

선형가열법에 따른 TMR 소자용 직경 10 cm 기판의 열적 특성에 관한 연구

송오성* · 이영민

서울시립대학교 공과대학 재료공학과, 서울시 동대문구 전농동 90

주영철

순천향대학교 기계공학과, 충남 아산시 신창면 읍내리 646

(2001년 3월 20일 받음, 2001년 4월 19일 최종수정본 받음)

선형가열법을 이용하여 4" 기판에 제조된 TMR 소자를 대량으로 열처리하는 경우를 상정하여 기판의 열특성을 전산 모사를 이용하여 예측하여 보았다. 1개의 할로겐 램프 열원을 집중하여 기판의 한쪽 끝에서 다른 한쪽 끝으로 특정 속도로 주사하여 열처리하는 상황을 FDM(finite differential method)으로 예측하였다. 자성박막의 열처리에 흔히 채용되는 최고 표면온도 350 °C를 고려한 경우를 상정한 결과 열원의 주사속도는 0.05 mm/sec에서 1 mm/sec으로 20배가 빨라져도 기판의 온도분포에는 40 °C 정도의 미미한 영향을 미쳤다. 따라서 선형가열법을 이용하여 TMR 소자를 열처리 하여도 주사속도를 빨리하여 기판 1장당 1분 40초의 단시간내에 목적하는 급속가열 열처리의 수행이 가능함을 예측할 수 있었다.

I. 서 론

1995년 MIT의 Moodera[1]와 일본 동북대학의 Miyazaki [2] 그룹이 상온에서 약 20 %의 자기저항비를 갖는 TMR device를 만들어 낸 이후 비휘발성 메모리 소자인 MRAM 이나 고밀도 자기기록용 HDD의 head에의 응용 등 그 중요성이 확대되고 있다.

TMR 소자에서 자기저항비를 향상시키기 위해 여러 가지 연구가 수행되었는데 그 중 M. Sato 등에 의하면 열처리에 의해 약 10 % 정도 자기저항비가 향상되는 연구 결과가 보고되고 있다[3]. 그러나 그 열처리 방법은 아직까지 일반적인 로내 가열법에 한정되고 있다.

최근 반도체 생산에서는 로내 가열법보다 수율이 높고 처리 시간이 짧은 RTA(rapid thermal annealing) 방법이 폭넓게 사용되고 있는데 TMR 소자는 그 생산공정이 기존의 반도체 생산공정과 비슷하며 특히 MRAM에 응용될 경우 DRAM 등의 생산공정을 크게 바꾸지 않고 그대로 적용시키기 위한 노력이 필요할 것으로 생각되므로, RTA에 의한 열처리의 영향을 연구할 필요성이 있다. 최근에 실험실 단계에서 연구되는 TMR 소자의 자기특성은 50 % 까지에는 이르는 높은 자기저항비와 균일한 재현성을 보이고 있으나 아직 연구 초기단계이므로 대량생산을 위한 연구는 미흡하다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 선형가열법(Fast Linear Annealing method)을 개발하여 기존의 로내가열법보다 양산성을 고

려한 경우에 고품질의 TMR device를 얻을 수 있는 공정의 기초적 연구를 수행하였다. 선형가열법은 RTA의 변형된 방법으로 적은 에너지원을 이용하여 빠르게 많은 양의 열처리를 해낼 수 있는 장점이 있기 때문에 양산이나 대량생산에 적합하다고 할 수 있으며 이미 반도체 분야에서의 적용 사례도 보고되고 있다[4].

본 연구는 TMR 소자의 열처리를 위한 선형가열공정의 개발을 위하여 선형가열법으로 4" 직경의 실리콘 기판 위에 TMR 소자를 열처리할 때의 열적 특성에 대해서 연구하였다. 이를 위하여 기판 전면에 소자가 형성된 웨이퍼에 가해지는 열을 열전쌍을 이용하여 측정하였으며, 유한차분법을 이용한 전산모사로 열적 특성을 해석하였다.

