

การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ที่เคลือบ
ด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน โครสปีดเตอริง

Preparation and characterization of CrVN thin films deposited by reactive dc
magmetron co-sputtering

สิทธิวัฒน์ อุ๋นจิตร*, อติสร บุรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ

Sitthiwat Unchit*, Adisorn Buranawong, Surasing Chaiyakun

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ (CrVN) ถูกเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนโครสปีดเตอริงบนกระจกสไลด์และซิลิกอน เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอริงของเป็าวานาเดียม (I_V) ต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม ด้วยเทคนิค XRD และ AFM ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอริงเป็าวานาเดียมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม ฟิล์มที่ได้แสดงโครงสร้างผลึกของวานาเดียมไนไตรด์ ระนาบ (222) (400) และ (404) ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่มีค่าในช่วง 883 -1048 นาโนเมตร และ 3.75-4.96 นาโนเมตรตามลำดับ

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง / โครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ / รีแอคทีฟ โครสปีดเตอริง

*Corresponding author. E-mail: Bj_maxx@hotmail.com

Abstract

Chromium vanadium nitride (CrVN) thin film was deposited by reactive DC magnetron co-sputtering method on glass slide and silicon. The effect of vanadium sputtering current (I_V) on the crystal structure, surface morphology and thickness of thin film were investigated by XRD and AFM techniques, respectively. The result show that the influence of vanadium sputtering current has dominate the crystal structure, surface morphology and thickness of thin film. The as-deposited films were compose of CrVN with (111), (200), (220) planes. The roughness and thickness of the as-deposited films were in the range of 883 to 1048 nm and 3.75 to 4.96 nm, respectively.

Keywords : Thin films / chromium vanadium nitride / reactive co-sputtering

1. บทนำ

การปรับปรุงผิววัสดุแนวทางการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากกลุ่มนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรม คือ การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีสมบัติเฉพาะในลักษณะของฟิล์มบางด้วยการเคลือบในสุญญากาศ (vacuum coating) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิค PVD (Physical Vapor Deposition) ในการปรับปรุงผิวของวัสดุ กลุ่มหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ คือ กลุ่มชั้นเคลือบแข็ง (hard-coating) การเคลือบแข็งในลักษณะฟิล์มบางนิยมใช้เคลือบบนผิวเครื่องมือตัดเฉาะต่างๆ ทางอุตสาหกรรม เป็นการปรับปรุงพื้นผิวของเครื่องมือตัดเฉาะให้มีความแข็งแรง ยืดอายุการใช้งาน ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิต และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับเครื่องมือตัดเฉาะอีกด้วย ฟิล์มบางที่นิยมใช้ในการเคลือบแข็งมักอยู่ในรูปของสารประกอบไนไตรด์ หรือ คาร์ไบด์ของธาตุทรานซิชัน ฟิล์มตัวหนึ่งที่น่าสนใจคือโครเมียมไนไตรด์ (Chromium nitride ; CrN) เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความแข็งแรงสูง (Bertrand, Savall, & Meunier, 1997) ทนการขัดสี การกัดกร่อน (Sue & Chang, 1995) ทนอุณหภูมิสูง และต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำ (Zenghu *et al.*, 2003) โดยฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์เป็นชั้นเคลือบของสารประกอบสองชนิด (Binary Coating) ซึ่งมีข้อจำกัดบางประการตามสมบัติเฉพาะตัวของชั้นเคลือบหรือฟิล์มนั้นๆ ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาชั้นเคลือบชนิดใหม่ที่ประกอบด้วยธาตุสามชนิดเรียกว่า ชั้นเคลือบของสารประกอบสามชนิด (Ternary Coating) โดยการเพิ่มอะตอมวาเนเดียม (V) เข้าไปในโครงสร้างของโครเมียมไนไตรด์ (CrN) เพื่อฟอร์มตัวเป็นชั้นของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ (CrVN)

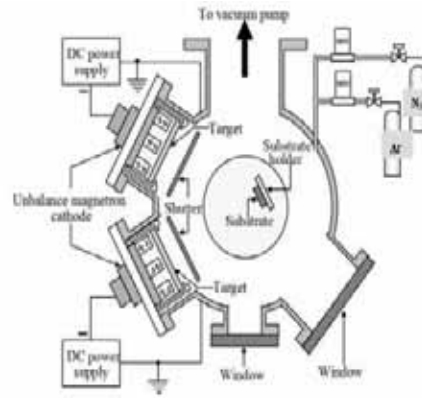
ฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์เหมาะสำหรับใช้เคลือบเครื่องมือในกลุ่มแม่พิมพ์ตอกโลหะ และงานชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์มีสมบัติที่ดีในด้านของความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความต้านทานต่อการเสียดสี

