

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

บทนี้เป็นการอภิปรายและสรุปผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโครเจน และสมบัติทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโครเจน ดังนี้

อภิปรายผล

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส

1.1 ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนในช่วง 5 sccm - 15 sccm พบว่า ฟิล์มมีสีม่วงหรือสีเขียวอ่อน โดยโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้พบว่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขมีเฟสอานาเทสระนาบ (101) และเฟสอานาเทสระนาบ (200) โดยความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เฟสอานาเทสระนาบ (101) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจน โดยที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 15 sccm มีความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeman and Takabayashi (2002) ซึ่งเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปีดเทอริงแล้วพบว่าความดันย่อยแก๊สออกซิเจนซึ่งควบคุมด้วยการแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม คือ เมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ซึ่งมีเฟสอานาเทสระนาบ (101) มีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้พบว่า เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจน โดยมีค่า a อยู่ในช่วง 3.784 Å – 3.785 Å ส่วนค่า c มีค่าอยู่ในช่วง 9.365 Å – 9.534 Å ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 89-4921 ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ($a = 3.777$ Å และ $c = 9.501$ Å)

ขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ คำนวณจากสมการของ Seherrer พบว่าขนาดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจน โดยที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 5 sccm ผลึกมีขนาดเท่ากับ 54.28 nm เมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 10 sccm ผลึกมีขนาดเพิ่มเป็น 56.15 nm สุดท้ายที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 15 sccm ผลึกมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 65.14 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeman and Takabayashi (2002) ที่เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง แล้วพบว่า เมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีขนาดใหญ่ขึ้น

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าลักษณะเกรนของฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 5 sccm และ 10 sccm เกรนมีลักษณะเล็กแหลม และเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 15 sccm เกรนเริ่มมีขนาดใหญ่ เรียว และแหลมขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ อติสร บุณวงศ์ (2551) ที่เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริงแล้วพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีเกรน โตขึ้น แต่ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Toku et al. (2008) ที่ศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง แล้วพบว่าเมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนของฟิล์มเล็กลง

ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงจาก 238 nm เป็น 215 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hunsche, Vergohl, and Ritz (2005) ซึ่งพบว่าความหนาฟิล์มมีค่าลดลงตามความดันย่อยแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณของแก๊สออกซิเจนในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจนนั้น ส่งผลให้อัตราการสปัตเตอริงของเป้าสารเคลือบลดลง เนื่องจากเมื่อแก๊สออกซิเจนมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ที่หน้าเป้าสารเคลือบ เป็นผลให้เป้าสารเคลือบถูกสปัตเตอริงได้ยากขึ้น ส่งผลให้อะตอมของไทเทเนียมที่จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน แล้วฟอร์มตัวเป็นชั้นฟิล์มบางเคลือบบนผิววัสดุรองรับน้อยลงด้วย เป็นผลให้ฟิล์มมีความหนาลดลง

สำหรับความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นความหยาบผิวมีค่าลดลงจาก 5.92 nm เป็น 4.85 nm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toku et al. (2008) ที่ศึกษาผลของความดันย่อยแก๊สออกซิเจนต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง แล้วพบว่าเมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความดันย่อยแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น สารเคลือบที่ตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับจะมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มมีความสม่ำเสมอและความหยาบผิวลดลง

1.2 ผลของความดันรวม ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นซิลิกอน โดยแปรค่าความดันรวมในช่วง 3×10^{-3} mbar - 5×10^{-3} mbar พบว่า ฟิล์มที่เคลือบได้มีสีม่วงอ่อน และสีเขียวอมฟ้า โดยโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนแปลงไปตามความดันรวม ดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอน เมื่อแปรค่าความดันรวมที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ พบว่า เมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้จะเปลี่ยนไป โดยที่ความดันรวมต่ำ (3×10^{-3} mbar) ฟิล์มที่เคลือบได้มีเฉพาะเฟสรูไทล์ เมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นเป็น 5×10^{-3} mbar พบว่า โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้เป็นเฟสผสมของรูไทล์/อนาเทส สุดท้ายที่ความดันรวมสูง (7×10^{-3} mbar และ 9×10^{-3} mbar) ฟิล์มที่เคลือบได้มีเฉพาะเฟสอนาเทส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yamagishi et al. (2003) ที่อธิบายถึงผลของความดันรวมที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ว่า เมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนไป สำหรับเหตุผลที่เมื่อเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยความดันรวมต่ำแล้วได้เฟสแบบรูไทล์นั้น Yamagishi et al. (2003) ได้อธิบายว่า ที่ความดันรวมต่ำ ระยะเวลาปลดการชนเฉลี่ยมีค่ามาก ทำให้อะตอมสารเคลือบ (ไทเทเนียม) หรืออนุภาคของแก๊ส ที่มีพลังงานสูงสามารถเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับ โดยปราศจากการชนกันทำให้อะตอมสารเคลือบมีพลังงานมากพอในการฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการฟอร์มตัว ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีเฟสรูไทล์

