

ข้าวไฟฟ้าชนิดฟิล์มเพชร

DIAMOND FILM ELECTRODE



นายชาญยุทธ เตียมสุข เลขประจำตัว 48010203
นายเทพรัตน์ ชินวัฒนา เลขประจำตัว 48010327
นายเทววัน ภักดิ์วงษ์ เลขประจำตัว 48010328

๒๗.
๕๒๙๔๖
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....103107
วัน,เดือน,ปี..... 28 ส.ค. 2552

๑ 1209932๖
i.....

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าชนิดฟิล์มเพชร

DIAMOND FILM ELECTRODE

นายชาญยุทธ เตียมสุข รหัส 48010203

นายเพชรภักย์ ชื่นวัฒนา รหัส 48010327

นายเทวิน ภัคตวิงษ์ รหัส 48010328

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปัจจุบันฟิล์มเพชร เป็นที่รู้จักแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากเพชรสารเคมีคอนดักเตอร์ ที่มีลักษณะเด่นหลายประการทั้งด้านกายภาพ ไฟฟ้าและแสง ดังนั้นจึงทำให้นักวิจัย ให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าและพัฒนา ทั้งในด้านวิธีการสังเคราะห์ฟิล์ม เพระะ ไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆต่อไป

รายงานฉบับนี้ได้อธิบายถึงการศึกษา และการพัฒนากระบวนการสร้างฟิล์มเพชร เพื่อประยุกต์ใช้งาน ทางไฟฟ้าเคมี ขั้วไฟฟ้าที่ดี จะต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมใช้ในการวิเคราะห์ หาปริมาณหรือความเปลี่ยนแปลงของสารเคมีที่ต้องการ ขั้วใช้เป็นขั้วไฟฟ้าวัดการตอบสนองทางไฟฟ้า จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารนั้น ฟิล์มเพชรซึ่งเป็นวัสดุที่มีความทนต่อกรดและด่างจึงมีความเหมาะสมเป็นขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อเรื่อง

ขั้วไฟฟ้าชนิดฟิล์มเพชร

DIAMOND FILM ELECTRODE

จัดทำโดย

นายชาญยุทธ เตียมสุข เลขประจำตัว 48010203

นายเทพรัตน์ ชื่นวัฒนา เลขประจำตัว 48010327

นายเทวิน ภักดีวงษ์ เลขประจำตัว 4010328

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ปีการศึกษา 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DIAMOND FILM ELECTRODE

Mr.Chanyuth Tiamsook ID.48010203

Mr.Tepparak Chuenwattana ID.48010327

Mr.Tewan Pukdeewong ID.48010328

Associate Prof.Somsak Cheersirikul

Year 2008

Abstract

Now diamond film is that know more and more extensively , because of be the Semiconductor that have many dominant points feature both of physical side ,electricity research and develop both of in the sense of synthetic film diamond way go to applied build to are electronic all equipment next.

This report has studied and developed diamond film electrode for fabrication chemical electrode. Which chemical electrode has should be the stable uses in the analysis the quantity or concentration of chemical solution .Electrode uses measurement electrical response from chemical resistance property. Then have suability is chemical electrode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

| | |
|--------------|--|
| ϵ | ค่าเพอริตติวิตี (permittivity) |
| ϵ_0 | ค่าเพอริตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum) |
| ϵ_s | ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสารกึ่งตัวนำ (dielectric constant of semiconductor) |
| θ | มุม(angle) |
| χ | อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) |
| λ | ความยาวคลื่นของแสง (wavelength of light) |
| μ | ความคล่องตัวของพาหะ (mobility) |
| μ_e | ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) |
| μ_h | ความคล่องตัวของโฮล (hole mobility) |
| ν | ความถี่ของแสง (frequency of light) |
| ρ | สภาพความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) |
| σ_0 | สภาพนำไฟฟ้า (conductivity) |
| σ_D | สภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity) |
| σ_p | สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductivity) |
| τ | เวลาอายุพาหะ (lifetime) |
| ϕ | ฟังก์ชันงาน (work function) |
| ω | ความถี่เชิงมุม (angular frequency) |
| B | แบนด์วิดท์ (band width) |
| C | ความจุไฟฟ้า (capacitance) |
| C_j | ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (junction capacitance) |
| E_A | ระดับพลังงานแอกเซปเตอร์ (acceptor level) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

| | |
|----------|--|
| E_C | ระดับคอนดักชัน (conduction level) |
| E_D | ระดับพลังงานโดเนอร์ (donor level) |
| E_f | ระดับพลังงานเฟอร์มิ (fermi level) |
| E_g | ช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) |
| E_V | ระดับเวเลนซ์ (valence level) |
| f | ความถี่ (frequency) |
| I | กระแสไฟฟ้า (current) |
| I_d | กระแสไฟฟ้ามืด (dark current) |
| I_p | กระแสไฟฟ้าโฟโต (photocurrent) |
| I_s | สัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) |
| I_{sc} | กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร (short circuit output current) |
| m^* | มวลประสิทธิผล (effective mass) |
| N_A | ความหนาแน่นของแอคเซ็ปเตอร์ (acceptor density) |
| N_V | ความหนาแน่นประสิทธิผลของสเตตของโฮล (effective density of holes) |
| q | ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electronic charge) |
| V_{bi} | ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) |
| V_{oc} | แรงดันเอาต์พุตวงจรมเปิด (open circuit voltage) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | 3 |
| 2.1 ฟิสิกส์เพอร์ | 3 |
| 2.2 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง | 9 |
| 2.3 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ | 14 |
| 2.4 ขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางเพอร์เจือโบรอน | 20 |
| 2.5 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ | 22 |
| 2.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process) | 23 |
| 2.7 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo Lithography) | 24 |
| บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง | 45 |
| 3.1 การออกแบบขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพอร์ | 45 |
| 3.2 การออกแบบไดอะแฟรม | 47 |
| 3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง | 48 |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง | 60 |
| 4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์ | 60 |
| 4.2 การลอกไนไตรด์เพื่อเป็นกาวเตรียมแผ่นผลึกในการสังเคราะห์ฟิล์มเพอร์ | 62 |
| 4.3 การทดลองการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพอร์ | 64 |
| 4.4 ผลการทดลองวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า | 65 |
| 4.5 ปัญหาของการสร้างฟิล์มเพอร์ | 67 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ ผลการทดลอง | 68 |
| ภาคผนวก ก | 70 |
| ภาคผนวก ข | 71 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---------------|------|
| ภาคผนวก ก | 72 |
| ภาคผนวก ง | 73 |
| ภาคผนวก จ | 74 |
| ภาคผนวก ฉ | 75 |
| ภาคผนวก ช | 76 |
| ภาคผนวก ซ | 78 |
| เอกสารอ้างอิง | 79 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 แบบจำลอง โครงสร้างผลึกเพชร | 3 |
| รูปที่ 2.2 ระนาบต่างๆ ของเพชร | 4 |
| รูปที่ 2.3 ภาพไออะแกรมระบบ CVD แบบลดความร้อน | 7 |
| รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบ โพลีคริสตัลไลน์ | 8 |
| รูปที่ 2.5 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง | 9 |
| รูปที่ 2.6 เครื่องสปัตเตอร์ริง | 13 |
| รูปที่ 2.6.1 เครื่อง Evaporation | 14 |
| รูปที่ 2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) | 15 |
| รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P) | 15 |
| รูปที่ 2.9 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับ ไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์บวกและ โลหะให้ศักย์ลบ) | 17 |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับ ไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์ลบและ โลหะให้ศักย์บวก) | 18 |
| รูปที่ 2.11 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและโลหะอะลูมิเนียมทั้ง ก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ก) ก่อนสัมผัส ข) หลังสัมผัส | 19 |
| รูปที่ 2.12 เมื่อขั้วไฟฟ้าเพชรวางอยู่ในสารละลาย H_2SO_4 | 21 |
| รูปที่ 2.13 แสดงลำดับขั้นตอน และภาพข้างของผลึกซิลิคอน ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี | 28 |
| รูปที่ 2.14 แสดงการทำงานและ โครงสร้างของอุปกรณ์สปินเนอร์ใช้เคลือบนำยาไวแสง | 34 |
| รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องเคลือบ นำยาไวแสงแบบอัตโนมัติ | 35 |
| รูปที่ 2.16 แสดงแผนผังของอุปกรณ์ “เครื่องปรับซ้อนมาสก์” | 39 |
| รูปที่ 2.17 ภาพลดขยายเครื่องหมายปรับซ้อน (Alignment mark) | 40 |
| รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของอุปกรณ์ Projection Printing ทั้งสองแบบ | 41 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการ Wet Etching และ Plasma Etching | 44 |
| รูปที่ 3.1 แสดงมาร์คกำหนดพื้นที่ฟิล์มเพชร | 46 |
| รูปที่ 3.2 แสดงมาร์คกำหนดพื้นที่การกัดชั้นซิลิกอน | 46 |
| รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก | 48 |
| รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร | 49 |
| รูปที่ 3.5 แผ่นซิลิกอนเริ่มต้น | 49 |
| รูปที่ 3.6 สร้างชั้นออกไซด์ | 50 |
| รูปที่ 3.7 ลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้า | 51 |
| รูปที่ 3.8 สร้างซิลิกอนไนไตรด์ด้านบน | 52 |
| รูปที่ 3.9 สร้างมาร์คด้านบน | 53 |
| รูปที่ 3.10 สร้างซิลิกอนไนไตรด์ด้านล่าง | 54 |
| รูปที่ 3.11 สร้างมาร์คด้านล่าง | 55 |
| รูปที่ 3.12 สร้างชั้นออกไซด์ | 56 |
| รูปที่ 3.13 กัดชั้นไนไตรด์ออก | 57 |
| รูปที่ 3.14 สังเคราะห์ฟิล์มเพชร | 58 |
| รูปที่ 3.15 กัดซิลิกอนออกไซด์แต่ไดอะแฟรมฟิล์มเพชร | 58 |
| รูปที่ 3.16 การเคลือบโลหะอลูมิเนียม | 59 |
| รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้า แผ่นซิลิกอนที่ขัดด้วยครีมเพชร 0.25 ไมครอน | 60 |
| รูปที่ 4.2 เครื่องสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร (ก) ภาพจากด้านบน (ข) ภาพตัดขวาง ด้านหน้า | 61 |
| รูปที่ 4.3 ลักษณะของแผ่นผลึกในระหว่างขั้นตอนการลอกไนไตรด์ออก | 62 |
| รูปที่ 4.4 แผ่นผลึกหลังจากขั้นตอนการลอกไนไตรด์ออกเรียบร้อยแล้ว | 62 |
| รูปที่ 4.5 แผ่นผลึกชิ้นงานหลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเสร็จเรียบร้อยแล้ว | 63 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.6 การทดลองการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพชร | 64 |
| รูปที่ 4.7 ปัญหาจากการสร้างฟิล์มเพชร | 67 |
| รูปที่ 6.1 เครื่อง spinner | 75 |
| รูปที่ 6.2 เครื่อง Alignment และฉายแสง | 75 |
| รูปที่ 6.3 เครื่องสร้างชั้นไนโตร | 76 |
| รูปที่ 6.4 เครื่อง Evaporation | 76 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรและสารกึ่งตัวนำอื่นๆ | 5 |
| ตารางที่ 2.2 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Clean Room) | 33 |
| ตารางที่ 2.3 แสดงขั้นตอนต่างๆของการเคลือบนำยาไวแสง | 37 |
| ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage (V) กับ Current density J (A/cm ²) | 65 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ฟิล์มเพชรเป็นรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำอยู่ในหมู่ 4 ของตารางธาตุเช่นเดียวกับซิลิคอน ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เช่นเดียวกับซิลิคอนเช่นกัน นอกจากนี้ฟิล์มเพชรยังมีคุณสมบัติบางด้านที่พิเศษกว่าซิลิคอน เช่นมีความแข็ง มีลักษณะโปร่งใสแสง ความต้านทานไฟฟ้าสูง(10^7 V/cm) ค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลสูง(2000 และ $1,800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) มีเสถียรภาพของอุณหภูมิพื้นผิวสูง (500-600 °C ในอากาศ และ 1,400-1,700 °C ในบรรยากาศของกาซเฉื่อย) มีค่าความนำความร้อนสูงมาก(20 W/cmK) โดยธรรมชาติแล้วเพชรเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีที่สุด แต่เมื่อทำการเจือโบรอนแล้วเพชรจะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และนำมาใช้งานในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าได้

วัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น carbon fiber glassy carbon และ graphite เป็นต้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับ 10^{-6} เมตร จะเห็นได้ว่าการรวมตัวกันเป็นลักษณะแบบ six-membered aromatic rings ซึ่งโครงสร้างคาร์บอนสร้างพันธะแบบ sp^3 ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุล หรือระหว่างโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาใช้ในทางเคมีไฟฟ้านั้น ได้มีการศึกษามานานกว่า 30 ปี โดยมีการศึกษาในโครงสร้างลักษณะต่างๆ โดยพิจารณาจากความสามารถการนำไฟฟ้า และในลักษณะของสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะฟิล์มบางเพชรเจือโบรอนมีผู้สนใจอย่างมากที่จะนำมาเป็นวัสดุทางเคมีไฟฟ้า โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีทางฟิสิกส์ และทางอิเล็กทรอนิกส์มีความเหมาะสมมาเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานจะต้องมีปริมาณของโบรอนที่เจืออยู่มากกว่าหรือเท่ากับ $10^{19} / \text{cm}^3$

1.2 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีการเกิดและคุณสมบัติของเพชร
2. ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร
3. ศึกษาทฤษฎีรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ
4. ศึกษาหลักการแยกสารละลายด้วยขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร
5. ศึกษาการออกแบบกระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสร้างฟิล์มเพชร
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร
3. เพื่อศึกษาและพัฒนาการแยกน้ำโดยใช้ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

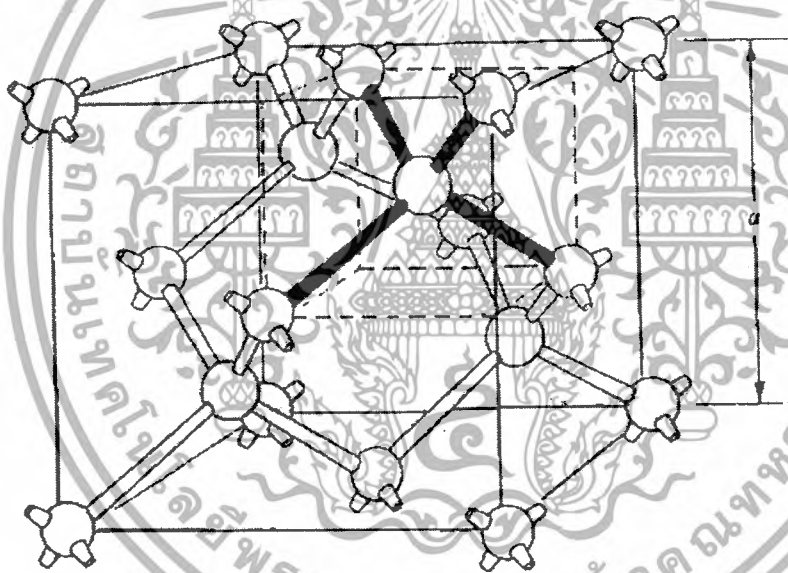
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ฟิสิกส์เพชร

2.1.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกเพชร

โครงสร้างของผลึกเพชรมีลักษณะเป็นแบบ face center cubic โดยที่อะตอมคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์ (unit cell) จะประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 8 อะตอม ซึ่งมีลักษณะการยึดเหนี่ยวกันในรูปที่ 2.1 คือ 1/8 ของอะตอม อยู่บริเวณมุมทั้งแปด อีก 1/2 อะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์

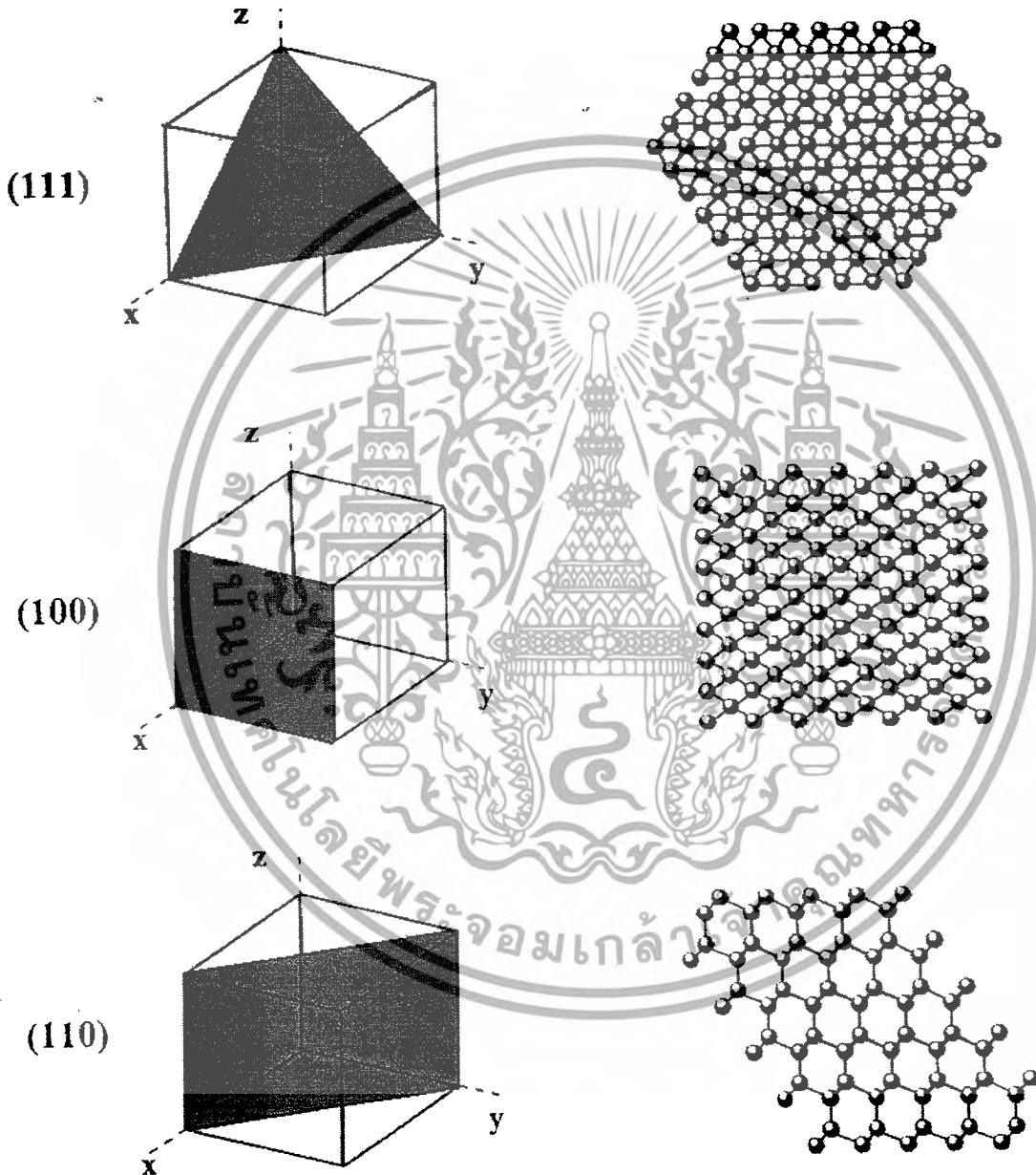


รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกเพชร

เมื่อพิจารณาขนาดของผลึกเพชรสามารถเกิดการเรียงตัวได้หลายขนาด เช่น ขนาด(111) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในขนาดเดียวกันเรียงตัวเป็นสามเหลี่ยมซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบ(100) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและระนาบ(110) จะมีลักษณะเหมือนอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกันเรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวอย่างระนาบของเพชรแบบต่างๆแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระนาบต่างๆ ของเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คุณสมบัติต่างๆ ของเพชร

เพชรมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ อยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และทางแสง เป็นต้น โดยถ้าพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากเพชรมีการยึดเหนี่ยวของอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงจึงทำให้เพชรมีความแข็งสูง นอกจากนั้นยังมีความทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและมีความนำความร้อนสูง ในด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ โฮลและอิเล็กตรอน มีค่าสูง และเพชรยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำทำให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง ส่วนคุณสมบัติทางแสงนั้นเพชรมีความกว้างช่องว่างแถบพลังงานสูงจึงมีความเหมาะสมในการนำมาสร้างเป็น อุปกรณ์ตรวจวัดแสงความยาวคลื่นสั้น ซึ่งจะทำให้การรบกวนจากแสงช่วงตามองเห็นต่ำ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ [3]

| คุณสมบัติ | เพชร | ซิลิคอน | แกเลียมอาร์เซไนด์ | เยอรมันเนียม |
|--|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Thermal conductivity (W/cm-k) | 20 | 1.5 | 0.455 | 0.28 |
| Electron mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$) | 2,000 | 1,500 | 8,800 | 3,900 |
| Hole mobility ($\text{cm}^2/\text{V-s}$) | 1,800 | 600 | 400 | 1,900 |
| Electron saturated velocity (cm/s) | 2.7×10^7 | 1×10^7 | 1.2×10^7 | 5×10^6 |
| Hole saturated velocity (cm/s) | 1.05×10^7 | 9×10^6 | 1×10^7 | 4×10^6 |
| Density of states effective mass | | | | |
| Electron | 0.57 | 1.1 | 0.068 | 0.55 |
| Hole | 1.2 | 0.8 | 0.5 | 0.37 |
| Effective density of states | | | | |
| Conduction band (cm^{-3}) | 1×10^{19} | 2.8×10^{19} | 4.7×10^{17} | 1.04×10^{19} |
| Valence band (cm^{-3}) | 3×10^{19} | 1×10^{19} | 7×10^{18} | 6.0×10^{18} |
| Breakdown field (V/cm) | 10^7 | 5×10^6 | 3×10^5 | 10^4 |
| Resistivity (Ωcm) | 10^{16} | 10^3 | 10^8 | 10 |
| Dielectric constant (ϵ) | 5.7 | 11 | 12.5 | 15.8 |
| Energy gap (eV) | 5.45 | 1.1 | 1.42 | 0.72 |

