

การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของดีบุกที่อุณหภูมิห้อง

The Measurement of Electrical Resistivity of Tin at Room Temperature

มนู เพื่องฟุ้ง หวี ฉิมอ้อย ปกรณ์ ปรีชาบุรณะและมานิตย์ วรภมร

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี

บทคัดย่อ

จากการศึกษาเปรียบเทียบการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นดีบุกบางรูปสี่เหลี่ยม ด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น (Linear 4-probes technique) กับเทคนิคของแวน เดอ พาว (van der Pauw technique) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น จะต้องมีการแก้ไขค่าที่หามาได้ค่าที่ถูกต้อง สำหรับการวัดด้วยเทคนิคของ แวน เดอ พาว มีความยุ่งยากกว่า เพราะต้องสลับขั้วการจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์ แต่จะให้ค่าที่น่าเชื่อถือโดยไม่ต้องใช้ค่าแก้ไข

Abstract

This study compared the 2 different techniques in measuring the electrical resistivity of rectangular slice of Tin at room temperature. They were the linear four probes technique and van der Pauw technique. It was found that the linear four probes technique needed a correction factor for an accurate value. For the van der Pauw technique, there was difficulty in alternating the probe for sink current and measuring the voltage., however the value from this technique was accurate without any correction factor.

Key word: Electrical Resistivity, Four Probes Technique, van der Pauw Technique

1. คำนำ

ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสาร (ρ) เป็นปริมาณพื้นฐานที่มีความสำคัญตัวหนึ่ง ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารนั้นๆว่าดีเพียงใด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน เทคนิคที่นิยมใช้วัดค่าสภาพความต้านทานโดยทั่วไปได้แก่แบบ 4 ขั้วเชิงเส้น [1],[2] และเทคนิคการวัดแบบแวน เดอ พาว [2],[3] สำหรับการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้นนั้น รูปร่างของสารตัวอย่างมีความสำคัญต่อการคำนวณเป็นอย่างมาก เพราะใช้ค่าแก้ไข (Correction factor) ที่แตกต่างกันไป [1],[4]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นดีบุกบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้วิธีการทั้งสองอย่างที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25°C โดยได้แสดงค่าแก้ไขสำหรับการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้นของ

สารตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมบางที่มีความหนา (t) น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างของขั้วของ โพรบ (s) หรือ $t < s/2$ [2] ไว้ด้วย เพื่อประโยชน์สำหรับผู้สนใจศึกษา

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น กับ การวัดแบบ แวน เดอ พาว ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการสร้างเครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแบบอัตโนมัติ

3. ทฤษฎี

การวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารด้วยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้นนั้นขึ้นกับปริมาณหลายอย่าง เช่น ความหนาของชิ้นสาร

(d) ระยะห่างระหว่างขั้วของโพรบ (S) และรูปร่างของสารตัวอย่าง เป็นต้น

สำหรับการวัดที่ความหนาของชิ้นสารน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างขั้ว ($t < S/2$) แล้ว จะหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จาก

$$\rho = t \cdot \frac{b}{s} \cdot R \left(\frac{b}{s}, \frac{a}{b} \right) \cdot \frac{V}{I} \quad \dots\dots\dots(1)$$

