

การเตรียมและวัดสมบัติเชิงฟิสิกส์ของวาริสเตอร์ที่ทำจาก สาร $\text{ZnO}+0.01\text{Sb}_2\text{O}_3$

ธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ¹, แวแยะ คาชล² และ นพมาศ จักรเจริญ³

Abstract

Panmatarith, T., Casol, W., and Juggaroen, N
Sample preparation and varistor physical properties measurement of
 $\text{ZnO}+0.01\text{Sb}_2\text{O}_3$
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2003, 25(1) : 133-140

The disc-shape $\text{ZnO}+0.01\text{Sb}_2\text{O}_3$ samples were prepared by standard ceramic techniques. The sample indicates white colour and was characterized by XRD. The prepared sample is varistor which shows break-down field strength of 87.18 V/mm and non-linearity exponent (α) of 38.179. It is worth noting that the high electric field strength of 5128.2 V/mm causes sample resistance changing. Sample resistance before and after poling were 189.13 k Ω and 6.516 k Ω , respectively.

Key words : varistor, $\text{ZnO}+0.01\text{Sb}_2\text{O}_3$

Materials Physics Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand.

¹ M.Sc. (Solid State Physics) รองศาสตราจารย์ ^{2,3} นักศึกษาริทยูชาติ (ฟิสิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail : pthongch@ratree.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 18 กุมภาพันธ์ 2545 รับลงพิมพ์ 24 กันยายน 2545

บทคัดย่อ

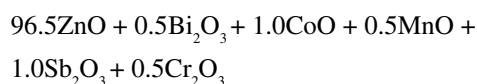
ธงชัย พันธุ์เมธาสุทธิ แวแย คาซล และ นพมาศ จักรเจริญ

การเตรียมและวัดสมบัติเชิงฟิสิกส์ของวาริสเตอร์ที่ทำมาจาก ZnO+0.01Sb₂O₃

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2546 25(1) : 133-140

บทความนี้นำเสนอการเตรียมสารก่อนรูปงาน ZnO+0.01Sb₂O₃ โดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน สารมีลักษณะสีขาวและศึกษาโครงแบบการจัดวางตัวของสารด้วย XRD สารที่เตรียมได้เป็นวาริสเตอร์ที่มีสนามไฟฟ้าเบรคดาวน์ที่ 87.18 V/mm และเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น (α) มีค่าเท่ากับ 38.18 สิ่งที่น่าสนใจจากการศึกษาคือความเข้มของสนามไฟฟ้าแรงสูงขนาด 5128.2 Vdc/mm สามารถทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารเปลี่ยนแปลง ความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนและหลังโพลิงมีค่า 189.13 k Ω และ 6.516 k Ω ตามลำดับ

วาริสเตอร์ (varistor) เป็นสารที่ความต้านทานขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าหรือเป็นตัวต้านทานที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า (voltage dependent resistor ,VDR) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) กับแรงดันไฟฟ้า (V) เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องตามสมการ $I = kV^\alpha$ โดยที่ k เป็นค่าคงที่และ α เป็นเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity exponent) โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับสนามไฟฟ้า (E) จะสอดคล้องตามสมการ $J = kE^\alpha$ สนามเบรคดาวน์ (break-down field, BE) มีความสัมพันธ์กับแรงดันเบรคดาวน์ (breakdown voltage, BV) ดังสมการ $BE = BV/L$ โดยที่ L เป็นความหนาของสาร สารจะมีความต้านทานไฟฟ้าสูงที่แรงดันไฟฟ้าต่ำและมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่แรงดันไฟฟ้าสูง พฤติกรรมแบบนี้ทำให้วาริสเตอร์สามารถป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินในวงจรหรือเครื่องใช้ไฟฟ้า (overvoltage protection) สารชนิดแรกที่ทำมาทำวาริสเตอร์มีสูตรเป็น SiC ซึ่ง α มีค่าน้อย สารชนิดที่สองซึ่งแสดงสมบัติของวาริสเตอร์ดีมาก คือ ZnO ที่ผสมกับตัวเติมต่างๆ (Moulson และ Herbert, 1990) สารที่ใช้ทำ เช่น



