

บทที่ 7

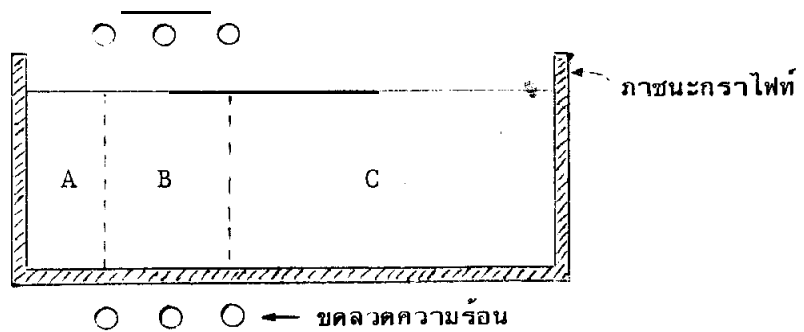
การประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนและวิธีการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสังเขป โดยเฉพาะวิธีการสร้างจังก์ชันต่างๆ และเทคโนโลยีพลาสมา

7.1 การปลูกผลึกเดี่ยวและการโคปสารเจือ

สิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำจะมีคุณสมบัติ เป็นไปตามที่คำนวณได้จะต้องประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีโครงสร้างที่สมบูรณ์มากที่สุด สารกึ่งตัวนำอาจจะถลุงให้บริสุทธิ์ได้ทั้งวิธีทางเคมีและทางกายภาพ ในธรรมชาติสารกึ่งตัวนำทั้งหลายมักจะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่นในกรณีของ Si จะอยู่ในรูปของ SiCl_4 , SiHCl_3 หรือ SiH_4 เป็นต้น การทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเหล่านี้จะได้ความบริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำได้เพียงประมาณ 99.999 % ซึ่งยังไม่พอเพียง เราต้องนำมาถลุงต่อโดยวิธีทางกายภาพโดยอาศัย ขบวนการแยกตัว (segregation) ซึ่งคือขบวนการที่สิ่งเจือปนในของแข็งจะแยกตัวเข้าไปอยู่ในสถานะเหลว รูป 7.1 แสดงวิธีการถลุงดังกล่าว ซึ่งระบบทั้งหมดอยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย บริเวณ B คือบริเวณสาร-



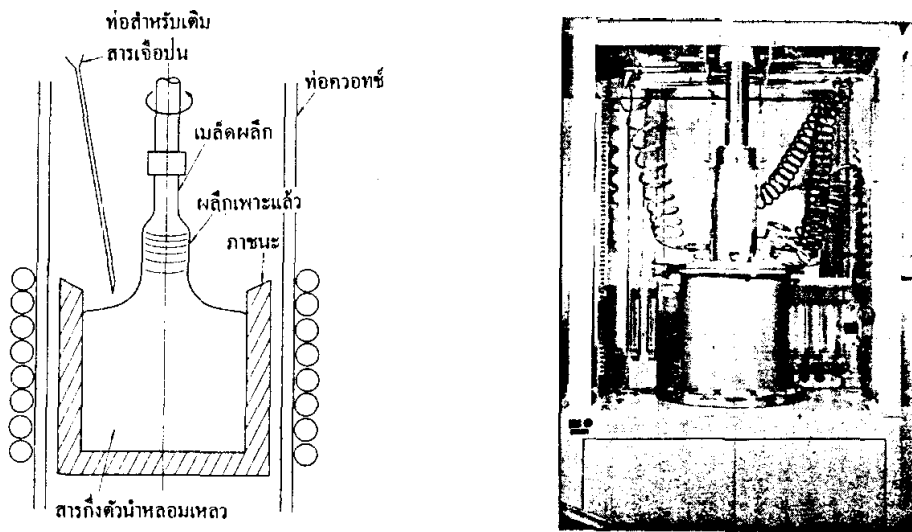
รูป 7.1 การถลุงแบบแยกโซน

กิ่งตัวนำที่หลอม เหลวซึ่งจะ เคลื่อนที่ไปทางขวาซ้ายๆ สิ่ง เจือปนทั้งหลายจะแพร่เข้ามาอยู่ในโซน เหลว นี้ บริเวณ A เป็นสารกิ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง บริเวณ C เป็นบริเวณที่สารกิ่งตัวนำยังมีความ บริสุทธิ์ต่ำ ด้วยวิธีการ เลื่อนขดลวดความร้อนซึ่งสามารถกระทำซ้ำๆ ได้หลายครั้ง สิ่ง เจือปนจะ ถูก "กวาด" ไปอยู่ด้านขวามือ และสารกิ่งตัวนำทางซ้ายจะมีความบริสุทธิ์สูงมากคือมีความบริสุทธิ์ ได้สูงถึง 99.99999999 % วิธีการถลุงแบบนี้มักจะ ใช้กับสารกิ่งตัวนำที่มีจุดหลอม เหลวต่ำ ข้อ เสีย ของวิธีการนี้คือ จะได้ผลึกที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์คือนักคืออาจจะมียรอยแตก ทั้งนี้เนื่องจากสัมประ สลธิ์การขยายตัวของภาชนะรองรับ (เช่นกราไฟท์) กับของสารกิ่งตัวนำไม่เท่ากัน ดังนั้นเวลาลด อุณหภูมิลงจึงมีแรงกระทำต่อผลึก

