

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

บทนี้เป็นการอภิปรายผลการศึกษาและสรุปผล ประกอบด้วย ผลของอัตราไหลแก๊สในโตรเจน ผลของกำลังไฟฟ้า และผลของเวลาเคลือบ ต่อลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์ม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

อภิปราย

ผลของอัตราไหลแก๊สในโตรเจน

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

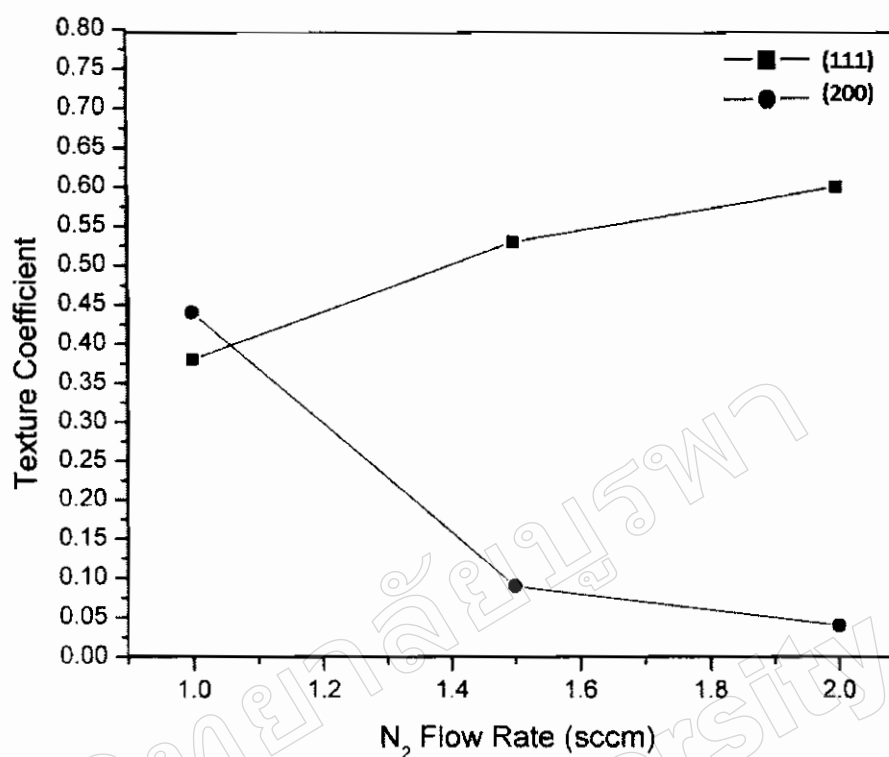
ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ทั้งหมด พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน เมื่อแปรค่าอัตราการไหลแก๊สในโตรเจนจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm พบว่าสีของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อน เป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้มตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Roquiny et al. (1999) ซึ่งพบว่า เมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนในกระบวนการเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 0 sccm เป็น 67 sccm สีของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีทองและสุดท้ายเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องจากเมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนเท่ากับ 0 sccm ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกของโลหะไทเทเนียมซึ่งยึดกันด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bond) ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก สีของฟิล์มที่เคลือบได้จึงมีสีเทา เมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนเพิ่มขึ้นสีของฟิล์มก็เปลี่ยนไป เนื่องจากเมื่ออะตอมของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สอะตอมของไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจะเข้าร่วมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในออร์บิทัล d เพื่อฟอร์มตัวเป็นชั้นของไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) เป็นผลให้พันธะโลหะและอิเล็กตรอนอิสระในฟิล์มที่จะทำอันตรกิริยา (Interaction) โดยการดูดกลืน (Absorbition) และสะท้อน (Relection) กับแสงตกกระทบผิวหน้าฟิล์มมีจำนวนลดลง ทำให้การสะท้อนแสงและสีของฟิล์มเปลี่ยนไป (Niyomsoan et al., 2002)

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 เมื่อแปรค่าอัตราการไหลแก๊สในโตรเจนจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm พบความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่

