บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1 ข้อสรุปจากผลการทดลอง

1. ค่าความต้านทานแผ่น

จากการใช้ตัวเติมสารเจือปนทั้ง 3 ชนิด ให้ผลในลักษณะเดียวกัน โดยที่

- กรณีของ B_2O_3 ค่าความต้านทานแผ่นขึ้นกับ เวลา อุณหภูมิ และความหนาของชั้น Si-B compound ที่เกิดจากการทาสารเจือปนบนแว่นผลึกเป็นจำนวนมาก ถ้าหากเวลา อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ Si-B compound มีปริมาณน้อยลง ค่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลง

- กรณีของ BBr_3 วิเคราะห์ได้เป็น 2 กรณี คือ

ก. เมื่อ carrier gas ที่ไหลผ่านระบบมีความเข้มข้นของอะตอมบอรอนเจือจาง (คือกรณีที่ $N_s = Hp_s$ ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Henry) ค่าความต้านทานแผ่นลดลงเมื่อ เวลา อุณหภูมิ และ carrier gas เพิ่ม (14)

ข. เมื่อ carrier gas ที่ไหลผ่านระบบมีความเข้มข้นของอะตอมบอรอนสูง จนเกิด Si-B compound และเป็นกรณีที่ทดลองในงานวิจัยนี้ ค่าความต้านทานแผ่นไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้แพร่ซึม แต่ขึ้นกับอุณหภูมิ และความหนาของชั้น Si-B compound ที่เกิด ถ้าอุณหภูมิเพิ่มหรือการเกิดของ Si-B compound มีปริมาณน้อย ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลง (15)

- กรณีของ BN ค่าความต้านทานแผ่นลดลงเมื่อเวลาหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับ spacing ของแผ่น BN และแว่นผลึกที่วางใน boat ด้วย (22)

2. ค่าความลึกของหัวต่อฯ

ความลึกของหัวต่อฯขึ้นกับ เวลา และค่าความสามารถในการแพร่ซึม (D) โดยที่ค่า D

ขึ้นกับความเข้มข้นสารเจือปนที่ผิว อุณหภูมิ และชนิดของสารเจือปนที่ใช้ [6,7,8] เมื่อใช้เงื่อนไขในการแพร่ซึมอื่นๆ ที่เหลือเหมือนกันคือ ค่าความต้านทานจำเพาะเริ่มแรก ชนิดและทิศทางของแว่นผลึกที่ใช้ โดยที่เวลาเพิ่ม ความลึกของหัวต่อฯเพิ่ม ดูผลจากตารางที่ 6.1-6.6

และอุณหภูมิเพิ่ม ความลึกของหัวต่อฯเพิ่ม แสดงว่าค่า D เพิ่มตามอุณหภูมิจริง โดยที่ ที่ 1,000•ซ. ค่า D สำหรับการแพร่ซึมด้วย BN มีค่าสูงสุด มีค่า 8×10^{-3}ไมครอน^2/ชม. และ ที่ 1,050•ซ. ค่า D สำหรับการแพร่ซึมด้วย B_2O_3 มีค่าสูงสุด มีค่า1.7×10^{-2}ไมครอน^2/ชม.

ที่ให้ผลเป็นเช่นนี้ สรุปได้ว่า ที่ 1,000•ซ. สำหรับ B_2O_3 อัตราการแพร่ซึมของบอรอนมีค่าต่ำกว่าอัตราการเกิดของชั้น Si-B compound บนผิวซิลิกอน ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ ค่า D มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ความลึกของหัวต่อฯมีค่าสูง

สำหรับ BBr_3 ค่า D ยังขึ้นกับการปรับอัตราส่วนของอัตรา N_2 bubble ผ่าน BBr_3 กับอัตราการไหล O_2 ต้องมีปริมาณพอเหมาะที่ทำให้เกิด B_2O_3 บนแว่นผลึก [15] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดลองในตารางที่ 6.7 คือเมื่อเวลาและอุณหภูมิการแพร่ซึมเป็น 5'+ 20'+ 3' และ 1,000 ซ. ตามลำดับ ค่าความลึกของหัวต่อฯที่ได้ เปลี่ยนไปด้วยค่าต่างๆ กัน เมื่อนำมาคำนวณค่า D แล้ว ปรากฏว่าที่อัตรา N_2 bubble ผ่าน BBr_3 เป็น 98 ฟอง/นาที ได้ค่า D สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.1×10^{-2}(ไมครอน)^2/ชม.