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเพชรกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์ด้วยระบบ CVD แบบหลอดความร้อน (Hot-Filament CVD), แบบคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Plasma CVD), แบบ ดีซี พลาสมา (DC Plasma CVD) และแบบคลื่นความถี่ (RF Plasma CVD) เป็นต้น

โดยในที่นี้จะกล่าวรายละเอียดเฉพาะวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ CVD แบบหลอดความร้อน ซึ่งไดอะแกรมระบบ CVD แสดงในรูปที่ 2.3 หลักการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมคาร์บอน

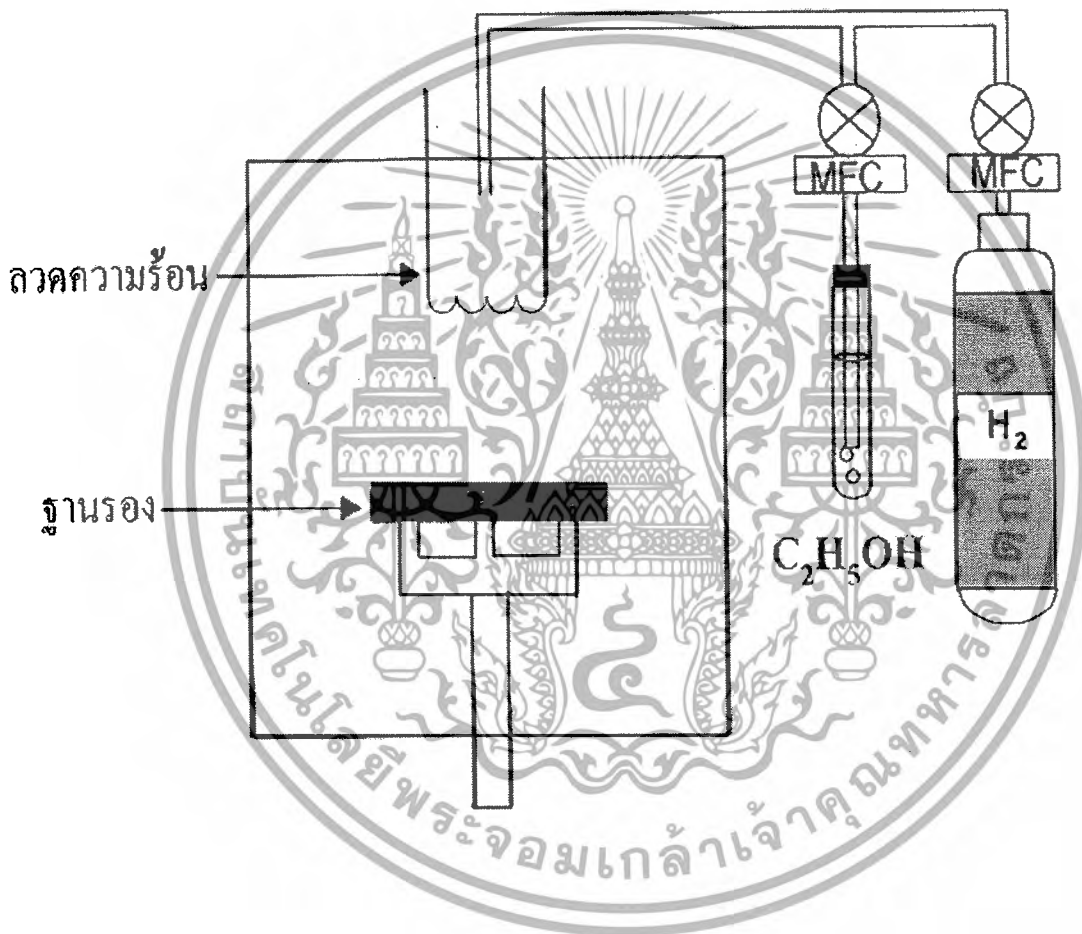
เนื่องจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรจะใช้อะตอมคาร์บอนเป็นปัจจัยในการเกิดผลึกเพชรโดยสามารถใช้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน หรือแอลกอฮอล์เป็นแหล่งจ่ายคาร์บอน ซึ่งนอกจากจะได้อะตอมคาร์บอนแล้ว ในส่วนก๊าซไฮโดรเจนยังมีส่วนสำคัญในการกำจัดกราไฟต์ ซึ่งปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน และอนุมูลคาร์บอนที่เหมาะสมจะทำให้การเกิดของเพชรมีคุณภาพที่ดี

2. การกระตุ้นก๊าซให้เกิดอนุมูลคาร์บอน

ในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยระบบ CVD แบบหลอดความร้อน การกระตุ้นก๊าซเฟสเพื่อให้แยกอะตอมของคาร์บอนออกมา นับว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์ฟิล์ม โดยเราจะใช้ความร้อนจากหลอดความร้อนทั้งสแตนด์เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมคาร์บอนแยกตัวออก จากอะตอมอื่นแล้วก่อตัวเป็นฟิล์มเพชรบนฐานรองที่เตรียมไว้

3. อุณหภูมิของฐานรองที่เหมาะสม

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 อุณหภูมิของฐานรอง นั้นเกิดจากการถ่ายเทความร้อน จากหลอดความร้อนไปยังฐานรอง ดังนั้นระยะห่างระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรองจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของฐานรอง ซึ่งอุณหภูมิของฐานรองจะมีส่วนสำคัญในการกำหนดรูปผลึกของฟิล์มเพชร

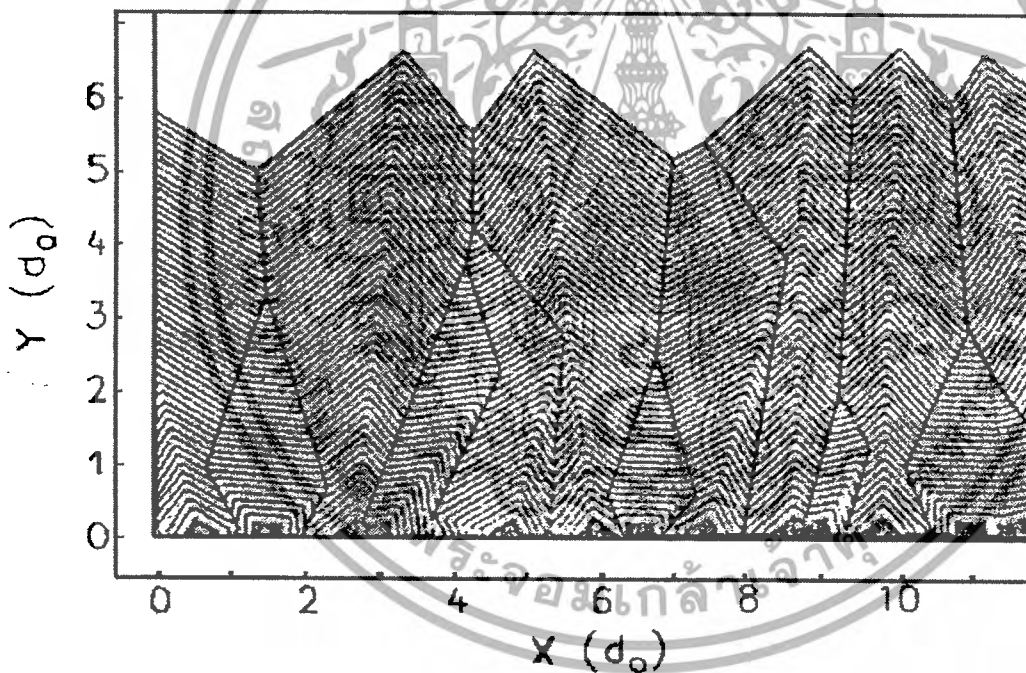


รูปที่ 2.3 ภาพไดอะแกรมระบบ CVD แบบหลอดความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเตรียมพื้นผิวของฐานรอง

ฐานรอง (Substrate) มีความสำคัญมากต่อการเกิดนิวเคลียสของเพชร โดยสามารถเลือกฐานรองได้หลายชนิด เช่น ซิลิคอน อลูมินา โมลิบดีนัม เป็นต้น โดยทั่วไปมักใช้ ซิลิคอน นำมาขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรให้มีลักษณะเป็นเส้นรอยขีดข่วนทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร ฟิล์มเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขีดข่วนก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์



รูปที่ 2.4 แสดงภาพจำลองการก่อตัวของฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตัลไลน์

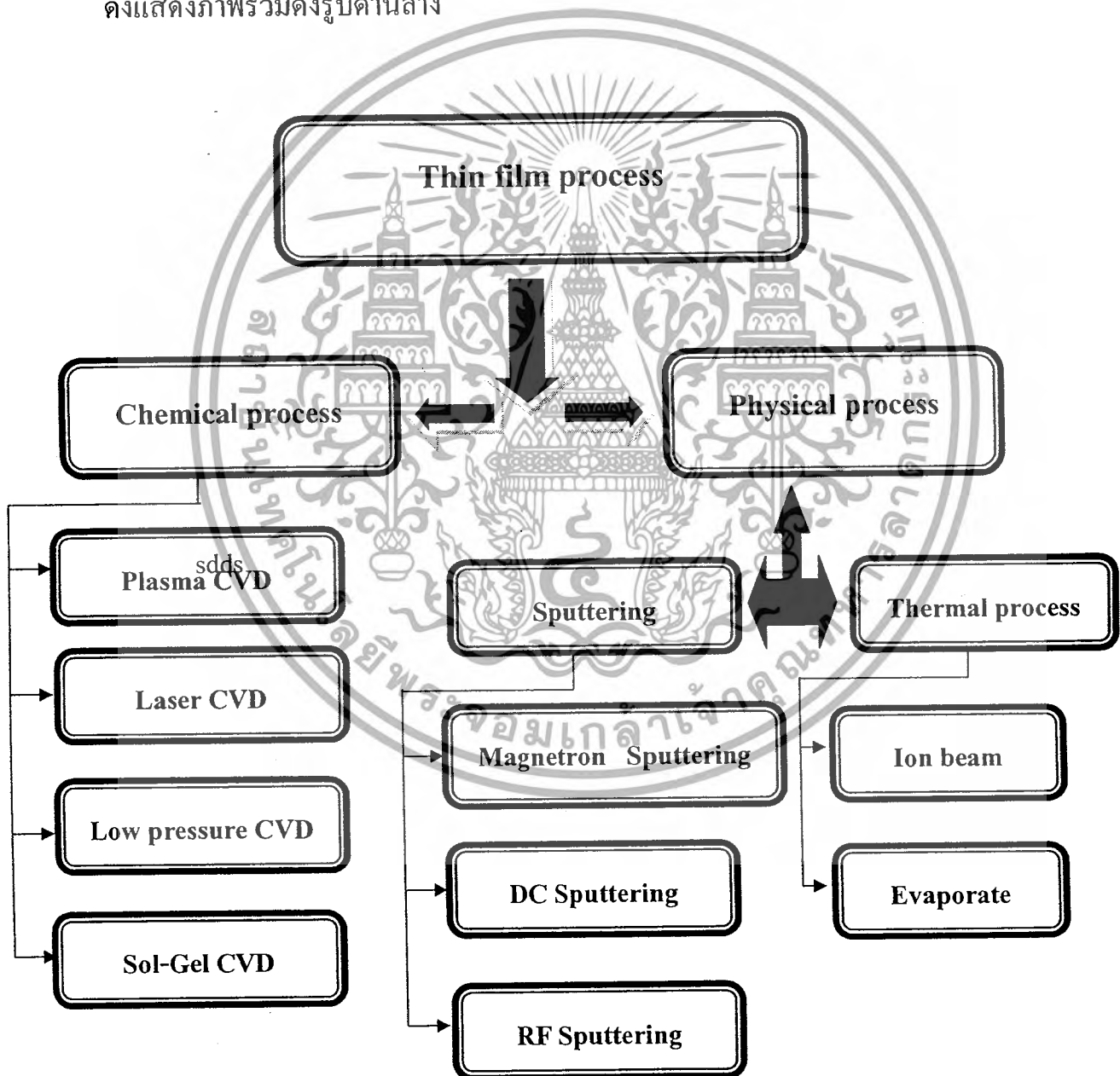
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอร์ริง

การสร้างฟิล์มบางด้วยกระบวนการเคลือบฟิล์ม(Thin film deposition) นั้นมีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของฟิล์มบางสามารถแบ่งออกได้ 2 เทคนิคคือ

1. กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางกายภาพ (Physical vapor deposition, PVD)
2. กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

ดังแสดงภาพรวมดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 2.5 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบ สเปคเตอร์ริง

การสเปคเตอร์ริง(Sputtering) คือกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนกันของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมที่ผิววัสดุ การสเปคเตอร์ริงมีกระบวนการที่สำคัญ ดังนี้

1. อาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าของก๊าซอาร์กอน(Ar)ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
2. จากนั้นทำการเร่งไอออนให้วิ่งชนเป้าสารเคลือบ(Target)ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

3. เป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊ซอะตอมของเป้าสารเคลือบจะหลุดออกมาและเคลานที่ด้วยความเร็วสูงมากมายังแผ่นฐานรองในทุกทิศทางจากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมานั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นอนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการสเปคเตอร์ริงที่ตกกระทบแผ่นฐานรองจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นฐานรอง อันตรกิริยาระหว่างไอออนและพื้มเป้าสารเคลือบ

เมื่อเป้าสารเคลือบที่เป็นของแข็งที่ถูกชน โดยไอออน สามารถอธิบายพฤติกรรมของไอออนในลักษณะต่างๆกันดังนี้

1. ไอออนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ
2. การชนของไอออนทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่ 2(Secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบเมื่อ ไอออนมีพลังงานสูงพอ
3. ไอออนที่ฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion Implantation)มีค่าประมาณ 10 อังสตรอม ต่อพลังงานไอออน 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในเป้าสารเคลือบที่เป็นทองแดง

4. การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก(Lattice defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวของ โครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

การเกิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชน สำหรับในกรณีนี้การเกิดสเปคเตอร์ริง จะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานไอออนบวกประมาณ 0.1-10 keV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กระบวนการชนในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว

หลักการทำให้เกิดการไอออไนซ์ และมีสถานะเป็นพลาสมาคือก๊าซที่เกิดการไอออไนซ์จะมีความดันตั้งแต่ 1 มิลลิทอร์ (m Torr) ขึ้นไป แหล่งกำเนิดเริ่มต้นของการเกิดไอออไนซ์คือ การชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแต่เนื่องจากการชนดังกล่าวจะมีการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ซึ่งการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซหรือไอออน จะมีการถ่ายเทพลังงานจากอิเล็กตรอนไปยังอะตอมหรือไอออนที่ถูกชนมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพราะว่ามวลของอิเล็กตรอนกับมวลอะตอมหรือไอออนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก

ในขณะที่ก๊าซแตกตัวและมีสถานะเป็นก๊าซมากจะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมจะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



โดยที่ G^0 คือ อะตอมของก๊าซที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด (Ground state)

G^+ คือ ไอออนของก๊าซที่มีประจุบวก

ถ้าให้อะตอมของก๊าซที่ถูกชนเป็นก๊าซอาร์กอน (Ar) และเกิดการไอออไนซ์ ดังนั้นความสัมพันธ์ เขียนได้ ดังนี้



จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการข้างต้น จะพบว่าอะตอมที่เป็นกลางหนึ่งอะตอมเมื่อเกิดไอออไนซ์ จะได้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุบวกหนึ่งตัวพร้อมกันนั้นจะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นหนึ่งตัว และถ้าต้องการให้มีไอออนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า อาจจะทำให้ได้โดยกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมาให้หมดไป แต่การกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะต้องให้พลังงานกับอิเล็กตรอนที่มากพอสมควรและ โดยปกติทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนที่อยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าที่มากกว่าสองบวกขึ้นไปจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้

กระบวนการปกติที่เกิดขึ้นในพลาสมาคือ การกระตุ้นอะตอมหรือไอออนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด เพื่อให้อะตอมหรือไอออนไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้นหรือที่เรียกว่าอยู่ในสถานะกระตุ้นพร้อมทั้งมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนอะตอมหรือไอออนเหล่านั้น แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



อะตอมหรือไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีช่วงเวลา(Lifetime)ที่อยู่ในสถานะดังกล่าวเป็นช่วงเวลาสั้นมาๆ หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวพร้อมกับปลดปล่อยโฟตอนออกมา ลักษณะเช่นนี้เป็นคุณลักษณะของพลาสมาและเป็นจุดเริ่มต้นที่จะอธิบายเรื่อง โกลว์ดิสชาร์จของก๊าซ

อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปีดเตอร์ริง

อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปีดเตอร์ริง หมายถึง ความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอร์ริง ต่อหน่วยของเวลาการสปีดเตอร์ริง ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมของเป้าสารเคลื่อนที่ถูกสปีดเตอร์และสภาพการชนกับอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุฐานรอง อัตราการเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อย, ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลื่อนกับวัสดุฐานรอง และความดันในภาชนะสุญญากาศ ในสภาวะของการ โกลว์ดิสชาร์จ

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความดันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อกัน การวัดผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเอียดหรือไม่ให้ความสำคัญกับตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ด้วยการกำหนดตัวแปรคงที่ และทำการศึกษาผลจากตัวแปรอีกตัวที่น่าสนใจ เช่นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่มีความคงที่ค่าๆหนึ่ง กำลังไฟฟ้าที่นี้เป็นการรวมผลของค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของการดิสชาร์จเข้าด้วยกัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนิยมในระบบการสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง(RF sputtering)ซึ่งสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มได้ดังสมการ

$$R \propto \frac{P}{lP'}^2$$

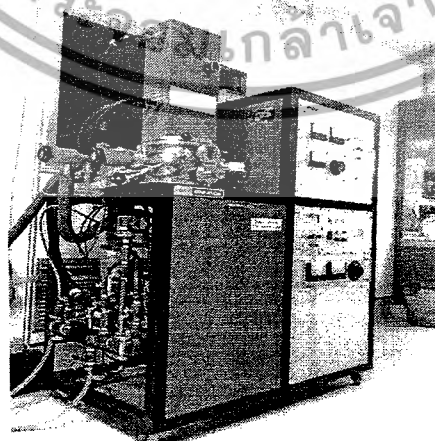
โดยที่ P คือกำลังไฟฟ้า

P' คือ ความดัน

l คือ ระยะจากเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง

2.2.3 ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง

ระบบการสปัตเตอร์ริงแบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง (DC sputtering) ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอเล็กโทรดที่วางขนานกัน ด้านหนึ่งของอเล็กโทรดจะเป็นขั้วคาโทดและอีกด้านเป็นอโนด บริเวณคาโทดจะมีเกิดเป้าสารเคลือบและระบบน้ำหล่อเย็น เมื่อควบคุมความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบที่ 0.1 ทอร์และทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ศักดาระหว่างขั้วอเล็กโทรดจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 10 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดการดีสชาร์จผ่านตัวกลางที่เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และก๊าซอาร์กอนที่เกิดการโค้วดีสชาร์จจะถูกเร่งพุ่งชนคาโทดที่เป่าเป้าสารเคลือบ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นที่อโนดหรือวัสดุฐานรอง

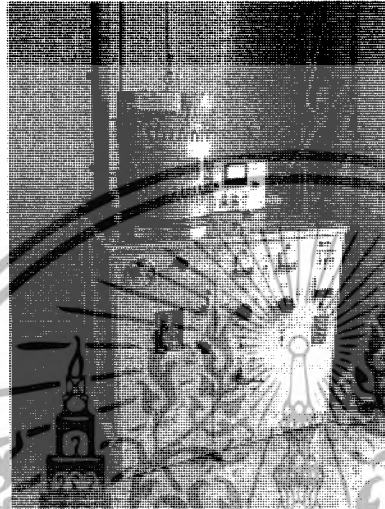


รูปที่ 2.6 เครื่องสปัตเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 กระบวนการ Evaporation

คือกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่โลหะจนถึงจุดเดือดของโลหะนั้น โลหะจะมีสถานะเป็นก๊าซซึ่งอยู่ในสูญญากาศ และจะไปเคลือบกับอุปกรณ์ที่ได้เตรียมไว้

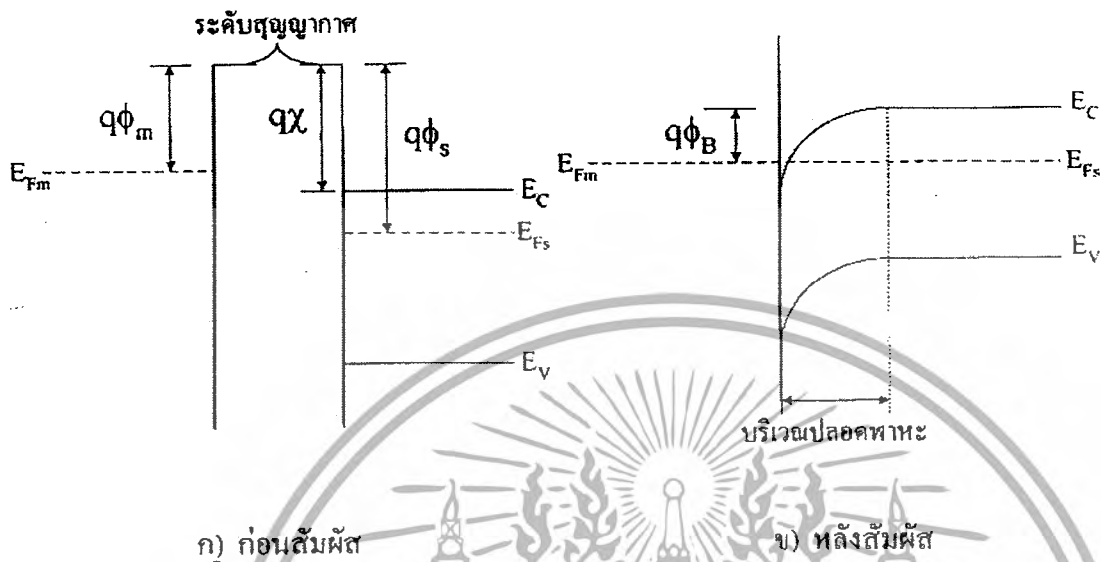


รูปที่ 2.6.1 เครื่อง Evaporation

2.3 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

ในการนำอุปกรณ์ประเภทโซลิดสเตต ไปใช้งานการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ นับว่ามีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์โซลิดสเตตสู่โลกภายนอก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือแบบเรกติไฟร์และแบบโอห์มมิกโดยจะอธิบายโดยใช้โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ซึ่งการรอยสัมผัสจะมีลักษณะเป็นแบบ เรกติไฟร์และแบบโอห์มมิกนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะและอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำ และในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 รอยต่อแบบโอห์มมิก

เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติมีค่าความนำสูงโดยสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้ง 2 ทิศทาง เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อแบบโอห์มมิก (ohmic contact) โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งก่อนนำมาสัมผัสและหลังนำมาสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N) และในรูปที่ 2.6 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P)

พิจารณารูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_m มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ϕ_s เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยระดับเฟอร์มี (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลผ่านรอยต่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอ็อนบวกขึ้นทางด้านโลหะและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อขึ้น โดยการไหลอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายใน มีค่าสูงพอที่จะสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้และเป็นสภาวะสมดุล ดังนั้นทำให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ โดยถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.5 จะไม่มีกำแพงศักย์กั้นอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ทั้งสองทิศทาง และในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มี $\phi_s < \phi_m$ ก็เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.3.2 รอยต่อชนิดชอตต์กี

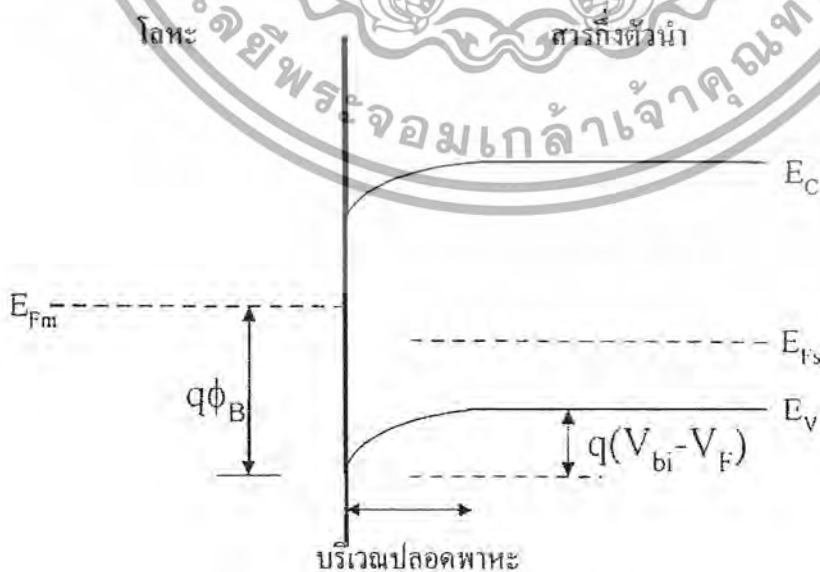
เมื่อนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำแล้วรอยต่อมีคุณสมบัติยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เราเรียกรอยต่อแบบนี้ว่ารอยต่อชอตต์กี (schottky contact) พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ฟังก์ชันงานของโลหะ ϕ_m มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ϕ_s เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสองชนิดจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยระดับเฟอร์มี (fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ระดับเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

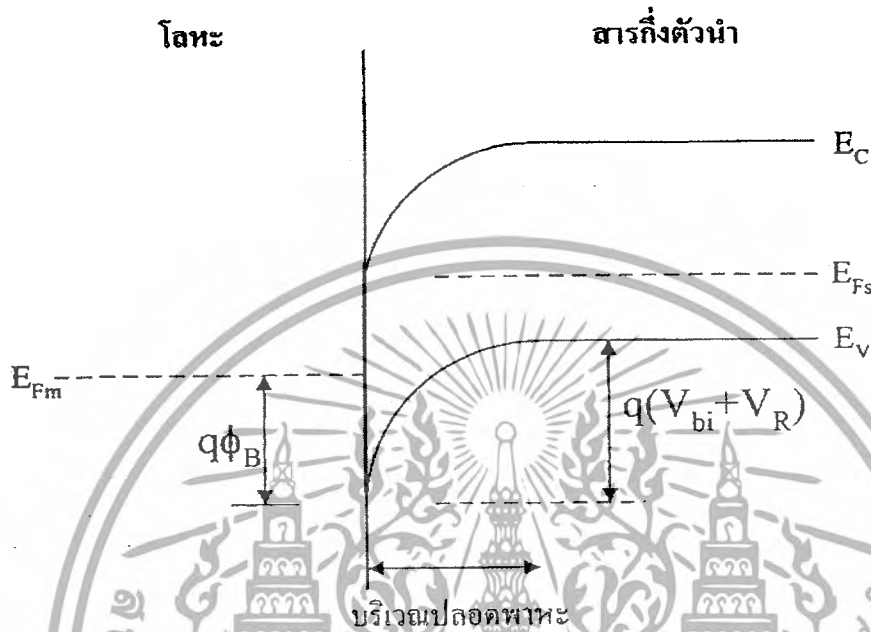
รอยต่อเข้าไปด้าน โลหะจึงทำให้เกิดอ็อนบวกเกิดขึ้นที่สารกึ่งตัวนำและเกิดมีประจุลบขึ้นที่ทางด้านโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดเป็นกำแพงศักย์กั้นจนไม่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนคืออยู่ในสภาวะสมดุล ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็อธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์เดียวกันและเมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะมีการถ่ายเทประจุพาหะจนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล คือไม่มีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่เมื่อให้ไบอัสแรงดันให้แก่รอยต่อจะมีผลให้โฮลที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แต่สำหรับกำแพงศักย์ที่กั้นอิเล็กตรอนที่ไหลจากด้านโลหะไปสารกึ่งตัวนำ $q\phi_B$ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อให้ไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) กับรอยต่อจะทำให้ค่า V_{bi} ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built in voltage) ลดต่ำลงและถ้าแรงดันไบอัสมีค่ามากพอ ($V_F \geq V_{bi}$) ก็จะทำให้ประจุพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อไปยังโลหะได้ ในทางตรงข้ามถ้าให้ไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) แก่รอยต่อก็จะทำให้ระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้นดังนั้นโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนใหญ่ในสารกึ่งตัวนำจะถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อไปยังด้านโลหะได้

แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสไปข้างหน้าและไบอัสย้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์บวกและโลหะให้ศักย์ลบ)



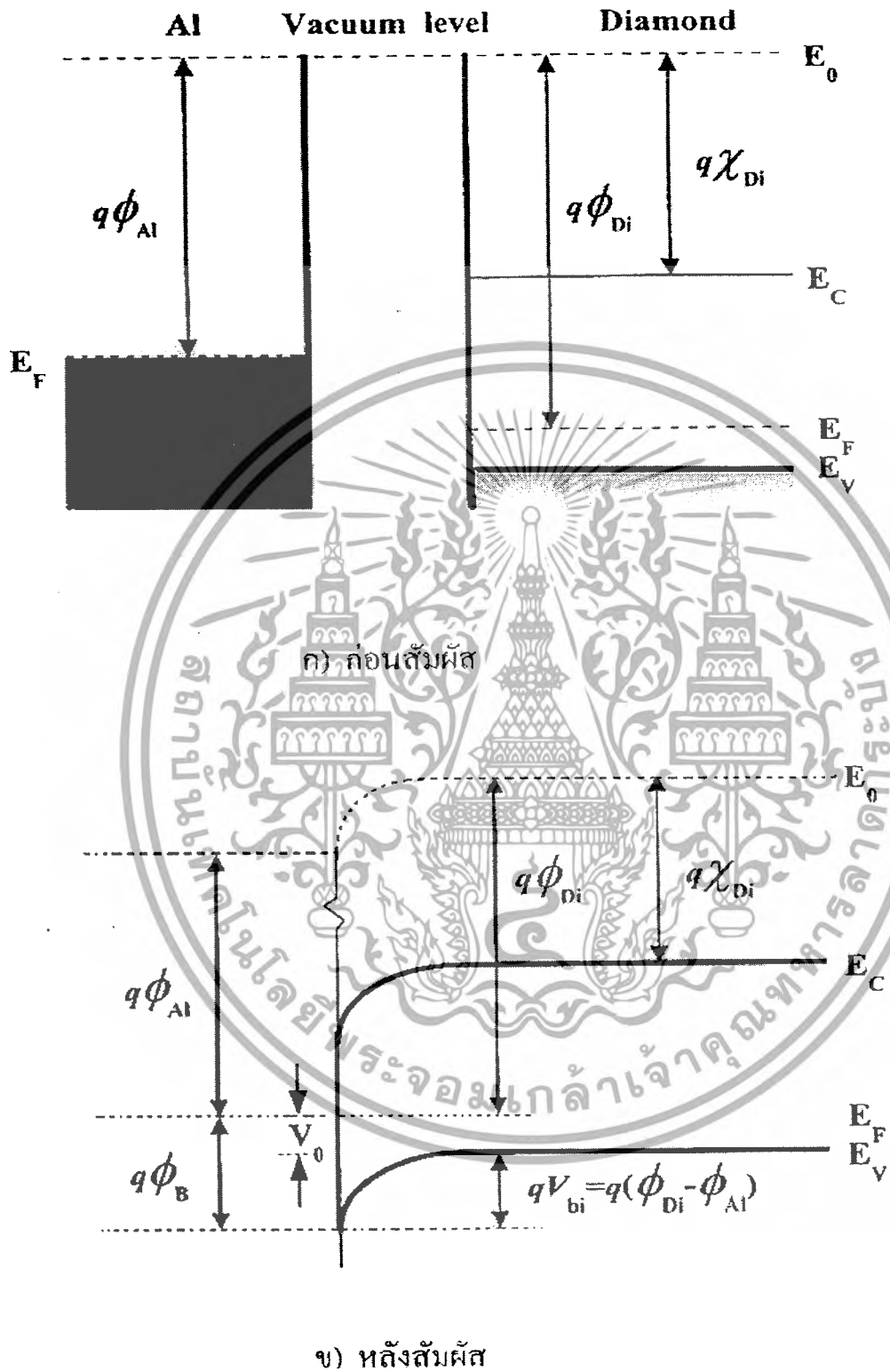
รูปที่ 2.10 โครงสร้างและแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับไบอัสแรงดันไปข้างหน้า (สารกึ่งตัวนำชนิดพีให้ศักย์ลบและโลหะให้ศักย์บวก)

2.3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อฟิล์มเพชรกับโลหะอลูมิเนียม

รอยต่อฟิล์มเพชรกับ โลหะอลูมิเนียมจัดเป็นรอยต่อแบบชอตต์กีคือ เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสัมผัสกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกที่รอยต่อและยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางเดียว

แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อฟิล์มเพชรกับ โลหะอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มเพชรและโลหะอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังนำมาสัมผัสกัน ก) ก่อนสัมผัส ข) หลังสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ขั้วไฟฟ้าฟิล์มบางเพชรเจือโบรอน

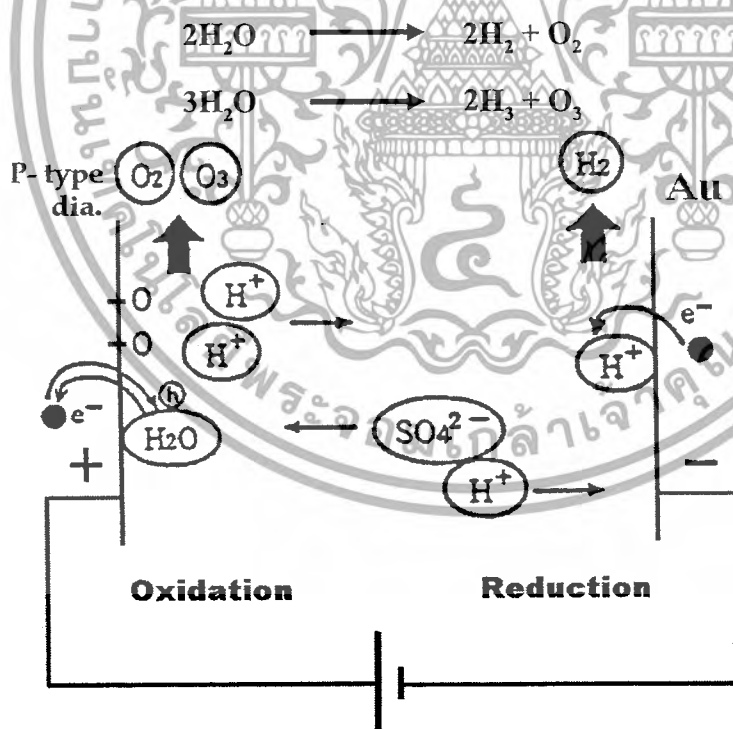
การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาใช้ในทางเคมีไฟฟ้านั้นได้มีการศึกษามานานกว่า 30 ปี โดยมีการศึกษาในโครงสร้างลักษณะต่างๆ เช่น carbon fiber glassy carbon และ graphite เป็นต้น โดยพิจารณาจากความสามารถนำไฟฟ้า และลักษณะของสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะในฟิล์มบางเพชรเจือโบรอนมีผู้สนใจอย่างมากที่จะนำมาเป็นวัสดุทางเคมีไฟฟ้า โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีทางฟิสิกส์ และทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีความเหมาะสมมาเป็นขั้วไฟฟ้าเคมี

นักวิจัยหลายกลุ่มทำการพัฒนาฟิล์มบางเพชรเจือโบรอนมาใช้ในทางเคมีไฟฟ้านั้น ได้สมบัติที่ดีหลายประการของฟิล์มบางเพชรเจือโบรอน ได้แก่ มีความแข็งแรง ความต้านทานต่อไม่ทำปฏิกิริยาเคมี ความสามารถนำความร้อนได้ดีมีความสามารถให้แสงผ่านได้ตลอดจนมีค่า $E_g = 5.5\text{eV}$ ซึ่งเป็นค่ากว้างมาก เป็นต้น และโครงสร้างของคาร์บอนใน โมเลกุลของเพชรนั้นมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบ six-member ring และสร้างพันธะแบบ sp^3 โดยแต่ละวงจะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ส่วนการเจือโบรอนในเพชรนั้น โบรอนจะอยู่ระหว่างอะตอมภายใน โมเลกุลโดยไม่สร้างพันธะกับ โมเลกุลของคาร์บอน ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะของ electron hole ขึ้นทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายใน โมเลกุลได้ และระหว่าง โมเลกุลดียิ่งขึ้น การเจือโบรอนจะทำในขั้นตอนการสร้างเพชรเพื่อให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีจากการเป็นฉนวนที่ดี ในปัจจุบันขั้วไฟฟ้าเคมีฟิล์มเพชรได้มีการใช้งานในการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า โดยทั่วไปการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าจะใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้ background current มีค่าน้อย ซึ่งเหมาะสมกับการใช้เป็นเซ็นเซอร์ แต่ในทางอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า เช่นการชุบด้วยไฟฟ้า การบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า และการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าเพชรจะต้องมีความหนาแน่นกระแสสูง เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่มาก ขนาดใหญ่ และในการสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ นิยมใช้ระบบการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแบบ Hot-filament CVD ที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

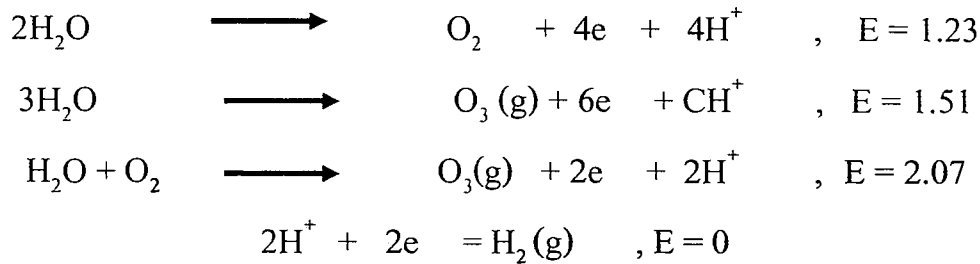
2.4.1 หลักการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพชร

ขั้วไฟฟ้าเพชรชนิด P จะให้อนุภาคอิสระชนิดบวกที่เรียกว่า โฮล เมื่อขั้วไฟฟ้าเพชรวางอยู่ในสารละลาย H_2SO_4 เมื่อได้รับการไบอัสศักดาบวก ทำให้โฮลในขั้วเพชรเคลื่อนที่ยังรอยสัมผัสระหว่างพื้นผิวเพชรกับสารละลาย ในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าบวก ดังรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำมีการถ่ายเทไปยังขั้วไฟฟ้าเพชร อาโนด หรือกระบวนการนี้พิจารณาในทางสมมูลได้ว่าโฮลในขั้วไฟฟ้าเพชรชนิด P ได้มีการถ่ายเทไปยังโมเลกุลของน้ำ เมื่อโมเลกุลของน้ำได้รับประจุบวกจากเพชรโมเลกุลน้ำจะมีการแตกตัวเปลี่ยนแปลงเป็นไฮโดรเจนไอออน ($2H^+$) และการยึดเกาะของ C-O ที่พื้นผิวเพชร ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะมีการเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า Au ที่ป้อนศักดาลบ และขั้วไฟฟ้า Au จะถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับ H^+ ทำให้เกิดก๊าซ H_2 ที่บริเวณขั้วไฟฟ้า Au ที่ขั้วไฟฟ้าเพชรศักดาบวก โมเลกุลของ H_2O ที่กระจายไปเกิดแขนการยึดเหนี่ยว C-O ร่วมกับอะตอมคาร์บอนทำให้ออกซิเจนอะตอมเหล่านั้นกลายเป็นก๊าซ O_2 และก๊าซ O_3 ซึ่งเป็นผลจากเพชร ดังสมการ



รูปที่ 2.12 เมื่อขั้วไฟฟ้าเพชรวางอยู่ในสารละลาย H_2SO_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.4.2 หลักการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพชรที่ไม่มีสารละลาย H_2SO_4

จากที่ได้ทำการค้นคว้าศึกษาขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรเราพบว่าการใช้อิเล็กโทรไลต์เพื่อเป็นสารอิเล็กโทรไลต์เท่านั้นเพื่อที่จะเป็นตัวนำไฮโดรเจนไอออน (H^+) พบว่ามีสารอิเล็กโทรไลต์ของแข็งที่จะนำมาใช้แทนสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นสารละลาย H_2SO_4 คืออิเล็กโทรไลต์แบบแผ่นเมมเบรนเพื่อที่จะเป็นตัวนำไฮโดรเจนไอออน

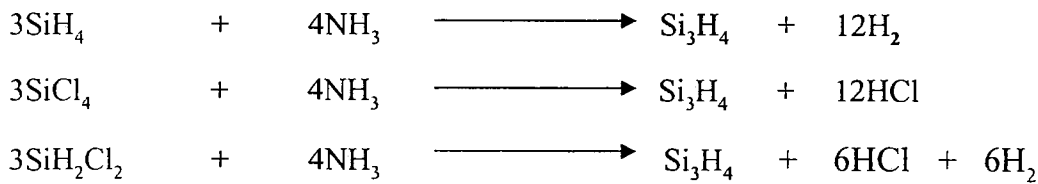
โดยแผ่นเมมเบรนจะเป็นตัวนำไฮโดรเจนไอออน จากขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรแคโทด (+) ไปยังขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรแอโนด (-) และขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรแอโนด (-) จะถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับ H^+ ทำให้เกิดก๊าซ H_2 สำหรับออกซิเจนอะตอมเหล่านั้นที่อยู่ขั้วแคโทดก็จะกลายเป็นก๊าซ O_2 และก๊าซ O_3 ซึ่งเป็นผลจากเพชร

สำหรับการใช้อิเล็กโทรไลต์แบบแผ่นเมมเบรนเข้ามาแทนอิเล็กโทรไลต์จากสารละลาย H_2SO_4 ก็เพราะว่าสารละลาย H_2SO_4 เป็นกรดเข้มข้นซึ่งทำให้เราจะทดสอบการทำงานขั้วไฟฟ้าฟิล์มยากมากเพราะเป็นกรดเข้มข้นกัดกร่อนสูงอาจจะกัดกร่อนขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรที่มีส่วนของโลหะ และยังอันตรายต่อผู้ทดลองด้วย

2.5 การสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์

ชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3H_4) ถูกนำมาใช้เป็นชั้นที่ป้องกันการเกิดออกไซด์ หรือ Oxidation Mask โดยชั้นนี้จะป้องกันไม่ให้ Si และ O_2 ทำปฏิกิริยากันได้ ชั้นของซิลิคอนไนไตรด์สร้างได้จากกระบวนการ CVD โดยการใช้ก๊าซสารประกอบซิลิคอน เช่น SiH_4 , SiCl_4 , SiH_2Cl_2 ทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ ทำปฏิกิริยากับก๊าซแอมโมเนีย มักจะมีก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ปะปนอยู่ และรวมกับก๊าซออกซิเจน (O_2) ได้ ชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ที่หนา มาก มักจะมีรอยแตกร้าวได้ง่าย อาจแก้ไขโดยใช้ LPCVD นอกจากนี้แล้วชั้นของซิลิคอนไนไตรด์ เป็นฉนวนที่ดีและป้องกัน alkali metal contamination จึงอาจนำไปใช้เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของอุปกรณ์วงจรรวมได้

กระบวนการ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือกระบวนการที่สร้างชั้นบางๆ ของวัสดุตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี จากไอหรือก๊าซ ซึ่งเป็นสารประกอบของธาตุที่ต้องการ กับธาตุไฮโดรเจน หรือ คลอรีน เมื่อก๊าซสารประกอบได้รับความร้อน จะเกิดการแยกตัวออกเป็นธาตุอิสระ สำหรับกรณีการสร้างชั้นสารที่มีซิลิคอนอยู่ด้วยได้แก่ ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ชั้นของโพลีซิลิคอน (Poly silicon) และชั้นของไนไตรด์ (Si_3N_4)

2.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization Process)

กระบวนการเมทัลไลเซชัน คือกระบวนการสร้างชั้นของโลหะ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้า หรือแถบตัวนำภายใน ดังนั้นหน้าที่ของชั้นโลหะที่ได้คือ

1. ขั้วสัมผัสโลหะ (Metal contacts) เพื่อเป็นตัวนำระหว่างชั้นโลหะกับอุปกรณ์ในวงจรรวม
2. แถบโลหะเชื่อมต่อภายใน (metal wire interconnection) เพื่อเชื่อมต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับโลหะภายนอกตัวอุปกรณ์วงจรรวม

