

ผลของกำลังสputtering ต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วย
เทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสputtering

Effect of Sputtering Power on Structure of Titanium Nitride Thin Films Deposited by
Reactive DC Magnetron Sputtering Technique

คมกฤษ สายเสรีภาพ^{1,2*} นรินทร์ วิฑิตอนันต์^{1,2} อติศร บุรณวงษ์^{1,2} และ สุรสิงห์ ไชยคุณ^{1,2}

Khomkrit Saisereepap^{1,2*} Nirun Wittit-anun^{1,2} Adisorn Buranawong^{1,2} and Surasing Chaiyakun^{1,2}

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบบนซิลิกอนและสแตนเลสด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสputtering เพื่อศึกษาผลของกำลังสputtering ในช่วง 130 ถึง 270 วัตต์ ต่อโครงสร้างฟิล์ม โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มศึกษาด้วยเทคนิค XRD ความหนาและลักษณะพื้นผิวศึกษาด้วยเทคนิค AFM ผลการศึกษาพบว่า สีของฟิล์มที่เคลือบได้แปรไปตามกำลังสputtering จาก สีม่วง เป็น สีทอง และ สีนํ้าตาล ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (111), (200) (220) และ (311) เมื่อกำลังสputtering เพิ่มขึ้น พบว่าขนาดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 21.9 นาโนเมตร เป็น 39.8 นาโนเมตร ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 331 นาโนเมตร เป็น 1113 นาโนเมตร ขณะที่ความหยาบผิวเพิ่มขึ้นจาก 0.5 นาโนเมตร เป็น 21.5 นาโนเมตร

ABSTRACT

Titanium nitride (TiN) thin films were deposited on silicon wafer and stainless steel by reactive DC magnetron sputtering technique. The effect of the sputtering power, ranging from 130 to 270 W, on the structure of the films was investigated. The crystal structure was characterized by XRD technique; the film's thickness and surface morphology were evaluated by AFM technique. The results show that the as-deposited film's color was varied with the sputtering power from violet, gold and brown. The crystallite structure of the as-deposited films was face center cubic (fcc) with (111), (200), (220), and (311), plane. When the sputtering power was increased it was found that crystal size were increased from 21.9 nm to 39.8 nm, the film's thickness were increased from 331 nm to 1113 nm, while the roughness were increased from 0.5 nm to 21.5 nm.

Key Words: Thin films, titanium nitride, sputtering, reactive magnetron sputtering.

E-mail: komgrit_saisereepap@hotmail.com

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Chon Buri 20131.

² ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) สบว. สกอ.

Plasma for Surface Sciences Laboratory, Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP), PERDO, CHE

คำนำ

การปรับปรุงผิววัสดุให้มีความคงทน ถาวรและสวยงามนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่การปรับปรุงผิววัสดุวิธีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน คือ การเคลือบผิววัสดุด้วยสารเคลือบที่เหมาะสมในลักษณะฟิล์มบาง (thin film) ด้วยเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศ (vacuum deposition) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เนื่องจากไทเทเนียมไนไตรด์ เป็นเซรามิกที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ มีความแข็งสูง นิยมใช้เป็นชั้นเคลือบป้องกัน (protective coating) สำหรับเครื่องมือช่างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุใช้งาน (Hilton *et al.*, 1987; Sundgren, 1985) นอกจากนี้ยังมีการนำฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์มาใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย เช่น ใช้เป็นขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ (diffusion barriers) ของ Al และ Cu ที่อุณหภูมิใช้งานสูง ที่สำคัญฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ยังมีสีทองที่สวยงาม (Vaz *et al.*, 2004) จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เคลือบชิ้นงานที่ต้องการหรือเน้นความสวยงาม เช่น เข็มกลัด ตุ่มหู สายนาฬิกา กรอบแว่นตา ฯลฯ ทำให้ได้ชิ้นงานสีทองสวยงามที่คงทน ไม่เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย

การเตรียมฟิล์มบางของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ทำได้หลายวิธี เช่น วิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Valvoda, 1995) วิธีอาร์เอฟรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Jones *et al.*, 2000) Ion Beam-assisted Deposition (Lal *et al.*, 2001) วิธีรีแอคทีฟพัลส์เลเซอร์ (Craciun *et al.*, 1999) หรือ วิธีระเหยด้วยคาโทดิกอาร์ค (Cathodic arc evaporation) (Niyomsoan *et al.*, 2002) ทั้งนี้การเตรียมฟิล์มแต่ละวิธีนั้นจะให้ฟิล์มที่มีโครงสร้างและสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการเตรียมฟิล์มบางนอกจากโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางที่ต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงประโยชน์ในการนำฟิล์มไปใช้งานอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเตรียมด้วยทั้งนี้วิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นวิธีที่น่าสนใจเมื่อเทียบกับวิธีอื่น เนื่องจากสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งไอออนปริมาณมากที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบซึ่งระดมยิง (bombardment) ไปยังวัสดุรองรับยังช่วยปรับเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มที่ได้ทำให้สามารถประยุกต์ไปสู่การเคลือบชิ้นงานขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย

ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบได้จากวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ เงื่อนไขการเคลือบ เช่น ความดันพื้น ความดันขณะเคลือบ กำลังไฟฟ้า อัตราไหลแก๊ส ฯลฯ อย่างไรก็ตาม โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว ตลอดจนสมบัติและองค์ประกอบของฟิล์มที่เคลือบได้อาจแตกต่างกันบ้างถ้าใช้วิธีเคลือบและเงื่อนไขที่แตกต่างกันแม้เตรียมจากเครื่องเคลือบเดียวกัน ทำให้การศึกษาผลของเงื่อนไขการเคลือบที่ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงยังคงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการวิจัยด้านฟิล์มบางต่อไป บทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง บนแผ่นซิลิกอนและแผ่นสแตนเลสที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อศึกษาผลของ กำลังสปัตเตอริง หรือ กำลังไฟฟ้า ที่จ่ายให้แก่โหนดของเครื่องเคลือบที่ใช้ในกระบวนการเคลือบต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้ โดยฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียมได้นำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD) ส่วนความหนาและลักษณะพื้นผิวศึกษาด้วยอะตอมมิคฟอซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope; AFM) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบดีซีอินบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (Figure 1) มีห้องเคลือบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 35.3 เซนติเมตร สูง 37.0 เซนติเมตร ติดตั้งเป้าไทเทเนียมบริสุทธิ์ (99.97%) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่แคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง การเคลือบใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอริง และแก๊สไนโตรเจน (99.995%) เป็นแก๊สไอพริกิริยา เครื่องสุบสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแปรไอและมีเครื่องสูบลโรตารีเป็นเครื่องสูบท้าย การวัดความดันใช้มาตรวัดความดันของ balzers รุ่น TPG300 โดยใช้หัววัดแบบพิรานี รุ่น TPR010 และ หัววัดแบบเพนนิ่ง รุ่น IKR050 การจ่ายแก๊สในกระบวนการเคลือบควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราไหลมวลแก๊สของ MKS รุ่น type247D

การเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เริ่มจากนำวัสดุรองรับซึ่งประกอบด้วยแผ่นสแตนเลส เกรด 304 ขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร (สำหรับสังเกตลี) และแผ่นซิลิกอน ขนาด 1.0x1.0 เซนติเมตร (สำหรับตรวจสอบโครงสร้างผลึก ความหนาและลักษณะพื้นผิว) ที่ทำความสะอาดแล้วเข้าห้องเคลือบวางห่างจากเป้าสารเคลือบเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร ลดความดันในภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันพื้นเท่ากับ 5.0×10^{-5} มิลลิบาร์ ปล่อยแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนเข้าห้องเคลือบด้วยการควบคุมของเครื่องควบคุมอัตราไหลมวลแก๊ส กำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนคงที่เท่ากับ 15 : 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (Standard Cubic Centimeters per Minute; sccm) สำหรับการแปรค่ากำลังสปัตเตอริงหรือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แคโทดในการเคลือบกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 130, 200 และ 270 วัตต์ โดยฟิล์มแต่ละชุดเคลือบนาน 60 นาที

