

고속 열처리 공정기(RTP)의 개요와 연구 동향

도현민, 최진영

서울대학교 전기공학부

1. 서론

반도체 산업은 현재 여러 가지 도전에 직면하고 있다. 반도체 산업 성공의 열쇠는 수요에 따른 혁신적인 대처나 빠른생산 능력, 전자산업의 변화에 따른 빠른 발맞춤이 쥐고 있다고 해도 과언이 아니다. 기존의 대량생산 시스템에서는 많은 웨이퍼를 함께 처리하기때문에 다양한 종류의 IC생산에 빠르게 대처할 수 있는 능력이 매우 뒤떨어져 있다. 이러한 이유로 반도체 생산 공정에서의 유연 생산(flexible manufacturing) 기술의 필요성이 강조되고 있는 시점이다. 유연 생산 시스템(flexible manufacturing system)은 한 장비에서 필요한 여러 가지 제조공정을 수행하도록 하여 다양한 종류의 IC생산에 적합한 형태이다.

고속 열처리 공정기(rapid thermal processing system, RTP)는 이러한 유연 생산 시스템의 이상적인 해로서 웨이퍼를 처리하기 위해서 필요한 공정들 즉, 담금질(annealing), 클리닝(cleaning), 산화(oxidation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition), 질화(nitridation), 에피 성장(epitaxial growth)등을 할 수 있는 웨이퍼 가공기이다[1-3]. 이러한 고속 열처리 공정기는 단일 웨이퍼 공정기로서 최근 반도체 공정에서 웨이퍼가 대형화되고 다품종 소량생산이 요구되면서 주목받기 시작했다. 단일 웨이퍼 공정은 대형 노에서 이루어지던 기존의 공정에 비하여 웨이퍼 하나하나가 같은 환경 하에서 가공되므로 웨이퍼간의 균일성을 유지하기가 용이하다. 또한 고속 열처리 공정기는 200 °C/s의 빠른 가열이 가능하므로 열처리 비용을 줄일 수 있고 몇 가지 공정을 한 곳에서 수 분 내에 처리할 수 있으며[4] 불순물의 재분산을 최소화하는 등의 장점을 가지고 있다[5].

이러한 장점에도 불구하고 기존의 고속 열처리 공정기에 대한 인식의 부족과 몇 가지 결점 때문에 아직 웨이퍼 제조공정에 많이 보급되지 못하고 있는 실정이다. 결점중 가장 핵심적인 것은 빠른 가열로 인하여 생기는 웨이퍼내의 온도의 불균일성 문제를 해결하지 못하고 있는 것이다[6]. 웨이퍼내의 온도가 균일하지 못하면 웨이퍼는 이로 인한 열적 압력(thermal stress)을 받게 되고 균열(crack)등이 생기게 된다. 이러한 문제를 해결하여 생산수율을 높이는 것이 중요한 문제가 되었

고 이에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[1,2,6-8]. 고속 열처리 공정기의 전반적인 발전 추세는 다음과 같다.

- 고속 열처리 공정기의 웨이퍼 온도 제어에 기존의 단변수 제어가 쇠퇴하고, 다변수 제어가 사용되고 있다.
- 고속 열처리 공정기에 기존의 한 챔버(chamber)에 한 웨이퍼만 제조했던 것을 탈피하기 위해 한 챔버에서 여러 장의 웨이퍼를 한꺼번에 제조하는 연구가 진행되고 있다.
- 고속 열처리 공정기에 다 챔버(multi-chamber)를 모두 연결하여 한 챔버에서는 한 과정만을 처리하고 각 과정들을 일렬로 처리하는 연구가 되고 있다. 이러한 다 챔버를 연결한 고속 열처리 공정기를 그림 1에 나타내었다. 웨이퍼는 로봇에 의해 운반되어, 각 제조 과정을 거치게 된다.

