

Influence of relative distance between heater and quartz crucible on temperature profile of hot-zone in Czochralski silicon crystal growth

Kwanghun Kim[†], Sejin Kwon, Ilhwan Kim*, Junseong Park*, Taehun Shim* and Jeagun Park*

R&D Center, WoongjinEnergy, Daejeon 34012, Korea

*Department of Electronic and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received September 20, 2018)

(Revised October 2, 2018)

(Accepted October 12, 2018)

Abstract To lessen oxygen concentrations in a wafer through modifying the length of graphite heaters, we investigated the influence of relative distance from heater to quartz crucible on temperature profile of hot-zone in Czochralski silicon-crystal growth by simulation. In particular, ATC temperature and power profiles as a function of different ingot body positions were investigated for five different heater designs; (a) typical side heater (SH), (b) short side heater-up (SSH-up), (c) short side heater-low (SSH-low), (d) bottom heater without side heater (Only-BH), and (e) side heater with bottom heater (SH+BH). It was confirmed that lower short side heater exhibited the highest ATC temperature, which was attributed to the longest distance from triple point to heater center. In addition, for the viewpoint of energy efficiency, it was observed that the typical side heater showed the lowest power because it heated more area of quartz crucible than that of others. This result provides the possibility to predict the feed-forward delta temperature profile as a function of various heater designs.

Key words Czochralski method, Temperature profile, Silicon single crystal ingot, Charge size, Solar industry

초크랄스키법 실리콘 성장로에서 핫존 온도분포 경향에 대한 히터와 석영도가니의 상대적 위치의 영향

김광훈[†], 권세진, 김일환*, 박준성*, 심태현*, 박재근*

웅진에너지연구소, 대전, 34012

*한양대학교 전자컴퓨터통신공학과, 서울, 04763

(2018년 9월 20일 접수)

(2018년 10월 2일 심사완료)

(2018년 10월 12일 게재확정)

요약 고효율 태양전지용 단결정 실리콘 웨이퍼는 초크랄스키 성장법으로 석영도가니 속의 실리콘 액체에서 단결정 잉곳을 성장시켜 제조된다. 석영도가니 성분 중의 하나는 산소는 실리콘 잉곳으로 유입되고, 태양전지의 전력변환 효율 저하 문제를 발생시킨다. 이러한 산소 유입을 줄이는 다양한 방법 중 하나는 히터의 모양과 구조를 변경하는 방법이 있다. 그러나 히터 구조 변경 시 단결정 실리콘 잉곳 바디 성장에 필요한 온도 분포경향에 큰 변화를 일으킨다. 따라서 본 연구에서는 초크랄스키 실리콘 성장에서 다양한 히터의 구조와, 히터와 석영도가니의 상대적 위치가 단결정 실리콘 잉곳 Body 성장 시의 ATC 온도와 Power 분포경향에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 삼중점과 히터 중심과의 위치가 가장 먼 SSH-Low가 가장 높은 ATC 온도 분포경향을 보여주었다. 또한 길이가 짧은 Short Side Heater(SSH-Up, SSH-Low)보다는 실리콘 액체를 담고 있는 석영도가니 측면의 많은 영역을 커버할 수 있는 일반 Side Heater(SH)가 가장 Power 소모 측면에서 유리하였다. 특히 본 연구 결과를 통해 고효율 태양전지용 단결정 실리콘 잉곳 성장 시 필요한 효율적인 ATC 온도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