ดังนั้นจึงไม่สามารถนำค่าความลึกของหัวต่อฯที่เกิดจากการแพร่ซึมด้วย BBr_3 มาเปรียบเทียบกับ B_2O_3 และ BN ได้โดยตรง

ผลการหาความลึกของหัวต่อฯจากการทดลองเทียบกับการคำนวณ ได้แสดงในตารางที่ 6.1-6.6 ส่วนรายละเอียดอื่นๆ สรุปไว้ในหัวข้อ 6.1 แล้ว

3. <u>ความสม่ำเสมอของการแพร่ซึม</u>

ถูกจำกัดด้วยเทคนิคที่ใช้แพร่ซึมสำหรับตัวเติมสารเจือปนแต่ละชนิด ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.3 สรุปได้ว่า สำหรับ BBr_3 และ BN ให้ความสม่ำเสมอในการแพร่ซึมใกล้เคียงกัน คือมีการเบี่ยงเบนของค่าความต้านทานแผ่นสูงสุดตลอดแว่นผลึกเป็น ± 8 % สำหรับ BBr_3 และเป็น -10 % สำหรับ BN และในแต่ละแถวของแว่นผลึก ค่าความต้านทานแผ่นเปลี่ยนจาก

1-4 % สำหรับ BBr_3 และ 3-8 % สำหรับ BN ส่วน B_2O_3 ให้ความสม่ำเสมอในการแพร่ซึมไม่ดี

4. อิมเพียวริตีโปรไฟล์หรือโปรไฟล์ของการแพร่ซึมของอะตอมบอรอนในแว่นผลึก

ในทางทฤษฎีถือว่าเป็น erfc และถือว่าหัวต่อฯที่เกิด เป็น step junction หรือ abrupt junction ซึ่งหมายถึงค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือปนทั้ง 2 ด้านต่างกันมาก และการเกิดบริเวณปลอดพาหะมีจริงตรงหัวต่อฯ ยังผลให้มีสนามไฟฟ้าสูง ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเลคตรอนผ่านหัวต่อฯจึงเคลื่อนได้สะดวก

ผลของอิมเพียวริตีโปรไฟล์ตามรูปที่ 6.15 เห็นได้ว่า ที่ 1,000°ซ. เวลา 30 นาที โปรไฟล์ของการแพร่ซึมด้วย BN ให้ผลของหัวต่อฯคล้ายกับ abrupt junction มากกว่าโปรไฟล์ของการแพร่ซึมที่เกิดจากสารอีก 2 ชนิด ส่วนที่ 1,050°ซ. เวลา 20 นาที โปรไฟล์ของการแพร่ซึมด้วย BBr_3 ให้ผลดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.16

สรุปได้ว่า คุณภาพของหัวต่อฯที่ดี ส่วนหนึ่งถูกกำหนดด้วยเทคนิคการแพร่ซึม เพราะทั้ง BN และ BBr_3 เป็นการแพร่ซึมสารเจือปนที่ค่อยๆ พาเอาอะตอมของบอรอนมาฝากบนซิลิกอนทีละน้อย ส่วน B_2O_3 เป็นการทาสารละลาย ทำให้ความสม่ำเสมอของอะตอมบอรอนบนผิวหน้าซิลิกอนมีน้อย การแพร่ซึมไปในเนื้อซิลิกอนจึงให้โปรไฟล์ที่แต่ละตำแหน่งไม่แน่นอน