II. 실험방법

2.1. 선형가열기를 이용한 급속열처리공정

본 연구에 사용된 선형가열기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 선형가열기는 크게 할로겐 램프와 반 타원형 반사경을 포함한 이동부와 접합하고자 하는 실리콘 웨이퍼를 지지해 주는 고정부의 두 부분으로 나누어져 있다. 길이 200 mm의 선형 할로겐 램프는 장축 50 mm, 단축 43.3 mm의 반 타원형 반사경의 한 초점에 위치해 있다. 반사경은 할로겐 램프에서 일부 에너지를 흡수하기 때문에 냉각수로 냉각해 주도록 냉각장치가 되어있다. 할로겐 램프와 반사경은 모두 상부에 장착된 레일을 따라 램프의

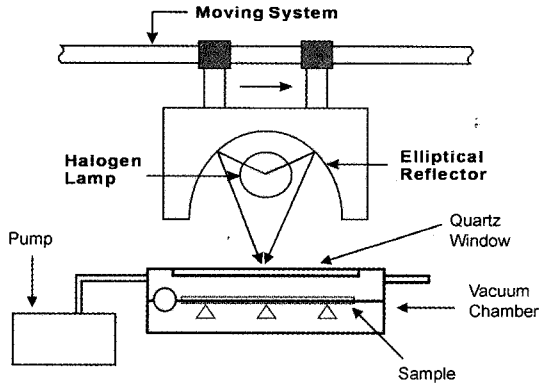


Fig. 1. Schematic diagram of the Fast Linear Annealing System.

축과 수직인 방향으로 천천히 일정한 속도로 움직인다.

반 타원형 반사경의 다른 한 초점에 접합하고자 하는 실리콘 웨이퍼가 놓여지고 이 웨이퍼는 세 개의 원뿔형 석영 지지대가 지지하고 있다. 지지대의 형상을 원뿔형으로 만든 이유는 웨이퍼와 지지대가 점접촉만을 하여 실리콘 웨이퍼에서 지지대로 전달되는 열전도를 최소한으로 줄이고자 함이었다.

진공챔버는 두께 5 mm, 지름 330 mm의 석영판 위에 놓여져 있으며 이 석영판의 하부에는 가열효과를 증대시키기 위하여 SUS 304로 만든 반사판을 설치하였으며 반사판은 과열을 방지하기 위해 물탱크 방식으로 수냉을 시켰다.

한편 목적하고자 하는 기판은 투명한 석영창을 가진 진공챔버에 위치하여 우선 10 mTorr의 진공상태로 만든 후 다시 N₂ 분위기로 만들어 열처리를 진행하였다. 웨이퍼의 한쪽 끝에 상부의 반사경에서 반사된 빛이 집속되게 하여 선형의 고온대를 형성시켰다. 고온대의 온도가 정상상태에 도달한 후 열원을 일정한 속도로 웨이퍼를 따라 이동시켜 기판 전 영역을 지나 기판의 끝까지 도달할 수 있도록 하였다. 기판의 끝에 열원이 도달하면 전원을 차단하고, 가열된 기판은 대기 중에서 냉각시켰다.

2.2. 모델링 및 해석방법

2.2.1. 모델링

할로겐 램프의 길이 방향으로 실리콘 웨이퍼의 온도구배를 무시할 수 있으므로 두께 0.5 mm, 길이 100 mm, 폭 무한대의 직교좌표계 2차원 물체로 실리콘 웨이퍼를 간략화 할 수 있다. 또한 웨이퍼는 상하 표면에 비해서 두께가 아주 얇으므로 웨이퍼 끝의 수직면을 통하여 대기

로 방출되는 열은 무시할 만큼 작다고 가정할 수 있다. 실리콘 웨이퍼 윗면과 아래면에서는 각각 복사열전달과 대류열전달에 의한 열손실이 일어난다고 가정할 수 있다.

할로겐 램프에서 조사되는 복사에너지는 직접 실리콘 웨이퍼의 표면에 도달하거나 반 타원형 반사경에 반사되어 도달한다. 타원형 반사경의 초점에서 복사에너지의 밀도가 가장 크고 그 주위로 멀어질수록 밀도가 낮아진다. 실리콘 웨이퍼에 조사되는 할로겐 램프의 직 · 간접적인 복사에너지가 cosine 함수의 형태를 띠었다고 가정하였다. 즉 복사에너지의 분포 $q_r(x)$ 는

$$q_r(x) = \frac{1}{2} q_{r,max} \times \left(\cos \frac{\pi(x-x_0)}{B} + 1 \right) \quad \text{for } x_0 - \frac{B}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{B}{2}$$

$$= 0 \quad \text{for } x_0 - \frac{B}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{B}{2} \quad (1)$$

의 분포를 갖는다고 가정하였다.

여기서, $q_{r,max}$: 타원형 반사경 초점에서의 복사에너지

x : 실리콘 웨이퍼 한쪽 끝에서의 거리

x_0 : 타원형 반사경 초점

B : 복사에너지가 조사되는 폭

이다.