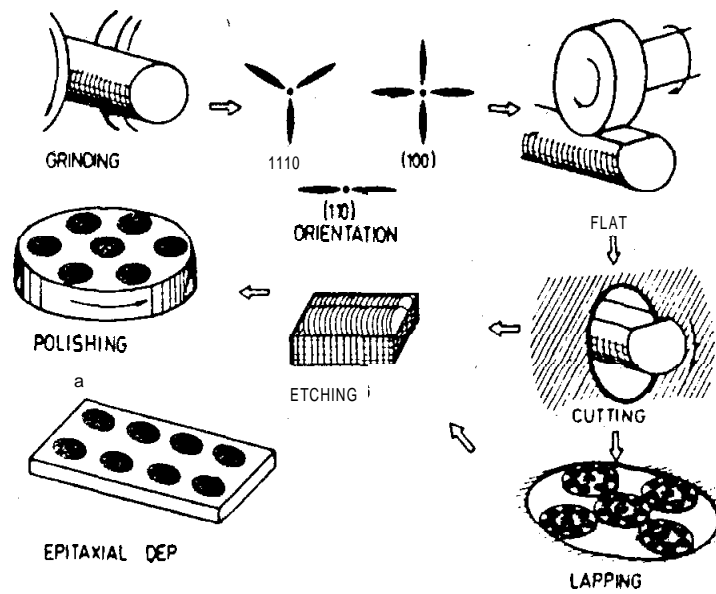
การ เจือปนสารเจือที่ต้องการสามารถทำได้ โดยเติมสารเจือลงในโซนหลอม เหลว ตามปกติชั้นสารกิ่งตัวนำที่ผลึกออกมาจากโรงงานมักจะอยู่ในลักษณะชนิด เอ็นหรือชนิดพี ซึ่งทำได้โดย การ เติมสาร เจือที่ เหมาะสม (ดูหัวข้อ 3.2) ลงไปในขณะผลิตผลึก ดังกล่าว

ในกรณีที่สารกิ่งตัวนำมีจุดหลอม เหลวสูง หรือกรณีที่ต้องการให้ได้ผลึกเดี่ยวคุณภาพ ดีมาก เราสามารถถลุงได้อีกวิธีหนึ่งซึ่งดีกว่าวิธีแยกโซน (แต่ก็ เป็นวิธีการที่แพงกว่าเช่นกัน) คือ วิธีการดึงผลึกหรือวิธีของโซราลสกี (Czochralski method) ในกรณีนี้สารกิ่งตัวนำที่เพาะตัว- เป็นผลึกเดี่ยวโดยการ เกาะกับผลึก เดี่ยวตัวแม่หรือ เม็ดผลึก (seed crystal) จะแข็งตัวโดยไม่ สัมผัสกับภาชนะรองรับดังรูป 7.2 ดังนั้นจึงขจัดสาร เจือปนที่ไม่พึงประสงค์จากภาชนะออกไปได้ และการแตกแยกของโครงสร้างผลึกก็จะน้อยกว่าวิธีแรกมาก แต่อย่างไรก็ตามอัตราการหมุนรอบ ตัว ($= \frac{1}{2}$ รอบต่อวินาที) ความเร็วในการดึงผลึก ($= 10^{-3}$ ซม.ต่อวินาที) และอุณหภูมิ จะ ต้องถูกควบคุมไว้ให้ได้ในลักษณะที่แน่นอนมาก นอกจากนี้การสันสะ เทือนก็จะต้องขจัดออกไปให้ได้ มากที่สุด เช่นกัน

ผลึก เดี่ยวที่ผ่านการผลิตขั้นต้นดังกล่าวแล้ว จะถูกนำมาทำ เป็นแว่นผลึกบางๆ หรือ เวเฟอร์ (wafer) โดยขั้นตอนต่างๆ ดังรูป 7.3 ได้แก่การตัดแต่ง หาทิศทางการเอียงตัวของ



