บทที่ 2

ไดโอด ทรานซิสเตอร์และวงจรอินติเกรต

วงจรเกทส่วนมากประกอบด้วยวงจรของจังชั่นทรานซิสเตอร์ และไดโอด (Junction transistor and diodes) เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงการทำงานของวงจร เราจึงควรจะทำความเข้าใจถึงส่วนประกอบของพวกไดโอดและทรานซิสเตอร์ รวมทั้งคุณสมบัติของไดโอดและทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรเกทเสียก่อน บทนี้จึงกล่าวถึงสารกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) ที่ใช้ทำไดโอดและทรานซิสเตอร์ คุณสมบัติของไดโอดและทรานซิสเตอร์เมื่อใช้ในวงจรเกท ตลอดจนถึงวงจรอินติเกรตซึ่งเป็นวงจรเกทที่ทันสมัยที่สุด

สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติทางเป็นตัวนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างสารตัวนำ (conductor) ได้แก่ เงิน, ทองแดง และสารฉนวน (insulator) เช่นแก้วหรือยาง สารพวกนี้ได้แก่สารเยอรมันเนี่ยม (Germanium) , ซิลิกอน (Silicon) เป็นต้น

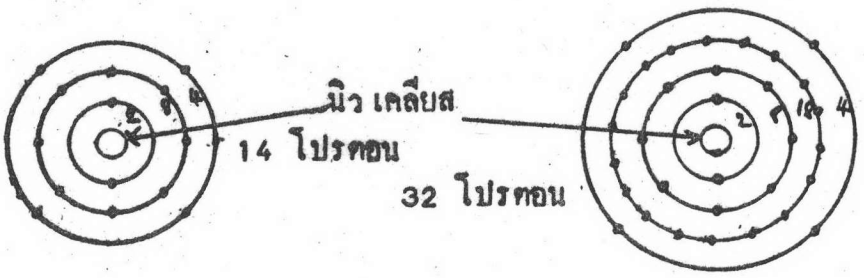
ตามทฤษฎีของอะตอม สารทุกชนิดจะประกอบด้วยอะตอม ในแต่ละอะตอมจะมีนิวเคลียส (nucleus) ซึ่งอยู่กลางอะตอม ภายในนิวเคลียสมีโปรตอนซึ่งเป็นประจุบวก และนิวตรอนซึ่งเป็นกลาง รอบ ๆ นิวเคลียสมีอีเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบวิ่งวนอยู่เหมือนกับดาวเคราะห์โคจรรอบดวงอาทิตย์

อะตอมของสารต่างชนิดจะมีจำนวนอีเล็กตรอน โปรตอนและนิวตรอนต่างกันไป ปกติอะตอมจะมีจำนวนโปรตอนเท่ากับจำนวนอีเล็กตรอน จึงทำให้ประจุรวมของอะตอมมีค่าเท่ากับศูนย์ การวิ่งของอีเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจะเป็นวง แต่ละ

วง เรียกว่าวงแหวน (ring) หรือ เชลล์ (shell) จำนวนอีเล็กตรอนในแต่ละเชลล์หาได้จาก

จำนวนอีเล็กตรอนใน เชลล์ N = $2N^2$

N เป็นลำดับของ เชลล์ นับจากนิว เคลียสออกมา

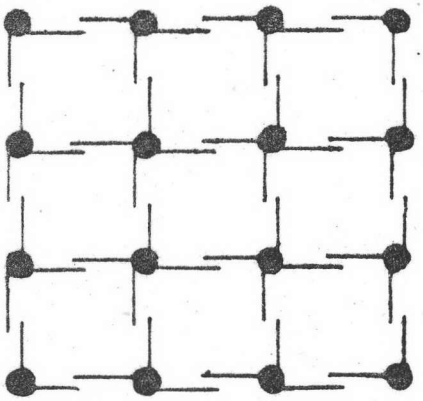


<u>วา เลนซ์</u> (Valence)

วา เลนซ์ (valence) หมายถึงคุณสมบัติทาง เคมีของสารในการรวมตัวกับสารอื่น วา เลนซ์ของสารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนอี เล็กตรอนวงนอกสุดของสาร ซึ่ง เรียกว่าวงแหวนวา เลนซ์ (valence ring) ถ้าวงแหวนวา เลนซ์มีจำนวนอี เล็กตรอนครบ ซึ่งปกติจะมี 8 ตัว เราถือว่าอะตอมนั้นอยู่ในภาวะคงตัว (stable) ถ้าวงแหวนของอะตอมมีจำนวนอี เล็กตรอนไม่ครบ มันก็จะรวมกับอะตอมอื่น ๆ เป็น โม เลกุล (molecule) อะตอมของซีลีกอนและ เยอรมัน เนี่ยมมีอี เล็กตรอนในวงแหวนวา เลนซ์อยู่ 4 ตัว ดังนั้นอะตอมในผลึกของ เยอรมัน เนี่ยมหรือซีลีกอนบริสุทธิ์จะจัดตัวมันห่างจากอะตอมอื่น ๆ สี่อะตอม เป็นระยะ เท่า ๆ กัน และวา เลนซ์อี เล็กตรอนแต่ละตัว

● = นิวเคลียสและอีเล็กตรอนใน
วงแหวนภายใน

—— = วาเลนซ์อีเล็กตรอนที่อะตอม
รวมกัน



รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของซิลิกอนหรือ เยอรมัน เนื่ยมบริสุทธิ์

จะอยู่รวม (share) กับวาเลนซ์อีเล็กตรอนอีกตัวของอะตอมที่อยู่ใกล้ ทำให้วงแหวนวาเลนซ์ของแต่ละอะตอมมีอีเล็กตรอนครบ 8 ตัว และแต่ละอะตอมก็จะอยู่ในภาวะคงตัว (stable) การจัดตัวของอะตอมในลักษณะนี้ เรียกว่า "crystal lattice structure"

