

การสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มบางเพชร

Fabrication of Diamond Thin Film for Photodiode



โดย

นาย ปริชญ์

ชากฤษณ์

นาย อรรถพล

ป้อมสถิตย์

เลขหนังสือ.....
เลขทะเบียน..... 42697
วัน, เดือน, ปี..... 6 ส.ย. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มบางเพชร
Fabrication of Diamond Thin Film for Photodiode

โดย

นาย ปริญญ์ ชากฤษณ์ 41013254

นาย อรรถพล ป้อมสถิตย์ 41013278



ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานเรื่อง การสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มบางเพชร

Fabrication of Diamond Thin Film for Photodiode

จัดทำโดย นาย ปริญญ์ ชากฤษณ์ 41013254

นาย อรรถพล ป้อมสถิตย์ 41013278

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบ โดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มเพชร

ปริญญา ชากฤษณ์ 41013254

อรรถพล ป้อมสถิตย์ 41013278

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้มีการสร้างโฟโตไดโอดจากฟิล์มเพชรด้วยวิธี Hot Filament CVD ที่ความดันบรรยากาศ โดยเริ่มจากการเตรียมฐานรองซิลิกอน (Si) ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเป็นชนิดพีแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy และ SEM (Scanning Electron Microscopy) หลังจากนั้นนำไปทดสอบผลของระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส, ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสโฟโตไดโอด, ผลตอบสนองต่ออุณหภูมิที่มีต่อโฟโตไดโอด

รายงานนี้ได้นำเสนอโฟโตไดโอดจากการสร้างฟิล์มเพชรซึ่งมีคุณสมบัติทำงานที่อุณหภูมิและความถี่สูงได้ดี โดยมีช่วงการทำงานที่อุณหภูมิ 1000 – 3000 °C ซึ่งสูงกว่าไดโอดชนิดซิลิกอนและสามารถตอบสนองความถี่สูงได้ดีในช่วง 1 GHz - 100 GHz

Fabrication of Diamond Thin Film for Photodiode

Priya Charkrit 41013254

Auttapon Pomsathit 41013278

Asst.Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This project presents the Photo Diode fabrication by Hot Filament CVD at atmosphere. Firstly, silicon (Si) substrate is treated. Then, diamond films in P-type will be grown and analyzed by Raman spectroscopy and SEM (Scanning Electron Microscopy). Distance from contact which affects the diamond plane is studied. Another studying is to analyze the effect on intensity of light and temperature in Photo Diode.

This project presents Photo Diode Fabricate from diamond thin film which tolerate high temperature (1000 – 3000 °C) and response to high frequency (1GHz – 100GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

| | |
|--|---|
| 1.1 บทนำ | 1 |
| 1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Filament-Assisted thermal CVD..... | 2 |
| 1.3 หลักการพื้นฐาน CVD | 4 |
| 1.3.1 กระบวนการก๊าซเฟส | 4 |
| 1.3.2 ผลของอุณหภูมิฐานรอง..... | 5 |
| 1.3.3 บทบาทของก๊าซ ไฮโดรเจน..... | 5 |
| 1.3.4 บทบาทของก๊าซ ออกซิเจน..... | 6 |
| 1.3.5 การนิวเคลียชัน..... | 6 |
| 1.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร..... | 7 |
| 1.4.1 การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM..... | 7 |
| 1.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Ramann spectroscopy | 9 |

บทที่ 2 ทฤษฎี

| | |
|---|----|
| 2.1 ทฤษฎีของแข็ง..... | 12 |
| 2.2 การเติมสารเจือ..... | 19 |
| 2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง..... | 21 |
| 2.3.1 คุณสมบัติที่เป็นอนุภาคของแสง..... | 23 |
| 2.3.2 ปรากฏการณ์ดูดกลืนแสง..... | 24 |
| 2.3.3 การดูดกลืนแสงใน Gap state | 30 |
| 2.3.4 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ..... | 31 |
| 2.3.5 การดูดกลืนแสงด้วยการกั้นของโครงสร้างผลึก..... | 31 |
| 2.3.6 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก..... | 32 |
| 2.3.6.1 โฟโตคอนดักทิฟ..... | 32 |
| 2.3.6.2 โฟโตโวลตาอิก..... | 32 |
| 2.4 การทำงานของโฟโตไดโอด..... | 33 |
| 2.4.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด..... | 35 |
| 2.4.2 เส้นกราฟลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟ | 36 |
| 2.4.3 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด..... | 40 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | หน้า |
|---|------|
| 2.4.3.1 สเปกตรัมผลตอบสนอง..... | 40 |
| 2.4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ..... | 41 |
| 2.4.3.4 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต..... | 41 |
| บทที่ 3 กระบวนการทดลอง. | |
| 3.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง..... | 44 |
| 3.1.2 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น..... | 44 |
| 3.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดครีမ်เพชร..... | 45 |
| 3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร..... | 46 |
| 3.4 กระบวนการทดสอบฟิล์มเพชร..... | 48 |
| 3.4.1 ตรวจสอบลักษณะฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM..... | 48 |
| 3.4.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Raman spectroscope..... | 48 |
| 3.5 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด (Photo diode) ระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีและ ซิลิกอนชนิดเอ็น..... | 49 |
| 3.5.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี..... | 49 |
| 3.5.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร..... | 49 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง | |
| 4.1 การตรวจสอบลักษณะของฟิล์มเพชร..... | 52 |
| 4.2 ผลของการวัดผลตอบสนองของแสงที่มีต่อฟิล์มเพชร..... | 53 |
| 4.3 ศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อโฟโตไดโอด..... | 55 |
| 4.4 ศึกษาระยะห่างของลวดลายของค่าที่มีผลต่อกระแสที่ได้รับจากแสง..... | 56 |
| 4.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโฟโตไดโอด..... | 57 |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง | |
| ภาคผนวก..... | 61 |
| กิตติกรรมประกาศ..... | 68 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 69 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ซิลิกอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ แต่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้มีขีดจำกัดในการใช้งานบางอย่าง เช่น การใช้งานในสถานะที่อุณหภูมิสูง ความถี่สูง ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์จะใช้งานได้ไม่ได้นัก เนื่องมาจากผลของคุณลักษณะทางกายภาพของตัวมันเอง นั่นคือ เฮอร์มันเนียมมีคุณสมบัติที่มีขนาดอะตอมขนาดใหญ่ประมาณ 0.278 nm เป็นผลให้เมื่อได้รับการกระตุ้นจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้ง่าย ดังนั้น ซิลิกอนซึ่งมีขนาดอะตอมเล็กกว่าจึงถูกนำไปใช้งาน คือมีขนาด 0.234 nm และยังมีขนาดพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) มากกว่า แต่ในส่วนของการทำงานที่ความดันสูง อุณหภูมิสูง และมีความเร็วในการเปิดปิดสูง ซิลิกอนก็ทำงานได้ไม่ดี ซึ่งผู้วิจัยคาร์บอนในโครงสร้างเพชร ได้พบว่า สารกึ่งตัวนำเพชร มีความแข็งแรงที่สุด จึงมีแนวคิดในการผลิตผลึกเพชรขนาดเล็ก ๆ เรียงตัวติดกันจนเป็นฟิล์มเพชร เรียกว่า ฟิล์มเพชร ดังนั้นเพชรจึงได้ถูกนำไปศึกษาเพื่อที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำทางอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อเทียบกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ คือ

ดังนั้นเพชรจึงถูกศึกษาเพื่อที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในทางอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์คือ

1. เพชรเป็นโครงสร้างรูปหนึ่งของคาร์บอน ซึ่งอยู่ในธาตุหมู่ 4 สามารถนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำได้เช่นเดียวกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์
2. เพชรมีค่านำความร้อนสูงกว่าซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ ดังนั้นจึงสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดี
3. เพชรมีช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) สูงถึง 5.5 eV ซึ่งเมื่อเทียบกับซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ แล้วมีค่าสูงกว่ากันมากดังนั้นจึงเหมาะที่จะทำงานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากสามารถที่จะควบคุมประจุพาหะได้ โดยไม่มีผลของอุณหภูมิมาเกี่ยวข้อง
4. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำทำให้ทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

จากตารางที่ 1.1 ตารางแสดงถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชรกับซิลิกอน และ เฮอร์มันเนียม ซึ่งสารทั้งสองเป็นสารที่ใช้ในการผลิตในอุตสาหกรรมหลัก

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเพชร ซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์

| Materials | Diamond | Si | GaAs |
|---|------------------|-----------------|-----------------|
| Crystal Structure | Diamond | Diamond | Zinc blends |
| Energy gap (eV) | 5.45 | 1.1 | 1.43 |
| Electron mobility ($\text{cm}^2/V.s$) | 2000 | 1500 | 8500 |
| Hole mobility ($\text{cm}^2/V.s$) | 1800 | 600 | 400 |
| Breakdown field (V/cm) | 10×10^6 | 5×10^6 | 6×10^6 |
| Resistivity ($\Omega.cm$) | 10^{16} | 10^3 | 10^9 |
| Dielectric Constant (ϵ) | 5.7 | 11 | 12.5 |
| Lattice constant (\AA) | 3.567 | 5.431 | 5.653 |
| Thermal conductivity (W/cm.K) | 20 | 1.5 | 0.46 |

1.2 เทคนิคการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี Filament-Assisted Thermal CVD

ปัจจุบันการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากและต้นทุนการสร้างต่ำ การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD เป็นหนึ่งในวิธีสร้างที่มีผู้ให้ความสนใจแพร่หลาย มีการพัฒนาทางเทคนิคการสร้างแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีการ CVD นี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆ ได้ตามเทคนิคที่ใช้คือ

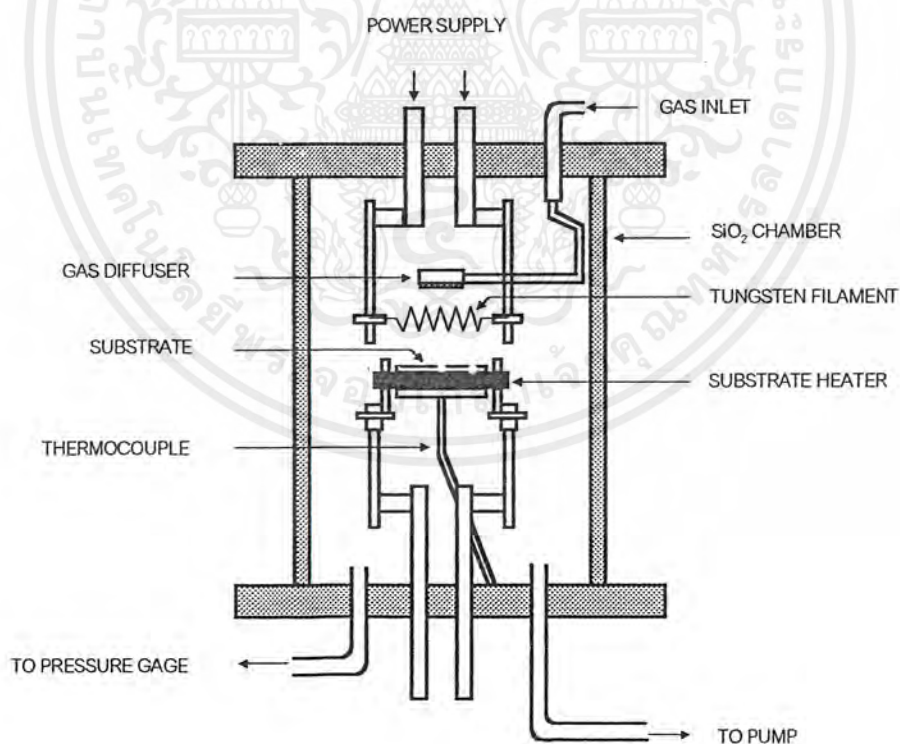
1. Thermal Enhanced CVD Methods
2. Plasma- Enhanced CVD Methods
3. Combustion Flame - Assisted CVD

ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ อาทิเช่น อัตราการเกิดของฟิล์มเพชร, อุณหภูมิที่ใช้ในการสร้าง, อุณหภูมิของฐานรอง, พื้นที่การเกิดฟิล์มเพชร ตลอดจนคุณภาพของฟิล์มที่ได้ แต่ท้ายที่สุดฟิล์มเพชรที่สร้างจากวิธีการต่างๆ จากการตรวจสอบจะพบว่า ลักษณะรูปร่างของฟิล์มและสเปกตรัมของ Raman จะคล้ายกันอันเป็นสิ่งยืนยันได้ว่า แม้เทคนิคที่ใช้สร้างฟิล์มเพชรแตกต่างกันไป แต่ผลที่ได้ก็คือ ฟิล์มเพชรเหมือนกันนั่นเอง สำหรับโครงการนี้ฟิล์มเพชรจะสร้างขึ้นด้วยเทคนิค Filament-Assisted Thermal CVD อันเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัยสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์มีราคาถูก ง่าย และฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดี ซึ่งรายละเอียดของวิธี Filament-Assisted Thermal CVD อธิบายได้ดังนี้คือ