5. ผลการประยุกต์ใช้การแพร่ซึมบอรอนในซิลิกอนเพื่อทำเซลแสงอาทิตย์

ผลการวิเคราะห์แสดงในหัวข้อ 6.5 และสรุปได้ว่า การแพร่ซึมด้วย B_2O_3 ให้ค่า J_{sc} สูงที่สุด มีค่า ≃ 21 มิลลิแอมป์/ซม.^{2} การแพร่ซึมด้วย BN ให้ค่า F.F. สูงที่สุด มีค่า ≃ 0.62 และประสิทธิภาพสูงสุดของเซลฯที่ทำได้คือ ทำจากการแพร่ซึมด้วย B_2O_3 มีค่า ≃ 3.5 % แต่ประสิทธิภาพของเซลฯแต่ละตัวมีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ขึ้นกับเงื่อนไขในการทำ

หมายเหตุ ผลการหาประสิทธิภาพของเซลฯโดยใช้แหล่งกำเนิดความเข้มแสงจากหลอดแฮโลเจน ที่ 100 mW/cm^2 ให้ผลเช่นเดียวกับการใช้แหล่งกำเนิดเป็นแสงอาทิตย์โดยตรง

7.2 ข้อดี-ข้อเสีย ของการแพร่ซึมโดยใช้ตัวเติมสารเจือปนแต่ละชนิด

- B_2O_3

ข้อดี

1. การแพร่ซึมทำให้ความหนาแน่นของอะตอมบอรอนที่ผิวแว่นผลึกมีค่าถึง solid solubility ที่อุณหภูมิการแพร่ซึม และการแพร่ซึมเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิสูง (>1,000°ซ.)
2. ทำได้สะดวก ประหยัด และการจัดระบบแพร่ซึมทำได้โดยง่าย
3. การควบคุมอัตราการไหลของ N_2 ไม่ต้องการความละเอียด
4. ปฏิกิริยาที่เกิดที่ผิวแว่นผลึก เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจาก B_2O_3 โดยตรง

ข้อเสีย

1. ให้ผลความสม่ำเสมอในการแพร่ซึมไม่ดี
2. ต้องทำออกไซด์ทุกครั้งหลังการแพร่ซึม เพื่อเอาชั้นของ Si-B compound ออกจากผิวซิลิกอน
3. เกิด strain แก่ผิวซิลิกอนในขณะแพร่ซึม เนื่องจากมีอะตอมบอรอนจำนวนมากในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงบนแว่นผลึกในระหว่างการนำแว่นผลึกเข้า-ออกจากเตา
4. ให้ reproducibility ที่ไม่ดี

- BBr_3

ข้อดี

1. ให้ความสม่ำเสมอในการแพร่ซึมและ reproducibility ที่ดี
2. ให้ผลการแพร่ซึมที่สะอาด และเกิด contaminate น้อยต่อระบบ
3. สามารถควบคุมปริมาณของบอรอนได้ในขนาดต่างๆ กัน

ข้อเสีย

1. การจัดระบบค่อนข้างยุ่งยาก

2. ต้องใช้ flow meter ที่อ่านค่าได้แม่นยำและละเอียดกว่าที่ใช้กับตัวเติมสารเจือปนอีก 2 ชนิด
3. เกิดอันตรายต่อร่างกายมากกว่า B_2O_3 และ BN

- BN

ข้อดี

1. เนื่องจากมี BN 3 เกรด จึงทำให้เลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมในการเติมอะตอมบอรอนลงในแว่นผลึก
2. ให้ความสม่ำเสมอและ reproducibility ที่ดี
3. เกิด damage น้อย และไม่มีปัญหาเรื่อง turbulence flow เนื่องจากการจัดเรียงแว่นผลึกในลักษณะตั้งฉากกับทิศทางการไหลของก๊าซ
4. ไม่จำเป็นต้องใช้ flow meter ที่มีความแม่นยำสูง

ข้อเสีย

1. การใช้แว่นผลึกถูกจำกัดด้วย boat ที่ใส่
2. การจัดเตรียมการก่อนแพร่ซึมทำได้ลำบากกว่าสารอีก 2 ชนิด คือต้องผ่านการทำความสะอาด activate และ stabilize ก่อนใช้แพร่ซึม
3. ในกรณีแว่นผลึกที่มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำมาก (เช่น กรณีที่ใช้ทดลองหาความสม่ำเสมอของการแพร่ซึม) BN ใช้เวลานาน เพื่อให้บอรอนแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อแว่นผลึกได้

