

5ST-O12: โครงสร้างและสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางวานาเดียมไนไตรด์ โครงสร้างนาโนที่เตรียมจากวิธีรีแอคทีฟดีซีอิมบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง Structure and morphology of nanostructured vanadium nitride thin film prepared by reactive DC unbalanced magnetron sputtering method

ศิริวัชร อาลักษณ์สุวรรณ^{1*} และ นิรันดร์ วิทิตอนันต์²

Siriwat Alaksanasuwan^{1*} and Nirun Witit-anun²

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางวานาเดียมไนไตรด์ (VN) เคลือบบนซิลิกอนด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีอิมบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อศึกษาผลของกำลังสปัตเตอริงต่อโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของฟิล์ม โดยโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิว ความหนา ความหยาบผิว และองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มถูกศึกษาด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มดิฟเฟรียนซ์ (FE-SEM) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มบางวานาเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ขนาดผลึกและค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่ได้มีค่าในช่วง 16.1 – 32.9 nm และ 4.124 – 4.144 Å ตามลำดับ ส่วนความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังสปัตเตอริง จาก 304 nm เป็น 1091 nm และ 2.2 nm เป็น 14.4 nm ตามลำดับ ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีวานาเดียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในอัตราส่วนต่าง ๆ แปรค่าตามกำลังสปัตเตอริง ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มที่เตรียมได้เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังสปัตเตอริง โครงสร้างจุลภาคและภาคตัดขวางจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มดิฟเฟรียนซ์พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้ทั้งหมดมีโครงสร้างแบบคอลัมน์

คำสำคัญ: วานาเดียมไนไตรด์ ฟิล์มบาง รีแอคทีฟดีซีอิมบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง กำลังสปัตเตอริง

Abstract

Vanadium nitride (VN) thin films were deposited on silicon by reactive DC unbalanced magnetron sputtering method. The effect of sputtering power on the structure and morphology of the as-deposited thin films was investigated. The crystal structure, microstructure, surface morphology, thickness, roughness, and chemical composition were characterized by various techniques, namely, X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), atomic force microscopy (AFM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), respectively. The results showed that the as-deposited vanadium nitride thin films had fcc structure with (111), (200), (220), and (311) planes. The crystallite size and lattice constant were in the range of 16.1 – 32.9 nm and 4.124 – 4.144 Å, respectively. The thickness and roughness increased with increasing of the sputtering power, from 304 nm to 1091 nm and 2.2 nm to 14.4 nm, respectively. The as-deposited films composed of vanadium and nitrogen in different ratios, depending on the sputtering power. The surface morphology and microstructure of the as-deposited film varied with the sputtering power. The microstructure and cross section result from FE-SEM technique showed a columnar structure for all the deposited thin films.

Keywords: Vanadium nitride, thin film, reactive DC unbalanced magnetron sputtering, sputtering power

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

¹ Science Department, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

* Corresponding author. E-mail: siriwat.aru@gmail.com

บทนำ

ฟิล์มบางคือชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่เคลือบหรือวางตัวอยู่บนผิวของวัสดุรองรับ ซึ่งมีความหนาในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร การเคลือบฟิล์มบางเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงลักษณะเฉพาะหรือโครงสร้างของพื้นผิววัสดุเพื่อให้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติไทรโบโลยี หรือสมบัติอื่น ๆ ปัจจุบันเทคโนโลยีวัสดุอุตสาหกรรมได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้วัสดุที่มีสมบัติเฉพาะและเหมาะสมในหลายด้านพร้อมกัน (Fayomi, Akande, Abioye, & Fakehinde, 2019) ดังนั้นฟิล์มบางจึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ตัวอย่างที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุอุตสาหกรรมที่กล่าวมานั้น ได้แก่ เครื่องมือตัด (cutting tool) ซึ่งมีการใช้ในอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท โดยเป้าหมายของการเคลือบฟิล์มบางลงบนเครื่องมือเหล่านี้คือเพื่อปรับปรุงผิวของชิ้นงานให้มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือนำไปสู่การลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ทำให้ช่วงที่ผ่านมาชั้นเคลือบแข็ง (hard coating) และชั้นเคลือบต้านการสึกหรอ (wear resistant coating) เช่น ชั้นเคลือบไนไตรด์คาร์ไบด์ ออกไซด์ และโบไรด์ จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ (Franz, & Mitterer, 2013)

ทั้งนี้ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์จัดเป็นชั้นเคลือบแข็งอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีค่าความแข็งแรงในช่วงประมาณ 9 – 23 GPa (Qiu, Zhang, Li, Lee, & Zhao, 2012) อีกทั้งยังมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำในช่วง 0.26 ถึง 0.4 สามารถทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 500 – 700°C (Cai *et al.*, 2019) ทำให้มีการนำฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ใช้เคลือบผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงสำหรับอุปกรณ์เครื่องมือช่าง และนอกจากสมบัติเชิงกลและความร้อนที่ดีเยี่ยมแล้วฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ยังมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมากอีกด้วยทำให้การนำไปใช้กับชิ้นส่วนในอุปกรณ์แม่เหล็ก ไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำหรือใช้เป็นอิเล็กโทรดในตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Roldan, Lopez-Flores, Alcalá, Ortega, & Real, 2010)

