Single-configuration FPP method에 의한 실리콘 웨이퍼의 비저항 정밀측정

논 문

60-7-21

Precision Measurement of Silicon Wafer Resistivity Using Single-Configuration Four-Point Probe Method

강 전 홍[†] · 유 광 민^{*} · 구 경 완^{**} · 한 상 옥^{***}

(Jeon-Hong Kang · Kwang-Min Yu · Kung-Wan Koo · Sang-Ok Han)

Abstract - Precision measurement of silicon wafer resistivity has been using single-configuration Four-Point Probe(FPP) method. This FPP method have to applying sample size, shape and thickness correction factor for a probe pin spacing to precision measurement of silicon wafer. The deference for resistivity measurement values applied correction factor and not applied correction factor was about 1.0 % deviation. The sample size, shape and thickness correction factor for a probe pin spacing have an effects on precision measurement for resistivity of silicon wafer.

Key Words : Four-point probe method, Single-configuration, Col-linear four point probe, Resistivity, Sheet resistance, Silicon wafer, Accuracy, Uncertainty

1. 서 론

반도체 산업에서 필수적으로 사용되는 실리콘 웨이퍼는 용도에 따라 웨이퍼의 크기, 모양, 두께, 비저항 등이 다르다. 반도체 산업에서 주로 사용되는 실리콘 웨이퍼의 비저항 범위는 $0.001 \Omega \cdot \text{cm} \sim 200 \Omega \cdot \text{cm}$ 로서 반도체 소자는 일반적으로 실리콘 웨이퍼의 적절한 비저항을 선택하여 설계하므로 생산되는 반도체 소자의 특성은 각각 다르다. 즉 실리콘 웨이퍼를 주원료로 생산되는 각종 IC, SCR, 메모리칩, 트랜지스터, 다이오드, 태양전지용 셀 등이 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 따라서 실리콘 웨이퍼의 비저항 정밀측정은 반도체 생산 공정에서 필수적이다. 일반적으로 잘 알려진 실리콘 웨이퍼의 비저항 정밀측정 방법은 4개의 탐침이 일정한 간격으로 일렬로 배열된 구조의 프로브를 실리콘 웨이퍼의 표면에 접촉시켜 비저항을 측정하는 단일배열 [1-5]과 이중배열 [6-8] 측정기술이 사용되고 있다. 현재 사용되고 있는 비저항 측정기는 대부분 단일배열 기술이 적용된 것으로 탐침 간격에 대한 웨이퍼의 크기나 두께에 대한 보정계수를 반드시 고려하여 사용하여야 한다. 그렇지 않으면 비저항 측정 정확도에 영향을 미치게 되므로 반도체 생산 공정 및 반도체 소자 설계 등에서 오류가 발생할 수도 있다. 따라서 본 연구는 실리콘 웨이퍼의 비저항 측정시 보정계수를 적용하는 방법과 정밀측정 기술에 대한 내용을 실험결과를 토대로 기술하였다. 일반적으로 실리콘 웨이퍼와

같은 형태의 재료들은 주로 단일배열 기술로 측정하고, 이에 비하여 박막 형태의 재료들은 가장자리 효과가 적은 이중배열 측정기술이 주로 사용된다. 본 연구에서는 slice 형태의 실리콘 웨이퍼를 기준으로 단일배열 기술을 바탕으로 비저항 정밀측정 방법에 대해 고찰하였으며, 특히 탐침간격에 대한 시료의 크기 및 두께 보정계수 적용이 측정 정확도에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 평가하였다.

2. 본 론

2.1 4-탐침법

4-탐침법은 전도성 박막 및 실리콘 웨이퍼의 면(비)저항을 측정하는데 가장 널리 사용되는 방법으로 싱글 배열과 듀얼 배열 측정기술이 있다. 본 연구에서 수행한 싱글 배열 측정기술은 4개의 탐침이 동일선상에 일정한 간격으로 일렬로 배열된 구조로서 프로브를 시료의 표면에 접촉시켜 저항을 측정한 후 탐침 간격에 대한 시료의 크기 및 두께 보정계수를 적용하여 면저항을 계산하고, 시료의 두께를 곱하여 비저항을 구하는 방법이다. 이 싱글 배열 기술에 의한 면저항 측정원리는 그림 1과 같이 탐침 A와 D에 전류 I_{AD} 를 흘리고, 탐침 B와 C에서 전압 V_{BC} 를 측정하여 저항 R_s 를 다음과 같이 구한다.

$$R_s = \frac{V_{BC}}{I_{AD}} [\Omega] \quad (1)$$

그리고, 면저항 R_{ss} 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{ss} = k_s \times R_s [\Omega/\text{sq.}] \quad (2)$$

k_s 는 비례상수로서 다음과 같이 정의된다.