วิธี Filament-Assisted Thermal CVD แสดงดังรูป 1.1 ภายใน Chamber มีไส้หลอดทั้งสแตนทำหน้าที่กำเนิดความร้อน โดยไส้หลอดทั้งสแตนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ DC อุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตนมีค่าสูงถึง 2,000-2,300°C ฐานรองวางอยู่ด้านล่างของไส้หลอดโดยมีระยะห่างที่เหมาะสมและมีอุณหภูมิ 700-1,000°C โดยอุณหภูมิดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง เมื่อก๊าซผสมระหว่างมีเทนและไฮโดรเจนถูกปล่อยเข้าไปใน Chamber ที่บริเวณไส้หลอดทั้งสแตนจะเกิดการแตกตัวของก๊าซขึ้นเป็นไฮโดรเจนอะตอมและคาร์บอนอะตอม เพชรจะมีอัตราการเกิด 1-10 $\mu\text{m/hr}$ วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้เป็นวิธีการที่ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก ฟิล์มเพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีมาก สามารถสร้างฟิล์มเพชรได้ในบริเวณกว้าง และมีความปลอดภัยสูง แต่ปัญหาที่พบคือ อายุการใช้งานไส้หลอดทั้งสแตนสั้น เนื่องจากผลของการให้ความร้อนแก่ไส้หลอดทั้งสแตนเป็นเวลานาน ทำให้ไส้หลอดเปราะและผิกรูปได้ง่าย



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพระบบ Hot-Filament-Assisted Thermal CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 หลักการพื้นฐาน CVD

จากที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับกระบวนการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธีต่างๆ แม้ว่าแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจะมีหลักการพื้นฐาน ที่สำคัญเหมือนกันดังนี้

1. ในระบบต้องมีอะตอมของไฮโดรเจนปรากฏอยู่
2. ต้องมีการกระตุ้นก๊าซที่มีอนุภาคคาร์บอน
3. อุณหภูมิของฐานรองต้องมีความเหมาะสม
4. ต้องมีการเตรียมพื้นที่ผิวของฐานรอง

ในกระบวนการสร้างนั้น ต้องใช้หลักการทั้งสี่ข้อนี้ร่วมกันเพื่อผลออกมาจะได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพ อัตราการเกิดฟิล์มเพชรมีค่าสูง หากขาดข้อหนึ่งข้อใดไป ผลที่ออกมาจะไม่ใช่เพชร อาจเป็นแกรไฟต์ อมอร์ฟัสคาร์บอน หรือ Diamond-like carbon ก็ได้โดยวิธีการที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขทั้งสี่ข้อดังกล่าว สามารถใช้เทคนิคหลายอย่างควบคุมตามความเหมาะสม วิธี Filament-Assisted Thermal CVD นี้จะได้เพชรที่คุณภาพคืออัตราการก่อตัวสูงพอสมควร อีกทั้งสิ่งเจือปนที่เกิดจากไส้หลอดมีน้อยมากจนยอมรับให้ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้จนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสร้างฟิล์มเพชร

1.3.1 กระบวนการของก๊าซเฟส

การสร้างเพชรด้วยกระบวนการ CVD มีหลักการพื้นฐาน คือต้องมีการกระตุ้นก๊าซเฟสด้วยพลังงานสถานะสูง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่าง คือ ทำให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุล ซึ่งพร้อมจะเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวที่พื้นผิว และแยกโมเลกุลไฮโดรเจนเพื่อสร้างสมดุลของความหนาแน่นสูงของก๊าซเฟสของอะตอมไฮโดรเจน

แม้ว่าแต่ละระบบการสร้างต่างๆ จะมีความแตกต่างกันในแง่ของรูปแบบทางวิศวกรรมแต่ทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญพื้นฐานเหมือนกัน คือ ทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพคือออกมา พลังงานจำนวนมากที่ใส่จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าหรือเคมีทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอนแตกตัว การสร้างจะกระทำที่ความดันต่ำ (ประมาณ 10 torr – 100 torr) เพื่อป้องกันการรวมตัวของอะตอมของไฮโดรเจนกลับไปสู่รูปของโมเลกุล อุณหภูมิของก๊าซเฟสมีค่าสูงกว่า 1,700 °C เกิดขึ้นที่บริเวณ Activation zone การระบายความร้อนทั้งแบบแอคทีฟหรือพาสซีฟเป็นตัวรักษาระดับอุณหภูมิของฐานรองให้มีค่าประมาณ 925 °C

1.3.2 ผลของอุณหภูมิฐานรอง

ในกระบวนการสร้างเพชรด้วยวิธี CVD อุณหภูมิของฐานรองจะส่งผลต่อการเกิดเพชรหลายอย่าง Spitsyn et al. ได้เสนอผลจากการทดลองว่ามีเพชรเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองมีค่าตั้งแต่ 500 °C ในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจน ผลที่ได้จะเป็น DLC (Diamond – like carbon) เกิดขึ้นแทน เมื่อไม่กี่ปีมานี้ Inspektor et al. รายงานถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่สร้างเพชรขึ้นได้ประมาณ 300 °C โดยใช้ก๊าซที่มีส่วนผสม C-H-O นอกจากนี้ อุณหภูมิฐานรองยังมีผลต่ออัตราการเกิดเพชรอีกด้วย โดยอัตราการเกิดเพชรจะมีค่าลดลงเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C

นอกจากนี้ Zhu et al. ได้ศึกษาถึงลักษณะการเกิดรูปทรงต่างๆ ของผลึกและฟิล์มเพชรที่สร้างด้วยวิธี Microwave plasma CVD พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิฐานรอง, ความเข้มข้นของมีเทน และอัตราการไหลของก๊าซมีผลอย่างยิ่งต่อการเกิดระนาบของผลึกพบว่าผิวหน้าของฟิล์มเพชรจะมีการเปลี่ยนระนาบไปเมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนไป

1.3.3 บทบาทของก๊าซไฮโดรเจน

อะตอมไฮโดรเจนสามารถกำจัดแกรไฟต์ออกจากเพชรได้เป็นอย่างดี และมีหน้าที่หลักอีกอย่างหนึ่งของคือ ช่วยทำให้เพชรมีเสถียรภาพมากขึ้นเนื่องจากบริเวณผิวหน้าของเพชรอะตอมคาร์บอนจะมีพันธะแขวนขนาด (Dangling bond) อะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปจับตัวกับแขนที่ขาดของอะตอมคาร์บอนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนพันธะของ sp^3 ไปเป็น sp^2 หรือ sp^1 และอะตอมไฮโดรเจนยังมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการเกิดเพชร โดยจะเป็นตัวกำจัดไฮโดรเจนที่จับตัวเป็นพันธะ C_d-H กับอะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร อะตอมคาร์บอนในพันธะระหว่าง C_d-H เมื่อสูญเสียอะตอมไฮโดรเจนออกไปจะเป็น C_d^* ดังสมการ



เมื่อ C_d คืออะตอมคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของเพชร และ C_d^* คืออะตอมคาร์บอนบริเวณผิวหน้าที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ให้ความเห็นเกี่ยวกับหน้าที่อื่นๆ ของไฮโดรเจนอีก เช่น Frenklack et al. เสนอว่าอะตอมไฮโดรเจนยังช่วยในการเกิดก๊าซเฟส หรือ Machin et al. กล่าวว่าอะตอมไฮโดรเจนช่วยในการกำจัดออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าของฐานรอง

1.3.4 บทบาทของก๊าซออกซิเจน

การเติมออกซิเจนเข้าไปในก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจนและไฮโดรคาร์บอน ได้รับการรับรองจากผู้ที่ศึกษาการสังเคราะห์เพชรหลายกลุ่ม (Kawato et al.) ว่าทำให้เพชรที่สร้างได้มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิฐานรองต่ำ และยังช่วยให้อัตราการเกิดดีขึ้น

บทบาทหลักๆ ของออกซิเจนคือช่วยทำให้เพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณภาพดี เป็นที่เชื่อกันว่าหากเราผ่านอนุมูลของก๊าซออกซิเจน เช่น O, O₂ หรือ OH เข้าไปขณะสังเคราะห์เพชร จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนที่ไม่ใช่เพชร และการป้องกันการเสียหายของอะตอมบริเวณพื้นผิวที่ถูกกระตุ้น อนุมูล OH สามารถกระตุ้นอะตอมบริเวณผิวหน้าดังสมการ



อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาจากสมการ (2.2) ยังไม่มีความสำคัญเท่ากับสมการ (2.1) ส่วนหน้าที่อื่นๆ ของออกซิเจนที่มีผู้ศึกษาไว้ได้แก่ Kawato et al. เสนอว่าออกซิเจนมีคุณสมบัติที่จะลดความหนาแน่นของอะเซติลีน ซึ่งถูกสันนิษฐานว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเกรไฟต์และอะมอร์ฟัสคาร์บอน

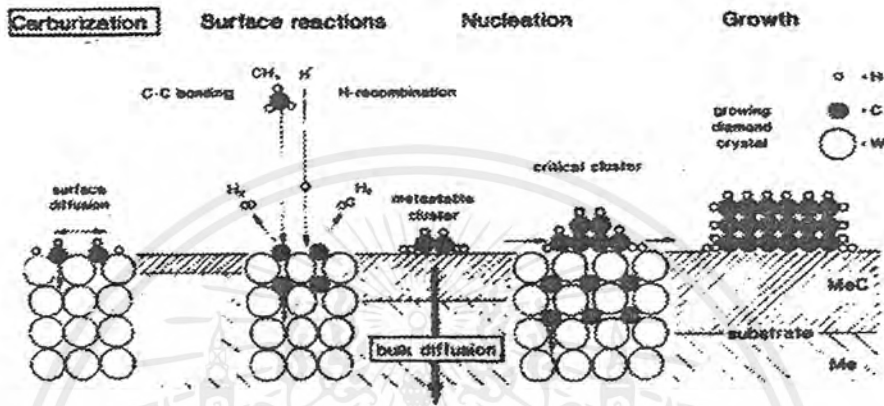
1.3.5 การนิวเคลียชัน

ปรากฏการณ์การนิวเคลียชันของเพชร CVD เป็นปรากฏการณ์การก่อตัวเริ่มต้นของก๊าซเฟสเป็นผลึกเพชร ตามด้วยการเกิดไฮโมอิพิแทกเซียล การเกาะตัวของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มขนาดของผลึกเนื้อสาร เป็นปรากฏการณ์การสร้างนิวเคลียสเริ่มต้นโดยขนาดของนิวเคลียสต้องมีขนาดมากกว่าขนาดวิกฤต สามารถคงอยู่และเสถียรได้นานพอที่จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกขึ้น ซึ่งอยู่กับรูปแบบของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นจนมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของระบบเป็นลบเพื่อให้อาจสามารถเกิดขบวนการขึ้นได้ ซึ่งระบบนี้หมายรวมถึงฐานรองอนุภาคที่เกิดขึ้นและก๊าซเฟส

เมื่ออนุภาคอิสระของก๊าซเฟสแพร่เข้าไปบนพื้นฐานรองจะก่อตัวกันด้วยพันธะ sp² เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน (PAHs ; polycyclic aromatic hydrocabons) อะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่ฐานรองจนถึงค่าหนึ่งซึ่งการแพร่ของอะตอมคาร์บอนไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีก อะตอมคาร์บอนที่แพร่เข้าไปจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของฐานรองเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เรียกว่า Intermediate layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชร พันธะ sp² เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ sp³ โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวเคลียชันและการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น Intermediate layer เมื่ออะตอมคาร์บอนเกาะตัวกันมากพอ จะเกิดขึ้นตอนการเกิดเพชร พันธะ sp^2 เปลี่ยนรูปเป็นพันธะ sp^3 โดยใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวช่วย กลไกการนิวเคลิเอชันและการเกิดขึ้น Intermediate layer เป็นดังรูป 1.2



รูปที่ 1.2 กลไกการนิวเคลิเอชันและการเกิดขึ้นของฟิล์มเพชร

1.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มเพชร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรมีหลายวิธีการแล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน อาทิเช่น ถ้าต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชร นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) แต่หากต้องการวิเคราะห์ถึงพันธะของอะตอมคาร์บอนที่จับตัวกัน เพื่อตรวจสอบว่าเป็นเพชร, กราไฟต์, อมอร์ฟัส หรือ DLC นิยมใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy สำหรับในโครงการนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของเพชร 3 วิธี คือ

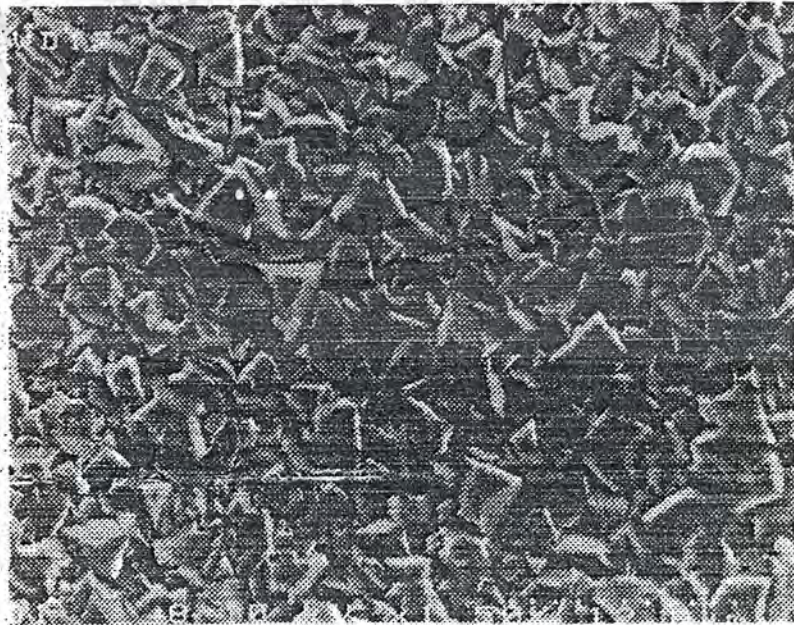
1. Scanning electron microscopy (SEM)
2. Raman spectroscopy