ฟิล์มที่ได้ทั้งหมดนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) ของ Rigaku รุ่น Rint 2000 โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.54056$ อังสตรอม) ที่ 40 กิโลโวลต์ และ 40 มิลลิแอมป์ ตรวจวัดแบบ 2 θ -scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียง (grazing incident angle) เท่ากับ 3 $^{\circ}$ สแกน 2 θ จาก 20 $^{\circ}$ ถึง 80 $^{\circ}$ สำหรับขนาดผลึก (crystal size) ของฟิล์มคำนวณจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามสมการของ Scherrer คือ $L = k\lambda/\beta \cos \theta$ เมื่อ L คือขนาดผลึก, k คือค่าคงที่เท่ากับ 0.94, λ คือความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 1.54056 อังสตรอม, β คือความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด (FWHM) และ θ คือมุมของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สูดท้ายศึกษาลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope; AFM) ของ Veeco Instruments Inc. รุ่น Nanoscope IV

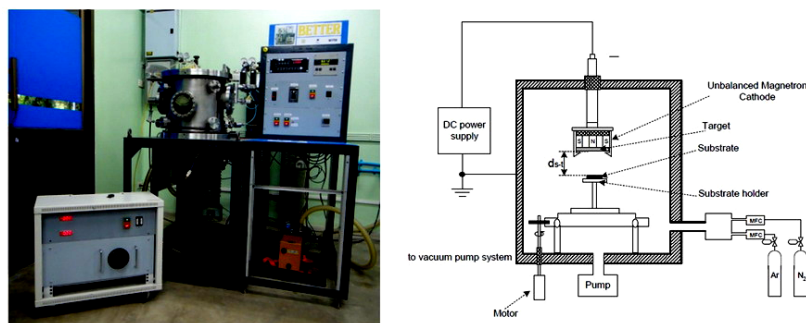


Figure 1 Feature and diagram of the DC unbalanced magnetron sputtering system

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากการแปรค่ากำลังสปีดเตอริง พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียนตามลักษณะของวัสดุรองรับ สีของฟิล์มที่ได้แปรไปตามกำลังสปีดเตอริง โดยเมื่อใช้กำลังสปีดเตอริงเท่ากับ 130 วัตต์ ฟิล์มมีสีม่วงเขียว เมื่อกำลังสปีดเตอริงเพิ่มเป็น 200 และ 270 วัตต์ สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทองและสีน้ำตาล (Figure 2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Barhai *et al.* (2010) ซึ่งพบว่ากำลังสปีดเตอริงที่จ่ายให้แคโทดในการสปีดเตอริงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ สำหรับอัตราเคลือบของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้กำลังสปีดเตอริงต่างๆ (หากจากค่าความหนาของฟิล์มหารด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม) พบว่าเมื่อใช้กำลังสปีดเตอริงในระบบวนการเคลือบเท่ากับ 130 วัตต์ อัตราเคลือบมีค่าประมาณ 5.5 นาโนเมตรต่อนาที และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 18.5 นาโนเมตรต่อนาที เมื่อกำลังสปีดเตอริงเพิ่มเป็น 270 วัตต์ (Figure 3) เนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังสปีดเตอริงจะทำให้ไอออนของอาร์กอนที่เกิดจากการไอออไนซ์แก๊สอาร์กอนในห้องเคลือบมีพลังงานจลน์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการสปีดเตอริงไทเทเนียมจากเป้าสารเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การรวมตัวกันของอะตอมไทเทเนียมและไนโตรเจนแล้วฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์เคลือบบนผิววัสดุรองรับมีโอกาสสูงขึ้นในเวลาเท่ากันเป็นผลให้อัตราการเคลือบของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

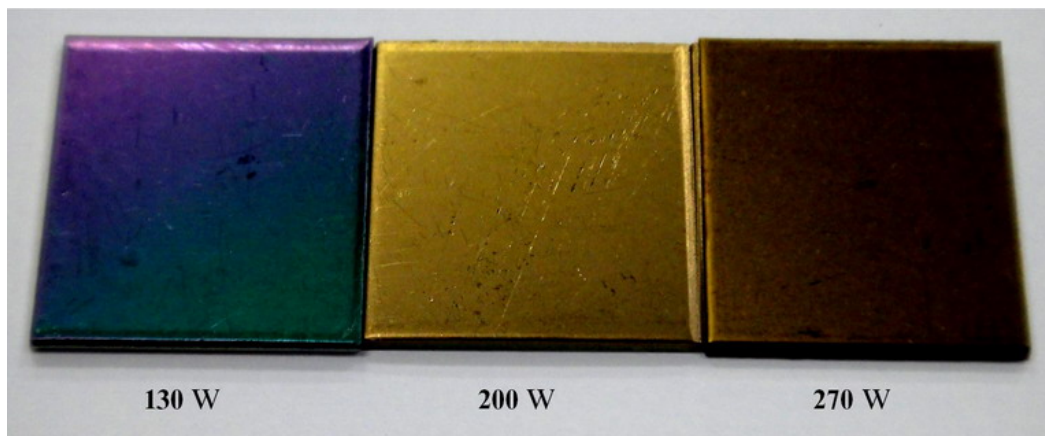


Figure 2 Features and colors of TiN thin films deposited on stainless substrate at different power.