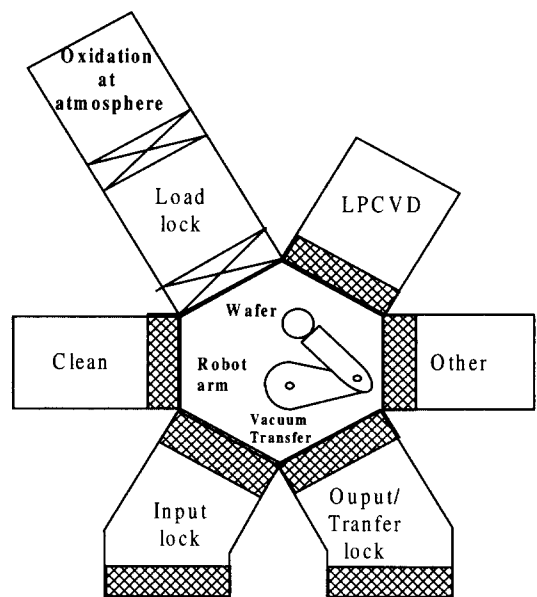


그림 1. 반도체 공정에 사용된 고속 열처리 공정기 다챔버 모듈.

2. 고속 열처리 공정기가 사용되는 반도체 공정

고속 열처리 공정기가 사용되는 반도체 공정 중에서 가장 중요한 부분인 담금질(rapid thermal annealing),

산화(rapid thermal oxidation), 화학적 증기 증착(rapid thermal CVD)공정을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 담금질(annealing)

VLSI(초대형 집적 회로) 소자의 기술동향은 현재 최소선폭이 $1\mu\text{m}$ 이하로 감소되어 가는 추세로 되고 있다. 소자크기를 감소시킴으로서 집적도를 높일 수 있으며, 회로 동작을 향상시킬 수 있기 때문이다. 소자의 크기를 $1\mu\text{m}$ 이하로 감소시키기 위해서는 전자선 lithography나 X선 lithography 등의 고도의 장비를 사용해야 되지만, 소자의 lateral feature size를 줄여 집적도를 높이려면, scaling법칙에 따라 접합의 깊이를 동시에 줄여야 한다. 그러나, 불순물의 농도분포는 초기 이온 주입공정과 다음 공정인 열처리 공정에 의해서 결정된다. 열처리 공정으로는 주입된 불순물을 활성화하고, 이온 주입시 발생한 결함을 없애기 위하여 열처리, 박막 증착과 slicide 형성고정의 열처리와 passivation glass reflow 공정의 열처리 등이 있는데, 이 과정에서 불순물들이 bulk속으로 확산되어 접합깊이가 깊어지게 된다. 따라서 sub-micron 기술의 개발을 위해서 불순물 확산을 최대한 막으면서 이온 주입시의 결함을 최대한 없애는 방법이 필수적이다. 이를 위해서, 열처리 과정을 1000도 이상의 고온에서 수십초 이내의 단시간으로 축소시키는 방법이 고려되어 왔다. 이 고온 단시간 열처리 기술은 위에 언급한 문제를 잘 처리해주는 방법이 되었다.

수십초 이내의 고속 열처리 공정은 기존의 확산로 내에서 웨이퍼 boat의 큰 thermal mass로 인하여 불가능할 뿐 아니라, 웨이퍼 크기가 증가함에 따라, 웨이퍼를 기존 확산로에서 아주 빨리 가열하거나 냉각시킬 경우 가장자리부터 가열되고 냉각되는 효과로 인하여 웨이퍼의 일그러짐이나 slip현상이 나타나게 된다. 고속 열처리 공정은 아크 램프나 텅스텐 램프, resistance heater, 레이저, 전자 beam, 이온 beam 등 다양한 에너지원을 이용하여 연구되어 왔다. 열처리 공정기술은 실리콘의 열반응 시간에 비해 얼마나 짧은 시간동안 열처리를 하느냐에 따라 크게 세 가지로 분류된다. 열처리 시간을 t 라고 할 때, $t < 10^{-6}$ 초인 경우를 adiabatic이라 하고, $10^{-6} < t < 10^{-2}$ 초일 때는 thermal flux, $t > 10^{-2}$ 인 경우를 isothermal이라고 구별한다. Adiabatic이나 thermal flux인 경우에는 웨이퍼의 표면만 강하게 가열됨으로써 여러 가지 장점이 있는 반면, beam의 spot 크기가 작고 (보통 지름 $100\mu\text{m}$ 이하) 웨이퍼 전체를 열처리하는데 걸리는 시간이 상대적으로 매우 길다. 또한 실제 열처리 공정시 beam이 머무는 시간이 수백 분의 일초 정도으로써 이로 인한 열적 충격이 야기되는데, 레이저로 열처리된 실리콘에서 점결합 농도가 매우 높은 주된 이유중의 하나라고 여