1.4.1. การวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM

SEM เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน (μm) หลักการพื้นฐานของ SEM คือทำการกวาดโฟกัสของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวและตรวจจับอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิว ขนาดของอิเล็กตรอนสามารถปรับโฟกัสให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กสุดได้ถึง 10-20 nm โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญกับความคมชัดของภาพที่ได้ ความสว่างหรือความเข้มของอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

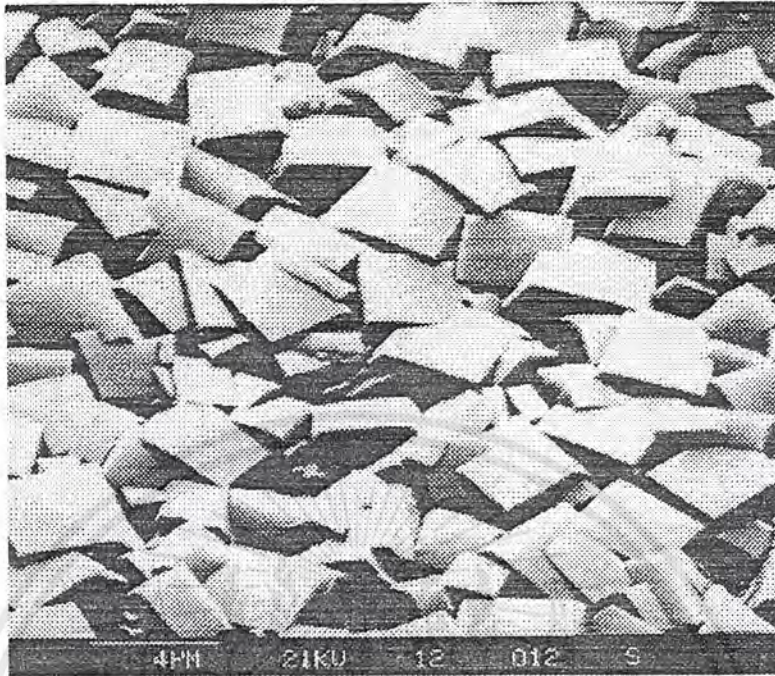
ความแตกต่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวที่ตรวจสอบ ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งของตัวตรวจจับไม่สมดุล ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จะถูกแสดงบนจอชนิด CRT (Cathode-ray tube) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับ Optical microscopes ชนิดอื่น ๆ คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50 - 40,000X) ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เห็นเป็นแบบสามมิติ และหากเปรียบเทียบกับ TEM (Transmission electron microscopy) ซึ่งสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบต้องมีความบางมาก ๆ เพื่อให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ แต่ SEM สามารถใช้สารตัวอย่างที่เป็นเนื้อของแข็งได้เลย สำหรับสารตัวอย่างที่มีความนำไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องจำเป็นต้องผ่านการเตรียมก่อน อย่างไรก็ตามในการใช้งานด้านแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าแรงดันและกระแสต่ำ ๆ จะช่วยหลีกเลี่ยงการประจุบนฟิล์ม ส่วนมากแล้วในการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค SEM นิยมใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น Raman spectroscopy

นอกจากนี้เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD ทำให้ได้รูปร่างลักษณะของฟิล์มแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการสร้าง โดยทั่วไปแล้วฟิล์มเพชรที่เกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชร (โดยเฉพาะฐานรอง Si) บริเวณผิวหน้าจะมีความขรุขระและรูปร่างลักษณะของพื้นผิวที่ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งลักษณะของฟิล์มเพชรที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้าง โดยเฉพาะอุณหภูมิของฐานรองและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรคาร์บอนต่อก๊าซไฮโดรเจน



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

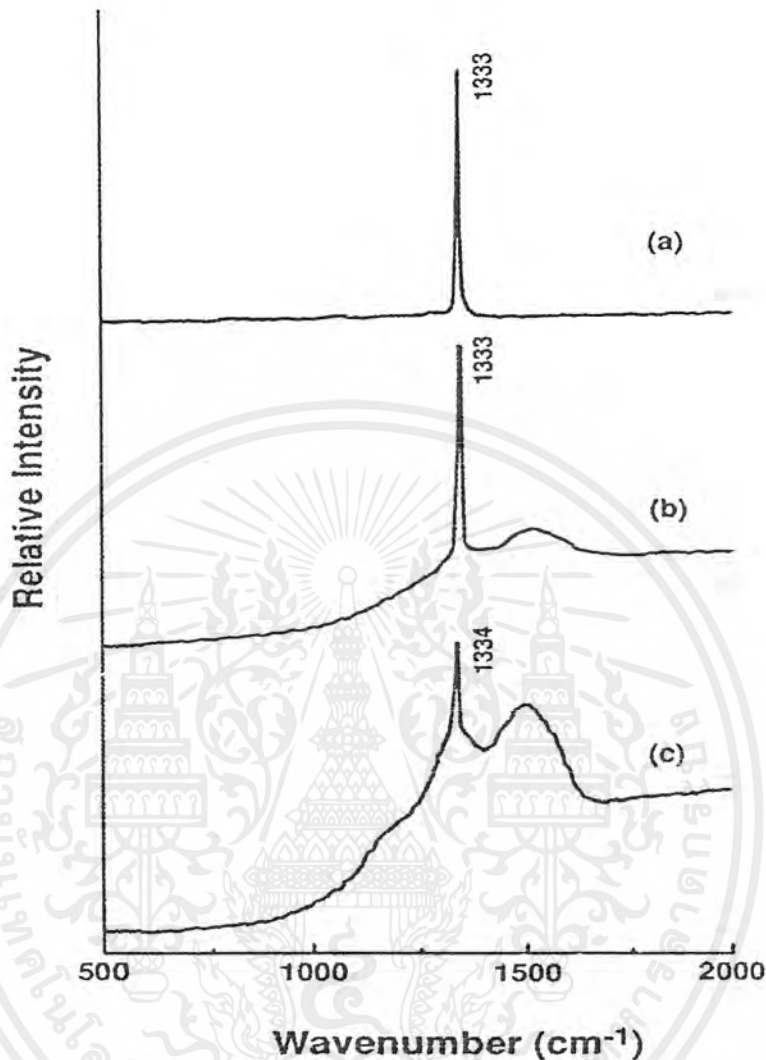
รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะรูปร่างของฟิล์มเพชรแบบต่าง ๆ

(a) {111} Triangular faces (b) {100} Square faces

1.4.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยมีความไวต่อการแยกเฟสของเพชรและกราฟไฟต์สูง ตำแหน่งและความกว้างของยอดจาก Raman spectrum จะเป็นตัวแสดงถึงชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตรวจสอบได้

จากการใช้ Raman spectroscopy ตรวจสอบพันธะชนิดต่างๆของคาร์บอนฟิล์มสามารถจำแนกชนิดต่างๆของคาร์บอนได้เป็น เพชร,กราฟไฟต์,อมอร์ฟิสดาร์บอน และ Hydrogenated carbon ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งยอดของ Raman spectrum และพันธะของคาร์บอนแสดงไว้ในตารางที่ 1.2 นอกจากนี้สามารถใช้ Raman spectrum ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชรที่ได้จากเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆกันเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น รูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กัน

(a) 0.5 % CH_4/H_2 (b) 2 % CH_4/H_2 และ (c) 5 % CH_4/H_2

ในรูปที่แสดงถึง Raman spectrum ของฟิล์มเพชรที่สร้างจากเงื่อนไขต่าง ๆ กันคือ (a) 0.5 % CH_4/H_2 (b) 2 % CH_4/H_2 และ (c) 5 % CH_4/H_2 รูปที่ 1.4a สเปกตรัมมีลักษณะแคบและยอดอยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่ายอดของเพชรธรรมชาติมาก นอกจากนี้ยังไม่พบยอดกราฟที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นฟิล์มเพชรจึงมีคุณภาพดี แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้สร้างดังกล่าวมีความเหมาะสม ส่วนรูปที่ 1.4b พบว่าสเปกตรัมของกราฟที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} เริ่มกว้างขึ้น และเกิดแถบกว้างขึ้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแถบประมาณ 1500 cm^{-1}

อันเป็นตำแหน่งของ Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon แสดงว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางวิชาการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นเพชรน้อยลงและมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่ สำหรับสเปกตรัมของรูป 1.4c ยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ 1332 cm^{-1} ลดลงอย่างมากและมีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 1334 cm^{-1} ตลอดจนแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1500 cm^{-1} เริ่มมียอดชัดเจนกว่ากราฟที่ได้ในเงื่อนไข (b) แสดงว่าฟิล์มเพชรจากเงื่อนไขการสร้างนี้มีความเป็นเพชรน้อย และมี Amorphous carbon หรือ Diamond-like carbon เจือปนอยู่มาก เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการสร้างที่ใช้ทั้งหมด

ตารางที่ 1.2 แสดงค่ายอดของ Raman spectrum ที่สัมพันธ์กับพันธะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอน

| Peak position | Type of carbon | Description |
|-----------------------------------|---|---|
| $\sim 1140\text{ cm}^{-1}$ | small size ($< 0.1\ \mu\text{m}$) cubic diamond | occasionally observed in diamond films with very small grain sizes ($< 0.1\ \mu\text{m}$) |
| $1315\text{-}1326\text{ cm}^{-1}$ | Hexagonal diamond | broad band, observed in shock wave produced diamond |
| 1332 cm^{-1} | Cubic diamond | first order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond |
| 1345 cm^{-1} | Amorphous carbon | broad band. It becomes a shoulder of the 1550 cm^{-1} band when the material is hydrogenated |
| 1355 cm^{-1} | Microcrystalline graphite | observed in materials with small grain sizes |
| 1550 cm^{-1} | Amorphous or diamond-like carbon | broad band |
| 1580 cm^{-1} | Graphite | first order peak |
| 2458 cm^{-1} | Cubic diamond | second order peak |
| 2710 cm^{-1} | Microcrystalline graphite | second order peak |
| 3240 cm^{-1} | Graphite | second order peak |

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีของแข็ง

ในปกติอะตอมเดี่ยวๆ ลักษณะของพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากนิวเคลียสของอะตอมมากกว่าคือมีกลุ่มของระดับพลังงานซึ่งอิเล็กตรอนจะอยู่ได้แต่ละระดับจะกำหนดด้วยเลขควอนตัมหลักอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนทุกตัวในผลึกของแข็งจะต้องเข้าไปครอบครองสถานะควอนตัมสถานะใดสถานะหนึ่ง และจะถูกแสดงด้วยกลุ่มของตัวเลขควอนตัมทั้งหมด 4 ตัว (n, l, m_l, m_s) และแต่ละสถานะควอนตัมจะยอมให้อิเล็กตรอนเข้าไปครอบครองได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ภายในบ่อของพลังงานศักย์ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมนั้น แต่อิเล็กตรอนที่อยู่ห่างนิวเคลียสมากที่สุดจะมีโอกาสหลุดออกไปจากอะตอมได้หากได้รับพลังงานระดับหนึ่งที่เพียงพอ ในสารของแข็งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากจึงมีอะตอมจำนวนมากเข้ามาใกล้ชิดกัน ถ้าหากว่าอะตอมหลายอะตอมเข้าใกล้กันอะตอมทั้งสองต่างก็เป็นอิสระ แต่เมื่อเข้ามาใกล้ชิดกันจะทำให้วงจรชั้นนอกสุดของทั้งสองอะตอมเกิดการทับซ้อนกันทำให้อิเล็กตรอนคู่แฝดแต่ละอะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปอีกอะตอมหนึ่งได้เพราะมีพลังงานค่าเดียวกัน ขณะนี้ถือว่าอะตอมทั้งสองเข้ามารวมเป็นระบบเดียวกัน แต่จากหลักการห้ามซ้อนของเพาลี (Pauli exclusion Principle) อิเล็กตรอนทั้งคู่จะมีพลังงานค่าเดียวกันไม่ได้ จะทำให้พลังงานศักย์แตกต่างไปจากเดิมเล็กน้อยโดยจะแยกเป็นสองค่าคือมีวงโครงสร้างเพิ่มเป็นสองวงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการแยกของระดับพลังงานในสารของแข็ง (Splitting of energy level) ในส่วนของระดับพลังงานด้านล่างจะคงมีระดับเหมือนเดิมเพราะไม่ได้มีปฏิกิริยาต่อกันแต่ถ้าระยะของอะตอมทั้งสองเข้ามาใกล้กันอีกในระดับล่างลงมาก็มีโอกาสเกิดการแยกระดับพลังงานได้อีก เมื่อพิจารณาตามปกติของสารของแข็งอะตอมจะมีจำนวนมากมายดั่งนั้นจะมีอะตอมจำนวนมากอยู่ใกล้ชิดกันและมีปฏิกิริยาต่อกัน ดังนั้นระดับพลังงานที่แยกออกมาจึงมีจำนวนมากซึ่งในแต่ละระดับจะมีค่าต่างกันเล็กน้อยจึงดูคล้ายกับพลังเหล่านี้มีค่าเรียงติดกันอย่างต่อเนื่อง และถูกเรียกว่า แถบยินยอม หรือ แถบพลังงานยินยอม (Allow Band)

ของแข็งทั่วไประดับพลังงานต่าง ๆ ในแถบวาเลนซ์จะมีค่าติดลบ และเมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ได้รับพลังงานเพิ่มเติมจากภายนอกจนเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานค่าเป็นบวก หรือมีค่า มากกว่า 0 eV มันจึงจะสามารถนำกระแสได้ และพลังงานที่อิเล็กตรอนวาเลนซ์ใช้ในการเปลี่ยนเป็นสถานะอิเล็กตรอนอิสระเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (Energy gap, E_g) นั่นคือระดับพลังงานมีค่าสูงกว่า 0