[†]Corresponding author
E-mail: huny2975@naver.com

1. 서 론

최근 전 세계적으로 여름철에 연속되는 폭염으로 많은 사람들이 힘들어 하고 있다. 이러한 연속적인 폭염은 지구가 점점 더워지는 현상의 결과 중 하나이다. 인류의 화석연료 사용으로 인한 온실가스 현상으로 지구 온난화가 심해짐에 따라, 이산화탄소를 배출하지 않는 신재생 에너지에 대한 관심이 어느 때보다 커지고 있다[1-3]. 대표적인 신재생에너지 중 하나는 무한에 가까운 태양에서 오는 빛을 전기에너지로 바꾸는 태양광발전에너지이다[4-6]. 태양광발전을 위한 가장 많이 사용되는 소재는 실리콘이며, 현재까지 다결정 실리콘 태양전지가 단결정 실리콘 태양전지보다 더 많이 설치되어 왔다[7]. 다결정 실리콘 태양전지의 소재인 웨이퍼 안에는 grain boundary가 많이 존재하므로, 일반적으로 단결정 실리콘 웨이퍼 소재보다 태양전지의 전력변환 효율이 낮다. 제조원가는 다결정 실리콘 웨이퍼 소재가 더 낮지만, 실리콘 소재의 이론한계효율까지 기술 개발을 진행 중에 있어, 향후 단결정 실리콘 wafer 소재가 더 많은 비중을 차지할 것으로 예측된다. 단결정 실리콘 웨이퍼는 초크랄스키 방법으로 만들어지며, 이러한 초크랄스키 방법은 단결정 잉곳을 생산하는 매우 대중적인 일반적인 방법이다. 일반적으로 불순물을 관리하기 위하여, 석영도가니 안에 도판트와 함께 폴리 실리콘을 쌓고[8], 진공챔버 안에서 그래파이트 히터로 가열하여 액체 실리콘으로 상 변태시킨 후, 단결정 실리콘 종자결정을 액체에 접촉시켜 온도제어를 하며 위쪽으로 서서히 끌어 올리면서 단결정 실리콘 잉곳을 성장시킨다. 이 때 고온에서 실리콘 액체와 접촉하고 있는 석영도가니에서 산소가 용출되어 실리콘 액체로 들어간다. 대부분의 산소는 실리콘과 결합한 채로 기체와 접촉한 free surface를 통하여 증발하지만, 1~2%의 산소는 고체 단결정 실리콘 잉곳 안으로 유입된다. 이러한 산소는 태양전지 제조 시 산소 석출물을 만들거나 oxidation induced stacking faults(OiSF)를 만들어 셀 효율을 저하시키며[9, 10], p-type 태양전지 웨이퍼의 경우 boron과 함께 광열화현상(LID)를 야기하여 셀 효율이 저하된다[11-13]. 따라서 단결정 실리콘 잉곳 성장 시 다양한 방법으로 산소농도를 낮추는 것이 연구 개발되고 있다[14-17]. 그 중 그래파이트 히터의 길이를

줄이는 방법 또한 최근에 많이 개발 되었다. 잉곳 성장로 안의 히터를 포함한 그래파이트 부품과 단열재의 온도를 제어하는 것은 잉곳 성장 중에 단결정구조가 없어지는 문제를 억제하는데 매우 중요하다[18-20]. 특히 초크랄스키 방법은 배치공정으로, 잉곳 성장 길이의 함수로 그래파이트 부품과 단열재 온도 설정은 매우 복잡하다. 진공챔버 성장로 안에서 실리콘 단결정 성장 시, 실리콘 고체 잉곳의 길이와 히터를 포함한 상부 그래파이트 부품의 상대적 위치와 실리콘 액체를 담고 있는 석영도가니와 하부 그래파이트 부품의 상대적 위치가 계속 변하게 된다.

따라서, 진공챔버 성장로 안의 모든 변수 변화에 따른 단결정 실리콘 잉곳의 품질 결과의 예측은 실제 실험을 통해서 규명할 경우, 많은 시간과 비용이 수반되기 때문에 이러한 자원을 절약하기 위하여 시뮬레이션 수행을 통하여 가능하다[21]. 그러므로 본 연구에서는, 초크랄스키법에서 히터 구조 변화와 석영도가니의 상대적 위치 변화가 핫존 온도 분포경향에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 관계성을 연구하였다. 특히, 그래파이트 부품의 온도 분포 변화의 단결정 실리콘 잉곳 길이 변화에 대한 의존성을 조사하였고, 다양한 히터의 길이와 석영도가니와의 상대적 위치를 변경하여 핫존에서의 온도 차이를 규명하였다.

2. 실험 방법

본 연구의 시뮬레이션 실험은 상용 소프트웨어인 CGSim으로 진행하였다. CGSim은 실리콘 단결정 잉곳 성장을 위한 진공챔버 성장로 안의 Global 시뮬레이션을 할 수 있는 소프트웨어이다[22]. 초크랄스키 실리콘 성장 공정의 Global 시뮬레이션은 대류, 전도, 복사를 통한 성장로 내부의 그래파이트 히터 및 부품, 실리콘 액체, 실리콘 고체 단결정 잉곳사이의 모든 열전달을 계산한다. 성장 결과를 정확하게 예측하기 위하여 성장로, 그래파이트 부품, 단결정 잉곳 등의 크기는 실제 양산공정에서 사용 중인 제품의 실제 길이 수치를 적용하였다. 각 재료의 물성 중 주요 부품의 물리적 상수 값은 Table 1에 표기하였다. 모든 부품과 실리콘 액체와 고체의 시