สำหรับค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเปลี่ยนไปตามความดันรวม โดยมีค่า a อยู่ในช่วง $3.780 \text{ \AA} - 3.784 \text{ \AA}$ ส่วนค่า c มีค่าอยู่ในช่วง $9.446 \text{ \AA} - 9.485 \text{ \AA}$ ใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 89-4921 ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล ($a = 3.777 \text{ \AA}$ และ $c = 9.501 \text{ \AA}$)

ขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ คำนวณจากสมการของ Scherrer e พบว่าขนาดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความดันรวมเท่ากับ 3×10^{-3} mbar ฟิล์มมีเฟสรูไทล์ ผลึกมีขนาดเท่ากับ 17.21 nm เมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นเป็น 5×10^{-3} mbar ฟิล์มมีเฟสผสมของรูไทล์/อนาเทส ผลึกมีขนาดเพิ่มเป็น 58.16 nm สุดท้ายที่ความดันรวมเท่ากับ 7×10^{-3} mbar และ 9×10^{-3} mbar ฟิล์มมีเฟสอนาเทส ผลึกมีค่าเท่ากับ 49.35 nm และ 50.89 nm ตามลำดับ

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่า ลักษณะเกรนของฟิล์มเปลี่ยนไปตามความดันรวมที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยความดันรวมเท่ากับ 3×10^{-3} mbar เกรนมีลักษณะเล็กกลมมน เมื่อความดันรวมเพิ่มเป็น 5×10^{-3} mbar, 7×10^{-3} mbar และ 9×10^{-3} mbar เกรนเริ่มมีขนาดเล็ก เรียว และแหลมขึ้น สาเหตุที่ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนแปลงไปนั้นเป็นผลมาจากพลังงานของสารเคลือบ ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2006) ที่เคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง อธิบายว่าพลังงานในการเคลื่อนย้ายอะตอมหรือ โมเลกุลมีผลต่อขนาดเกรน ซึ่งหากพลังงานในการเคลื่อนย้ายมาก ทำให้สามารถฟอร์มตัวเป็นฟิล์มได้ดีและมีขนาดเกรนใหญ่

ความหนาของฟิล์ม พบว่าเมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 190 nm เป็น 220 nm เนื่องจากที่ความดันรวมสูง ปริมาณของแก๊สอาร์กอนในห้องเคลือบมีจำนวนมาก ส่งผลให้อิออนของแก๊สอาร์กอนสามารถสปัตเตอไรซ์อะตอมของไทเทเนียมออกมาในปริมาณสูง และรวมตัวกับแก๊สออกซิเจนเป็นสารประกอบของฟิล์มตกลงเคลือบบนวัสดุรองรับได้มาก ทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนามากขึ้น แต่ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Sirghi, Aoki, and Hatanaka (2002) ซึ่งพบว่าความดันรวมเพิ่มขึ้น อัตราเคลือบมีค่าลดลง ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มลดลง เนื่องจากอัตราเคลือบขึ้นกับอัตราการสปัตเตอริงและความน่าจะเป็นของการชนแบบกระเจิง (Scattering Collisions) ของสปัตเตอไรซ์อะตอมกับอะตอมของแก๊สที่อยู่รอบ ๆ

