] S. N. Mohammad, M. A. Sorhan and S. Qutubuddin, Solid State Electron, "The influence of grain boundary on the performance efficiency of polycrystalline gallium arsenide solar cell", **32** (1989) 827-834.
- [11] B. Wu, S. Scott, N. Stoddard, R. Clark and A. Sholapurwalla, JOM, "Simulation of silicon casting process for photovoltaic (PV) application", **2** (2009) 269-276.