겨진다. Isothermal 열처리인 경우, 넓은 면적과 넓은 파장범위를 가지는 텅스텐 할로겐 램프와 같은 에너지원을 이용함으로써 adiabatic이나 thermal flux 열처리에서의 제한점을 극복할 수 있게 된다. Wafer 전체를 균일하게 가열함으로써 열적 충격을 감소시키면서, 수초에서 수십초 정도의 짧은 열처리 시간을 가지므로, 열처리를 하는 동안 불순물이 깊이 확산되는 것을 억제해준다.

2.2 산화(oxidation)

실리콘(silicon)의 산화막 형성은 집적 회로 제작에 가장 중요한 단계이며, 가장 많이 사용되는 공정이다. 진행은 800도에서 1200도까지의 온도 범위내의 대기압 상태에서 O_2 , H_2O 를 사용하여 이루어진다. 실리콘에 열산화막을 만드는데 사용되는 기본적인 장치가 필수적으로 갖추어야 할 것은 heating element, 가스 주입기가 붙어있는 tube, tube내에서 웨이퍼를 지탱하는 웨이퍼 운반기, 그리라고 산화막 형성조건을 위한 다양한 고순도 가스들(N_2 , O_2 , H_2 , HCl) 등이다.

2.3 화학적 증기 증착(CVD)

CVD는 집적 회로 공정에서 가장 중요한 공정 중의 하나로 가스상태의 반응물질로부터 원하는 물성을 가진 고체박막을 생성시키는 것이다. 이와 같은 CVD는 촉매 반응, 석탄 연소 등과 같은 산업적으로 중요한 반응과 같이 기체와 고체가 반응에 관계하는 heterogeneous reaction인데 pyrolysis, reduction, oxidation 등의 여러 가지 형태의 화학반응이 CVD에 포함되게 된다. CVD반응에는 다른 반응시스템과는 다른 특이한 점들이 있는데 그 중의 하나는 조건에 따라서 생성되는 박막의 형상이 판이하게 달라질 수 있다는 사실이다. 즉 온도가 낮으면 amorphous 상태의 film이 증착되지만 온도가 올라가면 결정화 경향이 증가하여 epitaxial growth가 가능해질 수 있다. CVD에 의해 생성되는 film은 일

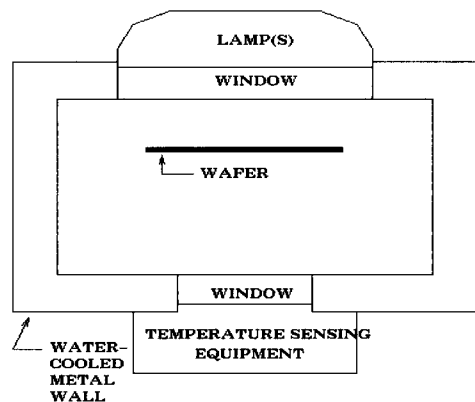


그림 2. 고속 열처리 공정기의 일반적인 구조.