รูป 7.2 การดึงผลึกโดยวิธีของไซราลสกี



รูป 7.3 แผนภูมิแสดงการเตรียมแผ่นผลึก

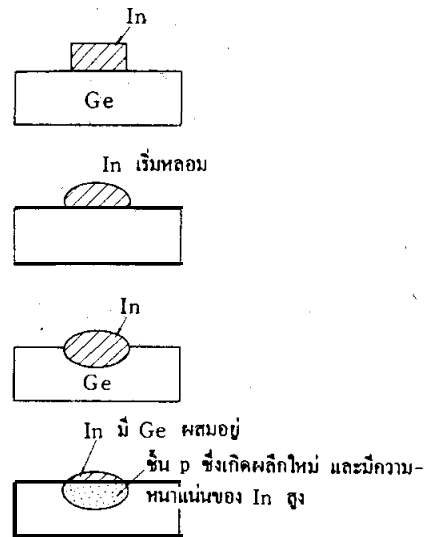
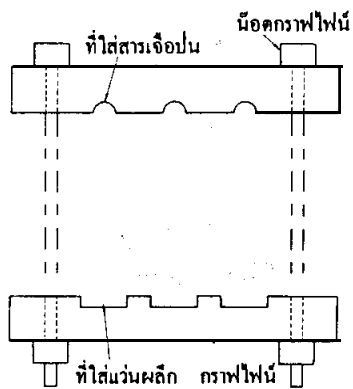
ผลึก การตัด เป็นแผ่นบางๆ แล้วนำไปขัดให้เรียบ เพื่อขจัดผิวผลึกที่ถูกทำลายโครงสร้างจากการตัด จากนั้นจะกัดผิวผลึกที่ถูกทำลายออกด้วยน้ำยาเคมีอีกชั้นหนึ่ง แล้วขัดมัน จากนั้นจึง เป็นการปลูกชั้น อีพิแทกเซียล (epitaxial) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการสร้างจังก์ชัน วิธีอีพิแทกเซียลนี้จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

7.2 การสร้างพี-เอ็นจังก์ชัน

การสร้างพี-เอ็นจังก์ชัน หรือจังก์ชันอื่นๆ มีวิธีที่นิยมอยู่ 4 วิธี คือ

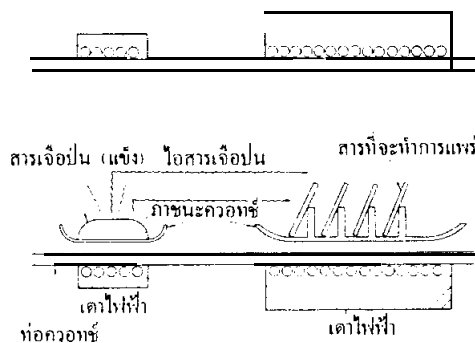
1. วิธีอัลลอย
2. วิธีแพร่
3. วิธีอีพิแทกเซียล
4. วิธีฝังอนุภาค

วิธีอัลลอย : รูป 7.4 แสดงการสร้างพี-เอ็นจังก์ชันโดยเริ่มจากแว่นผลึก Ge ชนิด เอ็น และโคปซต์ เชนด้วย In โดยวิธีการอัลลอยภายใต้อุณหภูมิสูง (ในกรณีนี้ประมาณ 500°C) และมีบรรยากาศ เป็นกาซเฉื่อย



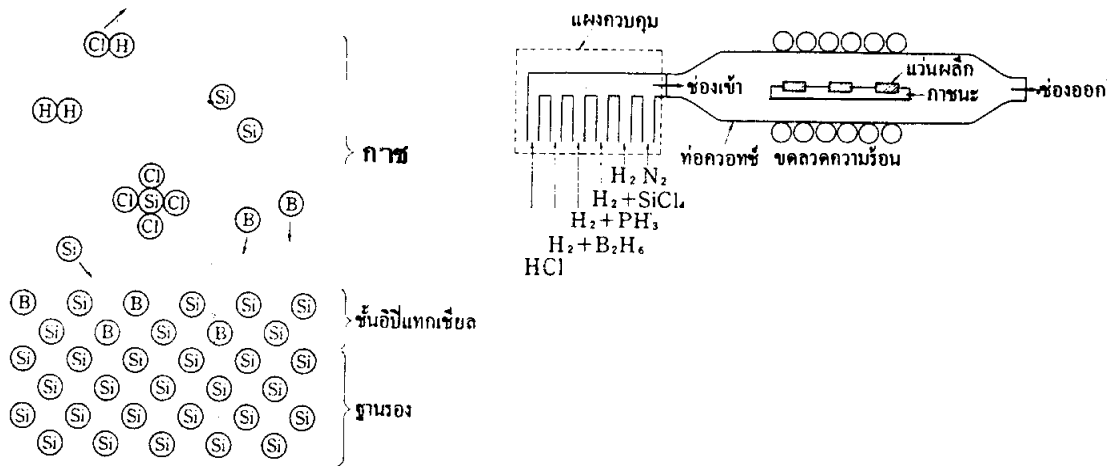
รูป 7.4 กรรมวิธีอัลลอย

วิธีแพร่ : รูป 7.5 แสดงภาพลักษณะการสร้างจังก์ชันโดยวิธีการแพร่ โดยตามปกติแวนผลึกจะถูก เตรียม ในลักษณะที่เป็นชนิด เอ็นหรือพีอยู่ก่อนแล้ว และโคปชด เซยจากการแพร่ของอะตอมสาร เจือปนชนิดตรงข้าม