Table 1
Physical properties for simulation

Item	Conductivity [W/m/K]	Specific heat [J/kg/K]	Emissivity
Graphite	$6.5 + 85.5\exp(-0.0009T)$	$2416.6T/(258.6 + T)$	0.7
Insulator	0.15	$516 + 0.634T$	0.8
Quartz	$0.56 + 0.049\exp(0.002T)$	753.9	0.85
Si (solid)	$23.8 + 314.4\exp(-0.0036T)$	744.7	0.9

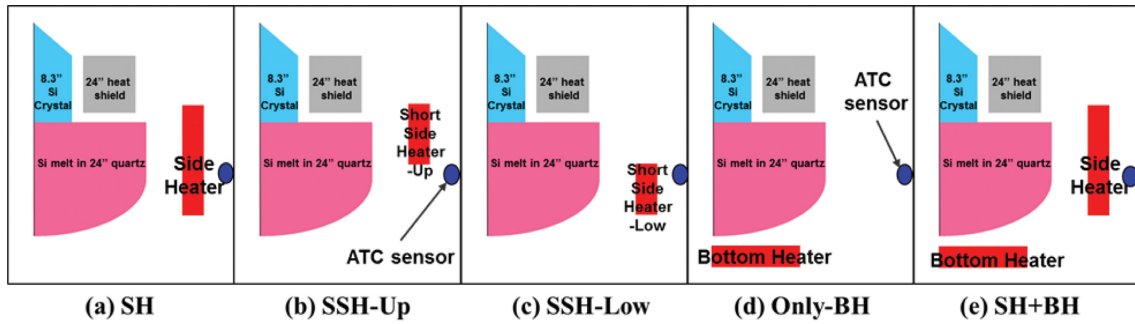


Fig. 1. Schematic diagram of various heater types (Each figure is half figure of front view of 24-inch quartz crucible, 8.3-inch diameter ingot, heater, and heat shield).

물레이션 도면은 사각형과 삼각형의 작은 그리드와 메시로 분할하였다[23]. 지배방정식, 초기 조건, 경계 조건은 CGSim에서 제공하는 정보를 사용하였으며, 실리콘 액체 대류와 Ar 가스 대류를 통한 운동량전달도 제공되는 것을 적용하였다.

실험에 적용한 여러 가지 히터 타입에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 길이가 긴 ~500 mm 길이의 Side Heater(SH), Fig. 1(b)는 히터의 길이를 절반으로 줄였으며 상부에 위치한 Short Side Heater-Up (SSH-Up), Fig. 1(c)는 히터의 길이가 절반으로 줄였으며 하부에 위치한 Short Side Heater-Low(SSH-Low), Fig. 1(d)는 Side Heater가 없는 ~150 mm 길이의 Bottom Heater(Only-BH), Fig. 1(e)는 Side Heater와 Bottom Heater가 함께 있는 Side Heater with Bottom Heater

(SH + BH)이다. 핫존은 ~400 mm 높이와 24인치 크기의 석영도가니를 사용하였으며, 폴리실리콘 충전 사이즈는 197 kg을 사용하였다. 실리콘 단결정 잉곳의 직경은 8.3 인치이며, 타겟 인상 속도는 1~1.3 mm/min이다. 석영도가니 회전속도는 반시계방향으로 6~12 rpm이며, 실리콘 잉곳의 회전속도는 시계방향으로 6~12 rpm이다. Ar의 유량은 10~80 lpm이며, 성장로 내부 압력은 10~80 torr이다. Melt Level(히터 상단부터 실리콘 액면까지의 거리)은 100~140 mm이며, Melt Gap(Heat shield 하단부부터 실리콘 액면까지의 거리)는 20~40 mm이다.

각 조건에서 실리콘 단결정 잉곳 길이를 0.1미터 간격으로 변경하며 단결정 성장 시물레이션을 수행하였다. 각 조건에 대한 시물레이션을 종료 한 후, 실제 생산에서 사용 중인 성장로에 부착된 광학식 온도센서(ATC 센서)와 동일한 지점(Fig. 2에서 오른쪽 측면 검은색 화살표 지점)에서의 Simulation 온도(ATC 온도)와 수렴한 Power 값을 확인하고 조사하였다.