[†] 교신저자, 정회원 : 한국표준과학연구원 선임연구원 · 공박

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

^{*} 정 회 원 : 한국표준과학연구원 선임연구원

^{**} 정 회 원 : 호서대학교 국방과학기술학과 교수 · 공박

^{***} 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2011년 3월 31일

최종완료 : 2011년 5월 18일

$$k_s = F(D/S) \times F(t/S) \times F(T) \times F(S) \quad (3)$$

또한 비저항(ρ)은 면저항을 구한 후 시료의 두께를 곱하여 구하며 식 (4)와 같다.

$$\rho = R_{ss} \times t \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (4)$$

그림 1 단일배열 4-탐침법

Fig. 1 Single-configuration FPP method

상기의 식 (3)에서 $F(D/S)$ [1-5]는 탐침간격 S 에 대한 시료 크기 D 의 보정계수이며, 4-탐침법의 측정원리로부터 정의된 그림 2의 원형시료와 그림 3의 사각형 시료에 대한 보정계수는 표 1에 의해 적용된다.

표 1에서처럼 탐침 간격 S 에 대한 시료의 크기 D 가 무한대라면 보정계수 $F(D/S) = 4.5324$ 이다. 이와 같이 탐침 간격에 대한 시료의 크기에 대한 보정계수는 표 1을 고려하여 적용하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 보정계수를 누구나 편리하게 적용하여 사용할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 그림 4에 나타났다. 이 프로그램은 탐침의 간격과 시료의 크기를 입력하면 자동으로 보정계수가 계산된다. 예를 들면 프로브의 탐침 간격이 1.00 mm이고, 실리콘 웨이퍼의 직경이 100 mm인 경우의 $F(D/S)$ 보정계수는 4.5284가 자동 계산되고, 또한 사각형 시료의 크기가 가로 100 mm, 세로 100 mm인 경우의 $F(D/S)$ 보정계수는 4.5290과 같이 계산된다. 이와 같이 탐침의 간격에 대한 시료의 크기 보정계수인 $F(D/S)$ 를 쉽게 구하여 적용할 수 있다. $F(t/S)$ [1-5]는 탐침 간격 S 에 대한 시료 두께 t 의 보정계수로서 표 2와 같으며, 탐침 간격 S 가 1.00 mm일 때 시료의 두께 t 가 0.400 mm이면 보정계수 $F(t/S) = 0.9995$ 이다. 본 연구에서는 탐침의 간격과 시료의 두께를 입력하면 자동으로 두께 보정계수가 계산되는 프로그램을 개발하였으며, 그림 5에 나타났다. 즉, 탐침 간격이 1.00 mm이고, 시료의 두께가 0.500 mm인 경우의 보정계수는 약 0.9974가 자동 계산됨을 알 수 있으며, 탐침의 간격에 대한 시료의 두께 보정계수인 $F(t/S)$ 를 쉽게 구하여 적용할 수 있다. $F(T)$ 는 측정 온도에 대한 보정계수로서 실리콘 웨이퍼를 비롯한 저항체들은 온도에 대한 영향이 있으므로 가능한 항온이 일정하게 유지되는 실험실에서 측정하여야 한다. 본 연구에서는 온도 챔버의 온도가 $(23.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 이므로 $F(T) = 1 - C_T(T - 23)$ 에 의해 보정계수는 1.0을 적용할 수 있다. $F(S)$ [4]는 탐침 간격에 대한 보정계수로서 $F(S) = 1 + 1.082 \times (1 - \frac{S_2}{S})$ 로 주어지며 (S_2 는 전압측정 probe 사이의 거리, $F(S)$ 는 $t \leq 0.5S$ 일 때 0.1 % 이하의 정확도를 가짐), 일반적으로 프로브 제작사의 성적서에 탐침

간격에 대한 오차가 명시되어 있으며, $\frac{S_2}{S}$ 가 0.3 % 이내에서 같으므로 그 수준에서 보정계수는 1.000을 적용한다.

