

Dual-Configuration Four-Point Probe Method에 의한 휴대형 면저항 측정기 개발

논문
59P-4-14

Development of Hand-Held Type Sheet Resistance Meter Based on a Dual-Configuration Four-Point Probe Method

강 전 홍⁺ · 유 광 민^{*} · 김 완 섭^{**}
(Jeon-Hong Kang · Kwang-Min Yu · Wan-Seop Kim)

Abstract - Portable sheet resistance-measuring instrument using the dual-configuration Four-Point Probe method is developed for the purpose of precisely measuring the sheet resistance of conducting thin films. While single-configuration Four-Point Probe method has disadvantages of applying sample size, shape and thickness corrections for a probe spacing, the developed instrument has advantages of no such corrections, little edge effects and measuring simply and accurately the sheet resistance between 0.2 Ω/sq and 2 kΩ/sq..

Key Words : Four-Point Probe, Single- & Dual-Configuration, Sheet Resistance, Accuracy, Uncertainty

1. 서 론

PDP, LCD, PMP, 휴대폰, 네비게이션 등 디스플레이 산업이 급속도로 발전함에 따라 touch screen 및 touch panel에 사용되고 있는 ITO(Indium Tin Oxide)박막 등의 면저항 측정은 필수적이다.

면저항 측정기술은 Four-Point Probe(FPP) method의 single-configuration[1-5]과 dual-configuration[6-8]이 있으며, 주로 single-configuration원리로 제작된 면저항 측정기가 사용되고 있다. 이 single-configuration에 의한 면저항 측정기술은 4개의 탐침이 일렬로 배열된 프로브(probe)의 탐침 간격에 대한 시료의 크기와 형태 및 두께에 따른 각각의 보정계수를 반드시 적용하여야 하며 가장자리효과가 큰 단점이 있다. 반면에 dual-configuration에 의한 면저항 측정기술은 보정계수를 적용할 필요가 없으며 가장자리효과가 거의 없는 장점이 있는 것으로 알려져 있다[6-8].

현재 국내에서 사용되고 있는 면저항 측정기의 대부분은 single-configuration을 적용한 것으로 일본과 미국 제품이 주로 사용되고 있으며, 일부 국산 면저항 측정기가 사용되고 있다. 최근 각종 신소재 개발에 대한 연구의 필요성으로 산업체를 비롯한 대학교, 연구소, 벤처기업 등의 다양한 분야에서 박막재료의 면저항을 측정하기 위한 측정기의 수요는 빠르게 증가하는 추세이다. 이에 따라 기존 single-configuration에 의한 면저항 측정기는 보정계수를 적용하여야 하므로 사용이 불편할 뿐만 아니라 가장자리효과가 크게 나타나는 단점을 개선하기 위하여 dual-configuration기술을 적용한 면저항 측정기를 개발하였다. 개발된 면저항 측정기는 휴대형

으로 시료의 표면에 프로브를 접촉시키면 면저항이 자동으로 측정되므로 누구나 쉽고 빠르고 정확하게 전도성 박막 재료의 면저항을 측정할 수 있다. 또한 이 면저항 측정기의 저항 측정기능과 면저항 측정기능에 대한 직선성, 반복성, 재현성 특성을 평가하기 위하여 국가측정표준으로부터 소급성이 유지된 표준저항과 십진 저항기를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 Four-Point Probe(FPP) Method

Valdes에 의해 개발된 FPP method는 전도성 박막 및 실리콘 웨이퍼 등의 면저항을 측정하는데 가장 널리 사용되고 있으며, 동일선상에 일렬로 배열된 4개의 탐침을 시료의 표면에 접촉시켜 저항을 측정 후 보정계수를 적용하여 면저항을 측정하는 single-configuration[1-5]이 주로 사용되고 있다. 이 single-configuration에 의한 면저항 측정원리는 그림 3(a)에서와 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 single-configuration에 의한 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 정의 된다.