วาริสเตอร์สังกะสีออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) พฤติกรรมของวาริสเตอร์เกี่ยวข้องกับขอบเขตของเกรน (grain boundaries) วาริสเตอร์ที่

ใช้เตรียมได้โดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐาน (Standard ceramic techniques) ซึ่งมีอุณหภูมิการเผาเป็น 900/1180 °C (Buchanan, 1991) วาริสเตอร์ที่ใช้ในทางการค้ามีค่า $\alpha > 30$ (Fan, 1993)

วาริสเตอร์ได้รับการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนามาตามลำดับโดยนักวิจัยกลุ่มต่างๆ ดังนี้

Shr-Nan Bai (1993) ได้เตรียมวาริสเตอร์จากส่วนผสมของ 97.5 mol % ZnO กับ .5 mol % ของ (Bi₂O₃, Sb₂O₃, Co₃O₄, MnO, Cr₂O₃) เเผาที่ 1150 °C และพบว่า $\alpha = 52$

Fan (1993) ได้เตรียม ZnO+0.01Bi₂O₃ + 0.01 Ag₂O varistor วัดความสัมพันธ์ J vs E คำนวณค่า α จากสูตร $\alpha = (\log J_2 - \log J_1) / (\log E_2 - \log E_1)$ โดยกำหนด J₁ และ J₂ มีค่า 0.1 และ 1 mA/cm² ตามลำดับความสัมพันธ์ระหว่าง α กับปริมาณของ Ag₂O และพบว่า $\alpha = 35$

Bi-Shiou Chiou (1993) ได้เตรียม MnO₂-doped ZnO-Bi₂O₃ varistor และพบว่า $\alpha = 14$

Tomasevic-Canovic (1993) ได้เตรียม ZnO-based varistor และพบว่า $\alpha = 30$

Narayanan (1995) ได้เตรียม ZnO-Bi₂O₃-Co₃O₄ varistor วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าและระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า วัดค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่ ได้ $\alpha = 40$

Kuang (1995) ได้เตรียม ZnO-V₂O₅ varistor และพบสมบัติที่ไม่เป็นโอห์มมิก (non-ohmic property)

Kutty (1996) ได้เตรียม 94.5ZnO+3.0Bi₂O₃+

2.5CoO และวัดได้ค่า $\alpha = 65$

Meyer (1996) ได้เตรียมวัสดุผสมวาริเตอร์ที่มีแรงดันเบรคดาวน์ต่ำ low-voltage varistor composite วัสดุผสมนี้ผสมกันระหว่าง $ZnO+0.01Bi_2O_3$ กับโพลีเอทิลีน (polyethylene) วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้ค่า 4.0×10^{11} cm วัดเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ $\alpha \sim 10$ วัดค่าสนามเบรคดาวน์ และพบว่า $BE = 190$ V/m

Pianaro (1997) ได้เตรียม (98.95-x) mol% $SnO_2 + 1.00$ mol% $CoO + 0.05$ mol % $Nb_2O_5 + x$ % Bi_2O_3

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือต้องการเตรียมก้อนสารจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง ศึกษาสมบัติหลักของวาริเตอร์ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า หาแรงดันเบรคดาวน์ ค่าสนามเบรคดาวน์ หาสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ก็ได้ทดสอบผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้าของสารด้วย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมก้อนสารจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง

เตรียมสารโดยวิธีเทคนิคเซรามิกมาตรฐาน (Standard ceramic techniques) ซึ่งเป็นวิธีการที่รายงานโดย Buchanan (Buchanan, 1991) วัสดุเริ่มต้นที่ใช้เป็นผง ZnO และ Sb_2O_3 ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.5 % คำนวณน้ำหนักจากส่วนผสมของ $ZnO+0.01Sb_2O_3$ ซึ่งผงของสาร ผสมสารโดยการคนในครก นำผงใส่กระป๋องพลาสติกแล้ววางในเครื่องหมุนผสมสาร หมุนผสมเป็นเวลา 5 นาที หยอดสารยัดเหนียว PVA (polyvinyl alcohol) ผสมน้ำกลั่นเพื่อสะดวกในการอัดเป็นก้อน นำผงของสารใส่ในเบ้าอัดอัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (RIIK 25 tons) นำสารใส่เตาหลอมไฟฟ้า (temperature controller (FCR-13A-R/M) และ thermocouple type K (CA) (model JB-35)) เเผาครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 900 °C ในอากาศโดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/นาที และ อุณหภูมิเย็นไฟ 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นโดยการปิดเตา หลังจากนั้นนำไปเผาครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1100 °C โดยใช้อัตราการเพิ่ม

อุณหภูมิและอุณหภูมิเย็นไฟเหมือนกับตอนเผาครั้งแรกแล้วปล่อยให้เย็นโดยการปิดเตา

2. การศึกษาโครงสร้างของวัสดุด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำก้อนสารที่ผ่านการเผาไปถ่ายด้วยเครื่อง XRD (X-ray diffractometer) (Philips PW3710) เพื่อดูเฟส (phase) ของสารแอนโนดของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทำมาจาก Cu แรงดันเยเนอเรเตอร์ 40 kV กระแสเยเนอเรเตอร์ 35 mA มุมแบรกก์ที่ทำการถ่าย 2 θ อยู่ในช่วง 15.004° ถึง 84.995° และความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ (λ_{Cu}) เป็น 1.54060 Å

3. การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แรงดันเบรคดาวน์ สนามเบรคดาวน์ หาเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น (α) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

วัดความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางของสารที่เตรียมได้ด้วยไมโครมิเตอร์ ทำขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน (CW2400, ITW Chemtronics) กาวเงินที่ใช้ประกอบด้วย 2 หลอดหลอดที่ 1 (part A) ประกอบด้วยส่วนผสมของเงิน (silver) อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) และโมดิฟายด์อีพอกซีเอสเตอ์ (modified epoxy ester) หลอดที่ 2 (part B) ประกอบด้วยส่วนผสมของเงิน (silver) และ โมดิฟายด์อัลฟาติกอะมีน (modified aliphatic amine) นำเงินกับกาวจากหลอดทั้งสองผสมกันด้วยปริมาณที่เท่ากันแล้วทาลงบนผิวหน้าของสารตัวอย่างและอบด้วยเตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที ใช้ลวดของสายโทรศัพท์ต่อขาของอุปกรณ์โดยการบัดกรี

การจัดชุดการทดลองแสดงดังรูป (Figure 1) เปิดสวิตช์ แรงดันไฟฟ้าบ้าน 220 V จะมาเข้าวาริเตอร์แรงดันไฟฟ้าจากวาริเตอร์ถูกส่งต่อไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า 220 V-650 V แรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าจะมายังสารที่เตรียมเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยการปรับวาริเตอร์ใช้มัลติมิเตอร์ I (Fluke 45 Dual Display Multimeter) วัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสาร (V) ใช้มัลติมิเตอร์ II (AVD M890C+) วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสาร (I) บันทึกค่า V และ I แล้ว

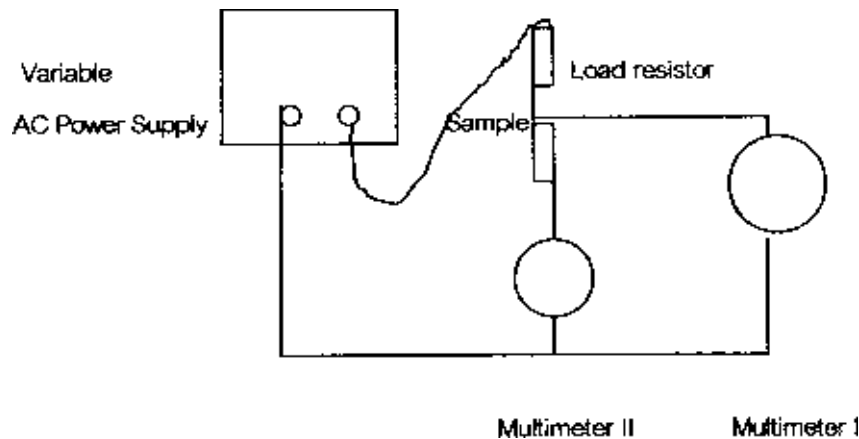


Figure 1. Current vs voltage, breakdown voltage and non-linearity coefficient measurement