รูป 7.5 กรรมวิธีแพร่

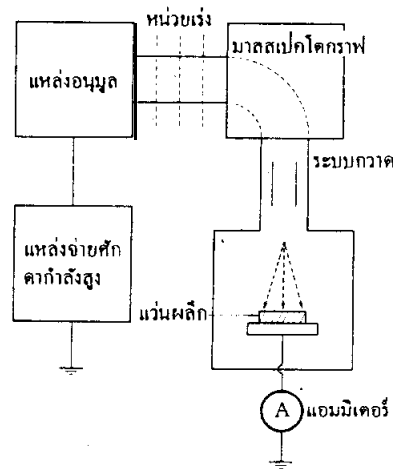
วิธีอีพีแทก เซียล : กรรมวิธีนี้ เป็นการจัด เรียงอะตอม เพิ่มขึ้นจากฐานรองซึ่งเป็น แวนผลึกในลักษณะ เดียวกับการ เรียงอะตอมของตัวฐานรองเอง นั่นคือโครงผลึกของฐานรองได้ เพาะตัวออกขณะ เดียวกับการโคปก็ จะทำไปพร้อมๆ กับการเพาะตัวนี้ ทำให้ได้ชั้นอีพีแทก เซียล เป็นชนิด เอ็นหรือพีได้ตามประสงค์ รูป 7.6 แสดงกรรมวิธีอีพีแทก เซียล ชั้นพีจะถูกเพาะขึ้นโดย การใช้ก๊าซ B_2H_6 กับ $SiCl_4$ ซึ่งอะตอมของโบรอนกับซิลิคอนจะแยกตัวออกโดยปฏิกิริยาเคมีที่ อุณหภูมิสูง ($\approx 1200^{\circ}C$) และเข้าไป เกาะตัวบนฐานรองรับซึ่งเป็นแวนผลึกซิลิคอน เมื่อต้องการ สร้างชั้น เอ็นก็ทำได้โดย เปลี่ยนส่วนผสมของก๊าซไป เป็น PH_3 กับ $SiCl_4$ จะเห็นว่าวิธีการเพาะ ชั้นอีพีแทก เซียลสามารถสร้างชั้นพีและ เอ็นได้ทันทีโดยไม่ต้องอาศัยการโคปชด เซย ก๊าซที่ใช้ อาจ ใช้อย่างอื่นก็ได้ กระบวนการนี้จำเป็นต้องทำความสะอาดผลึก เป็นระยะๆ โดยใช้ความร้อนและ ก๊าซต่างๆ เข้าช่วย



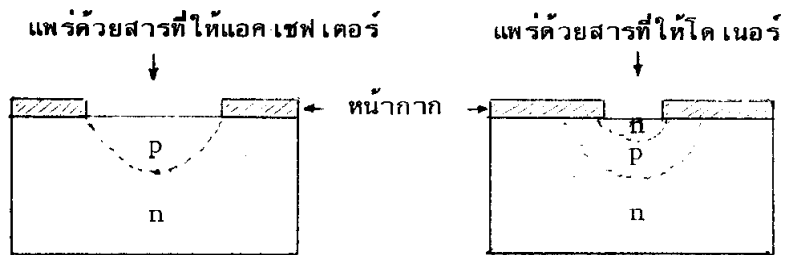
รูป 7 . 6 การ เพาะชั้นอีพิแทก ซีล

วิธีฝังอนุภาค : วิธีการนี้สาร เจือจะถูกทำให้อยู่ในลักษณะของไอออน และถูกเร่ง โดย เครื่อง เร่งอนุภาค จากนั้นไอออนจะถูกคัด เลือก ให้เหลือ เฉพาะ ไอออนที่ต้องการจริงๆ โดย เครื่องแมสส เปคโตรกราฟ เราสามารถย้ายตำแหน่งของการโคปนบนแว่นผลึก ได้โดยระบบกวาดซึ่ง ความคุมทิศทางของลำอนุภาค (ไอออนสาร เจือปน) โดยสนามไฟฟ้า วิธีการนี้จะให้ความหนาแน่น ของสาร เจือปนสม่ำเสมอดีมาก ขนาดและความลึกของจังก์ชันสามารถควบคุมได้อย่างสะดวกและ ระบบอยู่ภายใต้อุณหภูมิปกติ ข้อ เสียก็คืออุปกรณ์การฝังอนุภาคราคาแพงมาก

ในกรณีการสร้างจังก์ชันหลายๆ จังก์ชันเช่น พี-เอ็น-พี เราสามารถทำได้โดยการ โด๊ปชนิด เซย (ยก เว้นกรณีอีพิแทก ซีล) ดัง เช่น รูป 7.8 แสดงขั้นตอนการสร้าง เอ็น-พี-เอ็น จังก์ชันโดยวิธีการแพร่



รูป 7.7 ระบบการฝังอนุภาค



รูป 7.8 ขั้นตอนการสร้าง เอ็น-พี-เอ็น จังก์ชัน

7.3 การเชื่อมต่อโลหะ

การเชื่อมต่อสายโลหะ เข้ากับสารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปใช้งานมีหลักสำคัญอยู่ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะต้องไม่ทำให้คุณสมบัติของจังก์ชันผิดไปจากเดิม คือรอยต่อระหว่าง