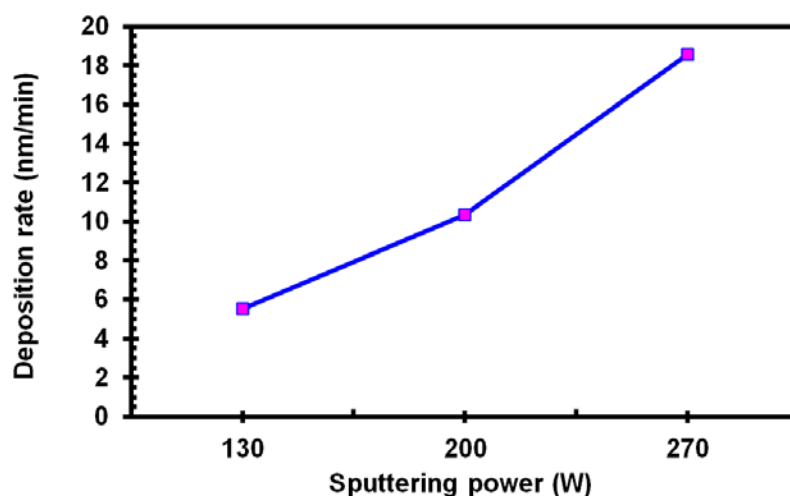


Figure 3 Deposition rates of TiN thin films at different power.

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เตรียมได้ทั้งหมดด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังแสดงใน Figure 4 กรณีฟิล์มชุดที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 วัตต์ ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐานเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบยังไม่มากพอให้อะตอมของไทเทเนียมจากเป้าสารเคลือบและแก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยาแล้วฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ แต่เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 200 วัตต์ พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 42.52° , 61.86° และ 74.18° ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก (fcc) ระนาบ (200), (220) และ (311) และสุดท้ายเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็น 270 วัตต์ พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 36.70° , 42.52° , 61.86° และ 74.18° ซึ่งตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก (fcc) ที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.50° เป็นพีคของซิลิกอนที่เป็นวัสดุรองรับ โดยค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 4.238 – 4.239 อังสตรอม (Table 1) ส่วนขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้คำนวณจากสมการของ Scherrer พบว่ามีขนาดในช่วง 21.9 – 39.8 นาโนเมตร

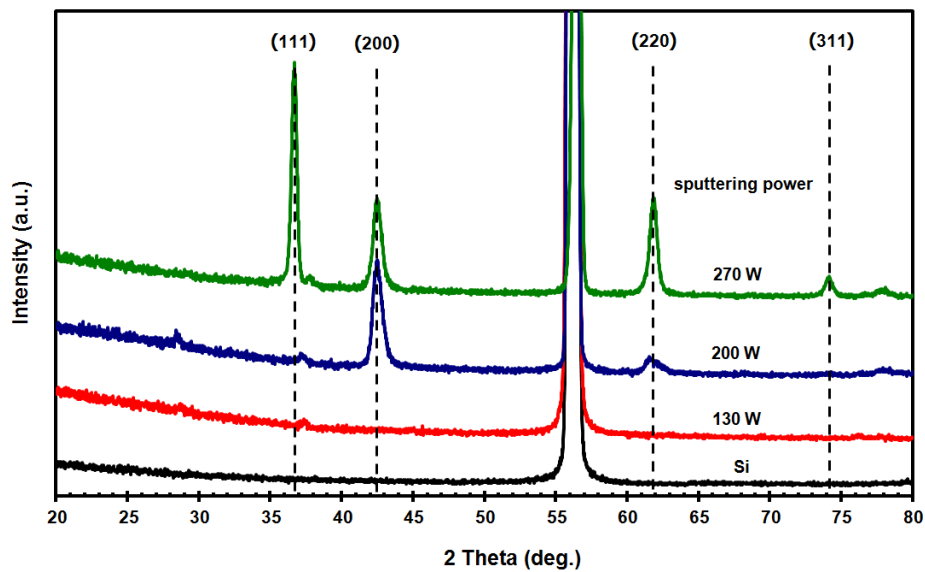


Figure 4 X-ray diffraction patterns of TiN thin films at different power

Table 1 Lattice constant, crystal size, thickness and roughness of as-deposited TiN thin film