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

여기서, $F(D/S)$ [1-5]는 탐침 간격 S 에 대한 시료크기 D

⁺ 교신저자, 정회원 : 한국표준과학연구원 선임연구원 · 공박
E-mail: jhkang@kriss.re.kr

^{*} 정 회 원 : 한국표준과학연구원 선임연구원

^{**} 정 회 원 : 한국표준과학연구원 책임연구원 · 공박

접수일자 : 2010년 6월 8일

최종완료 : 2010년 9월 14일

의 보정계수이며, 그림 1의 원형 시료와 그림 2의 사각형 시료에 대한 보정계수 적용값은 표 1과 같다. 표 1에서처럼 탐침 간격 S 에 대한 시료의 크기 D 가 무한대라면 보정계수 $F(D/S) = 4.5324$ 이다. $F(t/S)$ [1-5]는 탐침 간격 S 에 대한 시료 두께 t 의 보정계수로서 표 2와 같다. 예로서 탐침 간격 S 가 1.00 mm일 때 시료의 두께 t 가 0.4 mm이하이면 보정계수 $F(t/S) = 1.0$ 이다. $F(T)$ 는 측정 온도에 대한 보정계수로서 측정시 실험실의 온도가 $(23.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 의 범위였다면 $F(T) = 1 - C_T(T - 23)$ 에 의해 보정계수는 1.0이다. 또한 $F(S)$ 는 탐침 간격에 대한 보정계수로서 프로브 제작사의 성적서에 탐침 간격에 대한 오차가 없다면 보정계수는 1.0을 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≥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

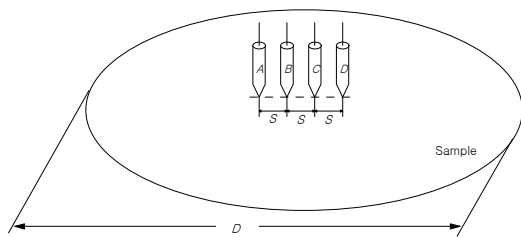


그림 1 원형시료
Fig. 1 Sample of round shape(circular)

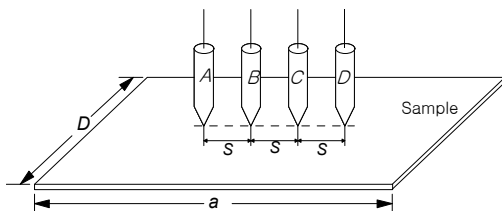


그림 2 사각형 시료
Fig. 2 Sample of square shape(rectangular)

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

Dual-configuration에 의한 면저항 측정방법은 그림 3(b)에서와 같이 탐침 A와 C에 전류 I_{AC} 를 인가하고, 탐침 B와 D에서 전압 V_{BD} 를 측정하여 다음과 같이 저항 R_d 를 구한다.

$$R_d = \frac{V_{BD}}{I_{AC}} [\Omega] \tag{4}$$

그리고 dual-configuration에 의한 면저항 R_{sd} 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{sd} = k_d \times R_s [\Omega/\text{sq.}] \tag{5}$$

여기서, 비례상수 k_d [6-8]는 다음과 같다.

$$k_d = -14.696 + 25.173(R_s/R_d) - 7.872(R_s/R_d)^2 \tag{6}$$

식 (5)와 (6)은 R_s 와 R_d 의 비가 $1.20 \leq R_s/R_d \leq 1.32$ [6]일 경우에만 dual-configuration 기술 적용이 가능하다.