สำหรับในส่วนของการเตรียมฟิล์มบางหรือการเคลือบผิววัสดุสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งปัจจุบันชั้นเคลือบแข็งที่ใช้กับเคลือบผิวของชิ้นส่วนอุปกรณ์และเครื่องมือในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถใช้งานได้กับวัสดุที่หลากหลาย ชั้นเคลือบที่ได้มีความแข็งแรงสูง มีพื้นผิวที่สม่ำเสมอ รวมถึงยังเป็นกระบวนการเคลือบที่สะอาดและก่อให้เกิดของเสียน้อยกว่ากระบวนการอื่น (Santecchia *et al.*, 2015) ทั้งนี้วิธีสเปตเตอร์จึงจัดเป็นกระบวนการเคลือบทางฟิสิกส์กระบวนการหนึ่งที่ได้รับการนิยมน้อยกว่าในขณะนี้ โดยในรอบทศวรรษที่ผ่านมาการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ กลุ่มนักวิจัยส่วนใหญ่ที่ศึกษาฟิล์มบางนี้ได้เลือกใช้วิธีสเปตเตอร์ในการเคลือบฟิล์ม เช่น เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอร์ (Sun, & Fu, 2008; Caicedo, Zambrano, Aperador, Escobar-Alarcon, & Camps, 2011; Qiu, Zhang, Li, Lee, & Zhao, 2012; Lucio-Porto *et al.*, 2014) เทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอร์ (Mistrik *et al.*, 2004) เทคนิคพัลส์แมกนีตรอนสเปตเตอร์ (Suszko, Gulbinski, Urbanowicz, & Gulbinski, 2011)

นอกจากนี้การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสเปตเตอร์ยังเหมาะสมกว่าวิธีอื่นในแง่ของการควบคุมความหนาฟิล์มและการปรับโครงสร้างผลึกของฟิล์มให้มีลักษณะตามที่ต้องการ ซึ่งทำได้โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์การเคลือบ (Leasen & Boonyopakorn, 2017) ดังนั้นจึงมีรายงานเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้าง ลักษณะเฉพาะ รวมไปถึงสมบัติของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ซึ่งสัมพันธ์กับพารามิเตอร์การเคลือบในกระบวนการสเปตเตอร์ เช่น อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน (Suszko, Gulbinski, Urbanowicz, & Gulbinski, 2011) ความดันรวมหรือความดันย่อยขณะเคลือบ (Qiu, Zhang, Li, Lee, & Zhao, 2012) เวลาเคลือบ (Lucio-Porto *et al.*, 2014) ศักย์ไบแอส (Caicedo, Zambrano, Aperador, Escobar-Alarcon, & Camps, 2011; Qiu, Zhang, Li, Lee, & Zhao, 2012) เป็นต้น

ทั้งนี้ยังพบว่า การเตรียมฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ของนักวิจัยส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนทั้งในขณะเคลือบหรือหลังการเคลือบเพื่อให้ได้ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีความเป็นผลึก (Mistrik et al., 2004; Caicedo, Zambrano, Aperador, Escobar-Alarcon, & Camps, 2011, Suszko, Gulbinski, Urbanowicz, & Gulbinski, 2011) แต่การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้ไม่สามารถเคลือบฟิล์มบนชิ้นงานที่ไวต่อความร้อนได้ อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าการใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงในกระบวนการเคลือบสามารถเพิ่มพลังงานให้แก่สารเคลือบซึ่งช่วยปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มได้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กความเข้มสูงจะช่วยให้ไอออนในพลาสมาหรืออะตอมของสารเคลือบระดมยิง (bombard) ไปที่ผิวหน้าของฟิล์มบนวัสดุรองรับขณะที่กำลังเกิดการสะสมพอกพูน (deposition) เป็นชั้นของฟิล์ม ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อฟิล์มที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ความร้อนที่เกิดจากพลาสมา (plasma heating effect) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการให้ความร้อนฟิล์มขณะเคลือบ (Alaksanasuwan, Buranawong, & Witit-anun, 2020) กรณีนี้ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกบนวัสดุรองรับที่ไวต่อความร้อนที่อุณหภูมิห้องได้ นอกจากนี้การใช้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงในระบบเคลือบยังมีเทคนิคเฉพาะที่ทำให้รูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่รอบเป้าแคโทดต่างกันออกไป กล่าวคือเทคนิคบาลานซ์แมกนีตรอน (balance magnetron) รูปร่างของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะที่สมมาตรกัน ขณะที่เทคนิคอับบาลานซ์แมกนีตรอน (unbalance magnetron) เส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะที่ไม่สมมาตรกัน ส่งผลให้ความเข้มของพลาสมา มีค่าสูงขึ้น ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างและสมบัติโดยรวมที่ดีกว่าฟิล์มบางที่ได้จากเทคนิคบาลานซ์แมกนีตรอน (Shanker, Prathap, Srivatsa, & Singh, 2019)

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสมบัติของฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีสเปตเตอริงล้วนสัมพันธ์กับโครงสร้างหรือลักษณะเฉพาะของฟิล์มซึ่งขึ้นกับพารามิเตอร์การเคลือบ โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายฉบับที่รายงานผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อโครงสร้างหรือสมบัติของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ เช่น Caicedo, Zambrano, Aperador, Escobar-Alarcon, & Camps (2011) ได้เตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอริงบนแผ่นซิลิกอน เมื่อแปรค่าศักย์ไบแอสในช่วง 0 V ถึง -150 V โดยใช้กำลังสเปตเตอริงคงตัวเท่ากับ 20 W/cm^2 และให้ความร้อนกับวัสดุรองรับระหว่างเคลือบที่ 400°C เพื่อศึกษาผลของศักย์ไบแอสต่อสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ จากรายงานพบว่าสามารถเตรียมฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีความเป็นผลึกได้จากทุกเงื่อนไขการเคลือบ โดยฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงที่ระนาบ (111) และ (200) เมื่อศักย์ไบแอสสูงขึ้นฟิล์มที่ได้มีขนาดเกรนเล็กลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อศักย์ไบแอสสูงขึ้นฟิล์มที่ได้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง ส่วน Qiu, Zhang, Li, Lee, & Zhao (2012) ได้เตรียมฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ด้วยเทคนิครีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปตเตอริงบนแผ่นซิลิกอนที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้กำลังสเปตเตอริงคงตัวประมาณ 1 W/cm^2 แปรค่าความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนในช่วง 0.007 Pa ถึง 0.29 Pa และศักย์ไบแอสในช่วง 0 V ถึง -200 V เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การเคลือบต่อคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีความเป็นผลึกโดยระนาบผลึกแปรตามความดันย่อยขณะเคลือบและศักย์ไบแอส ขนาดผลึกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดันย่อย ในส่วนของการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเมื่อความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้น เนื้อฟิล์มมีความหนาแน่นมากขึ้น และเมื่อใช้ศักย์ไบแอสสูงขึ้นทำให้เกิดปรากฏการณ์ re-sputtering ส่งผลให้ฟิล์มมีโครงสร้างแบบคอลัมน์และมีความหนาแน่นที่เรียบขึ้น ส่วนความแข็งของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าในช่วง 9 – 23 GPa