ผลึกบริสุทธิ์ของสาร เยอรมัน เนื่ยมและซีลีกอนจะไม่มีคุณสมบัติ เป็นตัวนำไฟฟ้า เพราะวาเลนซ์อีเล็กตรอนของอะตอมมีครบ 8 ตัว เพื่อที่จะให้สารพวกนี้มีคุณสมบัติทางตัวนำไฟฟ้า จึงมีการเติมสารอีกชนิดเรียกว่า impurities ลงในผลึก สารที่เติมนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. <u>Donor Impurities</u> อะตอมของสารพวกนี้จะมีวาเลนซ์อีเล็กตรอน 5 ตัว วาเลนซ์อีเล็กตรอน 4 ตัวจะจับรวมกับอะตอมของผลึกอีก 4 อะตอม ส่วนอีเล็กตรอนที่เหลืออีกตัวจะเป็นอิสระ และทำให้ผลึกมีคุณสมบัติทาง เป็นตัวนำดียิ่งขึ้น

โดยอีเล็กตรอนที่อิสระ (free electron) จะเป็นตัวนำ ผลึกแบบนี้เราเรียกว่าผลึกแบบ N (N type crystal) Impurities พวกนี้ได้แก่แอนทีโมนี (Antimony), อาเซนิค (Arsenic), บิสมัท (Bismuth) และฟอสฟอรัส (Phosphorous)

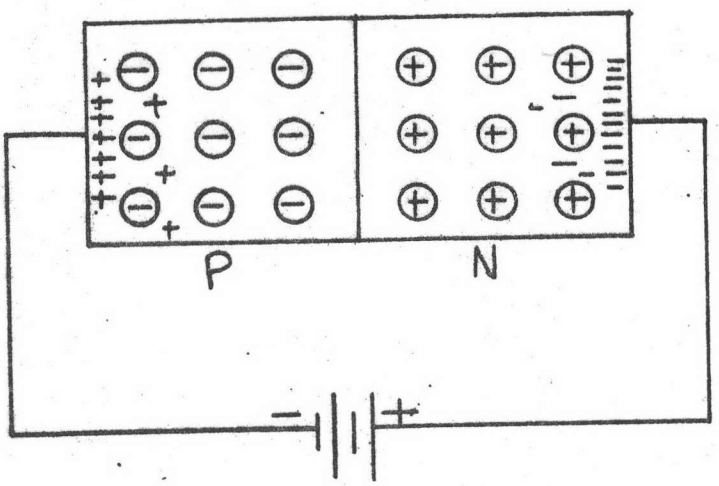
2. Acceptor Impurities ว่าเลนซ์อีเล็กตรอนของอะตอมของสารชนิดนี้มี 3 อีเล็กตรอน เมื่อรวมตัวกับสารกึ่งตัวนำจะทำให้อะตอมขาดอีเล็กตรอนไป เราเรียกว่าเกิด hole ขึ้น อะตอมที่เกิด hole จะยืมอีเล็กตรอนจากอะตอมใกล้เคียง และอะตอมที่ใกล้เคียงก็จะขาดอีเล็กตรอนซึ่งก็จะเอาอีเล็กตรอนของอะตอมถัดไปอีก จึงดูคล้ายกับว่า hole นี้เคลื่อนที่ไปได้เหมือนกับอีเล็กตรอนในผลึกแบบ N แต่ทิศทางการเคลื่อนที่จะตรงกันข้าม ผลึกแบบนี้เราเรียกว่าผลึกแบบ P (P type crystal) Impurity พวกนี้ได้แก่ อลูมิเนี่ยม (Aluminium), โบรอน (Boron), กาลเลี่ยม (Gallium), และอินเดี่ยม (Indium)

จังชั่นไดโอด (Junction Diode)

จังชั่นไดโอดเกิดจากการนำเอาผลึกแบบ N และผลึกแบบ P มาต่อกัน เมื่อผลึกทั้งสองต่อกัน อีเล็กตรอนอิสระในผลึกแบบ N กับ hole ในผลึกแบบ P จะวิ่งมารวมกันที่รอยต่อ (junction) ระหว่างที่รวมกันจะเกิดแรงอันหนึ่งเรียกว่าจังชั่นแบริเออร์ (junction barrier) ทำให้การรวมกันต้องหยุด แรงนี้เกิดจากการที่ผลึกแบบ P สูญเสีย hole ทำให้อะตอมมีประจุเป็นลบ และผลึกแบบ P สูญเสียอีเล็กตรอนอิสระ ทำให้อะตอมของผลึกมีประจุบวก ประจุเหล่านี้จะผลัก hole กับอีเล็กตรอนอิสระออกจากกัน จังชั่นแบริเออร์นี้เปรียบเหมือนแบตเตอรี่ที่มีขั้วลบที่ผลึกแบบ P และขั้วบวกที่ผลึกแบบ N เพื่อที่จะให้ไดโอดเป็นตัวนำ เราต้องต่อสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ตรงข้ามกับแบตเตอรี่ที่สมมติขึ้น การต่อสนามไฟฟ้าภายนอกแก่ไดโอดเราเรียกว่าการไบแอส (bias)

<u>การไบแอสตามและไบแอสกลับ</u> (Forward and Reverse Bias)

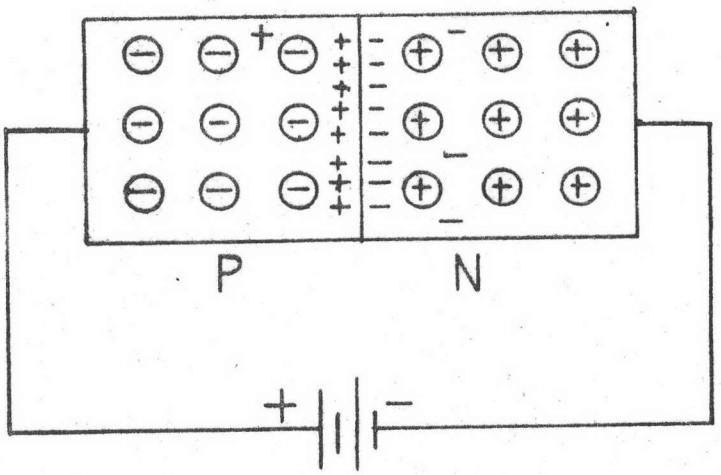
ถ้าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการต่อแบตเตอรี่กับผลึกไปเสริมกับจังชั่นแบริเออร์ ไดโอดนั้นก็จะถูกไบแอสกลับ (reverse biased) โดยข้วบวกของแบตเตอรี่จะต่อกับผลึกแบบ N และข้วลบต่อกับผลึกแบบ P สนามไฟฟ้าที่ให้จะช่วยดึงอีเล็กตรอน



