

## การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ที่เคลือบ

ด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน โครสปัตเตอริง

Preparation and characterization of CrVN thin films deposited by reactive dc

magnetron co-sputtering

สิทธิวัฒน์ อุ้นจิตร<sup>\*</sup>, อติศร บุรณวงศ์, สุรสิงห์ ไชยคุณ

Sitthiwat Unchit<sup>\*</sup>, Adisorn Buranawong, Surasing Chaiyakun

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

### บทคัดย่อ

ฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ (CrVN) ถูกเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน โครสปัตเตอริงบนกระจกสไลด์และซิลิกอน เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าในการสปัตเตอร์ของเป้าวานาเดียม ( $I_V$ ) ต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม ด้วยเทคนิค XRD และ AFM ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าในการสปัตเตอร์เป้าวานาเดียมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์ม ฟิล์มที่ได้แสดงโครงสร้างผลึกของวานาเดียมไนไตรด์ ระนาบ (222) (400) และ (404) ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่ได้มีค่าในช่วง 883 -1048 นาโนเมตร และ 3.75-4.96 นาโนเมตร ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** ฟิล์มบาง / โครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ / รีแอคทีฟ โครสปัตเตอริง

### 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

\*Corresponding author. E-mail : Bj\_maxx@hotmail.com

## 1. บทนำ

การปรับปรุงผิววัสดุแนวทางหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากกลุ่มนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรม คือ การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีสมบัติเฉพาะในลักษณะของฟิล์มบางด้วยการเคลือบในสุญญากาศ (vacuum coating) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิค PVD (Physical Vapor Deposition) ในการปรับปรุงผิวของวัสดุ กลุ่มหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ คือ กลุ่มชั้นเคลือบแข็ง (hard coating) การเคลือบแข็งในลักษณะฟิล์มบางนิยมใช้เคลือบบนผิวเครื่องมือตัดเจาะต่าง ๆ ทางอุตสาหกรรม เป็นการปรับปรุงพื้นผิวของเครื่องมือตัดเจาะให้มีความแข็ง ยืดอายุการใช้งาน ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการผลิต และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับเครื่องมือตัดเจาะอีกด้วย ฟิล์มบางที่นิยมใช้ในการเคลือบแข็งมักอยู่ในรูปของสารประกอบไนไตรด์ หรือ คาร์ไบด์ ของธาตุทรานซิชัน ฟิล์มตัวหนึ่งที่น่าสนใจคือโครเมียมไนไตรด์ (Cromium nitride ; CrN) เป็นโลหะทรานซิชันที่มีความแข็งแรงสูง(Bertrand, Savall, & Meunier, 1997) ทนการขีดสี 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)

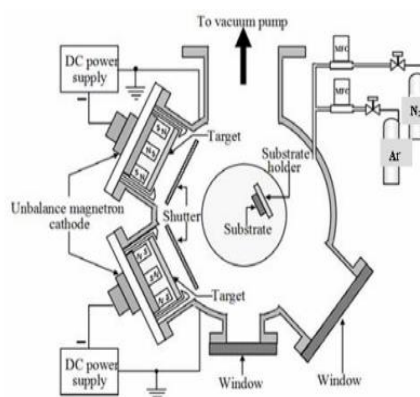
ฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์เหมาะสำหรับใช้เคลือบเครื่องมือในกลุ่ม แม่พิมพ์ดอกโลหะ และงานชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์มีสมบัติที่ดีในด้านของความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความต้านทานต่อการเสียดสีระหว่างวัตถุ ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายระหว่างใช้งานได้ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์มีค่าต่ำกว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ อีกทั้งฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและความต้านทานต่อการเสียดสีระหว่างวัตถุดีกว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์(M.Uchida at el., 2004)

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ดีซีรีแอคทีฟสไปตเตอริง (DC reactive sputtering) อาร์เอฟรีแอคทีฟสไปตเตอริง (RF reactive sputtering) การเคลือบวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของฟิล์มได้สะดวกและไม่ยุ่งยาก

คือการใช้วิธี โคสปีดเตอริง (co-sputtering) การเคลือบวิธีนี้ใช้เป้าสารเคลือบสองชนิดทำให้สามารถควบคุมอัตราการสปีดเตอริงสารเคลือบของโครเมียม (Cr) หรือ วาเนเดียม (V) โดยแปรค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าสารเคลือบนั้น บทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการเตรียมฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ด้วยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน โคสปีดเตอริง เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอริงเป้าสารเคลือบวาเนเดียม (I<sub>v</sub>) ที่มีต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และความหนาของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยต่อไป