จากรายละเอียดข้างต้นจะเห็นว่าโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ด้วยวิธีสเปตเตอริงจะขึ้นกับพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขการเคลือบเป็นสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพารามิเตอร์บางตัวที่เกี่ยวกับพลังงานของสารเคลือบ ได้แก่ ความดัน ศักย์ไบแอส หรือกำลังสเปตเตอริง ล้วนส่งผลต่อโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางที่ได้อย่างชัดเจน จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าการศึกษาเกี่ยวกับผลของผลของกำลังสเปตเตอริงต่อ

โครงสร้างและสัณฐานวิทยาของฟิล์มยังมีน้อยมาก บทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการศึกษาลักษณะของกำลังสเปคโตรสโกปีต่อโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ซึ่งเตรียมด้วยวิธีแอคทีฟดีพอสิตชันบนาลานซ์แมกนีตรอนสเปคโตรสโกปีบนแผ่นซิลิกอนและกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง โดยการแปรค่ากำลังสเปคโตรสโกปี 105 W, 145 W และ 265 W เพื่อศึกษาผลของกำลังสเปคโตรสโกปีขณะเคลือบต่อโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนา โครงสร้างจุลภาค ความหยาบผิวและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยต่อเนื่องของคณะผู้วิจัยที่กำลังศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางแข็งชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโกปีเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิจัยต่อไป

วิธีการศึกษา

การเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์

ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมจากเครื่องเคลือบระบบดีพอสิตชันแอคทีฟสเปคโตรสโกปี (Figure 1) ซึ่งประกอบด้วยระบบเคลือบและระบบสุญญากาศมีรายละเอียดดังนี้ (1) ระบบเคลือบ (coating system) ประกอบด้วยห้องเคลือบเป็นภาชนะสเตนเลสทรงกระบอกขนาดรัศมี 155 mm ความสูง 370 mm และติดตั้งเป้าสารเคลือบซึ่งเป็นแผ่นโลหะวาเนเดียมบริสุทธิ์ 99.95% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm โดยแคโทดที่ใช้เป็นแบบเป็นอานาลานซ์แมกนีตรอนแคโทด (unbalanced magnetron cathode) โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กึ่งกลางและด้านข้างของแคโทดมีค่าเท่ากับ 1800 G และ 1300 G ตามลำดับ ภาคจ่ายไฟฟ้าของเครื่องเคลือบเป็นชนิดกระแสตรงแรงดันสูง (1000 V 3 A) ในกระบวนการเคลือบใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสเปคโตรสโกปี และแก๊สไนโตรเจน (99.999%) เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา โดยจ่ายแก๊สผ่านชุดควบคุมการไหลของมวล (mass flow controller) ของ MKS type247D (2) ระบบสุญญากาศ (vacuum system) ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแปรไอชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำและมีเครื่องสูบลแบบโรตารีเป็นเครื่องสูบลทำย ส่วนความดันในห้องเคลือบตรวจวัดด้วยมาตรวัดความดันของ PFEIFFER ซึ่งประกอบด้วยชุดแสดงผล รุ่น TPG262 Dual Gauge และหัววัด รุ่น PKR251 Compact Full Range Gauge

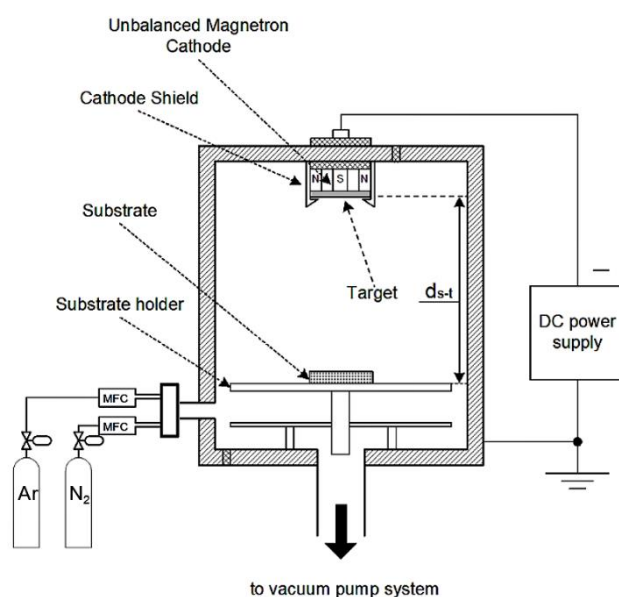


Figure 1 The diagram and feature of the coating system use in this research work.

Table 1 Thin films deposition conditions.

