

การปรับปรุงคุณภาพการเคลือบฟิล์มบางโดยการประยุกต์ การออกแบบการทดลอง

Quality Improvement of Thin Film Coating Process by Applying Experimental Design

ชาญณรงค์ สายแก้ว (Charnnarong Saikaew)^{1*}

อนูรัตน์ วิศิษฐ์สรอรรถ (Anurat Wisitsoraat)²

รังสฤษฎ์ สุทธิคุณ (Rangsrit Sootticoon)³

สุจินต์ บุรีรัตน์ (Sujin Bureerat)⁴

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของบทความวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเคลือบและความขรุขระของฟิล์มบางของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนโด๊ป MoOx โดยใช้วิธีอาร์เอฟรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงในอุปกรณ์ก๊าซเซินเซอร์ การศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางโดยการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทั้งสี่ซึ่งได้แก่ กำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ ความดันในการเคลือบ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซติลีนและก๊าซออกซิเจน ผลตอบสนองของกระบวนการคือ อัตราการเคลือบฟิล์มบางและความขรุขระของฟิล์มบาง วิธีพื้นผิวผลตอบสนองและวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจถูกนำมาใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางและความขรุขระของฟิล์มบางมีค่าสูงสุดในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนโด๊ป MoOx ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนโด๊ป MoOx อยู่ที่กำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 152 วัตต์ ความดันในการเคลือบ 0.006 มิลลิบาร์ อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจน 0.42 และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซติลีนและก๊าซออกซิเจน 0.09 ด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจประมาณ 74 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้ทำให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มบางเป็น 7.9 นาโนเมตรต่อนาทีและความขรุขระของฟิล์มบางเป็น 41.9 นาโนเมตร

Abstract

The objective of this paper is to study the effect of process factors on deposition rate and surface roughness of carbon doped MoOx thin film coating deposition by the radio frequency reactive sputtering method for production and process design and development of a gas sensor. Central composite design (CCD)

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² นักวิจัย 3 ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

³ บัณฑิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Corresponding author, e-mail: charm_sa@kku.ac.th

is used by varying four process factors including radio frequency (R.F.) power, operating pressure, argon to oxygen flow ratio, and carbon doping gas to oxygen flow ratio. The responses include deposition rate and surface roughness. Response surface methodology (RSM) with desirability function is used to determine an optimum operating condition that simultaneously maximizes the deposition rate and surface roughness of the carbon doped MoOx thin film coating process. The results show that the optimal operating condition for the carbon doped MoOx thin film coating process is R.F. power of 152 watts, operating pressure of 0.006 mbar, argon-oxygen flow ratio of 0.42, and carbon doping gas flow ratio of 0.09 giving an overall desirability of approximately 74%. The optimal operating condition produces a maximum deposition rate of 7.9 nm/minute and a maximum surface roughness of 41.9 nm.

คำสำคัญ: กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง, วิธีอาร์เอฟรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง, การออกแบบการทดลอง

Keywords: thin film coating deposition, radio frequency reactive sputtering, design of experiments

บทนำ

โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO₃) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถตอบสนองก๊าซประเภทแอลกอฮอล์ได้ดี (เช่น เอทานอล เมทานอล) มีความเสถียรสูงเมื่อมีการดูดซับก๊าซ สมบัติด้านการนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของก๊าซ (Ferroni et al., 1998) ทำให้มีการนำโมลิบดีนัมไตรออกไซด์มาประยุกต์ใช้ในการทำอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซด้วยการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ลงบนวัสดุที่ทำก๊าซเซนเซอร์ (Ramana et al., 2007) เช่น อุปกรณ์ตรวจจับปริมาณออกซิเจนในเตาเผา อุปกรณ์วัดปริมาณออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสีย อุปกรณ์วัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาป หรืออุปกรณ์วัดปริมาณอัลกอฮอล์จากลมหายใจของผู้ดื่มสุราแล้วขับรถ เป็นต้น การสร้างและพัฒนาอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องศึกษาเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการนำวัสดุที่มีสมบัติตรงตามลักษณะการใช้งานนั้นๆ

การทำก๊าซเซนเซอร์จากฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธีเช่น วิธีโซลเจล (Solgel) (Hai et al, 2007) วิธีระเหยสาร (Evaporation) (Wang and Zhang, 2001) วิธีใช้ไอออนช่วย (Ion-assisted deposition) (Bhattacharyya et al., 2000) และ

วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นต้น วิธีสปัตเตอร์ริงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยม เนื่องจากการยึดเกาะของฟิล์มกับวัสดุรองรับที่ดีและสามารถควบคุมกระบวนการได้ (Tien and Li, 2006) การสปัตเตอร์ริงเกิดจากการคายประจุ (Discharge) ไฟฟ้าของก๊าซภายใต้บรรยากาศความดันต่ำประมาณ 10^{-6} - 10^{-2} มิลลิบาร์ เกิดไอออนของก๊าซวิ่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบที่ต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงประมาณ 400-1000 โวลต์ ไอออนของสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซจะหลุดและวิ่งด้วยความเร็วสูงเคลือบลงบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ เกิดเป็นลักษณะฟิล์มบาง

จากสมบัติของโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ที่มีการตอบสนองต่อก๊าซได้ดี จึงมีผู้ทำการศึกษาและวิจัยประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดก๊าซอย่างกว้างขวาง Mutschall et al. (1996) ศึกษาการตอบสนองต่อก๊าซ NH₃ ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ซึ่งทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการ Radio frequency planer magnetron reaction sputtering โดยมีเป้าเคลือบเป็นโมลิบดีนัม 99.95% ภายใต้ความดัน 0.9 Pa สัดส่วน O₂:Ar อยู่ระหว่าง 20-100% กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ 360 วัตต์ โดยมีฐานรองรับเป็นซิลิกอน จากการศึกษาในการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซ H₂, CH₄, NH₃, NO₂, CO, SO₂ ภายใต้อุณหภูมิการทำงาน 250-470 °C พบว่า CO, SO₂, CH₄ มีการตอบสนอง

ต่อก๊าซไม่ดี ขณะที่ NH_3 มีการตอบสนองต่อก๊าซได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิสูงสุด 425°C ในปีค.ศ. 2000 Comini et al. ศึกษาโครงสร้างและการตอบสนองต่อก๊าซ CO ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ซึ่งทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการแตกต่างกัน 2 วิธีคือวิธี Radio frequency reactive sputtering ที่ผ่านการอบที่ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวิธีการ Solgel ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $400-700^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การศึกษาพบว่า การตอบสนองต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของฟิล์มบางจากการสปีดเตอร์ริงทำได้อย่างรวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าหนึ่งนาทีก่อน

นอกจากการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซ CO ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์แล้ว ยังพบว่ามีการนำไปทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซ NO_2 โดย Ferroni et al. (1998) ศึกษาโครงสร้างและการตอบสนองต่อก๊าซ NO_2 ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ โดยทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี Radio frequency reactive sputtering ซึ่งมีเป้าเคลือบเป็นโมลิบดีนัม 99.5% ภายใต้อุณหภูมิ 4×10^{-3} มิลลิบาร์ ใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ 7.5×10^4 วัตต์ต่อตารางเมตร บนพื้นผิวรองรับซิลิกอนที่อุณหภูมิ 300°C จากการศึกษพบว่า ในการตอบสนองต่อก๊าซ NO_2 เมื่ออุณหภูมิในการทำงานเพิ่มขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าจะลดลง ขณะที่ผลของการตอบสนองต่อก๊าซเมื่อมีความหนาแน่นของ NO_2 ต่างกันพบว่าที่ความหนาแน่นของ NO_2 มากขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ในปีค.ศ. 2001 Imawan et al. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ด้วยวิธี Radio frequency reactive sputtering แบบ Single layer และ Multi layer พบว่าเวลาของการตอบสนองต่อก๊าซ และเวลาการคืนตัวของฟิล์มบางแบบ Multi layer สามารถทำได้ดีกว่าฟิล์มบางแบบ Single layer อย่างมีนัยสำคัญ ปีค.ศ. 2003 Comini et al. ศึกษาผลการตอบสนองต่อเอทานอลของฟิล์มบาง ที่ทำจากส่วนผสมของโมลิบดีนัมและไทเทเนียม โดยสร้างฟิล์มบางด้วยวิธี R.F. Reactive sputtering เป้าสารเคลือบทำจากส่วนผสมของโมลิบดีนัมและไทเทเนียม 2 ชนิด จากการศึกษพบว่า เมื่อทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าในการตอบสนอง

ต่อเอทานอล ขึ้นกับค่าความนำไฟฟ้า โดยที่ฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมมากกว่าโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิการทำงาน $200-300^\circ\text{C}$ มีการตอบสนองต่อเอทานอลได้รวดเร็ว ขณะที่ฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนของโมลิบดีนัมมากกว่าไทเทเนียม มีเวลาในการคืนตัวที่เร็วกว่าเวลาตอบสนองและมีค่าตอบสนองที่สูงมาก ทำให้ทราบว่าโมลิบดีนัมไดรอกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพอย่างมากในการทำอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส นอกจากนี้ Ramana et al. (2007) ศึกษาการเคลือบและศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ด้วยวิธี DC Reactive sputtering ภายใต้อุณหภูมิของอุณหภูมิของแผ่นรองรับ (Substrate temperature) $350-500^\circ\text{C}$ โดยมีเป้าสารเคลือบเป็นโมลิบดีนัม 99.95% ภายใต้อุณหภูมิ 5×10^6 ทอร์สตัน $\text{O}_2:\text{Ar}$ อยู่ระหว่าง 20-100% กำลังไฟฟ้าในการเคลือบ 170 วัตต์ จากการศึกษพบว่าอุณหภูมิแผ่นรองรับที่ต่ำกว่า 350°C จะไม่พบผลึกของโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ขณะที่อุณหภูมิแผ่นรองรับที่มากกว่า 500°C จะทำให้แผ่นฟิล์มระเหยจากแผ่นรองรับ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 445°C

จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าว จะเห็นว่าปัจจัยของกระบวนการสปีดเตอร์ริง เช่น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน ความดันขณะทำการสปีดเตอร์ริง เป็นต้น มีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง เงื่อนไขที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของฟิล์มบางอันส่งผลถึงความสามารถในการตอบสนองต่อก๊าซของโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ หากสภาวะในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไม่เหมาะสม ย่อมทำให้ฟิล์มบางที่เกิดขึ้นมีลักษณะและคุณภาพที่แตกต่างกันไป เช่น ความหนาของแผ่นฟิล์มไม่สม่ำเสมอ การตอบสนองต่อก๊าซไม่รวดเร็ว เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวทำได้ช้า เป็นผลให้เกิดของเสีย และต้องทำการผลิตใหม่ ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทั้งด้านพลังงาน วัตถุดิบและเวลา ซึ่งในเชิงอุตสาหกรรมของเสียและความสิ้นเปลืองเป็นสิ่งที่พึงหลีกเลี่ยง

จากปัญหาความแปรปรวนของกระบวนการ

เคลือบฟิล์มบางดังกล่าวจึงต้องมีการพิจารณาแนวทางเพื่อลดความแปรปรวนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางลง ด้วยการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง เพื่อให้ได้กระบวนการที่มีความน่าเชื่อถือโดยมีความแปรปรวนในกระบวนการน้อยที่สุดและฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพที่ดี ทั้งความไวในการตอบสนองต่อก๊าซ เวลาการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัว เทคนิคการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiments) และวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นเครื่องมือและเทคนิคที่สามารถทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเคลือบฟิล์มบางและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริงได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ที่ใช้ในอุปกรณ์การตอบสนองต่อก๊าซ เพื่อให้ได้สภาวะของกระบวนการที่มีความน่าเชื่อถือโดยมีความแปรปรวนในกระบวนการน้อยที่สุดและฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพที่ดี โดยประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง และวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง



ก)

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ทำการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอพรีแอกทีฟแมกนีตรอนสปีดเทอริง มีเป้าของสารเคลือบเป็นโมลิบดีนัม 99% ฐานรองรับเป็นแผ่นแก้ว (Glass) มีสัดส่วนของ $O_2:Ar$ อยู่ระหว่าง 20-100% และมีการได้ปก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) ในกระบวนการได้ใช้เครื่องมือวิจัยจากห้องปฏิบัติการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) นอกจากนี้ ยังศึกษาลักษณะความหนาและความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยเครื่องมือ Interferometric surface profiler ของบริษัท Polytech รุ่น SP4000 จากห้องปฏิบัติการระบบจุลภาคไฟฟ้าเครื่องกลนาโนอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์มหรือศึกษาพื้นผิวของวัสดุ เช่น ร่อง หรือเนิน โดยอาศัยหลักการของการแทรกสอดของแสง ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) เครื่องจะคำนวณระยะที่เปลี่ยนแปลงไปของหัวกดในแนวตั้งด้วยกล้องแล้วแสดงผลที่ได้ออกมาเป็นกราฟความหนาของบริเวณที่ทำการวัด



ข)

รูปที่ 1. ก) เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเคลือบฟิล์มบาง ข) เครื่องวัดความเรียบผิว Interferometric surface profiler

การศึกษาความขรุขระผิว (Surface roughness) ของฟิล์มบางสามารถใช้เครื่องมือ Scanning electron microscope (SEM) ของ Hitachi รุ่น S-3400N จากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของวัสดุต่างๆ และสามารถสร้างภาพสองมิติที่มีกำลังขยายสูงมากถึงระดับอะตอม

การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้หลักการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design: CCD) การออกแบบส่วนผสมกลางเป็นเทคนิคหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองที่ได้รับความนิยมในการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่ใช้การออกแบบการทดลอง (Myers and Montgomery, 2002) โดยทั่วไปแล้ว การออกแบบส่วนผสมกลางประกอบด้วย 2^k แฟกตอเรียลที่มี 2^k หน่วยทดลอง, 2^k หน่วยทดลองในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ n_c หน่วยทดลองที่จุดศูนย์กลางซึ่งมักจะมีการกระทำซ้ำ 4-6 หน่วยทดลองที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง วิธีพื้นผิวผลตอบสนองเป็นเทคนิคที่ใช้ความรู้ด้านคณิตศาสตร์และสถิติมาทำการสร้างรูปแบบคณิตศาสตร์และทำการวิเคราะห์ (Myers and Montgomery, 2002) ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดในการมีผลตอบสนองหลายตัว(Multi-response optimization) ซึ่งนำเสนอโดย Derringer and Suich (1980) หลักการพื้นฐานของฟังก์ชันความพึงพอใจ คือการแปลงผลตอบสนองหลายตัวให้เป็นผลตอบสนองเพียงหนึ่งตัว โดยทำการแปลงค่าผลตอบสนองแต่ละตัว (y_j) ให้เป็นค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยว (Individual desirability function: d_j) และทำการแปลงค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจรวม (Overall desirability function: D) แล้วจึงทำการหาค่าสูงสุดของ