2.6.1 คุณสมบัติของโลหะที่ดีและเหมาะสมกับงานในวงจรรวม

1. มีค่า Contract resistance (R_c) ต่ำ หรือเป็น Good electrical contact และมีสภาพเป็นรอยต่อแบบ Ohmic contact ไม่ใช่ Rectifier contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ) ต่ำ เช่น $\rho_{Al} = 2.7 \text{ } \mu\text{m}\cdot\text{cm}$ หรือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้า (High conductivity) สูง เพื่อลด Voltage drop ในโลหะ และลดค่า Propagation delay , RC
3. ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น การทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical stability) ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลง จะทำให้มีอายุการใช้งานยาวนาน
4. ต้องสามารถทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีได้ และได้ลวดลายที่มีความคมชัดและละเอียดสูง
5. ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งเชื่อมต่อกับโลหะภายนอกได้ดี
6. มีราคาถูก และสามารถสร้างได้ง่าย

2.6.2 โลหะที่ถูกนำมาใช้งานวงจรรวม

1. อลูมิเนียม (Aluminum ; Al) เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งเป็นขั้วสัมผัสโลหะและแถบโลหะเชื่อมต่อภายใน อย่างไรก็ตามในอุปกรณ์ประเภท รอยต่อตื้นๆ (Shallowed junction) เช่น mosFET หรือ mosICs จะมีปัญหาจาก Al spike เกิดที่บริเวณ Metal contacts ทำให้รอยต่อ พี-เอ็น เสียหาย จึงต้องมีการแก้ปัญหาตามมา

2. ทองคำ (Gold ; Au) ทองคำจะมีการนำไปใช้บ้างบางกรณี แต่ราคาแพง และเนื่องจากอะตอมของทองคำเป็น Deep level impurity จึงทำให้มีปัญหาการ Trapping ทองจึงไม่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป

2.7 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photo Lithography)

2.7.1 สารไวแสงและเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี

โดยทั่วไปแล้ว คำว่า ลิโทกราฟี (lithography) หมายถึง การพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์เรียบที่เป็นหินหรือโลหะ แต่ในกระบวนการสร้างวงจรรวม เทคนิคของโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หมายถึงเทคนิคการสกัด (Etching) ชั้นสาร หรือวัสดุใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งส่วนใหญ่มักได้แก่ซิลิคอนไดออกไซด์ ในบางส่วน หรือในบริเวณที่ต้องการ โดยอาศัยเทคนิคทางแสง (Optical Technique) ซึ่งคล้ายเทคนิคในการถ่ายภาพ หรือพิมพ์ภาพ (Printing) เพราะการที่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิคอน บางส่วนถูกสกัด หรือละลายออกไป ด้วยสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้เป็นภาพ หรือลวดลาย ชั้นบนชั้นจึงซิลิคินไดออกไซด์ เหมือนกับการใช้เลื่อยฉลุ ทำการฉลุไม้เป็นลวดลายต่างๆ หรือการแกะสลักหรือการสกัดแผ่นหิน เพื่อให้ปรากฏภาพหรือลวดลายขึ้นนั่นเอง

ในงานของอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ที่เรียกว่า “ไมโครอิเล็กทรอนิกส์” ชิ้นส่วนของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไอซี ทรานซิสเตอร์ จะมีขนาดที่เล็กมาก เช่นมีขนาดเป็นไมโครเมตร (10 เมตร) ดังนั้นการประดิษฐ์หรือการสร้างต่างที่มีขนาดเล็กเช่นนี้ ไม่สามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์หรือเครื่องมือปกติทั่วไป เช่น การแกะสลักหิน อาจใช้ฆ้อนใช้สิ่ว การสลักหรือแกะสลัก แต่ถ้าเป็นภาพที่มีขนาดเล็กเป็นไมโครเมตร คงไม่สามารถใช้อุปกรณ์เครื่องมือเหล่านี้ได้ ดังนั้นจึงมีวิธีการสมัยใหม่ที่เรียกว่า “การสร้างลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์” (Microelectronics Patterning) โดยอาศัย เทคนิคด้านแสง หรือรังสีต่างๆ เช่นแสงอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีเอ็กซ์ (X-Ray) หรือลำแสงเลเซอร์ (Laser) หรือลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ร่วมกับการใช้ภาพต้นแบบ (Image) และสารไวแสงหรือน้ำยาไวแสง (Photo sensitive film) เช่นฟิล์มไวแสงชนิดต่างๆทำการพิมพ์ภาพต่างๆลงบนชั้นวัสดุใดๆ เช่นซิลิคอน ซิลิคอนไดออกไซด์ หรืออะลูมิเนียม เป็นต้น ชั้นสารต่างๆเหล่านี้จะถูกสกัดโดยปฏิกิริยาเคมี จากสารเคมีบางชนิด ทำให้เกิดเป็นภาพหรือลวดลายขนาดเล็กๆได้ วิธีการหรือเทคนิคดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี” หรือบางครั้งเรียกสั้นๆว่า “กระบวนการโฟโตเอตชิ่ง” (Photo etching) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้ ในกระบวนการสร้างวงจรรวม โดยใช้เพื่อการเปิดออกไซด์ (ซึ่งเป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือไม่ให้เข้าไปในซิลิคอน) ในบางส่วนบางบริเวณที่ประสงค์จะแพร่อะตอมสารเจือเข้าไป เพื่อให้เกิดเป็นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ หรือส่วนต่างๆของวงจรรวม ดังนั้นก่อนการแพร่อะตอมสารเจือทุกครั้งจำเป็นต้องกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเสมอ นอกจากนี้ อาจนำมาใช้กับการสกัดชั้นของโลหะอะลูมิเนียมให้เกิดเป็นลวดลายของแถบตัวนำ เพื่อเชื่อมโยงชิ้นส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นในชั้นผลึกซิลิคอนให้ต่อร่วมกัน เป็นวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่สมบูรณ์ ซึ่งวิธีการนี้ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า”การเชื่อมต่อภายใน” (Interconnection) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญอย่างหนึ่ง ของกระบวนการสร้างวงจรรวม นอกจากนี้อาจนำมาใช้กับขั้นตอนอื่นๆในกระบวนการสร้างวงจรรวมได้ และกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี นี้ถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีวงจรรวม เพราะการเปิดช่องชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมโครเมตร สามารถทำได้เป็นอย่างดี ดังนั้น เมื่อแพะอะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกซิลิคอนในบริเวณพื้นที่เล็กๆเช่นนี้ ทำให้เกิดเป็นชิ้นส่วนของอุปกรณ์ ที่มีขนาดเล็กๆได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิค โฟโตลิโทกราฟี ให้สามารถเปิดชั้นออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากๆได้ ก็หมายถึง การเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั่นเอง ซึ่งในปัจจุบันนี้ เราสามารถสร้างตัวทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากกว่าหนึ่งไมโครเมตรได้สำเร็จ ซึ่งเราเรียกเทคนิคนี้ว่า “ซัพไมครอนเทคโนโลยี”(Submicron Technology) เช่นในวงจรรระดับ VLSI ซึ่งในพื้นที่ประมาณ 1 ตารางเซนติเมตรจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์มากกว่า 1 ล้านตัว นั้นแสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมนี้มีขนาดเล็กมาก

2.7.1.1 น้ำยาไวแสง หรือสารไวแสง (Photo-resist)

วัสดุซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ก็คือ สารไวแสง หรืออ้ำยาไวแสง (Photo-sensitive) ซึ่งเป็นวัสดุ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงได้ โดยฟิล์มบางของสารไวแสงนี้ จะถูกนำมาใช้ ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกัน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุใดๆกับสารเคมีบางชนิดที่เป็น “สารกัด” (Etchant) เพราะฟิล์มบางของสารไวแสงนี้จะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีนั้นๆ คุณสมบัติดังกล่าวถูกนำมาใช้กับการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อการแพะสารเจือในบางส่วน หากบริเวณใดที่ต้องการให้มีชั้นออกไซด์คงอยู่

ก็ใช้ฟิล์มบางของสารไวแสงนี้ บังหรือปกคลุมไว้ ส่วนบริเวณใดที่ต้องการกัด หรือละลายชั้นออกไซด์ออก ก็ไม่ต้องมีชั้นสารไวแสงเปิดไว้ เมื่อนำแผ่นผลึกที่มีชั้นออกไซด์ไปทำปฏิกิริยากับสารตัวกัด (Etchant) ของชั้นออกไซด์ เช่น กรดกัดแก้ว (HF) หรือกรดไฮโดรฟลูออริก กรดกัดแก้วจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ ทำให้บริเวณที่ไม่มีชั้นสารไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บังอยู่ ชั้นออกไซด์จะถูกกรดละลายออกไปยกเว้นบริเวณที่มีชั้นสารไวแสงบังอยู่ ออกไซด์จะคงอยู่ได้ โดยไม่ถูกกัดหรือละลายออกไป การทำหน้าที่ของสารไวแสง เพื่อป้องกันหรือต้านทานปฏิกิริยาเคมี วังจึงเกิดขึ้นกับชั้นฐานรอง (Substrate) นี้ อาจถูกนำมาใช้เรียกชื่อของสารไวแสงนี้ว่า “ชั้นต้านทานที่ไวแสง” หรือ Photo resist film นี้ Photo resist และนิยมเรียกสั้นๆว่า resist

ชนิดของสารไวแสง

ในน้ำยาไวแสง ที่นำมาใช้กับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีทั่วไป จะประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่างๆคือ วัสดุที่เป็นสารไวแสง (Photo sensitive material) ส่วนที่เป็นสารละลาย (Solvent) และส่วนที่เป็นสารเพื่อช่วยในการยึดติดกับพื้นผิวใดๆ (Epoxy) และโดยพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีและ แสง (Chemical-Photo reaction) ของวัสดุไวแสง ที่มีอยู่ในน้ำยาไวแสง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ ทำให้เราสามารถจำแนกน้ำยาไวแสงออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 2 ชนิด

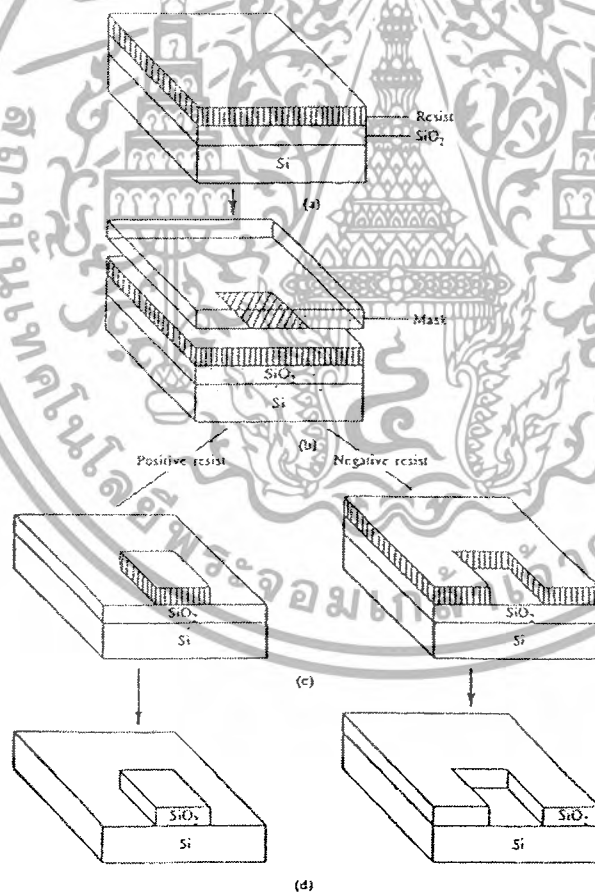
ก) น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resist)

หมายถึงน้ำยาไวแสง ที่เมื่อถูกฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยาเคมี-แสง เกิดขึ้นแล้วจะทำคุณสมบัติของการละลายในสารตัวทำละลาย หรือที่เรียกง่ายๆว่าน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) เปลี่ยนแปลงไป โดยขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับแสง จะสามารถละลายได้ดี สารตัวทำละลาย แต่เมื่อถูกแสงแล้ว จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป คือ ไม่สามารถละลายได้น้ำยาไวแสงชนิดลบนี้ จะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ฟิล์มถ่วงรูปต่างๆไป ซึ่งภาพที่ปรากฏบนฟิล์ม จะมีลักษณะเป็น ภาพเนกาตีฟ (Negative image) คือจะมีสภาพตรงข้ามกับ ภาพต้นแบบ (เช่น เปลี่ยนจากขาวเป็นดำ หรือดำเป็นขาว) หรือถ้าต้องการภาพที่เหมือนต้นแบบจริง จะต้องนำฟิล์มที่ได้ ไปพิมพ์ (Print) หรืออัดภาพลงบนกระดาษอัดภาพอีกครั้งหนึ่ง จึงจะได้ภาพที่เหมือนต้นแบบ ผลของปฏิกิริยาเคมี-แสง ของน้ำยาไวแสง วังจะให้ภาพเนกาตีฟดังกล่าวนี้ ทำให้ถูกเรียกว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ

ข) น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resist)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะประกอบด้วยวัสดุสารไวแสง (photo sensitive) ซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาเคมี-แสง ที่แตกต่างกับกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ โดยให้ผลตรงข้าม กล่าวคือ เมื่อยังไม่ถูกแสง หรือเมื่อไม่มีปฏิกิริยากับแสง จะมีคุณสมบัติไม่ละลายในตัวทำละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) แต่เมื่อถูกแสงหรือมีปฏิกิริยาแล้ว คุณสมบัติจะเปลี่ยนไปคือสามารถละลายได้ดีในน้ำยาล้าง น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะมีคุณสมบัติเหมือนฟิล์มสไลด์ (Slide film) หรือฟิล์มภาพยนตร์ ซึ่งจะให้ภาพบนฟิล์มมีลักษณะที่เป็น ภาพโพสิทีฟ (Positive image) ซึ่งเป็นภาพจริงเหมือนกับภาพต้นแบบ (คือขาว หรือดำ เหมือนต้นแบบ) ดังนั้นจึงเรียกน้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่าน้ำยาไวแสงชนิดบวก



รูปที่ 2.13 แสดงลำดับขั้นตอน และภาพข้างของผลิตภัณฑ์ลิโธกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานการสร้างวงจรรวม สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดบวกและชนิดลบ และคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำยาไวแสงก็คือ ความละเอียด(Resolution) ซึ่งอาจหมายถึง ความละเอียดของภาพที่สามารถทำได้ สำหรับงานวงจรรวมระดับสูง ที่มีขนาดเล็ก มากๆ น้ำยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูง (High resolution) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิด และคุณภาพ ของน้ำยาไวแสงนอกจากนี้ ปัจจัยภายนอก ที่เกี่ยวข้องกับความละเอียดของ ภาพ ก็คือชนิดของแสงที่ใช้ เช่นแสงอุลตราไวโอเล็ต ที่ความถี่ต่างๆ รังสีเอ็กซ์ หรือลำ อีเล็กตรอน โดยที่แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ จะสามารถทำให้ภาพที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น น้ำยาไวแสงที่มีขายตามท้องตลาด และใช้ในการสร้าง วงจรรวม มีมากมายหลาย ชนิด ซึ่งแต่ละบริษัทผู้ผลิตจะใช้ ชื่อเฉพาะทางการค้า และมีคุณสมบัติต่างๆกัน

2.7.1.2 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมเพื่อการสกัด หรือ เอตซิงค์ (Etching) ชั้นซิลิคอนออกไซด์บางส่วน ที่เคลือบอยู่บนผิว ผลึกซิลิคอนนอก เพื่อแพร่อะตอมของสารเจือ (impurity atom) เข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนต่างๆของอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งลำดับขั้นตอน พื้นฐานของกระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวหน้า ด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสง โดยผ่านกระจก ลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (Photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะ เป็นลวดลายบนฟิล์มกระจกซึ่งได้มาจากการออกแบบ (Design) แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์ จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย(สีดำทึบ)แสงจะผ่าน ไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสง จึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง ซึ่งเมื่อนำฟิล์มนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนจะคงเหลือค้าง อยู่บริเวณผิว ของซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ ถูกสกัด หรือเอตซิงค์ (Etching) ด้วย"สารตัวสกัด" หรือเอตซันต์ (Etchant) เช่น กรดกัดแก้ว (HF) เป็นต้นซึ่งขั้นตอนของการเอตซันต์ (Etchant) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดหรือละลายชั้นออกไซด์ออกไปได้ ในที่สุดหลังจากนั้น เมื่อชั้น ของน้ำยาไวแสงถูก ลอกออก ก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยที่ลักษณะเป็น ลวดลายเหมือนกับลวดลายบนกระจกโฟโต้มาส์ค การเกิดภาพลวดลายได้ ก็เพราะชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไปนั่นเอง คล้ายกับการสกัดหินลำดับขั้นตอน พื้นฐานของกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีโดยทั่วไป

2.7.1.3 ชนิดของโฟโต้มาส์ค

จากเทคนิคของโฟโต้ลิโธกราฟี จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่ดี ของกระจกโฟโต้ มาส์คก็คือ จะต้องสร้างวัสดุโปร่งแสง หรือวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านได้ดี และจะต้องมีค่า สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนค่าต่ำๆ นอกจากนี้จะต้องเป็นวัสดุที่ แข็งแรง เรียบ และทนทานไม่เกิดความผิขรุขระ ของรวดลายของวงจรรวมซึ่งมีขนาดเล็ก มาก ซึ่งวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้และถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ แก้วควอทซ์(Quartz) หรือ แก้ว โบโรซิลิเกตชนิดพิเศษ (Borosilicate) สำหรับวัสดุที่เป็นลวดลาย หรือส่วนคำทึบ แสง บนแก้วควอทซ์ หรือกระจกแก้วควอทซ์ จะต้องมีความสมบัติไม่ให้แสงผ่านได้ ซึ่งอาจ เป็นวัสดุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี หรืออาจจะเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนแสงหรือรังสี ได้ดี วัสดุที่นำมาใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ น้ำยาไวแสง (Photo resist) ซึ่งมีลักษณะสีดำ ทึบ แสง และโลหะโครเมียม หรือเหล็กออกไซด์ ก็ถูกนำมาใช้เช่นกัน เพราะสามารถสะท้อน แสงได้ดี และมีความทนทานสูง โดยเฉพาะในงานวงจรรวมที่มีภาพลาย ละเอียดหรือเล็ก มากๆ เช่น VLSI

จากการพิจารณาความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้ป้องกันแสง เราอาจจัดแบ่งชนิด ของโฟโต้มาส์คได้เป็น 2 ชนิดคือ

- อิมูลชันมาส์ค (Emulsion mask) บางครั้งเรียกว่าซอฟมาส์ค (soft mask)
- เมทัลมาส์ค (Metal mask) บางครั้งเรียกว่าฮาร์ดมาส์ค (Hard mask)

อิมูลชันมาส์ค (Emulsion mask) ซึ่งเป็นมาส์คบริเวณที่บแสงจะใช้น้ำยาไวแสง หรือฟิล์มไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและไม่ให้แสงทะลุผ่าน ปกตินิยมใช้ในงาน การสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆไป รวมทั้งวงจรรวม และงานประภทวิจัย เพราะมี ราคาถูก และสามารถสร้างได้ง่าย แต่ข้อเสียก็คือ เสียหาย หรือมีรอยขีดข่วนง่าย มีความ ทนทานน้อยกว่าแบบเมทัลมาส์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทัลมาสก์ (Metal mask) ซึ่งเป็นมาสก์บริเวณที่บแสง จะใช้โลหะที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี แสงจึงไม่สามารถผ่านไปได้ วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ โครเมียม (Cr) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งสารแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติที่มีความแตกต่างกัน และมีการใช้งานต่างกัน มาสก์ชนิดนี้จะมีความแข็งแรง และทนทาน จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงๆ เช่นวงจรรวมระดับ VLSI และในงานอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการมาสก์ที่มีอายุการใช้งานสูง

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนา โฟโต้มาสก์ที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น โดยการนำเอาสารสองชนิดมาทำเป็นฟิล์มซ้อนกันหลายชั้น เช่น โครเมียม กับ โครเมียมออกไซด์ จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่า เมทัลมาสก์แบบธรรมดา เราเรียกโฟโต้มาสก์ชนิดนี้ว่า “คอมปาวด์มาสก์” (Compound Mask)

2.7.1.4 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นผลึก

การเตรียมผิวหน้าแผ่นผลึก

โดยปกติแล้วน้ำยาไวแสงจะถูกนำมาใช้งาน หรือถูกเคลือบบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด แล้วแต่งานที่ต้องการทำ เช่น ชั้นออกไซด์ ชั้นซิลิคอน ชั้นอะลูมิเนียม เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมผิวหน้าของแผ่นผลึก ก่อนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง บนผิวสารต่างกัน จะมีวิธีการเตรียมผิวที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม ผิวที่มีการใช้งานมากที่สุดก็คือ ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งการเตรียมผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำได้โดยเริ่มจาก การกำจัดความชื้น หรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในชั้นออกไซด์ เพราะโดยปกติผิวของชั้นออกไซด์นี้ จะมีการดูดซึมน้ำ หรือความชื้นจากอากาศได้ดี การกำจัดความชื้นทำได้โดยการอบ ซึ่งเรียกว่า ดีไฮเดรชันเบค dehydration bake ที่ใช้อุณหภูมิราว 200-250 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายหลังจากการอบ ถ้าหากมีการนำออกมาทิ้งไว้นานเกิน 1 ชั่วโมง ชั้นของออกไซด์ก็จะดูดความชื้นเข้าไปอีก จำเป็นจะต้องอบใหม่ใช้กระบวนการเดิมอีกที ดังนั้น เมื่อทำการอบเสร็จแล้วควรดำเนินการ เคลือบน้ำยาไวแสงต่อไปทันที นอกจากนี้ ก่อนที่เคลือบน้ำยาไวแสง อาจจะใช้สารพิเศษที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane (HMDS) ฉีดพ่น หรือ อบไอรระเหย เพื่อช่วยให้ผิวสามารถยึดติดกับน้ำยาไวแสงได้ดีขึ้น เพราะสารนี้จะช่วยกำจัดโมเลกุลของน้ำ ออกจากผิวของออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปในเครื่องสปินเนอร์ จะมีหัวฉีดสเปรของสาร HMDS แล้วปั่นหรือหมุน
แห้ง จากนั้นจึงทำการเคลือบชั้นน้ำยาไวแสง

วิธีการเคลือบชั้นน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์
หรือชั้นวัสดุอื่นๆ ที่อยู่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งแล้วแต่ความ
เหมาะสม หรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