Parameters	Details
Sputtering target	V (99.95%)
Substrate	Si(100)
Substrate temperature	room temperature
Substrate-target distances (d_{st})	100 mm
Base pressure (P_B)	5.0×10^{-5} mbar
Working pressure (P_t)	5.0×10^{-3} mbar
Sputtering power	105, 145, 265 W
Flow rate of Ar	20 sccm
Flow rate of N_2	4 sccm
Deposition time	60 min

สำหรับขั้นตอนการเคลือบฟิล์มเริ่มจากนำวัสดุรองรับซึ่งใช้แผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ที่ทำความสะอาดแล้วเข้าสู่ห้องเคลือบ โดยจัดวางชิ้นงานให้ห่างจากหน้าเป้าสสารเคลือบเป็นระยะทางเท่ากับ 100 mm จากนั้นลดความดันภายในห้องเคลือบให้ได้ความดันพื้นที่ระดับประมาณ 5.0×10^{-5} mbar แล้วจึงจ่ายแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ห้องเคลือบ โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนคงตัวที่ 20 sccm และ 4 sccm ตามลำดับ ทั้งนี้ระหว่างการเคลือบความดันรวมขณะเคลือบจะถูกควบคุมไว้ให้คงตัวที่ระดับประมาณ 5.0×10^{-3} mbar ทำได้โดยการควบคุมที่วาล์วสุญญากาศสูง การเคลือบฟิล์มแต่ละชุดจะใช้เวลาเคลือบเท่ากันคือ 60 นาที สำหรับตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ กำลังสปัตเตอริง ซึ่งกำหนดไว้ 3 ค่า คือ 105 W, 145 W และ 265 W สำหรับรายละเอียดของพารามิเตอร์การเคลือบในงานวิจัยนี้แสดงใน (Table 1)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดนำไปศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้ (1) โครงสร้างผลึกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) ของ Burker รุ่น D8 โดยใช้ $Cu-K\alpha$ ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และตรวจวัดแบบ 2 θ -scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียง (grazing incident angle) เท่ากับ 2° โดยสแกนมุม 2 θ จากมุม 20° ถึง 80° (2) ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscopy; FE-SEM) ของ Hitachi รุ่น s4700 (3) โครงสร้างจุลภาคและความหนาผิวตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM) ของ Seiko Instrument รุ่น SPA400 และ (4) องค์ประกอบทางเคมีตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) ของ EDAX ซึ่งกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ LEO รุ่น 1450VP

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลของกำลังสเปตเตอริงต่อโครงสร้างผลึก

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางวานาเดียมไนไตรด์ที่เตรียมได้แสดงใน Figure 2 ผลการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นวานาเดียมไนไตรด์ที่มีความเป็นผลึกในทุกเงื่อนไขการเคลือบและเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังสเปตเตอริง โดยกำลังสเปตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เตรียมได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบเมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงต่ำ (105 W) พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีมุมประมาณ 37.7° และ 43.7° ซึ่งตรงกับสารประกอบวานาเดียมไนไตรด์ระนาบ (111) และ (200) ตามลำดับ (JCPDS เลขที่ 65-4307) และเมื่อเพิ่มกำลังสเปตเตอริงที่ใช้เคลือบให้สูงขึ้นเป็น 145 W และ 265 W พบว่าฟิล์มที่ได้มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีมุมประมาณ 37.7° , 43.7° , 63.7° และ 76.4° ซึ่งตรงกับวานาเดียมไนไตรด์ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ตามลำดับ (JCPDS เลขที่ 65-4307) ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงต่ำ ฟิล์มที่ได้มีเพียงสองระนาบคือ (111) และ (200) และเปลี่ยนเป็นสี่ระนาบคือ (111), (200), (220) และ (311) เมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงสูงขึ้นรวมถึงความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เพิ่มขึ้นตามกำลังสเปตเตอริงอีกด้วย

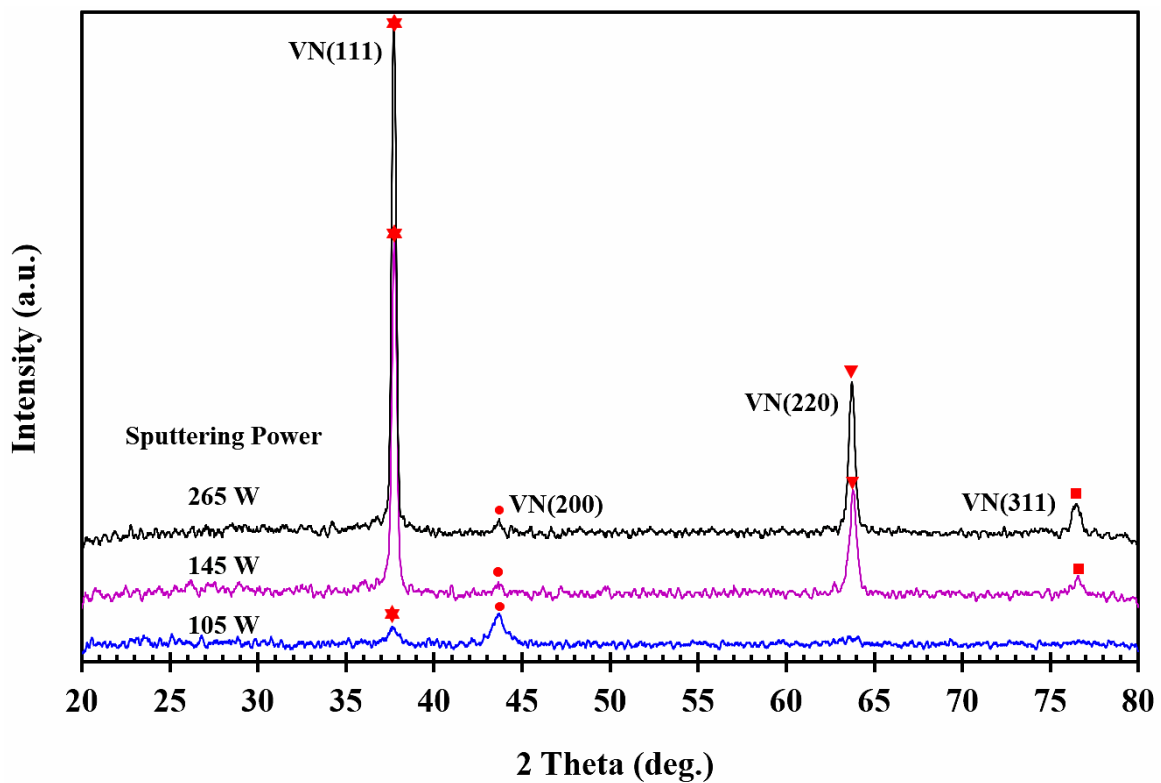


Figure 2 XRD patterns of VN thin film deposited at different sputtering power on Si (100).