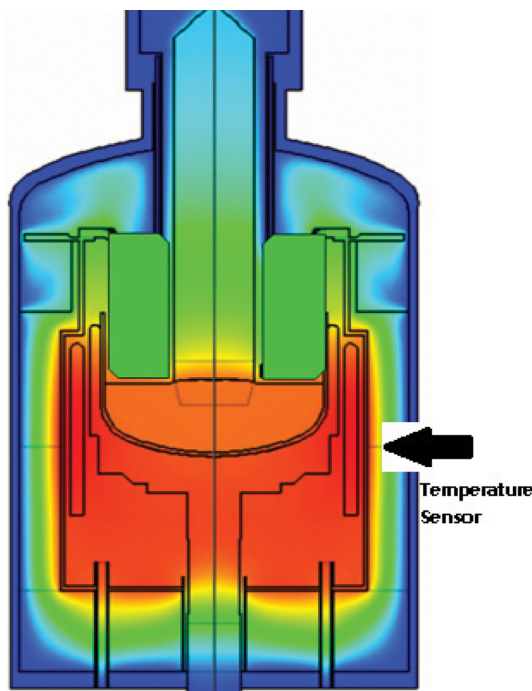


Fig. 2. Position of temperature sensor in simulated temperature contour map of grower.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 실리콘 단결정 잉곳 바디 길이 변화에 따른 ATC 온도 분포경향을 보여주고 있다. 고체, 액체, 기체

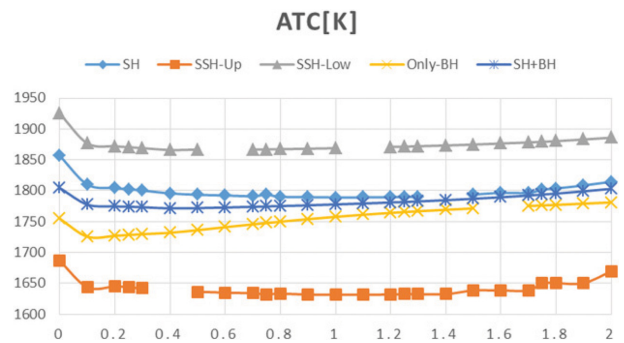


Fig. 3. ATC temperature [K] profiles as a function of the ingot body length [meter].

가 접하는 삼중점(Triple Point)의 온도는 실제 결정 성장 조건인 실리콘의 녹는점(1,685 K)으로 유지하여야 한다. SSH-Low의 경우, 히터의 중심부터 삼중점까지의 거리가 멀기 때문에 삼중점의 온도가 유지되기 위하여 더 많은 온도를 올려야하므로 1,850 K 이상의 가장 높은 온도를 보여주고 있다. 이와는 반대로 SSH-Up 경우는, 약 1,650 K의 가장 낮은 온도를 보여주고 있다. 이는 히터의 중심부터 삼중점까지의 거리가 가장 가깝기 때문에, 삼중점의 온도가 유지되기 위하여 온도를 적게 올려도 되기 때문이다. SH는 SSH-Low와 SSH-Up의 중간에 위치한 약 1,800 K 근처의 온도를 보여주고 있다. 이는 SH 히터 중심부는 SSH-Up과 SSH-Low의 중간에 위치하므로, 온도 특성이 양쪽 조건의 중간에 위치하게 된다. Only-BH는 SH보다 낮은 1,750 K 근처의 온도를 보여주고 있으며, 이는 Bottom heater가 ATC 센서 위치와 상대적으로 먼 거리에 위치하고 있기 때문에 ATC 센서에서의 온도는 다소 낮게 나오게 된다. SH + BH는 SH와 Only-BH의 정확히 가운데에 위치한 1,770 K 근처의 온도를 보여주고 있다. 이는 두 히터의 특성을 조금씩 보유하고 있으므로 중간에 위치한 온도를 보여주는 것으로 추정된다.