โลหะกับสารกึ่งตัวนำจะต้องมีลักษณะโอห์มมิก (Ohmic contact) วิธีการนี้ทำได้ทั้งโดยการอัลลอย ภายใต้ความร้อนหรือการระเหยในสุญญากาศ (evaporate) หรือวิธีอื่นๆ โลหะที่มีรอยต่อโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำต่างๆ จะแตกต่างกันไป แต่ส่วนมากที่นิยมใช้คืออะลูมิเนียม ตาราง 7.1 แสดงโลหะที่มีรอยต่อโอห์มมิกกับ Ge และ Si

ตาราง 7.1

โลหะที่ให้รอยต่อโอห์มมิก

สารกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำกระแส	อัลลอย	อุณหภูมิการอัลลอย
Ge	n	Sn	500–700
		Pb–Sb	650–750
		Au	320–600
		Au–Sb	
	p	In	500–650
		AU	400–600
Au–Ga		320–650	
Si	n	Au–Sb	400–900
		Al	600
	p	Al	600

7.4 เทคโนโลยีพลาสมาและไอซี

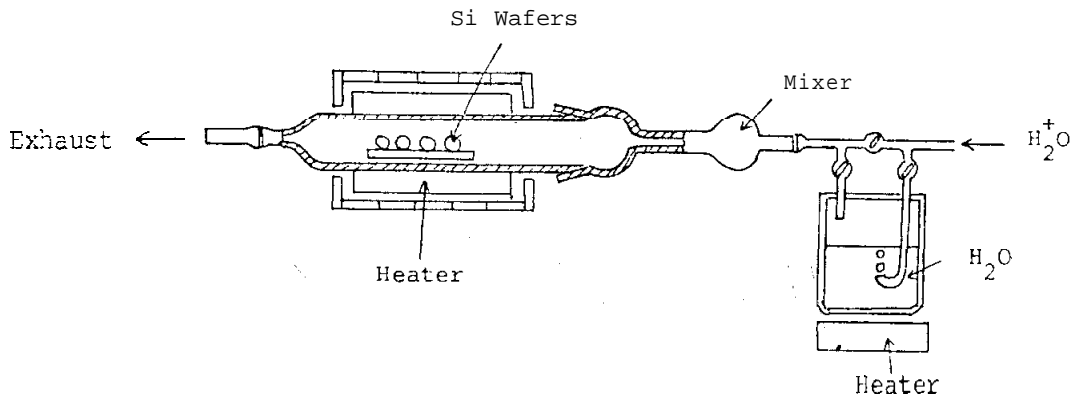
7.4.1 เทคโนโลยีพลาสมา

เทคโนโลยีพลาสมา (planar technology) เป็นกรรมวิธีการผลิตสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ จากสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะสำหรับการสร้างวงจรรวมหรือไอซี หลักการของเทคโนโลยีนี้คือการสร้างชั้นออกไซด์และกัดอกไซด์โดยการพิมพ์ลวดลายด้วยแสง ทำให้สามารถสร้างจังก์ชันได้หลายๆ แห่งในเวลาเดียวกัน ขั้นตอนของเทคโนโลยีพลาสมามีดังนี้คือ

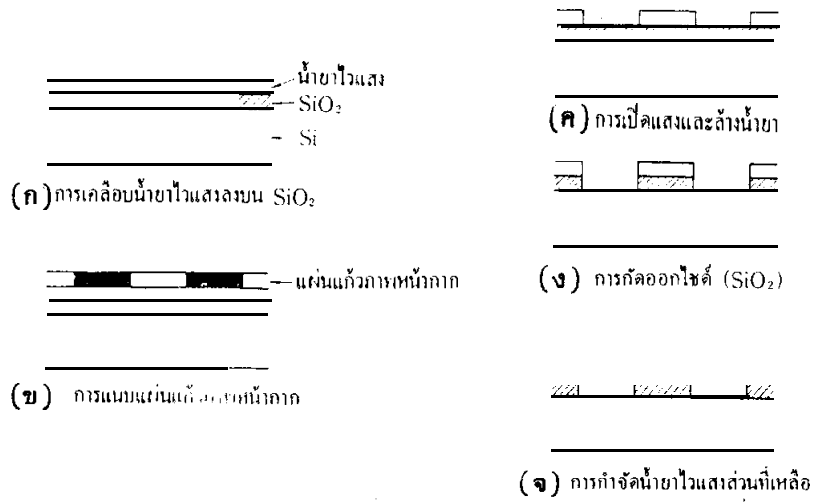
1. การสร้างชั้นออกไซด์ด้วยความร้อน (thermal oxidation)
2. การพิมพ์ลวดลายด้วยแสง (photolithography)
3. การแพร่อะตอมสาร เจือ (solid state diffusion)
4. การสร้างชั้นโลหะ (metallization)