จังชั่นไดโอดเมื่อถูกไบแอสกลับ

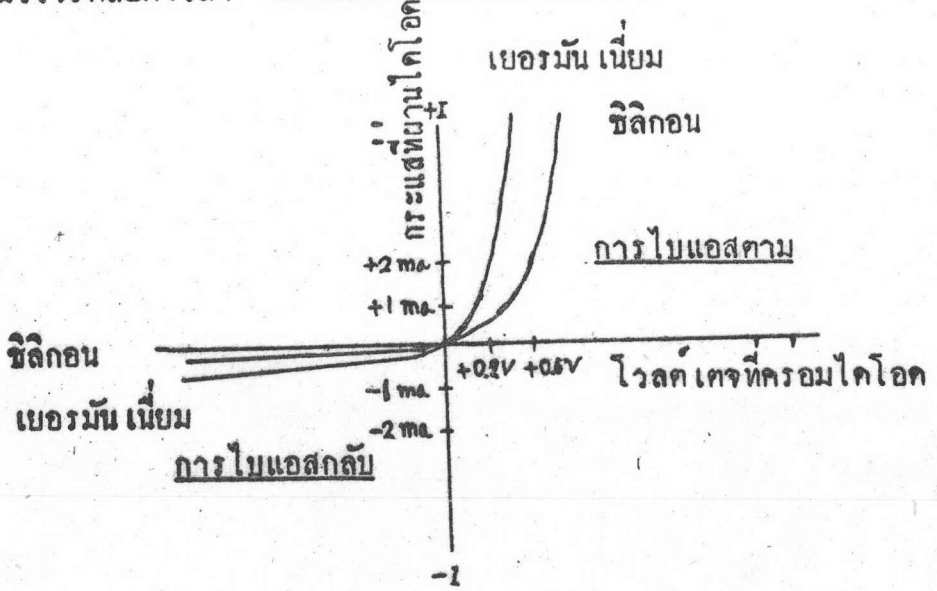
อิสระและ hole ให้ยิ่งห่างจากกัน ผลที่ได้จากการไบแอสกลับนี้จะทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอด (ในทางปฏิบัติจะมีกระแสไหลผ่านบ้างแต่น้อย)

ถ้าข้วบวกของแบตเตอรี่ต่อที่ผลึกแบบ P และข้วลบต่อที่ผลึกแบบ N สนามไฟฟ้าที่เกิดจะต้านกับจังชั่นแบริเออร์ ไดโอดนั้นก็จะถูกไบแอสตาม (forward biased) holeในแบบ P และอีเล็กตรอนอิสระในแบบ N จะเคลื่อนที่เข้าหาและรวมกัน ในการรวมแต่ละครั้งอีเล็กตรอนหนึ่งตัวในผลึกแบบ P จะแตกตัวจากอะตอมและเคลื่อนไปที่ข้วบวกของแบตเตอรี่ทำให้เกิด hole ใหม่ในผลึก



จังชั่นไดโอด เมื่อถูกไบแอสตาม

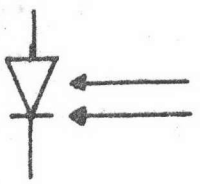
แบบ P ในผลึกแบบ N ก็จะมีอี เล็กตรอนจากข้วลบของแบต เตอรี่ เคลื่อนที่เข้าไปแล้ว เคลื่อนไปรวมกับ hole ใหม่ ดังนั้น เมื่อมีการไบแอสตาม ก็จะมีอี เล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรตลอดเวลา นั่นคือมีกระแสไหลตลอดเวลา



รูปที่ 2 กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอด

จากรูปที่ 2 เป็นกราฟที่จุดระหว่างค่าโวลต์เตจ (voltage) กับกระแส เมื่อให้โวลต์เตจที่ไดโอด กระแสไฟฟ้าจะ เริ่มไหล เมื่อโวลต์เตจมีค่า เป็นบวกเล็กน้อย ค่าโวลต์เตจที่จุดนี้ เรียกว่า "cut-in voltage" มีค่าประมาณ 0.2 โวลต์ สำหรับ เยอรมันเนี่ยม สำหรับซิลิกอนมีประมาณ 0.6 โวลต์ เมื่อค่าโวลต์เตจ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระแสไฟฟ้าก็มีค่า เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะแบบนี้ เรียกว่าไดโอดถูกไบแอสตาม เมื่อไดโอดถูกไบแอสกลับจะมีกระแสไฟฟ้าไหลไปในทางกลับกัน แต่ค่ากระแสที่ไหลมีค่าต่ำมาก เทียบกับ เมื่อไดโอดถูกไบแอสตาม

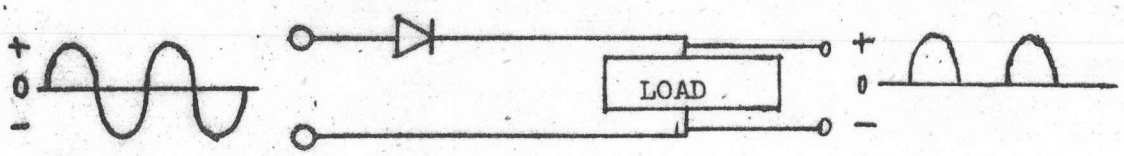
จังชั่นไดโอด PN นี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรอีเล็กโทรนิค สัญญลักษณ์ที่ใช้ เป็นดังนี้



ข้วบวก เป็นผลึกแบบ P
ข้วลบ เป็นผลึกแบบ N

ด้านที่เป็นผลึกแบบ P เรียกข้วบวก (plate หรือ anode) ด้านที่เป็นแบบ N เรียกข้วลบ (cathode)

ตัวอย่างการใช้ไดโอดในวงจรอีเล็กโทรนิค คือการแปลงไฟกระแสสลับ เป็นกระแสตรง (Rectifier)



Input Half-wave rectifier Output

ไดโอดจะยอมให้กระแสไฟผ่านก็ต่อ เมื่อข้ัวบวกมีโวลต์เตจ เป็นบวก เมื่อเทียบกับข้ัวลบ ผลลัพธ์ที่ได้จึงได้แต่ pulse ที่มีค่าบวก

