

와전류(eddy-current)방법에 의한 비접촉 전기비저항 측정기술 개발

박진습, 유권상, 류제천, 유광민
한국표준과학연구원 전자기 그룹

The measurement for contactless eddy-current conductivity on Si wafer

Jin Sueb Park, Kwon Sang Ryu, Je Cheon Ryu, Kwang Min Yu,
Electromagnetic Division, Korea Research Institute of Standards and Science

Abstract - The method of measurement for contactless eddy-current conductivity using magnetic dipole field theory was suggested by M.C. Chen[1], which calculate the eddy-current caused by exciting coil with Faraday's induction law. In this work, we have developed the apparatus for contactless measurement of conductivity or resistivity with the dipole field theory. The resistivity can be measured from several to a dozen $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ range within maximum 30% error. At the high resistivity range above $100\Omega\cdot\text{cm}$, the standard deviation of measurement was very large as the induced voltage of sensing coil is small, so it was difficult to measure the value precisely.

1. 서 론

반도체 소자 제조에 사용되는 실리콘 결정성장 각종 금속막, GaAs 웨이퍼 및 TFT LCD공정, 센서와 신소재 산업에서 전기비저항 측정은 Four-Point Probe(FPP)방법으로 이루어지고 있다. 하지만 이 방법은 접촉식이므로 탐침에 의해 test wafer가 오염되고, 손상되기 때문에 시험에 사용된 wafer는 제품화할 수 없으며, 그 양은 전체 wafer의 15% 이상을 차지하여 생산단가를 높여왔을 뿐만 아니라 생산라인으로부터 검사절차를 따로 분리해 내야하는 단점이 있다. 그러므로 생산단과와 공정시간을 줄이기 위하여 비접촉식 측정이 필요하여 최근 10여 년간의 연구결과로 반도체 라인용 장비가 상용화되어 판매되고 있으나 그 정확도가 수 % ~ 10%정도로 떨어져 생산현장에서 사용하기가 어려운 실정이다. M.C. Chen[1]은 비접촉으로 전기 비저항을 측정할 수 있는 magnetic dipole field이론을 제안하였는데, exciting 코일을 magnetic dipole로 간주하고 이 exciting 코일에서 생성된 자기장에 의하여 시편에 유도된 와전류를 Faraday의 유도법칙으로 계산하는 이론이다.

본 연구에서는 측정 정밀도를 높이기 위하여 exciting 및 측정코일에 보상코일을 각각 연결하여 시편이 없는 상태에서 100nV까지 nulling을 시킨 후, 시편을 삽입시키면 exciting 코일에 의해 시편에 와전류가 생성되는데, 이 와전류에 의해 유도된 전압을 측정코일로 측정하여 비접촉으로 전기 비저항을 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 방법으로 실리콘 웨이퍼에서 수 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ ~ 수십 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ 정도의 비저항을 측정할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 Dipole Field Theory

그림 1은 실리콘 웨이퍼의 비접촉식 전기전도도 측정 방법의 개념도이다. Exciting 코일과 측정 코일, 실리콘 웨이퍼가 z축에 일렬로 정렬되어있고, 여기서 코일의 반지름과 길이 그리고 웨이퍼의 두께가 코일과 웨이퍼사이의 거리(d , d')와 비교하여 충분히 작을 때는 코일을 자기 모멘트를 가지는 자기쌍극자로 간주할 수 있다.

$$\vec{p}_m = \hat{a}_z b_m = \hat{a}_z \mu_0 \mu_e \pi a^2 n I \quad (1)$$

여기서 a 는 코일의 반지름이며, n 은 코일의 권선수, μ_0 은 진공의 투자율이며 μ_e 는 코어의 비투자율이다. O점에 있는 자기쌍극자에 의해 웨이퍼상에 있는 Q점에 와전류를 유도하게 되고 웨이퍼상의 와전류는 다시 P점의 코일에 전압 V 를 유도시킨다.

실제 측정에서는 웨이퍼상의 와전류에서 뿐만 아니라 exciting 코일에서 직접 측정코일에 유도시키는 전압 V_o 가 존재한다. 측정코일에 유도되는 전압은 이 두 유도전압의 합으로 나타난다. V_o 는 I 에 90° 뒤처지는 위상차를 가지며 V 는 I 와 180° 의 위상차를 가진다. 즉, 이 관계를 리사쥬 곡선으로 나타내면 V_o 는 $-jI$ 에 비례해서 $V_o - jI$ 리사쥬 곡선은 타원으로 나타나며(그림 2,A곡)

