

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองที่แสดงในบทที่ 5 โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลังกระบวนการยิงฝัประจุ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิคอนที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝัประจุ, การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล และการเพิ่มขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การศึกษาความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างผิวโพลีซิลิคอนที่ได้รับการเจือสาร กับ โลหะ (Contact Resistance) และสุดท้ายทำการวิเคราะห์การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ (TCR) การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดในบทนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 การวิเคราะห์ผลการศึกษาโครงสร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนและหลังกระบวนการยิงฝัประจุ

จากการศึกษาโครงสร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ก่อนกระบวนการยิงฝัประจุ เมื่อทำการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ฟิล์ม Poly-Si ขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ไมครอน ขณะที่ ฟิล์ม a-Si ไม่มีขนาดเกรนแสดงให้เห็น และเมื่อนำ Poly-Si และ a-Si ไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องวัดโพรมอยท์โพรบ พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มทั้งสองชนิดสูงมาก (มากกว่า $5 \times 10^6 \Omega/\square$) ซึ่งไม่สามารถวัดได้ หลังจากนั้นนำฟิล์มทั้งสองชนิดมาทำการยิงฝัประจุที่ปริมาณสารเจือ $1.0 \times 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ ที่พลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มโพลีซิลิคอน เมื่อทำการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าฟิล์มจาก Poly-Si ขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ไมครอน ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับของเดิม ขณะที่ฟิล์มจาก a-Si มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรนมาก คือ มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.6 ไมครอน เมื่อนำ ฟิล์มทั้งสองชนิดไปวัดค่าความต้านทานเชิงผิวด้วยเครื่องวัดโพรมอยท์โพรบ พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มจาก Poly-Si มีค่าเท่ากับ $206.2 \Omega/\square$ ส่วน ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ ฟิล์ม a-Si มีค่าเท่ากับ $123.75 \Omega/\square$ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ ฟิล์มจาก Poly-Si มากกว่า ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ ฟิล์มจาก a-Si ทั้งนี้เนื่องจากขนาด

เกรนที่ของฟิล์มจาก Poly-Si ที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนของฟิล์ม a-Si สามารถพิสูจน์ได้ จากเอกสารอ้างอิง[27, 28] ดังนี้

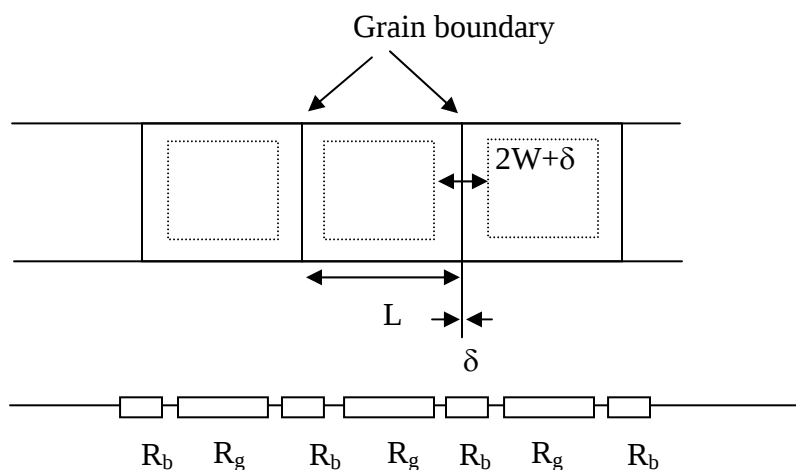
พิจารณา โพลีซีลิสเตอร์ ในรูปแบบที่มีการต่อตัวต้านทานเป็นแบบอนุกรม ดังในรูปที่ 6.1 ซึ่ง จะเห็นว่า ความต้านทานของโพลีซีลิสเตอร์ เท่ากับ ผลรวมของความต้านทานของเกรน กับความต้านทานที่ของขอบเกรน ได้ดังสมการ 6.1 ดังนี้

$$R_T = R_b + R_g + R_b + R_g + \dots \quad (6.1)$$

โดยที่ R_T คือ ความต้านทานของโพลีซีลิสเตอร์

R_g คือ ความต้านทานของเกรน

R_b คือ ความต้านทานของขอบเกรน



รูปที่ 6.1 โครงสร้างอย่างง่ายที่ต่อเป็นแบบอนุกรมของโพลีซีลิสเตอร์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสภาพความต้านทานของโพลีซีลิสเตอร์ในแต่ละเกรนจะได้ ดังสมการ 6.2

$$\rho = \left[\frac{L - (2W + \delta)}{L} \right] \rho_g + \left[\frac{2W + \delta}{L} \right] \rho_b \quad (6.2)$$