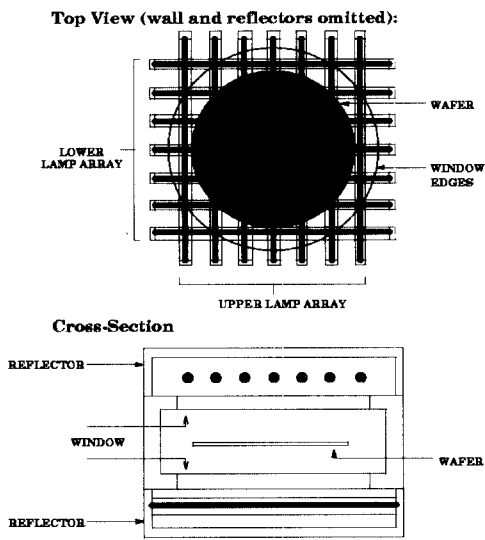


그림 3. 선형 텅스텐-할로젠 램프를 양쪽 면에 배열한 구조

반적으로 엄격한 범위내의 물성치를 가지는 것이 요구되므로 위와 같은 현상은 매우 중요하다. 일반적으로는 반응물질의 농도가 증가하면 반응속도가 증가한다. 그러므로 CVD의 경우 증착속도가 반응가스의 농도 증가와 더불어 증가하는 것이 일반적이다. 그러나 경우에 따라서는 반응가스의 농도가 어느 이상으로 증가하면 오히려 증착속도가 감소하는 현상이 나타나는 경우가 있다.

3. 고속 열처리 공정기의 기본 구조

일반적으로 반도체 공정에서 사용되어지고 있는 고속 열처리 공정기는 그림 2와 같이 구성되어 있다. 각각의 구성요소는 다음과 같다.

3.1 광원(lamp)의 구조

웨이퍼의 위쪽 면에서는 텅스텐-할로젠 램프군에 의해 발산된 빛을 흡수하게 되어 있다. 수십 KW의 전력을 소모하는 강력한 텅스텐-할로젠 램프들로 구성되어 있다. 필요한 전력량은 웨이퍼의 크기나 고속 열처리 공정기실의 구조, 그리고 제조 공정에 따라서 결정된다.

3.2 챔버(chamber)의 구조

램프와 웨이퍼 사이가 석영으로 만들어진 투명한 창(window)으로 분리되어 있다. 웨이퍼의 지지대는 웨이퍼의 온도 균일도 유지를 위하여 회전 운동을 하도록 되어 있다. 이 고속 열처리 공정기내에는 대기압이나 다른 가스등으로 채워져 외부와 분리되어 웨이퍼만 내장하게 되어 있다. 이 고속 열처리 공정기 챔버의 재질은 주로 석영(quartz)이나 실리콘 카바이드(silicon carbide), 스테인레스 스틸(stainless steel) 또는 알루미늄(aluminium)등으로 되어 있다. 아래 창 역시, 온도의 감지를 위해 광원이 통과할 수 있도록 석영으로 구성된 투명한 창(quartz window)을 가지고 있다.

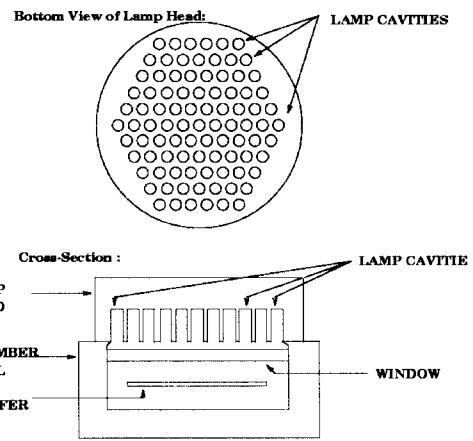


그림 4. 둥근 형의 텅스텐-할로젠 램프를 한쪽 면에 여러 개 배열한 구조

3.3 온도 측정 장치

정밀한 온도제어와 온도 균일성에 대한 평가를 위해서 웨이퍼의 여러 부분에서의 온도 측정이 필요하다. 웨이퍼의 온도 측정은 측정장치가 웨이퍼에 접촉하면 접촉된 부분은 측정장치에 의해 오염되어 심각한 수율 저하 현상을 일으키며 따라서 가장 일반적인 온도 측정장치인 thermocoupler를 사용할 수 없다. 많이 사용되고 있는 방법이 pyrometer이며 웨이퍼에 접촉하지 않고 웨이퍼에서 방사하는 웨이퍼의 방사파장을 측정하여 온도를 알 수 있는 장치이다. 웨이퍼를 받치고 회전하는 부분은 웨이퍼의 오염 문제 때문에 석영으로 만들어 웨이퍼의 접촉을 최소화할 수 있도록 설계한다.