ระนาบ (111), (220) และ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ระนาบ (200) มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lou, Axen, Somekh, and Hutchings (1997) ซึ่งพบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบเท่ากับ 5% ฟิล์มที่เคลือบได้มีความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (200) สูงสุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนเป็น 20% ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (200) กลับมีค่าลดลง ขณะที่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน การเปลี่ยนระนาบของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเปลี่ยนนั้น เป็นผลจากการระดมยิง (Bombard) ของอะตอมสารเคลือบที่มีพลังงานต่าง ๆ ขณะเกิดการฟอร์มตัวของฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับ โดยพลังงานของอะตอมสารเคลือบที่ระดมยิงจะเปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเนื่องจากเมื่ออัตราไหลแก๊สมีค่าสูงอะตอมสารเคลือบมีโอกาสสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกันของอะตอมข้างเคียงมากกว่าในกรณีที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำ (Kim, Park, & Park, 2012)

อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนระนาบของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบเปลี่ยนไปนั้น ยังสามารถอธิบายได้ด้วยค่า Texture Coefficient ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของระนาบที่สนใจว่ามีมากน้อยเพียงใดในฟิล์มที่เคลือบได้ โดย Texture Coefficient สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมดของฟิล์มที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ พบว่าระนาบของฟิล์มที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ดังนี้คือเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm พบว่าระนาบ (111) มีค่า Texture Coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.80 ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.44 เป็น 0.04 (ภาพที่ 5.1) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. (2012) ที่พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มี Texture Coefficient ของระนาบ (111) และ (200) เปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนซึ่งส่งผลต่อพลังงานของอะตอมสารเคลือบที่ระดมยิงฟิล์มขณะเกิดการฟอร์มตัวบนวัสดุรองรับ



ภาพที่ 5-1 Texture Coefficient ของระนาบ (111) และ (200) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่าง ๆ

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเพชเชนเตอร์คิวบิก จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้ พบว่าฟิล์มที่เคลือบมีค่าคงที่แลตทิซอยู่ในช่วง 4.236 – 4.243 Å ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å สอดคล้องกับงานวิจัยของ Roquiny et al. (1999) ซึ่งพบว่าเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนตั้งแต่ 0.5 sccm ถึง 25 sccm ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มบางที่เคลือบ มีค่าคงที่ในช่วง 4.2507 - 4.2157 Å

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ คำนวณจากสมการของ Scherrer พบว่าขนาดของผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 29.9 nm ถึง 41.8 nm เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arshi, Lu, Koo, Lee, and Ahmed (2012) ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 4 sccm ถึง 10 sccm ขนาดของผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24 nm ถึง 35 nm

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.0 sccm อะตอมสารเคลือบจับตัวเป็นฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับมีลักษณะเรียบกระจายตัวสม่ำเสมอเนื่องจากที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำ อะตอมของไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบมีปริมาณน้อย ส่งผลให้ห้องเคลือบมีระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean Free Path) สูง พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบจึงมีค่าสูงเนื่องจากโอกาสในการชนกันของอะตอมในห้องเคลือบมีค่าต่ำ เมื่ออะตอมของสารเคลือบตกลงบนวัสดุรองรับ จึงยังมีพลังงานจลน์มากพอสำหรับเคลื่อนที่ไปทั่วพื้นผิวของวัสดุรองรับก่อนฟอร์มตัวเป็นชั้นของฟิล์ม เป็นผลให้พื้นผิวฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะราบเรียบ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 sccm อะตอมสารเคลือบมีการรวมตัวคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) อย่างชัดเจน และสุดท้ายมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเป็น 2.0 sccm เนื่องจากเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อะตอมสารเคลือบที่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับมีพลังงานไม่มากพอ จึงเริ่มเกาะกลุ่มรวมตัวกัน ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของฟิล์มเป็นกลุ่มก้อน

สำหรับความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm พบว่า ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $1.28 \text{ } \mu\text{m} - 1.35 \text{ } \mu\text{m}$ ส่วนความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.5 nm เป็น 18.6 nm เนื่องจากที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำ อะตอมของไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบมีปริมาณน้อย ส่งผลให้ห้องเคลือบมีระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean Free Path) สูง โอกาสในการชนกันของอะตอมในห้องเคลือบจึงต่ำ ทำให้อะตอมของสารเคลือบมีพลังงานจลน์สูง เมื่อตกลงบนวัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบยังมีพลังงานจลน์มากพอทำให้เกิดการเคลื่อนที่กระจายครอบคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวที่ตกกระทบก่อนฟอร์มตัวเป็นชั้นของฟิล์ม ซึ่งเป็นผลให้พื้นผิวฟิล์มที่เคลือบได้จึงมีความหยาบผิวดำ แต่เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอะตอมของไนโตรเจนมีปริมาณมากขึ้น ระยะปลอดการชนเฉลี่ยสั้นลง ทำให้พลังงานจลน์ของอะตอมของสารเคลือบมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานจากการชนกันของอะตอมในห้องเคลือบ ทำให้เมื่อสารเคลือบตกกระทบวัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะฟอร์มตัวเป็นชั้นของฟิล์มทันที เป็นผลทำให้ฟิล์มมีความหยาบผิวมาก

ผลของกำลังไฟฟ้า

1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

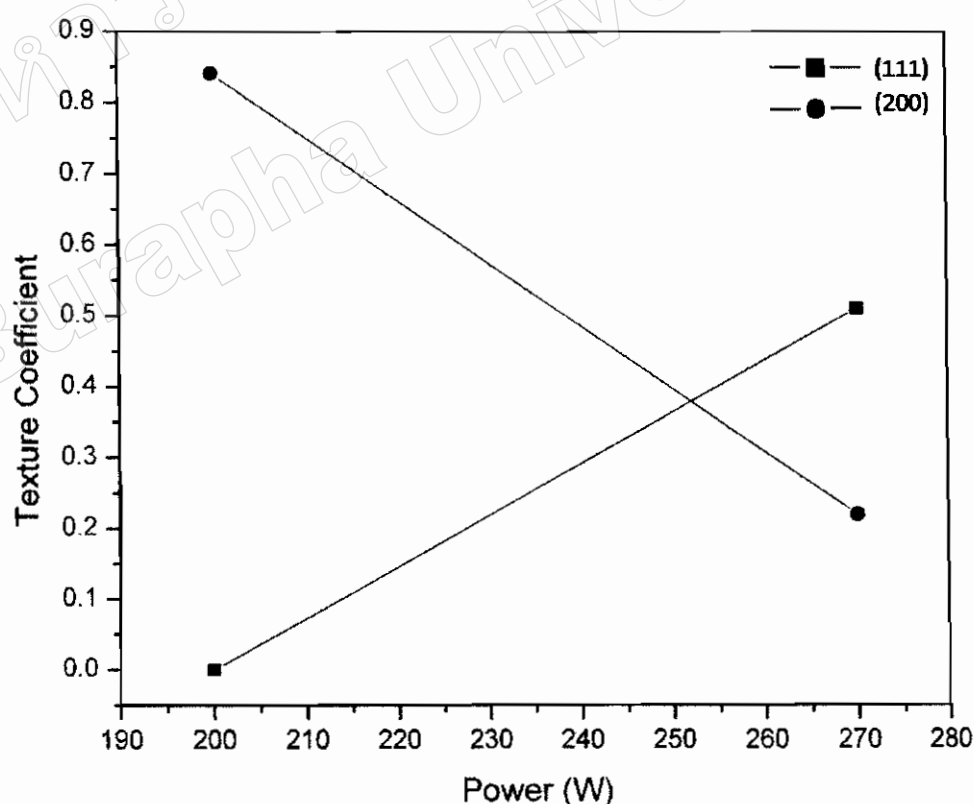
ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน เมื่อแปรค่ากำลังไฟฟ้าจาก 130 W เป็น 200 W และ 270 W พบว่าสีของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนจาก สีม่วง เป็นสีทองและสีน้ำตาล ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD โดยในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ (130 W) ฟิล์มที่เคลือบได้มี โครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐานและฟิล์มมีสีม่วง แต่เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น (200 W และ 270 W) ส่งผลให้อะตอมสารเคลือบมีพลังงานมากขึ้นทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความเป็นผลึกมากขึ้นและสี ของฟิล์มที่เคลือบได้จะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 200 W ฟิล์มที่เคลือบได้มีสีทองและมีโครงสร้างผลึกระนาบ (200) เป็น Preferred Orientation สุดท้ายเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มเป็น 270 W ฟิล์มที่เคลือบได้มีสีน้ำตาลและมีโครงสร้างผลึกระนาบ (111) และ (200) เป็น Preferred Orientation สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yukimura et al. (2003) ซึ่งพบว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่มีสีทองจะมีโครงสร้างผลึกระนาบ (200) เป็น Preferred Orientation โดยสีของฟิล์มที่เคลือบได้จะเปลี่ยนไปตามโครงสร้างผลึกของฟิล์มนั้น ๆ ซึ่งสัมพันธ์ กับพลังงานของอะตอมสารเคลือบ โดยเมื่ออะตอมสารเคลือบมีพลังงานต่ำ ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้าง ผลึกแบบอสัณฐาน แต่เมื่อพลังงานของอะตอมสารเคลือบเพิ่มขึ้นฟิล์มที่ได้มีความเป็นผลึกมากขึ้น ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบก็เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพลังงานของอะตอมสาร เคลือบโดยตรง

