ผลของความดันย่อยไนโตรเจนต่อสมบัติทางโครงสร้าง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์

Effects of nitrogen partial pressure on the structural and electrical properties of Ti-W-N thin films

ภัททิรา หอมหวล[1]*, จิราภรณ์ พงษ์โสภา[2]และ กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล[3]

Pattira Homhuan[1], Jiraporn Pongsopa[2] and Kanchaya Honglertkongsakul[3]

[1]*ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา*

[2]*โปรแกรมวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต*

[3]*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*

บทคัดย่อ

ฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ถูกปลูกลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนที่มีระนาบ(100)ด้วยกระบวนการฉาบโลหะแมกนีตรอนระบบสองหัวแบบไม่ดุลโดยใช้เป้าโลหะไทเทเนียมและเป้าโลหะทังสเตนบริสุทธิ์ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจน งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบสุญญากาศถูกปรับให้มีค่าตั้งแต่ 0% ถึง 9%ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนส่งผลอย่างมากต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างของผลึกและความต้านทานแผ่น เอกซเรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงานแสดงสัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มโดยสัดส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน สัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มมีค่าสูงสุดที่19%โดยอะตอม เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์มเป็นลูกบาศก์แบบกลางหน้าของสารละลายของแข็ง $Ti_xW_YN_Z$ ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน โดยค่าความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 5.3 โอห์ม/ตาราง ถึง 11.0 โอห์ม/ตาราง

คำสำคัญ : ไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ / ฟิล์มบาง / การฉาบด้วยโลหะ

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

Abstract

Titanium tungsten nitride films on Si (100) were grown by dual unbalanced magnetron sputtering with pure Ti and W target under argon/nitrogen atmosphere. We studied the effects of nitrogen partial pressure on the properties of Ti-W-N thin films. The nitrogen partial pressure in the vacuum chamber was varied from 0% to 9% of total gas. The results showed that the nitrogen partial pressure strongly affected on composition, crystal structure and sheet resistance. Energy dispersive x-ray analysis (EDX) showed that the nitrogen concentration in films increased with the nitrogen partial pressure. The maximum nitrogen concentration was 19 at.%. X-ray diffraction analysis confirmed FCC solid solution $Ti_xW_YN_Z$ in films. The sheet resistance of Ti-W-N films tended to increase with an increase in nitrogen partial pressure. The sheet resistance varied from 5.3 Ω/square to 11.0 Ω/square.

Keywords: Ti-W-N / Thin film / Sputtering

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการฟิล์มเคลือบแข็งที่ปลูกด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์มีแนวโน้มสูงขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตในหลายด้านเนื่องจากฟิล์มเคลือบแข็งที่นำมาเคลือบชิ้นงานทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น เช่น ลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิว ลดการสึกกร่อนและลดการกัดกร่อน เป็นต้น โดยส่งผลให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในขบวนการผลิต (Vetter et al., 1996; Carlsson et al., 2006; Pesch et al., 2003; Van et al.,1995) ซึ่งการปลูกฟิล์มด้วยประบวนการทางฟิสิกส์มีลักษณะเด่นกว่าการปลูกฟิล์มด้วยกระบวนการทางเคมีคือ ฟิล์มที่ได้มีความเสถียรสูงและมีความเจือปนของสิ่งแปลกปลอมน้อยกว่า (Caicedo et al.,2011) มีความต้านทานการสึกกร่อนดี (Severo et al., 2009) จากการศึกษาพบว่าทังสเตนไนไตรด์และทังสเตนคาร์ไบด์เป็นฟิล์มเคลือบแข็งที่นิยมนำมาเคลือบผิวชิ้นงานโดยเฉพาะชิ้นงานสำหรับเครื่องมือตัดเนื่องจากมีความแข็งสูงและมีความต้านทานการกัดกร่อนดี แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบชิ้นงานด้วยฟิล์มดังกล่าวเกิดการออกซิเดชันได้ง่าย ซึ่งพบว่าการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มสามารถทำได้โดยการเพิ่มธาตุที่สามเข้าไปในระบบการปลูกฟิล์ม (Marques et al., 2003; Piedade et al., 2006) หนึ่งในธาตุที่นิยมนำมาเพิ่มในระบบการปลูกฟิล์มในกระบวนทางฟิสิกส์ คือ ธาตุไทเทเนียม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเคลือบฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์บนแผ่นรองรับซิลิกอน

ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจนโดยใช้กระบวนการฉาบด้วยโลหะแมกนีตรอนระบบสองหัวแบบไม่ดุล โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ Cavaleiro และคณะ (2003) ได้ทำการปลูกฟิล์ม W-Ti-N เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขการปลูกฟิล์มที่ดีสุดด้วยกระบวนการฉาบด้วยโลหะ โดยผลค้นพบว่าเป้าโลหะควรเป็นการผสมระหว่างโลหะทังสเตนและโลหะไทเทเนียม 20 %โดยน้ำหนัก เพื่อให้สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มดีที่สุด (Cavaleiro et al., 2003) และงานที่สืบเนื่องกัน คือ งานของ Silvaและคณะ (2008) ค้นพบว่า สัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม โดยทำให้ฟิล์มมีความต้านทานการสึกกร่อนสูงและลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นผิว (Silva et al., 2008) ดังนั้นงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับผลของความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

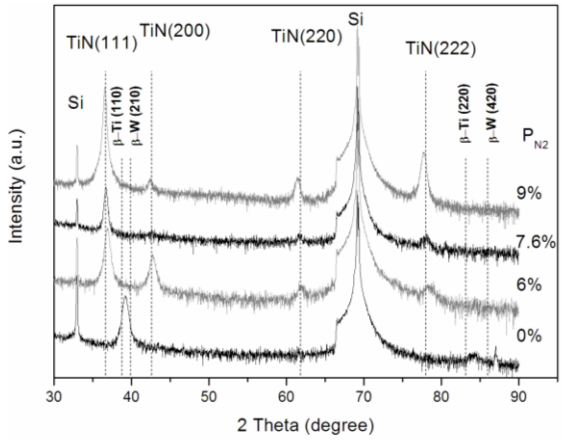
ฟิล์มบางไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ถูกปลูกลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนที่มีระนาบ(100) ด้วยระบบการฉาบด้วยโลหะแมกนีตรอนระบบสองหัวแบบไม่ดุล โดยใช้เป้าโลหะบริสุทธิ์ 2 เป้า คือ ไทเทเนียมและทังสเตนในบรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจน โดยเปลี่ยนความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนตั้งแต่ 0 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ความดันพื้นฐานในระบบก่อนที่ปลูกฟิล์มอยู่ที่ 5×10^{-5} มิลลิบาร์ ความดันในขณะทำการปลูกฟิล์ม คือ 5×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับเป้าทั้งสองโดยให้กระแสแมกนีตอนของเป้าไทเทเนียมและทังสเตนคงที่คือ 0.6 แอมแปร์ และ 0.1 แอมแปร์ ตามลำดับ ค่าความต้านทานแผ่นวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้ว พลังงานยึดเหนี่ยวของธาตุ ทังสเตน ไทเทเนียม และ ไนโตรเจนวัดด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์(XPS, AXIS Ultra DLD) โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD, Brukers D8 Discover)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รูปที่ 1 แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ (Ti-W-N) ที่เคลือบลงบนซิลิกอนระนาบ (100) ที่เปลี่ยนความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน สำหรับฟิล์มไทเทเนียมทังสเตน (Ti-W) ที่ปลูกด้วยความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน 0% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด พบว่ายอดปรากฏที่ $2\theta = 39.218^\circ$ ซึ่งอยู่ระหว่างยอด β-Ti (110) และ β-W (210) ทังสเตนบริสุทธิ์มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ที่มีแลตทิซพารามิเตอร์ 5.05 อังสตอม โดยยอดของ β-Ti(110) และ β-W(210) ปรากฏตำแหน่ง $2\theta = 38.759^\circ$ และ 39.885°