7.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจาก B_2O_3 เป็นตัวเติมสารเจือปนที่ใช้เวลาในการแพร่ซึมน้อย โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้กับแว่นผลึกที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในทุกๆ ช่วง อีกทั้งยังสามารถใช้ทำการแพร่ซึมได้สะดวกที่สุด รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ ไม่จำเป็นต้องมีราคาแพงนักและหาได้ง่าย เช่น flow meter เตา หรือแม้กระทั่งตัวเติมสารเจือปน ซึ่งใช้สะดวกและเก็บรักษาง่าย ปลอดภัย จึงเหมาะกับการประยุกต์ให้เข้ากับเทคโนโลยีภายในประเทศ เพื่อสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

เช่น เซลแสงอาทิตย์ ซึ่งให้ค่า J_{sc} สูง ดังผลการทดลอง หรือทำเป็น back surface field ของเซลแสงอาทิตย์ เนื่องจากให้ความเข้มข้นสารเจือปนสูงมากจนถึง solid solubility ที่อุณหภูมิแพร่ซึม หรือทำเป็นชั้น P^+ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ อาทิเช่น ซีนเนอร์ไดโอด เป็นต้น ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถผลิตในประเทศได้ทั้งสิ้น อีกทั้งมีการประหยัดพลังงานอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากใช้เวลาในการแพร่ซึมสั้น

แม้จะด้อยกว่าสารเจือปนอีก 2 ชนิด ในแง่ความสม่ำเสมอของการแพร่ซึมและคุณภาพของหัวต่อฯ ซึ่งปัญหานี้สามารถลดลงได้ด้วยการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 1,000-1,200 อังสตรอม บนแว่นผลึกก่อนทาสารละลาย ทำให้ผลการแพร่ซึมสม่ำเสมอขึ้น (คล้ายกับกรณีของ BBr_3 ที่ต้องมีการสร้างชั้นออกไซด์ในช่วงเวลา preheat เพื่อให้การแพร่ซึมเกิดอย่างสม่ำเสมอ) นอกจากนี้การทำออกไซด์ยังช่วยให้หลังการแพร่ซึม ไม่ต้องทำออกไซด์อีกครั้ง เพื่อกัดเอา Si-B compound ออกจากผิวหน้าแว่นผลึก

หรือถ้าต้องการให้ผลของ reproducibility ดีขึ้น ควรทาสารละลายอย่างอื่นที่มีความหนืดพอควร โดยผสมกับผง B_2O_3 แล้วไม่เกิดปฏิกิริยารุนแรงหรือไม่เกิดอันตรายต่อสุขภาพ เช่น-เดียวกับกรณี paint-on ของสารละลายระหว่าง Ethylene Glycol กับ P_2O_5 เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ B_2O_3 ได้ในทำนองเดียวกัน

2. กรณีของ BBr_3 ถ้าต้องการแพร่ซึมให้สะดวกขึ้น ไม่จำเป็นต้องผ่าน N_2 ลงไป bubble ใน BBr_3 เพียงแต่ให้ก๊าซ N_2 ผ่านไปยังผิวหน้าของ BBr_3 เพื่อจะได้อ่านค่าอัตราการไหลของ N_2 จาก flow meter ได้สูงขึ้น และตัดปัญหาเรื่องการใช้ flow meter ที่มีความละเอียดและถูกต้องสูง เพราะสำหรับระบบของ BBr_3 ให้ผลของการแพร่ซึมที่ดีแล้ว

3. กรณีของ BN ถ้าต้องการให้การแพร่ซึมเกิดได้ดีขึ้น ควรผสมไอน้ำกับ N_2 เพื่อให้ B_2O_3 ที่เกิดที่ผิวหน้าของแผ่น BN หลังการ activate กลายเป็น HBO_2 ซึ่ง HBO_2 นี้ มีค่า vapor pressure สูงกว่า vapor pressure ของ B_2O_3 มาก (ดังแสดงในรูปที่ 3.9) ทำให้การแพร่ซึมใช้เวลาสั้นลง