ระหว่างวัตถุ ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายระหว่างใช้งานได้ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ มีค่าต่ำกว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ อีกทั้งฟิล์มโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและความต้านทานต่อการเสียดสีระหว่างวัตถุดีกว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ (M. Uchida *at el.*, 2004)

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ดีซีรีแอคทีฟสไปตเตอริง (DC reactive sputtering) อาร์เอฟรีแอคทีฟสไปตเตอริง (RF reactive sputtering) การเคลือบวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของฟิล์มได้สะดวกและไม่ยุ่งยากคือการเคลือบวิธีโคสไปตเตอริง (co-sputtering) การเคลือบวิธีนี้ใช้เป้าสารเคลือบสองชุด ทำให้สามารถควบคุมอัตราการสไปตเตอริงสารเคลือบของโครเมียม (Cr) หรือ วานาเดียม (V) โดยแปรค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบนั้น บทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน โคสไปตเตอริง เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าในการสไปตเตอริงเป้าสารเคลือบวานาเดียม (I_V) ที่มีต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และความหนาของฟิล์มโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ฟิล์มโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ในงานนี้เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนโคสไปตเตอริง จากเครื่องเคลือบในสุญญากาศ ระบบ ดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สไปตเตอริง ภาพที่ 1 ภายในระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยภาชนะห้องเคลือบเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310.0 mm สูง 370.0 mm ติดตั้งเป้าโครเมียม มีความบริสุทธิ์ (99.95%) และเป้าวานาเดียม มีความบริสุทธิ์ (99.95%) ซึ่งเป้าทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.0 mm ในการเคลือบใช้แก๊สไนโตรเจน (99.995%) เป็นแก๊สไวปฏิกิริยาและใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสไปตเตอริง สำหรับเครื่องสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบลูกโรตารีและเครื่องสูบลูบไล ในส่วนของการวัดความดันใช้มาตรวัดความดันของ Balzers รุ่น TPG300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานีรุ่น TPR010 และหัววัดแบบเพนนิ่งรุ่น IKR050 แก๊ส ที่ใช้ในการเคลือบ ควบคุมการปล่อยเข้าห้องเคลือบด้วยเครื่องควบคุมการไหลมวลแก๊สของ MKS รุ่น 2470D



ภาพที่ 1 ลักษณะเครื่องเคลือบและไดอะแกรมของเครื่องเคลือบสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำหรับการเตรียมฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ เริ่มจากนำวัสดุรองรับซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกอน (100) และกระจกใสลัดที่ทำความสะอาดแล้วเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศโดยจัดให้อยู่ห่างจากหน้าเป้าสารเคลือบเท่ากับ 10 cm ลดความดันในห้องเคลือบให้ได้ความดันพื้นเท่ากับ 5.0×10^{-5} mbar จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊ส ไนโตรเจนในอัตราส่วน 3:2 และให้กระแสไฟฟ้ากับเป้าโครเมียมคงที่ 600 mA ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าวาเนเดียม (I_V) มีค่าเท่ากับ 400, 600 และ 800 mA โดยฟิล์มบางแต่ละชุดการทดลองใช้เวลาในการเคลือบทั้งหมด 40 นาที ก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์มบางทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบโดยการสเปตเตอร์หน้าเป้าสารเคลือบ (pre-sputtering) ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน 2 นาที โดยปิดแผ่นบัง (shutter) ที่ติดตั้งระหว่างเป้าสารเคลือบกับแท่นวางวัสดุรองรับ จากนั้นจึงเคลือบฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