ตามลำดับ การปรากฏเฟสของ β-Wแสดงถึงการจัดตัวที่ไม่เสถียรของโครงสร้าง W_3-W (Abadias et al., 2006) หรือการก่อเกิดของทังสเตนออกไซด์ (W_3O) (Louro et al., 1995) การที่ตำแหน่งยอดของการทดลองปรากฏที่ตำแหน่งมุมน้อยกว่าตำแหน่งอ้างอิงของβ-W เพราะค่าของแลตทิซพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นจากทังสเตนบริสุทธิ์อันเกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นสารละลายของแข็งของไทเทเนียมในเมทริกซ์ทังสเตนทำให้แลตทิซพารามิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเป็น 6-9% ของปริมาณแก๊สทั้งหมดเฟสβ-W ไม่ปรากฏ แต่โครงสร้างลูกบาศก์แบบกลางหน้า(FCC) ปรากฏแทน การที่ตำแหน่งยอดปรากฏใกล้เคียงกับเฟส TiN พิจารณาได้ว่าเป็นการผสมกันของเฟส W_2N/TiN (สารละลายของแข็ง $W_xTi_yN_z$) เนื่องจากในกรณีถ้ามีเพียงเฟส TiN อย่างเดียว เฟส W ต้องปรากฏในรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Shaginyan et al., 2002; Zhou et al., 2011) กระบวนการเกิดฟิล์มเป็นขบวนการแทนที่ของอะตอมไทเทเนียมด้วยอะตอมทังสเตน จากข้อมูลโครงสร้างผลึกของทังสเตนไนไตรด์ไม่ปรากฏ

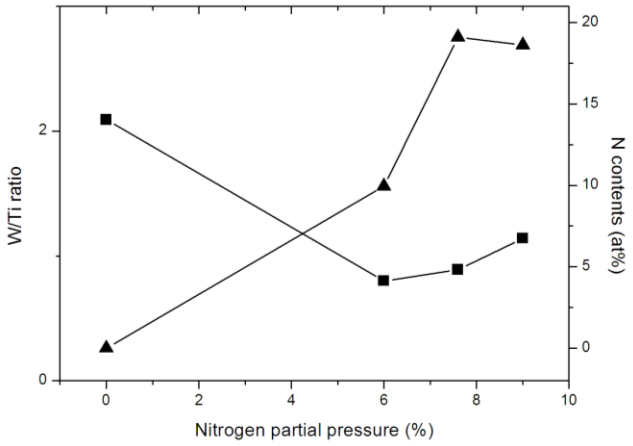


รูปที่ 1 แบบอย่างการเลี้ยวเบนของฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ที่เคลือบลงบนซิลิกอนระนาบ (100) ที่เปลี่ยนความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม

สัดส่วนของ W/Ti และ N ในฟิล์มเมื่อเปลี่ยนความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 2 เส้นกราฟสัดส่วนของ W/Ti ต่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนแสดงด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมทึบ ในขณะที่สัดส่วนของ N ในฟิล์มต่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนแสดงด้วยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมทึบ จากกราฟเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของไนโตรเจนในฟิล์มมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อความ

ดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบเป็น 0% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ คือ Ti-W โดยสัดส่วนของ W/Ti มากกว่า 1 แสดงว่าอะตอมของทังสเตนถูกสปัตเตอร์ด้วยไอออนของอาร์กอนได้ง่ายกว่าอะตอมของไทเทเนียม แม้เป้าไทเทเนียมจะถูกระดมยิงด้วยกระแสไอออนมากกว่า (จากเงื่อนไขของการปลูกฟิล์ม) แต่เมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบสัดส่วนของ W/Ti ลดลงจากเดิม แต่สัดส่วนW/Tiมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนในฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นในงานวิจัยนี้เป้าไทเทเนียมและเป้าทังสเตนแยกออกจากกันและไม่ขึ้นแก่กัน การเกิดชั้นไนไตรด์ที่บริเวณผิวเป้าของไทเทเนียมจะไวกว่าบนผิวเป้าทังสเตนเนื่องจากไทเทเนียมจับตัวกับไนโตรเจนได้ดีกว่าทังสเตน (Goldschmidt, H.J., 1967) เมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบมากขึ้น ผิวเป้าของไทเทเนียมเกิดชั้นไนไตรด์และทำให้อัตราการเกิดการฉาบด้วยโลหะที่ผิวเป้าไทเทเนียมลดลงในขณะที่อัตราการเกิดชั้นไนไตรด์บนผิวเป้าทังสเตนเกิดขึ้นได้ช้า ส่งผลให้สัดส่วนอะตอมของ W/Ti ที่เคลื่อนที่มายังแผ่นรองรับมีค่าสูงขึ้นในขณะที่อัตราการเกิดฟิล์มลดลง (Severo et al., 2009)

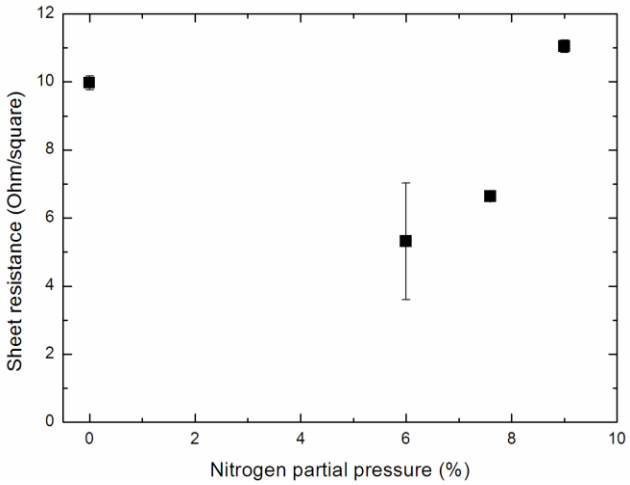


รูปที่ 2 สัดส่วนของ W/Ti และ N ในฟิล์มเมื่อเปลี่ยนความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน สัดส่วนของW/Ti แสดงด้วย■ สัดส่วน N แสดงด้วย ▲

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

ขณะที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเป็น 0% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ค่าความต้านทานแผ่นมีค่า 9.97 $\pm$ 0.20 โอห์ม/ตาราง แต่เมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ พบว่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มลดลง ดังรูปที่ 3 เป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างจากสารละลายของแข็งของไทเทเนียมในเมท

ริกซ์ทังสเตน ซึ่งวิถีเสรีเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในเนื้อฟิล์มมีค่าน้อยเนื่องจากการแทรกตัวในโครงสร้างผลึกของอะตอมไทเทเนียม มาเป็นโครงสร้างแบบ FCC เมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้นแนวโน้มความต้านทานแผ่นมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการแทรกของอะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างฟิล์ม (Zhou et al., 2011)