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางวานาเดียมไนไตรด์ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีสาเหตุจาก 2 ปัจจัยหลัก ดังนี้ คือ (1) การเพิ่มกำลังสเปตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มซึ่งควบคุมโดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เป้าแคโทด ทำให้มีการสเปตเตอริงสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบออกมาพ่นตัวเป็นชั้นของฟิล์มบางมากขึ้นจึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้น และ (2) การเพิ่มกำลังสเปตเตอริงเป็นการเพิ่มพลังงานแก๊สไอออนของแก๊สอาร์กอนที่เข้าชนโลหะวานาเดียมที่ใช้เป็นเป้าสารเคลือบซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสเปตเตอริงอะตอม (อะตอมวานาเดียม) ที่หลุดจากเป้าสารเคลือบ

เมื่ออะตอมสารเคลือบเหล่านี้มีพลังงานสูงมากพอจนเสมือนว่าเป็นอนุภาคพลังงานที่ระดมยิงมายังวัสดุรองรับ ซึ่งช่วยให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้กันซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการจัดเรียงตัวและเติบโตเป็นผลึก นอกจากนี้ยังทำให้วัสดุรองรับมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ให้ผลเหมือนการให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับ (substrate heating) ระหว่างการเคลือบส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกมากขึ้น (Zhang et al., 2000)

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ซึ่งคำนวณจากสมการของ Scherrer สรุปดัง Table 2 พบว่าผลึกของฟิล์มที่ได้มีขนาดใหญ่มากขึ้นตามการเพิ่มกำลังสปัตเตอริง โดยเมื่อใช้กำลังสปัตเตอริงต่ำเท่ากับ 105 W ขนาดผลึกมีค่าในช่วง 12.8 nm – 16.8 nm และเมื่อเพิ่มกำลังสปัตเตอริงสูงขึ้นเป็น 145 W และ 265 W พบว่าผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 17.5 nm เป็น 25.4 nm และจาก 26.7 nm เป็น 32.9 nm ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้พบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าคงที่แลตทิซของสารประกอบวาเนเดียมไนไตรด์ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-4307 (ค่าคงที่แลตทิซของวาเนเดียมไนไตรด์เท่ากับ 4.130 Å) จึงสามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีโครงสร้างเป็นวาเนเดียมไนไตรด์ ผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องให้ความร้อนกับวัสดุรองรับทั้งในขณะเคลือบหรือภายหลังการเคลือบ

Table 2 Crystal sizes and lattice constants of the as-deposited VN thin films at different sputtering power.

Sputtering Power (W)	Crystal size (nm)				Lattice constant (Å)			
	(110)	(200)	(220)	(311)	(110)	(200)	(220)	(311)
105	16.1	12.8	-	-	4.130	4.144	-	-
145	25.4	17.5	19.9	23.5	4.126	4.143	4.125	4.124
265	31.1	32.9	26.7	22.5	4.128	4.142	4.127	4.130

ผลของกำลังสปัตเตอริงต่อลักษณะพื้นผิว โครงสร้างจุลภาค ความหนาและความหยาบผิว

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิสิกส์ (FE-SEM) แสดงไว้ใน (Figure 3) ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะพื้นผิวและขนาดเกรนของฟิล์มบางขึ้นกับกำลังสปัตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบ กล่าวคือเมื่อใช้กำลังสปัตเตอริงเท่ากับ 105 W พบว่าเนื้อของฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะแน่นทึบ มีความขรุขระหรือความหยาบผิวน้อย โดยเกรนที่บริเวณผิวน้ำของฟิล์มมีลักษณะกลม ขนาดเล็กละเอียดกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณผิวน้ำของฟิล์มอย่างต่อเนื่องจนไม่มีช่องว่างระหว่างเกรน (Figure 3a) เมื่อเพิ่มกำลังสปัตเตอริงเป็น 145 W พบว่าเกรนของฟิล์มมีลักษณะคล้ายปิรามิดหรือเกล็ดสามเหลี่ยมขนาดเล็กเรียงตัวต่อเนื่องกันห่าง ๆ และมีช่องว่างระหว่างเกรนค่อนข้างมาก ทำให้พื้นผิวฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างขรุขระ หรือมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้น (Figure 3b) และสุดท้ายเมื่อใช้กำลังสปัตเตอริงในการเคลือบที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 265 W พบว่าเกรนของฟิล์มที่เตรียมได้ยังคงมีลักษณะคล้ายกับเกรนของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังสปัตเตอริงเท่ากับ 145 W กล่าวคือเกรนมีลักษณะเป็นเกล็ดสามเหลี่ยมขนาดเล็กและมีช่องว่างระหว่างเกรนมาก นอกจากนี้ยังพบเกรนบางเกรนที่มีขนาดใหญ่มีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยมสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่บางบริเวณของผิวฟิล์ม (Figure 3c) ทั้งนี้ขนาดเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจส่งผลกับความแข็งของฟิล์มบาง เนื่องจากกลไกที่เกี่ยวข้องกับความแข็งของฟิล์มบางนั้นขึ้นกับขนาดเกรนเป็นสำคัญ (Musil, 2012)