4. 연구 동향 및 전망

현재 국내외적으로 고속 열처리 공정기에서 가장 많은 연구를 하고 있는 부분은 크게 광원의 배치 구조의 최적화 부분과 제어기 설계 부분이다. 그밖에 웨이퍼 온도 측정 장치에 대한 연구도 이루어지고 있다. 각각에 대한 국내외적 연구 동향을 알아보자.

4.1 광원의 배치 구조의 최적화

웨이퍼의 고른 온도 분포를 위해서 가장 중요한 부분은 빛을 발산하는 광원의 배치 구조이며 이것의 변경을 통해 고속 열처리 공정기가 발전되어 오고 있다.

그림 3은 양쪽 면에서 일자형 램프에 의해 가열되는 방식이다[2]. 웨이퍼의 고른 열분포를 위해 위쪽 램프는 아래쪽 램프와 직각을 이루어 구성한다. 그림 4는 웨이퍼의 위쪽에서만 가열하는 방식이다. 위쪽에 여러 개의 램프 캐비티(lamp cavity)내에 둥근 램프를 구성하여 온도균일도를 높이려고 구성되었다. 옆면에서 보면 램프군을 싸고 있는 램프 헤드(lamp head)부분이 있고 램프와 웨이퍼는 창에 의해 분리되어 있으며 웨이퍼를 싸고 있는 챔버의 벽(wall)이 있다. 그림 3,

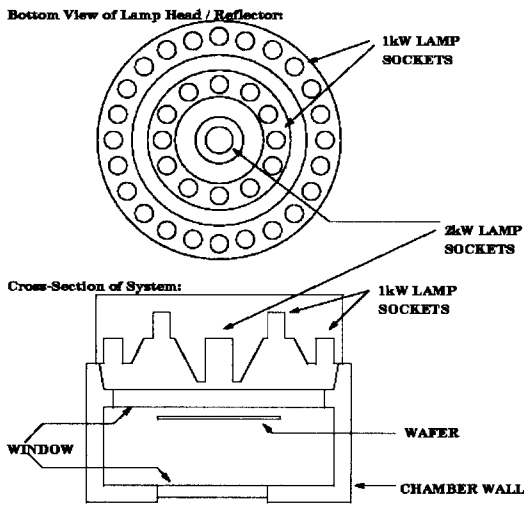


그림 5. 한쪽 면에 링구조로 램프를 모아 배열한 구조

그림 4 모두 다 설계는 웨이퍼의 온도 균일도를 위해 여러 개의 램프를 고루 분포하였다. 하지만 이러한 모델 등은 램프마다 똑같은 전력에 의해 똑같이 방사되어 웨이퍼의 위치에 따라 고르지 못한 온도 분포를 유지하게 한다. 왜냐하면 웨이퍼는 가스나 대기 중에 노출되어 있으며 대기의 온도는 가열되지 않고 웨이퍼 자체만 가열되기 때문에 웨이퍼의 가장자리 모서리 부분은 대기나 가스에 의한 온도 하강 효과를 일으켜 중심부와는 다른 온도 분포를 유지하게 된다. 이러한 단점 때문에 고속 열처리 공정기는 현재 각각의 램프 등의 전력을 따로따로 주어 광원의 양을 서로 다르게 함으로써 온도 균일도를 높이려는 연구가 계속되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 Stanford 대학에서는 3중의 링으로 램프를 묶어서 각각을 따로따로 제어할 수 있는 모델을 제안하였다(그림 5)[1,9]. 웨이퍼의 중심부와 가장자리 그리고 그 사이의 3곳에서 온도를 측정하며 이 측정된 온도의 편차에 의해 각각의 램프 광원의 양이 다르게 제어되며 이 편차에 의해 균일도가 평가된다. Norman은 이 모델에 대하여 선형계획법(Linear Programming)을 이용하여 온도 균일도 한계를 분석하였다[1]. 또 Cho 등은 4인치 웨이퍼에 대해 웨이퍼의 열손실량(Heat Loss Profile, HLP)과 열류량(Heat Flux Profile, HFP)의 차를 최소화시킴으로써, 최적의 열을 보상하는 고속 열처리 공정기의 램프의 위치를 제안하였다[9]. 또 최성규 등은 8인치 웨이퍼에 대해 램프 위치뿐만 아니라 챔버내에서 웨이퍼의 높이를 최적화시키기 위해 고속 열처리 공정기내에 웨이퍼의 높이와 램프 위치의 가변에 따른, 온도 균일도 문제를 선형계획법문제로 설정하여 최적위치를 구하였다[10]. 여기서는 열류보상이 아닌, Norman의 분석에 기반하여 온도 자체에 대한 문제로 설정하여 최적 위치를 구하는 방법을 제안하였다.