Fig. 4는 실리콘 단결정 잉곳 바디 길이에 따른 Delta 온도(Body 0미터에서의 시작 ATC 온도에서, 각 길이에서의 ATC 온도를 뺀 값) 분포경향을 보여주고 있다. Delta 온도 프로파일은 Target Temperature Profile(TTP)라고도 하는데, 이는 실제 실리콘 단결정 성장 시 성장로 설비의 소프트웨어에 입력시켜주는 recipe 프로그램이다. 보통 TTP는 이전 Batch 성장의 결과로 얻은 ATC 온도 분포경향을 보고, 타겟 직경과 타겟 인상속도에 맞게끔 엔지니어가 수정하여 입력하므로, 이러한 방식은 전형적인 Feed Forward 제어 시스템의 일종이다. TTP를 잘 만들어서 입력해야 단결정 수율을 높일 수 있으므로, Delta 온도 분포는 단결정 성장에서 매우 중요한 parameter이다. Fig. 4에서는 모든 히터들에서 동일하게 Body 초반 0.1미터까지 30~50 K 가량의 급격한 온도

변화를 보인다. 이는 Body가 생성됨에 따라 히터와 free surface, 즉, 실리콘 액체와 Ar 기체와의 경계면으로부터 유입되는 복사에너지에 의한 잉곳 온도 증가를 억제하기 때문이다[24]. 특히, Only-BH와 SH + BH에 비해 SH, SSH-Up, SSH-Low는 20 K 이상 온도가 하강한다. 이는 Bottom Heater에서의 복사에너지에 의한 열이 직접적으로 Ingot Body 주변부로 가지 않기 때문이다. Only-BH는 Body 초반부의 급격한 하강 이후 온도가 상승하는 경향을 보인다. 이는 잔류 실리콘 액체의 양이 줄어들면서 열용량이 줄어들어 삼중점의 온도가 낮아지는 것을 방지하기 위한 것으로 추정된다[24]. 특이한 점은 온도가 증가하기 시작하는 잉곳 바디 길이는 히터의 구조 및 위치에 따라 모두 다르다는 것이다. 즉, SH의 경우 Body 1미터까지 온도가 하강하다 상승하는 경향으로 바뀌는데, 이는 SSH-Up과 비슷하다. 하지만 SSH-Low의 경우 Body 0.4미터까지 온도가 하강하다 상승한다. 이는 석영도가나와 히터의 상대적 위치 차이로 인해 발생하는 현상이다. 실리콘 잔류 액체가 줄어들어 따라 석영도가나 위치는 Melt Gap이 일정하게 유지되기 위하여 상승하게 된다. SSH-Low의 경우 석영도가나가 상승하게 되면 Bottom Heater로부터 도가나가 점점 멀어지는 경향을 보이나, SH와 SSH-Up은 석영도가나가 상승하더라도 대부분의 잔류 실리콘 액체가 Side Heater 가열 범위 안쪽에 그대로 존재하므로 상대적으로 열이 쉽게 전달된다. SH + BH의 경우 Only-BH와 SH의 중간 지점에서의 온도 분포 경향을 보여주고 있다. 이는 삼중점의 온도와 실리콘 액체의 열을 유지하기 위해 필요한 에너지가 Bottom Heater와 Side Heater 두 곳으로부터 분배되어 들어오고 있기 때문이다.

Fig. 5는 실리콘 단결정 잉곳 바디 길이 변화에 따른 Power 분포 경향을 보여주고 있다. 실리콘 단결정 잉곳 바디 길이 변화에 따른 Power의 분포 경향과 ATC 온도의 경향과 히터들 간의 상대적 경향성은 일치하지 않는다. SH가 가장 낮은 Power 값을 보여주고 있으며, 이는 긴 길이의 히터가 석영도가나 측면의 넓은 영역에서 골

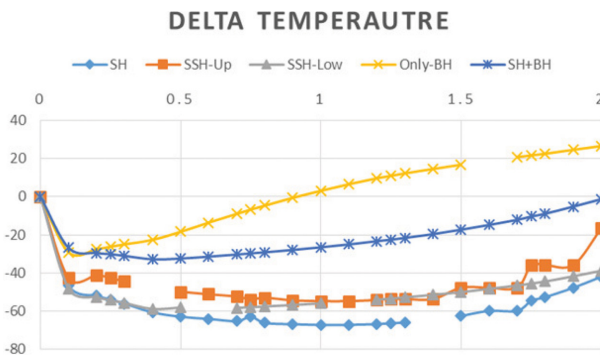


Fig. 4. Delta temperature (= (ATC at zero meter) - (ATC at each length)) as a function of the ingot body length [meter].