ความหยาบผิวของฟิล์ม พบว่าเมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวของฟิล์มที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความดันรวมเท่ากับ 5.0×10^{-3} mbar มีค่าความหยาบผิวสูงสุดเท่ากับ 5.9 nm เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบได้เป็นเฟสผสมของรูไทล์/อานาเทส ลักษณะเกรนของฟิล์มเป็นแบบแหลมสูง และหลุมลึกขนาดต่าง ๆ ทำให้ผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะสูง ๆ ต่ำ ๆ แตกต่างกันมาก ส่งผลโดยตรงต่อค่าความหยาบผิว ส่วนที่ความดันรวมเท่ากับ 3.0×10^{-3} mbar ฟิล์มที่ได้เป็นเฟสรูไทล์ และที่ความดันรวมเท่ากับ 7.0×10^{-3} mbar และ 9.0×10^{-3} mbar ฟิล์มที่เคลือบได้เป็นเฟสอานาเทส โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มแต่ละแบบนี้มีผลต่อค่าความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2006) ที่อธิบายผลของความดันรวมต่อความหยาบผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ว่าเมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหยาบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันรวมมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความน่าจะเป็นในการชนกันของอนุภาคสารเคลือบเพิ่มขึ้น แต่ทำให้พลังงานของอนุภาคสารเคลือบลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสารเคลือบและ Adatom บนวัสดุรองรับมีค่าลดลง จนความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจน

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนเคลือบบนแผ่นซิลิกอน โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สในไตรเจนอยู่ในช่วง 1 sccm - 3 sccm พบว่า ฟิล์มบางที่เคลือบได้มีลักษณะใส ส่องผ่านแสง มีสีเขียวจาง ๆ โดยโครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้เปลี่ยนตามอัตราไหลแก๊สในไตรเจน ดังนี้

โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่เคลือบได้บนแผ่นซิลิกอน พบว่าฟิล์มที่เคลือบเมื่อไม่เจือในไตรเจนมีเฟสผสมของอนาเทสและรูไทล์ แต่เมื่อเจือในไตรเจนในกระบวนการเคลือบโดยการเพิ่มอัตราไหลแก๊สในไตรเจนตั้งแต่ 1 sccm ถึง 3 sccm ฟิล์มที่เคลือบได้ยังคงมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เหมือนฟิล์มชุดที่ไม่ได้เจือในไตรเจน กล่าวคือมุม 2θ ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงเท่าเดิมคือ 25.34° , 27.28° และ 47.98° แต่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ลดลงทุกระนาบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernandez-Rodriguez et al. (2008) ที่อธิบายผลของอัตราไหลแก๊สในไตรเจนที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนว่า เมื่ออัตราไหลแก๊สในไตรเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มที่เคลือบได้ยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทสไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลแก๊สในไตรเจน

ค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้ เปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สในไตรเจน โดยมีค่า a อยู่ในช่วง $3.780 \text{ \AA} - 3.784 \text{ \AA}$ ส่วนค่า c มีค่าอยู่ในช่วง $9.446 \text{ \AA} - 9.485 \text{ \AA}$ ซึ่งใกล้เคียงค่ามาตรฐานตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 89-4921 ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาเทส ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระ โกนอล ($a = 3.777 \text{ \AA}$ และ $c = 9.501 \text{ \AA}$)

ขนาดผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ คำนวณจากสมการของ Scherrer พบว่าขนาดผลึกของฟิล์มที่ไม่เจือในไตรเจนมีขนาดเท่ากับ 50.88 nm เมื่อเจือในไตรเจนในกระบวนการเคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สในไตรเจนเท่ากับ 1 sccm ผลึกมีขนาดลดลงเป็น 31.36 nm และสุดท้ายเมื่ออัตราไหลแก๊สในไตรเจนเท่ากับ 2 sccm และ 3 sccm ผลึกมีขนาดเท่ากับ 30.72 nm และ 27.14 nm ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chui et al. (2007) ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สในไตรเจนที่ใช้เจือในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้มีขนาดผลึกลดลง เนื่องจากในไตรเจนที่เจือในกระบวนการเคลือบจะไปลดความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมไทเทเนียมและออกซิเจนซึ่งส่งผลต่อการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ของสารเคลือบที่จะฟอร์มตัวเป็นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนในที่สุด (Hukaru et al., 2002; Mohamed et al., 2004)

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าลักษณะเกรนของฟิล์มเปลี่ยนไปตามอัตราไหลแก๊สในโตรเจน โดยฟิล์มที่เคลือบเมื่อไม่เจือในโตรเจน พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่และเรียวยาว แต่เมื่อเจือในโตรเจนในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยอัตราไหลแก๊สในโตรเจนเท่ากับ 1 sccm, 2 sccm และ 3 sccm เกรนของฟิล์มเริ่มจับกลุ่มกันเป็นก้อนและมีขนาดเล็ก ซึ่งต่างกับงานวิจัยของ Chui et al. (2007) ที่พบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบเมื่อไม่เจือในโตรเจนเกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นก้อนกลม (Small Round-Shape Nodules) แต่เมื่อเจือในโตรเจนในกระบวนการเคลือบพบว่า เกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นก้อนแหลม (Acute Angle-Shape Nodules)

ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนในกระบวนการเคลือบเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเพิ่มขึ้นจาก 225 nm เป็น 236 nm เนื่องจากเมื่อปริมาณแก๊สในโตรเจนในระบบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แก๊สในโตรเจนสามารถรวมตัวกับอะตอมไทเทเนียมและแก๊สออกซิเจนเป็นสารเคลือบและตกเคลือบบนวัสดุรองรับได้มาก ซึ่งทำให้ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนามากขึ้น ส่วนความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนในกระบวนการเคลือบเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวมีค่าอยู่ในช่วง 4.1 nm - 5.4 nm

3. สมบัติทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจน

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนเคลือบบนกระจกสไลด์ เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สในโตรเจนอยู่ในช่วง 1 sccm - 3 sccm โดยสรุปพบว่าอัตราไหลแก๊สในโตรเจนมีผลต่อสมบัติทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์ม ดังนี้

ค่าการส่งผ่านแสง พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ (ความยาวคลื่นในช่วง 300 – 2500 nm) โดยมีค่าการส่งผ่านแสงสูงตลอดความยาวคลื่นที่พิจารณา ทั้งนี้หากพิจารณาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนที่เคลือบได้ทั้งหมดพบว่ามีลักษณะคล้ายการกระเพื่อมของคลื่นกล่าวคือมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันตลอดความยาวคลื่นแสงที่พิจารณา เนื่องจากการแทรกสอดของแสงผ่านชั้นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์นั่นเอง

ค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มที่ได้ จากวิธี Envelope โดยใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงมาคำนวณ พบว่าที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 nm ฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อไม่เจือในโตรเจนมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.61 และมีค่าลดลงเป็น 2.53 สำหรับฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อเจือในโตรเจนในช่วง 1 sccm - 3 sccm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu, Ma, and Shang (2004) ที่ศึกษาผลการเจือในโตรเจนต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วพบว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เจือในโตรเจนมีค่าลดลง เมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนในการเจือ

เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มที่เคลือบได้ พบว่าสำหรับฟิล์มชุดที่ไม่เจอไนโตรเจน สัมประสิทธิ์การดับสูญมีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งใกล้เคียงศูนย์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีการดูดกลืนต่ำจึงมีลักษณะใสส่งผ่านแสงได้ดี ขณะที่ฟิล์มชุดที่เคลือบโดยมีการเจอไนโตรเจน ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1 sccm ถึง 3 sccm พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญมีค่าในช่วง 0.001-0.002 ใกล้เคียงฟิล์มชุดที่ไม่เจอไนโตรเจน

สำหรับค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เคลือบได้ มีค่าเท่ากับจุดตัดบน แกน x ของกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับ $h\nu$ (Chiu et al., 2007) พบว่าฟิล์มชุดที่เคลือบได้เมื่อไม่เจอไนโตรเจนมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.10 eV ใกล้เคียงค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ชุดนี้เป็นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Luca et al. (2007) ซึ่งเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบไม่เจอไนโตรเจนแล้วได้เฟสอนาเทสซึ่งมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.09 eV ขณะที่ฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้เมื่อมีการเจอไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบ ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1 sccm ถึง 3 sccm พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ชุดนี้มีค่าแถบพลังงาน 2 ค่า คือ (1) มีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.20 eV ซึ่งเท่ากับค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส (แถบพลังงาน = 3.20 eV) (Herman et al., 2006) และ (2) มีค่าแถบพลังงานประมาณ 2.50 eV ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส และมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เจอในกระบวนการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแถบพลังงานของฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้มีค่าลดลงจาก 2.60 eV เป็น 2.40 eV สอดคล้องกับงานวิจัยของ Herm'andez-Rodr'iguez et al. (2008) ที่พบว่าเมื่อเจอไนโตรเจนในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วจะทำให้ค่าแถบพลังงานของฟิล์มเปลี่ยนไป กล่าวคือมีค่าลดลงจาก 3.50 eV เป็น 2.70 eV ที่เป็นเช่นนี้เพราะโดยปกติแล้วแถบการนำ (Conduction Bands) และแถบวาเลนซ์ (Valence Bands) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบขึ้นจากออร์บิทัล (Orbital) ของไทเทเนียม 3d และ ออกซิเจน 2p และเนื่องจากออร์บิทัล 2p ของไนโตรเจนมีพลังงานศักย์มากกว่าออร์บิทัล 2p ของออกซิเจน ดังนั้นการเพิ่มจำนวนอะตอมไนโตรเจนในฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจอจึงเป็นการเพิ่มพลังงานศักย์ลบ (Negative Potential Energy) ของแถบวาเลนซ์เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ จึงทำให้ค่าแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เจอไนโตรเจนมีค่าแถบพลังงานต่ำกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ (Asahi et al., 2001) ทั้งนี้จากการเปลี่ยนค่าแถบพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ เมื่อมีการเจอไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบ จาก 3.20 eV เป็น 2.50 eV จึงอาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจอไนโตรเจนได้สำเร็จ