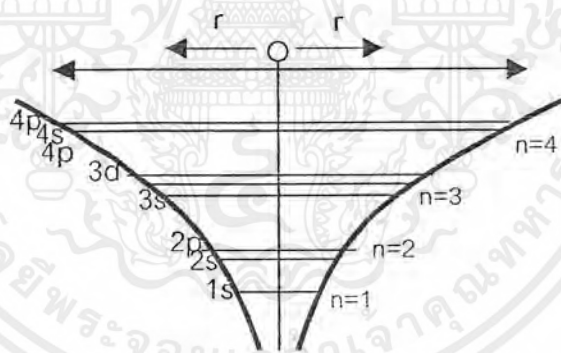
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

eV ซึ่งนั่นคือระดับพลังงานที่นำไฟฟ้าได้ และเรียกแถบนี้ว่าแถบนำไฟฟ้าหรือแถบนำ (Conduction band)

ต่อมาเมื่อพิจารณาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย โดยจะเริ่มพิจารณาว่าบ่อพลังงานศักย์ของอะตอมแต่ละอะตอม แสดงได้ด้วยรูปบ่อศักย์หนึ่งมิติดังที่ได้พิจารณาแล้วในรูปของการพิจารณาในกรณีบ่อศักย์หนึ่งมิติ แต่เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ที่เราได้ประมาณว่า แต่ละอะตอมสามารถแสดงด้วยบ่อจำลองรูปซึ่งมีความกว้าง เท่ากับ δ และมีความสูง เป็นอนันต์เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอิเล็กตรอนหลุดออกไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอมจะมีสมบัติและพฤติกรรมเหมือนกับอนุภาคที่อยู่ในบ่อศักย์รูปสี่เหลี่ยมนี้และจากกลศาสตร์ควอนตัม จะได้ว่าค่าพลังงานที่สามารถจะเป็นไปได้ของอนุภาคภายในบ่อศักย์รูปสี่เหลี่ยมหนึ่งมิติที่กว้าง L จะมีลักษณะเป็นค่าแบบไม่ต่อเนื่อง (Quantization) ดังสมการ

$$E_n = \frac{h^2 n^2}{8mL^2} \tag{2.1}$$

โดยที่ค่า n เป็นค่าตัวเลขควอนตัม มีค่า = 1, 2, 3,



รูปที่ 2.1 แสดงบ่อศักย์พลังงานของอะตอม

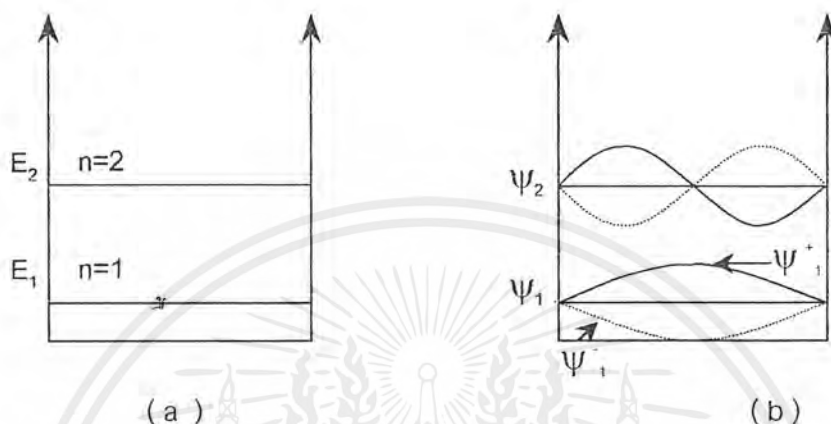
ค่าพลังงานตามสมการที่ 2.1 ถูกเรียกว่า ค่าไอเกน (Eigen value) ค่าพลังงานต่ำสุดจะปรากฏที่ระดับ n = 1 ซึ่งเรียกว่า ชั้นสถานะพื้น (Ground state) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนในรูปฟังก์ชันคลื่น ψ (wave function) ของอนุภาคซึ่งอยู่ในบ่อศักย์รูปสี่เหลี่ยมที่มีความลึกเป็นอนันต์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x คือตำแหน่งใด ๆ ภายในบ่อศักย์ และ L คือค่าความกว้างของบ่อศักย์

ฟังก์ชันคลื่น ψ_n จะมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ (sinusoidal) หรือเกือบจะเป็นสัญญาณไซน์เลยทีเดียว และเรียกฟังก์ชันคลื่น ψ_n นี้ว่า ฟังก์ชันไอเกน (Eigen function) อนุภาคที่ระดับพลังงานต่ำสุดคือ E_1 จะมีฟังก์ชันคลื่นคือ และมีลักษณะดังรูป 2.2 (a) และ 2.2 (b)



รูปที่ 2.2 (a) แสดงค่าพลังงานบ่อศักย์ที่สามารถเป็นไปได้ (b) ลักษณะฟังก์ชันคลื่นที่ระดับพลังงาน ต่าง ๆ

เมื่อเราพิจารณาปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมสองอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมแทนด้วยบ่อศักย์รูปสี่เหลี่ยมหนึ่งมิติซึ่งกว้าง δ และมีขอบบ่อสูงค่า ๆ หนึ่งแต่มีค่าน้อยกว่าอนันต์ เริ่มแรกระยะห่างระหว่างสองอะตอมจะต่างกันมาก ๆ เมื่อพิจารณาในกรณีนี้อะตอมทั้งสองจะไม่มีปฏิกริยาต่อกัน ดังนั้นลักษณะของบ่อศักย์ และระดับของพลังงานของอิเล็กตรอนรวมทั้งฟังก์ชันคลื่น จะมีตามสมการที่ 2.3 โดยค่าระดับพลังงานต่ำสุดของอิเล็กตรอนในอะตอม ($n = 1$)

$$E_1 = \frac{h^2}{8m\delta^2}$$

(2.3)

และค่าฟังก์ชันคลื่น คือ

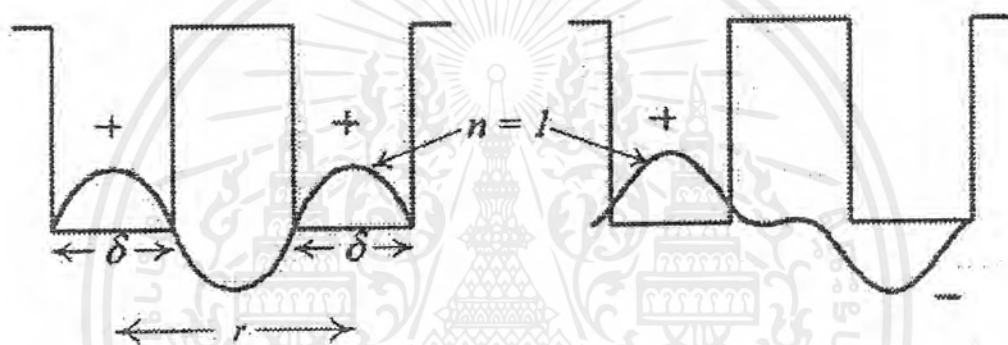
$$\psi_1 = \sqrt{\frac{2}{\delta}} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{\delta}\right)$$

(2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

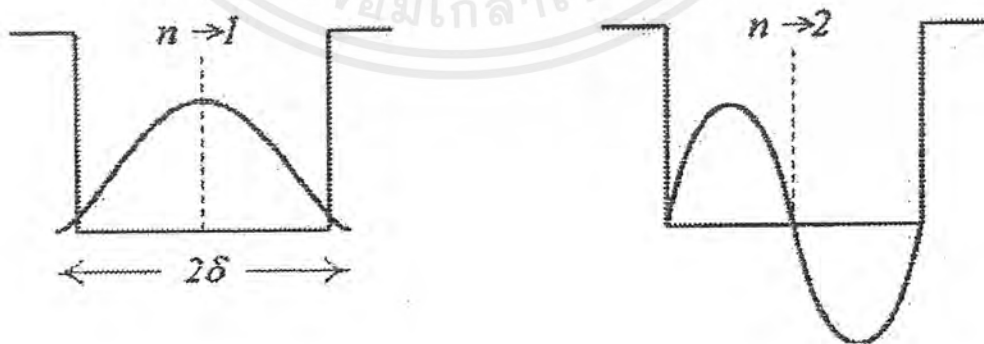
ค่าฟังก์ชันคลื่นอาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ถ้าในกรณีที่เราพิจารณาอะตอมสองอะตอมมีฟังก์ชันคลื่นสองอันเป็นบวกหรือลบเหมือนกัน เราจะเรียกลักษณะสมมาตรและเมื่อฟังก์ชันคลื่นมีลักษณะแตกต่างกันจะเรียกว่าไม่สมมาตร ในกรณีที่ค่าแอมพลิจูดมีค่าน้อยกว่าอนันต์จึงเห็นได้ว่ารูปฟังก์ชันคลื่นมีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนได้บ้างบริเวณนอกบ่อศักย์

และต่อมาเมื่ออะตอมเข้ามาใกล้กันมากจนมีปฏิริยาต่อกันบ่อศักย์จะเริ่มรวมตัวกันอย่างต่อเนื่องจนเริ่มเป็นระบบเดียวกันหรือเป็นบ่อศักย์เดียวกันและการกระจายของฟังก์ชันคลื่น ก็จะเป็นการต่อที่ต่อเนื่องกันและสามารถเกิดได้สองลักษณะคือสมมาตรและไม่สมมาตรดังรูป



รูปที่ 2.3 แสดงฟังก์ชันคลื่นอะตอมสองอะตอมมาใกล้กันระยะ $r > \delta$

ต่อมาเมื่อบ่อศักย์ทั้งสองเข้ามาใกล้กันเพิ่มมากขึ้นบ่อศักย์จะรวมตัวกันอย่างกลมกลืน และ



มีความกว้างเท่ากับ 2δ และมีฟังก์ชันคลื่นได้เป็นสองลักษณะเช่นกัน ดังรูป

รูปที่ 2.4 แสดงฟังก์ชันคลื่นอะตอมสองอะตอมเข้าใกล้กันระยะ $r = \delta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเรานำมาหาค่า ไอเกน (Eigen value) ได้ดังสมการ

กรณีสมมาตร เรากำหนดให้ $n = 1$ และ $L = 2$ จะได้

$$E_1 = \frac{h^2}{8m(2\delta)^2} = \frac{1}{4} \frac{h^2}{8m\delta^2} \quad (2.5)$$

กรณีไม่สมมาตร เรากำหนดให้ $n = 2$ และ $L = 2$ จะได้

$$E_1 = \frac{2^2 h^2}{8m\delta^2} = \frac{h^2}{8m\delta^2} \quad (2.6)$$

จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนค่าพลังงานออกเป็นสองลักษณะ และเมื่ออะตอมเข้ามาใกล้กันยิ่งขึ้น จะได้ขนาดของบ่อศักย์ก็คือ $(r + \delta)$ ดังแสดงรูป



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันคลื่นอะตอมสองอะตอมเข้ามาใกล้กันเป็นระยะ $r < \delta$

และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

กรณีสมมาตร เรากำหนดให้ $n = 1$ จะได้ว่า

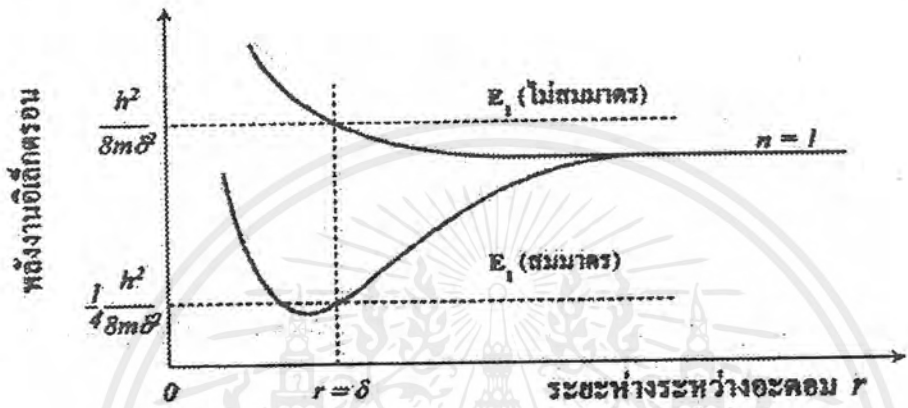
$$E_1 = \frac{h^2}{8m(r + \delta)^2} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

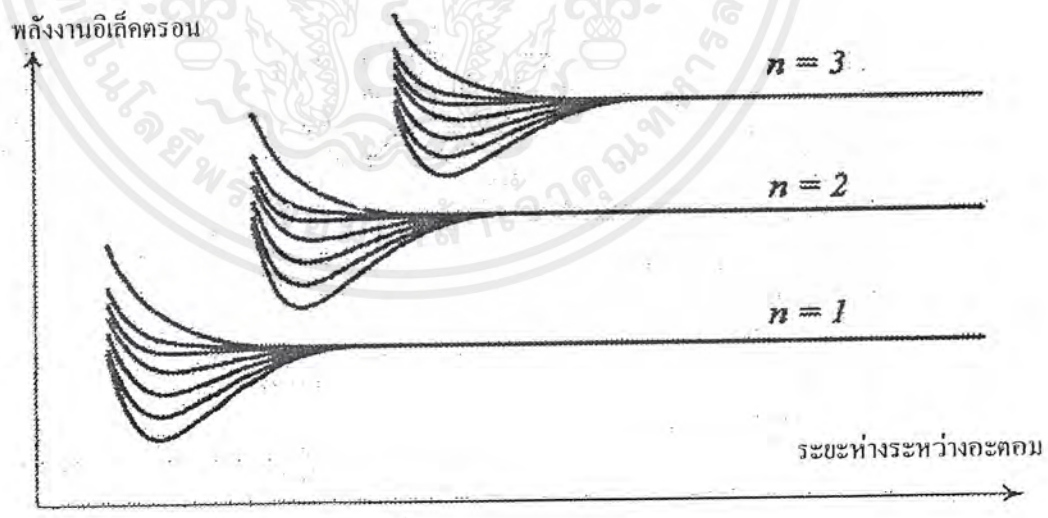
กรณีไม่สมมาตร เรากำหนดให้ $n = 2$ จะได้ว่า

$$E_1 = 4 \left\{ \frac{h}{8m(r + \delta)^2} \right\} \quad (2.8)$$

และจะมีระดับของพลังงานแยกออกเป็นสองลักษณะได้เช่นกันและสามารถเขียนเป็นได้
 ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการแยกระดับพลังงานเมื่ออะตอมเข้ามาอยู่ใกล้กัน