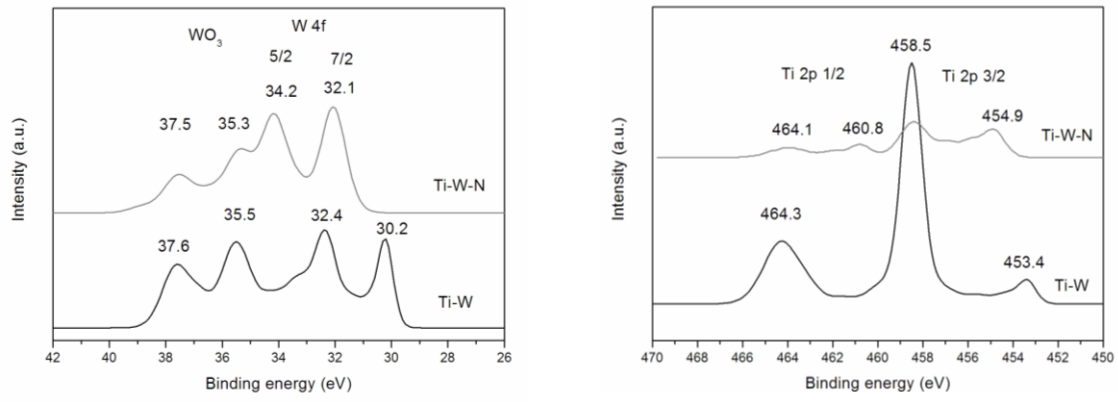


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน

3.4 การวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยวของฟิล์มด้วยสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

เมื่อนำฟิล์มมาตรวจสอบด้วยสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) พบว่าฟิล์มมีองค์ประกอบทางเคมีของคาร์บอนและออกซิเจน คาร์บอนที่พบเกิดจากการเจือปนที่ผิวชิ้นงาน ในขณะที่ออกซิเจนเกิดจากการออกซิไดส์ของชิ้นงานที่อยู่ในอากาศหรือออกซิเจนที่เหลืออยู่ในภาชนะสุญญากาศ ฟิล์ม Ti-W ที่ปลูกด้วยความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน 0% ของปริมาณแก๊สทั้งหมด แสดงพลังงานยึดเหนี่ยว W 4f 7/2 และ W 4f 5/2 ที่ตำแหน่ง 30.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 32.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ดังรูป 4 (ก) การเลื่อนของตำแหน่งยอด W 4f ของฟิล์ม Ti-W-N ที่ปลูกด้วยความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน 7.6 % ของปริมาณแก๊สทั้งหมดเกิดจากการก่อเกิดของทังสเตนไนไตรด์(WN) โดยเลื่อนตำแหน่งจากเดิมประมาณ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ (Zhou et al., 2011; Wagner et al.,1979) การที่ยอดของ WN เลื่อนตำแหน่งแสดงถึงการถ่ายโอนประจุจากทังสเตนไปสู่ไนโตรเจนระหว่างการก่อเกิดฟิล์ม (Shen et al., 2000) ส่วนยอดอื่นๆที่ปรากฏ คือ ทังสเตนออกไซด์ โดย W ใน WO_3 ที่ 35.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 37.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (Shaginyan et al., 2002)เปรียบเทียบพลังงานยึดเหนี่ยว Ti 2p ของฟิล์ม Ti-W และ ฟิล์ม Ti-W-N ที่ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจน 7.6 % ของปริมาณแก๊สทั้งหมดแสดงดังรูป 4 (ข) ฟิล์ม Ti-W แสดง Ti 2p

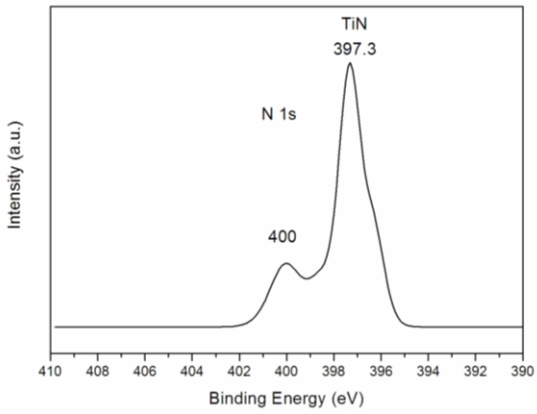
3/2ที่ 453.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ยอดอื่นๆแสดงการเกิด TiO_2 ที่ 458.5 และ 464.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ผิว (Viincent et al., 1999)