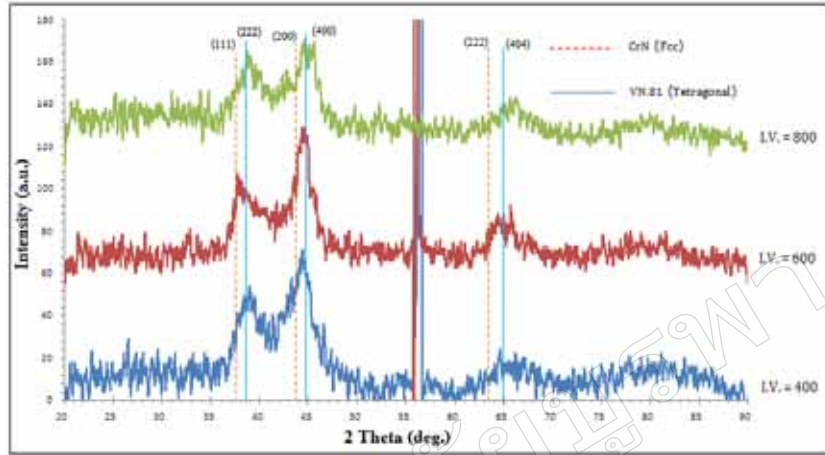
ฟิล์มบางที่เคลือบได้ทั้งหมดจะนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Rint 2000 ใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.540600 \text{ \AA}$) ที่ 40 kV และ 40 mA ตรวจวัดแบบ 2θ -scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียง (Grazing incident angle) คงที่เท่ากับ 3° สแกน 2θ จาก 20° ถึง 90° และศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิว (R_{rms}) ขนาดเกรนและความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ตรวจวัดแบบ tapping mode บนผิวหน้าของฟิล์มบางในพื้นที่ขนาด $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ ด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope ; AFM) ของ Veeco instruments Inc. รุ่น Nanoscope I

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์

จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์บนซิลิกอนที่กระแสของเป้าวาเนเดียมค่าต่างๆด้วยเทคนิค XRD จากภาพที่ 2 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ที่กระแสของเป้าวาเนเดียมเท่ากับ 400 mA มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 38.98° , 44.46° และ 64.62° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวาเนเดียมไนไตรด์ระนาบ (222) (400) และ (404) ตามข้อมูล JCPDS เลขที่ 71-1139

เมื่อกระแสของเป้าวานเดียมเพิ่มขึ้นเป็น 600 และ 800 mA รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมวานเดียมไนไตรด์ที่กระแสในการสับเตเตอร์ของเป้าวานเดียมค่าต่างๆ

3.2 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มโครเมียมวานเดียมไนไตรด์

เมื่อนำฟิล์มที่เคลือบได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมี โครเมียม (Cr) วานเดียม (V) และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่างๆ ที่มีค่าเปลี่ยนไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการสับเตเตอร์ของเป้าวานเดียมที่ใช้ใน ดังตารางที่ 1 พบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจาก 400 มิลลิแอมป์ เป็น 800 มิลลิแอมป์ องค์ประกอบธาตุของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ คือ วานเดียมเพิ่มขึ้นจาก 13.59% เป็น 29.22% ขณะที่โครเมียมลดลงจาก 66.30% เป็น 51.04% เนื่องจากวานเดียมถูกสับเตเตอร์ออกจากเป้าสารเคลือบเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าในการสับเตเตอร์ เป้าวานเดียมและเข้าไปแทนที่อะตอมโครเมียมในโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ ทำให้โครเมียมในฟิล์มมีปริมาณลดลง ส่วนไนโตรเจนมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 20.11% ถึง 19.74% กล่าวได้ว่างานวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางโครเมียมวานเดียมไนไตรด์ได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบางโครเมียมวานเดียมไนไตรด์ที่กระแสไฟฟ้าในการสับเตเตอร์เป้าวานเดียม

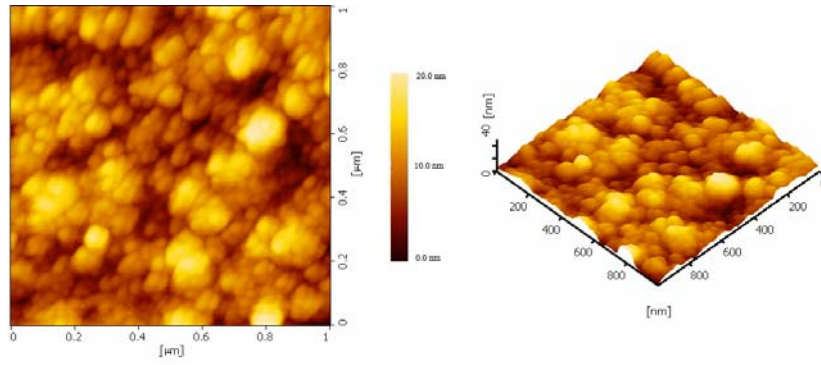
Element Wt%	($I_V = 400$ mA)	($I_V = 600$ mA)	($I_V = 800$ mA)
Cr	66.30	58.28	51.04
V	13.59	21.45	29.22
N	20.11	20.27	19.74