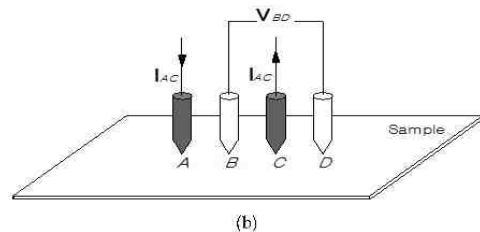
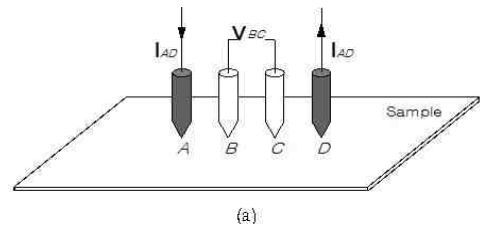


그림 3 (a) 싱글 배열 (b) 듀얼 배열 FPP method
Fig. 3 (a) single- & (b) dual-configuration Four-Point Probe method

2.2 면저항 측정기의 설계 및 제작

개발된 휴대형 면저항 측정기는 그림 4와 같이 전원장치, 연산장치와 표시장치, A/D converter, gain amplifier, four-point probe, 전원으로 사용되는 충전용 건전지 등으로 구성되었다. 그림 5는 개발된 면저항 측정기의 사진을 보여 준다. 측정기능은 저항과 면저항을 측정할 수 있도록 설계 하였으며, 면저항 측정시 시료의 표면에 4-탐침 프로브가 접촉되면 측정기의 표시창에 면저항 측정값을 나타낸다. 또한 접촉하고 있는 동안에는 측정을 계속하도록 설계되어 측정값의 재현성, 안정도 및 반복성을 평가할 수 있으며, 측정을 멈추면 마지막 측정값이 표시창에 그대로 유지되어 면저항 측정값을 편리하게 읽을 수 있다. 그리고 박막재료의 면저항 측정시 탐침의 흔들림으로부터 발생하는 접촉저항의 영향을 최소화하기 위하여 프로브를 고정시키고, 상하 수직 운동과 탐침의 하중을 조절할 수 있는 프로브 고정장치 (probe station)를 제작하였다. 이 측정기는 휴대형이므로 프로브를 손으로 잡고 시료의 원하는 위치에 접촉시켜 면저항을 측정하거나 프로브 고정장치에 프로브를 장착하여 사용할 수 있도록 설계하여 사용자의 편의를 고려하였다. 그리고 회전판을 설치하여 박막시료의 측정위치를 이동하면서 측정할 수 있도록 하여 누구나 쉽고 편리하게 사용할 수 있다.

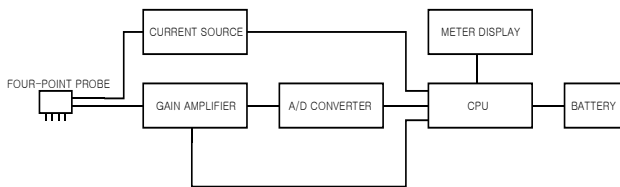


그림 4 면저항 측정기의 구성도
Fig. 4 Block diagram of sheet resistance meter



그림 5 개발된 면저항 측정기
Fig. 5 Developed sheet resistance meter

2.3 면저항 측정기의 직선성 특성평가

전기량 측정에 사용하고 있는 전압계, 전류계, 저항계 등의 측정기들은 측정의 정확도 뿐 만 아니라 직선성, 반복성, 재현성, 안정도 등의 특성이 좋아야 한다. 일반적으로 제작사의 사양서를 보면 그 측정기의 정확도와 장기 안정도 등

이 기술되어 있다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 면저항 측정기의 저항기능에 대한 직선성 평가를 위하여 그림 6과 같이 측정회로를 구성하고 국가측정표준으로부터 소급성이 유지된 십진 저항기(Decade Resistor, 모델: ESI DB62, 불확도: 0.005 %)를 사용하였다. 측정 방법은 십진 저항기의 저항값을 0.1 Ω ~ 500 Ω의 범위까지 설정하고 면저항 측정기에 나타나는 측정값을 기록하였으며, 측정불확도[9-11]는 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω 범위에서 0.1 %이하로 평가되었다. 표 3은 직선성 평가의 측정결과이며, 그림 7은 측정결과에 대한 직선성 특성 곡선을 나타냈다. 또한 반복성과 재현성에 대한 특성을 확인하기 위하여 여러 범위에서 기준 저항값을 설정하고 5회 이상 반복 측정한 결과 0.1 %이하의 일치도를 나타냈으며, 안정도는 표시창에 지시되는 마지막 자리(분해능)의 ±1 digits 였다.