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังสเปตเตอร์ต่ำ (105 W) มีเนื้อฟิล์มที่ค่อนข้างหนาแน่นและสามารถยึดเกาะวัสดุรองรับได้ดี (Figure 3a) เมื่อกำลังสเปตเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 145 W พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้เริ่มมีโครงสร้างแบบคอลัมน์าร์ กล่าวคือเนื้อฟิล์มนั้นเริ่มมีลักษณะเป็นแท่งที่วางตัวในแนวตั้ง (Figure 3b) และพบโครงสร้างลักษณะนี้อย่างชัดเจนในฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังสเปตเตอร์สูงสุดเท่ากับ 265 W โดยโครงสร้างแบบคอลัมน์าร์ที่เงื่อนไขนี้มีลักษณะเป็นแท่งยาวซึ่งวางตัวในแนวตั้งและแท่งยาวเหล่านี้เรียงชิดติดกันอย่างหนาแน่นมากขึ้น (Figure 3c) สำหรับความหนาของฟิล์มที่วัดได้จากภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีค่าเท่ากับ 304 nm, 767 nm และ 1,091 nm ซึ่งเพิ่มขึ้นตามกำลังสเปตเตอร์ที่ใช้เคลือบคือ 105 W, 145 W และ 265 W ตามลำดับ และเมื่อนำไปคำนวณหาอัตราการเคลือบของฟิล์มในงานวิจัยนี้ ซึ่งนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อเวลาเคลือบในหน่วย nm/min พบว่ามีค่าเท่ากับ 5.1 nm, 12.8 nm และ 18.2 nm/min ตามลำดับ เนื่องจากการแปรค่ากำลังสเปตเตอร์ที่ใช้เคลือบฟิล์มซึ่งทำได้โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าแคโทด เมื่อกระแสไฟฟ้าที่เป้าสารเคลือบสูงขึ้นจะทำให้ไอออนของแก๊สสเปตเตอร์ (ไอออนของแก๊สอาร์กอน) ในห้องเคลือบมีจำนวนเพิ่มขึ้น ไอออนเหล่านี้จะระดมยิงไปที่หน้าเป้าสารเคลือบซึ่งติดตั้งอยู่ที่แคโทดจนเกิดกระบวนการสเปตเตอร์เป้าสารเคลือบ ซึ่งจะทำให้ได้สเปตเตอร์อะตอม (sputtered atom) จำนวนมาก ดังนั้นสารเคลือบจึงมีโอกาสในการฟอร์มตัวเป็นชั้นเคลือบวาเนเดียมไนไตรด์ซึ่งจะสะสมพอกพูนบนผิววัสดุรองรับมากขึ้น ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาแน่นมากขึ้น ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Barhai et al. (2001) ซึ่งรายงานว่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้จะขึ้นกับกำลังสเปตเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบ โดยรายละเอียดของความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้แสดงใน (Table 3)

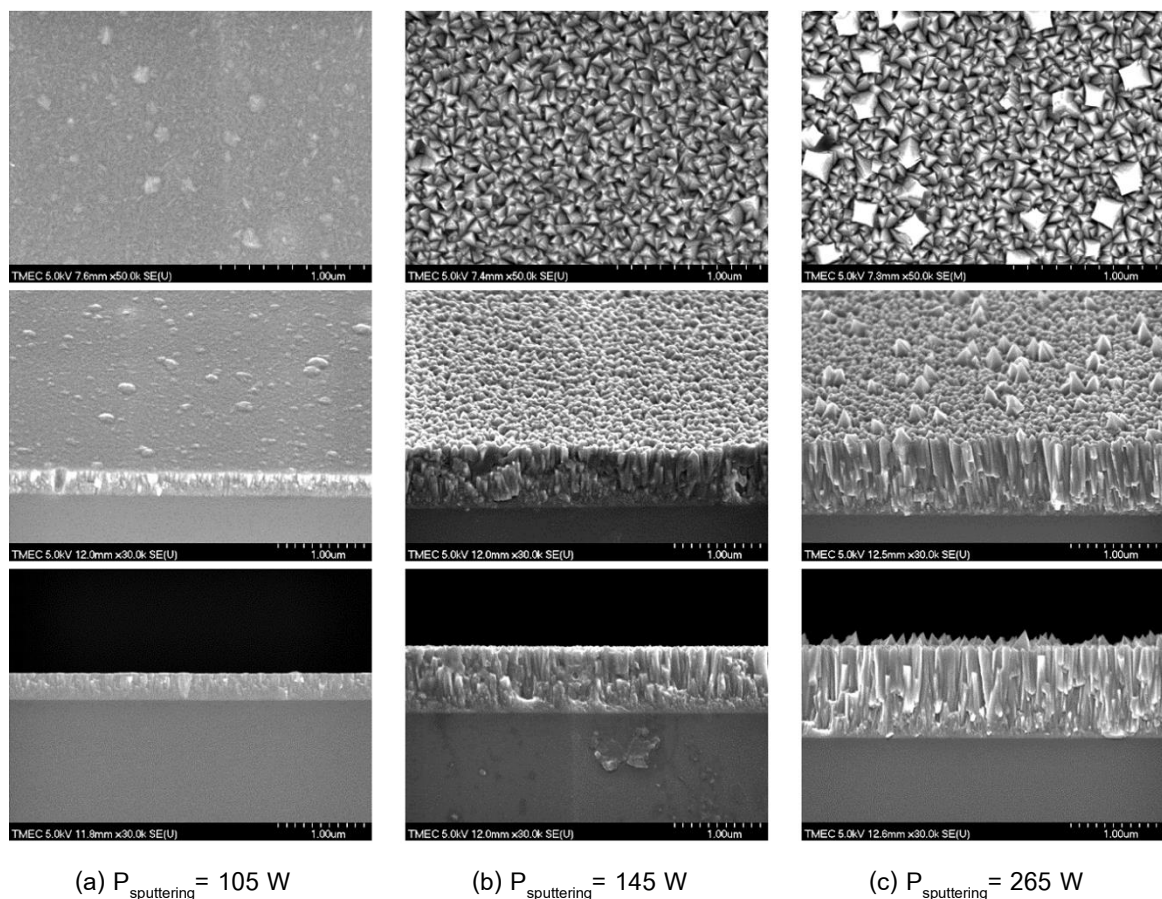
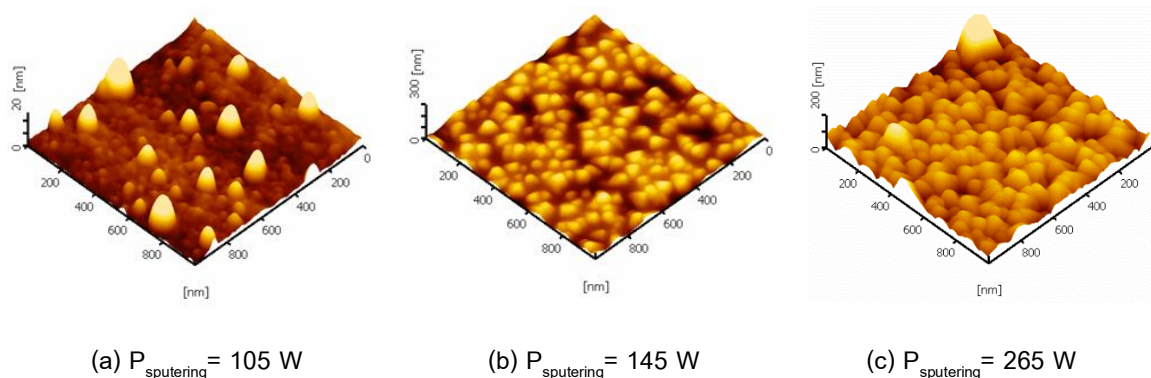