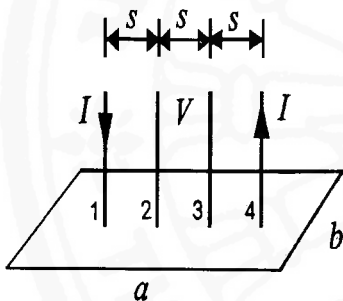
เมื่อ t เป็นความหนาของสารตัวอย่าง

a, b เป็นขนาดของสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 1

$R \left(\frac{b}{s}, \frac{a}{b} \right)$ เป็นค่าแก้ไขที่ได้จากตารางที่ 1

I เป็นกระแสที่จ่ายให้กับขั้วที่ 1 และ 4

V เป็นความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 2 และ 3



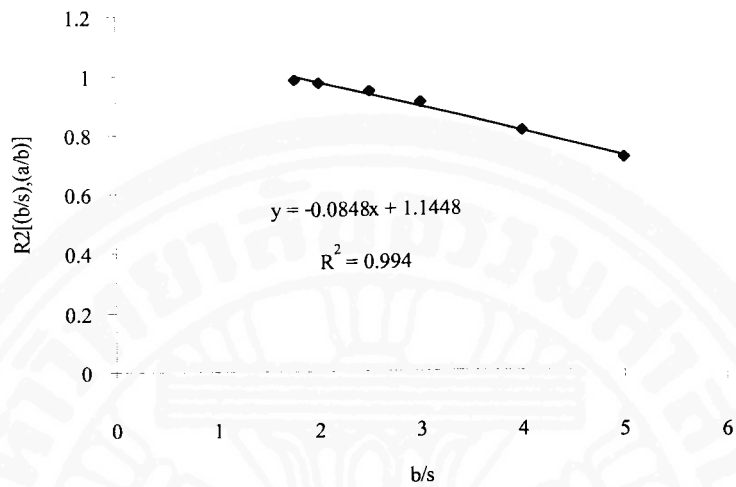
รูปที่ 1 แสดงขนาดของตัวอย่างและการจัดขั้ว

ตารางที่ 1 ค่าแก้ไข $R \left(\frac{b}{s}, \frac{a}{b} \right)$

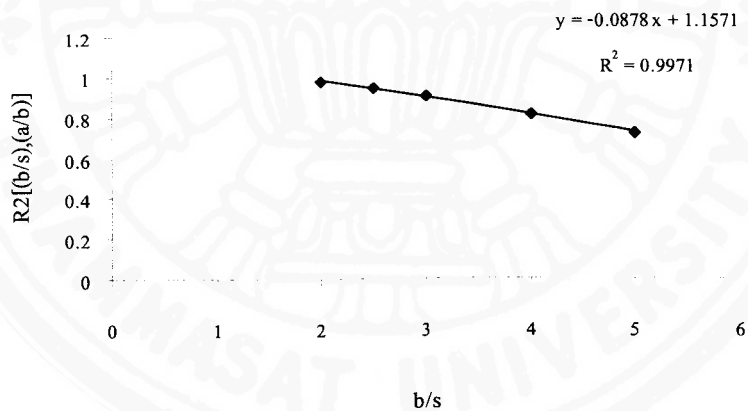
b/s	$a/b = 1$	$a/b = 2$	$a/b = 3$	$a/b = 4$
1			0.9988	0.9994
1.25			0.9973	0.9974
1.5		0.9859	0.9929	0.9929
1.75		0.9826	0.9850	0.9850
2		0.9727	0.9737	0.9737
2.5		0.9413	0.9416	0.9416
3	0.8192	0.9000	0.9002	0.9002
4	0.7784	0.8061	0.8062	0.8062
5	0.7020	0.7150	0.7150	0.7150

จากตารางที่ 1 ได้เลือกค่าของ $R \left(\frac{b}{s}, \frac{a}{b} \right)$ กับค่าของ b/s

ในช่วงที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับความเป็นเชิงเส้นมาเขียนเป็นกราฟตามรูปที่ 2 ทั้งนี้ได้เลือกเฉพาะอัตราส่วนของ $a/b = 2$ และ $a/b = 3$ เท่านั้น เนื่องจากขนาดของตัวอย่างไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไป ซึ่งง่ายในการเตรียม



(ก) $a/b = 2$



(ข) $a/b = 3$

รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าแก้สำหรับการวัดแบบ 4 ขั้วเชิงเส้น

สำหรับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่วัดด้วยเทคนิคของ
แวน เดอ พาว จะกำหนดขั้วจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์
ตามรูปที่ 3 และคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้จากสม
การ(2)

$$e^{-\pi d R_{AB,CD}/\rho} + e^{-\pi d R_{BC,DA}/\rho} = 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ d เป็นความหนาของชิ้นสาร

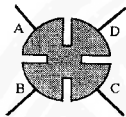
$$R_{AB,CD} = V_{CD}/I_{AB}$$

$$R_{BC,DA} = V_{DA}/I_{CB}$$

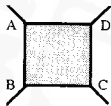
หรือจากสมการ(3)

$$\rho = \frac{\pi d}{4n2} \frac{(R_{AB,CD} + R_{BC,DA})}{2} f\left(\frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,DA}}\right) \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ $f\left(\frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,DA}}\right)$ หาได้จากกราฟในรูปที่ 4



หรือ



รูปที่ 3 การจัดขั้วสำหรับการวัดแบบ แวน เดอ พา

4. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์หลักที่ใช้ได้แก่

- (1) Programmable Current Source ของ Keithley model 220
- (2) Nanovoltmeter ของ Keithley model 181
- (3) Micrometer 0.001 mm.
- (4) Digital thermometer

4.1 การวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น

ในการทดลองต้องเตรียมที่จับยึดสารตัวอย่างพร้อมขั้วอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 5 ทั้งนี้ขั้วทั้ง 4 นั้น ดัดแปลงจากขั้วต่อที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้ว 2.476 มม.