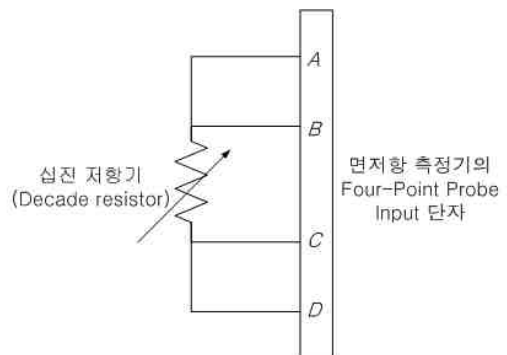


그림 6 직선성 평가를 위한 개략도
Fig. 6 Schematic diagram for linearity estimate

표 3 직선성 특성 측정결과

Table 3 Measurement results of linearity characteristics

기준값 (Ω)	측정값 (Ω)	불확도(k = 2) (Ω)
0.1000	0.100	0.001
0.5000	0.500	0.001
1.0000	1.000	0.001
3.000	3.00	0.01
4.000	4.00	0.01
5.000	5.00	0.01
7.000	7.00	0.01
9.000	9.00	0.01
10.000	10.00	0.01
15.000	15.00	0.01
20.000	20.00	0.01
30.00	30.0	0.1
50.00	50.0	0.1
70.00	70.0	0.1
90.00	90.0	0.1
100.00	100.0	0.1
200.00	200.0	0.1
300.0	300	1
400.0	400	1
500.0	500	1

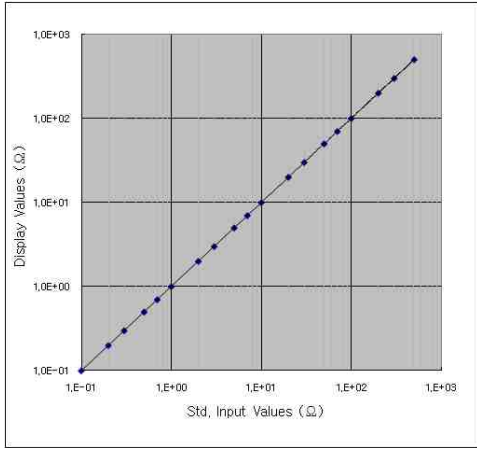


그림 7 개발된 면저항 측정기의 직선성 특성
 Fig. 7 Linearity characteristics of developed sheet resistance meter

개발된 면저항 측정기의 면저항 측정기능에 대한 성능 평가는 위의 관계식 (5)와 (6)을 이용하여 확인하였다.

그림 6에서처럼 십진저항기 대신 4단자로 구성된 표준저항 1.0000 Ω을 면저항 측정기의 프로브 입력단자(A,B,C,D)에 연결하고 그림 3의 (a)(b)에서 R_s 와 R_d 를 측정하면 R_s 와 R_d 의 비는 1.000 이므로 dual-configuration기술의 면저항 비례상수 k_d 는 위의 식 (6)에 의하여 계산하면 2.605가 된다. 따라서 식 (5)에 의하여 면저항 R_{sd} 의 값은 2.605 Ω/sq.이며 이 값이 측정기에 나타나면 이론적인 면저항 값과 실제 측정된 면저항 값을 확인할 수 있다. 또한 같은 방법으로 표준저항 10.000 Ω과 100.00 Ω을 면저항 측정기의 프로브 입력단자(A,B,C,D)에 각각 연결하고 측정하면 각각 26.05 Ω/sq.와 260.5 Ω/sq.가 나타나야 하는데 측정된 결과는 표 4와 같다.