Power (W)	Lattice constant (Å)	Crystal size (nm)	Thickness (nm)	Roughness (nm)
130	-	-	331	0.5
200	4.239	21.85	621	1.5
270	4.238	39.84	1113	21.5

สำหรับความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อกำลังสเปคโตริงที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มจาก 130 วัตต์ เป็น 270 วัตต์ พบว่า ความหนาฟิล์มเพิ่มจาก 331 นาโนเมตร เป็น 1113 นาโนเมตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Barhai *et al.* (2010) ซึ่งรายงานว่าความหนาของฟิล์มที่ได้เพิ่มขึ้นตามกำลังสเปคโตริงที่ใช้เคลือบ ส่วนความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.5 นาโนเมตร เป็น 21.5 นาโนเมตร (Table 1) เนื่องจากเมื่อกำลังสเปคโตริงเพิ่มขึ้นทำให้อาร์กอนมีพลังงานมากขึ้นส่งผลให้อัตราการสเปคโตริงเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมไทเทเนียมหลุดจากเป้าออกมารวมตัวกับไนโตรเจนเกิดเป็นชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น

Figure 5 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยกำลังสเปคโตริงเท่ากับ 130 วัตต์ สารเคลือบที่จับตัวเป็นฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับมีลักษณะเรียบกระจายตัวสม่ำเสมอไม่มีการรวมตัวกัน อย่างชัดเจนเนื่องจากพลังงานของสารเคลือบยังไม่มากพอ เมื่อกำลังสเปคโตริงเพิ่มขึ้นเป็น 200 และ 270 วัตต์ สารเคลือบมีการรวมตัวกันเป็นยอดแหลมกระจาย สุกทำยรวมตัวใหญ่ขึ้นมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และ หุบเขา (เป็นร่องลึก) อย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อกำลังสเปคโตริงที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้นสารเคลือบที่ตกเคลือบ บนผิววัสดุรองรับมีพลังงานมากพอในการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่โตมากขึ้น