Table 1. Comparison between ZnO+0.01Sb₂O₃ varistor and commercial varistor for breakdown voltage and non-linearity exponent

physical quantities	varistor (ZnO+0.01Sb ₂ O ₃)	Commercial varistor (14K471U)
Breakdown voltage (V)	170.00	357.00
Breakdown field (V/mm)	87.18	
Non-linearity exponent (α)	38.18	36.35
Leakage current (mA)	2.10	0.61
Operating voltage (V)	150.00	340.00

ทำการพลอตกราฟ หาแรงดันเบรคดาวน์ (BV) จำนวนสนามเบรคดาวน์ (BE) หาสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (α) และความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า หลังจากนั้นได้นำสมบัติเชิงฟิลิกส์ที่วัดได้จากสารตัวอย่างที่เตรียมจากสาร ZnO+0.01Sb₂O₃ เทียบกับค่าที่วัดได้จากวาริสเตอร์ที่ใช้ในเชิงการค้ารหัส 14K471U (Table 1) เพื่อต้องการแสดงให้เห็นว่าผลข้อมูลจะชี้ว่าสารที่เตรียมขึ้นมามีคุณสมบัติของวาริสเตอร์

4. การทดสอบผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้าของวาริสเตอร์ ZnO+0.01Sb₂O₃

เพื่อที่จะศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวาริสเตอร์ในขณะที่ได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง จึงได้วัดความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนทำโพลิงด้วย Fluke 45 Dual Display Multimeter แล้วประกอบแผงวงจรโพลิงพร้อมกับการทดสอบ

จนใช้งานได้ (Figure 2) นำสารที่ผ่านการทำขั้วด้วยกาวเงินไปรับสนามไฟฟ้าซึ่งทำได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า 10,000 V ไปที่ขั้วของสารเป็นเวลา 13 นาที 13 วินาที ในน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิห้อง การป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบพัลส์ หลังจากนั้นเอาแรงดันไฟฟ้าออกไป โพลาริเซชันบางส่วนจะค้างในสาร วัดความต้านทานไฟฟ้าของสารหลังจากที่ได้รับสนามไฟฟ้าและเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนและหลังจากที่ได้รับสนามไฟฟ้า

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ผลการเตรียมก่อนสารจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นผง

ความร้อนจากการเผาทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่จนกระทั่งเกิดการรวมตัวของสาร 2 ชนิดกลายเป็นสารสูตรใหม่ สารที่เตรียมได้เป็นก้อนรูปจานสีขาว สารมีความ

