บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนากระจกเคลือบซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงนำไฟฟ้า ด้วยวิธี MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) ซึ่งเป็นเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางชนิดหนึ่ง โดยใช้ไอของสารตั้งต้นคือ น้ำ(H_2O) และไดเอททิลซิงค์ (DEZ) มีไดโบเรน (B_2H_6) เป็นสารเจือ เข้าไปทำปฏิกิริยาทางความร้อนกันภายใน chamber สุญญากาศ โดยปรับปรุงเครื่องมือในการทดลองจากเครื่อง Multi-chamber ซึ่งใช้สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วทดลองสร้างฟิล์ม ZnO:B บนกระจก โดยศึกษาปริมาณการเติมสารเจือ B_2H_6 และอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม คุณสมบัติทางไฟฟ้า และ คุณสมบัติทางแสง เลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำมาเป็นฐานรองสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติ กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO_2:F

จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารเจือ B_2H_6 มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม โดยอะตอมของโบรอนที่เพิ่มมากขึ้น จะลดความคล่องตัวของพื้นผิว (surface mobility) ในขณะเกิดผลึกทำให้อัตราการเกิดฟิล์มมีค่าลดลง และขนาดเกรนของผลึกจึงเล็กลง ส่งผลให้ความขรุขระของฟิล์มลดลงด้วย จากภาพถ่ายของเครื่อง SEM แสดงให้เห็นว่าที่การเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 10 sccm และ 15 sccm เกิดรูปทรงผลึกพีระมิด สมบูรณ์ชัดเจน และเมื่อพิจารณาระนาบของผลึกด้วยเครื่อง XRD ฟิล์มที่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 10 sccm มีความเข้ม spectrum ของระนาบ (100) มากกว่าฟิล์มที่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 15 sccm

ส่วนผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจะมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มของสารเจือ B_2H_6 การเพิ่มปริมาณสารเจือไดโบเรน ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากอะตอมของโบรอน เป็นสารเจือชนิด n จากการเข้าไปแทนที่อะตอมของ Zn หรือ เข้าไปแทรกระหว่างอะตอมของ ZnO เป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในการนำไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO บนกระจก จึงลดลงสัมพันธ์กับปริมาณการเติมสารเจือไดโบเรน สำหรับกระจกที่ใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงควรมีความต้านทานต่ำ

สำหรับผลของการเติมสารเจือ B_2H_6 ต่อคุณสมบัติทางแสงนั้น ปริมาณอะตอมของโบรอนที่เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มพาหะอิสระ ซึ่งอะตอมของโบรอนจะดูดกลืนแสงได้น้อยในช่วงคลื่นสั้นทำให้แสงส่งผ่านได้มาก และจะดูดกลืนแสงมากในช่วงใกล้อินฟราเรด ทำให้ช่วงความยาวคลื่นยาวการส่งผ่านแสงจะลดลง ดังนั้นที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์มจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารเจือ B_2H_6

ส่วนเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงกระจายของฟิล์มจะลดลงตามปริมาณการเติมสารเจือ B_2H_6 ซึ่งเป็นผลมาจากความขรุขระของฟิล์มที่ลดลง ทำให้การกระเจิงของแสงลดลง ส่งผลให้ค่าเปอร์เซนต์ความขุ่นมัวของฟิล์ม มีค่าลดลง คุณสมบัติทางแสงที่ดีของฟิล์มที่นำไปใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสง ควรมีเปอร์เซนต์ความขุ่นมัวของฟิล์มที่สูงหมายถึงแสงกระจายได้มาก เมื่อนำไปใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แสงเดินทางภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ยาวขึ้น