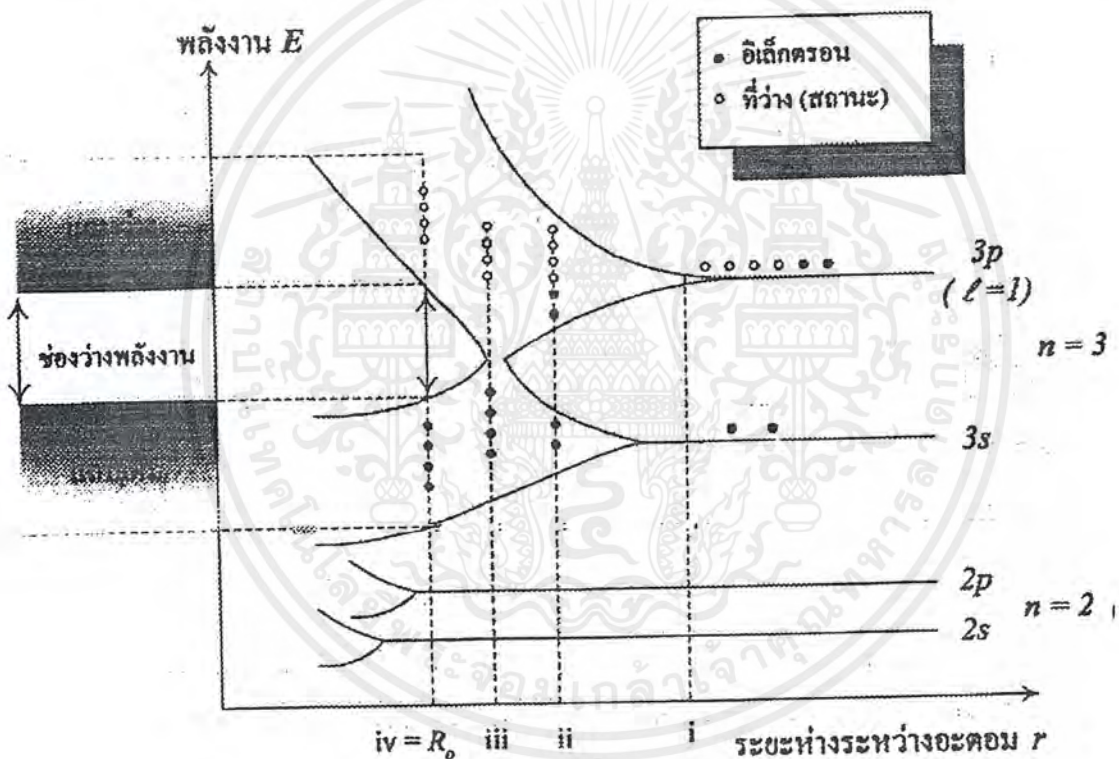


รูปที่ 2.7 แสดงการแยกระดับพลังงานที่ระดับ n ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระหว่างระหว่างอะตอมที่มีค่ามาก ๆ จะเห็นว่าจะมีระดับพลังงานที่ค่าเดียวเนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาต่อกัน เมื่ออะตอมเริ่มใกล้กัน เริ่มที่จะแยกระดับพลังงานโดยจำนวนพลังงานจะเกิดขึ้นตามจำนวนอะตอมที่มาทำปฏิกิริยาต่อกัน และระดับพลังงานที่มีค่าสูงจะแตกแยกออกก่อน ในขั้นถัดมาก็จะเกิดการแตกแยกตามมาเป็นลำดับ นั่นก็คือพลังงานระดับต่ำสุดจะเกิดการแยกพลังงานเมื่ออะตอมเข้ามาใกล้มากที่สุด

ในกรณีที่มีอิเล็กตรอนจำนวน n อะตอมจะมีพลังงานแตกออกเป็น n อะตอมที่อยู่ใกล้กันมาก ดังรูปที่ 2.7 โดยในความเป็นจริงสำหรับของแข็งจำนวนอะตอมที่มีปฏิกิริยาต่อกันจะมีค่ามาก ๆ เช่น 10^{22} อะตอม / ตร.ซม และช่องกว้างของแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ค่าประมาณ 1 eV ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะอยู่ติดกันมากเป็นแถบพลังงาน ซึ่งเรียกว่าแถบต่อเนื่อง



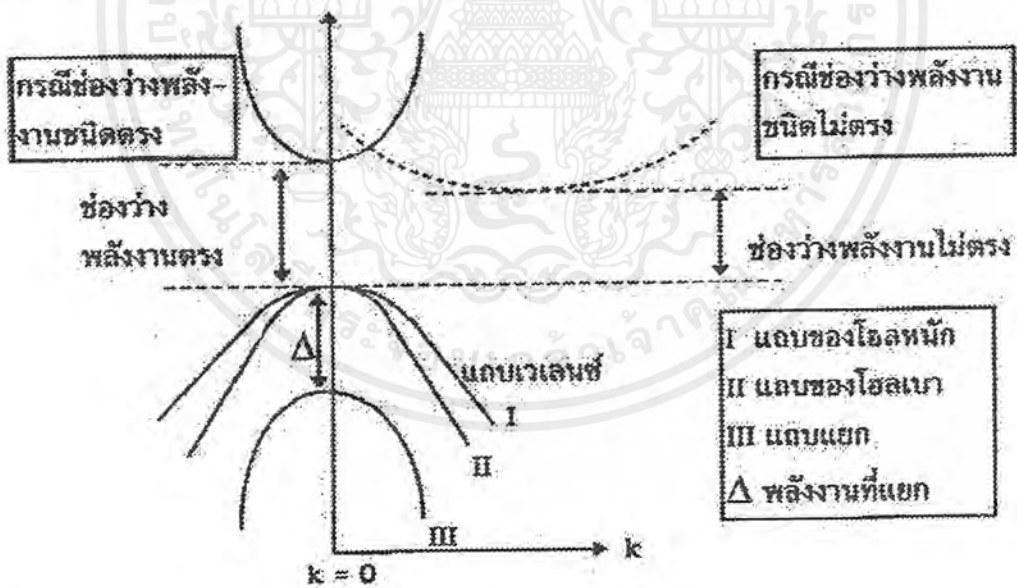
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดแถบพลังงานที่ระยะห่างต่าง ๆ

และระดับพลังงานที่จะมีได้ของแข็งจะปรากฏในลักษณะเป็นแถบพลังงาน ซึ่งแยกจากกันที่บริเวณต้องห้ามซึ่งหมายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะมีไม่ได้ จากรูปที่ สมมติให้อะตอมอยู่ห่างกันมากเกินนั้นคือค่าคงที่ของแลททิซ a มีค่ามากกระทั่งไม่มีปฏิกิริยาใด ๆ ระหว่างอะตอมดังในตำแหน่งที่ 1 ของ ต่อมาเมื่ออะตอมเข้ามาใกล้กันยิ่งขึ้นจะมีการแยกระดับพลังงานขึ้นทำ

ให้เกิดแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ ดังในตำแหน่งที่ 2 และต่อมาเมื่อลดระยะห่างเข้าไปอีกแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานจะมีการซ้อนทับกัน ดังในตำแหน่งที่ 3 และเมื่อลดระยะห่างของแลตทิซลงเรื่อยๆ พลังงานของอิเล็กตรอนที่จะมีได้ จะเกิดการทับซ้อนของระดับพลังงานซึ่งมีสองแถบดังกล่าวตำแหน่ง 4 ดังนั้นจะเกิดช่องว่างพลังงานต้องห้ามขึ้น (Forbidden gap) จึงสรุปว่า ระยะแลตทิซ a ซึ่งในของแข็งแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ ยิ่งระยะแลตทิซมีค่าน้อยจะทำให้เกิดช่องว่างของพลังงานมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรงและแถบพลังงานชนิดไม่ตรง

ในบางกรณีเราจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้ระดับพลังงานอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number หรือตัวย่อว่า k) ของอิเล็กตรอน นั่นคือจะเขียนแผนภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงานโดยแกนนอนคือเลขคลื่น k และแกนตั้งคือระดับพลังงานอิเล็กตรอน เนื่องกรณีนี้ $p = hk$ ดังนั้นค่าในแกนนอนคือค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนนั่นเอง เมื่อเราเขียนแผนภาพแถบพลังงานของฟังก์ชัน k จะแถบพลังงานเป็นรูปร่างโค้ง สูงๆ ต่ำๆ ดังในรูป โดยทั่วไปจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิดจะอยู่ที่ตำแหน่งค่า k เท่ากับ 0 พอดี ส่วนจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันอาจจะอยู่ที่ $k = 0$ หรือไม่ก็ได้ ซึ่งเราเรียกสารกึ่งตัวนำที่แถบต่ำสุดของแถบคอนดักชันอยู่ที่ $k = 0$ ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพลังงานแบบตรง (direct band gap semiconductor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดที่จุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันไม่ได้อยู่ที่ $k = 0$ เรียกเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานไม่ตรง (indirect band gap semiconductor)

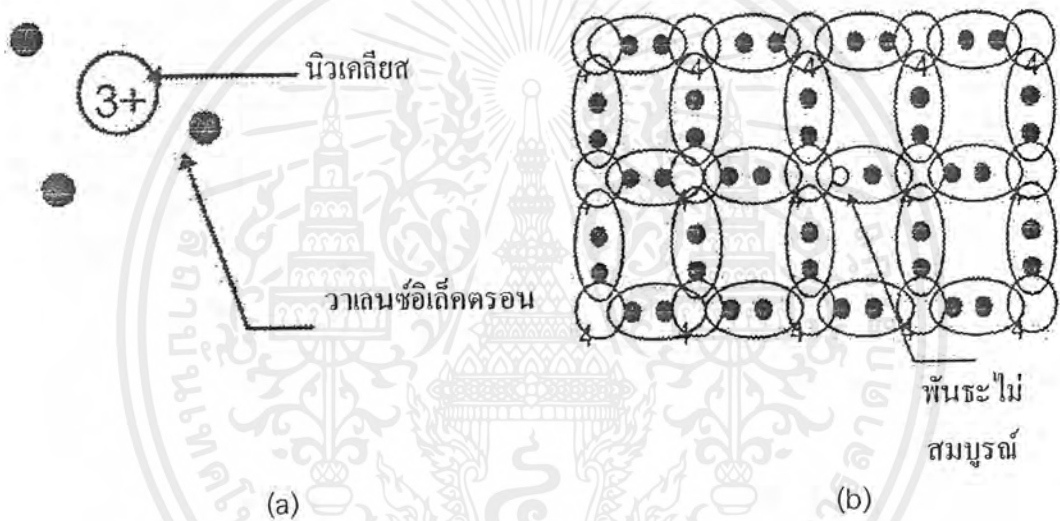


รูปที่ 2.9 แผนภาพของแถบพลังงานแบบชนิดตรง และแบบไม่ตรง

2.2 การเติมสารเจือ

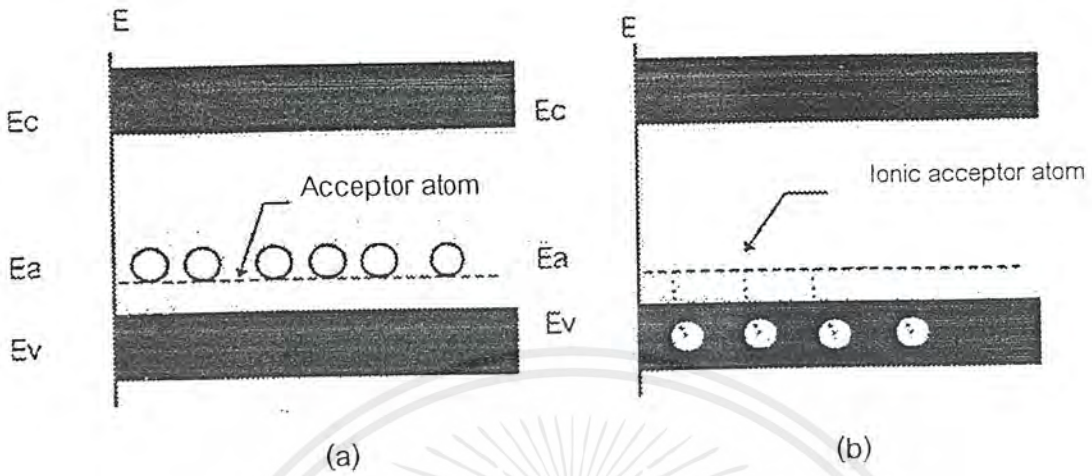
สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (intrinsic Semiconductor) หมายถึงสารบริสุทธิ์นั้นคือสารที่ไม่มีการเจือปนของอะตอมแปลกปลอมจากแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ ดังแสดงในรูป 2.10 (a) ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกสารจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและเกาะกันเป็นโครงข่าย หรือ แลตทิซ (Lattice) แต่ละอะตอมจะเกาะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เป็นการเกาะแบบพันธะโควาเลนต์นั่นคือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยที่อิเล็กตรอนเหล่านี้คืออิเล็กตรอนวาเลนซ์ (Valence electron) แต่สารชนิดนี้ถูกนำไปใช้เป็นสารกึ่งตัวนำได้น้อยมากเนื่องจากการนำไฟฟ้าต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเจือ (Impurity) ลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เมื่อเติมแล้วความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือ การเติมสารเจือเรียกว่า doping และสารที่นำมาเจือเรียกว่าสารกึ่งเอกทรินซิก (extrinsic Semiconductor) ตามปกติจะประกอบด้วยสาร หมู่ 3 หรือ หมู่ 5 ในโครงงานจะกล่าวถึงสารกึ่งตัวนำชนิด P โดยใช้สารหมู่ 3 โดยธาตุหมู่ 3 ที่เติมที่เติมลงไปเรียกสาร เจือผู้รับ เนื่องจากธาตุหมู่ 3 มีอิเล็กตรอน 3 ตัว เมื่อเติมลงไปทำให้พันธะไม่สมบูรณ์ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว ดังรูปที่ 2.10 (b)