4.2 제어기 설계

고속 열처리 공정기의 웨이퍼 온도 제어에서 다음의 두 가지 조건이 가장 중요하다. 첫째, 웨이퍼의 온도가 제조 공정에 정해진 온도 곡선을 정확히 추적해야 한다. 둘째, 웨이퍼의 어떤 위치든 균일한 온도 분포를 가지고 최소의 온도차를 가져야 한다. 첫째 조건은 한 장의 웨이퍼에 대한 과정을 되풀이하더라도 모두 다 같은 특성을 갖는 웨이퍼를 만들어 내어야 하기 때문이다. 두 번째 조건은 웨이퍼내의 각 셀(cell)에 관한 문제이다. 이 셀들이 모두 같은 특성을 가지기 위해서는 웨이퍼 내의 온도가 최소의 온도차로 고루 분포되어야 한다는 것이다.

시스템의 제어법에는 제어 대상의 온도 측정 장치나 광원 전력량의 독립성 등을 따져서 단변수 제어와 다변수 제어로 나누어 볼 수 있다. 단변수 제어는 단지 웨이퍼의 한 점만의 온도를 감지하고 이 온도를 웨이퍼의 전체의 온도로 가정하며 램프의 광원을 조절하여 이 온도만을 제어한다. 초창기의 PID제어 등이 이 제어에 속한다. 이 제어기의 장점은 제어기의 구조가 간단하여 저가의 제어기를 구성할 수 있다는 것이다. 하지만 이 경우에 램프 광원이 웨이퍼 전체를 일정하게 비추지 못하고 또 주위 환경에 따른 웨이퍼 가장자리 온도 감소 효과 등을 무시하였기 때문에 웨이퍼 전체의 균일한 온도 제어를 할 수 없다는 단점이 있다. 다변수 제어는 여러 부분의 웨이퍼의 온도를 감지하여 여러 부분의 온도를 각각 따로따로 제어를 하는 것이다. 물론 여기에 해당하는 광원의 양을 서로 따로 조절하여 제어를 하는 것이다. 다변수 제어의 장점은 웨이퍼의 여러 군데의 온도를 감지하고 각각 따로 제어를 함으로써 웨이퍼의 온도분포를 고르게 할 수 있다는 점이며, 단점은 제어기가 복잡해짐으로써 시스템의 비용이 고가가 된다는 것이다.

초창기의 고속 열처리 공정기는 단일 램프군과 단일 센서를 부착하여 PID제어를 하는 것이 고작이었다. 그 후 다변수 강인제어기법의 발달로 램프군들을 분리하기 시작하였고 웨이퍼의 온도 감지도 여러 군데에서 하기 시작하였다. 대표적인 연구팀이 Integrated System사의 A. Emami-Naeini, Curtis F. Elia 등의 팀과 스탠포드 대학의 Thomas Kailath, Gene Franklin, Paul J. Gyugyi, Young Man Cho 등의 팀[1,4,7,9,11]이다. 우선 Integrated System사에서는 유한 구간 추적기법과 LQG/LTR 기법을 적용하여 초당 50 °C의 증가비율로 750 °C에서 1050 °C까지의 온도를 제어(약 4초 소요)하는데 성공하였다. 스탠포드 대학에서는 고속 열처리 공정기의 램프구조를 링형으로 변경하여 웨이퍼온도 균일도 향상을 시키려고 하였고 여기에 다변수 제어기들을 설계하여 실험을 하여 최고 온도에서 웨이퍼 온도의 균일도 최고 오차 13.5 °C를 얻었다.