การสร้างชั้นออกไซด์บนเว่นผลึก เป็นพื้นฐานสำคัญมากในเทคโนโลยีนี้ ชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นจะทำหน้าที่เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ซึม ในจุดที่ไม่ต้องการ เป็นชั้นฉนวนเพื่อป้องกันการลัดวงจรและป้องกันอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ตามปกติในกรณีของ Si ชั้นออกไซด์คือ SiO_2 ซึ่งสร้างขึ้นได้โดยปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Si กับ O_2 หรือ Si กับ H_2O รูป 7.9 แสดงเตาที่ใช้ในการสร้าง SiO_2

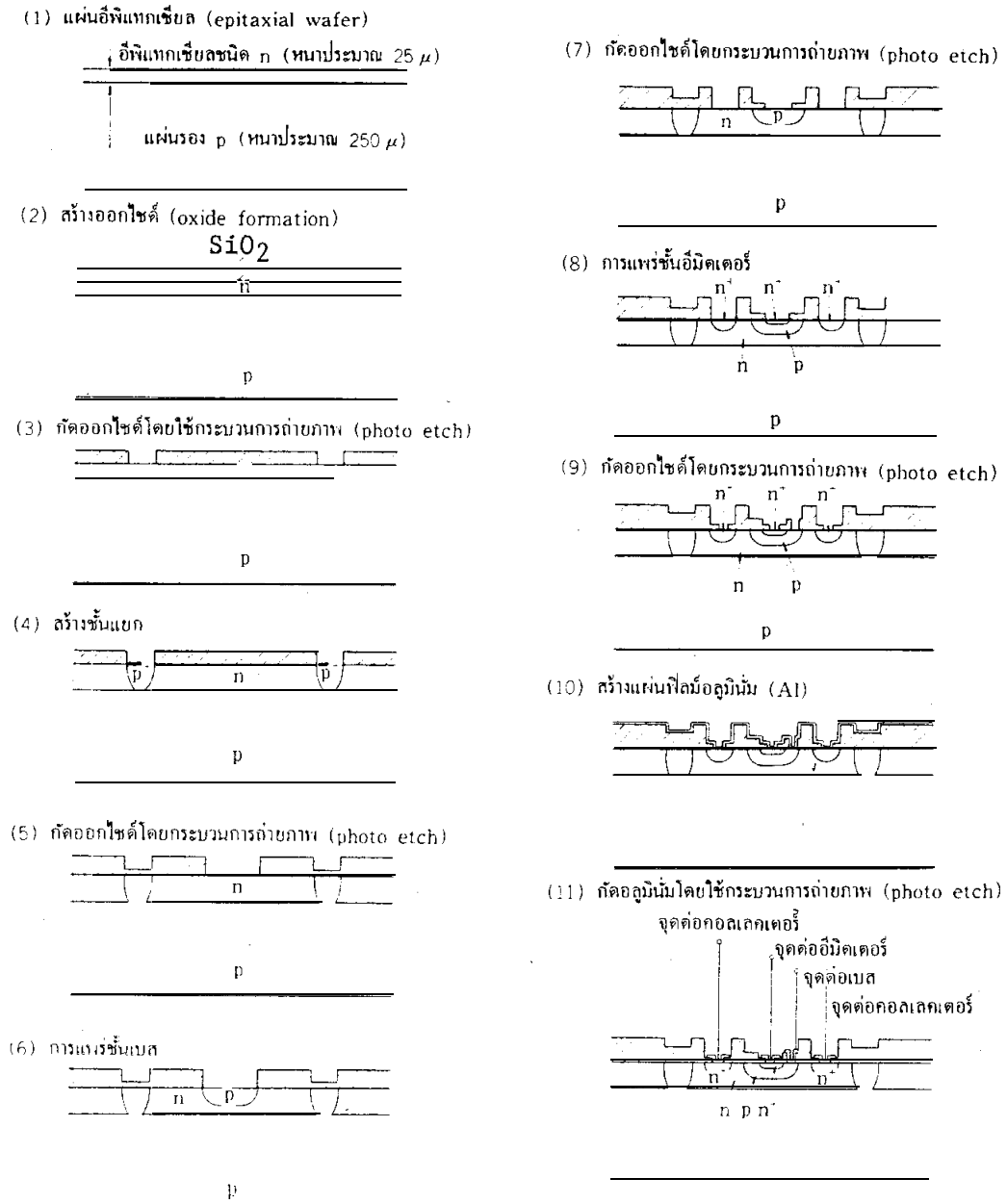
การพิมพ์ลวดลายด้วยแสงมีจุดประสงค์เพื่อที่จะขจัดชั้นออกไซด์บางส่วนออก เพื่อที่จะได้แพร่อะตอมของสาร เจือลงไปในตำแหน่งนั้น วิธีการคือจะต้องเคลือบน้ำยาไวแสง (อุลตราไวโอเลต) ทับลงบนชั้นออกไซด์ จากนั้นทาบแผ่นแก้วซึ่งวาดแบบไว้แล้ว แสงจะผ่านส่วนที่วาดไว้ลงสู่น้ำยาไวแสงได้ สำหรับแบบบนแผ่นแก้วและน้ำยาไวแสงจะต้องใช้คู่กัน เช่นถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาอ่อนตัว (depolymerize) เมื่อถูกแสง ลวดลายบนแผ่นแก้วที่ต้องการใช้จะต้องทำให้โปร่งแสง แต่ถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิด



รูป 7.9 การสร้างชั้น SiO_2



รูป 7.10 การกัดชั้นออกไซด์โดยการพิมพ์ลวดลายด้วยแสง



รูป 7.11 ลำดับการสร้างทรานซิสเตอร์ในวงจรรวม

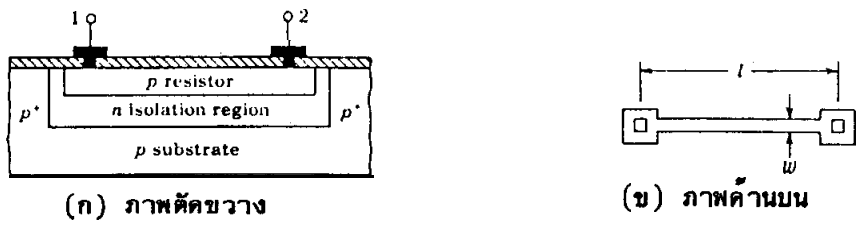
ลปซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาแข็งตัว (polymerize) เมื่อถูกแสง ลวละลายบนแผ่นแก้วที่ต้องการใช้จะ-
 ต้องทำให้ทึบแสง จากนั้นนำไปล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่อ่อนตัวออกและกัดชั้นออกไซด์ออกด้วยวิธีการ
 ทางเคมีก็จะได้ลวละลายหรือหน้ากากของชั้นออกไซด์ตามต้องการ ดังรูป 7.10

สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือ ก็คือขบวนการโคปโดยวิธีแพร่ตัวเอง มีจุดประสงค์
 เพื่อสร้างชั้นเอ็นหรือพีตามต้องการ อะตอมของสารเจือจะแพร่ลงไปในส่วนกึ่งตัวนำที่ชั้นออกไซด์
 ถูกกัดออกไปแล้วเท่านั้น และสำหรับการสร้างชั้นโลหะส่วนใหญ่จะกระทำโดยวิธีการระเหยในระบบ
 สูญญากาศ โลหะที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นอะลูมิเนียม โดยการเผาอะลูมิเนียมในสูญญากาศที่อุณหภูมิสูง อะลู-
 มินัมจะเกิดการระเหย และอะตอมอะลูมิเนียมจะเข้าไป เกาะตัวกับแผ่นสารกึ่งตัวนำ

รูป 7.11 แสดงขั้นตอนการสร้างทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมไอซีโดยเทคโนโลยีพลาสมา

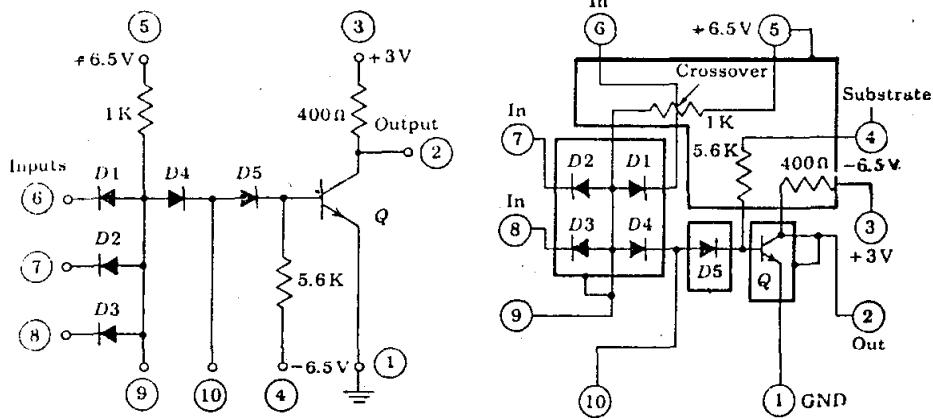
7.4.2 วงจรรวม

เทคโนโลยีพลาสมามีประโยชน์มากในการสร้างวงจรรวมซึ่งประกอบด้วยวงจรมากมาย
 วงจรรวมกันอยู่บนชั้นสารกึ่งตัวนำชั้นเดียว ในการสร้างความต้านทาน ไดโอด ทรานซิสเตอร์
 ลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำชั้นเดียว จะต้องทำให้มีลักษณะอิสระจากกัน ซึ่งทำได้โดยการสร้างชั้นแยก
 หรือทำให้เป็นเกาะ (island) โดยการสร้างชั้น n^+ หรือ p^+ และให้ไบอัสที่เหมาะสม รูป 7.11
 แสดงการสร้างทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมไอซี รูป 7.12 แสดงการสร้างตัวต้านทานในวงจรรวมไอซี
 สำหรับตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์และไดโอดมีหลักการคล้ายๆ กับการสร้างทรานซิสเตอร์นั่นเอง