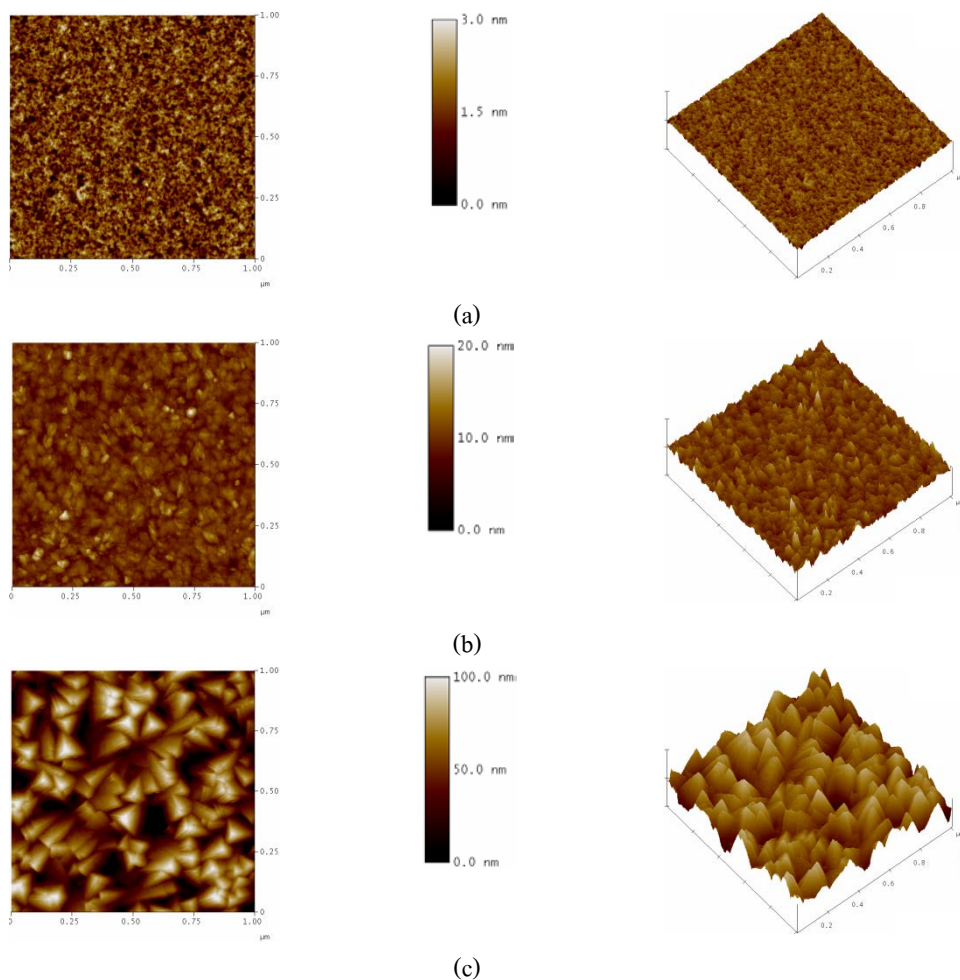


Figure 5 Morphology of TiN thin films by AFM at different power
(a) 130 W, (b) 200 W, (c) 270 W

สรุป

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยเทคนิครีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงบนแผ่นซิลิกอนและสแตนเลส เกรด 304 พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะเรียบเนียน สะท้อนแสงดี สีของฟิล์มบางแปรไปตามกำลังสเปคโตรริงที่ใช้จาก สีม่วงเขียว เป็น สีทองและสีน้ำตาลในที่สุด ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ระบาย (111), (200) (220) และ (311) ค่าคงที่แลตทิซอยู่ในช่วง 4.238 – 4.239 อังสตรอม ขนาดผลึกของฟิล์มจากสมการของ Scherrer มีค่าในช่วง 21.9 – 39.8 นาโนเมตร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้กำลังสเปคโตรริงต่ำ สารเคลือบมีลักษณะเรียบกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อกำลังสเปคโตรริงเพิ่มขึ้นสารเคลือบเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มมีลักษณะเป็นยอดแหลมจนมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) ในที่สุด ส่วนความหนาและความหยาบผิวพบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาอยู่ในช่วง 331 – 1113 นาโนเมตร ส่วนความหยาบผิวมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 21.5 นาโนเมตร

เอกสารอ้างอิง

- Barhai, P.K., Kumari, N., Banerjee, I., Pabi, S.K. and Mahapatra, S.K. 2010. 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.
- Craciun, V., Craciun, D., Ghica, C., Trupina, L., Flueraru, C. and Nastase, N. 1999. Growth of thin transparent titanium nitride layers by reactive laser ablation. *Applied Surface Science*. 138-139: 593-598.
- Hilton, M.R., Vandentop, G.J., Salmeron M. and Somorjai, G.A. 1987. TiN coatings on M2 steel produced by plasma-assisted chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*. 154: 377-386.
- Jones, M.I., McColl, I.R. and Grant, D.M. 2000. Effect of substrate preparation and deposition conditions on the preferred orientation of TiN coatings deposited by RF reactive sputtering. *Surface and Coatings Technology*. 132: 143-151.
- Lal, K., Meikap, A.K., Chattopadhyay, S.K., Chatterjee, S.K., Ghosh, M., Baba, K. and Hatada, R. 2001. Electrical resistivity of titanium nitride thin films prepared by ion beam-assisted deposition. *Physica*. B 307: 150-157.
- Niyomsoan, S., Grant, W., Olson, D.L. and Misha, B. 2002. Variation of color in titanium and zirconium nitride decorative thin films. *Thin Solid Films*. 415: 187-194.
- Sundgren, J.E. 1985. Structure and properties of TiN coatings. *Thin Solid Films*. 128: 21-44.
- Valvoda, V. 1995. Structure of thin films of titanium nitride. *Journal of Alloys and Compounds*. 219: 83-87.
- Vaz, F., Cerqueira, P., Rebouta, L., Nascimento, S.M.C., Alves, E., Goudeau, Ph., Riviere, J.P., Pischow, K. and de Rijk, J. 2004. Structural, optical and mechanical properties of coloured TiN_xO_y thin films. *Thin Solid Films*. 447 – 448: 449-454.