실리콘 웨이퍼 표면에서 일어나는 자연대류에 의한 열손실을 계산하기 위해서는 수평 평판에서의 열전달계수를 알아야 한다. 수평 평판에서 가열면이 위로 향할 때의 자연대류 열전달은

$$\text{층류} : Nu = 0.54(GrL \cdot Pr)^{1/4}$$

$$10^5 < GrL \cdot Pr < 2 \times 10^7 \quad (2)$$

$$\text{난류} : Nu = 0.14(GrL \cdot Pr)^{1/3}$$

$$2 \times 10^7 < GrL \cdot Pr < 3 \times 10^{10} \quad (3)$$

으로 주어진다[5, 6]. 여기서 Nu, GrL, Pr은 각각 Nusselt number, Grashof number, Prandtl number이다.

본 연구에 이용된 선형가열기는 7.9×10^5 의 GrL · Pr 값을 갖고 있어 웨이퍼 위의 자연대류가 층류이다. 이를 식 (2)에 대입하여 열전달계수 h

$$h = kr \cdot Nu/L = 8.713 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4)$$

를 얻었다. 여기서 k는 열전도율이다.

수평 평판에서 가열면이 아래로 향할 때의 자연대류 열전달은

$$\text{층류} : Nu = 0.27(GrL \cdot Pr)^{1/4}$$

$$10^5 < GrL \cdot Pr < 2 \times 10^7 \quad (5)$$

으로 상면과 같이 계산하면 열전달계수 $h = 4.357 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 얻는다.

실리콘 웨이퍼의 열전도율, 비열 등의 상태량은 온도에 따라 그 값이 변한다. 하지만 본 연구에서 실리콘 웨이퍼는 50°C 내외의 작은 온도범위에서 온도가 변하였으므로 여러 상태량들은 웨이퍼 평균온도에서의 값을 읽어 일정하다고 하였다.

2.2.2. 지배방정식과 경계조건

앞 절의 모델링에 의해 실리콘 웨이퍼의 온도분포는 2차원 열전도 방정식이 된다.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (6)$$

여기서 α 는 열확산도이다. 양쪽 옆면에서의 경계조건은

$$\frac{dT}{dx} = 0 \quad \text{at } x = 0 \text{ and } L \quad (7)$$

웨이퍼 윗면과 아래면에서의 경계조건은 각각

$$q_{rad, input} = q_{conv} + q_{rad, out} + q_{cond} \quad (8)$$

$$0 = q_{conv} + q_{rad, out} + q_{cond} \quad (9)$$

이다. 여기서 $q_{rad, input}$ 은 할로겐 램프에서 전달되는 복사에너지이고, $q_{rad, out}$ 와 q_{conv} 은 웨이퍼에서 방출되는 복사에너지와 자연대류열, q_{cond} 은 실리콘 웨이퍼 내부로 전달되는 열이다. 이는 다시

$$q_r(x) = h(T_0 - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_0^4 - T_\infty^4) - k \frac{dT}{dy} \quad (10)$$

로 표현된다. 여기서 $q_r(x)$ 과 h 는 식 (1)과 (4)에서 구한 결과를 이용하며, ϵ 과 σ 는 각각 emissivity와 Stefan-Boltzman constant, k 는 실리콘 웨이퍼의 열전도도이다.

2.2.3 유한차분법

수치해석방법에는 여러 가지가 있으나 본 문제는 기하학적인 형상이 간단하므로 유한차분법(finite difference method)을 선정하였다. 유한차분법에도 여러 가지 방법이 있으나 SOR (successive overrelaxation) method와 ADI (alternating direction implicit) method가 가장 많이 사용된다. 전자는 explicit method의 일종으로 프로그램이 간단하다는 장점이 있으나, overrelaxation parameter에 따라 수렴속도가 틀려지며 적절치 않은 overrelaxation parameter를 선정하였을 경우에는 해가 발산할 수도 있다는 단점이 있다. 이에 반해 후자는 implicit method의 일

종으로 한 time step을 둘로 나누어 수평방향 계산을 먼저 하고 수직방향 계산을 후에 하는 방법이다. 이 방법은 조건에 관계없이 항상 해가 수렴한다는 장점이 있지만, 계산식이 복잡하여 프로그램을 작성하기 힘들다는 단점이 있다[7-9]. 본 연구에서는 수렴성 때문에 ADI method를 선정하였다.