แผ่นดีบุกที่ใช้ในการทดลองมีความหนาเฉลี่ย 151.4

ไมโครเมตร และมีขนาดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดของแผ่นดีบุกที่ใช้ทดลอง

ตัวอย่าง	ขนาด ($b \times a$) ซม.
S1	1x2
S2	1x3

วิธีการทดลองจะจ่ายกระแสเข้าทางขั้วที่ 1 และออกทางขั้วที่ 4 และวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วที่ 2 และ 3 โดยจ่ายกระแสไม่น้อยกว่า 5 ค่า แล้วนำค่าที่วัดได้มาเขียนกราฟระหว่าง I_{14} กับ V_{23}

4.2 วิธีการวัดด้วยเทคนิคของแวน เดอ พา

จัดเตรียมภาชนะสำหรับยึดขั้วดังรูปที่ 6 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทำจากโลหะชนิดเดียวกันเพื่อให้ผลของ Thermoelectric มีค่าน้อยที่สุด (ในที่นี้ใช้สวตทองแดง) และที่ด้านข้างของสารตัวอย่าง (กรณีตัวอย่างเป็นรูปเหลี่ยมควรแตะที่มุมทั้งสี่) ทั้งนี้จุดสัมผัสจะต้องเป็นแบบโอห์มิก (Ohmic contact) จากนั้นกำหนดชื่อของขั้ววัด เช่น A, B, C และ D โดยเรียงลำดับในทิศทวนเข็มนาฬิกาตามรูปที่ 3 หลังจากนั้นกำหนดนิยามของกระแสและแรงดันดังนี้

I_{AB} หมายถึง กระแสที่จ่ายเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว B และสำหรับกระแส I_{BC} ก็มีความหมายในลักษณะเดียวกัน โดยมีหน่วยเป็นแอมแปร์

V_{DC} หมายถึง ความต่างศักย์ที่วัดระหว่างขั้ว D และ C และสำหรับความต่างศักย์ V_{AD} ก็มีความหมายในลักษณะเดียวกัน โดยมีหน่วยเป็นโวลต์

ขนาดของกระแสที่จะจ่ายให้กับชิ้นสารตัวอย่างจะต้องทำให้เกิด Power dissipation ไม่เกิน 5 mW (ถ้าจะให้ดีไม่ควรเกิน 1 mW) [5] ซึ่งค่าจำกัดนี้จะทำให้สามารถหาค่าของกระแสได้โดยวัดความต้านทาน R ระหว่างขั้วที่อยู่ ตรงข้ามกัน เช่น ความต้านทานระหว่างขั้ว A กับ C หรือขั้ว B กับ D ดังนั้นกระแสที่จะจ่ายให้กับตัวอย่างกำหนดได้จาก

$$(1000R)^{-1/2} \leq I < (500R)^{-1/2} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อหาค่าจำกัดของกระแสได้แล้ว เริ่มทำการทดลองโดยจ่ายกระแส I_{AB} และวัดความต่างศักย์ V_{DC} จากนั้นสลับขั้วจ่ายกระแสเป็น I_{BC} และวัดความต่างศักย์ V_{AD} ซึ่งจะทำให้ได้

$$R_{AB,DC} = V_{DC} / I_{AB}$$

และ $R_{BC,AD} = V_{AD} / I_{BC}$

จากนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการ(2) หรือ (3)

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น

สำหรับแผ่นดินบุกตัวอย่าง S1 ซึ่งมีอัตราส่วน

$a/b = 2$ ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการวัด V_{23} ของ S1

I_{14} (mA)	V_{23} (mV)
2	0.00093
4	0.00144
6	0.00198
8	0.00256
10	0.00320
12	0.00379

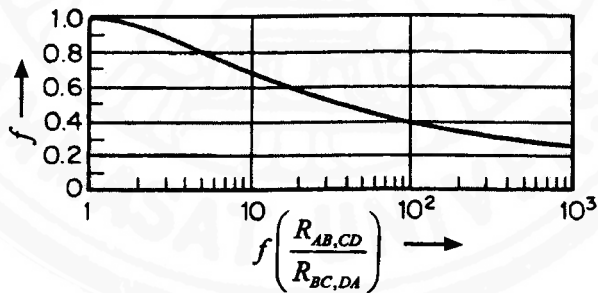
และสำหรับแผ่นดินบุกตัวอย่าง S2 ซึ่งมีอัตราส่วน