Figure 3 FE-SEM images of VN thin film deposited at different sputtering power on silicon wafers.

Table 3 Thickness and surface roughness of the VN thin films at different sputtering power.

Sputtering Power (W)	Thickness (nm)	Deposition rate (nm/min)	Roughness (R_a) (nm)	Roughness (R_{rms}) (nm)
105	304	5.1	2.2	3.5
145	767	12.8	10.9	13.2
265	1091	18.2	14.4	19.2

สำหรับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ซึ่งแสดงไว้ใน (Figure 4) พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล่าวคือเมื่อใช้กำลังสปัตเตอริงต่ำที่ 105 W พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ โดยมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetical mean roughness; R_a) ประมาณ 2.2 nm และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแบบรากกำลังสองเฉลี่ย (root mean square roughness; R_{rms}) ประมาณ 3.5 nm โดยพบเกรนของฟิล์มที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 nm และสูงประมาณ 20 nm กระจายตัวอยู่บนผิวฟิล์ม (Figure 4a) เมื่อกำลังสปัตเตอริงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 145 W พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้มีความหยาบผิวหรือมีความขรุขระมากขึ้น พื้นผิวฟิล์มประกอบด้วยเกรนขนาดใหญ่และมีช่องว่างระหว่างเกรนลักษณะคล้ายหลุมลึกทั่วผิวฟิล์ม โดยพบว่ามีค่า R_a สูงขึ้นที่ประมาณ 10.9 nm และ ค่า R_{rms} ที่ประมาณ 13.2 nm (Figure 4b) และสุดท้ายเมื่อใช้กำลังสปัตเตอริงสูงสุดเท่ากับ 265 W พบว่าผิวฟิล์มที่เคลือบได้มีความขรุขระมากขึ้น พื้นผิวของฟิล์มประกอบด้วยก้อนเกรนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ โดยมีค่า R_a สูงสุดเท่ากับ 14.4 nm และ ค่า R_{rms} เท่ากับ 19.2 nm (Figure 4c) สำหรับการที่ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีขนาดเกรนและความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามกำลังสปัตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการที่ว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการระดมยิงของอะตอมสารเคลือบพลังงานสูงที่เป็นผลมาจากการเพิ่มกำลังสปัตเตอริงในกระบวนการเคลือบนั้นมีส่วนทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น จากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า substrate temperature effect จึงส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Zhang et al., 2000) โดยรายละเอียดของค่า R_a และค่า R_{rms} ของฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้แสดงใน (Table 3)

**Figure 4** AFM images of VN thin film deposited at different sputtering power.

ผลของกำลังสเปตเตอริงต่อองค์ประกอบทางเคมี

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางที่เคลือบได้เมื่อแปรค่ากำลังสเปตเตอริงที่ใช้เคลือบในงานวิจัยนี้ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีธาตุวาเนเดียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยปริมาณของธาตุทั้งสองมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นกับกำลังสเปตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณวาเนเดียมในฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 37.9 at.% เป็น 44.0 at.% ตามการเพิ่มของกำลังสเปตเตอริง ในทางตรงกันข้ามเมื่อกำลังสเปตเตอริงที่ใช้เคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณไนโตรเจนในฟิล์มลดลงจาก 62.1 at.% เป็น 56.0 at.% ทั้งนี้อัตราส่วนของวาเนเดียมต่อไนโตรเจน (V:N) พบว่าอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ตามกำลังสเปตเตอริงที่ใช้ในการเคลือบเท่ากับ 105 W, 145 W และ 265 W ตามลำดับ โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมีในฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยกำลังสเปตเตอริงต่าง ๆ แสดงไว้ใน (Table 4)

Table 4 Chemical compositions of the as-deposited VN thin films at different sputtering power.

Sputtering power (W)	V (at.%)	N (at.%)	V:N
105	37.9	62.1	0.6
145	41.9	58.1	0.7
265	44.0	56.0	0.8

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคอีพิตอกซ์อเนกชั้นบนฐานซิลิกอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ต้องให้ความร้อนกับวัสดุรองรับ ผลการศึกษาพบว่ากำลังสเปตเตอริงมีผลต่อโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของฟิล์มบาง ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้เป็นวาเนเดียมไนไตรด์ (VN) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) โดยเมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงต่ำ (105 W) พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างผลึกระนาบ (111) และ (200) เท่านั้น แต่เมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงสูงกว่า 145 W จึงเริ่มพบโครงสร้างผลึกระนาบ (220) และ (311) เพิ่มเติม โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกสูงขึ้นตามการเพิ่มของกำลังสเปตเตอริง ขนาดผลึกมีค่าในช่วง 16.1 – 32.9 nm โดยพบว่าผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังสเปตเตอริง ค่าคงที่แลตทิซมีค่าในช่วง 4.124 – 4.144 Å ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มบางพบว่ามีเนื้อฟิล์มสม่ำเสมอ มีการยึดเกาะกับวัสดุรองรับได้ดีและฟิล์มบางเริ่มมีโครงสร้างแบบคอลัมน์เมื่อใช้กำลังสเปตเตอริงในการเคลือบเท่ากับ 145 W ขึ้นไป ความหนาและอัตราเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังสเปตเตอริงในช่วง 304 – 1,091 nm และ 5.1 – 18.2 nm/min ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีขนาดเกรนและความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามกำลังสเปตเตอริงที่ใช้เคลือบ ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 2.2 nm เป็น 14.4 nm ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงานพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีวาเนเดียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยปริมาณวาเนเดียมเพิ่มขึ้นในช่วง 37.9 – 44.0 at.% ส่วนปริมาณไนโตรเจนลดลงในช่วง 62.1 – 56.0 at.% ตามการเพิ่มของกำลังสเปตเตอริง อัตราส่วนของวาเนเดียมต่อไนโตรเจน (V:N) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.6 เป็น 0.8 ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังสเปตเตอริงที่แตกต่างกันสรุปได้ว่า