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานการในการแตกตัวของไอน้ำและไอของ DEZ แล้วทำปฏิกิริยารวมตัวเกิดเป็นผลึก ZnO และทำให้ความคล่องตัวของพื้นผิวในขณะเกิดผลึกเพิ่มขึ้น มีผลต่อโครงสร้างและรูปร่างของผลึก จากภาพถ่าย SEM ที่อุณหภูมิ 100°C ผลึกจะมีรูปร่างเม็ดกลม ซึ่งจะแสดงระนาบ (002) คือผลึกจะเกิดในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวกระจก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของระนาบผลึก ไปในทิศทางที่ขนานกับผิวกระจกคือ (100) และมีรูปร่างที่เป็นรูปทรงเป็นพีระมิดเพิ่มขึ้น

ผลของอุณหภูมิในช่วง 100°C-200°C ที่มีต่ออัตราการเกิดฟิล์มนั้น เนื่องจากระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของ DEZ โดยออกซิเจนจากไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 100°C การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับ DEZ ที่พื้นผิวสูง อัตราการเกิดฟิล์มของ ZnO จึงสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิประมาณ 180°C ไอน้ำจะเกิดการแตกตัวที่พอเพียงสำหรับการเกิดฟิล์ม ZnO เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ จึงทำให้ไอน้ำแตกตัวสูงยิ่งขึ้น เกิดออกซิเจนที่มากและมีพลังงานจลน์สูง รบกวนการเกิดฟิล์ม ทำให้อัตราการเกิดฟิล์มลดลง

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม ZnO ที่อุณหภูมิ 100°C พลังงานความร้อนที่ใช้สร้างฟิล์มต่ำ จึงทำให้การเคลื่อนที่พื้นผิวน้อย ผลึกที่ได้เกิดในระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิว (002) ความขรุขระจึงต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงที่อุณหภูมิประมาณ 180°C พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่พื้นผิวมีมาก เกิดเป็นผลึกในระนาบที่ขนานกับพื้นผิว (100) เป็นรูปทรงพิระมิดมากขึ้น ความขรุขระจึงสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ น้ำเกิดการแตกตัวได้มากเกินสัดส่วนที่พอเหมาะกับการทำปฏิกิริยากับ DEZ ในการเกิดฟิล์ม ZnO แต่พลังงานความร้อนที่สูงทำให้การเคลื่อนที่พื้นผิวมากขึ้น ขนาดเกรนจึงเล็กลง เป็นผลให้ความขรุขระลดลง

จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO:B นั้น จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการแตกตัวที่สูงขึ้นของไอน้ำบนผิว Substrate ทำให้มีการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (100) ที่เป็นระเบียบมากขึ้น และขนาดเกรนของผลึกที่ใหญ่ขึ้น การกระจายของขอบเกรนลดลง เป็นผลให้การนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

ส่วนคุณสมบัติทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 380-980 นาโนเมตร สำหรับการนำไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 100°C ถึง 200°C ลักษณะพื้นผิวผลึกรูปทรงพิระมิดที่มากขึ้น ผลึกจึงไปขวางการเดินทางของแสงทำให้ค่าเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงรวมลดลง ส่วนค่าเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงกระจายจะสัมพันธ์กับความขรุขระที่อุณหภูมิ 180°C จะมีค่าความขรุขระมากสุด ทำให้แสงที่ผ่านฟิล์มกระจายได้มากกว่าที่ความขรุขระต่ำกว่า เป็นผลให้ค่าเปอร์เซนต์ความขุ่นมัวมีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 100°C ถึง 180°C และลดลงที่อุณหภูมิ 200°C

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง เงื่อนไขในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B ที่เลือกไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมคือ ปริมาณการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่ 10 sccm และ อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มที่ 180 °C ซึ่งคุณสมบัติที่ได้ใกล้เคียงกับกระจกเคลือบฟิล์ม SnO_2:F ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของกระจก SnO_2:F และ กระจก ZnO:B