$a/b = 3$ ได้ผลดังตารางที่ 4

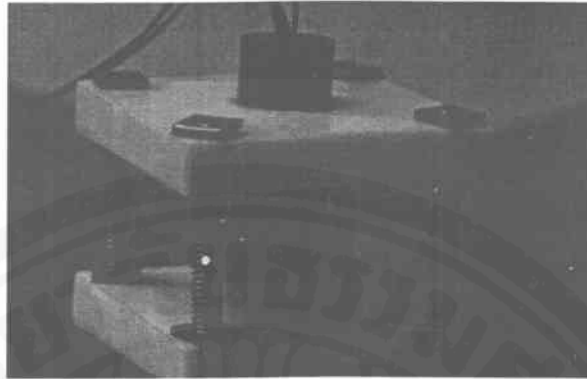
ตารางที่ 4 แสดงผลการวัด V_{23} ของ S2

I_{14} (mA)	V_{23} (mV)
2	0.00073
4	0.00129
6	0.00183
8	0.00238
10	0.00294
12	0.00349

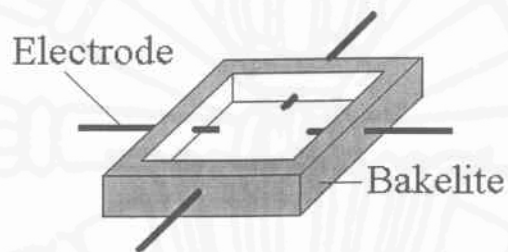
จากตารางที่ 3 และ 4 จะได้กราฟรูปที่ 7 และ 8



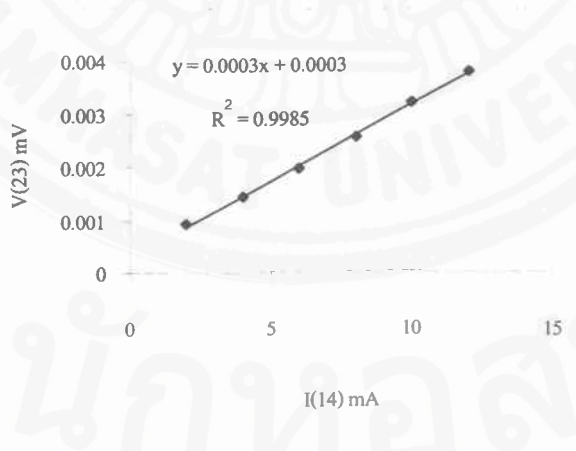
รูปที่ 4 กราฟของค่า $f\left(\frac{R_{AB,CD}}{R_{BC,DA}}\right)$



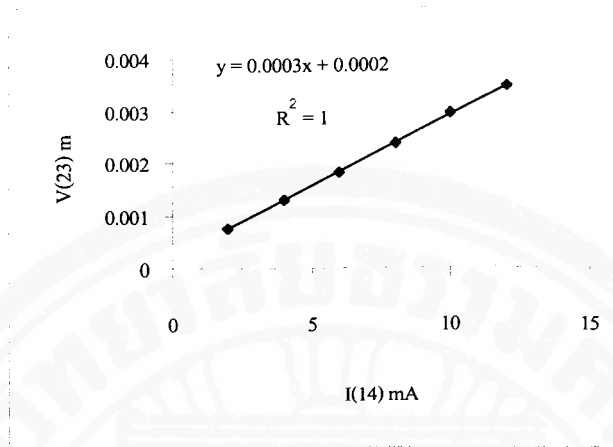
รูปที่ 5 ขั้วสำหรับการวัดด้วยเทคนิค 4 ขั้วเชิงเส้น ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 6 ภาชนะสำหรับการวัดด้วยเทคนิคของ แวน เดอ พา



รูปที่ 7 กราฟระหว่าง I_{14} และ V_{23} ของตัวอย่าง S1 โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น



รูปที่ 8 กราฟระหว่าง I_{14} และ V_{23} ของตัวอย่าง S2 โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

จากผลการทดลอง คำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างทั้งสองได้

$$\rho = 1.472 \times 10^{-7} \Omega.m$$

5.2 ผลการวัดด้วยวิธีของ แวน เดอ พาว

โดยใช้แผ่นดินุกขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เมื่อใช้มิเตอร์วัดความต้านทานระหว่างขั้ว AC และ BD ได้ค่าความต้านทานเฉลี่ย 0.4 โอห์ม ดังนั้น กระแสที่จะจ่ายให้กับตัวอย่างมีค่าระหว่าง 2-12 mA ทั้งนี้ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5 และ 6