1. แบบสปินเนอร์ (Spinner)

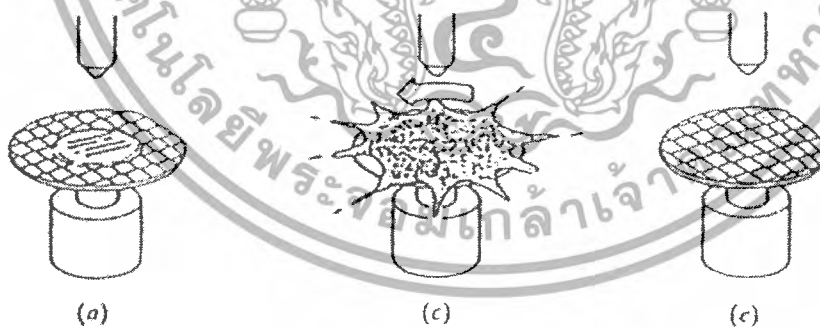
เป็นวิธีที่นิยมใช้งานมากที่สุด สำหรับการเคลือบน้ำยาไวแสง ลงบนแผ่นผลึก
วงกลมการเคลือบชั้นน้ำยาไวแสงวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือ สปินเนอร์
โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูก
วางบนแท่นหมุน และถูกยึดติดแท่นหมุนด้วยระบบสูญญากาศ จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูก
หยดลง บริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่เหมาะสม เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน
(Spin) ด้วยความเร็วรอบ 3000/6000 รอบต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที น้ำยาไว
แสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบๆ เป็นฟิล์มบาง เคลือบอยู่บนผิวของ
แผ่นผลึก ความหนาแน่นของฟิล์มสารไวแสงที่ได้ มีค่าทั่วไปประมาณ 1000 – 2000
อังสตรอม ถ้าความเร็วรอบต่ำเกินไป ชั้นของน้ำยาไวแสงจะหนามาก แต่ถ้าความเร็วรอบ
สูงๆ ความหนาชั้นของน้ำยาไวแสง จะไม่เท่ากัน โดยทั่วไปบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะ
หนามาก ในขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังฝุ่นเป็นพิเศษ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงทำภายในห้อง
สะอาด หรือ Clean Room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็ก
และจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยการใส่ระบบกรองฝุ่นแบบพิเศษใส่กล่องฝุ่นที่มี
ประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter) ระดับความสะอาดจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนฝุ่น
ละอองในอากาศ โดยปกตินิยมใช้ค่าความหนาแน่น ของฝุ่นละอองขนาด 0.5
ไมโครเมตรในปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรเป็นมาตรฐาน ค่าระดับความสะอาดของห้อง
สะอาดแสดงได้ในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

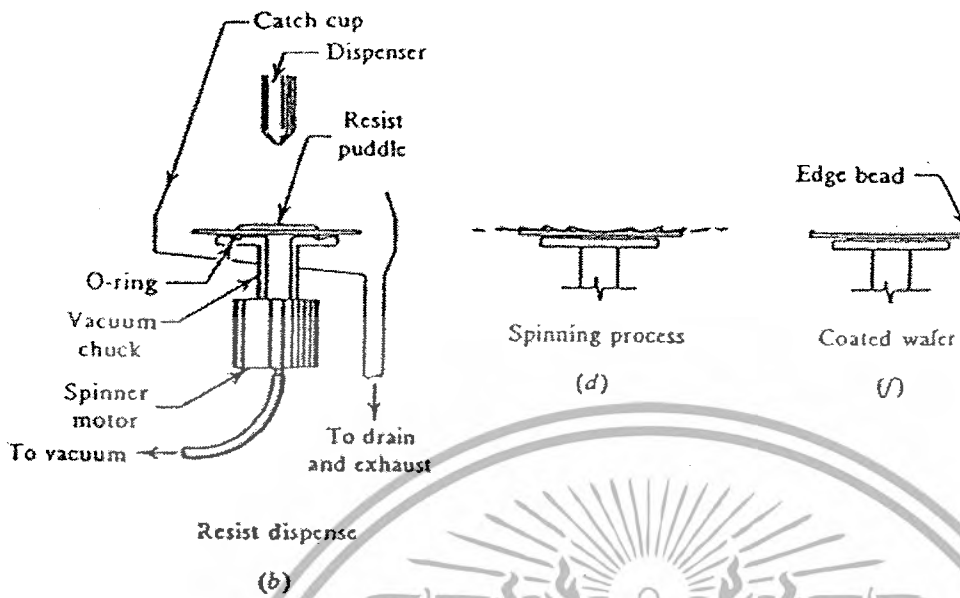
| Class | Number of 0.5 um particles/ft ³ (m ³) | Number of 5 um particles/ft ³ (m ³) |
|--------|--|--|
| 10,000 | 10,000 (350,000) | 65 (23,000) |
| 1,000 | 1,000 (35,000) | 6.5 (2,300) |
| 100 | 100 (3,500) | 0.65 (230) |
| 10 | 10 (350) | 0.065 (23) |
| 1 | 1 (35) | 0.0065 (2.3) |

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าของระดับความสะอาดของห้องสะอาด (Clean Room)

สำหรับอุปกรณ์สปินเนอร์ และลักษณะการทำงานแสดงในรูปที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์สปินเนอร์ซึ่งใช้เคลือบนำยาไวแสง

แบบสเปร (Spray Coating)

วิธีนี้นำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาเป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึกและจึงยึดเกี่ยวกันเป็นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรซึ่งง่ายและสะดวก แต่เหมาะสมกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มทำได้ยากปกติจะใช้งานในการสร้างชั้นตอนที่ไม่สำคัญ เช่นใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกันชั้นออกไซด์ด้านล่างของแผ่น

แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

การเคลือบนำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมทำ ในขั้นตอนของการ ตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนออกเป็น ไคซ์ หรือ ชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยนำยาไวแสงทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (Sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้นำยาไวแสงชนิดบว

การอบชั้น Pre bake หรือ Soft bake

หลังจากเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นฟิล์มไปอบ เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นตอนนี้เรียกว่า Pre bake หรือ Soft bake ซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 90 – 100 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้อุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อยที่ 80 – 90 องศาเซลเซียส การอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรือที่อุณหภูมิสูงเกินไป อาจจะทำให้เกิดความเสียหาย ต่อชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดปฏิกิริยาความร้อน หรืออาจจะไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ดังนี้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection oven) ซึ่งในตู้อบจะมีใบพัดเพื่อช่วยพัดให้อากาศร้อน จากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (Heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นฟิล์มทำให้แผ่นฟิล์มร้อน การอบนี้สามารถทำได้ที่หลากหลาย แผ่นได้พร้อมกัน โดยแผ่นฟิล์มจะถูกเก็บไว้ในกล่องควาสเซ็ทพิเศษ และวิธีการให้ความร้อนแบบนี้แผ่นฟิล์มจะให้ความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อนเข้าไปข้างใน จะทำให้เกิดการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ ซึ่งเป็นข้อเสียและไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

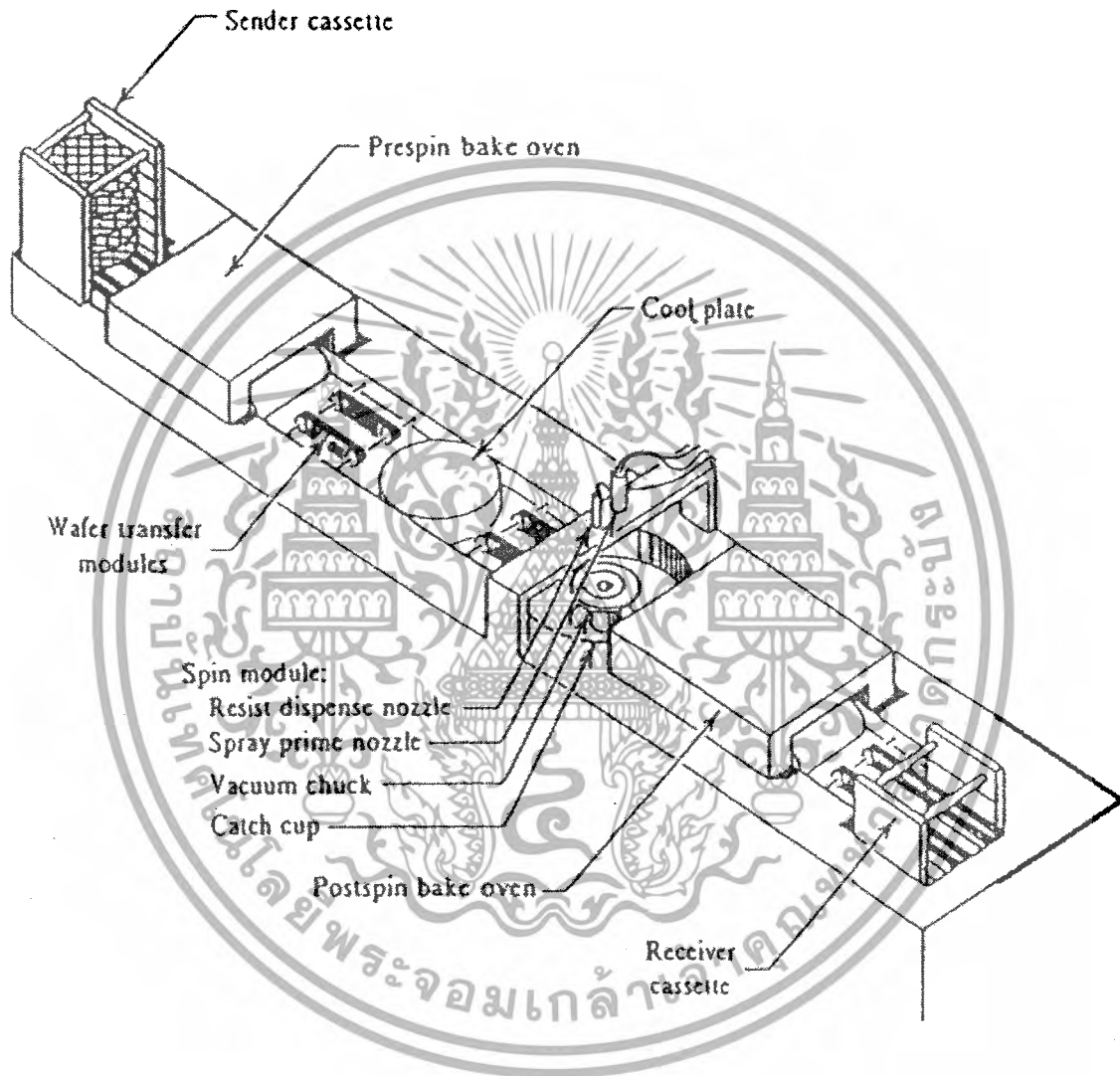
สำหรับในสายการผลิตวงจรรวม ในโรงงานอุตสาหกรรม นิยมอบแผ่นฟิล์มที่ละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการเช่นนี้ ฐานรองที่แผ่นฟิล์มซิลิกอนจะระดับความร้อนก่อน เพราะซิลิกอนมีคุณสมบัติ ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นฟิล์มซิลิกอน แล้วไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้ สามารถลดความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีการให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot plate) โดยนำแผ่นซิลิกอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจจะใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อน

เครื่องเคลือบน้ำยาไวแสงแบบ Spin Coater ชนิดอัตโนมัติ

ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบแสง บนแผ่นฟิล์มซิลิกอน จะมีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยไม่ผิดพลาด ดังนั้น ในสายการผลิตจึงนิยมใช้อุปกรณ์เครื่องเคลือบสารไวแสง บนแผ่นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้ก็เพื่อประสิทธิภาพในการผลิต และคุณภาพของผลผลิตที่ได้ อุปกรณ์ดังกล่าวอาจเรียกว่า “อโต้เมตเตด สปิน โค้ทเตอร์” (An Automated Spin-Coater) ซึ่งมีระบบการทำงาน ซึ่งมีระบบการทำงานดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่องเคลือบนำยาไวแสงแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ เริ่มจากบรรจุแผ่นผลึกซิลิกอนจำนวนหลายสิบแผ่น ซึ่งบรรจุในกล่องคาสเซต (cassette) ที่เรียกว่า "กล่องส่ง" (Sender Cassette) จะถูกนำไปวาง (loaded) ที่ปลายด้านหนึ่งของเครื่อง จากนั้นแผ่นผลึกจะถูกส่งออกมาที่ละแผ่นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตโนมัติ และถูกนำไปยังส่วนแผ่นร้อน" (Hot Plate) หรือระบบคลื่นไมโครเวฟก็ได้ แต่ส่วนใหญ่นิยมแบบรังสีอินฟราเรด การอบในขั้นตอนนี้เรียกว่า Prebake ทำเพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่นผลึก จากนั้นแผ่นผลึกจะถูกส่งไปยังส่วนทำให้เย็น (Cool Module) เพื่อให้ผิวแผ่นผลึกเย็นลงเป็นปกติก่อนที่จะนำไปเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยตัวหมุน (spin Module) โดยแผ่นผลึกจะถูกดูดด้วยสูญญากาศ ติดกับแท่นหมุนของสปินเนอร์ (spinner) จากนั้นขั้นตอนต่างๆของการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะเริ่มขึ้น ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.3

| Start Time (Sec) | Duration(Sec) | rpm | Dispense | Comment |
|------------------|---------------|------|----------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | - | Load wafer |
| 0 | 2 | 1000 | N ₂ | Blow off water |
| 2 | 10 | 500 | HMDS Spay | Apply primer |
| 12 | 10 | 3000 | - | Spin dry primer |
| 22 | 1 | 0 | - | Allow water to stop spinning |
| 23 | 3 | 0 | Resist | Dispense resist & let spread |
| 26 | 5 | 500 | - | Spread resist |
| 31 | 20 | 3000 | - | Spin resist |
| 51 | 0 | 0 | - | Unload wafer |

ตารางที่ 2.3 แสดงขั้นตอนต่างๆของการเคลือบน้ำยาไวแสง

แผ่นผลึกจะถูกพ่น ด้วยละอองของสารเตรียมผิว ที่เรียกว่า Hexa Methyl Disilazane หรือ HMDS เพื่อช่วยให้ชั้นสารไวแสง ติดกับผิวของผลึกได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นน้ำยาไวแสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก และแผ่นผลึกจะถูกหมุนด้วยความเร็วสูง น้ำยาไวแสงจะกระจายออกไปโดยรอบและเป็นฟิล์มบางเคลือบผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึก ต่อจากนั้น แผ่นผลึกจะถูกส่งไปยังส่วนให้ความร้อน หรือ Second เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bake module เพื่อทำการอบแผ่นสลิก ทำให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า post baking หรือ soft baking เมื่ออบเสร็จแล้ว แผ่นสลิกจะถูกส่งเข้าไปไว้ในกล่องเก็บ (Cassette) ด้านทางออกเรียกว่า”กล่องรับ” (Receiver cassette) การทำงานทุกขั้นตอนที่กล่าวมา จะเป็นไปโดยอัตโนมัติและต่อเนื่อง ด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้ได้แผ่นสลิกที่ถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงประมาณนาทีละ 1 แผ่นสลิก การกำหนดหรือควบคุมอุณหภูมิ และเวลาของขั้นตอนต่างๆสามารถทำได้โดยระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้อุปกรณ์ มีความคล่องตัวสูงมาก อุปกรณ์บางเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูงอาจประกอบด้วยชุดทำงานดังกล่าวถึง 3 ชุดหรือที่เรียกว่า”3 Tracks Spin Coater”ดังแสดงในรูปที่ 6.4.10 ซึ่งปลายด้านซ้ายมือบนเครื่อง จะสังเกตเห็น Sender wafer cassette บริเวณตอนกลางจะเป็นส่วน Spinner และด้านขวามือสุด เป็นที่วาง Receiver wafer cassette อุปกรณ์ดังกล่าวควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งระบบการทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า”ระบบ Cassette to Cassette Coater”

2.7.2 การปรับซ็อนมาสก์และการฉายแสง (Mask Alignment and Exposure)

การปรับซ็อนมาสก์

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาสก์ ซึ่งโดยปกติจะถูกวางทาบทับ ลงไปบนแผ่นสลิก ที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่กระจกโฟโตมาสก์ชิ้นแรก หรือ มาสก์ที่ 1 สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ็อนมาสก์ ทั้งนี้เนื่องจาก ยังไม่ได้มีการสร้างส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจรรวม บนแผ่นสลิกเลย แต่ในกรณีที่แผ่นสลิกนั้น ได้ผ่านการสร้างแผ่นวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่ต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้องเพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามทีออกแบบไว้

ดังนั้นการใช้กระจกโฟโตมาสก์ ตั้งแต่มาสก์ที่ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสง จำเป็นจะต้องมีการปรับซ็อนมาสก์ เพื่อให้แบบลวดลายบนกระจกมาสก์ ซ็อนกับแบบลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นสลิกอย่างถูกต้อง ในที่สุดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ ที่ตำแหน่งที่ถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามทีออกแบบและถูกต้องอย่างไรก็ดี เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในการปรับซ็อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า “ตัวปรับซ็อนมาสก์” (Mask aligner) ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ แผ่นสลิกจะถูกวางและติดไว้กับแท่นเลื่อน (x-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

y-z table) ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้ง แนว x,y และ z นอกจากนี้ยังสามารถปรับหมุนแผ่นผลึกได้ โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 6.4.11

ส่วนกระจกโฟโตมาส์ก จะถูกยึดให้อยู่หนึ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลาย ที่ปรากฏทั้งบนแผ่นและบนโฟโตมาส์ก พร้อมกับทำการปรับเลื่อนแผ่นผลึกทั้งแกน x,y และมุม

จนกระทั่ง ภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์กซ้อนกันตรงตำแหน่ง ที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นผลึกเลื่อนสูงขึ้นในแกน z จนแนบสนิท กับกระจกโฟโตมาส์ก ในกรณีที่ภาพลวดลาย มีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้ จะสามารถทำได้โดยการสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไปภาพลวดลายของวงจรรวม มีขนาดเล็กมาก

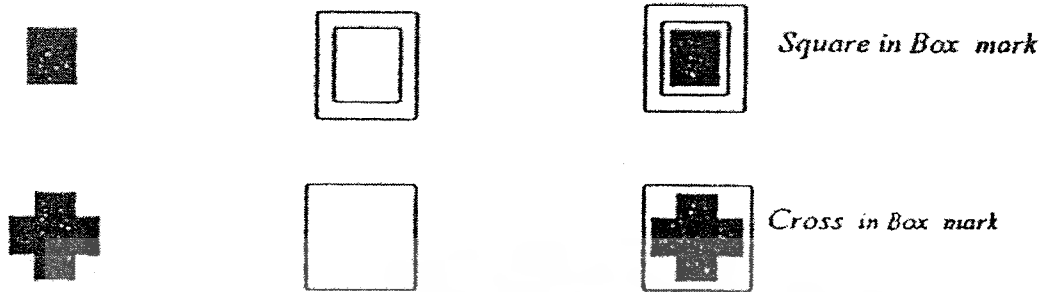
รูปที่ 2.16 แสดงแผ่นผังของอุปกรณ์ “เครื่องปรับซ้อนมาส์ก”

นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วย จึงเป็นการยาก ที่จะทำการปรับซ้อนโดยการสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับซ้อนทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาส์กโดยเฉพาะ และเรียกว่า “เครื่องหมายปรับซ้อน” (Alignment mark) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งอาจจะเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม (Square in box) , กากะบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากะบาท เช่น ภาพลวดลายในแผ่นผลึกของ “ เครื่องหมายปรับซ้อน” เป็นรูป จตุรัส และภาพลวดลาย บนกระจกมาส์ก เป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยม เป็นต้น

ภาพถ่ายบนแผ่นฟิล์ม

ภาพถ่ายบนกระจกมาส์ก

ภาพถ่ายเมื่อปรับชั้นแล้ว

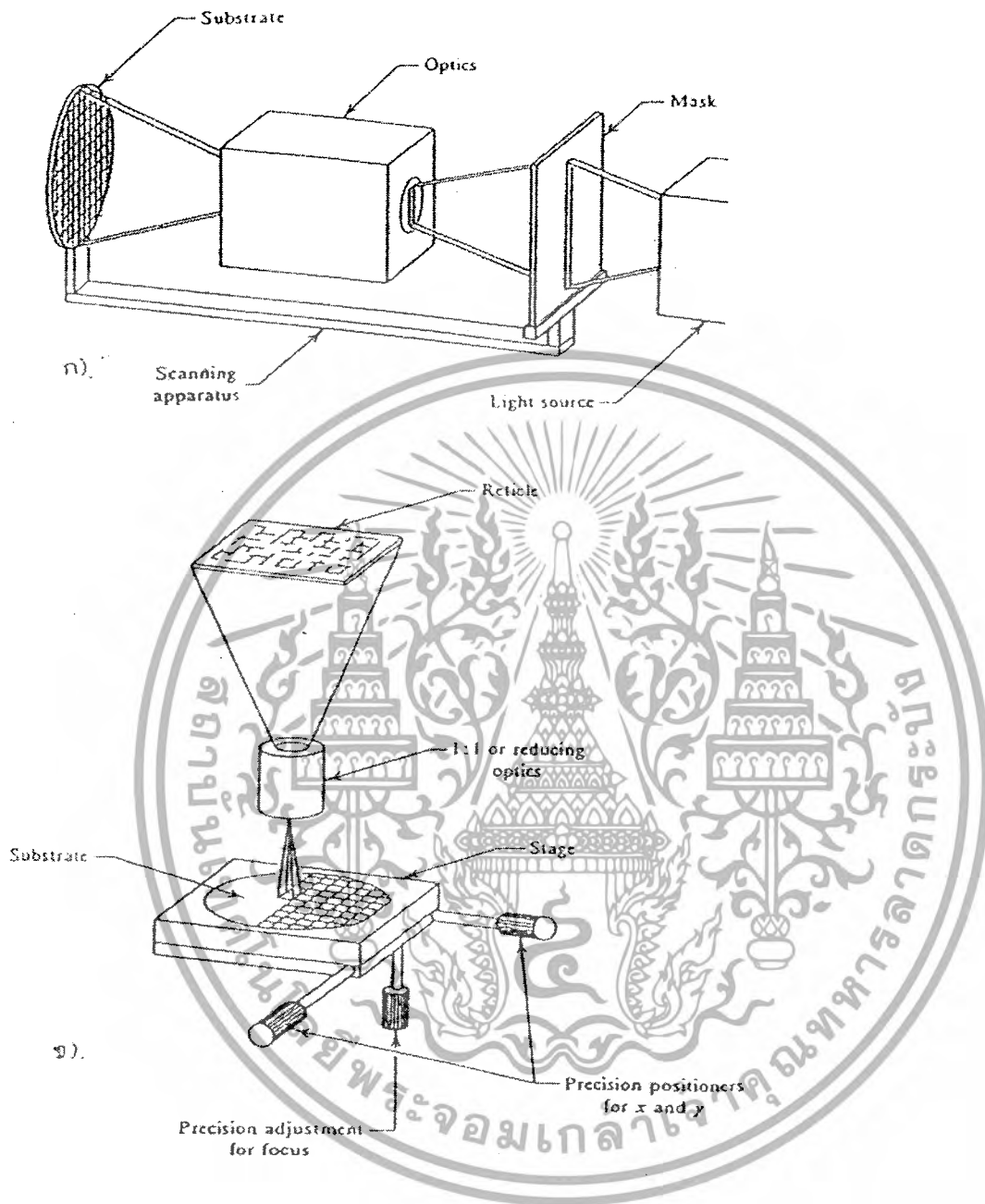


รูปที่ 2.17 ภาพลวดลายเครื่องหมายปรับชั้น (Alignment mark)