지배방정식 (5)에 대해 한 time step을 둘로 나누고 먼저 수평방향에 대하여

$$\frac{T_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - T_{ij}^n}{\alpha\Delta t/2} = \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} \quad (11)$$

를 적용한 후 수직방향에 대해서

$$\frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^{n+\frac{1}{2}}}{\alpha\Delta t/2} = \frac{T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y^2} \quad (12)$$

를 적용한다. 경계조건에 대해서도 같은 방법을 적용하여 유한차분식을 만든다.

수치해석 프로그램의 정밀도를 확인하기 위해서 한쪽면은 단열되어 있고 다른 면은 대류열전달을 하는 2차원 무한평판의 시간에 따른 온도분포를 해석해로 구하였다. ADI method를 이용한 수치해와 0.1% 미만의 작은 오차를 보였다.

III. 결과 및 토의

3.1. 할로겐 램프의 복사에너지 분포

할로겐 램프와 반 타원형 반사경에서 조사되는 복사에너지 분포를 직접 측정하는 것은 기술적 문제가 있어서 실리콘 웨이퍼의 온도분포를 측정하여 복사에너지를 예측하였다. 실리콘 웨이퍼에 할로겐 램프의 이동방향으로 5~10 mm 간격으로 열전쌍을 위치시켜 온도분포를 측정하였다. 이때 복사에너지에 의한 간섭을 피하기 위해 열전쌍이 위치한 면을 아래로 향하게 하였다. Fig. 2는 할로겐 램프가 웨이퍼의 중앙에 위치하고 있을 때 입력 전압을 80 V에서 150 V까지 변화시키면서 웨이퍼의 온도분포를 측정 한 결과이다. x좌표는 웨이퍼 좌측에서의 거리이고, y좌표는 열전쌍이 읽은 온도이다. 입력 전압이 높아지면 열전쌍에서 측정되는 온도도 높아진다. 온도분포는 타원형 반사경의 초점에서 최고의 값을 나타내며 초점에서의 거리가

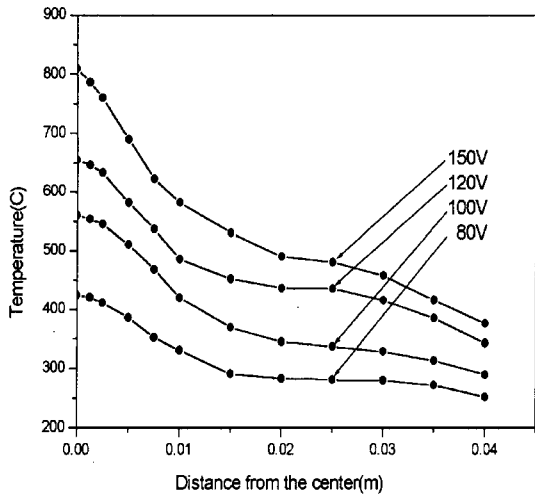


Fig. 2. The measured distribution of halogen lamp radiation heat.

떨어질수록 급격히 감소한다. 또다른 측정결과 초점에서의 거리가 30 mm보다 멀어지면 온도가 완만하게 감소한다는 것을 알 수 있었다.

할로겐 램프 복사에너지의 최고치와 조사폭을 변경시키며 유한차분법 프로그램을 이용하여 웨이퍼의 온도분포를 구하여 시행착오법으로 실험결과와 맞는 복사에너지 입력 분포를 구하였다. 복사에너지의 조사폭이 12.5 mm이고 최고치가 각각 80 kW/m²과 110 kW/m²일 때 80 V와 120 V에서 측정한 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 복사에너지가 가장 강한 반사경 초점에서 웨이퍼의 온도가 가장 높고 주변으로 갈수록 온도가 감소하는데 감소하는 율은 갈수록 줄어들어 초점에서 먼곳에서는 거의 평탄한 온도 분포를 나타낸다.

구해진 복사에너지에 근거하여 Fig. 3과 같이 표면최고

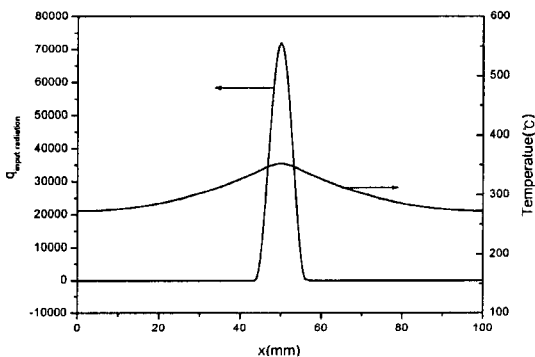


Fig. 3. Halogen lamp radiation heat distribution and steady state temperature distribution of the silicon wafer.