สรุปผลการทดลอง

1. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส

1.1 ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

- ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีสีม่วง และสีเขียวอ่อน
- โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่เคลือบได้ทุกเงื่อนไขมีเฟสอานาเทสระยะนาบ (101)

และ เฟสอานาเทสระยะนาบ (200) โดยความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเฟสอานาเทสระยะนาบ (101) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราไหลแก๊สออกซิเจนในกระบวนการเคลือบ โดยที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 15 sccm มีความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สูงสุด

- อัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าลดลง จาก 238 nm เป็น 215 nm และ 5.92 nm เป็น 4.85 nm ตามลำดับ

1.2 ผลของความดันรวม

- ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบได้มีสีม่วงอ่อน และสีเขียวอมฟ้า
- โครงสร้างผลึกของฟิล์มเปลี่ยนไปตามความดันรวม โดยที่ความดันรวมต่ำ

ฟิล์มที่เคลือบได้มีเฉพาะเฟสรูไทล์ แต่เมื่อความดันรวมเพิ่มสูงขึ้นฟิล์มเปลี่ยนเป็นเฟสผสมของรูไทล์/อานาเทส และเป็นเฟสอานาเทสในที่สุด

- ความดันรวมมีผลต่อความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มที่เคลือบได้ โดยเมื่อความดันรวมเพิ่มขึ้นความหนามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 190 nm เป็น 220 nm ส่วนความหยาบผิวมีค่าอยู่ในช่วง 2.2 nm - 5.9 nm

2. การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจน

2.1 ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในโตรเจนที่เคลือบได้มีมีลักษณะใส

ส่งผ่านแสง มีสีเขียวจาง ๆ

2.2 โครงสร้างผลึก ฟิล์มที่เคลือบเมื่อไม่เจือในโตรเจนมีเฟสผสมของรูไทล์/อานาเทส แต่เมื่อเจือในโตรเจนในกระบวนการเคลือบ ฟิล์มที่เคลือบได้ยังคงมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เหมือนฟิล์มชุดที่ไม่เจือในโตรเจน และเมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนเพิ่มขึ้นความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ลดลงทุกระนาบ

2.3 อัตราไหลแก๊สในโตรเจนมีผลต่อความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มบางที่เคลือบได้ โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สในโตรเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 225 nm เป็น 236 nm ส่วนความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 4.1 nm - 5.4 nm

3. สมบัติทางแสงและแถบพลังงานของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจน

3.1 ฟิล์มที่เคลือบได้มีลักษณะใส สามารถส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ (ความยาวคลื่นในช่วง 300 – 2500 nm)

3.2 ดัชนีหักเหของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนที่เคลือบได้ พิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 nm พบว่าฟิล์มมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.61 และมีค่าลดลงเป็น 2.53 เมื่อเจือในไตรเจนในกระบวนการเคลือบ

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนที่เคลือบได้ พิจารณาที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 550 nm พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.001 และฟิล์มชุดที่เคลือบได้เมื่อมีการเจือในไตรเจนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอยู่ในช่วง 0.001 – 0.002 พบว่าใกล้เคียงฟิล์มชุดที่ไม่เจือในไตรเจน

3.4 แถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อไม่เจือในไตรเจนมีค่าเท่ากับ 3.10 eV ขณะที่ฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อมีการเจือในไตรเจนมีแถบพลังงาน 2 ค่า คือ (1) มีค่าเท่ากับ 3.20 eV และ (2) มีค่าประมาณ 2.50 eV และมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลแก๊สในไตรเจนที่เจือในกระบวนการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงจาก 2.60 eV เป็น 2.40 eV แสดงว่างานวิจัยนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เจือในไตรเจนได้สำเร็จ