การปรับชั้นทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นฟิล์ม บนแท่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ได้ภาพ จตุรัส เข้าไปซ้อนอยู่พอดี ภายในภาพกล่องสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 6.4.13 ในตำแหน่งนี้ภาพลวดลายของวงจรรวมในแผ่นฟิล์ม และบนกระจกโฟโตมาส์ก จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ถูกทุกประการ ถ้าหากการปรับชั้นตำแหน่งผิดพลาด โครงสร้างของวงจรรวมก็จะไม่ถูกต้อง และเกิดการเสียหายได้ขั้นตอนของการปรับชั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก การพิมพ์ ด้วยการใช้กระจกโฟโตมาส์ก มาวางทับลงไปบนแผ่นฟิล์มๆ ให้แนบสนิทแล้วฉายแสง ซึ่งเรียกว่าวิธี Contact Printing ดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่า มีการสัมผัสกันระหว่างแผ่นฟิล์ม และกระจกโฟโตมาส์ก ซึ่งอาจทำให้เกิดรอยขีด เกิดสิ่งสกปรก หรือความเสียหายต่างๆ ได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีวิธีการพิมพ์ แบบอื่นๆ เช่น วิธี Proximity Printing หรือวิธี Projection Printing ซึ่งกระจกโฟโตมาส์ก จะไม่สัมผัส กับผิวหน้าของแผ่นฟิล์มเลยจึงช่วยลดความเสียหายต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นได้

สำหรับวิธีการ Projection Printing อาจทำได้ 2 แบบ Whole-substrate Projection Printing ซึ่งเป็นการพิมพ์ ภาพวงจรรวม ลงบนแผ่นฟิล์ม ทั้งหมดครั้งเดียว และ แบบ Step and Repeat Projection ซึ่งเป็นการพิมพ์ภาพวงจรรวมทีละภาพๆ ลงบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งการพิมพ์วิธี Projection Printing นี้ ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวมแต่ อุปกรณ์ ที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูงมากราคาของเครื่องค่อนข้างสูง หลักการทำงานของอุปกรณ์ Projection Printing ทั้งสองแบบ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 หลักการทำงานของอุปกรณ์ Projection Printing ทั้งสองแบบ

2.7.3 การฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ้อณภาพระหว่างกระจกโฟโต้มาสก์ และแผ่นผลึกเรียวเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การฉายแสง ผ่านกระจกโฟโต้มาสก์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี - แสงขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ชั้นน้ำยาไวแสง ปกติน้ำยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม จะมีความไวต่อแสง ที่มีความยาวคลื่น (λ) ในช่วง 300-500 นาโนเมตร ซึ่งก็คือแสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี จึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นเกิน 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง แต่ถ้าเป็นฟิล์มถ่ายรูปจะต้องใช้แสงในห้องที่มีสีแดงเท่านั้น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กัน โดยทั่วไป ได้มาจากหลอดไอปรอท (Mercury Vapor Lamp) ซึ่งหลอดนี้ จะให้เส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มสูง ที่ความยาวคลื่นราว 310,365,405 และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 นาโนเมตร จากสเปกตรัมของแสง ความยาวคลื่นประมาณ 400 nm ถูกเรียกว่า Near Ultraviolet wave lengths หรือ Near U.V. ซึ่งเป็นแสง สำหรับเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีโดยทั่วไป สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า Far Ultraviolet wave lengths หรือ Far UV. จากการศึกษาพบว่า การพิมพ์ที่มีขนาดเล็กๆ จำเป็นต้องใช้แสง ที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่น ขนาดราว 2 ไมโครเมตร ต้องใช้คลื่น Far U.V. ดังนั้นในวงจรรวมระดับ VLSI ที่มีขนาดอุปกรณ์เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จึงต้องใช้แสงประเภท Far U.V. ซึ่งมีความยาวคลื่นราว 100-200 nm ความสัมพันธ์ของขนาดความละเอียดของวงจรรวม และความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ยิ่งไปกว่านี้ ยังสามารถใช้คลื่นรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอน มาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลาย วงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า "เอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟี" (X-Ray Photolithography) และ Electron-beam lithography ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม น้ำยาไวแสงที่จะต้องใช้จะต้องแตกต่างจากธรรมดาเพราะรังสีเอ็กซ์ และลำอิเล็กตรอน มีพลังงานสูงกว่าแสง Near U.V. ที่ใช้น้ำยาไวแสงปกติ

2.7.4 การล้างน้ำยาไวแสง (Resist Development)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการล้างฟิล์ม (Development) ละลาย หรือล้างน้ำยาไวแสง ที่ผ่านการฉายแสงมาแล้ว ถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกละลายออก แต่ถ้ากรณีน้ำยาไวแสงชนิดบวก ส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายออกไป

การล้างน้ำยาไวแสงนี้ ถ้าเป็นกรณีน้ำยาไวแสงชนิดลบ จะใช้วิธีการพื้นฐานคือ นำแผ่นผลึกไปหมุนบนสปินเนอร์ (Spinner) คล้ายกับการเคลือบน้ำยาไวแสง โดยขณะที่แผ่นผลึกกำลังหมุน น้ำยาล้างจะถูกฉีดพ่นลงบนแผ่นผลึก น้ำยาไวแสงที่ถูกละลายก็จะถูกแรงเหวี่ยงกระจายออกไปรอบๆ จากนั้นล้างแผ่นผลึกให้สะอาดด้วยสารละลายอื่นๆ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับล้างน้ำยาไวแสง

ในกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดบวก อาจทำได้ครั้งละหลายๆ แผ่นพร้อมกัน โดยจุ่มลงในน้ำยาล้างหรืออาจใช้วิธีการฉีดพ่นน้ำยาล้าง คล้ายกับวิธีการล้างน้ำยาไวแสงชนิดลบ

2.7.5 การเอตซิงค์ (Etching)

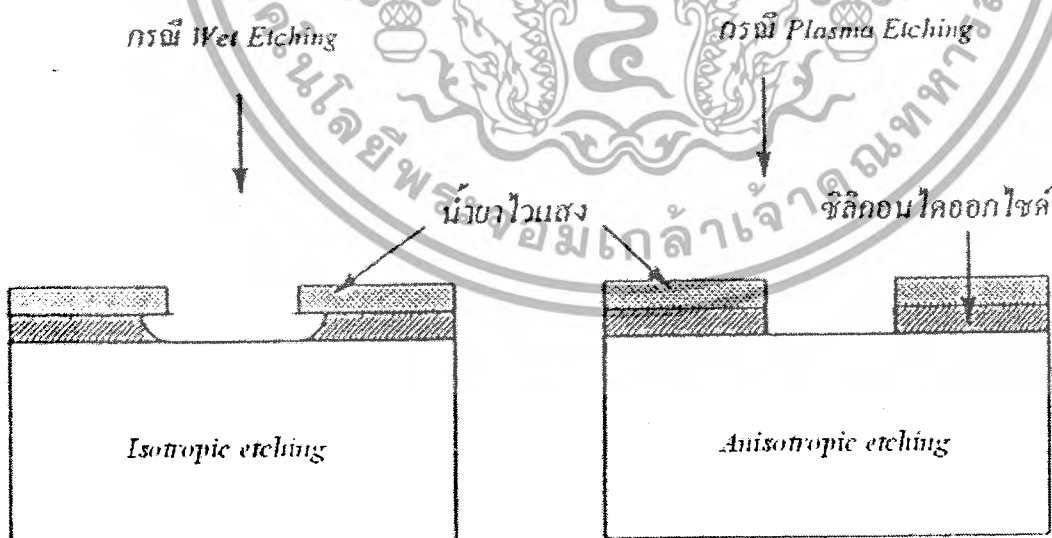
ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการกัดหรือละลาย ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ หรือวัสดุอื่นๆ ด้วย สารเคมีที่เป็น สารตัวกัด หรือเอตเชนท (Etchant) โดยที่แผ่นผลึก ที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง (Development) แล้วน้ำยาไวแสงจะเหลือตกค้าง และปกคลุมอยู่บนผิว ของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์และบางส่วนก็ถูกละลายออกไป ทำให้ชั้นออกไซด์ บริเวณที่ไม่มีสารไวแสงเหลืออยู่ ถูกทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตัวกัด (Etchant) เช่นกรดกัดแก้ว (HF) ก่อนการเกิดเอตซิงค์ หรือก็คือ ภายหลังการล้างน้ำยาไวแสง แผ่นผลึกจะถูกนำไปอบ (Post bake หรือ Hard bake) เพื่อใช้ชั้นน้ำยาไวแสง แห้งสนิท และยึดติดแน่นกับผิวของออกไซด์ วิธีการการกัดชั้นหรือสารหรือ ชั้นออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของสารตัวกัด (Etchant) ที่เป็นสารละลายเคมีนี้ ถูกเรียกว่า “wet chemical etching” หรือ “wet etching” หรือ การเอตซิงค์เปียก

นอกจากนี้การกัด หรือเอตซิงค์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาของพลาสมา (plasma) วิธีการนี้ถูกเรียกว่า “พลาสมาเอตซิงค์” หรือ “Plasma etching” ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า Day etching หรือ “การเอตซิงค์แห้ง” การเอตซิงค์แบบเปียก จะทำให้เกิดมีการละลายของชั้นสารออกไปในทุกๆด้านรวมทั้ง ทางด้านข้างด้วย ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณขอบของชั้นสาร ถูกสกัดออกไป การเอตซิงค์ในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ “Isotropic-type” ส่วนการเอตซิงค์ แบบแห้งหรือ Plasma etching จะได้ผลการเอตซิงค์แบบ “แอนไอโซโทรปิกเอตซิงค์” หรือ Anisotropic-type ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะของลวดลายที่คมชัดกว่า การเอตซิงค์แบบเปียก และภาพลวดลายไม่ผิดเพี้ยนจากต้นแบบ ซึ่งวิธีการนี้ ถูกนำมาใช้กับลวดลายที่มีขนาดเป็นซับไมโครเมตร โดยที่การเอตซิงค์แบบเปียกไม่สามารถนำมาใช้ได้

อัตราการเอตซิงค์แบบเปียก (Wet etching) จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารตัวสกัด (Etchant) และอุณหภูมิที่ใช้ ในการเอตซิงค์ สารละลายซึ่งเป็นสารตัวสกัด ชั้นออกไซด์ได้แก่ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งจะมีแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ผสมอยู่เพื่อควบคุมปฏิกิริยาเคมีให้สม่ำเสมอ อัตราการสกัด (Etching rate) ประมาณ 1000 Å/min ที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากทำการเอตซิงค์แล้ว ชั้นของรารน้ำยาไวแสงถูกลอกออก ด้วยการนำไปจุ่มในสารละลายที่ใช้สำหรับ การลอกฟิล์มหรือต้มในกรดบางชนิดเช่น กรดน้ำยาไวแสงชนิดลบใช้ต้มในกรดซัลฟูริกเข้มข้นและชนิดบวกใช้จุ่มล้างในสารอะซีโตน (Acetone) สำหรับกรณีของซับไมครอน นิยมใช้วิธีการของพลาสมาเอตซิงค์ Plasma etching ซึ่งจะทำให้ได้ผิวหน้าที่สะอาด และเรียบร้อย ไม่มีชั้นของน้ำยาไวแสง หลงเหลือ หรือติดค้างอยู่เลย



รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการ Wet Etching และ Plasma Etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

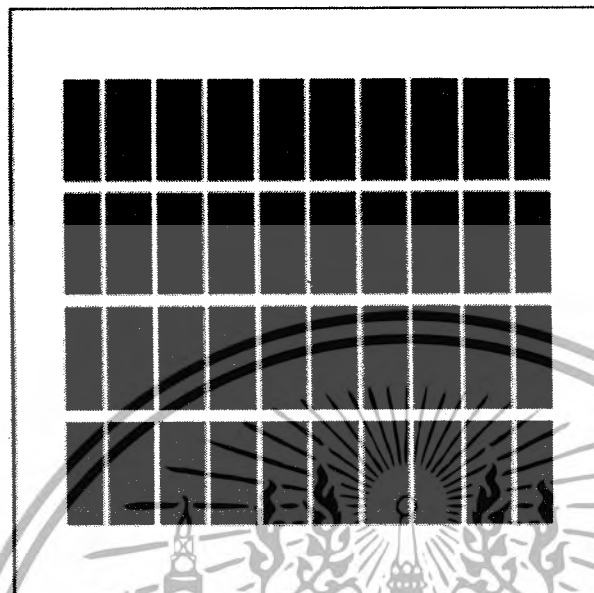
การออกแบบและการสร้าง

การที่อุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรจะมีประสิทธิภาพการทำงานสูงนั้นนอกจากจะขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์แล้ว การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ก็เป็นส่วนที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างแล้ววิธีการสร้างอุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าเพชร ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร

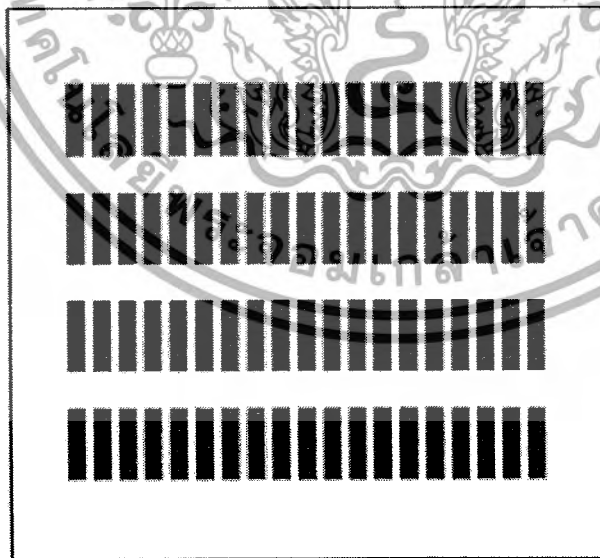
ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรเกิดจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะ กับสารกึ่งตัวนำเพชรชนิด P ที่มีรอยต่อแบบโอห์มมิก เพื่อไม่ให้เกิดศักดาตกคร่อมระหว่างรอยสัมผัส การสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรได้ใช้เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ซิลิกอนเป็นฐานรองสำหรับการสังเคราะห์เพชร ทำให้ฟิล์มเพชรที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีความหนามาก เนื่องจากใช้ฐานรองซิลิกอนทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร ในการออกแบบนี้ได้กำหนดใช้ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรสำหรับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โดยน้ำจะมีการไหลผ่านขั้วไฟฟ้าเพชรตลอดเวลา ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ใช้มาร์คในการสร้างทั้งหมด 2 มาร์ค ประกอบด้วย มาร์คกำหนดพื้นที่ฟิล์มเพชร และมาร์คกำหนดพื้นที่การกัดชั้นซิลิกอน

3.1.1 มาร์คกำหนดพื้นที่ฟิล์มเพชร 4 mm.*1.39 mm.



รูปที่ 3.1 แสดงมาร์คกำหนดพื้นที่ฟิล์มเพชร

3.1.2 มาร์คกำหนดพื้นที่การกักชั้นซิลิกอนขนาด 3.0 mm.*0.7 mm.



รูปที่ 3.2 แสดงมาร์คกำหนดพื้นที่การกักชั้นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบไดอะแฟรม

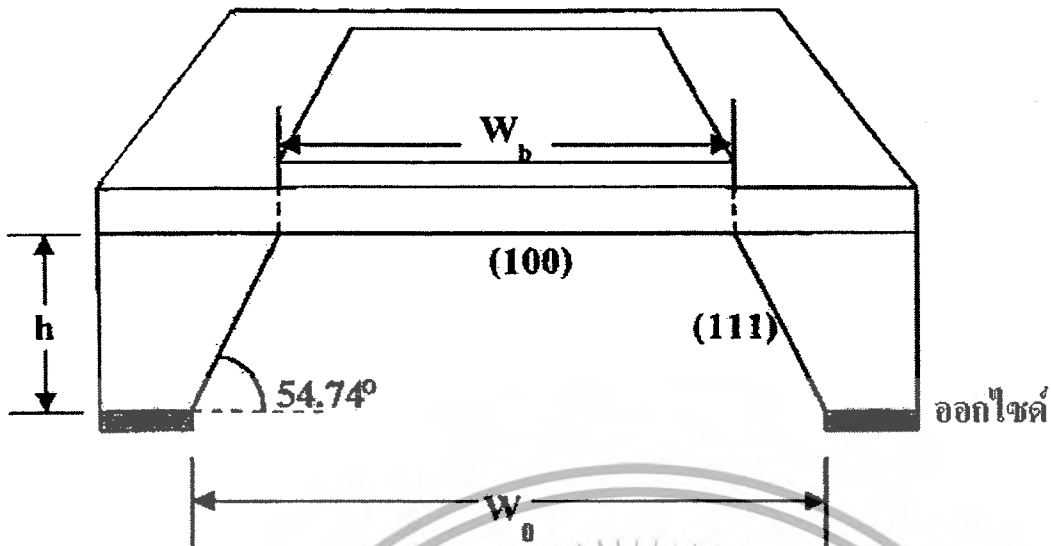
โครงสร้างของอุปกรณ์อุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าเพชรประกอบด้วยไดอะแฟรมบางของฟิล์มเพชรเป็นส่วนสำคัญ ด้วยเหตุนี้การกัดซิลิคอนบางส่วนออกเพื่อให้เหลือเป็นไดอะแฟรมของฟิล์มเพชรจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ ไดอะแฟรมของฟิล์มเพชรเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ออกโดยสารละลายที่มีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) คือการกัดที่ตัวกัด (etchant) ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายจะกัดเนื้อสารในทิศทางหรือระนาบต่างๆ ของผลึกไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูป 3.4

ดังนั้นการออกแบบปากหลุมจึงมีความสัมพันธ์กับความกว้างของก้นหลุม ถ้าเปิดปากหลุมกว้างเท่ากับ W_0 และทำการกัดได้ลึกเท่ากับ h จะได้ขนาดความกว้างก้นหลุม W_b ดังสมการ

$$W_b = W_0 - \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \approx W_0 - \sqrt{2}h \quad (3.1)$$

ถ้าต้องการความกว้างก้น 2406 ไมครอน และแผ่นซิลิคอนมีความหนา 420 ไมครอน ดังนั้นต้องเปิดปากหลุมเท่ากับ $W_0 = 2406 + \sqrt{2}(420) = 3000$ ไมครอน

ในการทดลองเราใช้สารละลายที่เกิดจากการผสมระหว่างเอซีลินไดอะมี (Ethylenediamine) กับไพโรแคตอล (Pyrocatechol) และน้ำบริสุทธิ์ (DI water) หรือที่นิยมเรียกว่า EPD โดยมีอัตราส่วน E 50 ml : P 8 กรัม : DI 16 ml ทำการกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กวนสารละลายด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที มีอัตราการกัดซิลิคอนประมาณ 1.50 ไมครอนต่อนาที ใช้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 7000 อังสตรอม เป็นชั้นป้องกันการกัดซิลิคอน โดยสารละลาย EPD จะไม่กัดฟิล์มเพชร



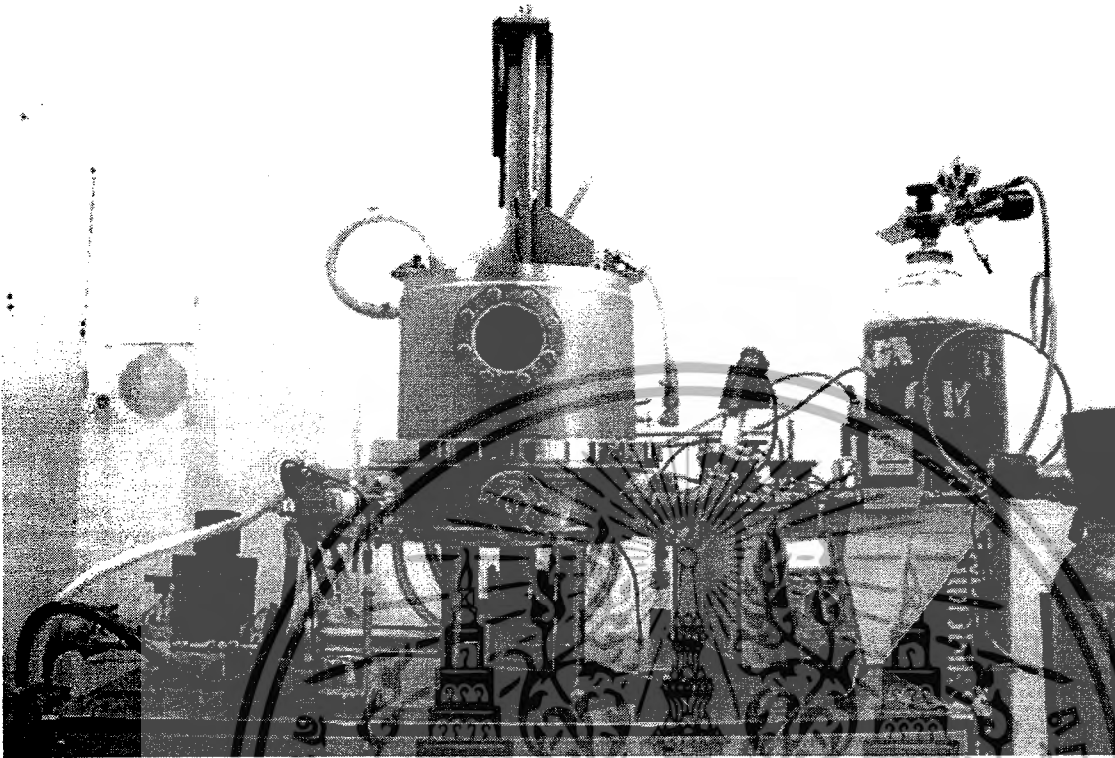
รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