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ในงานนี้เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนโคสปีดเตอริงจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบ ดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง รูปที่ 1 ภายในระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยภาชนะห้องเคลือบเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310.0 mm สูง 370.0 mm ติดตั้งเป้าโครเมียม มีความบริสุทธิ์ (99.95%) และเป้าวาเนเดียม มีความบริสุทธิ์ (99.95%) ซึ่งเป้าทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.0 mm ในการเคลือบใช้แก๊สไนโตรเจน (99.995%) เป็นแก๊สไอปฏิกิริยาและใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสปีดเตอริง สำหรับเครื่องสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบลูกโรตารีและเครื่องสูบลู่ว่าง ในส่วนของการวัดความดันใช้มาตรวัดความดันของ Balzers รุ่น TPG300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานีรุ่น TPR010 และหัววัดแบบเพนนิ่งรุ่น IKR050 แก๊สที่ใช้ในการเคลือบ ควบคุมการปล่อยเข้าห้องเคลือบด้วยเครื่องควบคุมการไหลมวลแก๊สของ MKS รุ่น 2470D



รูปที่ 1 ลักษณะเครื่องเคลือบและไดอะแกรมของเครื่องเคลือบสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สำหรับการเตรียมฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ เริ่มจากนำวัสดุรองรับซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกอน (100) และกระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดแล้วเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศโดยจัดให้อยู่ห่างจากหน้า

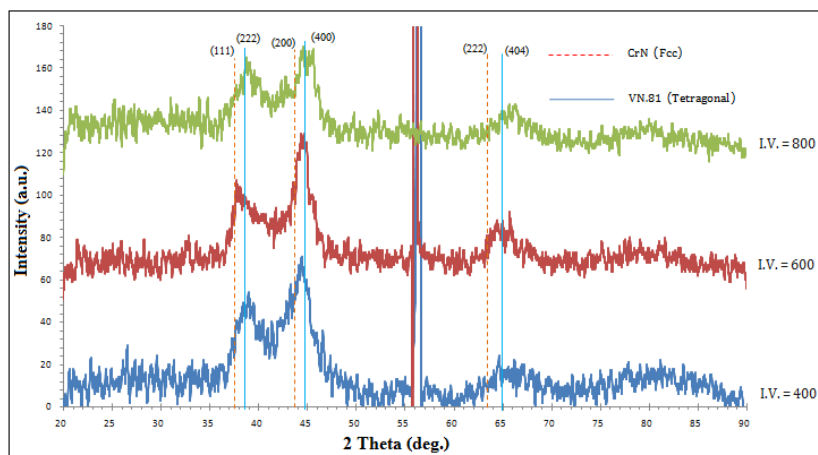
เป้าสารเคลือบเท่ากับ 10 cm ลดความดันในห้องเคลือบให้ได้ความดันพื้นเท่ากับ  $5.0 \times 10^{-5}$  mbar จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊ส ไนโตรเจนในอัตราส่วน 3:2 และให้กระแสไฟฟ้ากับเป้าโครเมียมคงที่ 600 mA ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าวาเนเดียม ( $I_V$ ) มีค่าเท่ากับ 400 , 600 และ 800 mA โดยฟิล์มบางแต่ละชุดการทดลองใช้เวลาในการเคลือบทั้งหมด 40 นาที ก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์มบางทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบโดยการสปัตเตอร์หน้าเป้าสารเคลือบ (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  $2\theta$ -scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียง (Grazing incident angle) คงที่เท่ากับ  $3^\circ$  สแกน  $2\theta$  จาก  $20^\circ$  ถึง  $90^\circ$  และศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิว ( $R_{\text{rms}}$ ) ขนาดเกรนและความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ตรวจวัดแบบ tapping mode บนผิวหน้าของฟิล์มบางในพื้นที่ขนาด  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  ด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope ; AFM) ของ Veeco instruments Inc. รุ่น Nanoscope I

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 3.1. โครงสร้างผลึกของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์

จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์บนซิลิกอนที่กระแสของเป้าวาเนเดียมค่าต่างๆด้วยเทคนิค XRD จากรูปที่ 2 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ที่กระแสของเป้าวาเนเดียมเท่ากับ 400 mA มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม  $38.98^\circ$ ,  $44.46^\circ$  และ  $64.62^\circ$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวาเนเดียมไนไตรด์ระนาบ (222) (400) และ (404) ตามข้อมูล JCPDS เลขที่ 71-1139 เมื่อกระแสของเป้าวาเนเดียมเพิ่มขึ้นเป็น 600 และ 800 mA รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ที่กระแสในการสปีดเตอร์ของเป้าวานาเดียมค่าต่างๆ