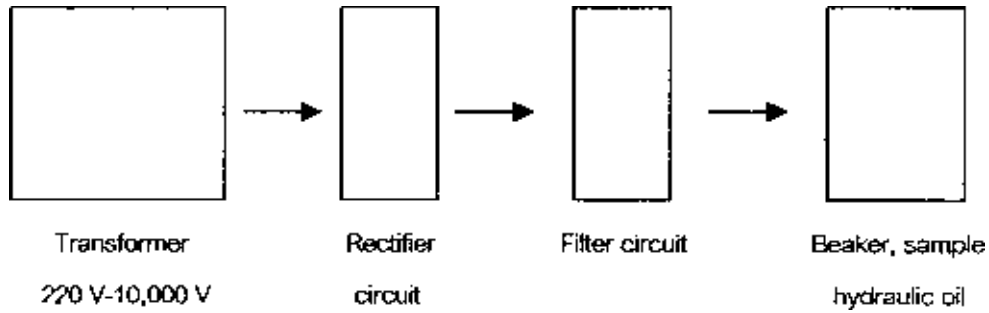


Figure 2. Block diagram of poling process

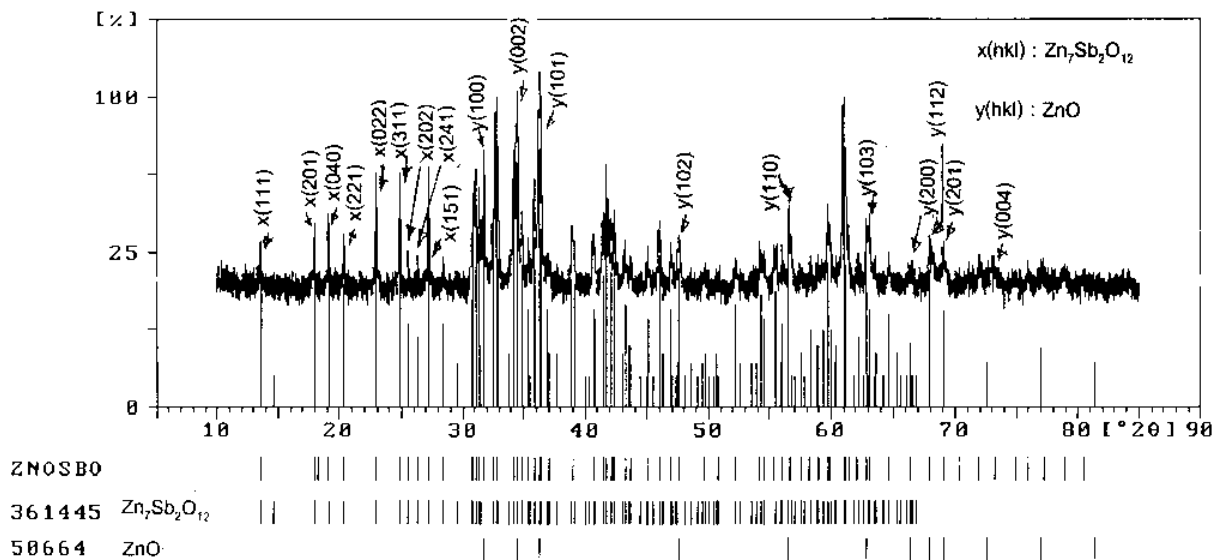


Figure 3. X-ray diffraction pattern

หนา 1.95 มม และเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.73 มม

(002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) และ (004)

2. ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อพิจารณาแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) พบว่าสารมี 2 เฟส คือ Zn₇Sb₂O₁₂ และ ZnO ผสมกันอยู่แสดงใน Figure 3 โครงสร้างผลึกของสาร Zn₇Sb₂O₁₂ อยู่ในระบบออร์โทโรอมบิค ระนาบของผลึกที่พบได้แก่ (111), (201), (040), (221), (022), (311), (202) และ (241) โครงสร้างผลึกของสาร ZnO อยู่ในระบบเอกซะโกนอล ระนาบของผลึกที่พบได้แก่ (100),

3. ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า แรงดันเบรคดาวน์ (breakdown voltage) สนามเบรคดาวน์ (breakdown field) เลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น (α) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าแสดงดัง Figure 4a และ 4b เลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิง

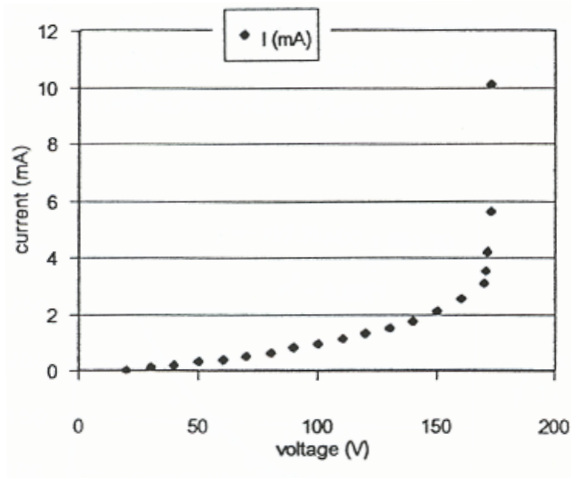


Figure 4a. Current vs voltage and breakdown voltage of ZnO+0.01Sb₂O₃ varistor

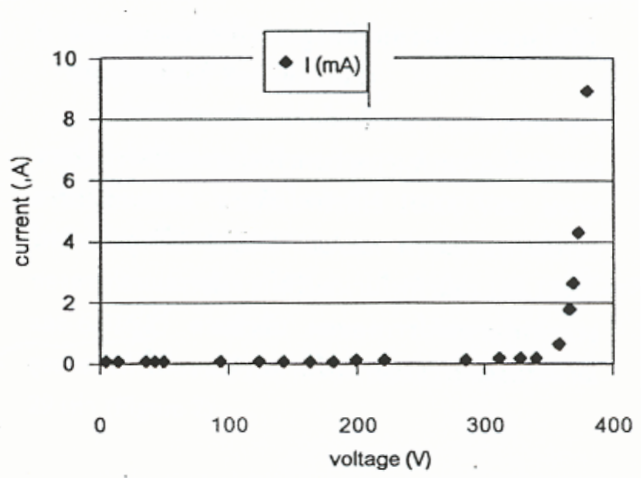


Figure 4b. Current vs voltage and breakdown voltage of commercial varistor (14K471U)

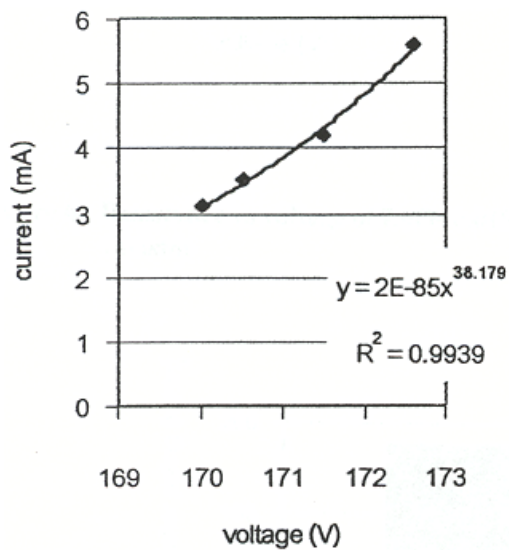


Figure 5a. Non-linearity exponent value (α) of ZnO+0.01Sb₂O₃ varistor

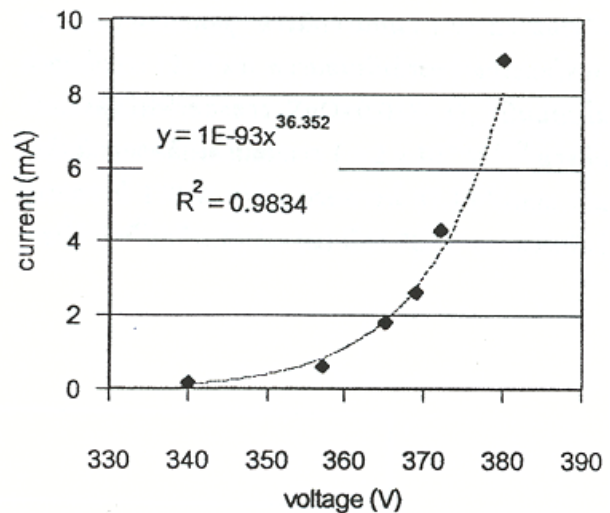


Figure 5b. Non-linearity exponent value (α) value of commercial varistor(14K471U)

เส้น (α) แสดงใน Figure 5a และ 5b สำหรับวาริสเตอร์ที่เตรียมขึ้นเอง (ZnO+0.01Sb₂O₃) และวาริสเตอร์ที่ใช้ในทางการค้า ตามลำดับ แรงดันเบรคดาวน์ สนามเบรคดาวน์ และเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงใน Table 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับแรงดัน

ไฟฟ้าแสดงใน Figure 6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในย่านก่อนเบรคดาวน์จะมีค่าน้อย เมื่อถึงจุดเบรคดาวน์พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของสารจะลดลงอย่างมาก กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านสารมาก สารจะร้อนเนื่องจากสามารถเก็บพลังงานความร้อนไว้ในตัวได้มากและสารจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็น

สีเหลือง ความต้านทานไฟฟ้าของสารมีค่าลดลงเร็วมาก ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสารมีค่า 170 V ซึ่งสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าเบรคดาวน์ของ Figure 4a

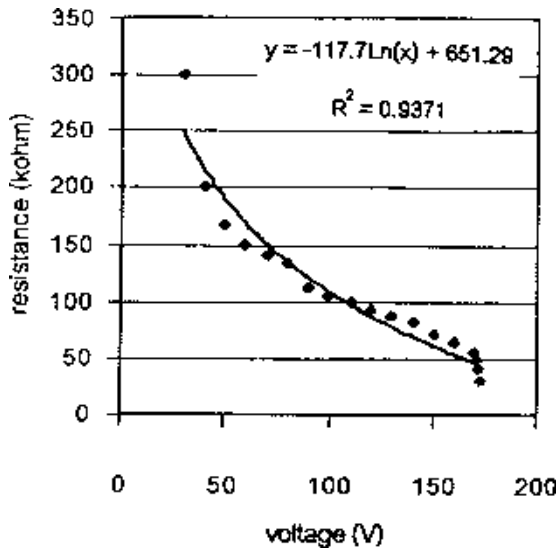


Figure 6. Resistance vs voltage of $ZnO+0.01Sb_2O_3$ varistor

4. ผลของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อความต้านทานไฟฟ้าของวาริสเตอร์ $ZnO+0.01Sb_2O_3$

เมื่อวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนและหลังจากที่สารได้รับสนามไฟฟ้าพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของสารเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 10000 Vdc สนามไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ 5128.2 Vdc/mm ความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนและหลังจากได้รับสนามไฟฟ้ามีค่า 189.13 k Ω และ 6.516 k Ω ตามลำดับ ผลของการให้สนามไฟฟ้าแรงสูงแก่สารทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารลดลงประมาณ 29 เท่า (Figure 7)

สรุปผลการทดลอง

สารก่อนรูปงาน $ZnO+0.01Sb_2O_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีเทคนิคเซรามิกส์มาตรฐานมีสีขาว แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าก่อนสารประกอบด้วย $Zn_7Sb_2O_{12}$ และ ZnO ผสมกันอยู่ สารมีความหนา 1.95 มม และเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.73 มม ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสาร $ZnO+0.01Sb_2O_3$ เป็นแบบไม่โอห์มมีกสอดคล้องตามสมการ $I = 2 \times 10^{-85} V^{38.179}$ แรงดันเบรคดาวน์ 170 V สนามเบรคดาวน์ 87.18 V/mm และเลขชี้กำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้น (α) มีค่า 38.18 ความสัมพันธ์