3.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ฟิล์มเพชรถูกสังเคราะห์บนฐานรองซิลิคอนด้วยวิธีการ CVD แบบลวดความร้อน ที่ความดันต่ำ รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสร้างฟิล์มเพชร ฟิล์มเพชรสร้างบนฐานรองซิลิคอนโดยใช้แหล่งจ่ายเป็นไฮโดรเจนของก๊าซมีเทน (CH_4) สำหรับฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิกและผสมด้วยสารละลายโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) สำหรับสร้างฟิล์มเพชรชนิดเอ็กทรีนซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



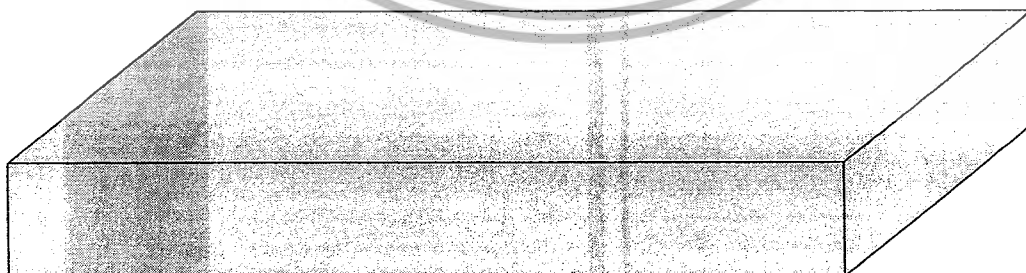
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

3.3.2 กระบวนการสร้าง

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร

3.3.2.1 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

นำแผ่นซิลิคอนระนาบ 100



รูปที่ 3.5 แผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 สร้างชั้นออกไซด์

ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้เป็นหน้ากักป้องกันการซึดข่วนบนผิวของซิลิคอนทั้งด้านหน้าและด้านหลัง สร้างที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

ออกไซด์แบบ DRY หนาประมาณ 2,000 อังสตรอมที่ความร้อน 1000 °C เพื่อเป็นชั้นป้องกันการกัดด้วยสารเคมีในขั้นตอนการสร้างไดอะแฟรม หนาประมาณ



รูปที่ 3.6 สร้างชั้นออกไซด์

3.3.2.3 ลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้า

ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าแผ่น เพื่อเข้าสู่กระบวนการต่อไป

- อบแผ่น ไล่ความชื้นที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
- ทาหน้ายา ไวแสง (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

ใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแผ่นให้แห้งด้วยไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

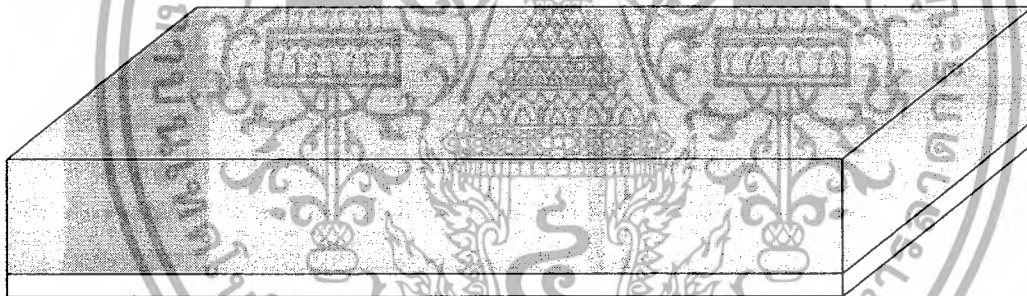
กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

- อุลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นก็กัดด้วยน้ำยาคัดแก้ว แล้วขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน



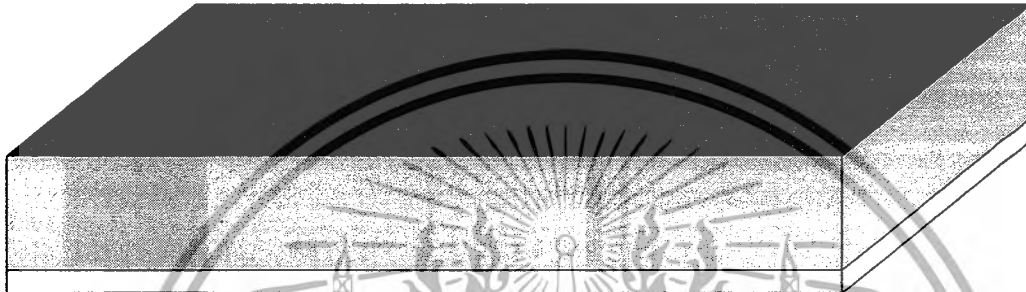
รูปที่ 3.7 ลอกชั้นออกไซด์ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.4 สร้างซิลิคอนไนไตรด์

นำแผ่นซิลิคอนมาสร้างมาร์ค ทำแบบนี้ทั้งข้างบนและข้างล่าง

3.3.2.4.1 สร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้านบน



รูปที่ 3.8 สร้างซิลิคอนไนไตรด์ด้านบน

3.3.2.4.2 สร้างมาร์คด้านบน

การเปิดช่องไนไตรด์ เป็นการเปิดช่องไนไตรด์เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หรือโฟโตเอ็ดจิงค์ โฟโตลิโทกราฟี Mask#1

- อบแผ่นไต่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที
- ฉายแสง

Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียสเวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นไนโตร เพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

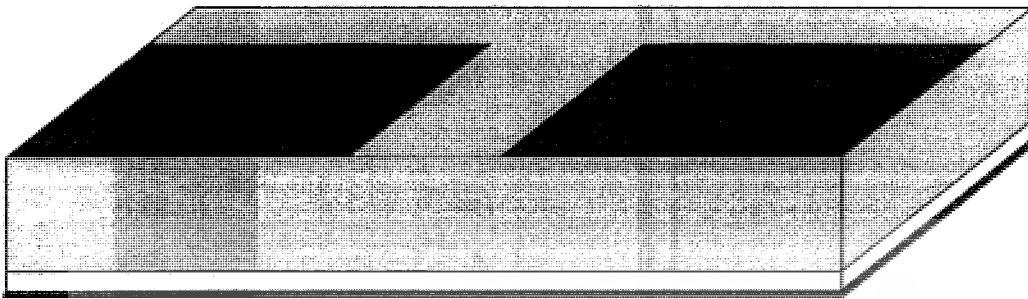
- จุ่มในสารละลายบัพเฟอร์
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.9 สร้างมาร์คด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.4.3 สร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง



รูปที่ 3.10 สร้างซิลิคอนไนไตรต์ด้านล่าง

3.3.2.4.4 เปิดชั้นไนไตรต์ด้านล่าง

การเปิดช่องไนไตรต์ด้านล่างเป็นการเปิดช่องไนไตรต์เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโตเอตซิงค์ ใช้โฟโตลิโธกราฟี Mask#2

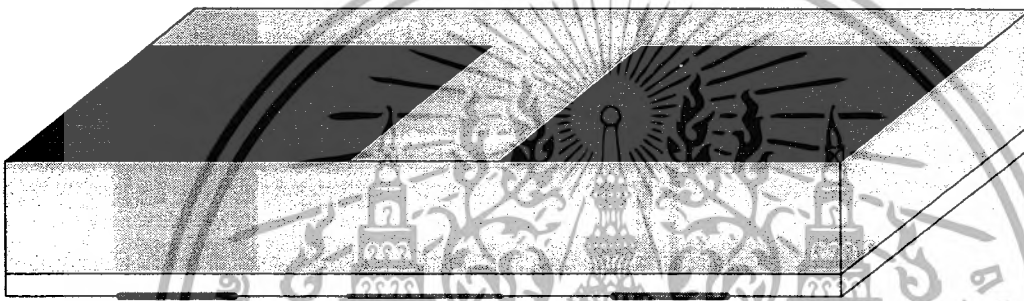
- อบแผ่นไถ่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที
- ฉายแสง

Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียสเวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
- การใช้สารละลายสกัดชั้นไนโตร เพื่อสร้างชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์
- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์
 - จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 1
 - จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 2
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

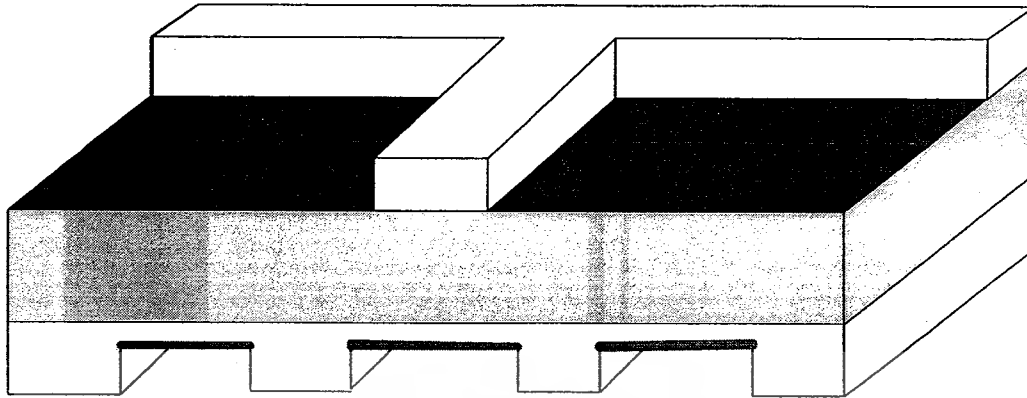


รูปที่ 3.11 สร้างมาร์คด้านล่าง

3.3.2.5 สร้างชั้นออกไซด์

จากนั้นสร้างออกไซด์แบบ DRY 30 นาที และ WET 10 ชั่วโมง เพื่อให้เป็นพื้นที่ที่ครอบคลุมแผ่นที่เป็น silicon จะมีความหนาของออกไซด์ 3 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 สร้างชั้นออกไซด์

3.3.2.6 กัดชั้นไนไตรด์ออก

หลังจากนั้นทำการกัดไนไตรด์ออก เพื่อจะสังเคราะห์ฟิล์มเพชร พื้นที่ที่เป็นซิลิคอน การเปิดช่องไนไตรด์ เป็นการเปิดช่องไนไตรด์เพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หรือโฟโตเอตซิงค์ โฟโตลิโทกราฟี Mask#1

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที
- ฉายแสง

Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 นาที
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มลงในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียสเวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้สารละลายสกัดชั้นไนโตร เพื่อสร้างชั้นซิลิโคนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลายบัพเฟอร์
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มลงในสารละลาย H_3PO_4 อุณหภูมิเตา 350 องศาเซลเซียส จนไนโตรหมด
- จุ่มน้ำ DI อุณหภูมิ แก้วที่ 1
- จุ่มน้ำ DI อุณหภูมิ แก้วที่ 2
- จุ่มน้ำ DI แก้วที่ 3
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

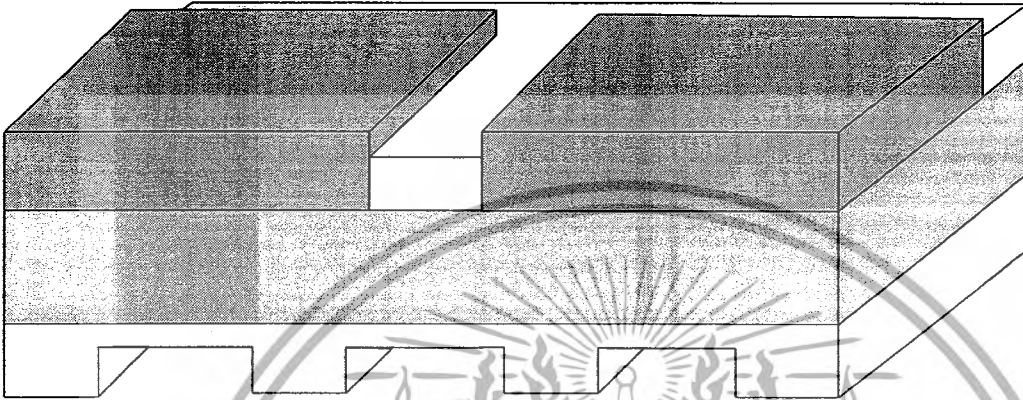


รูปที่ 3.13 กัดชั้นไนโตรออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.7 สังกะระห์ฟิล์มเพชร

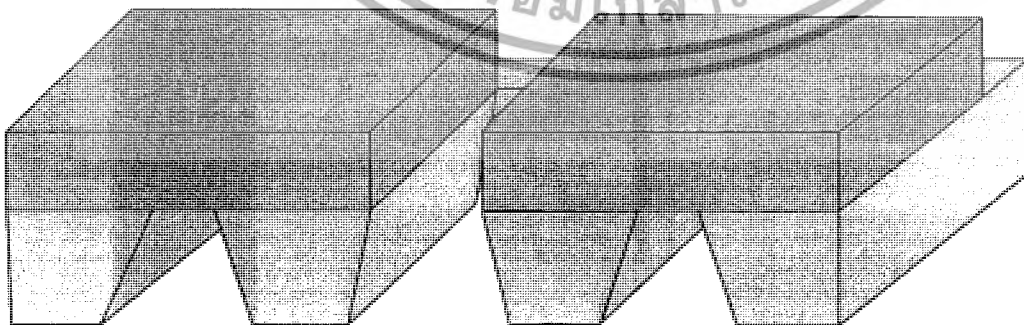
แล้วนำไปสังกะระห์ฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง CVD แบบลวดความร้อนให้ได้ความหนาฟิล์มเพชร 5 ไมครอนใช้เวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3.14 สังกะระห์ฟิล์มเพชร

3.3.2.8 การกัดไดอะแฟรม

นำฟิล์มเพชรที่สังกะระห์ได้มากัดไดอะแฟรมตามทีออกแบบไว้ด้วยสารละลาย EPD โดยมีชั้นออกไซด์เป็นตัวป้องกันส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยากัด



รูปที่ 3.15 กัดซิลิคอนออกเหลือแต่ไดอะแฟรมฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.9 การเคลือบโลหะอลูมิเนียม

นำฟิล์มเพชรที่กัดเป็นไดอะแฟรมเรียบร้อมแล้วมาสร้างรอยต่อขอตัดที่บริเวณด้านล่าง โดยใช้วิธีการเคลือบโลหะอลูมิเนียมในสุญญากาศ จากนั้นนำไปซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.16 การเคลือบโลหะอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรในการทดลองนี้ใช้วิธีการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ ฟิล์มเพชรถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอน โดยรายละเอียดวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรแสดงในหัวข้อต่อไป

4.1.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน

ฟิล์มเพชรถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิคอนที่ทำการขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชร สาเหตุที่ต้องขัดผิวหน้า เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดนิวเคลียสของผลึกเพชร โดยการเกิดเพชรจะเริ่มต้นเกิดที่รอยขัดก่อนจากนั้นจึงเริ่มขยายขึ้นเรื่อยๆ การสร้างฟิล์มเพชรในการทดลองนี้เราใช้ฐานรองเป็นซิลิคอนระนาบ (100) ขัดผิวหน้าด้วยครีมเพชรขนาด 0.25 ไมครอน ภาพซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าแล้วแสดงในรูปที่ 4.1 จากนั้นจึงนำซิลิคอนที่ขัดผิวหน้าเรียบร้อยแล้วไปเข้าเครื่องสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

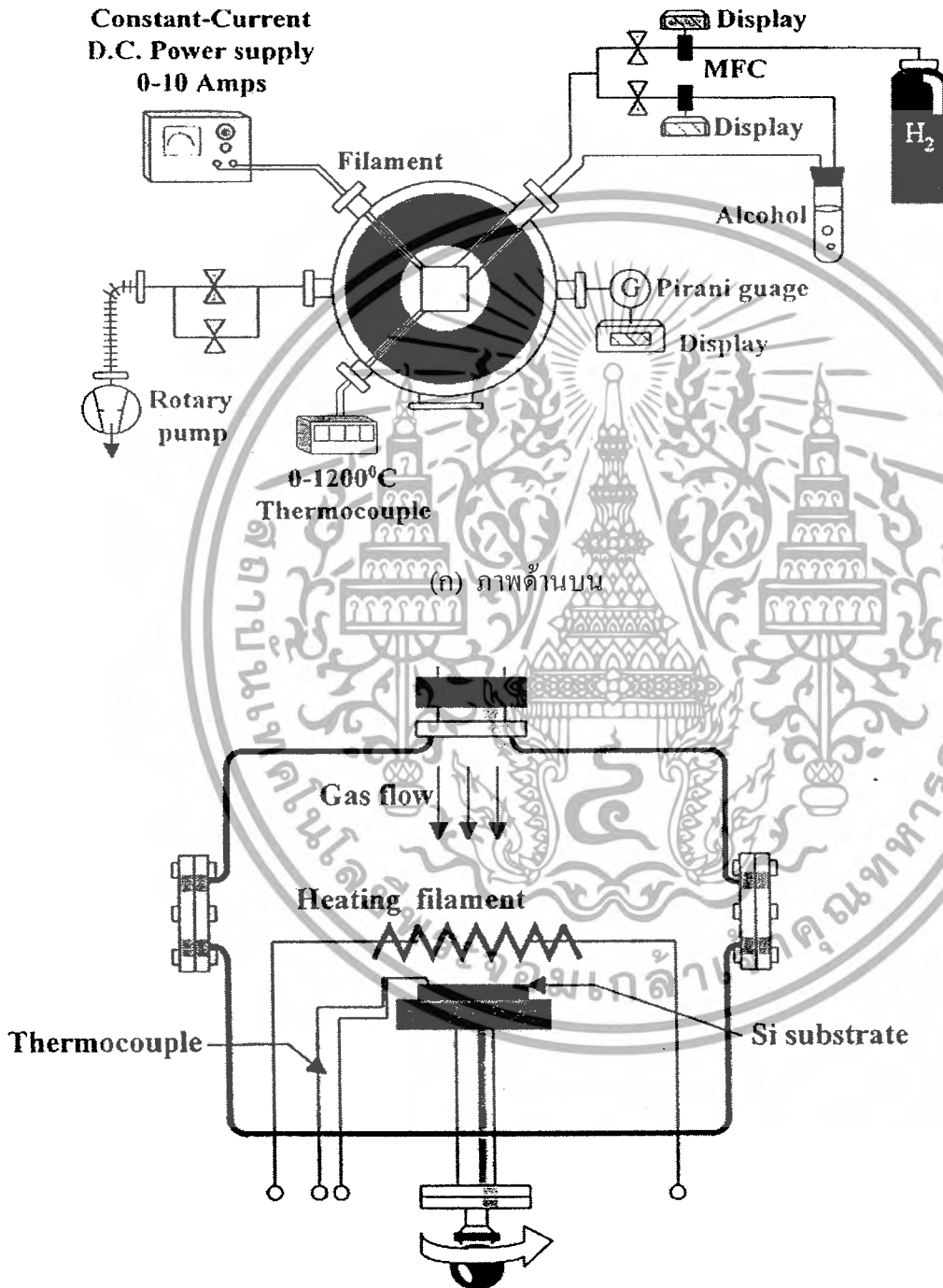


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของผิวหน้า
แผ่นซิลิคอนที่ขัดด้วยครีมเพชร 0.25 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

แผนภาพไออะแกรมของระบบเครื่องสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีการCVDแบบ
ลดความร้อนที่ความดันต่ำแสดงในรูปที่ 4.2



(ข) ภาพตัดขวางด้านหน้า

รูปที่ 4.2 เครื่องสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร (ก) ภาพจากด้านบน (ข) ภาพตัดขวางด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การลอกไนไตรเพื่อเป็นการเตรียมแผ่นผลึกในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

การลอกไนไตรออกจากแผ่นผลึกนี้เป็นการลอกไนไตรออกเพื่อให้เหลือแต่เฉพาะส่วนที่เป็นซิลิคอนคือในบริเวณที่เป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ คือบริเวณที่เป็นซิลิคอนเป็นส่วนที่ต้องการจะให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้นและซิลิคอนไดออกไซด์คือบริเวณที่เป็นสีฟ้าม่วงคือบริเวณขอบโดยรอบนั่นเองจะเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้นนั่นเอง ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ลักษณะของแผ่นผลึกในระหว่างขั้นตอนการลอกไนไตรออก

รูปที่ 4.4 แผ่นผลึกหลังจากขั้นตอนการลอกไนไตรออกเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผลึกชิ้นงานหลังจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเสร็จเรียบร้อยแล้วและฟิล์มเพชรก็
คือบริเวณที่เป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆตามรูปที่ 4.5

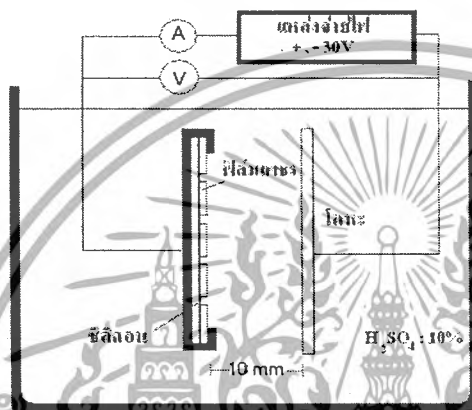


รูปที่ 4.5 แผ่นผลึกชิ้นงานหลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพชร

ขั้วไฟฟ้าเพชรชนิด P จะให้อนุภาคอิสระชนิดบวกที่เรียกว่า โฮล เมื่อขั้วไฟฟ้าเพชรวางอยู่ในสารละลาย H_2SO_4 เมื่อได้รับการไบอัสศักดาบวก ทำให้โฮลในขั้วเพชรเคลื่อนที่ยังรอยสัมผัสระหว่างพื้นผิวเพชรกับสารละลาย ในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าบวก และให้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะไบอัสไฟลบ ดังรูปการทดลอง



รูปที่ 4.6.1 วงจรแสดงการทดลองการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.6.2 การทดลองการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