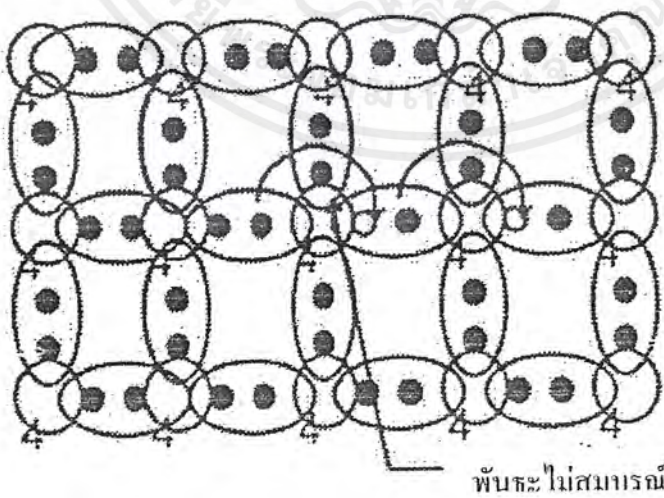
รูปที่ 2.10 (a) แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของสารเจือชนิดพี (b) แสดงการเกาะกันระหว่างอะตอมสารเจือชนิดพีและอะตอมสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 (a) โครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0 เคลวิน (b) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาเคลวิน

จาก รูปที่ 2.11 (a) จะเกิดโฮลขึ้นที่ระดับสารเจือผู้รับ (E_A) ซึ่งอยู่เหนือแถบพลังงานวาเลนซ์เพียงเล็กน้อยโดยที่อุณหภูมิ 0 องศาเคลวิน ยังไม่มีการเคลื่อนอิเล็กตรอนไปยังระดับดังกล่าว แต่เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (เพียง 0.01 eV) ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะมีพลังงานพอที่จะไปอยู่ที่ระดับพลังงานสารเจือผู้รับ ได้ดังรูปที่ 2.11 (b) ทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปตามที่ว่างเหล่านี้ทำดูเหมือนว่าโฮลเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.12



พันธะไม่สมบูรณ์

รูปที่ 2.12 แสดงการเคลื่อนที่ของอะตอมไปยังพันธะที่ไม่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ประจุพาหะมีจำนวนมาก เรียกว่า พาหะส่วนมาก (majority carriers) ส่วนประจุพาหะที่มีจำนวนน้อยเรียกว่า พาหะส่วนน้อย (minority carrier)

ดังนั้นพาหะส่วนมากของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ โฮล และของสารชนิดเอ็น คือ อิเล็กตรอน

2.3. คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น และเป็นอนุภาค ซึ่งปรากฏการณ์ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง (Reflection) การแทรกสอด (Interference) และการหักเหของแสง (Refraction) แสดงให้เห็นว่า แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นอนุภาค คือ การส่องสว่างของแสง เข้าสู่ ผิวโลหะ แล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออก สู่อากาศปกติ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อ ถูกแสง

2.3.1 คุณสมบัติที่เป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าเราให้ λ คือ ความยาวแสง ν คือ ความถี่ และ C_0 คือ ความเร็วของแสง จะได้

$$\lambda = \frac{C_0}{\nu} \quad (2.9)$$

แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็น เรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 nm โดยสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นสีต่าง

ถ้าแสงเดินทางในวัสดุที่มีเนื้อเรียบตลอด แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัสดุหนึ่งไปสู่วัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่ช่วงรอยต่อของวัสดุทั้งสองนั้นจะหักเห หรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ n จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าใน สุญญากาศ ดังนั้นความเร็วแสง C ในวัสดุจะเท่ากับ

$$C = C_0/n \quad (2.10)$$

ซึ่งค่าดัชนีหักเหแสง n ของวัสดุใดๆ จะขึ้นกับความยาวคลื่นหรือ ความถี่ของแสงด้วย และค่า n นี้มีค่าความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ ของวัสดุ (dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

(2.11)

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงตัว ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ = $8.8541872 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| พลังงาน (eV) | ความถี่ (s ⁻¹) | ความยาวคลื่น (m) | ชื่อคลื่น | วิธีการกำเนิดคลื่น |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 10 ⁻¹⁰ | 10 ³ (kHz) | 10 ⁵ km | ความถี่ต่ำ | เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ |
| | 10 ⁵ (MHz) | | คลื่นวิทยุ | VLF |
| | | | | LF |
| | | | | MF |
| | | | | HF |
| | 10 ⁹ (GHz) | 1 m | | VHF |
| 10 ⁻⁵ | | | | UHF |
| | 10 ¹⁰ | cm | ไมโครเวฟ | SHP |
| | | 10 ⁻³ mm | | EHF |
| | | | | |
| 1 | 10 ¹⁵ | 10 ⁻⁸ μm | แสงอินฟราเรด | สเปกตรัมของโมเลกุล |
| | | | แสงมองเห็น | สเปกตรัมของอะตอม |
| | | | แสงอัลตราไวโอเล็ต | |
| | | 10 ⁻⁹ nm | รังสีเอกซ์ | หลอดรังสีเอกซ์ |
| | | 10 ⁻¹⁰ Å | | |
| 10 ⁵ (MeV) | 10 ²⁰ | 10 ⁻¹³ X.U. | รังสีแกมมา | เครื่องเร่งอนุภาค |
| (GeV) | | | | รังสีจากนิวเคลียส/อวกาศ |
| 10 ¹⁰ | 10 ²⁵ | | | - รังสีคอสมิก - |

รูปที่ 2.13 แสดงความถี่และความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

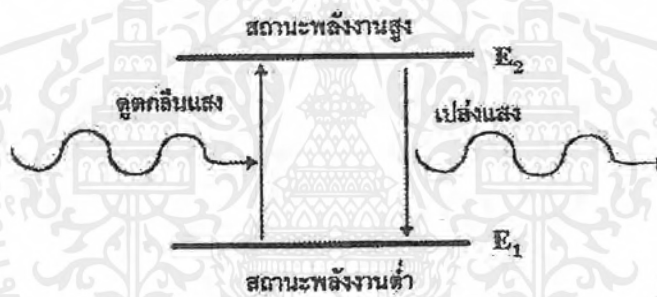
2.3.1 คุณสมบัติที่เป็นอนุภาคของแสง

แสงนอกจากจะเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคนี้ว่า อนุภาคโฟตอน (Photon) อนุภาคแสงมีพลังงานอยู่ภายใน และถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ

$$E = h\nu \quad (\text{eV}) \quad (2.12)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ $= 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

จากทฤษฎีข้างต้นนี้ ทำให้เป็นที่ยอมรับว่าแสงนั้นมีคุณสมบัติไม่เพียงแต่เป็นคลื่นแต่เป็นอนุภาคชนิดหนึ่งด้วย การดูดกลืนแสงหรือ การเปล่งแสง เกิดจากการที่ระบบที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างสภาวะพลังงานสูงและสภาวะพลังงานต่ำ

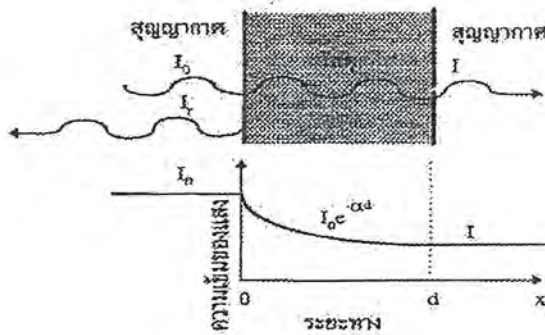


รูปที่ 2.14 แสดงสภาวะระดับพลังงานที่มีค่าไม่เท่ากัน

รูปที่ 2.14 แสดงภาพระดับพลังงานที่มีค่าไม่เท่ากันคือระดับพลังงานสูงอยู่ที่ E_2 และระดับพลังงานสูงค่าอยู่ที่ E_1 สมมติให้ว่าระบบที่กำลังพิจารณา เป็นระบบของอิเล็กตรอน การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอน จาก E_1 ไปสู่ E_2 ก็จะต้องมีการดูดกลืนพลังงาน โฟตอนเท่ากับ $E_2 - E_1$
การดูดกลืนแสงในของแข็ง

2.3.2 ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสง

เมื่อแสงเดินทางไปกระทบวัสดุ บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุและถูกวัสดุดูดกลืน



รูปที่ 2.15 แสดงการดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงของวัสดุ

จากรูป 2.15. ถ้าให้ I_0 คือความเข้มของแสงที่เดินทางไปกระทบวัสดุ โดยเราจะกำหนด นิยามของสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสง (R) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (T)

โดยที่ ความเข้มของการสะท้อน (I_r)

$$I_r = R I_0 \quad (2.13)$$

ทำให้ความเข้มแสงเข้าสู่วัสดุมีค่าเหลือเท่ากับ

$$I_0 - I_r = (1 - R) I_0 \quad (2.14)$$

และเมื่อแสงเดินทางเข้าสู่วัสดุ เป็นผลให้ความเข้มแสงมีค่าลดลง อย่าง เอกซ์โพเนนเชียล ตามระยะทาง d จะได้

$$I = (1 - R) I_0 \times e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

ความเข้มของแสงที่ทะลุออกด้านหลังวัสดุ

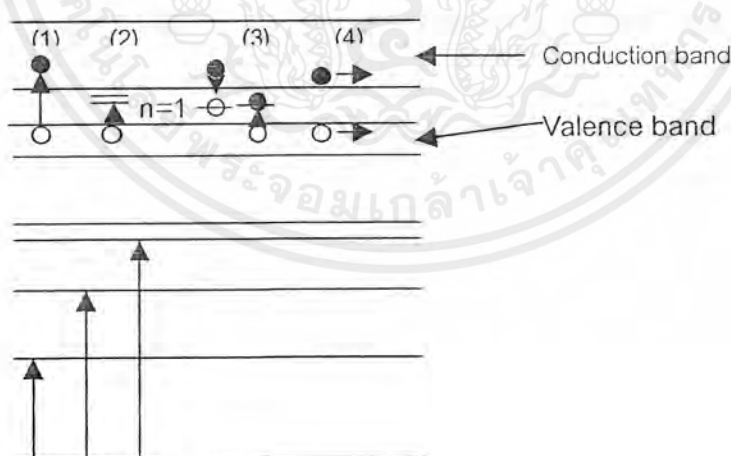
$$T = \frac{I}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{I}{I_0} = (I - R)e^{-\alpha d} \quad (2.16)$$

สาเหตุที่ทำให้แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ดูดกลืนในวัสดุ คือ อนุภาค อิเล็กตรอน หรือ ไอออน หรือ นิวเคลียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุนั้นซึ่งมีประจุไฟฟ้าและ โมเมนต์แม่เหล็ก จึงมีการเกิด อันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง จึงทำให้เกิดการดูดกลืน แสง และเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น

1. การเปลี่ยนแปลงสถานะของอะตอมพลังงานเดี่ยว ๆ
2. การเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของ อิเล็กตรอนและ โอล ในสารกึ่งตัวนำ
3. การเกิด เอกซิตอน (exciton)
4. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน และ โอล ระหว่างระดับพลังงานของสารเจือปน หรือ gap state ที่เกิดจากจุดบกพร่อง
5. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอิสระ (free carrier) ภายในแถบพลังงานเดียวกันใน โลหะ หรือสารกึ่งตัวนำ
6. การเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของอะตอมเมื่ออะตอมมัน
7. การกระตุ้นให้เกิดโพลาไรเซชันชนิดต่าง ๆ
8. การกระตุ้นให้โครงสร้างผลึกชนิด ไอออนเกิดการสั่น
9. การดูดกลืนแสงเนื่องจากโมเมนต์แม่เหล็กของนิวเคลียส หรือของ อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.16 กระบวนการเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ของอิเล็กตรอนในของแข็ง

จากรูปที่ 2.16 ได้อธิบาย เกี่ยวกับกลไกการดูดกลืนแสงด้วย อิเล็กตรอน ซึ่ง อิเล็กตรอน จะเปลี่ยนสถานะในรูปแบบต่างๆ ที่อยู่ในของแข็ง อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นในๆ ใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวเคลียสจะมีคุณสมบัติเหมือนอะตอมที่อยู่อย่างเดี่ยวๆ กล่าวคือมีระดับพลังงานแบบกระโดดเป็นเส้นๆ ไม่ต่อเนื่อง ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบนอกจะมีระดับพลังงานแบบแถบดังรูป ทำให้กลไกการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนจึงสามารถแบ่งออกได้เป็นลักษณะดังนี้

1. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในๆ
2. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจาก valence band ไปยัง conduction band
3. การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน หรือ โฮลที่อยู่ใน gap state
4. การดูดกลืนแสงเนื่องจาก อิเล็กตรอนหรือ โฮลอิสระ

2.3.3 การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนชั้นใน

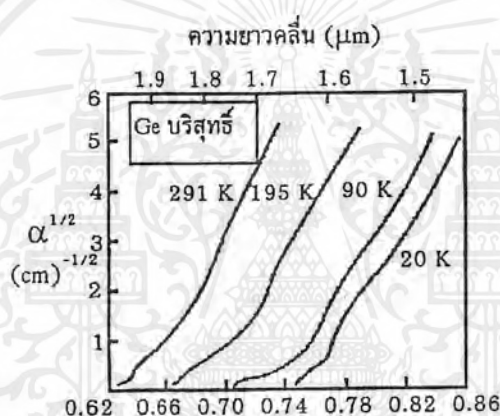
เนื่องจากระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในของอะตอม จะมีลักษณะ เป็นเส้นไม่ต่อเนื่องเหมือนระดับพลังงานของอะตอมที่อยู่เดี่ยว ซึ่งโดยส่วนมาก การดูดกลืนนี้จะอยู่ในย่านรังสีเอกซ์ ที่มีความยาวคลื่นสั้นมากๆ หรือ มีพลังงานโฟตอนที่มีค่าสูงมากประมาณหลายร้อยพันอิเล็กตรอนโวลต์

2.3.4 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน

การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) คือ การดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ ของอิเล็กตรอน จากยอดสูงสุดของแถบ valence ขึ้นไปสู่จุดต่ำ สุดของ แถบ conduction ในกรณีฉนวนและสารกึ่งตัวนำ และเราเรียกความยาวแสงของสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสง ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) โดยการดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ในบางครั้งเราจำเป็นต้องแสดงลักษณะพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number : K) ของอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือค่าโมเมนตัมนั่นเอง ($p = \hbar k$) จากรูปที่ 2.9 เมื่อเราเขียนลักษณะของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k เราจะได้แถบพลังงานที่มีรูปร่างสูงเป็นเส้นโค้งต่างๆ ไม่ได้เป็นเส้นตรงเสมอไป ในกรณีที่ยอดสูงสุดของ valence band อยู่ตรงจุดเดียวกับที่จุดต่ำสุด ของ conduction band ที่ตำแหน่งของ $k = 0$ พอดี เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานเช่นนี้ว่า แถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) ส่วนในกรณีที่ จุดยอดของ valence band อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดของ conduction band เราจะเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานเช่นนี้ว่า แถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gap) จะเห็นได้ว่า การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบตรง จะมีการไม่เปลี่ยนค่าโมเมนตัม เนื่องจาก $k = 0$ พอดี เราจะเรียกการรักษาโมเมนตัมให้ไม่เปลี่ยนแปลงนี้ว่า กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservative rule)

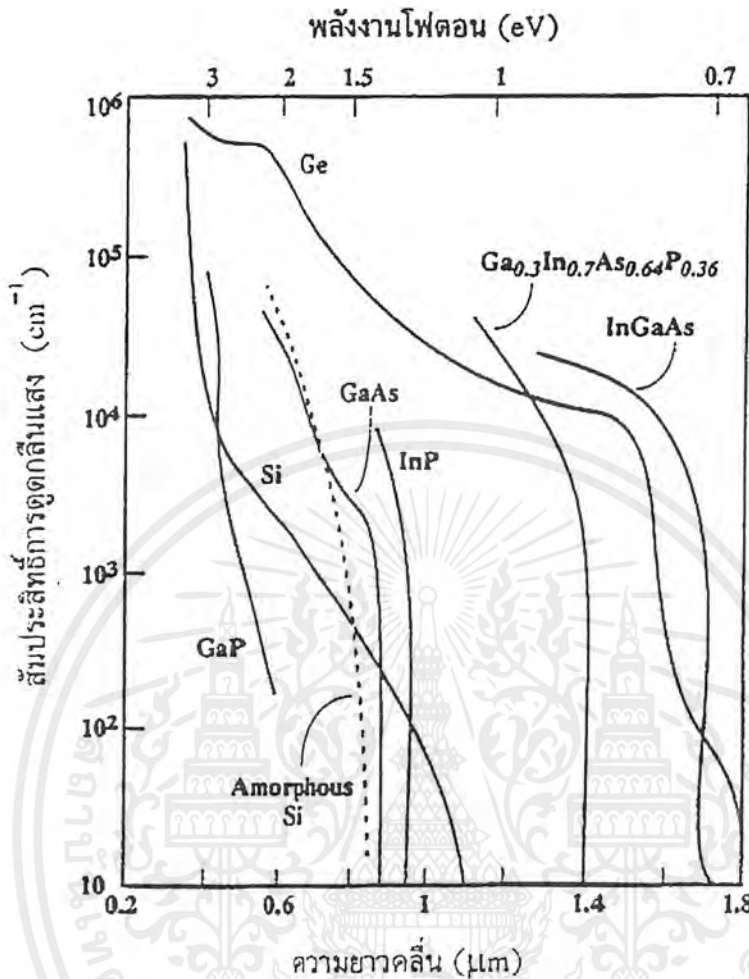
แต่ในกรณีที่การดูดกลืนแสงที่มีลักษณะพลังงานแบบไม่ตรงนั้นจะไม่มีสถานะพลังงานใดๆที่จะรองรับ อิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง เนื่องจาก จุดต่ำสุดของ conduction band ไม่ตรงกับ จุดยอดของ valence band ถ้าจะให้อิเล็กตรอน กระโดดข้ามไปสู่ conduction band ได้ ก็ต่อเมื่อ อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับ โครงผลึก (lattice) คือ การรับหรือการถ่ายเทโมเมนตัมกับ โครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง ซึ่งในปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบยังคงถูกรักษาไว้ได้ ทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบไม่ตรง เกิดขึ้นได้

นอกจากนี้ยังได้มีการทดลองอีก โดยพบว่า ปกติแล้วขนาดของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะแคบลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลให้ความยาวคลื่นของขอบการดูดกลืนแสงก็จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยดังรูปที่ 2.17.



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดขึ้นกับอุณหภูมิของช่องพลังงานของเจอร์เมเนียม แถบแนวตั้งคือ รากที่สองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

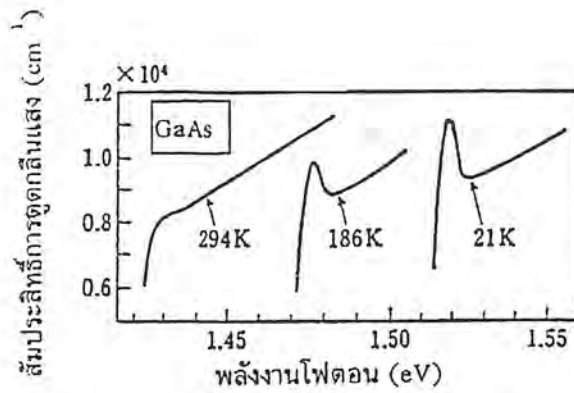
รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรง จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่บริเวณพลังงาน โฟตอนที่มีค่าใกล้เคียงกับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบไม่ตรงนั้น มีค่าค่อนข้างน้อย เพราะการดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยการถ่ายเทโฟนอนกับ โครงผลึก (lattice) ด้วย ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานไม่ตรงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เพราะที่อุณหภูมิสูง โครงผลึกจะสั่นมากขึ้น



รูป 2.18 แสดงสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตรอนในสารกึ่งตัวนำ การกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ที่ conduction band และเหลือ โฮล ไว้ใน valence band นั้น ในบางครั้ง ถ้าการกระตุ้นมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจจะทำให้อิเล็กตรอน และโฮลนั้นยังคงมีแรง กูดอมบี๋ดึงคู่ซึ่งกันและกัน อยู่เป็นคู่ เราเรียก อิเล็กตรอนที่สภาวะนี้ว่า เอกซิตรอน (exciton) เอกซิตรอนจะเป็นคู่ของ อิเล็กตรอนและโฮลที่ยังไม่เป็นอิสระแต่อยู่ในสภาพจับคู่กัน เกิดขึ้นเพราะพลังงานโฟตอนของแสงไม่สูงพอที่จะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนและโฮล เป็นอิสระต่อกันได้ ในการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิด เอกซิตรอนนั้น จะสังเกตได้ว่า สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงมีรูปเป็นยอดแหลมและมีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานเล็กน้อย ดังรูปข้างล่าง

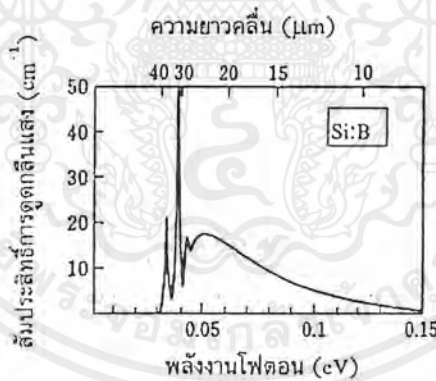
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ GaAs ที่อุณหภูมิต่ำๆ

2.3.5 การดูดกลืนแสงในแก๊ปสเตต

ในการเติมสารเจือปนหรืออะตอมแปลกปลอมเข้าสู่ผลึกสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดพลังงานต่างๆขึ้น ใน valence band เราเรียกระดับพลังงานนี้ว่า แก๊ปสเตต (gap state) ซึ่งแก๊ปสเตตเหล่านี้สามารถเป็นศูนย์กลางของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ด้วย จากรูป 2.20 จะแสดงถึง สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของซิลิคอนที่ถูกโด๊ปด้วยโบรอน โดยจะพบว่ามีการดูดกลืนแสงด้วยระดับแก๊ปสเตตที่เกิดจากสารเจือปน



รูปที่ 2.20 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ Si ซึ่งโด๊ปด้วยสารเจือปน โบรอน

2.3.6 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

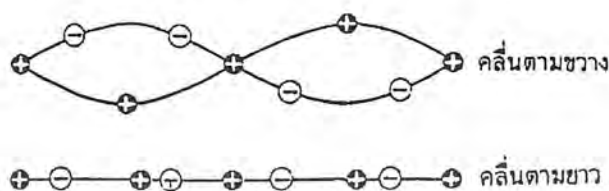
อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ใน conduction band ในโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานหรือสนามไฟฟ้าจากแสงจะถูกเร่งให้ โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและพลังงานของอิเล็กตรอนก็มีค่ามากขึ้น ในการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นมากๆ และสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะเพิ่มตามความยาวคลื่นแสงยก

กำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

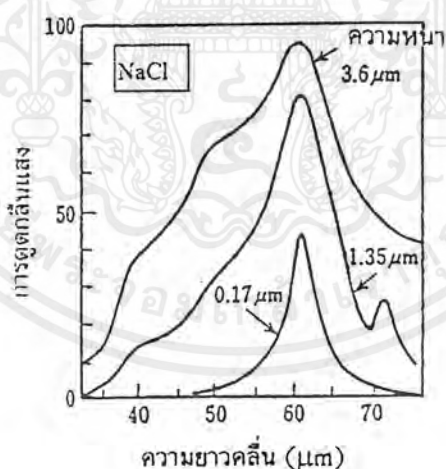
2.3.7 การดูดกลืนแสงด้วยการสั่นของโครงผลึก

ตามปกติแล้วอะตอมที่ประกอบกันเป็นวัสดุหนึ่ง ที่อุณหภูมิใดๆ อะตอมจะไม่ได้อยู่นิ่งเฉย แต่จะมีการสั่นรอบๆ ตำแหน่งสมดุลอยู่เสมอ และถ้าเป็นอะตอมที่มีขั้วไฟฟ้าแบบไอออนอยู่บ้าง ก็จะทำให้ไอออนบวกและลบสั่นสลับข้างกันดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แบบจำลองการสั่นของผลึก

ถ้าแสงมากระทบกับวัสดุเช่นนี้ แสงที่มีความถี่เท่ากับการสั่นของไอออนก็จะถูกวัสดุนั้นดูดกลืน รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างการดูดกลืนแสงที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกในย่านแสงอินฟราเรดในฟิล์มโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มีความหนาต่างๆ กัน จะสังเกตเห็นว่ามีการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 60 μm ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของโมเลกุลย่าน 10^{13} Hz



รูปที่ 2.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง NaCl

2.3.8 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก

เป็นปรากฏการณ์ที่แสงส่องเข้าสู่วัสดุ และทำการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใน valence band ซึ่งเป็นสถานะสมดุล ให้กระโดดขึ้นไปสู่ conduction band และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ พลังงานโฟตอนของแสงนั้นจะต้องมีค่า, มากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ตามหลักของการดึงเอาอิเล็กตรอนมาใช้งานคือ

2.3.8.1 ชนิดโฟโตคอนดักทิฟ (Photoconductive type) ได้แก่ การป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระในวัสดุวิ่งออกไปสู่วงจรมานอกและเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหล ส่วนโฮลที่เกิดขึ้นใน valence band ก็มีส่วนช่วยทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยวิธีนี้ได้แก่ โฟโตเซล

2.3.8.2 ชนิดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic type)