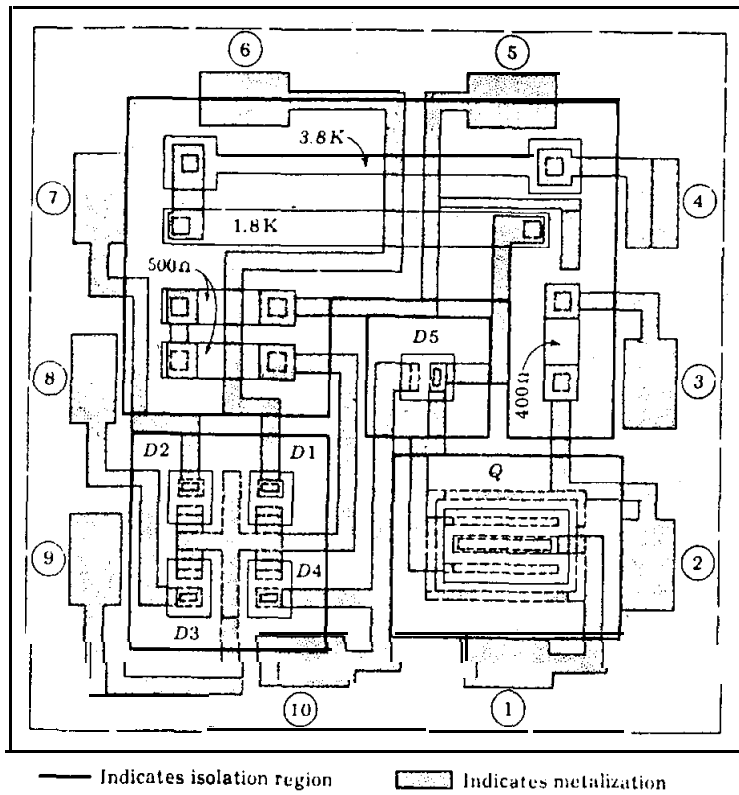
รูป 7.12 ตัวต้านทานในวงจรรวมไอซี

เพียงแต่จ้งคั้งขึ้นน้อยลง รูป 7.13 แสดงการดัดแปลงวงจร DTL ให้อยู่ในรูปเหมาะสมในการออกแบบไอซี และรูป 7.14 แสดงไอซีของวงจรในรูป 7.13



รูป 7.13 วงจร DTL และการออกแบบใหม่ให้เหมาะสมกับไอซี

โดยปกติสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ เมื่อสร้างเสร็จแล้วหรือ เสร็จบางส่วนตอน จะต้องนำไปอบหรือแอนนิล (anneal) ที่อุณหภูมิเหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อให้คุณสมบัติของรอยต่อต่างๆ คั้งขึ้นและมีความคงทน



รูป 7.14 วงจรไอซีของ DTL ตามรูป 7.13

บทสรุป

การปลูกผลึกเดี่ยวและการโคป

การถลุงผลึกทางกายภาพอาศัยขบวนการ "segregation"

การปลูกผลึกเดี่ยวและการโคปที่นิยมคือแบบแยกโซนและแบบการดึงผลึกหรือวิธี
ไซราลสกี ในแบบหลังขณะการแข็งตัวของผลึก เดี่ยวจะไม่สัมผัสกับภาชนะรองรับ

การสร้างจังก์ชัน

มีที่สำคัญ 4 วิธีคือ วิธีอัลลอย วิธีแพร่ วิธีอีพิแทกเซียล และวิธีฝังอนุภาค
ส่วนใหญ่อาศัยหลักการโคปซด เซย ยก เว้นวิธีอีพิแทกเซียลซึ่งสร้างขึ้น เอ็นหรือพีขึ้น
โดยตรง

เทคโนโลยีพลาสมา

มีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

- การสร้างชั้นออกไซด์ เพื่อใช้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอม
สารเจือ เป็นฉนวน และป้องกันการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก
- การพิมพ์แบบ มีจุดประสงค์เพื่อกัดชั้นออกไซด์ตรงบริเวณที่จะทำการโคป
- การแพร่อะตอมสารเจือ เพื่อสร้างชั้น เอ็นหรือพีตามต้องการ
- การสร้างชั้นโลหะ เพื่อต่อกับวงจรภายนอก

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายคำว่า segregation และวิธีการของไซรอลสกี
2. วิธีอิมแพก เซ็ลล์ ไม่จำเป็นต้องใช้การโคปซดเซย จงอธิบาย
3. จงวาดภาพและอธิบายขั้นตอนของการสร้างทรานซิสเตอร์เดี่ยว (ไม่ใช่แบบที่อยู่ในวงจรไอซี) โดย เทคโนโลยีพลาสมา
4. น้ำยาไวแสง 2 ชนิด มีวิธีการใช้ต่างกันอย่างไร ในเทคโนโลยีพลาสมา