สำหรับการใช้ไดโอดในวงจรเกทนั้น ตัวไดโอดจะทำหน้าที่เหมือนสวิทช์ ซึ่งเปิดปิดตามค่าโวลต์เตจที่ปรากฏที่ปลายทั้งสองของผลึก

<u>จังชั่นทรานซิสเตอร์</u> (The Junction Transistor)

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้กันตั้งแต่ในเครื่องเสียงจนกระทั่งถึงวงจรภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

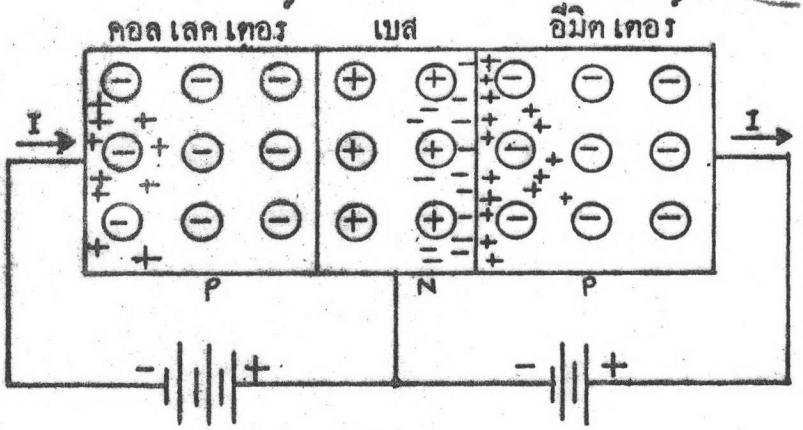
1. <u>ทรานซิสเตอร์แบบ PNP</u> ทรานซิสเตอร์แบบนี้ประกอบด้วยผลึกแบบ N หนึ่งชิ้นอยู่ระหว่างผลึกแบบ P สองชิ้น

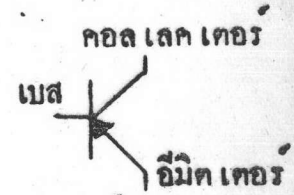
2. <u>ทรานซิสเตอร์แบบ NPN</u> แบบนี้ผลึกแบบ P จะอยู่ระหว่างผลึกแบบ N

ความแตกต่างของทรานซิสเตอร์สองกลุ่มนี้อยู่ที่ว่าตัวนำกระแส (current carrier) ใน PNP ทรานซิสเตอร์เป็น hole (ประจุบวก) ส่วนตัวนำกระแสใน NPN เป็นอีเล็กตรอน (ประจุลบ) สัญญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 แบบนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 3

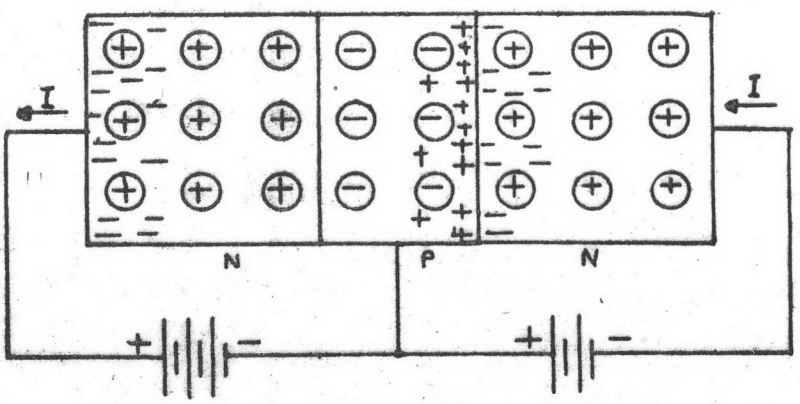
ในการใช้งานตามปกติจังชั่นทั้งสองของทรานซิสเตอร์จะต้องถูกไบแอสโดยจังชั่นหนึ่งไบแอสตาม อีกจังชั่นไบแอสกลับ ผลึกที่อยู่ตรงกลาง (คือส่วน P ใน NPN และส่วน N ใน PNP) เรียกว่า เบส (base) จังชั่นที่ไบแอสตามเรียกจังชั่นอีมิตเตอร์-เบส (emitter-base junction) จังชั่นที่ไบแอสกลับเรียกจังชั่นคอลเลคเตอร์-เบส (collector-base junction) หน้าที่ของส่วนอีมิตเตอร์คือการให้ (supply) ตัวนำกระแส หน้าที่ของส่วนคอลเลคเตอร์คือการดึง (attract) ตัวนำกระแสพวกนี้ ส่วนหน้าที่ของเบส คือคอยควบคุม

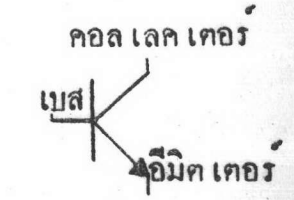
จำนวนตัวนำกระแสที่ไหลจากอีมิต เตอร์ไปที่คอล เลค เตอร์





สัญญลักษณ์ของ
ทรานซิส เตอร์แบบ PNP





สัญญลักษณ์ของ
ทรานซิส เตอร์แบบNPN

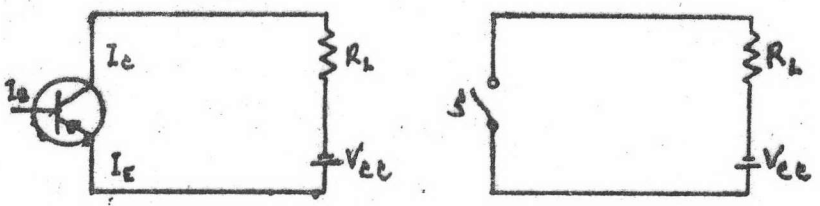
I = ทิศทางการไหลของอี เล็คตรอน

รูปที่ 3 สัญญลักษณ์และการไบแอสทรานซิส เตอร์

คำว่าทรานซิส เตอร์นี้มาจากคำว่า "transfer" (การย้าย) และ
คำว่า "resistor" (ความต้านทาน) การป้อนข้อมูลก็คือการย้ายจาก input
ที่มีความต้านทานต่ำ (ไบแอสตาม) ไปยัง output ที่มีความต้านทานสูง (ไบแอสกลับ)