D การแปลงค่าให้เป็นค่าฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวในกรณีที่ต้องการค่าสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{y_i - low}{high - low} \right), & low \leq y_i \leq high, \\ 0, & otherwise, \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ $high$ คือค่าขอบเขตบน แล low คือค่าขอบเขตล่าง เมื่อได้ฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยวแต่ละค่าแล้ว จึงทำการแปลงค่าเป็นฟังก์ชันความพึงพอใจรวม (D) ดังสมการที่ (2) แล้วจึงทำการหาสูงสุดของ D

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/n} \quad (2)$$

โดยที่ D คือค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวม d_j คือฟังก์ชันความพึงพอใจเดี่ยว และ n คือ จำนวนผลตอบสนอง

ในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการทดลองซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่เกิดขึ้นนี้ควรจะมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Propagation of error, POE) เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ โดยที่มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองน้อยที่สุด วิธีการวิเคราะห์นี้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต ที่คาดว่าจะต้องให้มีความผันแปรของกระบวนการน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงต่อความต้องการของลูกค้ามากที่สุด (Anderson and Whitcomb, 2005)

กำหนดให้ความแปรปรวนของผลตอบสนองคือ $Var(y)$ ความแปรปรวนระดับของปัจจัย $\sigma_{x_i}^2$ และความแปรปรวนจากการทดลองคือ σ_e^2 ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (POE) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$POE = \sqrt{Var(y)} \quad (3)$$

ซึ่ง $Var(y)$ แสดงในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\text{Var}(y) = \nabla^T \Sigma \nabla + \sigma_e^2$$

โดยที่

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{x_2}^2 \end{pmatrix}$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{Var}(y) &= \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} & \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{x_2}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} \end{pmatrix} + \sigma_e^2 \\ &= \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \sigma_e^2 \end{aligned}$$

ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนถูกนำมาพล็อตพื้นผิวผลตอบสนองและแบบเส้นโครงร่าง โดยพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติบริเวณที่แบนที่สุดหรือราบที่สุดจะเป็นบริเวณที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (Anderson and Whitcomb, 2005) ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง นอกจากนี้ ยังแสดงความแปรปรวนระดับของปัจจัย ที่ใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 1. ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง และความแปรปรวนระดับของปัจจัย

Factor	Low level	High level	σ_{xi}^2
A: R.F. Power (W)	100	200	20
B: Pressure (mbar)	0.004	0.008	0.001
C: Ar:O ₂	0.25	0.667	0.05
D: C ₂ H ₂ :O ₂	0.053	0.25	0.02

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัยทั้งสี่ที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลือบและค่าความขรุขระของพื้นผิวในการเคลือบฟิล์มบางโพลีไดนิม ไตรออกไซด์ด้วยวิธีการอาร์เอฟรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ได้แก่ กำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ (R.F. power) ความดัน (Pressure) อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน (Ar:O₂) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนและออกซิเจน (C₂H₂:O₂) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองในระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยทำการสร้างรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการผลิตและผลตอบสนองทั้งสอง สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนรูปแบบจำลองของอัตราการเคลือบพบว่ามีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ปัจจัยหลักสามปัจจัยคือกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ (ปัจจัย A) อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน (ปัจจัย C) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนและออกซิเจน (ปัจจัย D) มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลือบ นอกจากนี้ อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัย A และปัจจัย D มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลือบเช่นกัน สมการแบบจำลองของอัตราการเคลือบฟิล์มบางแสดงดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= 9.22 + 3.45A + 0.085B + 0.43C + 1.59D \\ &+ 1.05AD + 0.69BC - 0.47A^2 - 0.45C^2 - 0.58D^2 \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ \hat{y}_1 คืออัตราการเคลือบฟิล์มบางโดยเฉลี่ยที่สามารถทำนายได้จากแบบจำลองสมการที่ (4) เพื่อวัดความเหมาะสมของรูปแบบสมการข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) มีค่าเท่ากับ SS_{Model} / SST นั่นคือ $R^2 = (353.55/370.97) \times 100 = 95.30\%$ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted R²) มีค่าเท่ากับ $1 - (MSE/MST)$, $MST = SST/n - 1$ นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว

$R^2_{adj} = 1 - (0.87/(370.97)) \times 100 = 93.20\%$ แสดงให้เห็นว่ามากกว่า 90% ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรที่เป็นปัจจัยในกระบวนการผลิต

ทำนองเดียวกัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนรูปแบบจำลองของความขรุขระของพื้นผิวในการเคลือบฟิล์มบางพบว่ามีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ปัจจัยหลักสองปัจจัยคือกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ (ปัจจัย A) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทีลีนและออกซิเจน (ปัจจัย D) มีอิทธิพลต่อความขรุขระของพื้นผิว นอกจากนี้ อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัย A และปัจจัย D และระหว่างปัจจัย B และปัจจัย C มีอิทธิพลต่อความขรุขระของพื้นผิวเช่นกัน สมการแบบจำลองของความขรุขระของพื้นผิวแสดงดังสมการที่ (5)

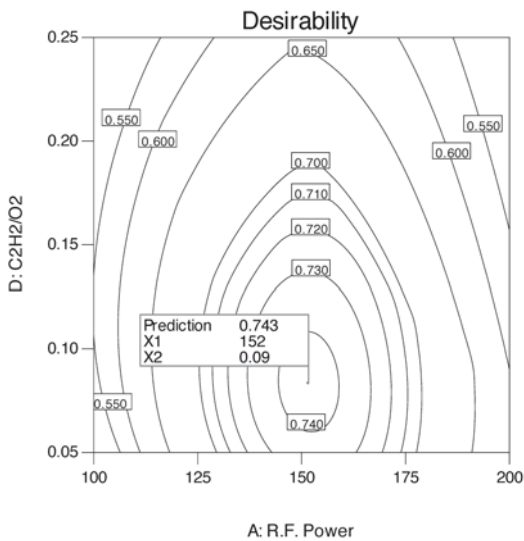
$$\hat{y}_2 = 38.25 - 2.66A + 0.93B + 0.20C - 3.97D - 2.10AC - 2.08BC - 3.07A^2 + 1.90D^2 \quad (5)$$

โดยที่ \hat{y}_2 คือความขรุขระของพื้นผิวโดยเฉลี่ยที่สามารถทำนายได้จากแบบจำลองสมการที่ (5) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ SS_{Model}/SST ดังนั้น $R^2 = (968.64/1281.23) \times 100 = 75.60\%$ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted R^2) มีค่าเท่ากับ $1 - (MSE/MST)$, $MST = SST/n - 1$ นั่นคือ $R^2_{adj} = 1 - (14.89/(1281.23/29)) \times 100 = 66.30\%$ แสดงให้เห็นว่า มากกว่า 65% ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรที่เป็นปัจจัยในกระบวนการผลิต สังเกตว่าถึงแม้ค่า R^2 และ Adjusted R^2 ของแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิวมีค่าน้อยกว่าค่าทั้งสองของแบบจำลองอัตราการเคลือบก็ตาม แต่ค่าทั้งสองก็มีความแตกต่างกันน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง

การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimal operating condition) ของอัตราการเคลือบและความขรุขระของพื้นผิวสามารถดำเนินการโดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง โดยใช้สมการรูปแบบจำลองของผลตอบสนองทั้งสอง (สมการที่ (4) และ (5)) การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert[®] Version 7.0 (Stat-Ease, 2005) สถานะที่เหมาะสมที่ทำให้ผลตอบสนองมีความผันแปรน้อยที่สุดไม่จำเป็นต้องอยู่ในระดับของปัจจัยที่ให้ค่าผลตอบสนองมีค่าดีที่สุด เปรียบเสมือนยอดเขาที่มีความราบเรียบซึ่งมีความผันแปรของความสูงชันน้อยที่สุด เพื่อให้การวิเคราะห์บรรลุวัตถุประสงค์คือ การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของระดับปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองทั้งคู่มีค่าสูงที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ผลตอบสนองมีค่าความผันแปรน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถกระทำร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) โดยการกำหนดให้ ค่าอัตราการเคลือบฟิล์มและค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางมีค่ามากที่สุด ในขณะที่เดียวกัน ต้องทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของอัตราการเคลือบฟิล์มและค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางมีค่าน้อยที่สุด

รูปที่ 2 แสดงเส้นโครงร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจรวมหลังจากการวิเคราะห์ POE ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert[®] Version 7.0 (Stat-Ease, 2005) พบว่าสถานะเหมาะสมที่สุดคือกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ (ปัจจัย A) มีค่า 152 วัตต์ ความดัน (ปัจจัย B) มีค่า 0.006 mbar อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน (ปัจจัย C) มีค่า 0.42 และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทีลีนและออกซิเจน (ปัจจัย D) มีค่า 0.09 อัตราการเคลือบและความขรุขระของพื้นผิวมีค่าสูงสุดคือ 7.9 nm/min และ 41.9 nm ตามลำดับ โดยที่ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจรวมเท่ากับ 74%



รูปที่ 2. เส้นโครงร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจรวม หลังจากการวิเคราะห์ POE

เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือจากการทดลองและผลการวิเคราะห์ที่ได้ การทดลองยืนยันผล (Confirmation experiment) เป็นสิ่งที่ต้องปฏิบัติ ในการทดลองเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองคือมีค่าอัตราการเคลือบและค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางที่สูงที่สุด ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเคลือบฟิล์มบางที่สภาวะเหมาะสมที่สุดโดยกระทำ การเคลือบฟิล์มบางเป็นจำนวน 25 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการเคลือบเท่ากับ 8.26 nm/min และ 0.61 nm/min ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 42.94 nm และ 3.57 nm ตามลำดับ การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าอัตราการเคลือบและค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ (Antony, 2003)

$$CI_{DR} = 8.26 \pm 2.064 \left(\frac{0.61}{\sqrt{25}} \right) \quad (6)$$

$$= 8.26 \pm 0.25 = (8.01, 8.51)$$

$$CI_{SR} = 42.94 \pm 2.064 \left(\frac{3.57}{\sqrt{25}} \right) \quad (7)$$

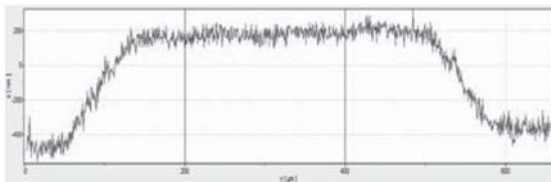
$$= 42.94 \pm 1.47 = (41.47, 44.41)$$

การคำนวณระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการเคลือบฟิล์มซึ่งได้จากผลการทดลองยืนยันผล มีค่าอยู่ระหว่าง 8.01 ถึง 8.51 nm/min ค่าที่ได้ทำนายไว้มีค่า 7.9 nm/min ซึ่งอยู่นอกความเชื่อมั่นที่นี้อาจเกิดความผิดพลาดระหว่างการทดลองเพราะบางปัจจัยควบคุมได้ค่อนข้างยาก แต่ค่าที่ได้สามารถยอมรับได้เนื่องจากระดับปัจจัยที่ได้ทำนายเอาไว้เมื่อทำการทดสอบจริงได้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ทำนาย ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้อัตราของการเคลือบฟิล์มสูง การคำนวณระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางซึ่งได้จากผลการทดลองยืนยันผล มีค่าอยู่ระหว่าง 41.47 ถึง 44.41 nm ขณะที่ค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางที่ทำนายไว้มีค่า 41.90 nm ซึ่งอยู่ในระดับความเชื่อมั่นที่ได้คำนวณไว้ แสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์และกระบวนการผลิตที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจากผลการทดลองยืนยันผลเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าสภาวะของระดับปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีค่าอัตราการเคลือบและค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบางสูงสุดภายใต้ความผันแปรของผลตอบสนองทั้งสองน้อยที่สุดเป็นผลทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพ

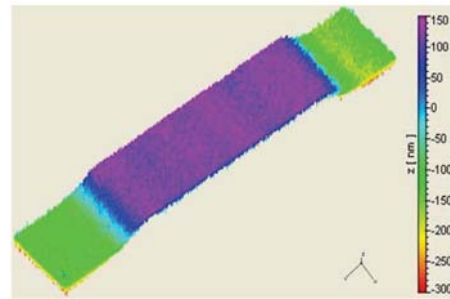
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบาง

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางเป็นการวิเคราะห์ลักษณะของภาพหน้าตัดและรูปร่างสามมิติของฟิล์มบางที่ระดับปัจจัยต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ทำนายไว้ ว่าฟิล์มบางมีความขรุขระที่มากและความหนาสม่ำเสมอที่ระดับ 300 nm หรือไม่ โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยคือกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ และ

อัตราส่วนของก๊าซอะเซทิลีนกับออกซิเจน เนื่องจากกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ และอัตราส่วนของก๊าซอะเซทิลีนกับออกซิเจนส่งผลอย่างมากต่ออัตราการเคลือบและความขรุขระของฟิล์มบาง ซึ่งแสดงได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่องวัดความเรียบผิว Interferometric surface profile เมื่อพิจารณาภาพหน้าตัดและรูปร่างสามมิติของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นจากระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ทำนายเอาไว้ ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่าฟิล์มบางที่มีความขรุขระและสม่ำเสมอที่ระดับความหนา 300 nm มีอัตราการเคลือบ 8.03 nm/min มีค่าความขรุขระที่ระดับ 42.52 nm ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ได้ทำการทดลองยืนยันผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ทางสถิติตรงกับผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวโครงสร้างของฟิล์มบางเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติที่ผ่านมาพบว่าผลการวิเคราะห์อัตราการเคลือบและค่าความขรุขระของพื้นผิวมีความสอดคล้องกันอย่างมาก โดยเฉพาะค่าความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มบางซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการตรวจจับแก๊ส สามารถทำนายผลตอบสนองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปปรับปรุงพัฒนากระบวนการอื่นๆ ได้