กำลังสเปคตรัมเท่ากับ 165 W เป็นเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยชิ้นนี้ เนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบด้วยเงื่อนไขดังกล่าวมีความเป็นผลึกสูง มีโครงสร้างที่หนาแน่นแบบคอลัมน์าร์ รวมไปถึงความเป็นเนื้อเดียวกันที่ตรงตาม Stoichiometric ที่ปริมาณของวาเนเดียมกับไนโตรเจนในฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด นอกจากนี้ผลการศึกษาจากงานวิจัยชิ้นนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น มีโครงสร้างผลึก มีลักษณะพื้นผิว หรือมีองค์ประกอบของธาตุในเนื้อฟิล์มตามต้องการ อีกทั้งยังสามารถนำองค์ความรู้นี้ไปพัฒนาต่อยอดสำหรับเคลือบผิวชิ้นงานอื่น เช่น เหล็กกล้า พลาสติก หรือวัสดุอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อใช้เป็นชั้นเคลือบแข็งหรือชั้นเคลือบทนความร้อน ซึ่งสามารถปรับปรุงผิววัสดุให้มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังอาจนำมาใช้งานกับวัสดุอุปกรณ์ในด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Alaksanasuwan, S., Buranawong, A., & Witit-anun, N. (2020). Effect of total pressure on the structure and hydrophilic property of TiO_2 thin film prepared by reactive DC magnetron sputtering method. *RMUTSB Acad. J.*, 8(2), 240–254. (in Thai)
- Barhai, P.K., Kumari, N., Banerjee, I., Pabi, S.K., & Mahapatra, S.K. (2001). Study of the effect of plasma current density on the formation of titanium nitride and titanium oxynitride thin films prepared by reactive DC magnetron, *Vacuum*, 84, 896–901.
- Cai, Q., Li, S. X., Pu, J. B., Cai, Z. B., Lu, X. Cui, Q. F., & Wang, L.P. (2019). Effect of multicomponent doping on the structure and tribological properties of VN-based coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 556–574.
- Caicedo, J. C. Zambrano, G., Aperador, W., Escobar-Alarcon, L., & Camps, E. (2011). Mechanical and electrochemical characterization of vanadium nitride (VN) thin films. *Applied Surface Science*, 258, 312–320.
- Fayomi, O. S. I., Akande, I. G., Abioye, O. P., & Fakehinde, O. B. (2019). New trend in thin film composite coating deposition: A mini review. *Procedia Manufacturing*, 35, 1007–1012.
- Franz, R., & Mitterer, C. (2013). Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review. *Surface & Coatings Technology*, 228, 1–13.
- Leasen, S., & Boonyopakorn, N. (2017). The effect of RF power on crystal structure and electrical properties of aluminum-doped zinc oxide films prepared by RF magnetron sputtering technique. *RMUTSB Acad. J.*, 5(2), 129–135. (in Thai)
- Lucio-Porto, R., Bouhtiyya, S., Pierson, J. F., Morel, A., Capon, F., Boulet, P., & Brousse, T. (2014). VN thin films as electrode materials for electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 141, 203–211.
- Mistrik, J., Takahashi, K., Antos, R., Aoyama, M., Yamaguchi, T., Anma, Y., Fukuda, Y., Takeyama, M. B., Noya, A., Jiang, Z. T., Thurgate, S. M., & Riessen, G. V. (2004). Spectroscopic ellipsometry of TaN_x and VN films. *Thin Solid Films*, 455 – 456, 473–477.
- Musil, J. (2012). Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface & Coatings Technology*, 207, 50–65.
- Qiu, Y. X., Zhang, S., Li, B., Lee, J. W., & Zhao, D. L. (2012). Influence of nitrogen partial pressure and substrate bias on the mechanical properties of VN coatings. *Procedia Engineering*, 36, 217–225.
- Roldan, M. A., Lopez-Flores, V., Alcala, M. D., Ortega, A., & Real, C. (2010). Mechanochemical synthesis of vanadium nitride. *Journal of the European Ceramic Society*, 30, 2099–2107.
- Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E. Cabibbo, M., & Spigarelli, S. (2015). Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings. *Ceramic International*, 41, 10349–10379.
- Shanker, G., Prathap, P., Srivatsa, K. M. K., & Singh, P. (2019). Effect of balanced and unbalanced magnetron sputtering processes on the properties of SnO_2 thin films. *Current Applied Physics*, 19(6), 697–703.

- Sun, Q., & Fu, Z. W. (2008). Vanadium nitride as a novel thin film anode material for rechargeable lithium batteries. *Electrochimica Acta*, 54, 403–409.
- Suszkowski, T., Gulbinski, W., Urbanowicz, A., & Gulbinski, W. (2011). Preferentially oriented vanadium nitride films deposited by magnetron sputtering. *Materials Letters*, 65, 2146–2148.
- Zhang, D.H., Yang, T.L., Ma, J., Wang, Q.P., Gao, R.W., & Ma, H.L. (2000). Preparation of transparent conducting ZnO:Al films on polymer substrates by r. f. magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 158, 43–48.