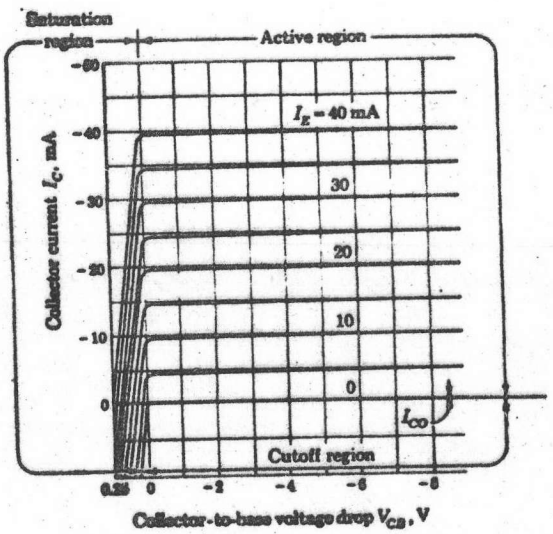
การใช้ทรานซิสเตอร์ในวงจรเกท

ในวงจรเกท ทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่เหมือนสวิทช์ มีลักษณะเหมือนกับ



สวิทช์ทางกลศาสตร์ เว้นแต่ต้องอาศัยไฟฟ้าและมีความรวดเร็วกว่ามาก

เราสามารถแบ่งการใช้งานของทรานซิสเตอร์ออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง cutoff ช่วง active และช่วง saturation ซึ่งแสดงอยู่บน common-base characteristics ของทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟแสดง common-base characteristics ของทรานซิสเตอร์

ในช่วง cutoff ทั้งจังชั่นอีมิตเตอร์ และจังชั่นคอลเลคเตอร์จะถูกไบแอสกลับ และมีกระแสไหลเพียงผ่านจังชั่นเพียงเล็กน้อย คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้เหมือนกับสวิทช์เปิด (ไม่มีการไหลของกระแส)

ถ้าจังชั่นอีมิตเตอร์ถูกไบแอสตามและจังชั่นคอลเลคเตอร์ถูกไบแอสกลับ รูปลักษณะของกระแสทาง output ของทรานซิสเตอร์จะ เหมือนกับกระแสทาง input (รูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง) การทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้ เรียกว่าช่วง active และใช้กันมากใน เครื่องขยาย เสียง แต่เมื่อใช้ในทางสวิทช์ช่วงนี้กลับ เป็นช่วงที่ไม่สำคัญ เพราะว่า เราต้องการให้ทรานซิสเตอร์ เปลี่ยนจากช่วง cutoff ไปยังช่วง saturate โดยให้เสียเวลาในช่วงนี้น้อยที่สุด (เปลี่ยนจากสวิทช์ เปิด เป็นสวิทช์ปิดให้ เร็วที่สุด)

ในช่วง saturate จังชั่นอีมิตเตอร์และจังชั่นคอลเลคเตอร์จะถูกไบแอสตามทั้งหมด ทำให้โวลต์เตจระหว่างจังชั่นแต่ละอัน หรือจังชั่นรวมมีค่าน้อย (ในช่วง-มิลลิโวลต์) คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้ เหมือนกับว่าทรานซิสเตอร์ เป็นสวิทช์ปิด (กระแสไหลผ่านได้)

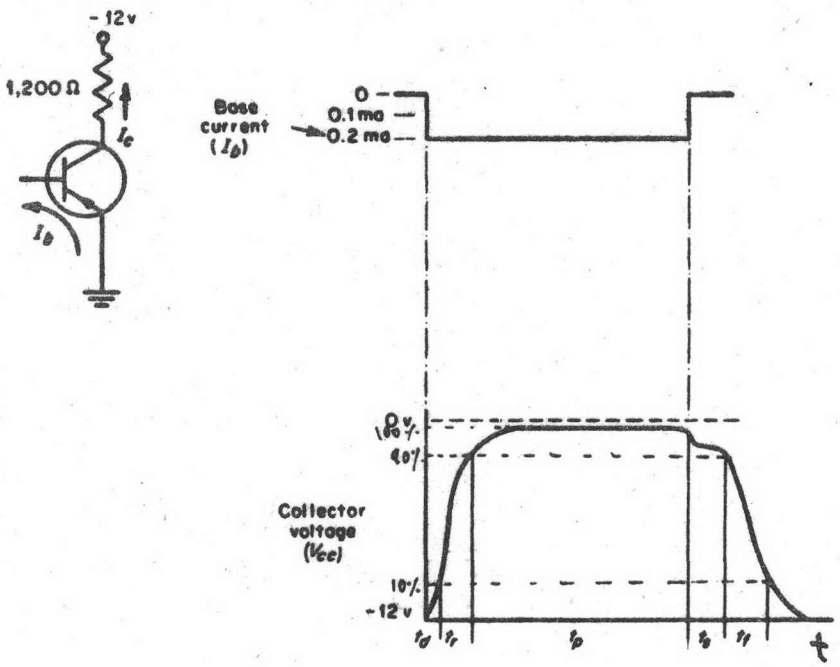
004684

Transient Response

เพื่อดูการทำงานของทรานซิสเตอร์ จากรูปที่ 5 เมื่อมี pulse ป้อนเข้าทาง เบสและอีมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ การ เปลี่ยนแปลงโวลต์เตจของ output ที่คอลเลคเตอร์กับอีมิตเตอร์ไม่ได้ เกิดขึ้นทันทีทันใด และ เมื่อ pulse หยุด สัญญาณทาง output ก็ไม่ได้ลดลงทันทีทันใด เราจึงแบ่งช่วง เวลาในการ เปลี่ยนแปลงของ output ได้ดังนี้

1. Delay Time (t_d) เป็นช่วง เวลาจากจุดเริ่มต้นที่ pulse เข้าทาง input ถึงช่วงที่ output มีระดับโวลต์เตจ 10 % ของค่าโวลต์เตจสูงสุดของ output Delay Time อาจ เกิดได้หลายกรณี แต่ที่สำคัญก็คือ

i 1754824X



รูปที่ 5 Transient response ของทรานซิสเตอร์

เกิดจากระยะทางที่กระแสต้องเดินทางจากขาอีมิตเตอร์ผ่านอีมิตเตอร์, เบส และคอลเลคเตอร์ไปที่ขาคอลเลคเตอร์ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดหนาก็ยิ่งมีค่า t_d มาก อีกกรณีเกิดจากการเกิดค่า capacitance ของอีมิตเตอร์กับเบส ค่า capacitance จะทำหน้าที่เหมือนเป็น filter capacitor ซึ่งต้องถูก discharge ก่อนที่กระแสที่ป้อนจะเริ่มไหล