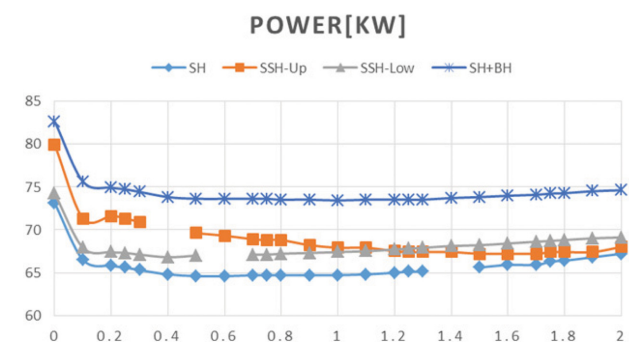


Fig. 5. Power profiles as a function of the ingot body length [meter].

고루 효율적으로 열에너지를 전달하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 에너지 절약 측면에서는 긴 Side Heater가 상대적으로 더 유리하다. SSH-Up의 경우 SSH-Low 경우보다 Body 초반부에 Power가 더 많이 들어간다. 이는 잉곳 성장 초반에 실리콘 액체의 양이 많을 때 석영 도가니의 하부까지 열을 보내기 위해서 상대적으로 높은 Power가 필요하기 때문이다. 하지만 이러한 현상은 Body의 길이가 1미터 이상으로 성장되면, SSH-Low의 Power가 SSH-Up의 Power 값보다 커지게 된다. 이는 실리콘 잔류 액체의 양이 줄어들면서 석영 도가니의 위치가 상승하고 SSH-Low의 가열 범위에서 멀어지므로 더 많은 Power를 소모해야 하기 때문이다. SH + BH는 가장 많은 Power를 소비하고 있으며, 이는 두 곳의 Heater에서 열을 가하는 것이 에너지 측면에서 훨씬 비효율적임을 의미한다. Only-BH는 히터로부터 공급되는 열이 melt free surface까지 전달되기까지의 거리가 상대적으로 멀고 열이 실리콘 액체에 고루 전달되기 어렵기 때문에 실제 실리콘 단결정 성장에서는 적합하지 않아 Fig. 5에 Power 분포를 도시하지 않았다.

Fig. 6은 Fig. 1의 삼중점과 ATC 센서 포인트와 각 히터의 발열 중심점의 상대적 거리를 직선으로 표시하여 나타낸 그림이다. 노란색 원은 삼중점의 위치를, 파란색 원은 ATC 센서가 온도를 읽는 점(위치)을 모식적으로 표기하였다. 히터와 연결시킨 점은 히터의 중앙부에 위치시켰다. 현대의 초크랄스키법 실리콘 단결정 성장로는 단결정 성장 시, 기술적 한계로 인해 실제 삼중점의 온도를 읽고 제어하지 못하고 있다. 대신 성장로 밖에 파이로미터(광학식 온도 측정기)를 설치하고 성장로에 구멍을 뚫어 유리창을 설치한 후 단열재에 원기둥모양의

조그만 구멍을 뚫어 히터 근처에 있는 그라파이트 부품의 온도를 측정하여 간접적인 방식으로 실리콘 단결정을 성장한다. 만약 삼중점의 온도를 직접 측정한다면, 잉곳 바디 길이에 관계없이 Fig. 3의 ATC 온도 그래프는 모두 1,685 K로 일정하였을 것이다. Fig. 6(b)의 SSH-Up이 히터의 중심과 삼중점까지의 거리가 가장 가깝고 ATC 센서 온도 점과도 가깝기 때문에 ATC 온도 분포경향에서 가장 낮은 값을 보인다. 반대로 Fig. 6(c)의 SSH-Low는 히터의 중심과 삼중점까지의 거리가 멀고 ATC 센서 온도 점과도 가깝기 때문에 ATC 온도 분포경향에서 가장 높은 값을 보이고 있다. Fig. 6(d)의 Only-BH는 히터가 실리콘 멜트의 측면이 아니라 바닥에서 가열하고, ATC 온도 점과의 거리가 가장 멀기 때문에 SH보다 ATC 온도 분포경향이 조금 낮은 값을 보였다. 마지막으로 Fig. 6(e)의 SH + BH의 경우 삼중점으로의 열이 BH와 SH로부터 동시에 들어옴을 모식도에서 추론하여 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 히터의 구조 모양과 상대적 위치에 따라 단결정 실리콘 잉곳 Body 성장 시의 ATC 온도와 Power 분포 경향이 어떻게 영향을 받는지에 대하여 조사 하였다. 삼중점과 히터 중심과의 거리가 가장 먼 SSH-Low가 가장 높은 ATC 온도 분포 경향을 보여주었고, 가장 가까운 거리의 SSH-Up이 가장 낮은 ATC 온도 분포 경향을 보였으며, 나머지는 그 중간 온도 분포 경향을 보인다는 것을 확인 하였다. 또한, 에너지 효율 측면에서는 길이가 짧은 Short Side Heater(SSH-Up,