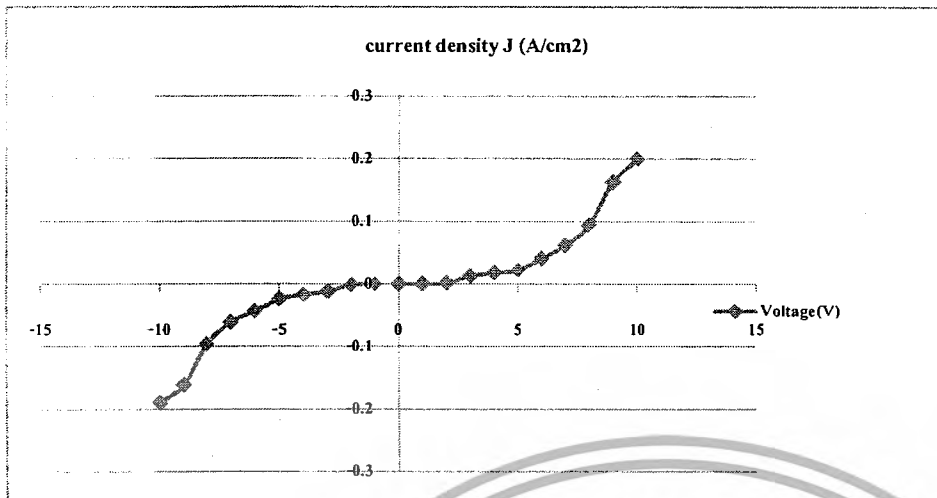
ต่อวงจรตามรูปด้านที่ โดยป้อนไฟกระแสตรงจาก Supply ตั้งแต่ -10 v ถึง 10 v วัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และเมื่อป้อนไฟที่ 10 v จากเวลา 0t – 200t วัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

| Voltage(V) | Current density(A/cm ²) | Voltage(V) | Current density(A/cm ²) |
|------------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.00012 | -1 | -0.00013 |
| 2 | 0.0014 | -2 | -0.0015 |
| 3 | 0.013 | -3 | -0.012 |
| 4 | 0.018 | -4 | -0.017 |
| 5 | 0.022 | -5 | -0.024 |
| 6 | 0.041 | -6 | -0.043 |
| 7 | 0.062 | -7 | -0.061 |
| 8 | 0.094 | -8 | -0.096 |
| 9 | 0.163 | -9 | -0.161 |
| 10 | 0.2 | -10 | -0.19 |

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage (V) กับ Current density J (A/cm²)

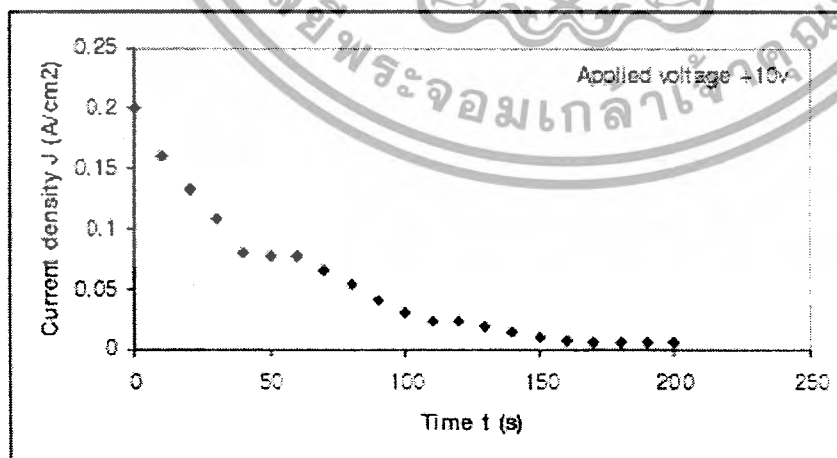
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage (V) กับ Current density J (A/cm²)

จากการทดลองพบว่าเมื่อเราป้อนไฟฟ้าตั้งแต่ -10 v ถึง 10 v ค่าความหนาแน่นของกระแสที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.2 (A/cm²)

และเมื่อป้อนไฟฟ้าที่ 10 v จากเวลา 0t – 200t วัดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

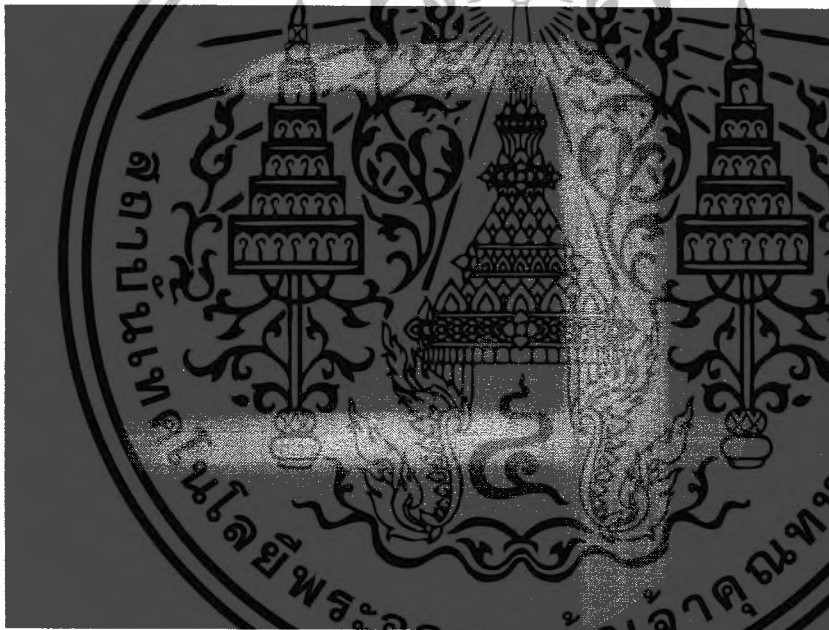


กราฟที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Time t(s) กับ Current density J (A/cm²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ปัญหาของฟิล์มเพชร

ปัญหาของฟิล์มเพชรอาจเกิดได้มาจากหลายๆสาเหตุจากกระบวนการสร้างต่างๆที่ไม่สมบูรณ์แบบ เช่น ปัญหาที่เพชรที่สังเคราะห์ที่ได้นั้นมีความหนาแน่นของผลึกเพชร มีความหนาแน่นไม่พอเหมาะที่จะใช้งาน เพชรที่ได้นั้นมีลวดลายที่ไม่แน่นอนตามที่ต้องการ ปัญหาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความดันที่ไม่เหมาะสมจากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร และยังพบว่าการลอกไนโตรเจนไม่สมบูรณ์ลอกออกไม่หมด เพชรบริเวณนั้นก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีบางจุดที่เพชรไม่เกิด



รูปที่ 4.7 ปัญหาจากการสร้างฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปวิจารณ์ผลการทดลอง

รายงานเล่มนี้แสดงผลการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชร โดยทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ CVD แบบลดความร้อนที่ความดันต่ำ โดยที่เรานำฟิล์มเพชรมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีเพราะฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า คุณสมบัติทางเคมีทางฟิสิกส์และทางอิเล็กทรอนิกส์ว่ามีความเหมาะสมมาเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานจะต้องมีปริมาณของโบรอนที่เจืออยู่มากกว่าหรือเท่ากับ $10^{19} / \text{cm}^3$

จากการทดลองสร้างขั้วไฟฟ้าฟิล์มเพชรพบว่าการสร้างฟิล์มเพชรมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นคือเกิดเพชรล้าเข้าไปในออกไซด์ซึ่งเกิดกระบวนการสร้างชั้น SiO_2 แบบออกซิเดชันด้วยความร้อนหรือความหนาของชั้นออกซิเดชันหรือระยะห่าง และขนาดความกว้างของลวดลาย และในส่วนของฟิล์มเพชรมีบางส่วนที่ไม่เกิดฟิล์มเพชรขึ้นเนื่องจากในกระบวนการลอก Si_3N_4 ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจากน้ำยาป้องกันชั้น Si_3N_4 ในส่วนที่ถ้ำมาส์กไว้ป้องกันได้ไม่ครบ ทำให้เมื่อถึงกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรเกิดส่วนที่ฟิล์มเพชรไม่เกิดขึ้น และยังพบว่าแถวของ Si_3N_4 นั้นหายไปบางจุดจากการตรวจสอบแล้วพบว่าจากสาเหตุของบัฟเฟอร์ที่เขาไปในรอยร้าวของน้ำยาสารไวแสงข้างหลังเพื่อที่จะป้องกันบัฟเฟอร์ ซึ่งบัฟเฟอร์จะกัด Si_3N_4 ออกหมด จึงทำให้บริเวณนั้นเสียหาย ดังนั้นจึงต้องพินิจพิเคราะห์ และควบคุมขั้นตอนต่างๆ ในการสร้างให้ละเอียดรอบคอบ เพื่อที่จะได้ฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในต่อไป

เมื่อได้ฟิล์มเพชรเป็นลวดลายตามที่ต้องการเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน จากการทดลองสามารถนำไปศึกษาการนำไฟฟ้าในสารละลาย H_2SO_4 10 % พบว่าเมื่อจ่ายศักดา 10 v จะค่าความหนาแน่นของกระแส มีค่าเท่ากับ $0.2 (\text{A}/\text{cm}^2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Time t (s) กับ Current density J (A/cm²) พบว่ายิ่งไบอัสนานจะทำให้ Current density ลดลง ซึ่งในการที่จะนำไปใช้งานนั้นค่าที่ได้นี้ Current density ควรจะคงที่

ผลการทดลองที่ได้นี้เป็นข้อเสียจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร คือเกิดจากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ยังไม่สะอาดพอ เมื่อใช้งานนานเข้าการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีลดลง จึงทำให้ Current density ลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทำความสะอาดผิวผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (cleaning) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (supersonic cleaning)
2. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
3. กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
5. ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า
6. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
7. ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
8. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
9. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภท ไชมัน
11. ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
12. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
13. จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 นาที
14. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
15. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทำความสะดวกผิวหน้าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์แล้วก่อนนำเข้ากระบวนการอื่นต่อไปมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กัดด้วยสารละลายอิมตัวของโครเมียมไตรออกไซด์ (CrO_3) ในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่อุณหภูมิ

170 °C เป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดกราฟไฟท์ที่ผิวหน้า

2. ล้างด้วยสารละลายต้มเดือดของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

(NH_4OH) อัตราส่วน 1:1

3. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

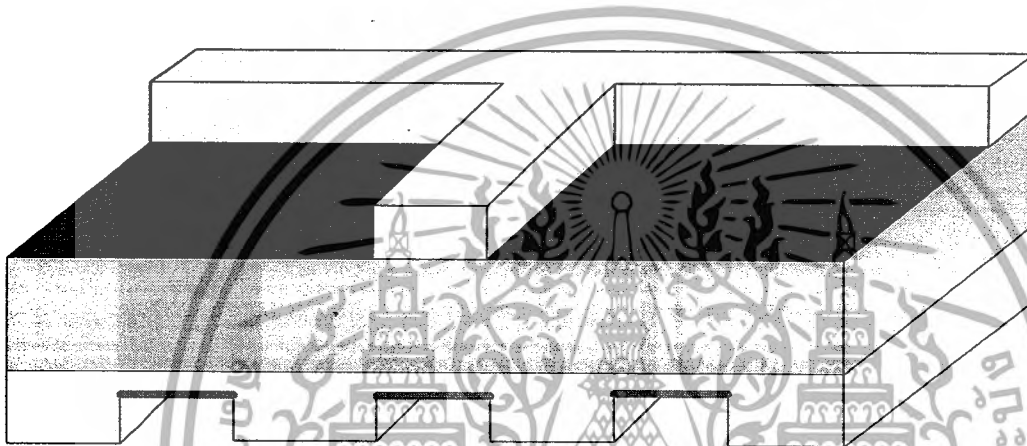
4. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



ภาคผนวก ค

กระบวนการออกซิเดชัน (การสร้าง SiO_2 ให้นำ $15,000 \text{ \AA}$)

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc/min 30 นาที
(เป็นการสร้าง SiO_2 แบบละเอียดและกระบวนการที่เกิดขึ้นช้า)
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000cc/min 10 ชั่วโมง



แสดงกระบวนการสร้าง SiO_2 แบบ Wet และ Dry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- อบแผ่นผลึกในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นที่ อุณหภูมิ 95°C ประมาณ 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่อง Spinner 5000 rpm สำหรับ AZ 1350
- Pea brake ด้วยการอบในเตาอบที่ อุณหภูมิ 95 °c ประมาณ 30 นาที
- นำแผ่นทำการ Mask Alignment และฉายแสงประมาณ 80 วินาที
- Development โดย จุ่ม AZ 400K เป็นเวลา 40 วินาที
- Post bake ในเตาอบที่อุณหภูมิ 95 °c ประมาณ 20 นาที แล้วนำออกมาเคลือบสารไวแสงข้างหลังเพื่อป้องกันการกัดด้วย AZ แล้วอบต่ออีก 10 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer 12 นาที (สารจะสกัดชั้น ออกไซด์ นาทีละ 1000 Å)
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วย N₂

กระบวนการลอกฟิล์ม (ลอกฟิล์มที่โดนแสงออกไป)

- ล้างในสารละลาย Acetone 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้ง
- ต้มในน้ำ DI 30 นาที 1-2 ครั้ง
- ล้างน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้งแล้วเป่าแห้งด้วย N₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

| คุณสมบัติ | สัญลักษณ์ | ขนาด | หน่วย |
|---|--------------|-------------------------|-------------------|
| ประจุอิเล็กตรอน(Electron Charge) | Q | 1.602×10^{-19} | C |
| ค่าคงที่โบลทซ์มันน์(Boltzmann's constant) | K | 1.38×10^{-23} | J/K |
| ความเร็วแสงในอวกาศ(speed of light in space) | C | 2.998×10^8 | m/s |
| ค่าความยินยอมทางไฟฟ้าของอวกาศ (Permittivity of free space) | ϵ_0 | 8.85×10^{-12} | F/m |
| ความซึมซับแม่เหล็กของอวกาศ (Permeability of free space) | μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ | H/m |
| ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์(Absolute temperature) | K | - | K |
| ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัส ระหว่าง SiO ₂ หนา 100 | Q_{aa} | 1.4×10^{-8} | C/cm ² |
| แรงดันเนื่องจากความร้อน(ที่ T = 300 K) | kT/q | 0.0295 | V |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
คุณสมบัติของซิลิกอนออกไซด์

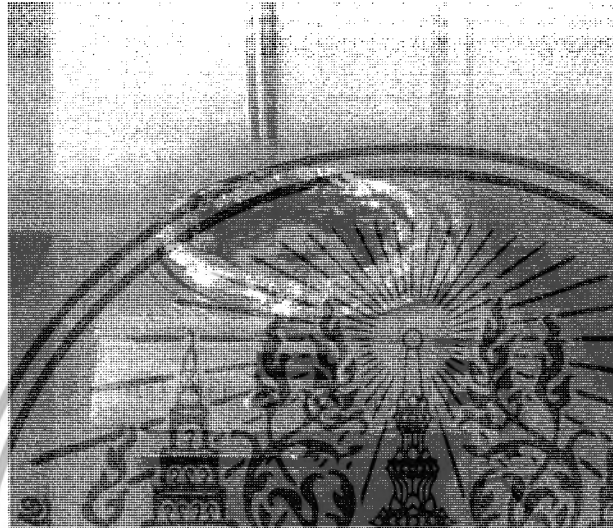
| คุณสมบัติ | ขนาด | หน่วย |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| น้ำหนักอะตอม | 60.08 | - |
| ความหนาแน่นอะตอม | 2.3×10^{-22} | cm-3 |
| ความต้านทาน | $>10^{16}$ | Ω -cm |
| ค่าความยินยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ | 3.9 | - |
| จุดหลอมเหลว | 1700 | $^{\circ}\text{C}$ |
| ความร้อนจำเพาะ | 1 | J/g $^{\circ}\text{C}$ |
| การนำความร้อน | 0.014 | $^{\circ}\text{C}^{-1}$ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รูปเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้าง

เครื่อง Spinner เคลื่อนย้ายไอแสง



รูปที่ 6.1 เครื่อง spinner

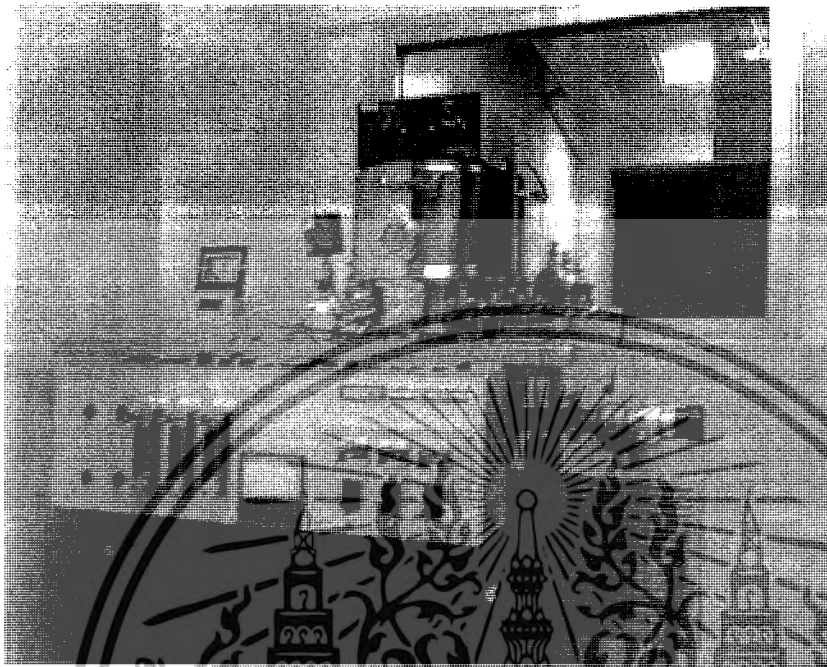
เครื่อง Alignment และฉายแสง



รูปที่ 6.2 เครื่อง Alignment และฉายแสง

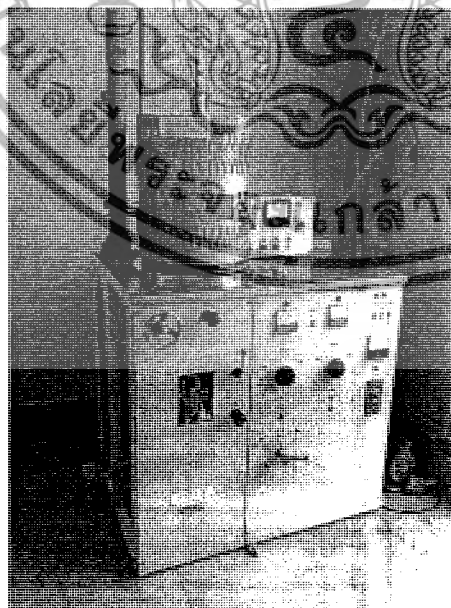
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง สร้างชั้นไนโตร



รูปที่ 6.3 เครื่องสร้างชั้นไนโตร

เครื่อง Evaporation เพื่อสร้างข้อมูลนิยาม



รูปที่ 6.4 เครื่อง Evaporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีคำนวณหาอัตราส่วนโบรอนต่อคาร์บอน (B:C) ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง ต้องการหาอัตราส่วน B:C = 1 ppm ในสารละลาย 50 cm³

| | | | | |
|-----------|---|------|-----------------|------|
| เนื่องจาก | C ₂ H ₅ OH 1 cm ³ | หนัก | 0.769 | กรัม |
| | C ₂ H ₅ OH 50 cm ³ | หนัก | 0.769x50 = 39.8 | กรัม |

โมเลกุลของ C₂H₅OH = 2(12.01115) + 6(1.00797) + 15.9994 = 46.0695 กรัม/โมล

ดังนั้น C₂H₅OH 1 โมล จะมี C = 2(12.01115) = 24.023 กรัม

เพราะฉะนั้น C₂H₅OH 50 CM³ มีปริมาณ $\frac{39.80 \text{ g}}{46.0695 \text{ g/mole}} = 0.8639$ กรัม

ดังนั้น C₂H₅OH 0.8639 โมล จะมี C = 0.8639 x 24.023 = 20.7535 กรัม

โมเลกุลของ B₂O₃ = 2(10.811) + 3(15.9994) = 69.6202 กรัม

โดย B₂O₃ 1 โมล จะมี B = 2(10.811) = 21.622 กรัม

ดังนั้น B:C = 1 ppm = 1 x 10⁻⁶

คือ C 10⁶ กรัม จะมี B อยู่ 1 กรัม

ถ้า C 20.7535 กรัม จะมี B อยู่ 2.07535 x 10⁻⁵ กรัม

เพราะฉะนั้น B 21.662 กรัม จะมีอยู่ใน B₂O₃ อยู่ 1 โมล

ดังนั้น B 2.07535 x 10⁻⁵ กรัม จะมีอยู่ใน B₂O₃ อยู่ 9.5983 x 10⁻⁷ โมล

เพราะฉะนั้นต้องใช้ B₂O₃ หนักเท่ากับ (9.5983 x 10⁻⁷)(69.6202) = 6.6824 x 10⁻⁵ กรัม

สำหรับ C₂H₅CO 50 CM³

B : C = 1 ppm ใช้ B₂O₃ หนัก 6.6824 x 10⁻⁴ กรัม

B : C = 100 ppm ใช้ B₂O₃ หนัก 6.6824 x 10⁻³ กรัม

B : C = 1000 ppm ใช้ B₂O₃ หนัก 6.6824 x 10⁻² กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกราช รัตนอุดมพิสุทธิ์, สมศักดิ์ เข็ชรศิริกุล และ สมเกียรติ สุภเดช “ การสังเคราะห์ฟิล์มบาง เพชรบน Si ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน โดยใช้ C_2H_5OH ” การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 20 2540, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 425-500
- [2] R.F. Davis. Diamond films and Coating. New Jersey: Noyes publications , 1993
- [3] S.M. Sze. **Semiconductor Devices: Physics and Technology**. New York: John wiley & Sons, Inc 1986. pp. 364-391
- [4] โยธิน วงศ์ประเสริฐ “เอกสารการสอนวิชาการบวนการผลิตวัสดุสารกึ่ง ตัวนำ (SEMICONDUCTOR MATERIAL PROCESSING)”, 2551
- [5] สมเกียรติ สุภเดช “เอกสารการสอนวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม (Integrated Circuit Technology).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้