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ ไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ยกเว้นฟิล์มชุดที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 130 W ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงว่ามีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ส่วนฟิล์มที่ เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 200 W พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (200) และ (220) และเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มเป็น 270 W พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111), (200), (220) และ (311) โดยความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (200) มีค่าลดลงในขณะที่ ระนาบ (311) มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Groudeva-Zotova, Kaltofen, & Sebal (2000) ซึ่งพบว่าระนาบของของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนไปตามกำลังไฟฟ้า ที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ ซึ่งเป็นผลจากการระดมยิงของอะตอมสารเคลือบที่มีพลังงานต่าง ๆ ขณะเกิดการฟอร์มตัวของฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับซึ่งพลังงานของอะตอมสารเคลือบ

มีค่าเปลี่ยนไปตามกำลังไฟฟ้า เมื่ออะตอมสารเคลือบตกกระทบบนวัสดุรองรับที่ระดับพลังงานต่างกัน เป็นผลให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนไป

การเปลี่ยนระนาบของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่อกำลังไฟฟ้าในกระบวนการเคลือบเปลี่ยนไปนั้น ยังสามารถอธิบายได้ด้วยค่า Texture Coefficient ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของระนาบที่สนใจว่ามีมากน้อยเพียงใดในฟิล์มที่เคลือบได้ โดย Texture Coefficient สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมดของฟิล์มที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ พบว่าระนาบของฟิล์มที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้า โดยที่ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่า Texture Coefficient ได้ เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 200 W เป็น 270 W พบว่าระนาบ (111) มีค่า Texture Coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.51 ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.84 เป็น 0.22 (ภาพที่ 5-2) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Groudeva-Zotova et al. (2000) ที่พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มี Texture Coefficient เปลี่ยนไปตามกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 5-2 Texture Coefficient ของระนาบ (111) และ (200) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าต่าง ๆ

ค่าคงที่แสดงทิศของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์คำนวณโดยอาศัยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบเมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน มีค่าคงที่แสดงทิศในช่วง 4.238 - 4.239 Å และตรงกับฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์นั้นหาได้จากสมการของ Scherrer โดยอาศัยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนพบว่าผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 21.85 nm ถึง 39.84 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam et al. (2008) ซึ่งพบว่าขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เปลี่ยนไปตามกำลังไฟฟ้า