표 1 탐침 간격에 대한 시료의 크기 보정계수; $F(D/S)$
Table 1 Correction factor of sample size for pin spacing; $F(D/S)$

D/S	원형시료의 경우, $F(D/S)$ 의 보정계수	사각형 시료의 경우, $F(D/S)$ 의 보정계수			
		a/D=1	a/D=2	a/D=3	a/D $\geq$ 4
1.0	-	-	-	0.9988	0.9994
1.25	-	-	-	1.2467	1.2248
1.3	-	-	1.4788	1.4893	1.4893
1.75	-	-	1.7196	1.7238	1.7238
2.0	-	-	1.9454	1.9475	1.9475
2.5	-	-	2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5325	4.5321

그림 2 원형시료

Fig. 2 Sample of circular shape

그림 3 사각형 시료

Fig. 3 Sample of rectangular shape

그림 4 탐침간격에 대한 시료크기 보정계수 계산프로그램

Fig. 4 Correction factor calculation program of sample size for pin spacing

표 2 탐침 간격에 대한 시료의 두께 보정계수; $F(t/S)$ Table 2 Correction factor of sample thickness for pin spacing; $F(t/S)$

$F(t/S)$	t/S
1.0000	0.100
1.0000	0.141
1.0000	0.200
0.9999	0.333
0.9974	0.500
0.9215	1.000
0.7983	1.414
0.6337	2.000
0.4067	3.333
0.2753	5.000
0.1385	10.00

그림 5 탐침간격에 대한 시료두께 보정계수 계산 프로그램

Fig. 5 Correction factor calculation program of sample thickness for pin spacing

2.2 두께 측정기의 설계 및 제작

실리콘 웨이퍼의 두께(t)는 식(4)에서처럼 비저항 측정결과에 직접적인 영향을 주므로 정확한 측정이 요구된다. 그림 6은 실리콘 웨이퍼나 slice 재료의 두께를 정밀·정확하게 측정하기 위하여 고안된 것으로 디지털 마이크로미터 두 대를 ball과 ball 전극이 맞닿은 구조로 설계 제작하였다.

이 측정원리는 실리콘 웨이퍼가 전극 사이에 위치하면 두 개의 마이크로미터가 두께를 각각 나타내며, 두께의 합을 평균하면 시료의 두께를 정확하게 알 수 있다. 따라서 제작된 두께 표시장치는 누구나 쉽고 정확하게 측정할 수 있으며,

시료의 위치에 상관없이 두께를 측정할 수 있는 장점이 있다. 그림 7은 제작된 두께측정기를 나타냈다. 두께 측정에 사용된 마이크로미터와 측정기는 국가측정표준으로부터 소급성을 확보하여야 하므로 본 연구에 사용된 디지털 마이크로미터는 국가측정표준으로부터 두께의 소급성이 유지된 게이지 블록과 두께 CRM을 사용하여 실리콘 웨이퍼의 두께를 비교 측정하였다. 두께 측정은 시료의 중심 10 mm 이내에서 측정불확도[9-11]를 줄이기 위해 10회 반복 측정하였다. 이 두께측정 장치의 측정범위는 수십 μm ~ 수 mm이며, 측정 정확도는 0.1 % 이하이다.

그림 6 실리콘 웨이퍼의 두께 측정원리

Fig. 6 Thickness measurement principle of silicon wafers

그림 5 실리콘 웨이퍼의 두께 측정기

Fig. 5 Thickness measurement apparatus of silicon wafers

2.3 실험

본 연구에서 기준 시료로 사용된 인증표준물질(Certified Reference Material, CRM) 6종에 대해 비저항을 평가한 결과는 표 3과 같다. 평가에 사용된 실리콘 웨이퍼 CRM은 4"(직경 100 mm)크기이며, 두께는 약 625 μm 이다. 측정에 사용된 시스템은 국가측정표준대표기관인 한국표준과학연구원서 실리콘 웨이퍼의 비저항 인증에 사용되는 측정시스템을 사용하였다. 실험조건에서 사용된 프로브의 탐침 간격은 1.00 mm, 탐침 반경(radius)은 150 μm , 하중은 350 g, 실험온도는 $(23.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 이고 암실 상태에서 측정하였으며, 측정결과는 표 3과 같다. 여기에서 A항은 일반적으로 간과할 수 있는 경우로서 탐침간격에 대한 시료의 크기를 무한하다고 보고 보정계수 4.5324를 적용하고, 시료의 두께 보정계수는 1.0으로 적용한 값이다. B항은 표 1과 2로부터 보정계수를 적용한 결과를 나타낸 것이다. 이와 같이 보정계수의 적용여부에 따라 측정정확도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, B항을 기준값으로 하여 오차를 계산하면 1.0 % 이상의 편차를 보인다.