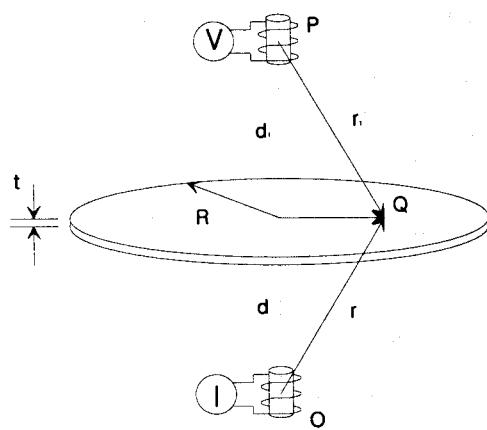


그림 1 와전류를 이용한 비저항 측정 원리

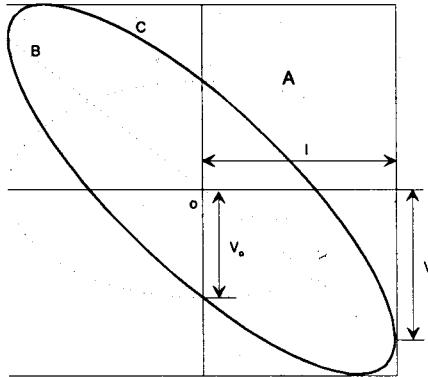


그림 2 driving 코일의 전류와 측정코일에 유도되는 전류와의 관계

선). V 는 $-I$ 에 비례해서 V - I 곡선은 음의 기울기를 가진 직선으로 나타난다(그림 2,B곡선). 그래서 측정코일에 유도된 전압을 전류와 리사쥬 곡선을 그렸을 때 그림 2의 C 곡선과 같이 기울어진 타원 모양으로 나타난다.

그림 3에는 비저항이 $2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$ 인 실리콘 웨이퍼에 대해 driving 전류 I 와 측정코일에 유도된 전압의 리사쥬 곡선을 나타내었다.

Dipole field 이론에 근거하여 $d=d_1$ 이라고 할 때 V 와 V_o 를 이론적으로 계산한 결과는 다음 식과 같다.[2]

$$V = -(n\pi a^2)(n_1 \pi a_1^2) \omega^2 I \frac{\mu_0^2 \mu_e^2 R^4}{32\pi d^2 (R^2 + d^2)^2} \sigma t \quad (2)$$

$$V_o = (n\pi a^2)(n_1 \pi a_1^2) \omega I \frac{\mu_0 \mu_o^2}{16\pi d^3} \quad (3)$$

$$\frac{V}{V_o} = \frac{\mu_0 d R^4}{2(R^2 + d^2)^2} \omega \sigma t \quad (4)$$

여기서 σ 는 웨이퍼의 전기전도도로서 비저항의 역수이며 t 는 웨이퍼의 두께이다. 식 (2), (3), (4)의 $R^4/(R^2+d^2)^2$ 항은 웨이퍼의 크기(R)와 자기쌍극자와 웨이퍼의 거리(d)에 관련된 항으로 fringe field 효과를 나타낸다. d/R 이 충분히 작다면 이 효과는 단위량으로 수렴한다.[3]

식 (4)에서 V/V_o 의 비는 전기 전도도와 두께의 곱 σt 에 비례하므로 σt 가 작은 영역, 즉 저항이 큰 영역에서는 V_o 가 노이즈로써 문제가 된다. 와전류에 의해 유도되는 전압 V 를 크게하기 위해서 가장 좋은 방법은 교류 주파수 ω 를 크게 하는 것이다. 하지만 exciting 코일과 측정코일간의 용량성 결합이 존재하므로 한계가 존재한다.

2.2 측정장치 제작

측정장치의 구성은 그림 4와 같다. 파형발생기(HP3325B)를 사용하여 120kHz의 교류파형을 발생시키고 교류주파수의 최대 진폭 I_p 가 0.4A가 되도록 증폭시켜 exciting 코일(그림 4, B)에 연결시켰다. 측정코일(그림 4, A)에 발생된 신호는 lock-in amp.(EG&G

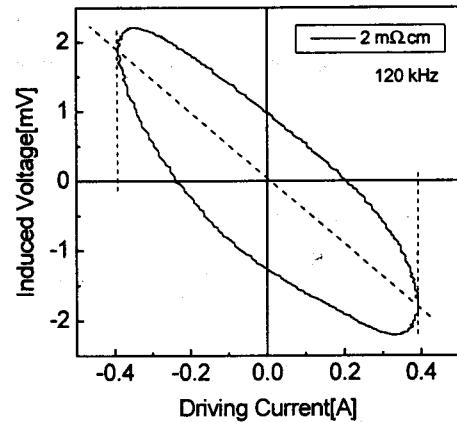


그림 3 Dipole이론을 따르는 Si 웨이퍼($2\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$)의 Driving 전류와 측정코일에 유도된 전압의 리사쥬 곡선

5210)을 사용하여 120kHz의 신호를 측정하였다. 코일은 직경 10mm의 아크릴판에 0.2mm 구리선 20회를 감고, 아크릴판 내부에 단면적이 $3.5 \times 4.5\text{mm}^2$ 인 페라이트 코어를 삽입하여 총 4개를 제작하였다. 시편을 넣지 않았을 때, 측정코일에 유도되는 전압을 nulling 시키기 위해 시편을 넣는 stage로부터 멀리 떨어진 곳에 같은 형태의 보상코일을 설치하였다. 이 보상코일의 간격을 조절하여 바닥값이 수백 nV정도로 nulling 시킬 수 있다. 그리고 외부에서의 잡음을 막기 위해 exciting 코일과 측정코일은 큰 원통형 구리판으로 차폐를 하였다.