### 3.2. องค์ประกอบธาตุของฟิล์มโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์

เมื่อนำฟิล์มที่เคลือบได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมี โครเมียม (Cr) วานาเดียม (V) และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่างๆ ที่มีค่าเปลี่ยนไปตามค่ากระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอร์ของเป้าวานาเดียมที่ใช้ใน ดังตารางที่ 1 พบว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นจาก 400 มิลลิแอมป์ เป็น 800 มิลลิแอมป์ องค์ประกอบธาตุของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ คือ วานาเดียมเพิ่มขึ้นจาก 13.59 % เป็น 29.22% ขณะที่โครเมียมลดลงจาก 66.30% เป็น 51.04% เนื่องจากวานาเดียมถูกสปีดเตอร์ออกจากเป้าสารเคลือบเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอร์เป้าวานาเดียมและเข้าไปแทนที่อะตอมโครเมียมในโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ ทำให้โครเมียมในฟิล์มมีปริมาณลดลง ส่วนไนโตรเจนมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 20.11% ถึง 19.74% กล่าวได้ว่างานวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์ที่กระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอร์เป้าวานาเดียม

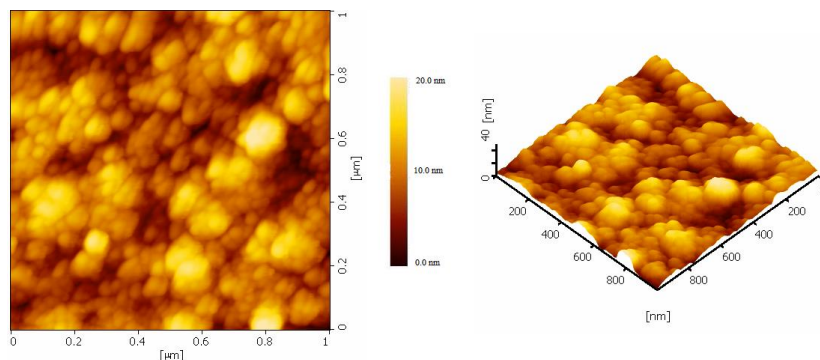
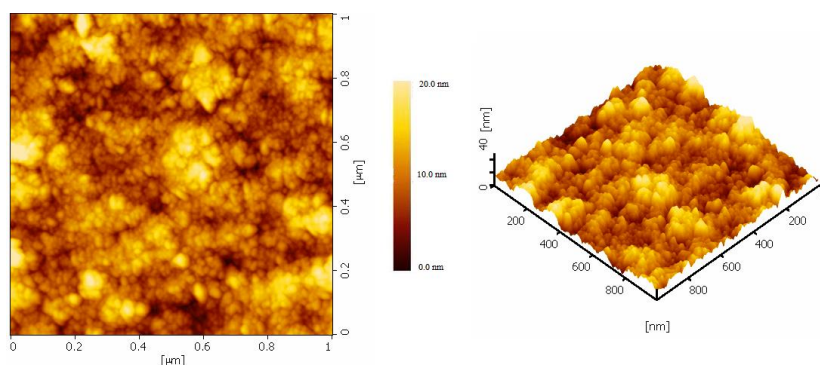
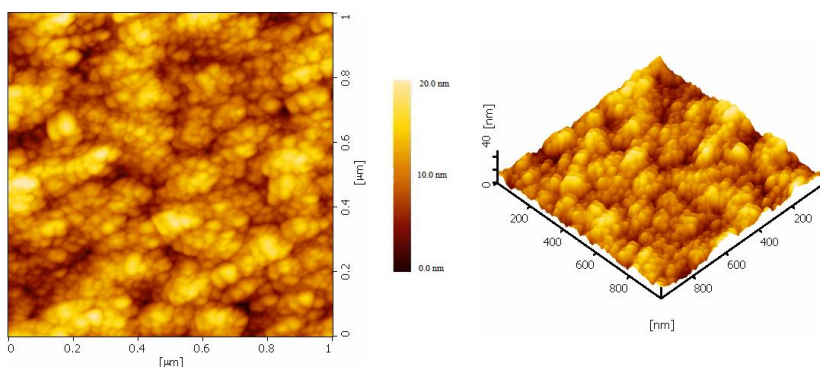
Element Wt%	(I <sub>v</sub> = 400 mA)	(I <sub>v</sub> = 600 mA)	(I <sub>v</sub> = 800 mA)
Cr	66.30	58.28	51.04
V	13.59	21.45	29.22
N	20.11	20.27	19.74

### 3.3. ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์

รูปที่ 3 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป้วาเนเดียมเท่ากับ 400 มิลลิแอมป์ ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเม็ดกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์ม ส่วนฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป้วาเนเดียมเท่ากับ 600 มิลลิแอมป์ สารเคลือบเริ่มเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้น และฟิล์มที่เคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป้วาเนเดียมเท่ากับ 800 มิลลิแอมป์ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะแหลมสูงต่ำกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบได้ มีค่าความหยาบผิว ( $R_{rms}$ ) ในช่วง 3.75-4.96 นาโนเมตร เมื่อกระแสไฟฟ้าการสับเตอร์เป้วาเนเดียมเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มเพิ่มจาก 883 นาโนเมตร เป็น 1048 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาและความหยาบผิวที่กระแสไฟฟ้าในการสับเตอร์เป้วาเนเดียมค่าต่างๆ