2. <u>Rise Time</u> (t_r) เป็นเวลาที่โวลต์เตจทาง output เพิ่มจาก 10 % ถึง 90 % ของค่าโวลต์เตจสูงสุดของ output ค่า t_r ขึ้นอยู่กับการตอบสนองต่อความถี่ (frequency response) ของทรานซิสเตอร์และขนาดของกระแสที่ป้อนเข้าไป

3. <u>Pulse Time</u> (t_p) เป็นเวลาระหว่างค่า 90 % ที่ทางขึ้นและ

ทางลง (leading and trailing edges) ของ pulse

4. Storage Time (t_s) เป็นเวลาที่ pulse ยังมีขนาดใกล้ค่า t_p ในขณะที่ไม่มีกระแสทาง input แล้ว

5. Fall Time (t_f) เป็นเวลาที่ output ตกจาก 90 % ถึง 10 % ของค่าโวลต์เตจสูงสุด

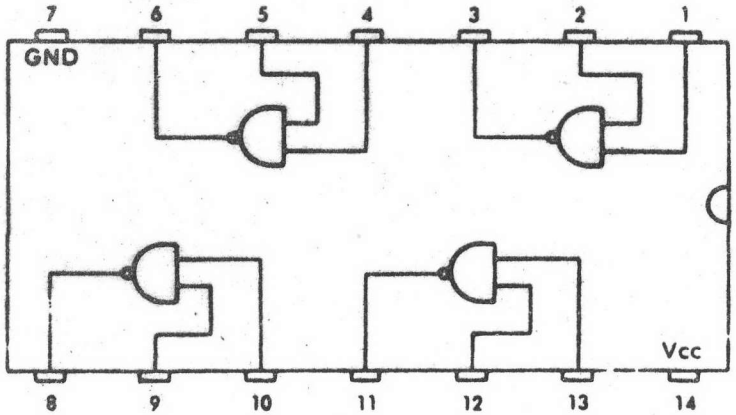
เมื่อใช้ทรานซิส เตอร์เป็นสวิทช์ ทรานซิส เตอร์จะต้อง เปิดปิดด้วยความเร็วสูง เวลาที่สวิทช์ปิด (turn-on) ก็คือผลบวกของ t_d กับ t_r และเวลาที่เปิด (turn-off) คือผลบวกของ t_s กับ t_f ดังนั้น t_d , t_r, t_s และ t_f จะต้องมีค่าต่ำด้วย

วงจรอินติเกรต (Integrated Circuit)

เราได้พูดถึงคุณสมบัติของไดโอดและทรานซิส เตอร์มาแล้ว เวลาใช้งาน เราต้อง เอาพวกไดโอดและทรานซิส เตอร์ เหล่านี้มาต่อกับพวกตัวต้านทานต่าง ๆ เป็นวงจรตามที่เราต้องการ วงจรหนึ่ง ๆ ที่ต่อขึ้นมาจะต้องใช้ เนื้อที่ เป็นอันมากทำให้ไม่สะดวก จึงมีผู้พยายามพัฒนาวงจรให้มีขนาดเล็กลง ปัจจุบันจึงมีการสร้างวงจร เป็นรูปวงจรอินติเกรต (integrated circuit) เรียกย่อ ๆ ว่า IC IC นี้จะต่อเป็นวงจรที่สมบูรณ์แบบและมีขนาดเล็ก ชิ้นส่วนต่าง ๆ ก็ได้ผ่านการทดสอบจนนำไปใช้งานได้เลย

เมื่อนำวงจรอินติเกรตไปใช้งาน เราไม่ต้องมาวิเคราะห์วงจร เพื่อหาค่ากระแสและโวลต์เตจในวงจร ซึ่งต่างจากการใช้วงจรทั่ว ๆ ไป เพราะว่าวงจรอินติเกรตถูกสร้างอย่าง เรียบร้อย และถูกหุ้มจนมิดชิด นอกจากนั้นวงจรอินติเกรตยังมีขนาดเล็กมาก จน เราไม่สามารถมอง เห็นส่วนประกอบของวงจรด้วยตา เปล่าได้

ปกติวงจรอินติเกรตที่ผลิตขายมีวงจรหลายวงจรบรรจุอยู่ร่วมกัน ผู้ผลิตจะบอกรายละเอียดของแบบและขาต่อต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งอยู่ในรูปของไดอะแกรม

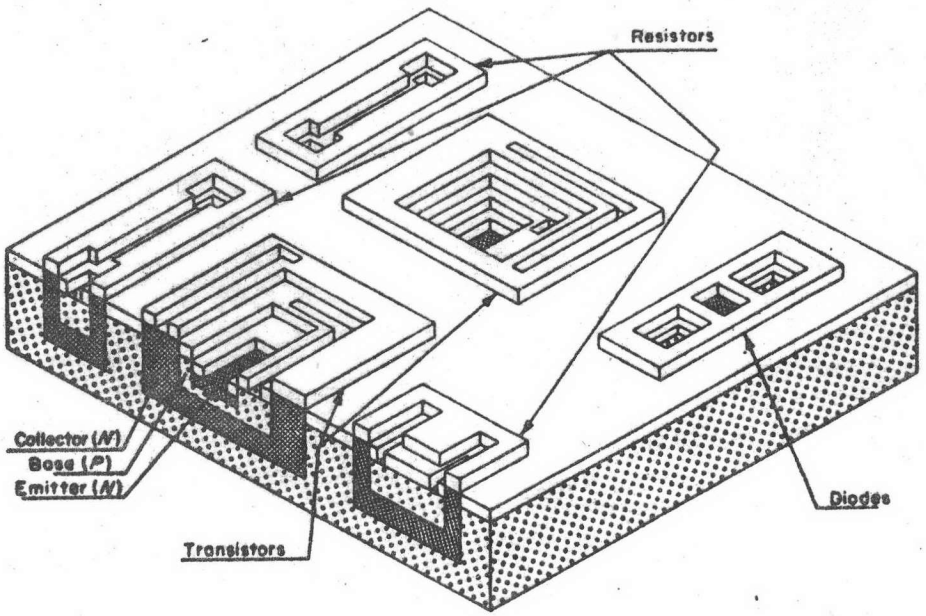


รูปที่ 6 ไดอะแกรมของลอจิกเกทในวงจรอินติเกรต

ดังรูปที่ 6 การต่อวงจรอินติเกรตไปใช้งาน เราอาจใช้ socket สำหรับให้วงจรอินติเกรตแต่ละตัวเสียบและต่อ socket กับแผ่นบอร์ดแล้วต่อขา socket ไปใช้งาน หรืออาจต่อลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit card) ที่มีการต่อวงจรไว้เรียบร้อยแล้ว