3.3 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์

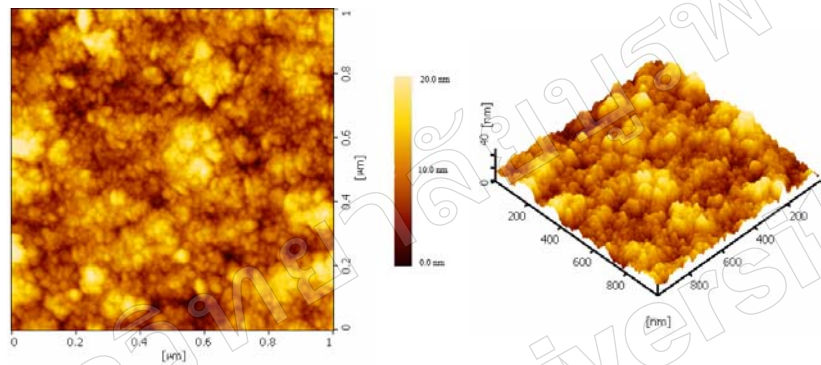
ภาพที่ 3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร้เข้าวาเนเดียมเท่ากับ 400 มิลลิแอมป์ ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเม็ดกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์ม ส่วนฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร้เข้าวาเนเดียมเท่ากับ 600 มิลลิแอมป์ สารเคลือบเริ่มเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้น และฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร้เข้าวาเนเดียมเท่ากับ 800 มิลลิแอมป์ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะแหลมสูงต่ำกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบได้ มีค่าความหยาบผิว (R_{ms}) ในช่วง 3.75-4.96 นาโนเมตร เมื่อกระแสไฟฟ้าการสับเตอร้เข้าวาเนเดียมเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มเพิ่มจาก 883 นาโนเมตร เป็น 1048 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาและความหยาบผิวที่กระแสไฟฟ้าในการสับเตอร้เข้าวาเนเดียมค่าต่างๆ

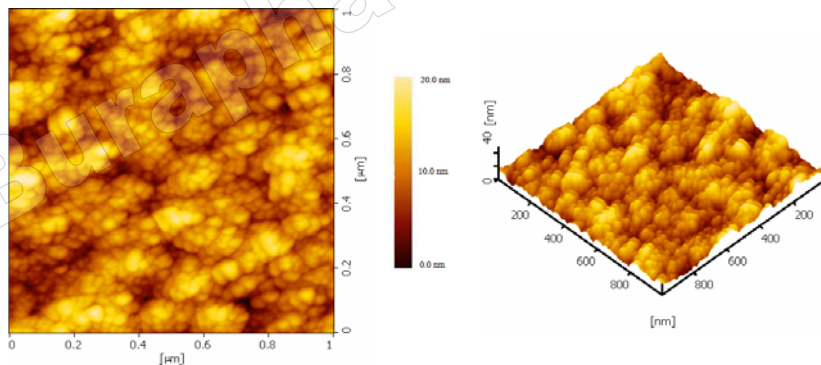
Vanadium current (mA)	ความหยาบผิว (nm)	ความหนา (nm)
400	3.75	883
600	4.09	929
800	4.96	1048