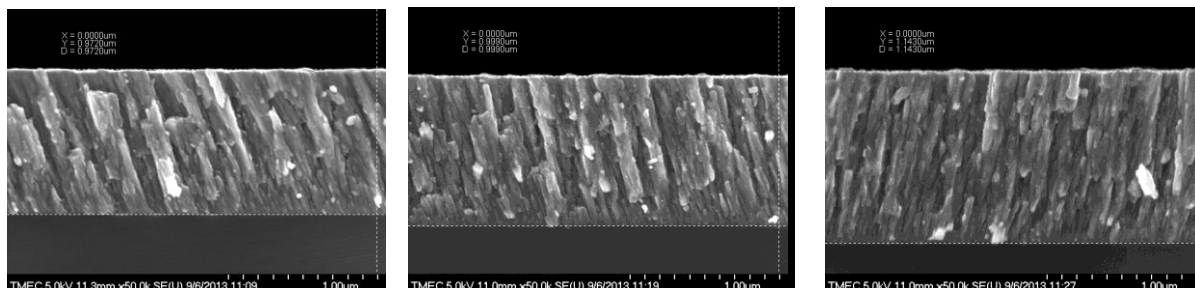
Vanadium current (mA)	ความหยาบผิว (nm)	ความหนา (nm)
400	3.75	883
600	4.09	929
800	4.96	1048

(a)  $I_V = 400 \text{ mA}$ (b)  $I_V = 600 \text{ mA}$ (c)  $I_V = 800 \text{ mA}$ 

**รูปที่ 3** แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโครเมียมวานาเดียมไนไตรด์จากเทคนิค AFM ที่กระแสในการสปีดเตอร์ของเป้าวานาเดียมค่าต่างๆ

จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในการสปีดเตอร์เป้าวานาเดียมเพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิว ความหนา ความหยาบผิวตลอดจนขนาดของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มกระแสเป็นการเพิ่มพลังงานของอะตอมสารเคลือบที่เคลือบบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ ทำให้สาร

เคลือบมีพลังงานมากพอในการเกาะกลุ่มรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ความหยาบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าในการสเปกโตรอิเล็กโทรไลซิสของวาเนเดียม ส่งผลให้อะตอมวาเนเดียมเป็นองค์ประกอบในฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์เพิ่มขึ้นและมีความหนาของฟิล์มมากขึ้น

(a)  $I_V = 400 \text{ mA}$ (b)  $I_V = 600 \text{ mA}$ (c)  $I_V = 800 \text{ mA}$ 

**รูปที่ 4** ภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์จากเทคนิค FE-SEM ที่กระแสในการสเปกโตรอิเล็กโทรไลซิสของวาเนเดียมค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4 แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์จากการเทคนิคศึกษาด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าโครงสร้างของชั้นฟิล์มมีการจัดเรียงตัวกันแบบคอลัมน์นาโรในโซน Z2 และเมื่อกระแสไฟฟ้าที่ให้กับวาเนเดียมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 400 mA เป็น 800 mA พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 968 nm เป็น 1141 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับผลที่วัดได้จากเทคนิค AFM

#### 4. สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มบางโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยวิธีแอตตีฟิเคชันอัลบาลานซ์แมกเนตรอนโคสเปกโตรริงบนกระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอน ผลการศึกษาพบว่ากระแสไฟฟ้าในการสเปกโตรอิเล็กโทรไลซิสของวาเนเดียมมีผลต่อโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้ เมื่อกระแสไฟฟ้าในการสเปกโตรอิเล็กโทรไลซิสของวาเนเดียมเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มโครเมียมวาเนเดียมไนไตรด์ที่ได้มีโครงสร้างผลึกกระนาบ (222) (400) และ (404) องค์ประกอบธาตุของฟิล์มที่เคลือบได้มี โครเมียม (Cr) วาเนเดียม (V) และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบในสัดส่วนต่างๆขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าในการสเปกโตรอิเล็กโทรไลซิสของวาเนเดียม ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 883 นาโนเมตร เป็น 1048 นาโนเมตร และ 3.75 นาโนเมตร เป็น 4.96 นาโนเมตรตามลำดับ



## 5. กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีและให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

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

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

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันต์, สกฤต ศรีญาณลักษณ์ และจักรพันธ์ ถาวรธิดา. (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 N<sub>2</sub> partial pressure on the microstructure and mechanical properties of magnetron sputtered. *Surface and Coatings Technology*, 162, 189-193.