그러나 이러한 연구들은 수학적 모델식에 의존하여 설계되기 때문에 실제 적용시 모델링 오차에 의해 성능이 보장되지 않을 수가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에 고속 열처리 공정기의 수학적 모델을 모른다는 가정하에 입출력 데이터를 사용하여 제어기를 설계하는 방법이 제시되고 있다. Hwang 등은 진화 연산 알고리즘과 퍼지 논리를 이용하여 제어기를 설계하는 방법을 제시하였고[12] Choi 등은 신경망기반의 반복학습제어기법을 사용하는 방법을 제안하였다[13].

4.3 고속 열처리 공정기의 미래방향

고속 열처리 공정기는 1960년대 이후로 혁명적으로 발전되어 왔다. 그렇지만 아직도 $0.5\mu m$ 선폭의 IC의 제조에 미치지 못하고 있다. 다음은 고속 열처리 공정기의 미래형을 제시하고 있으며 이러한 사항들로 발전한다면 고속 열처리 공정기로 제조할 수 있는 1-Gbit의 시대가 멀지 않았다고 본다.

구성요소별로 전망해보면 다음과 같다.

- 램프(lamps) : 텅스텐-할로겐 램프는 고속열처리 공정기에서 절대 자리를 차지할 것이다. 그리고 다변수 제어를 위한 램프 구조들의 최적화가 진행될 것이다.
- 챔버(chambers) : 챔버에서의 핵심은 이 램프의 광원을 반사하는 반사경에 있으며 이 반사경의 높은 반사율과 반사광원의 최적화가 중요하다. 그리고 다변수 제어를 위해 여러 곳에서 온도를 감지할 수 있는 구조를 지닐 것이다. 그리고 한 챔버에서의 여러 과정의 동시 작업보다는 작업 효율을 위해 여러 챔버를 연결하여 다 챔버-다 제조 과정으로 가야 할 것이다.
- 센서(sensors) : 현재 온도 감지를 위해 웨이퍼의 끝점에 thermocoupler를 접촉하는 방식과 고온계(pyrometer)를 사용하는 방식에서 벗어나 끝점 처리 방법에 많은 변화가 있을 것이다. 대표적인 예로 현재 진행되고 있는 초음파를 사용한 온도의 감지 법이 많은 발전을 할 것이다. 또한 재료 등의 발전으로 센서 그 자체의 정밀도가 향상될 것이다.
- 처리과정(process) : 여러 제조과정의 덩어리들(batch process)의 처리과정이 매우 빨라질 것이다. 하지만 기술적인 그리고 비용의 이유 때문에 고속 열처리 공정기가 필연적으로 필요로 하는 부분에 많이 사용될 것이다. 그리고 진공의 처리 과정보다는 대기압에서 제조할 수 있는 과정이 더 많은 발전을 할 것이다.

5. 맺음말

본 고에서는 반도체 생산 장비의 하나인 고속 열처리 공정기를 소개하고, 현재의 기술 동향과 그에 따른 기술 발전의 추이를 논의하였다. 고속 열처리 공정기는 단일 웨이퍼 가공기로서 각각의 웨이퍼가 동일한

환경하에서 가공될 수 있다는 장점 때문에 앞으로 웨이퍼가 대형화되고 다품종 소량 생산이 요구되면서 더욱더 주목받게 되고 또한 반도체 생산에 있어서 핵심이 될 장비이다. 따라서 현재 고속 열처리 공정기를 실제 현장에서 널리 사용하지 못하고 있는 큰 이유중의 하나인 웨이퍼의 온도 균일성 문제를 해결하는 것이 현 시점에서 매우 중요하다. 그리고 여러 챔버를 연결하여 다양한 작업을 일괄적으로 처리할 수 있는 다 챔버 과정으로의 발전도 필요하다고 할 수 있다.