표 3 측정결과 비교**Table 3** Comparison of measurement results

CRM ($\Omega \cdot \text{cm}$)	CRM thickness	A ($\Omega \cdot \text{cm}$)	B ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Deviation (%)
0.01	628 μm	0.010 33	0.010 22	1.1
0.1	627 μm	0.1096	0.1085	1.0
1	625 μm	1.0240	1.0136	1.0
10	630 μm	10.621	10.509	1.1
100	625 μm	96.7	95.7	1.0
200	627 μm	203.3	201.2	1.0

3. 결 론

4-탐침법의 단일배열 기술은 탐침간격에 대한 시료의 크기와 두께 보정계수를 적용하여 실리콘 웨이퍼의 비저항을 측정하여야 측정 정확도를 높일 수 있다. 본 연구결과에서 보정계수를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우의 측정오차는 1.0 %이상으로 측정정확도에 큰 영향을 미치게 됨을 확인하였다. 실리콘 웨이퍼의 비저항은 시료의 두께 측정 정확도에 따라 측정 불확도에 영향을 주므로 정밀한 두께 측정이 요구된다. 실리콘 웨이퍼의 비저항 측정시 정밀측정에 필요한 요건은 적절한 4-탐침의 반경(radius)을 갖는 프로브를 선택하여야 하며, 적절한 하중과 실험온도 및 암실 측정환경 등은 비저항 평가에서 중요한 요인으로 나타났다. 또한 측정불확도에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 전류원 및 전압계의 안정도와 시료의 두께측정 정확도 등이다.

참 고 문 헌

- [1] Arther Uhler, JR. "The Potentials of Infinite Systems of Sources and Numerical Solutions of Problems in Semiconductor Engineering", Bell System Technical Journal, Vol. 34, No. 1, pp. 105-128, 1954.
- [2] L. B. Valdes, "Resistivity Measurements on Germanium for Transistors", Proceedings of the Institute of Radio Engineers New York", Vol. 42, pp. 420-427, Feb., 1954.
- [3] V. F. M. SMITS, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe", Proceedings of the Institute of Radio Engineers, pp 711-718, May 1958.
- [4] ASTM F84, "Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers with In-Line Four-Point Probe"
- [5] Lydon J. Swartzendruber, "Correction Factor Tables for Four-Point Probe Resistivity Measurements on Thin, Circular Semiconductor Samples", NBS technical note 199, April 1964.
- [6] ASTM F1529-97, "Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line Four-Point Probe with the Dual-Configuration Procedure", 1997.
- [7] J. R. Ehrstein and M. C. Crparlom, NIST Special Publication 260-131, 1999. (The Certification of 100 mm Diameter Silicon Resistivity SRMs 2541 through

2547 Using Dual-Configuration Four-Point Probe Measurements.)

- [8] Masato YAMASHITA, "Resistivity Measurement by Dual-Configuration Four-Probe Method". The Japan Society of Applied Physics, Vol. 42, No. 2A, pp 695-699, February 2003.
- [9] ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1991.
- [10] EA-4/02, "Expression the uncertainty of measurement in calibration", 1999.
- [11] KRISS-99-079-ET, "측정불확도 평가 및 표현방법", 1999.

저 자 소 개 **강 전 홍 (姜 鎭 洪)**

1963년 2월 8일생, 2008년 충남대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년 ~ 현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5152

E-mail : jhkang@kriss.re.kr

유 광 민 (劉 珖 民)

1960년 9월 29일생, 1985년 부산대학교 물리학과 졸업(석사), 2000년~현재 충남대학교 물리학과 박사과정, 1986년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 전자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5153

E-mail : kmyu@kriss.re.kr

구 경 완 (丘 庚 完)

1983년 충남대학교 전자공학교육과 졸업 1992년 충남대학교 전자공학과 졸업(박사) 현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수

Tel : 041-540-9541

E-Mail : alarmkoo@hoseo.edu

한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기) 졸업, 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5655

E-mail : sohan@cnu.ac.kr