คุณสมบัติ	SnO_2:F	ZnO:B
ความหนาฟิล์ม (Thickness)	8,595 A°	17511.77 A°
ความขรุขระ (Roughness: R_{rms})	14.46 nm.	16.37 nm.
ความต้านทานแผ่น (Sheet resistance)	12.95 ohm.sq	17.97 ohm.sq
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	1.11 x10^{-3}ohm.cm	3.15 x10^{-3}ohm.cm
เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงรวม (%Total transmittance) ที่ 550 นาโนเมตร	82.33 %	81.792%
เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงกระจาย (%Diffuse transmittance) ที่ 550 นาโนเมตร	19.15%	18.782%
ความขุ่นมัว (%Haze)	6.85 %	6.55 %

นำกระจกเคลือบ ZnO:B มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเงื่อนไขเดียวกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก SnO_2:F เปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจกทั้งสองชนิดที่ตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2
ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO_2:F และ กระจก ZnO:B จากเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ชนิดกระจกฐานรอง	แรงดันไฟฟ้าเปิด (V)	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (mA/cm^2)	ฟิลด์แฟกเตอร์	ประสิทธิภาพ (%)
กระจก SnO_2:F	0.91	17.10	0.66	10.31
กระจก ZnO:B	0.85	18.90	0.61	9.88

จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเปิด (V_{OC}), ฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ บนกระจก ZnO:B มีค่าน้อยกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO_2:F เนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าของกระจก ZnO:B ที่สูงกว่าทำให้สภาพการนำไฟฟ้าได้น้อยกว่ากระจก SnO_2:F และ ความหนาของชั้นฟิล์ม ZnO:B ที่หนา ทำให้การส่งผ่านแสงได้น้อย สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก ZnO:B มีค่ามากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก SnO_2:F เป็นผลจากรูปร่างผลึกของฟิล์ม ZnO:B ที่มีรูปทรงพิระมิดและลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระทำให้แสงกระเจิง และผ่านเข้าสู่ชั้น i ซึ่งเป็นชั้นที่ผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะทางยาวมากขึ้น

สรุปได้ว่าสามารถสร้างฟิล์ม ZnO:B บนกระจก ที่คุณสมบัติโดยรวมใกล้เคียงกับกระจก SnO_2:F ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถสร้างด้วยวิธี MOCVD ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของกระจก ZnO:B เพื่อนำไปพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น และใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการเคลือบฟิล์ม ZnO:B บนกระจก ด้วยวิธี MOCVD นั้น นับว่าเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มที่ค่อนข้างง่าย และให้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ในการนำไปใช้เป็นฐานรองสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน เทียบเท่ากับกระจก SnO_2:F แต่อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้งานจริงต้องมีการปรับปรุงความสม่ำเสมอของฟิล์มบนพื้นที่ขนาดใหญ่ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตอยู่ในตลาด ส่วนใหญ่จะสร้างบน TCO ที่มีขนาดกว้าง 635 เซนติเมตร ยาว 1250 เซนติเมตร ซึ่งความสม่ำเสมอของฟิล์มบนกระจก TCO มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และแนวทางในการนำ ZnO:B ไปพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อีกวิธีคือ เพิ่มการเคลือบฟิล์ม ZnO:B ก่อนเคลือบชั้น โลหะเงิน (Ag) เพื่อเป็นการดักแสง เป็นการเพิ่มการสะท้อนกลับของแสง ให้กระเจิงอยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้น

โดยทั่วไปแล้วลักษณะของระนาบที่เหมาะสมของ ZnO:B ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะเป็นระนาบ (002) เนื่องจากเป็นโครงสร้างแบบ Hexagonal Closed Pack (hcp) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีของ ZnO มากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ ซึ่งในที่นี้ผลการทดลองที่ออกมายังได้ผลไม่ดีนักเนื่องจากส่วนมากที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นระนาบ (100) และหลังจากเคลือบฟิล์ม ZnO:B เสร็จแล้วควรนำฟิล์มที่ได้ ไปอบอ่อน (Anneal) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน(N_2) เพื่อลดความเครียดของผลึกและลดการแทรกของอะตอมออกซิเจนที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ทำให้ระนาบผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น