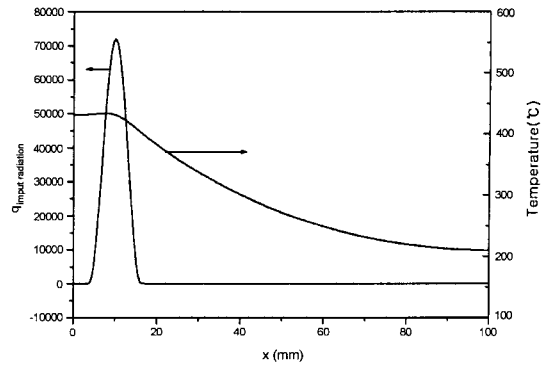


Fig. 4. Temperature distribution of the silicon wafer when the Halogen lamp is located at x=10 mm.

온도 350 °C가 되는 조건을 상정하여 온도분포를 상정하였다. 높은 산 모양의 커브는 할로겐 램프의 복사에너지 분포로 12.5 mm의 조사폭 내에서만 코사인 함수 형태의 에너지 분포를 갖는다. 완만한 산 모양의 커브는 이때의 온도분포로 할로겐 램프의 초점에서 가장 높은 온도인 350 °C를 나타내며 초점에서 멀어질수록 온도가 급격하게 감소하다가 초점에서의 거리가 약 30 mm 보다 멀어지면 완만하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 2의 측정결과와 잘 일치한다.

Fig. 4는 반 타원형 반사경의 초점이 실리콘 웨이퍼의 왼쪽 끝에서 10 mm 떨어진 곳에 위치했을 때의 온도분포이다. 초점의 오른쪽 부분에서는 거리가 멀어질수록 온도가 급격하게 감소하다가 충분히 먼 곳에서는 거의 일정하게 된다. 하지만 초점의 왼쪽에서는 할로겐 램프에서 받은 열이 밖으로 빠져 나가지 못하고 쌓이게 되어 온도가 초점의 온도와 거의 비슷한 분포를 보이고 있다.

3.1.1. 천이상태의 온도분포

Fig. 5의 굵은 실선은 할로겐 램프를 웨이퍼의 왼쪽 끝에서 10 mm 위치에 충분히 오래 머물게 하여 웨이퍼 전체의 온도가 정상상태에 도달하게 한 후, 할로겐 램프를 오른쪽으로 0.05 mm/s의 속도로 이동시켰을 때의 온도분포를 때 40초마다 나타낸 그림이다. 160초 후에 할로겐 램프가 이동하면서 나타낸 온도분포와 그 위치에 고정되어 있을 때 나타나는 정상상태에서의 온도분포가 크게 차이가 나지 않는다. 이는 실리콘 웨이퍼의 열전도율에 비해서 할로겐 램프의 이동속도가 너무 느려 각 순간마다 준평형(quasi-equilibrium)을 이루면서 이동하였기 때문이다. 따라서 0.05 mm/s 이하의 할로겐 램프의 이동속도에서는

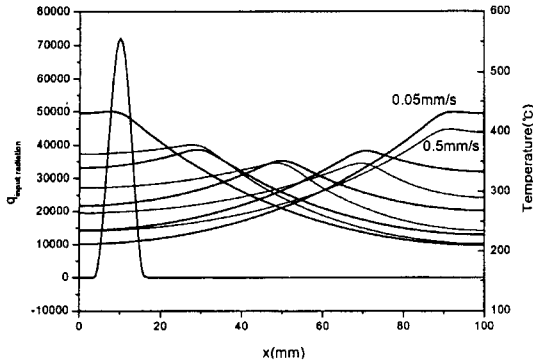


Fig. 5. Temperature distribution of silicon wafer when the halogen lamp is moving.

이동속도가 실리콘 웨이퍼의 극부 최고온도에는 영향을 거의 주지 못하며, 단지 에너지 총량에만 영향을 미친다.

Fig. 5의 가는 실선은 할로겐 램프의 이동속도가 0.5 mm/s일 때 마찬가지로 방법으로 나타낸 것이다. 두 속도에서의 온도분포가 크게 차이나지 않으며 최고치의 온도 차이는 더욱 적음을 알 수 있다. 최고온도의 차이가 누적되어 가장 크게 나타나는 $x = 90$ mm 지점에서도 온도의 차이는 26°C 에 불과하였다.