โดยที่ L คือ ความกว้างของเกรน

W คือ ระยะเกรนถึงขอบเกรน

δ คือ ความหนาของขอบเกรน

ρ คือ สภาพต้านทานในแต่ละเกรนของโพลีซิลิไซด์เตอร์

ρ_g คือ สภาพต้านทานของเกรน

ρ_b คือ สภาพต้านทานของขอบเกรน

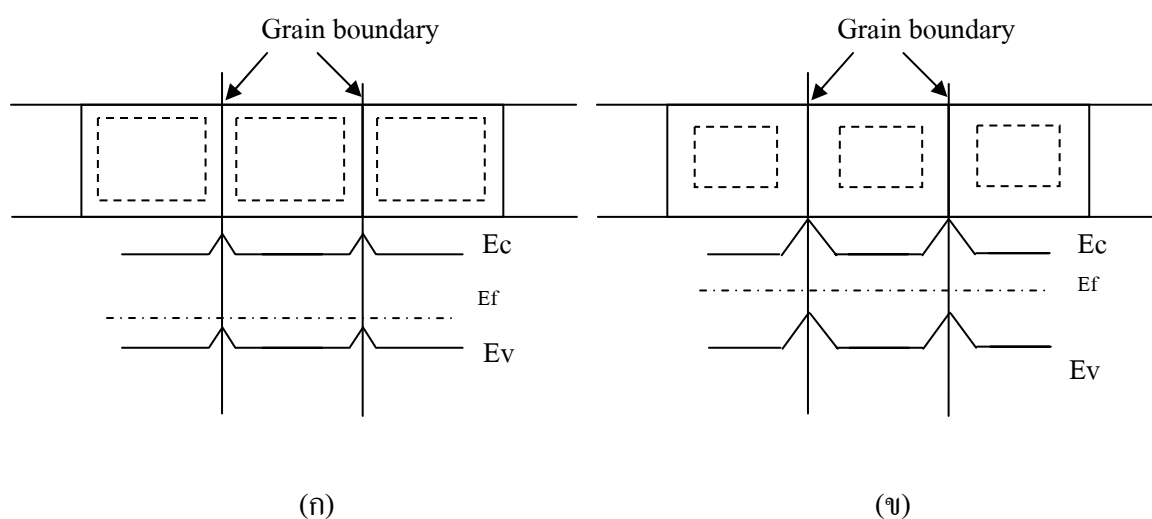
ค่า ρ_b มีค่าสูงกว่าค่า ρ_g มาก เนื่องจากที่บริเวณขอบเกรนไม่มีการจับพันธะที่สมบูรณ์ จึงมีความต้านทานสูง ซึ่งต่างจากบริเวณเกรนเป็นผลึกสมบูรณ์เมื่อได้รับการเจือสารทำให้มีค่าความต้านทานต่ำ จากสมการที่ 6.2 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ขนาดเกรนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ได้ค่า $\left[\frac{2W + \delta}{L} \right]$ ต่ำ ทำให้ได้ค่า ρ_b มีค่าน้อย และจะทำให้ได้ค่า ρ น้อยด้วย แต่ในกรณีที่ขนาดเกรนมีขนาดเล็กจะทำให้ได้ค่า $\left[\frac{2W + \delta}{L} \right]$ มาก ทำให้ได้ค่า ρ_b มีค่ามาก เป็นเหตุให้ค่า ρ มากด้วย

6.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ

จากผลการทดลองศึกษาความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์ที่ สร้างจากฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเจือเท่ากับ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² ที่พลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง และเมื่อนำ Poly-Si และ a-Si ไปวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องวัดโพรพอร์โพรบ พบค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ ฟิล์ม Poly-Si มีค่าเท่ากับ 201.95, 181.73, 158.34 และ 147.07 $\Omega/\square$ ตามลำดับ และค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ ฟิล์ม a-Si มีค่าอยู่ในช่วง 123.75, 117.17, 106.2 และ 102.58 $\Omega/\square$ ตามลำดับ ที่ปริมาณสารเจือตั้งแต่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าลดลง ขณะที่ทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ ซึ่งอธิบายได้[27] ดังนี้คือ จากสมการที่ 6.2 จะเห็นว่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์เตอร์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นขอบเขตของเกรน และส่วนที่เป็นเกรน