표 4 개발된 면저항 측정기의 면저항 특성
 Table 4 Sheet resistance characteristics of developed sheet resistance meter

이론값(Ω/sq.)	측정값(Ω/sq.)	불확도 ($k = 2$) (Ω/sq.)
2.605	2.60	0.01
26.05	26.0	0.1
260.5	261	1

2.4 Single- & dual-configuration에 의한 가장자리효과 비교

그림 8은 가로와 세로의 길이가 약 106 mm인 ITO 박막 시료에 대하여 가장자리로부터 3 mm 안쪽 시료의 중심위치에서 프로브를 1 mm씩 좌에서 우로 이동하며 single-configuration과 dual-configuration four-point probe method로 측정된 면저항 곡선이다.

Dual-configuration으로 측정된 면저항 값은 그림에서 보이는 것처럼 ITO의 전체 영역에서 거의 비슷한 값을 나타냈으며, 측정값이 일정하지 않은 것은 시료의 균질도 특성

때문으로 추정된다. 반면에, single-configuration으로 측정된 ITO 면저항은 가장자리 부분(0~30 mm, 80~100 mm)이 중간 위치에서의 측정값과 dual-configuration으로 측정된 값에 비해 약 5 %정도 측정값의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 single-configuration의 측정방식은 가장자리 효과가 크게 나타나는 확인하였으므로 면저항 측정시 반드시 고려하여 사용하여야 한다.

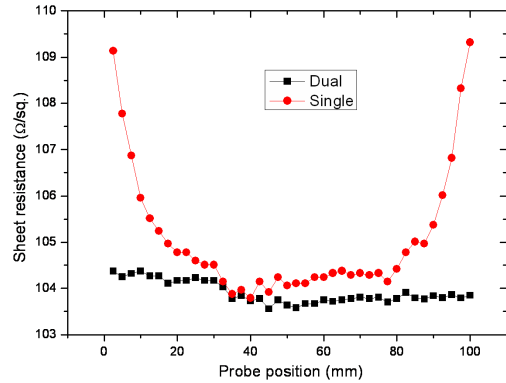


그림 8 Single- & dual configuration FPP method에 의한 가장자리 효과 비교
 Fig. 8 Comparison of edge effects by single- & dual configuration FPP method

3. 결 론

Four-Point Probe method의 dual-configuration기술을 적용하여 개발된 휴대형 면저항 측정기는 전도성 박막의 면저항을 0.2 Ω/sq.~2 kΩ/sq. 범위에서 약 1.0 %이하의 측정 불확도로 측정할 수 있다.

이 측정기는 종래의 single-configuration에 비해 가장자리효과가 훨씬 적고 별도의 보정계수를 적용 할 필요가 없으며, 박막시료의 표면에 프로브를 접촉시키면 면저항 측정값이 나타나므로 누구나 쉽고 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 국가측정표준으로부터 소급성이 유지된 십진 저항기를 사용하여 평가한 직선성, 반복성, 재현성은 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω 범위에서 약 0.1 %이하의 일치도를 갖는 우수한 특성을 나타냈으며, 탐침 간격에 대한 시료의 크기와 형상 및 두께 보정이 요구되는 종래의 single-configuration 기술을 적용한 면저항 측정기에 비해 많은 장점이 있으므로 수입대체 효과가 예상된다. 향후에는 전도성 박막 재료의 면저항 측정범위와 정확도 향상에 대한 사용자의 요구가 예상되므로 수 mΩ/sq.~수백 MΩ/sq.의 측정범위와 0.5 %이하의 정확도를 갖는 면저항 측정기를 개발할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] Arther Uhlir, 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] 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] KRIS-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
 Fax : 042-868-5018
 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 기반표준부 전자기센터 선임연구원
 Tel : 042-868-5153
 Fax : 042-868-5018
 E-mail : kmyu@kriss.re.kr



김 완 섭 (金 完 燮)

1990년 Duisburg 대학교 물리학과 졸업(학사), 1993년 Duisburg 대학교 졸업(석사), 1998년 Duisburg 대학교 졸업(이학박사), 2002년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기센터 책임연구원
 Tel.: 042-868-5623
 Fax: 042-868-5018
 E-Mail: ws2kim@kriss.re.kr