Fig. 6은 할로겐 램프가 웨이퍼의 오른쪽($x=70$ mm)에 도달했을 때 할로겐 램프 바로 밑지점의 실리콘 웨이퍼 온도를 할로겐 램프의 이동속도에 따라 나타낸 그림이다. 램프의 이동속도가 빨라질수록 웨이퍼가 충분히 가열되지 못하여 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 그러나 이동속도의 증가에 비해서 웨이퍼 온도의 감소율은 미미할 만큼 작다.

이상의 시뮬레이션 결과를 통하여 실리콘 웨이퍼의 열전도율이 크기 때문에 할로겐 램프의 이동속도가 빨라져도 실리콘 웨이퍼의 극부 최고온도에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상되었다. 할로겐 램프의 이동속도는 극부 최고온도 보다는 웨이퍼에 가해진 전체 열의 총량과 관련되어 열처리의 진행에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

IV. 결 론

유한차분법을 이용한 컴퓨터 프로그램을 개발하여 선형 가열법으로 TMR device를 열처리할때의 열적 특성을 해석하였다. 정상상태에서는 대기중에 방출되는 열량에 비해

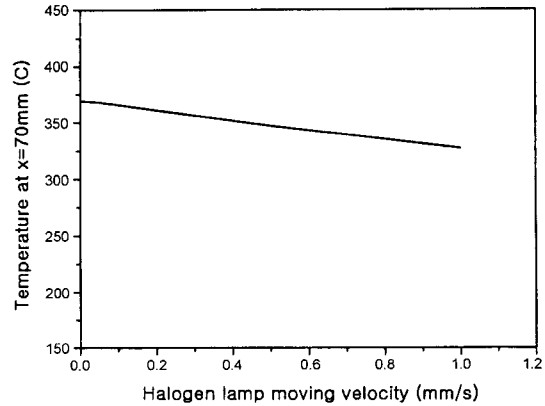


Fig. 6. Temperature of the silicon wafer with different moving velocity of the halogen lamp.

실리콘 웨이퍼의 열전도율이 크므로 할로겐 램프의 집속 강도를 높여도 커다란 온도분포의 차이를 볼 수 없었다. 비 정상상태에서도 할로겐 램프의 이동속도가 빨라질수록 웨이퍼의 온도가 낮아졌지만 그 차이는 크지 않았다. 따라서 할로겐 램프의 이동속도는 웨이퍼의 최고온도에 영향을 크게 미치지 않았으므로 가능하면 1 mm/sec의 큰 이동속도로 빠르게 열처리하여도 목적하는 자성을 조절하기 위한 열처리가 4급 기판에서 가능하다고 예상할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, Phys. Rev. Lett., **74**, 3273(1995).
- [2] T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Magn. Mater., **139**, L231(1995).
- [3] M. Sato and K. Kobayashi, IEEE Tran. Magn., **33**(5), 3553(1997).
- [4] J. W. Lee, Ph.D. Thesis, Seoul National University, (1999).
- [5] L. C. Burmeister, Convective Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York(1983).
- [6] W.M. Kays and M.E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, Inc. New York(1980).
- [7] J.C. Tannehill, D.A. Anderson, and R.H. Pletcher, Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2nd ed., Taylor & Francis(1997).
- [8] J. D. Anderson, Jr., Computational Fluid Dynamics, McGraw-Hill, Inc. New York(1995).
- [9] C. A. Hall and T. H. Porsching, Numerical Analysis of Partial Differential Equations, Prentice Hall, New Jersey(1990).

A Study on the Thermal Characteristics of a 10 cm-diameter substrate for TMR devices by FLA Method

Ohsung Song* and Youngmin Lee

Department of Materials Science and Engineering The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Youngcheol Joo

Department of Mechanical Engineering Soonchunhyang University, Asan, Chungnam, 336-745, Korea

(Received 20 March 2001, in final form 19 April 2001)

The thermal characteristics of TMR devices by using Fast Linear Annealing method has been studied. A computer program that employs the finite differential method has been developed to simulate the temperature distribution of a diameter of 4" silicon wafer, which is subjected to radiation heat from the halogen lamp. We adopted the temperature of 350 °C, which is the highest temperature usually used in annealing for magnetic thin films. We changed moving velocity of the lamp from 0.05 mm/sec to 1 mm/sec. The moving velocity of halogen lamp has less effect on the local peak temperature of the sample only about 40 °C. Therefore, we may be able to anneal TMR devices in such short time of 1 minute and 40 seconds per one wafer, using the Fast Linear Annealing method.