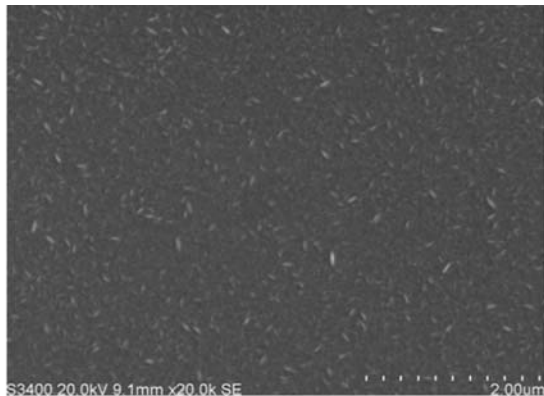
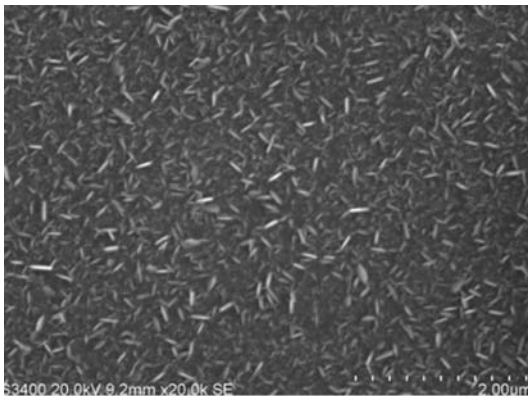


รูปที่ 3. ภาพหน้าตัดของฟิล์มบางที่เกิดจากระดับปัจจัยที่ได้ทำนายไว้

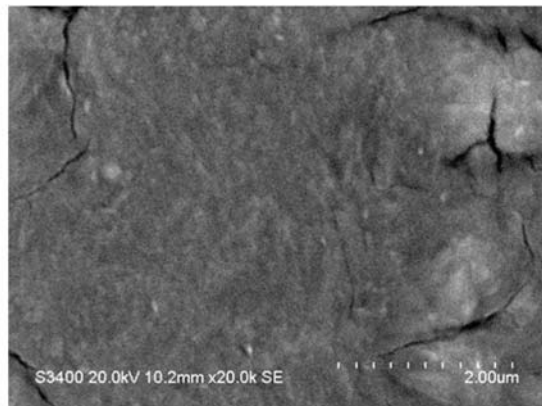
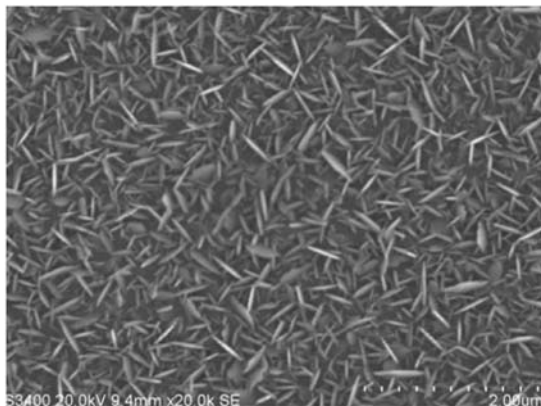


รูปที่ 4. รูปร่าง 3 มิติภาพหน้าตัดของฟิล์มบางที่เกิดจากระดับปัจจัยที่ได้ทำนายไว้

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางโดยละเอียดจะสามารถทำได้ด้วยการใช้เครื่อง SEM จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ากำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ (ปัจจัย A) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนและออกซิเจน (ปัจจัย D) มีผลต่อค่าความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด ตามลำดับ ผลกระทบของปัจจัย A ต่อลักษณะของพื้นผิวแสดงในรูปที่ 5 ก) และ 5 ข) ซึ่งแสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 100 W และ 200 W ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเพิ่มกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ จาก 100 W เป็น 200 W สำหรับกรณีที่กำลังมีค่าต่ำ (100 W) จะเห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มบางไม่เรียบและมีโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโน (Nanostructure) ที่มีลักษณะเป็นแท่งเล็กและมีปลายค่อนข้างแหลม ซึ่งเรียกว่า Nanorod ในกรณีนี้ความยาวของ Nanorod มีค่าอยู่ในช่วง 100-300 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าอยู่ในช่วง 20-40 nm ในขณะที่พื้นผิวของฟิล์มบางกรณีที่กำลังมีค่าสูง (200 W) พื้นผิวของฟิล์มบางค่อนข้างเรียบและมี Nanorod ที่มีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนน้อยกว่ามาก ดังนั้น ผลที่ได้จึงสอดคล้องกับผลการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง Interferometric surface profiler



รูปที่ 5. ก) SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 100 W
 ข) SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังของสนามไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 200 W



รูปที่ 6. ก) SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและออกซิเจน 0.00
 ข) SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและออกซิเจน 0.43

ผลกระทบของปัจจัย D ต่อลักษณะของพื้นผิวเป็นดังแสดงในรูปที่ 6 ก) และ 6 ข) ซึ่งแสดงพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและออกซิเจน 0.00 และ 0.43 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างกำมะถันและออกซิเจนจาก 0.00 เป็น 0.43 สำหรับ