2.3 Si 웨이퍼의 비저항 측정

본 장치에 사용할 시편은 VLSI와 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 표준 저항으로 인증한 5종류의 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 표 1은 5가지의 실리콘 웨이퍼의 기하학적인 양과 4-point법으로 측정한 저항값이다. 시편 4번의 크기는 다른 시편에 비해 반지름이 1.3배정도 더 크다.

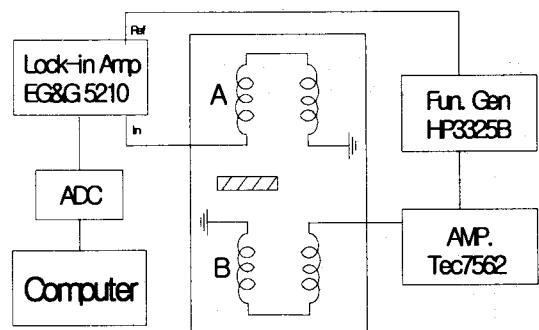


그림 4. 와전류를 이용한 비접촉 비저항 측정장치의 개념도

표 1 실험에 사용된 Si 웨이퍼의 크기와 비저항

Wafer	Radius R (mm)	Thickness t (mm)	Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	σt
1	38.0	0.469	0.00198	25.05
2	37.9	0.510	0.01002	5.09
3	38.1	0.506	0.0966	0.52
4	50.0	0.625	1	6.25×10^{-2}
5	38.1	0.505	9.53	5.40×10^{-3}

각 시편에 대해 측정한 결과를 와전류에 의해 유도된 전압과 전기전도도 σt 에 대해 그림 5에 log-log 그래프로 나타내었다. 기울기가 0.973으로 dipole field 이론으로부터 계산된 식 (2)에서 나타낸 바와 같이 1차의 선형성에 부합되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 dipole field 이론을 바탕으로 하여 Si 웨이퍼에 대해 와전류를 이용한 비접촉식 비저항 측정장치를 제작하였다. 식(2)에 각 수치를 대입하여 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 이 표는 4 point probe법의 측정결과와 이 실험결과를 비교한 것으로서 본 장치에서 수 $\text{m}\Omega \cdot \text{cm} \sim \text{수십}\Omega \cdot \text{cm}$ 정도의 비저항을 최대 30%내의 오차 범위내에서 측정할 수 있었다. $100\Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 고저항 영역에서는 유도전압의 크기가 미소해 점에 따라 측정값의 표준편차가 커서 정밀측정에 한계가 있었다.

주된 오차 요인은 측정시스템과 시편모양에 있다고 판단된다. 시편이 완전한 원형이 아니며, 한쪽 끝이 잘려 나간 형태를 하고 있기 때문이다. 그리고 본 실험에서 수행한 비접촉식 방법은 체적평균값인 반면 4 point probe법에 의한 측정값은 국부적인 영역의 값이므로 측정시편이 균질하지 않은 점을 감안하면 Crowley와 Rabson이 수행한 실험 측정값의 오차와 비슷한 결과를 나타내었다.[3]

표 2 4 point probe법과 비접촉식에 의해 측정된 5가지 시편의 비저항 비교

Wafer	Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)		error %
	Contactless	4-point probe	
1	0.00198	0.00198	0.2
2	0.01002	0.00965	3.7
3	0.0966	0.06837	29.2
4	1	1.03	3.0
5	9.53	7.85	21.8

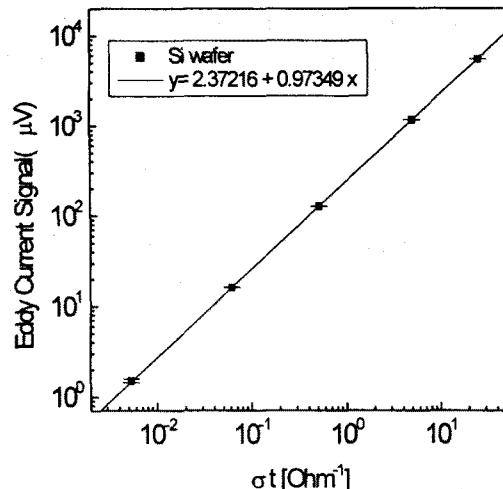


그림 5 $1\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 $10\Omega \cdot \text{cm}$ 의 선저항을 갖는 실리콘 웨이퍼의 유도전압.

[참 고 문 헌]

- [1] M. C. Chen, "Sensitive contactless eddy-current conductivity measurements on Si and HgCdTe", Rev. Sci. Instrum. 60(6), 1116 (1989)
- [2] Ichiro M. and Miki G., "Theoretical Considerations on a Contactless Measuring Method of Electric Conductivity of Semiconductor Circular Wafer", Trans. IECE Japan, E65, No. 8 492 (1983)
- [3] J. D. Crowley and T. A. Rabson, "Contactless method of measuring resistivity", Rev. Sci. Instrum., Vol. 47, No. 6, 712 (1976)