(a) $I_V = 400 \text{ mA}$



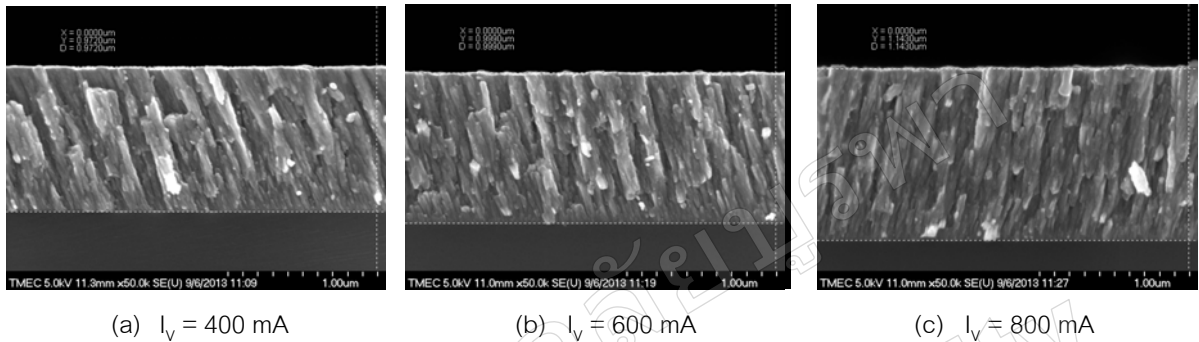
(b) $I_V = 600 \text{ mA}$



(c) $I_V = 800 \text{ mA}$

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคโรเนียมวาเนเดียมไนไตรด์จากเทคนิค AFM ที่กระแสในการสัต์เตอร์ของเป้าวาเนเดียมค่าต่างๆ

จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป่าวาเนเดียมเพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิว ความหนา ความหยาบผิวตลอดจนขนาดของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มกระแสเป็นการเพิ่มพลังงานของอะตอม สารเคลือบที่เคลือบบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ ทำให้สารเคลือบมีพลังงานมากพอในการเกาะกลุ่มรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความหยาบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป่าวาเนเดียม ส่งผลให้อะตอมวาเนเดียมเป็น องค์ประกอบในฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์เพิ่มขึ้นและมีความหนาของฟิล์มมากขึ้น



ภาพที่ 4 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์จากเทคนิค FE-SEM ที่กระแสในการสับเตอร์ของเป่าวาเนเดียม ค่าต่างๆ

จากภาพที่ 4 แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์จากการเทคนิคศึกษาด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่า โครงสร้างของชั้นฟิล์มมีการจัดเรียงตัวกันแบบคอลัมน์ในโซน Z2 และเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป่าวาเนเดียมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 400 mA เป็น 800 mA พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 968 nm เป็น 1141 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับผลที่ วัดได้จากเทคนิค AFM

4. สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยวิธีอีพิตักษิอัลบาลานซ์แมกนีตรอนโคสปเตอร์ริงบนกระจก- สไลด์และแผ่นซิลิกอน ผลการศึกษาพบว่ากระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป่าวาเนเดียมมีผลต่อโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิว ของฟิล์มที่ได้ เมื่อกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป่าวาเนเดียมเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่ได้มีโครงสร้าง ผลึกระนาบ (222) (400) และ (404) องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบได้มี โครเมียม (Cr) วาเนเดียม (V) และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่างๆ ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป่าวาเนเดียม ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์ม ที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 883 นาโนเมตร เป็น 1048 นาโนเมตร และ 3.75 นาโนเมตร เป็น 4.96 นาโนเมตรตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องสเปกโตรสโกปี และให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ. (2551). เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ. (หน้า 4-17).

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธันัสถา รัตนะ. (2547). การวิจัยและพัฒนาการเคลือบผิวโลหะด้วยวิธีรมสเปกโตรสโกปีตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 รายงานการวิจัยประจำปี 2547. ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (หน้า 163-166).

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรวิธา. (2540). การพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสเปกโตรสโกปี. รายงานการวิจัยประจำปี 2540. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยบูรพา.

Bertrand, G., Savall, C., & Meunier, C. (1997). Properties of reactively RF magnetron sputtered chromium nitride coatings. *Surface & Coatings Technology*, 96, 323-329.

Holleck, H. (1986). Material selection for hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 4, 2661-2670.

Sue, J. A., & Chang, T. P. (1995). Friction and wear behavior of titanium nitride, Zirconium nitride and chromium nitride coatings at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 76-77, 61-69.

Uchida, M., Nihira, N., Mitsuo, A., Toyoda, K., Kubota, K., Aizawa, T. (2004) Friction and wear properties of CrAlN and CrVN films deposited by cathodic arc ion plating method. *Surface and Coatings Technology*, 177-178, 627-630

Zenghu, Han, Jiawan, Tian, Qianxi, Lai, Xiaojiang, Yu, & Geyang Li. (2003). Effect of N₂ partial pressure on the microstructure and mechanical properties of magnetron sputtered. *Surface and Coatings Technology*, 162, 189-193.