วงจรทั้งหมดของวงจรอินติเกรตจะทำบนชิ้นส่วนเล็ก ๆ ชิ้นหนึ่ง วิธีการพื้นฐานที่ทำวงจร monolithic silicon IC ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันก็เหมือนกับการทำทรานซิสเตอร์ แต่มีขั้นตอนในการทำมากกว่า และผลที่ได้จะเป็นวงจรทั้งอันที่ประกอบด้วยพวกจังชั่นไดโอดและทรานซิสเตอร์ กับตัวความต้านทานที่มีค่าต่ำ เหตุที่ต้องใช้ค่าความต้านทานต่ำก็เพราะว่า การทำตัวความต้านทานที่มีค่าสูงต้องใช้เนื้อที่มากกว่าการทำทรานซิสเตอร์หลายเท่า ดังนั้นวงจรอินติเกรตจึงต้องถูกออกแบบให้ใช้แต่พวกไดโอด ทรานซิสเตอร์และตัวความต้านทานที่มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

รูปที่ 7 เป็นวงจรอินติเกรตที่ขยายใหญ่ แสดงส่วนของทรานซิสเตอร์ และความต้านทานต่าง ๆ

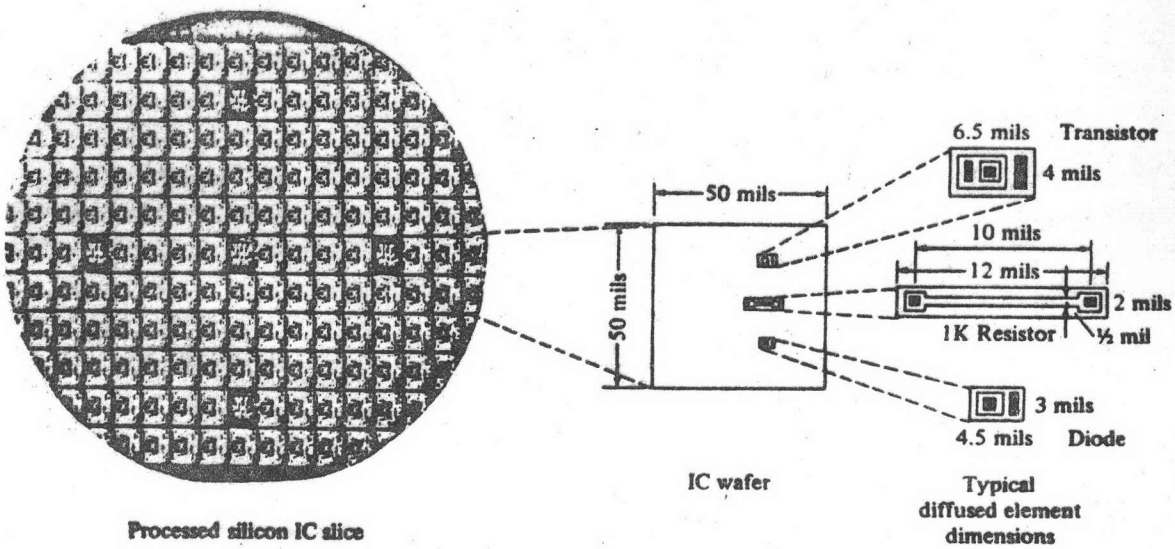


รูปที่ 7 วงจรอินติเกรตที่ขยายใหญ่

กรรมวิธีในการผลิต Monolithic IC

คำว่า monolithic ได้มาจากภาษากรีกว่า monos ซึ่งแปลว่าชิ้นเดียว กับ lithos ซึ่งแปลว่าหิน เมื่อรวมกันหมายถึงชิ้นส่วนเล็ก ๆ ชิ้นหนึ่ง ซึ่งวิธีการนั้นก่อนอื่นต้องเตรียมสารกึ่งตัวนำ ขนาดยาว 6 ถึง 8 นิ้ว และเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1/2 ถึง 1 นิ้ว จากนั้นก็ตัดเป็นชิ้นบาง ๆ แต่ละชิ้นมีความหนาประมาณ 6 มิลส์ (mils) (6/1,000 นิ้ว) แต่ละชิ้นจะผ่านวิธีการอีกหลายขั้นตอน เพื่อทำวงจรนับร้อยวงจรลงบนชิ้นส่วนบาง ๆ เพียงชิ้นเดียว ชิ้นส่วนบาง ๆ นั้นก็จะประกอบด้วยวงจรลอกจิกที่เหมือนกันนับร้อยวงจร ดังรูปที่ 8 วงจรพวกนี้จะถูกตัดแยกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการทำวงจรพวกนี้ไม่แพง แต่ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ใช้ไปในการตรวจสอบและบรรจุวงจรลงใน

รูปที่เราเอาไปใช้งาน



รูปที่ 8 ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วย IC หลายร้อยวงจร[1]

ขั้นตอนในการผลิต อาจแบ่งได้ตามลำดับดังนี้

1. Surface Preparation เนื่องจากเราจำเป็นต้องแยกวงจรแต่ละวงจรบนแผ่นวัตถุบาง ๆ วิธีการขั้นนี้เป็นการทำเตรียมใส่เลเยอร์ (layer) ซึ่งใช้ถ่ายวงจรลงไป ชิ้นส่วนที่ต้องการเป็นชิ้นซิลิกอนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหนึ่งนิ้ว หนา

---

1 Nashelsky, Louis, Introduction to Digital Computer Technology. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1972), p.238.