반도체 생산장비의 대다수를 수입에 의존하고 있는 국내 현실을 고려할 때 반도체 생산 기술의 국산화는 매우 중요하다. 따라서 차세대 반도체 생산장비로 주목받고 있는 고속 열처리 공정기의 생산 기술을 국산화하는 것은 그 의미가 크다고 할 수 있다. 이를 위하여 산업계와 학계의 지속적인 관심과 좋은 연구결과를 기대한다.

참고문헌

- [1] S. A. Norman, "Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing systems," submitted to IEEE Trans. on Electron Devices, June, 1991.
- [2] R. S. Gyurcsik, T. J. Riley and F. Y. Sorrell, "A model for rapid thermal processing: achieving uniformity through lamp control," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 4, no. 1, pp. 9-13, Feb., 1991.
- [3] S. A. Campbell, K. -H. Ahn, K. L. Knutson, B. Y. H. Liu and J. D. Leighton, "Steady-state thermal uniformity and gas flow pattern in a rapid thermal processing chamber," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 4, no. 1, pp. 14-20, Feb., 1991.
- [4] K. C. Saraswat, P. P. Apte, L. Booth, Y. Chen, P. C. P. Dankoski, F. L. Degertekin, G. F. Franklin, B. T. Khuri-Yakub, M. M. Moslehi, C. S. Schaper, P. J. Gyugui, Y. J. Lee, J. Pei and S. C. Wood, "Rapid thermal multiprocessing for a programmable factory for adaptable manufacturing of IC's," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 7, no. 2, pp. 159-175, May, 1994.
- [5] H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 1, no. 3, pp. 105-114, Aug., 1988.
- [6] P. P. Apte and K. C. Saraswat, "Rapid thermal processing uniformity using multivariable control of a circularly symmetric 3 zone lamp," IEEE Trans. on

- Semiconductor Manufacturing, vol. 5, no. 3, pp. 180-188, Aug., 1992.
- [7] P. J. Gyugyi, Y. M. Cho, G. Franklin and T. Kailath, "Convex optimization of wafer temperature trajectories for rapid thermal processing," submitted to 1993 CCA, Jan., 1993.
- [8] R. H. Perkins, T. J. Riley and R. S. Gyuresik, "Thermal uniformity and stress minimization during rapid thermal processes," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 8, no. 3, pp. 272-279, Aug., 1995.
- [9] Y. M. Cho, A. Paulraj, T. Kailath and G. Xu, "A contribution to optimal lamp design in rapid thermal processing," IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing, vol. 7, no. 1, Feb., 1994.
- [10] 최성규, 최진영, 권욱현, "8인치 웨이퍼의 온도균일도향상을 위한 고속열처리공정기의 최적 파라미터 설계에 관한 연구," 대한전자공학회 논문지, 제 34권, 제 10호, pp. 68-76, 10. 1997.
- [11] P. J. Gyugui, Y. M. Cho, G. Franklin, and T. Kailath, "Control of rapid thermal processing: A system theoretic approach," IFAC 12th Triennial World Congress, 1993.
- [12] M. W. Hwang, J. Y. Choi, "Hybrid Feedforward and Feedback Controller for RTP system Using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic," IEEE ICIPS '97, pp. 93-97, Beijing, Oct. 1997.
- [13] J. Y. Choi and H. M. Do, " Temperature Control in Rapid Thermal Processing System Using Neural-based Iterative Learning Control," submitted to SCI '98/ISAS '98,

저자소개

도 현 민

1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(학사)

1997년-현재, 서울대학교 전기공학부 석사 과정.

<관심분야>

◦ 반복학습제어, RTP 온도제어.

최진영

1982년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(학사)

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(석사)

1993년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학박사)

1984년-1994년 한국전자통신연구소 선임연구원

1994년-1996년 서울대학교 제어계측공학과 전임강사

1996년-현재, 서울대학교 전기공학부 조교수.

<관심분야>

◦ Neural Networks, Adaptive and Learning System, Adaptive Control of Autopilot, Detection and Recognition System.