(ก) **(ข)**

รูปที่ 4 การแยกชัดสูงของ XPS ของ W 4f (ก) และ Ti 2p (ข) ของ Ti-W และ Ti-W-N ที่ปลูกด้วยความดันย่อยแก๊สไนโตรเจน 0% และ 7.6 %ของปริมาณแก๊สทั้งหมดตามลำดับ

สำหรับฟิล์ม Ti-W-N ยอดที่ตำแหน่ง 454.9 และ 458.4 อิเล็กตรอนโวลต์เกิดจากการรวมกันของหลายพันธะ คือ Ti ใน TiO ที่ตำแหน่ง 454.7 อิเล็กตรอนโวลต์ Ti ใน TiN ที่ตำแหน่ง 455.8 อิเล็กตรอนโวลต์ และ Ti ใน TiO_2 ที่ตำแหน่ง 458.6 อิเล็กตรอนโวลต์ (Moulder et al., 1992) ยอดทั้งหมดนี้แสดงถึง Ti 2p 3/2 สำหรับธาตุไทเทเนียม ยอดของ Ti 2p 3/2 และ Ti 2p 1/2 ห่างกัน 6.1 อิเล็กตรอนโวลต์ (Viincent et al., 1999) ดังนั้น ยอดตำแหน่ง 460.8 และ 464.1อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงถึง Ti 2p1/2 เส้นเสปกตรัม ของ N 1s แสดงดังรูปที่ 5 ยอดเด่นของ N 1s อยู่ที่ 397.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่บ่งบอก N ใน TiN (Viincent et al., 1999) และ WN_x (Shen et al., 2000) ยอดรองลงมาที่ตำแหน่ง 400 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งบอก N ใน C_xN_y (Zemek et al., 1995)



รูปที่ 5 การแยกชัดสูงของ XPS ของ N 1s ของ Ti-W-N ฟิล์มที่ปลูกด้วยความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน 7.6 % ของปริมาณแก๊สทั้งหมด

4. สรุปผลการวิจัย

ฟิล์มไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ถูกเคลือบลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนที่มีระนาบ(100) โดยใช้กระบวนการฉาบด้วยโลหะแมกนีตรอนระบบสองหัวแบบไม่ดุลที่มีโลหะไทเทเนียมและโลหะทังสเตนบริสุทธิ์เป็นเป้าภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจน จากการทดลองพบว่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อสมบัติของฟิล์ม ความต้านทานแผ่น องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม และโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมทังสเตนไนไตรด์ โดยที่ความต้านทานแผ่นของฟิล์มลดลงเมื่อเปลี่ยนจาก Ti-W เป็น Ti-W-N เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของฟิล์ม และค่าความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการแทรกตัวของอะตอมไนโตรเจนในฟิล์ม นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์แสดงพลังงานยึดเหนี่ยวของ W 4f, Ti 2p และ N 1s ซึ่งบ่งบอกการเกิดพันธะของ TiN, WN, TiO, TiO_2 และ WO_3 ในฟิล์มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงโครงสร้างผลึกของฟิล์ม โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างผสมของ β-W และ β-Ti เป็นโครงสร้างสารละลายของแข็ง $Ti_xW_YN_Z$ โดยทุกฟิล์มที่ปลูกด้วยเงื่อนไขที่ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนไม่น้อยกว่า 9 % ของปริมาณแก๊สทั้งหมด ฟิล์มแสดงพหุผลึกของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวในระนาบที่มีพลังงานต่ำที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และขอขอบคุณ รศ.ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ เป็นอย่างสูงสำหรับคำปรึกษาและคำชี้แนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องการฉาบด้วยโลหะและขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องขั้วปลายแหลมสี่ขั้ว

6. เอกสารอ้างอิง

Abadias, G., Dub, S. andShmegera, R. (2006). Nanoindentation hardness and structure of ion beam sputtered TiN, W and TiN/W multilayer hard coatings. *Surface& Coatings Technology,* 200, 6538-6543.