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W เกรนของฟิล์มรวมตัวกันมีลักษณะกลมมนกระจายทั่วผิวน้ำฟิล์ม เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 200 W พบว่าเกรนของฟิล์มเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มหนาแน่นมากขึ้น ความแหลมหรือความสูงของเกรนเพิ่มขึ้น สุดท้ายจึงเปลี่ยนเป็นกลุ่มของเกรนที่มีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) เมื่อกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 270 W สอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam et al. (2008) ซึ่งพบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เปลี่ยนไปตามกำลังไฟฟ้า โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้อธิบายได้ว่า ที่กำลังไฟฟ้าต่ำ (130 W) พลังงานของอะตอมสารเคลือบยังไม่มากพอที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างชัดเจน ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (200 W และ 270 W) อะตอมสารเคลือบที่ตกเคลือบบนผิววัสดุรองรับมีพลังงานมากพอในการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่โตมากขึ้น เป็นผลให้ฟิล์มมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) อย่างชัดเจน

สำหรับความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 130 W เป็น 270 W ความหนาของฟิล์มเพิ่มจาก 331 nm เป็น 1113 nm และความหยาบผิวเฉลี่ยมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 0.5 nm เป็น 21.5 nm เนื่องจากที่กำลังไฟฟ้าต่ำ ทำให้อัตราการสปีดเตอริงต่ำ ส่งผลให้จำนวนอะตอมของไทเทเนียมที่หลุดออกมาจากเป่ามีปริมาณน้อย ทำให้รวมตัวกับแก๊สไนโตรเจนและเกิดการฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ได้น้อย เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการสปีดเตอริงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนอะตอมของไทเทเนียมหลุดจากเป่ามีจำนวนเพิ่มขึ้นและรวมตัวกับแก๊สไนโตรเจนเกิดการฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ได้มากขึ้น เมื่อตกกระทบบนวัสดุรองรับ ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มของไทเทเนียมไนไตรด์เพิ่มมากขึ้น และยังมีการเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นก้อนที่โตมากขึ้น เป็นผลทำให้ฟิล์มมีความหนาและความหยาบผิวเพิ่มขึ้น

ผลของเวลาเคลือบ

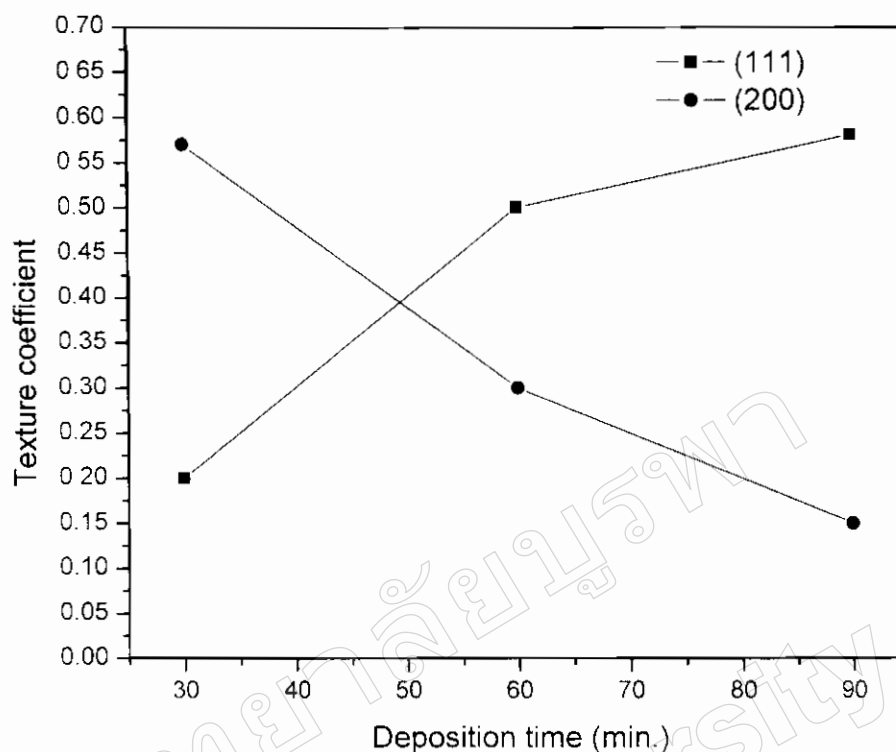
1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ทั้งหมด พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเรียบเนียน เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที และ 90 นาที สีของฟิล์มเปลี่ยนจากสีทองเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้มตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui, Yu, Ma, and Chu (2009) พบว่าสีของฟิล์มเปลี่ยนตามเวลาในการเคลือบจากสีเหลืองเป็นสีม่วงแดงและสีน้ำเงิน

2. โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบจาก 30 นาที เป็น 60 นาที และ 90 นาที พบความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) และ (220) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ระนาบ (200) มีค่าลดลง ในขณะที่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (311) มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu and Chen (2000) พบว่าเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มจาก 5 นาทีเป็น 30 นาที ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของระนาบ (111) และ (220) มีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ ระนาบ (200) มีค่าลดลง การเปลี่ยนระนาบของฟิล์มที่เคลือบได้เป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลือบเนื่องจากการชนของอะตอมสารเคลือบบนผิวหน้าของวัสดุรองรับจนทำให้เกิดขึ้นร้อนสะสมในเนื้อฟิล์มขณะเคลือบ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบได้ (Guemmaz, Mosser, & Grob, 1997) ดังนั้นเมื่อใช้เวลาเคลือบนานขึ้นระนาบของฟิล์มที่เคลือบได้จึงเปลี่ยนแปลงไป (Subramanian et al., 2008)

การเปลี่ยนระนาบของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้เมื่อเวลาเคลือบในกระบวนการเคลือบเปลี่ยนไปนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยค่า Texture Coefficient ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของระนาบที่สนใจว่ามีมากน้อยเพียงใด โดย Texture Coefficient สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบที่สนใจต่อความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบทั้งหมดของฟิล์มที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ พบว่าระนาบของฟิล์มที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเคลือบ โดยที่ เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 90 นาที พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่า Texture coefficient เพิ่มขึ้นจาก 0.20 เป็น 0.58 ขณะที่ระนาบ (200) มีค่า Texture Coefficient ลดลงจาก 0.57 เป็น 0.15 (ภาพที่ 5.3) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chou, Yu, and Huang (2002) ซึ่งพบว่า Texture Coefficient ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้นและ Chen, Yu, and Huang (2001) พบว่า Texture Coefficient ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (200) ลดลงตามเวลาเคลือบ



ภาพที่ 5-3 Texture Coefficient ของระนาบ (111) และ (200) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่อใช้เวลาเคลือบต่างๆ

ค่าคงที่แสดงทิศของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ หาได้จากสูตรการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกในระบบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก โดยอาศัยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยแปรค่าเวลาเคลือบมีค่าคงที่แสดงทิศในช่วง 4.236 - 4.256 Å สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang, Ouyang, and Yu (2007) ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้โดยแปรค่าเวลาเคลือบในช่วงเวลาเคลือบมีค่าคงที่แสดงทิศในช่วง 4.238 Å ถึง 4.247 Å และตรงกับฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 65-5774 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.241 Å

สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์นั้นหาได้จากสมการของ Scherrer โดยอาศัยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ได้ พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบโดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนพบว่าผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 24.0 nm เป็น 44.0 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2007) ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้น ขนาดของผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.6 nm เป็น 9.9 nm