และเมื่อคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าตามสมการ (2) จะได้

$$\rho = 1.372 \times 10^{-7} \Omega.m$$

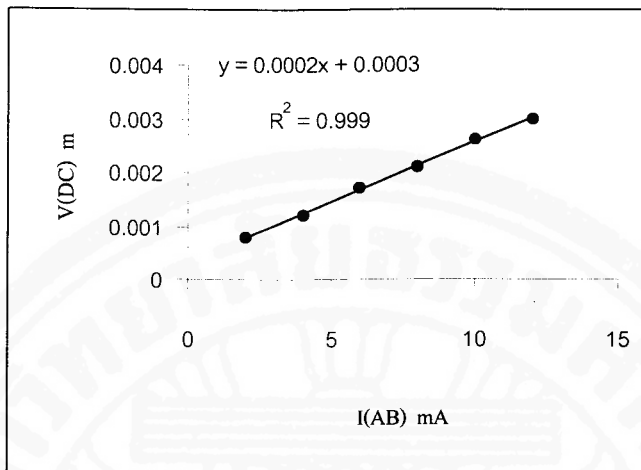
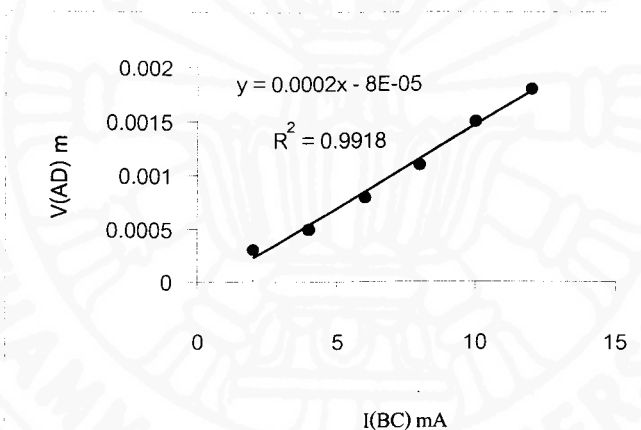
ตารางที่ 6 ผลการวัด $V(DA)$

$I(BC)$ mA	$V(DA)$ mV
2	0.0003
4	0.0005
6	0.0008
8	0.0011
10	0.0015
12	0.0018

ตารางที่ 5 ผลการวัด $V(DC)$

$I(AB)$ mA	$V(DC)$ mV
2	0.0008
4	0.0012
6	0.0017
8	0.0021
10	0.0026
12	0.0030

จากตารางที่ 5 และ 6 จะได้กราฟรูปที่ 9 และ 10

รูปที่ 9 กราฟระหว่าง I_{AB} และ V_{DC} รูปที่ 10 กราฟระหว่าง I_{BC} และ V_{AD}

6. สรุปผล

จากการทดลองวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นดินทุกทั้งสองวิธี พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันประมาณ 7% ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากค่าแก้ เมื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากทั้งสองวิธีนี้กับค่าที่มีผู้ทดลองมาแล้ว [6],[7] พบว่าที่อุณหภูมิ 25 °C นั้น ค่าที่วัดได้จากวิธีของ แวน เดอ พาว ใกล้เคียงกว่า โดยแตกต่างกันเพียง 1.4% ดังนั้นวิธีของ แวน เดอ พาว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาสร้างเครื่องวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบบ

อัตโนมัติต่อไป เนื่องจาก ไม่ขึ้นกับรูปร่างของตัวอย่างและไม่ต้องใช้ค่าแก้ ที่สำคัญให้ค่าที่แน่นอน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W.R.Runyan and T.J.Shsffner, **Semiconductor Measurements and Instrumentation**, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1998.
- [2] Four-Point-Probes, <http://www.four-point-probes.com/fpp.html>.

- [3] L.J. van der PAUW, **A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape** , Philips Res. Repts. 13. 1-9,1958.
- [4] HALDOR TOPSPE correction factors,
<http://www.four.point.probes.com/haldor.html>.
- [5] Hall Effect Measurements,
<http://www.eeel.nist.gov/812/hall.html>.
- [6] G.T. Dyos and T.Farrell (Edited), **ELECTRICAL RESISTIVITY HANDBOOK**, IEE Material and Devices Series 10, Peter Peregrinus Ltd.,London, 1992.
- [7] จิรัชชา วงษ์ใหญ่, การศึกษาปรากฏการณ์ขนส่งด้วยวิธีของแวน เดอ พาว, โครงการพิเศษ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,พ.ศ.2542.