Caicedo, J.C., Yate, L. and Montes, J. (2011). Improving the physicochemical surface properties on AISI D3 steel coated with Ti-W-N. *Surface& Coatings Technology,* 205, 2947-2953.

Carlsson, P. and Olson, M. (2006). PVD coatings for sheet metal forming processes—a tribological

evaluation. *Surface& Coatings Technology,* 200, 4654-4663.

Cavaleiro, A., Trindade, B., Vierira, M.T. (2003). Influence of Ti addition on the properties of W-Ti-C/N sputtered films. *Surface& Coatings Technology*, 174-175, 68-75.

Goldschmidt, H.J. (1967). *Interstitial alloys*.London: Butterworths.

Louro, C. and Cavaleiro, A. (1995). Oxidation behavior of W-N-M (M = Ni, Ti) sputtered films. *Surface& Coatings Technology,* 74-75, 998-1004.

Marques, A.P. and Cavaleiro, A. (2003). Structural and mechanical properties of amorphous W–Si–N sputtered films after thermal annealing. *Thin Solid Films,* 441, 150-160.

Moulder, J.F., Stickle, W.F., Sobol, P.E. and Bomben, K.D. (1992). *Handbook of x-rayphotoelectron spectroscopy*.Eden Prairie: Perkin-Elmer.

Pesch, P., Sattel, S., Woestman, S., Masarczyk, P., Herden, K., Stucky, T., et al. (2003). Performance of hard coated steel tools for steel sheet drawing. *Surface& Coatings Technology,* 163-164, 739-746.

Piedade, A.P., Gomes, M.J., Pierson, J.F. andCavaleiro, A. (2006). Characterization of W–Ge–N coatings deposited by sputtering. *Surface& Coatings Technology,* 200, 6303-6307.

Severo, V., Vilhena, L., Silva, P.N., Dias, J.P., Becker, D., Wagner, S., et. al. (2009). Tribologicalbehaviour of W-Ti-N coatings in semi-industrial strip-drawing tests. *Journal of materials processing technology,* 209, 4662-4667.

Shaginyan, L.R., Misina, M., Zemek, J., Musil, J., Regent, F. andBritun, V.F. (2002). Composition, structure, microhardness and residual stress of W–Ti–N films deposited by reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 408, 136-147.

Shen, Y.G., Mai, Y.W., McKenzie, D.R., Zhang, Q.C., McFall, W.D. and McBride, W.E. (2000). Composition, residual stress, and structural properties of thin tungsten nitride films deposited by reactive magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 88, 1380.

Silva, P.N., Dias, J.P. Cavaleiro, A. (2008).Performance of Ti-W-(N) coated pins in lubricated pin-on-disk tests. *Surface& Coatings Technology*,202, 2338-2343.

Van Stappen, M., Stals, L.M., Kerkhofs, M. and Quaeyhaegens, C. (1995). State of the art for the industrial use of ceramic PVD coatings. *Surface& Coatings Technology,* 74-75, 629-633.

Vetter, J., Knaup, R., Dwulwtzki, H., Schneider, E.and Vogler, S. (1996). Hard coatings for

lubrication reduction in metal forming. *Surface& Coatings Technology,* 86-87(2), 739-747.

Viincent Crist, B. (1999). *Handbooks of Monochromatic XPS Spectra*. California : XPS International LLC. Wagner, C.D., Riggs, W.M., Davis, L.E. and Mouder, J.F. (1979). *Handbook of x-ray photoelectron spectroscopy*. Eden Prairie: Perkin-Elmer.

Zemek, J., Luches, A., Leggieri, G, Fejfar, A. and Trchova, M. (1995). Characterization of carbon nitride films prepared by laser reactive ablation deposition. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 76, 747-752.

Zhou, S., Liu, W. and Cai, C. (2011). Structural and electrical properties of Ti-W-N thin films deposited by reactive RF sputtering. *Physics Procedia,* 18, 66-72.