3. ลักษณะพื้นผิว ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM ในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยเวลาเคลือบเท่ากับ 30 นาที อะตอมสารเคลือบจับตัวเป็นฟิล์มบนผิวหน้าของวัสดุรองรับมีลักษณะเรียบกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มเป็น 60 นาที อะตอมสารเคลือบมีการรวมตัวคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) อย่างชัดเจน และสุดท้ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มเป็น 90 นาที เนื่องจาก ที่เวลาเคลือบต่ำ (30 นาที) จำนวนของอะตอมสารเคลือบยังมีไม่มากพอ เมื่อตกกระทบลงบนวัสดุรองรับและก่อตัวเป็นฟิล์มบางจึงยังไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างชัดเจน ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้น (60 นาที และ 90 นาที) อะตอมสารเคลือบที่ตกเคลือบบนผิววัสดุรองรับมีจำนวนเพิ่มขึ้นและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่โตมากขึ้น เป็นผลให้ฟิล์มมีลักษณะคล้ายภูเขา (แหลมสูง) และหุบเขา (เป็นร่องลึก) อย่างชัดเจน

สำหรับความหนาฟิล์มที่ได้ พบว่าเมื่อเวลาเคลือบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 90 นาที ความหนาฟิล์มเพิ่มจาก 0.55 μm เป็น 1.45 μm และความหยาบผิวเฉลี่ยมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 6.4 nm เป็น 26.1 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2007) ซึ่งพบว่า เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบจาก 27.5 นาทีถึง 82.5 นาที ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้เพิ่มขึ้นจาก 140 nm ถึง 430 nm และความหยาบผิวมีเพิ่มขึ้นจาก 4.7 nm ถึง 7.0 nm เนื่องจากที่เวลาเคลือบต่ำ อะตอมของสารเคลือบที่หลุดจากเป่ายังมีปริมาณน้อย เป็นผลให้รวมตัวกับอะตอมของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ได้น้อย เมื่อเวลาเคลือบมากขึ้น อะตอมของสารเคลือบที่หลุดจากเป่าปริมาณเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้รวมตัวกับอะตอมของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสตัวเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ได้มากขึ้น เมื่อตกกระทบบนวัสดุรองรับ ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มของไทเทเนียมไนไตรด์เพิ่มมากขึ้น และยังมีการเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นก้อนที่โตมากขึ้น เป็นผลทำให้ฟิล์มมีความหนาและความหยาบผิวเพิ่มขึ้น

สรุปผล

1. ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

1.1 เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มบางเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้มตามลำดับ

1.2 เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนจาก 1.0 sccm เป็น 1.5 sccm และ 2.0 sccm รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ระนาบ (200) มีค่าลดลง

1.3 พื้นผิวของฟิล์มบางมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกระจายทั่วพื้นผิวและมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนความหนา มีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ที่ในช่วง 1.28 μm ถึง 1.35 μm ขณะที่ ความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 4.5 nm เป็น 18.6 nm

2. ผลของกำลังไฟฟ้า

2.1 เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสีของฟิล์มเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีทองและสีน้ำตาล

2.2 เมื่อแปรกำลังไฟฟ้าจาก 200 W เป็น 270 W พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระนาบ (200) มีค่าลดลง ส่วนที่ กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 130 W ไม่พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.3 พื้นผิวของฟิล์มบางมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกระจายทั่วพื้นผิวและมีขนาดเพิ่มขึ้น ความหนาและความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 331 nm เป็น 1113 nm และ 0.5 nm เป็น 21.5 nm ตามลำดับ

3. ผลของเวลาเคลือบ

3.1 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสีของฟิล์มเปลี่ยนจากสีทองเป็นสีน้ำตาลและสีน้ำตาลเข้ม

3.2 เมื่อแปรค่าเวลาเคลือบจาก 30 นาที เป็น 60 นาที และ 90 นาที รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระนาบ (200) มีค่าลดลง

3.3 พื้นผิวของฟิล์มบางมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกระจายทั่วพื้นผิวและมีขนาดเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนาและความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.55 μm เป็น 1.45 μm และ 6.4 nm เป็น 26.1 nm ตามลำดับ