กรณีที่มีอัตราส่วนมีค่าต่ำสุด (0.00) จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของฟิล์มบางขรุขระค่อนข้างมากและมีโครงสร้าง Nanorod เป็นจำนวนมากในกรณีนี้ความยาวของ Nanorod มีค่าอยู่ในช่วง 200-600 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าอยู่ในช่วง 20-50 nm ซึ่งใหญ่กว่ากรณีในรูปที่ 5 ก) ในขณะที่พื้นผิวของฟิล์มบางกรณีที่มีอัตราส่วนมีค่าสูง (0.43) พื้นผิวของฟิล์มบาง

จะเรียบและไม่ปรากฏว่ามี Nanorod ดังนั้น ผลที่ได้จึงสอดคล้องกับผลการวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง Interferometric surface profiler ในทำนองเดียวกัน

สรุปและเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวคิดและการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองทางสถิติ และวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อใช้ปรับปรุงกระบวนการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในอุปกรณ์ก๊าซเซนเซอร์ โดยมีเป้าหมายให้เกิดอัตราการเคลือบของฟิล์มบางที่สูงและทำให้ฟิล์มบางที่ผลิตมีค่าความขรุขระของพื้นผิวมากที่สุด การออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้ในการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเคลือบและความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มบาง ฟังก์ชันความพึงพอใจ หลักการการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนและโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกันในการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยมีการยืนยันผลการศึกษาที่ได้ด้วยการทดลองซ้ำ นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้ศึกษา วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางโดยการอธิบายลักษณะภาพหน้าตัดและรูปร่างสามมิติของฟิล์มบางในการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ด้วยวิธีการอาร์เอฟรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง งานวิจัยครั้งนี้ สามารถขยายผลการศึกษาโดยการนำฟิล์มบางที่ได้รับการปรับปรุงกระบวนการผลิตไปทำการทดสอบการตรวจจับก๊าซว่ามีความสามารถในการตรวจจับมากน้อยเพียงใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนประเภทอุดหนุนทั่วไปจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ 2551 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยจากห้องปฏิบัติการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) และห้องปฏิบัติการนาโน

อิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารอ้างอิง

- Anderson, M.J., and P.J. Whitcomb. 2005. **RSM simplified: optimizing process using response surface methods for design of experiments.** Productivity Press, New York.
- Antony, J. 2003. **Design of experiments for engineers and scientists.** Butterworth-Heinemann.
- Bhattacharyya, D., N. K. Sahoo, S. Thakur, N. C. Das. 2000. Spectroscopic ellipsometry of TiO₂ layers prepared by ion-assisted electron-beam evaporation. **Thin solid films.** 360: 96-102.
- Comini, E., G. Faglia, G. Sbeveglieri, C. Cantalini, M. Passacantando, S. Santucci, Y. Li, W. Wlodarski, W. Qu. 2000. Carbon monoxide response of molybdenum oxide thin films deposited by different techniques. **Sensor and actuator.** B93: 168-174.
- Comini, E., G. Sbeveglieri, M. Ferroni, V. Guidi, G. Martinelli. 2003. Response to ethanol of thin films base on Mo and Ti oxides deposited by sputtering. **Sensor and actuator.** B93: 409-415.
- Derringer, G., R. Suich. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology.** 12(4): 214-219.
- Ferroni, M., V. Guidi, G. Martinelli, M. Sacerdoti, P. Nelli, G. Sberreglieri. 1998. MoO₃ based sputtered thin films for Fast NO₂ Detection. **Sensors and actuators.** B48: 285-288.

- Hai H., W.J. Xiao, J. Yuan, J.W. Shi, M.X. Chen, W.F. Shang. 2007. Preparations of TiO_2 film coated on foam nickel substrate by sol-gel processes and its photocatalytic activity for degradation of acetaldehyde. **Journal of environmental sciences**. 19: 80-85.
- Imawan, C., H. Steffers, F. Solzbacher, E. Obermeier. 2001. A new preparation method for sputtered MoO_3 multilayers for the application in gas sensors. **Sensors and actuator**. B78: 119-125.
- Mutschall, D., K. Holzner, E. Obermeier. 1996. Sputtered molybdenum oxide thin films for NH_3 detection. **Sensors and actuators**. B35-36: 320-324.
- Myers, R.H. and D.C. Montgomery. 2002. **Response surface methodology process and product optimization using designed experiments**. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Ramana, C.V., V.V. Atuchin, V.G. Kesler, V.A. Kochubey, L.D. Pokrovsky, V. Shutthanandan, U. Becker, R.C. Ewing. 2007. Growth and surface characterization of sputter- deposited molybdenum oxide thin films. **Applied surface science**. 253: 5368-5374.
- Stat-Ease, Inc. 2005. **Design-expert version 7 user's manual**. Stat-Ease, Inc. Minneapolis, MN.
- Tien, C.L., S.W. Li. 2006. Optimization of process parameters of titanium dioxide films by response surfaces methodology. **Optics communications**. 266: 574-581.
- Wang, K.L., Y. Zhang. 2001. Study of the growth morphology of TiO_2 thin films by AFM and TEM, **Surface and coatings technology**. 140: 155-160.