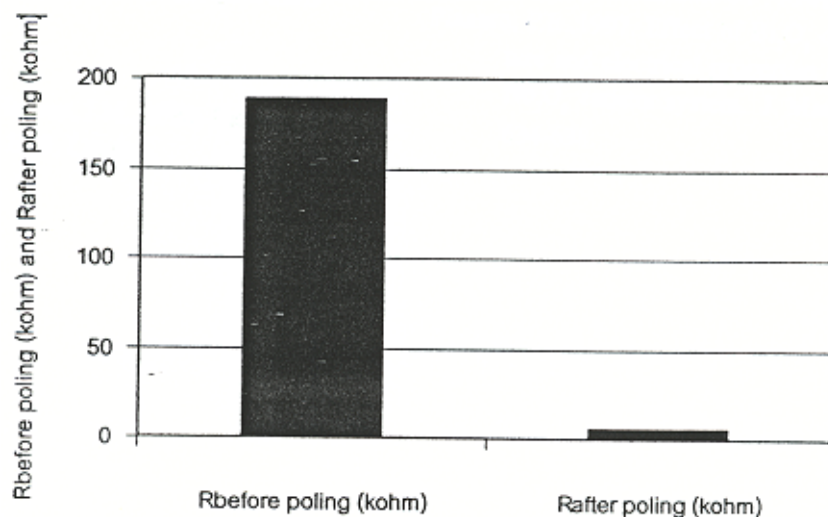


Figure 7. Comparison between resistance before and after poling with 10,000 Vac

ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสอดคล้องตาม $R = -117.7\ln(V)+651.29$ สารที่เตรียมได้นี้เป็นวาริสเตอร์ สาร ZnO ที่ยังไม่เติมตัวเติม (dopant) พบว่ามี α มีค่าน้อยและมีกระแสการรั่วมาก (Moulson และ Herbert, 1990) แต่เมื่อได้เติม 0.01Sb₂O₃ ลงไป พบว่า α มีค่ามากขึ้นและมีกระแสการรั่วลดลง

ความต้านทานไฟฟ้าของสารก่อนและหลังที่ได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูงซึ่งมีขนาด 5128.2 Vdc/mm มีค่า 189.13 k Ω และ 6.516 k Ω ตามลำดับ ผลของการให้สนามไฟฟ้าแรงสูงแก่สารทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารลดลงประมาณ 29 เท่า ผลการวัดลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่า ถ้านาวาริสเตอร์ไปใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินไป วาริสเตอร์จะมีสมบัติเปลี่ยนไปและจะเสียหายด้วย วาริสเตอร์ที่เตรียมได้นำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินของวงจร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการงานนักศึกษาของภาควิชาฟิสิกส์ ทุนทำงานแลกเปลี่ยนและทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินรายได้ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ประจำปี 2542-44 งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ หน่วยเครื่องมือกลาง ศูนย์เครื่องมือกลางและทุน STDB

เอกสารอ้างอิง

Moulson, A.J. and Herbert, J.M., 1990. *Electroceramics*, Chapman & Hall, London.

- Buchanan Relva, C., 1991. *Ceramic materials for electronics*, second edition, Merceel Dekker Inc., New York.
- Shr-Nan Bai, 1993. Influence of sintering temperature on electrical properties of ZnO varistors. *J. Appl. Phys.* 74 (1), 1 July : 695-703.
- Fan, J., 1993. Electrical properties and d.c. degradation characteristics of silver doped ZnO varistors. *J. Mater. Sci.* 28 : 1391-1395.
- Bi-Shiou Chiou., 1993. Electrical behaviour of the MnO₂-doped ZnO-Bi₂O₃ system. *J. Mater. Sci: Mater. In Elect.*, 4 : 38-42.
- Tomasevic_Canovic, M., 1993. Synthesis of ZnO-based varistor precursor powders by reaction spray process. *J. Mater. Sci.* 28 : 5211-5217.
- Narayanan, T.R., 1995. Influence of alkali ions in enhancing the nonlinearity ZnO-Bi₂O₃-Co₃O₄ varistor ceramics. *J. Appl. Phys.* 34 : 6125-6132.
- Kuang, Tyh., 1995. Microstructure and nonohmic properties of ZnO-V₂O₅ ceramics. *J. Appl. Phys.* 34 : 6452-6457.
- Kutty, T.R.N., 1996. Dependence of non-linearity coefficients on transition metal oxide concentration in simplified compositions of ZnO+Bi₂O₃+MO varistor ceramics (M = Co or Mn). *J. Mater. Sci : Mater. In Elect.* 7 : 137-148.
- Meyer, B., 1996. New low-voltage varistor composites. *J. Mater. Sci.* 31 : 5941-5944.
- Pianaro, P.R., 1997. Effect of Bi₂O₃ on the microstructure and electrical properties of the SnO₂.CoO. Nb₂O₅ varistor system. *J. Mater. Sci. Lett.* 16 : 634-638.