เมื่อเราพิจารณาขอบเขตเกรน (grain boundary) โดยมีพฤติกรรมแบบช็อตตี้ (schottky barrier) ซึ่งทั้งสองด้านเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 6.2 โดยปกติแล้ว กลไกที่เกี่ยวข้องของสองกลไก คือ กลไกแบบแรก คือ เทอร์มิโอนิก อิมิสชัน (thermionic emission) ซึ่งบริเวณนี้พาหะจะมีพลังงานเพียงพอ ที่จะข้ามผ่านสิ่งกีดขวาง โดยสามารถทะลุทะลวง (tunneling) หรือ การแพร่ผ่านสิ่งกีดขวาง และในทางอุดมคติของ เทอร์มิโอนิก อิมิสชัน จะถูกรวบรวมไว้กับการทะลุทะลวง แบบควอนตัม (quantum tunneling) ซึ่ง

ได้นำเสนอโดย ทัง (Tarn) ได้อาศัยหลักการนี้มาอธิบาย พฤติกรรมแบบซ็อตกี และอธิบายขอบเขตเกรน (grain boundary) ของโพลีคริสเตอ์ สำหรับกลไกแบบที่ 2 คือการรวมกันระหว่าง เทอร์มิโอนิก อิมิตชันกับกระบวนการแพร่ ซึ่งได้นำเสนอโดยคุณสิงห์ (Singh) ซึ่งนำไปใช้ในการอธิบายพฤติกรรมระหว่างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (metal semiconductor barrier) จากรูปที่ 6.2 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม ในแต่ละด้านของขอบเขตเกรน ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือต่ำแสดงดังรูปที่ 6.2 (ข) จะมีค่าศักย์ ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละด้านของ ขอบเขตเกรนสูงกว่า ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือสูงแสดงดังรูปที่ 6.2 (ก) ดังนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูง ทำให้พาหะข้ามกำแพงศักย์ได้ยากทำให้มีความต้านทานที่สูงกว่ากรณีที่มีกำแพงศักย์ที่ต่ำกว่า ทำให้กรณีที่มีปริมาณสารเจือที่สูงกว่ามีค่าความต้านทานที่ขอบเขตเกรนต่ำกว่า ในกรณีที่มีปริมาณสารเจือที่ต่ำกว่า



รูปที่ 6.2 โครงสร้างของแถบพลังงานที่ขอบเขตเกรน (ก) ปริมาณสารเจือมาก (ข) ปริมาณสารเจือน้อย

เมื่อเราพิจารณาส่วนที่เป็นเกรน ซึ่งภายในเกรนเป็นผลึกสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับปริมาณสารเจือที่สูงขึ้นแต่กลับได้ค่าสภาพความต้านทานที่ต่ำลง ด้วยความสัมพันธ์ ตามสมการที่ 6.3 [25]

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \quad (6.3)$$

โดยที่ n คือ ความเข้มข้นสารเจือชนิดเอ็น

p คือ ความเข้มข้นสารเจือชนิดพี

q คือ 1.6×10^{-19} คูโลมปี

μ_n คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน

μ_p คือ สภาพคล่องของโฮล

จะพบว่าความต้านทานขอบเขตของเกรน และส่วนที่เป็นเกรนมีค่าต่ำลงเมื่อสารเจือเพิ่มขึ้น ดังนั้นความต้านทานของเนื้อฟิล์ม a-Si และ Poly-Si มีค่าต่ำลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารเจือ

6.3 การวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล

การศึกษาโครงสร้างและความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si ที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการแอนนัล โดยการปรับเพิ่มก๊าซออกซิเจนเพื่อเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นชั้นฉนวนใช้ในการป้องกันการแพร่ออกของสารเจือ (out gas) ในระหว่างทำกระบวนการแอนนัล จากผลการทดลองได้แสดงผลดังรูปที่ 5.10 พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของ ฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si ที่ใช้เงื่อนไขการ แอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hrs ภายใต้บรรยากาศ N_2 และ O_2 มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เงื่อนไขการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 15 hrs ภายใต้บรรยากาศ N_2 เท่ากับ 8.20 % และ 9.05 % ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มก๊าซออกซิเจนเพื่อเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ช่วยลดค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ได้ ทั้งนี้ปัญหาลักษณะหนึ่งมาจากในระหว่างกระบวนการแอนนัลโดยการเพิ่มก๊าซออกซิเจนในระหว่างการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำให้ปริมาณสารเจือส่วนหนึ่งในโพลีซิลิไซด์เข้าไปอยู่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.4 การวิเคราะห์การศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ศึกษาความต้านทานของ โพลีซิลิไซด์ที่สร้างจาก ฟิล์ม Poly-Si และ a-Si โดยการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นชั้นฉนวนใช้ในการป้องกันการแพร่ออกของสารเจือ (out gas) ในระหว่างทำกระบวนการแอนนัล จากผลการทดลองได้แสดงผลดังรูปที่ 5.12 พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่น ของฟิล์ม Poly-Si และ ฟิล์ม a-Si ที่มี ชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ มี ชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์เท่ากับ 6.17 % และ 5.86 % ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ไม่ช่วยลดค่าความต้านทานของโพลีซิลิไซด์ได้ ทั้งนี้ปัญหาลักษณะหนึ่งมาจากใน

ระหว่างกระบวนการยิงฝังประจุ ทำให้ปริมาณสารเจือส่วนหนึ่งในโพลีซิลิคอนเข้าไปอยู่ในชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น

6.5 การวิเคราะห์การศึกษาหา ที่ชิอาร์

จากผลการทดลองที่ 5.7 ค่าความต้านทานของโพลีซิลิคอน โดยการปรับอุณหภูมิ 25-99 องศาเซลเซียส จะได้ค่าดังตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} - 1.3×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณสารเจือ 1.6×10^{16} - 2.0×10^{16} ion/cm² จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและโพลีซิลิคอนที่สร้างจากฟิล์ม a-Si มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณสารเจือ ในการทดลองนี้

ในรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ a-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ 3.05×10^{-4} , 5.04×10^{-4} , 5.09×10^{-4} และ 5.19×10^{-4} / °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ a-Si มีค่าเป็นช่วงบวกทุกสารเจือ และมีค่าค่อนข้างคงที่

เมื่อพิจารณาในฟิล์มของ Poly-Si ที่ปริมาณสารเจือ 1.0×10^{16} , 1.3×10^{16} , 1.6×10^{16} และ 2.0×10^{16} ion/cm² จะได้ค่าของ TCR เท่ากับ -1.32×10^{-4} , -4.12×10^{-5} , 4.12×10^{-5} และ 1.36×10^{-4} ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า TCR ของ ฟิล์ม Poly -Si มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเจือ โดยมีค่าเป็นช่วงลบในช่วงปริมาณสารเจือ 1.0 - 1.5×10^{16} ion/cm² และมีค่าเป็นช่วงบวกที่ปริมาณสารเจือมากกว่า 1.5×10^{16} ion/cm² ซึ่งค่า TCR มีค่าเป็นช่วงลบซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติคล้ายกับ Shockley barrier เป็นเหตุให้นำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดันจะไม่สามารถควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเชิงเส้นได้[27]

เมื่อเปรียบเทียบค่า TCR ระหว่างเนื้อฟิล์มของ a-Si กับ Poly-Si จะพบว่า ค่า TCR ของ a-Si มีค่ามากกว่า Poly-Si ทุกสารเจือ

จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เราเลือก ฟิล์ม a-Si ในการนำไปสร้าง เป็นโพลีซิลิคอนในการตรวจจับความดัน และปริมาณสารเจือที่เราเลือกคือ 1.3×10^{16} ion/cm² เนื่องจากได้ค่า TCR เท่ากับ 5.04×10^{-4} / °C เมื่อเทียบกับ สารเจือปริมาณ 1.6×10^{16} ion/cm² และ 2.0×10^{16} ion/cm² ได้ค่า TCR เท่ากับ 5.09×10^{-4} / °C และ 5.19×10^{-4} / °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าต้องเจือสารเพิ่มขึ้นจาก 1.3×10^{16} ion/cm² เท่ากับ 23.07% และ 58.83% เพื่อให้ได้ TCR เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.99% และ 2.98% ซึ่งเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นน้อยมาก