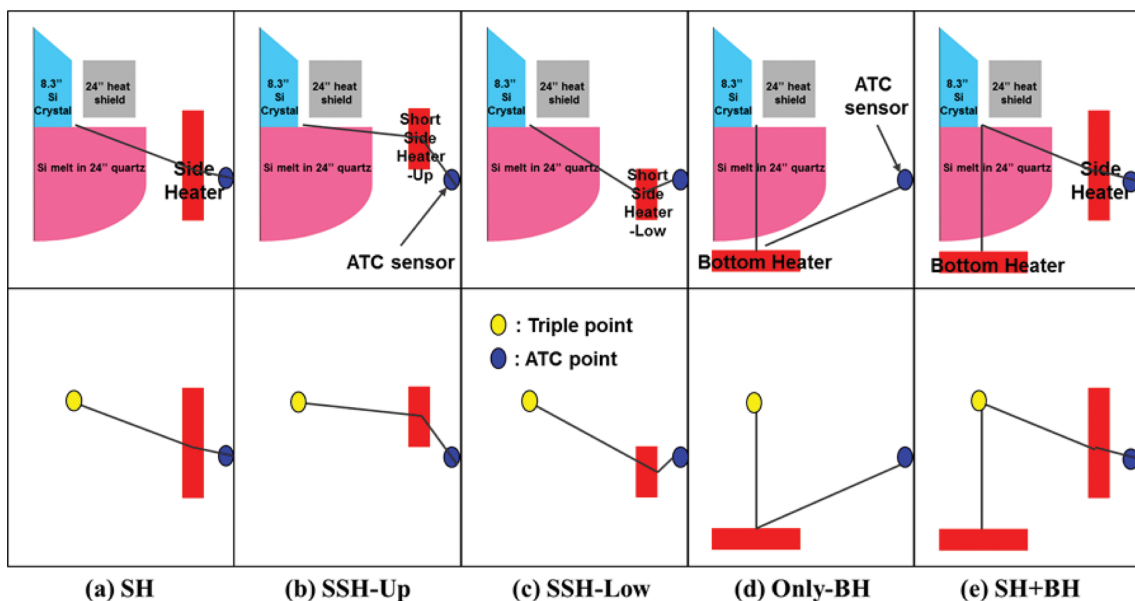


Fig. 6. The relative distances from heater to both triple point and ATC sensor point.

SSH-Low)보다는 실리콘 액체를 담고 있는 석영도가니 측면의 많은 영역에 열을 가할 수 있는 일반 Side Heater (SH)가 Power가 가장 낮게 소모되므로 가장 효율적이다. 잉곳 성장 시 Feed-forward로 제어하기 위해 필요한 Delta 온도 분포경향은 히터와 석영도가니의 상대적 위치 관계에 따라 히터 구조 및 크기 설계에 대해 매우 다른 양상을 보여주는 것을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구를 통해 초크랄스키법 실리콘 단결정 성장 시 필요한 ATC 온도 프로그램을 예측하여 사용할 수 있는 가능성을 확인하게 되었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20173010013070).