6 มิลล์ ซึ่งเป็นผลึกแบบ P ที่มีความต้านทานค่อนข้างสูง (5 ถึง 10 โอห์มต่อเซนติเมตร) แต่ละชิ้นจะถูกขัดจนลื่นทั้งสองด้าน และมีด้านหนึ่งจะถูกขัดจนเป็นเงา (polished mirror smooth

2. Epitoxial Growth เป็นการใส่เลเยอร์ของวัตถุที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้าลงไป บนผิวของชิ้นซิลิกอนด้านขัดเงาจะถูกเติมเลเยอร์บาง ๆ ของสารแบบ N เลเยอร์นี้เรียก Epitoxial layer แล้วผิวด้าน N จะถูกฉาบด้วยสารที่เป็นฉนวน (ออกไซด์ของซิลิกอน) อีกที

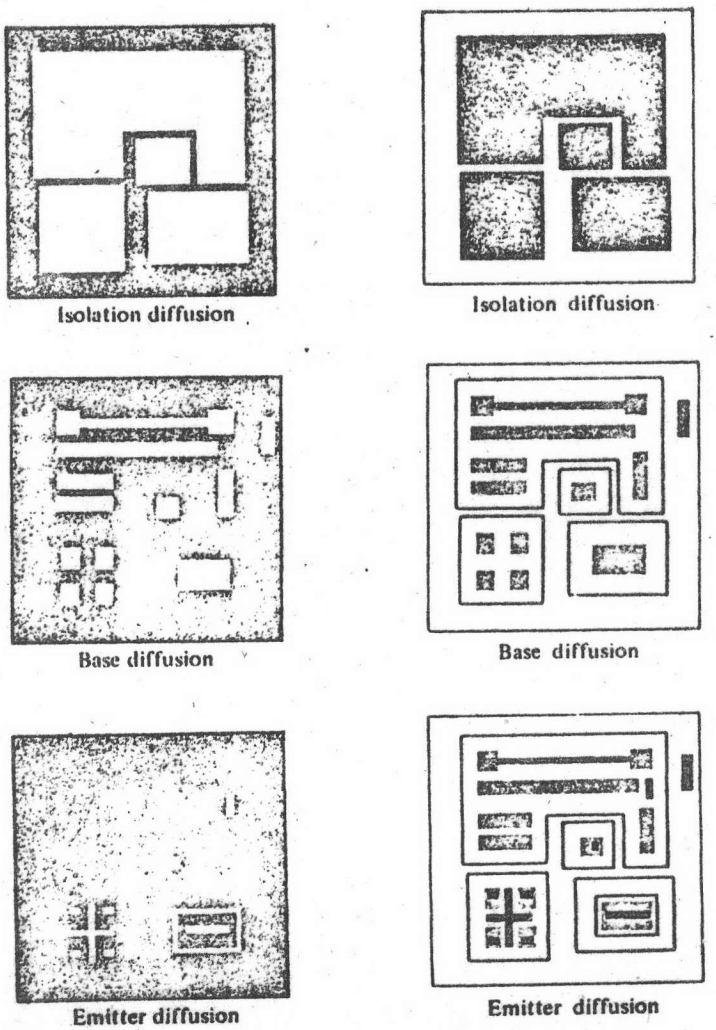
3. Diffusion วิธีการนี้มีหลายขั้นตอน เพื่อที่จะสร้างชิ้นส่วนของตัวความต้านทาน, ไดโอด และทรานซิสเตอร์ขึ้น ในขั้นนี้จะทำส่วนของวงจรที่ต้องการลงบนฟิล์ม เรียกว่าทำ photographic แล้วนำไปฉายแสงลงบนผิวที่ฉาบออกไซด์ไว้ ออกไซด์ของซิลิกอนด้านที่ไม่ถูกแสงฉายจะถูกลบออกไปโดยวิธีทางเคมี เหลือแต่รูปแบบของส่วนของวงจรที่ต้องการ รูปที่ 9 แสดงการเตรียม photographic mask สำหรับการทำ diffusion แบบต่าง ๆ ต่อไป Diffusion ก็คือการเติมโครงสร้างบางส่วนของชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วย impurity แบบ P หรือแบบ N วิธีการก็คือ ปล่อยก๊าซของ impurity บนชิ้นส่วนภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดัน impurity ก็จะกระจายเข้าไปในโครงสร้างตามความต้องการ โดยส่วนที่ยังมีออกไซด์ของซิลิกอนจะไม่มีการกระจายเข้า

เมื่อเสร็จขั้น diffusion ครั้งหนึ่งก็จะมีการอาบเลเยอร์ของออกไซด์ใหม่ แล้วทำวิธีการขั้นนี้ใหม่โดยใช้ฟิล์มของวงจรส่วนใหม่ จนได้ชิ้นส่วนของวงจรครบตามต้องการ โดยทั่วไปแล้วขั้น diffusion นี้จะแบ่งได้ 3 ตอน คือ

ก. Isolation diffusion เป็นการแยกส่วนของวงจร

ข. Base diffusion จะได้ตัวความต้านทาน ขั้วบวกของไดโอด และเบสของทรานซิสเตอร์

ค. Emitter diffusion จะได้ขั้วลบของไดโอดและอีมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 9 Masking และ Diffusion ของชิ้น IC

4. Metallization จากชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ได้สร้างขึ้น วิธีการต่อไปก็คือทำการต่อชิ้นส่วนเป็นวงจรที่ต้องการ วิธีการคือทำ photographic mask แล้วฉายแสงไปบนชิ้นส่วน ส่วนที่ไม่ต้องการจะถูกลบออกโดยวิธีทางเคมี แล้วใช้ Thin Film ของอลูมิเนียมต่อวงจร

เมื่อจบขั้นตอนดังกล่าวแล้วแผ่นวัตถุบาง ๆ จะมีวงจรอยู่นับร้อยวงจร จากนั้นก็มีการตรวจสอบวงจรขั้นต้น วงจรที่ผ่านการทดสอบขั้นนี้จะถูกนำไปทดสอบและบรรจุ หลังจากได้ตัดออกเป็นวงจรชิ้น ๆ