References

- [1] S. Bhavsar, M. Najera, R. Solunke and G. Vesper, "Chemical looping: To combustion and beyond", *Catal. Today* 228 (2014) 96.
- [2] A. Zyadin, A. Puhakka, P. Ahponen and P. Pelkonen, "Secondary school teachers' knowledge, perceptions, and attitudes toward renewable energy in Jordan", *Renew. Energy* 62 (2014) 341.
- [3] S.R. Gislason and E.H. Oelkers, "Carbon Storage in Basalt", *Science* 344 (2014) 373.
- [4] E.W. McFarland, "Solar energy: setting the economic bar from the top-down", *Energy Environ. Sci.* 8 (2014) 846.
- [5] Y. Horiuchi, T. Toyao, M. Takeuchi, M. Matsuoaka and M. Anpo, "Recent advances in visible-light-responsive photocatalysts for hydrogen production and solar energy conversion-from semiconduction TiO_2 to MOF/PCP photocatalysts", *Phy. Chem. Chem. Phys.* 32 (2013) 13243.
- [6] C.F. Guo, T. Sun, F. Cao, Q. Liu and Z. Ren, "Metallic nanostructures for light trapping in energy-harvesting devices", *Light-Sci. Appl.* 3 (2014) e161.
- [7] S.S. Baik, I.S. Pang, J.M. Kim and K.H. Kim, "Improvement of minority carrier life time in N-type monocrystalline Si by the Czochralski method", *Electron. Mater. Lett.* 12 (2016) 426.
- [8] B. Sopori, P. Basnyat, S. Devayajanam, T. Tan, A. Upadhyaya, K. Tate, A. Rohatgi and H. Xu, "Dissolution of oxygen precipitate nuclei in n-type CZ-Si Wafers to improve their material quality: experimental results", *IEEE J. Photovolt.* 7 (2017) 97.
- [9] J. Haunschild, I.E. Reis, J. Geilker and S. Rein, "Detecting efficiency-limiting defects in Czochralski-grown silicon wafers in solar cell production using photoluminescence imaging", *Phys. Status Solidi RRL* 5 (2011) 199.
- [10] C.L. Zhou, W.J. Wang, H.L. Li, L. Zhao, H.W. Diao and X.D. Li, "Influence of ring oxidation-induced stack faults on efficiency in silicon solar", *Chin. Phys. Lett.* 25 (2008) 3005.
- [11] J. Schmidt, "Light-induced degradation in Crystalline silicon solar cells", *Solid State Phenom.* 95-96 (2004) 187.
- [12] T. Luka, C. Hagendorf and M. Turek, "Multicrystalline PERC solar cells: Is light-induced degradation challenging the efficiency gain of rear passivation?", *PV International* 32 (2016) 37.
- [13] J. Lindroos, Y. Boulfrad, M. Yli-Koski and H. Savin, "Preventing light-induced degradation in multicrystalline silicon", *J. Appl. Phys.* 115 (2014) 154902.
- [14] S. Togawa, Y. shiraishi, K. Terashima and S. Kimura, "Oxygen transport mechanism in Czochralski silicon melt", *J. Electrochem. Soc.* 142 (1995) 2844.
- [15] N. Machida, K. Hoshikawa and Y. Shimizu, "The effects of argon gas flow rate and furnace pressure on oxygen concentration in Czochralski silicon crystals grown in a transverse magnetic field", *J. Cryst. Growth* 210 (2000) 532.
- [16] M. Watanabe, W. Wang, M. Eguchi and T. Hibiya, "Control of oxygen-atom transport in silicon melt during crystal growth by electromagnetic force", *Mater. T. JIM* 41 (2000) 1013.
- [17] K.H. Kim, B.C. Sim, I.S. Choi and H.W. Lee, "Point defect behavior in Si crystal grown by electromagnetic Czochralski (EMCZ) method", *J. Cryst. Growth* 299 (2007) 206.
- [18] T.C. Chen, H.C. Wu and C.I. Wang, "The effect of interface shape on anisotropic thermal stress of bulk single crystal during Czochralski growth", *J. Cryst. Growth* 173 (1997) 367.
- [19] J. Friedrich, L. Stockmeier and G. Muller, "Constitutional supercooling in Czochralski growth of heavily doped silicon crystals", *Acta Phys. Pol. A* 124 (2013) 219.
- [20] K.H. Kim and S.S. Baik, "Optimization of pulling speed for decreasing thermal stress in different quartz crucible size with Czochralski method", *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd. IEEE*, 2015.
- [21] V.V. Kalaev, "Combined effect of DC magnetic fields and free surface stresses on the melt flow and crystallization front formation during 400 mm diameter Si Cz crystal growth", *J. Cryst. Growth* 303 (2007) 203.
- [22] V.V. Kalaev, A. Sattler and L. Kandinski, "Crystal twisting in Cz Si growth", *J. Cryst. Growth* 413 (2015) 12.
- [23] B. Zhou, W. Chen, Z. Li, R. Yue, G. Liu and X. Huang, "Reduction of oxygen concentration by heater design during Czochralski Si growth", *J. Cryst. Growth* 483 (2018) 164.
- [24] S.S. Baik, S.J. Kwon and K.H. Kim, "Understanding of the effect of charge size to temperature profile in the Czochralski method", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 28 (2018) 141.