ได้แก่ การผลิตให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีรอยต่อ P-N (หรือ P - I - N) ซึ่งที่รอยต่อ ของ P-N นั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built - in potential) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และศักย์ไฟฟ้าภายในนี้จะนำพาเอาอิเล็กตรอนอิสระ และโฮล ที่เกิดจากแสงที่มากกระทบให้วิ่งออกออกไปสู่วงจรมานอกทางด้านชั้น N และ ชั้น P ได้ตามลำดับ ซึ่งพลังงานโฟตอนของแสงจะต้องมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ จึงจะทำให้ อิเล็กตรอน กระโดดข้ามไปสู่ conduction band เป็น อิเล็กตรอนอิสระและโฮลกลับลงมาสู่ valence band เป็น โฮล อิสรหะลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ทำให้ สิ่งประดิษฐ์ทำงานได้สะดวกรวดเร็ว ในวัสดุบางชนิดสามารถขยายสัญญาณได้ด้วยตัวเอง โดยสิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยวิธีนี้ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตไดโอด โฟโตทรานซิสเตอร์ CCD สิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง (PSD) ฯลฯ

2.4 การทำงานของโฟโตไดโอด

ในบทนี้จะอธิบายหลักการการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ pn รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และติดต่อกับชนิด n เป็นรอยต่อ pn นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้สัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนฐานรองซึ่งเป็นชนิด n

เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำกล่าวคือ

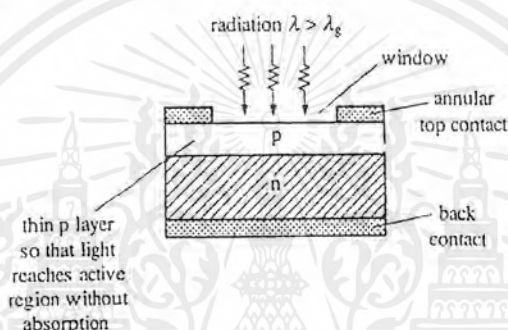
$$h\nu \geq E_g \quad \text{จะได้} \quad \frac{h\nu}{c} > E_g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราจะได้ค่าความคลื่นต่ำสุดเท่ากับ

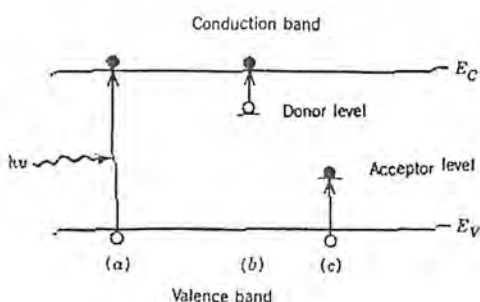
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g}$$

; λ_c = เป็นค่าที่คิดจากค่าความถี่ของระดับ donor หรือ acceptor ใน Bangap ในอุปกรณ์โฟโตไดโอดชนิด extrinsic จะมีค่า absorption optical ต่ำมาก และจะต้องใช้ในที่ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อจะหลีกเลี่ยงการ ionization อันเนื่องมาจากอุณหภูมิต่ำ ส่วนในอุปกรณ์โฟโตไดโอดชนิด intrinsic จะมีค่าการ absorption optical สูงมากกว่าและสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง



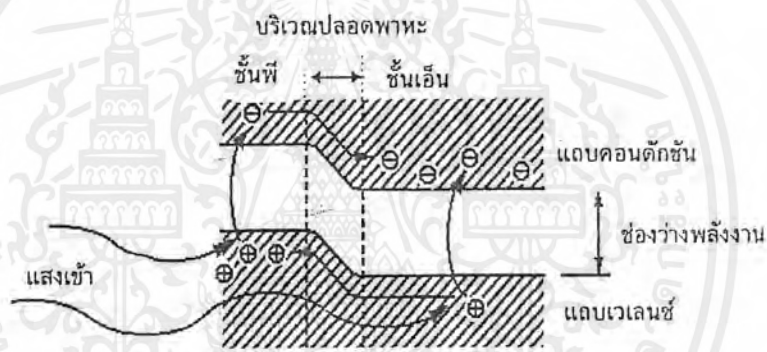
รูปที่ 2.23 ตัวอย่างภาคตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

แสงที่ถูกสารกึ่งตัวนำถูกกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน และที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ และเมื่อแสงที่มีระดับพลังงานเพียงพอมาตกกระทบที่โฟโตไดโอดจะทำให้ได้พาหะอิสระขึ้นในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยแสงได้ดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 รูปแสดงโฟโตไดโอดเมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.25 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ,ชั้นปลอดพาหะ และชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) พัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือจะไหลจากแถบเวเลนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p จำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก



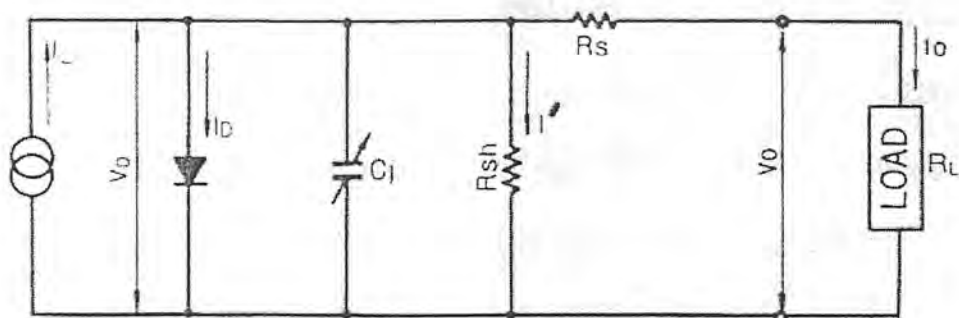
รูปที่ 2.24 แสดงแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

2.4.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 2.25 โดยที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นคือ

- I_L : กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง
- I_0 : กระแสไฟฟ้ามือในไดโอด
- C_j : ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ pn
- R_{sh} : ความต้านทานชั้นดี
- R_s : ความต้านทานอนุกรม
- I' : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}
- V_0 : แรงดันไฟฟ้าคร่อม ไดโอด
- I_0 : กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
- V_0 : แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

จากวงจรนี้ สามารถคำนวณหากระแสเอาต์พุต ได้ว่า

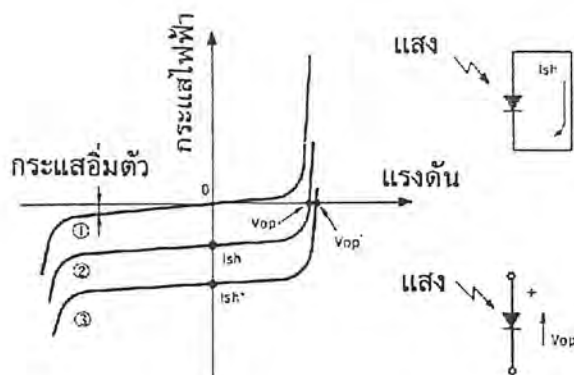
$$I_o = I_L - I_D = I_L - I_s \left(\exp \frac{eV_D}{kT} - 1 \right)$$

I_s ในสมการนี้คือกระแสไฟฟ้าย้อนกลับอิ่มตัวของโฟโตไดโอด และจากสมการนี้เราสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตวงจรเปิด V_{op} ได้จากการให้ $I_o = 0$ นั่นคือ

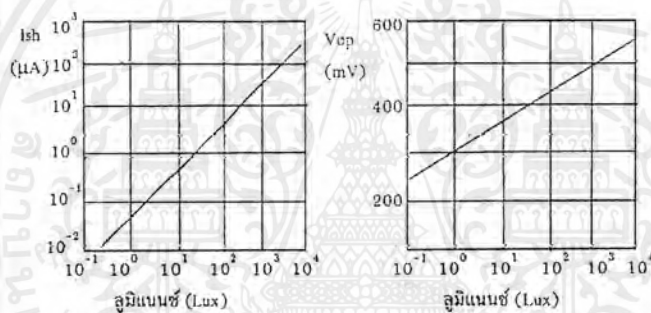
$$V_{op} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_s} + 1 \right)$$

2.4.2 เส้นกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟ

ในขณะที่ยังไม่ส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมือจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้เป็นตัวเรกติฟายเออร์ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดจะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่หมายเลข 2 และถ้าความเข้มของแสงมากขึ้นก็จะเป็นหมายเลข 3 ในขณะที่กำลังส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรโฟโตไดโอดจะได้ค่า โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากเอโนดไปสู่แคโทด ถ้าเป็นวงจรเปิดเราจะได้แรงดันวงจรเปิด หรือและโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงในลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.27 (a)



รูปที่ 2.26 รูป ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด
เส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพมืดและมีรูปร่างของไดโอดทั่วไป
เส้นหมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง



รูปที่ 2.27 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sh} ของโฟโตไดโอด และความเข้มของแสงอินพุต

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{op} และความเข้มของแสงอินพุต

ถ้าความเข้มของแสงอยู่ในช่วง $10^{-12} - 10^{-3}$ (W) I_{sh} จะเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงประมาณ 6-8 หลัก ความเข้มของแสงที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำให้ I_{sh} เปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับค่า NEP (Noise Equivalent Power) ของโฟโตไดโอด ส่วนความเข้มของแสงที่สูงที่สุดที่ยังคงทำให้ I_{sh} เป็นเส้นตรงจะขึ้นกับค่าความต้านทานของโหลดแลแรงดันไบแอสย้อนตามสมการต่อไปนี้

$$P_{\max} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_S + R_L) \cdot R_L}$$

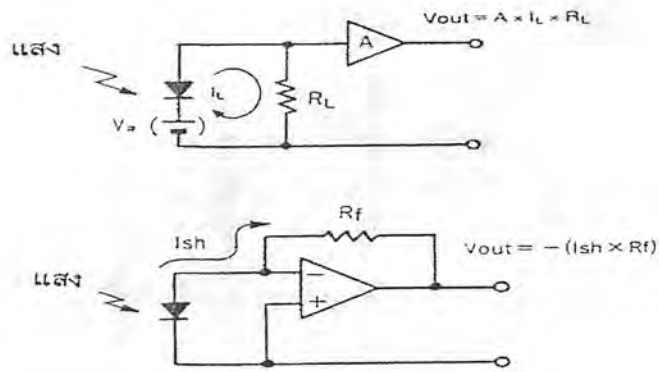
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ : ความเข้มของแสงที่สูงสุดที่กระแสไฟฟ้ายังเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงกับความเข้มของแสง
- V_{BI} : ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built – in potential) (V)
- V_R : แรงดันป้อนย้อนกลับ (V)
- R_L : ความต้านทานโหลด (Ω)
- R_L : เรสปอนซิวิตีหรือความไวของโฟโตโอด (AW) ที่ความยาวคลื่น
- R_S : ความต้านทานอนุกรม (Ω)

เนื่องจากแรงดันวงจรเปิด V_{op} แปรผันตรงกับค่า $\ln P$ (P คือความเข้มของแสง) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ V_{op} เปลี่ยนแปลงมากด้วย ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ V_{op} เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสง

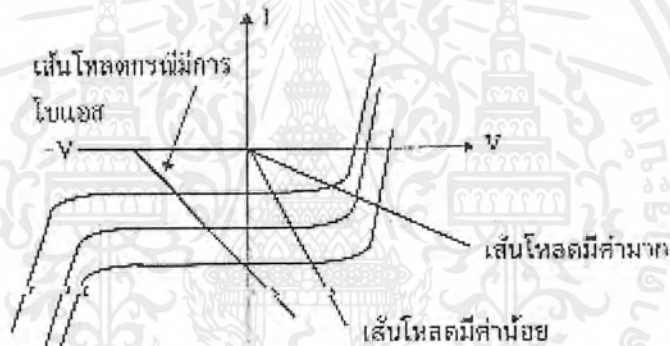
การใช้กระแสลัดวงจร I_{sh} เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสงทำได้โดยการใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 2.28 ในรูป (a) มีโหลดตัวต้านทาน R_L ต่ออยู่ที่เอาต์พุตของโฟโตโอด ดังนั้นแรงดัน $I_{sh} R_L$ จึงสามารถขยายได้โดยใช้แอมพลิฟายเออร์ A และถ้ามีการไปแอสซ็อนด้วยแรงดัน V_R จะช่วยทำให้สามารถวัดแสงที่มีการเปิดและปิดแสงด้วยความเร็วสูงได้เร็วขึ้น แต่มีข้อเสียที่ลักษณะเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเข้มของแสงในวงจรนี้ไม่ค่อยจะดีนัก รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะสมบัติของ I-V และเส้น โหลด

รูปที่ 2.28 (b) เป็นวิธีการใช้อุปแอมป์แบบวงจรป้อนกลับซึ่งความต้านทานอินพุตสมมูล (equivalent input resistance) มีค่าน้อยกว่า R_L หลายหลัก ทำให้สามารถใช้วงจรนี้วัด I_{sh} ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติได้ดีมาก



รูปที่ 2.28 การวัดความเข้มของแสงด้วยโฟโตไดโอด

- ทำการไบแอสแบบย้อนและวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลด
- ต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์และวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร



รูปที่ 2.29 ลักษณะสมบัติของเส้น I-V ในสภาพมืดของโฟโตไดโอดและเส้นโหลด

รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะสมบัติ I-V ในสภาพมืดโดยขยายสเกลให้ใหญ่ให้เห็นชัดในช่วง -10 mV ถึง $+10 \text{ mV}$ (ขยายจากรูปที่ 2.26) จากรูปนี้จะเห็นว่ามีการแปรสภาพไฟฟ้าเมื่อไหลในลักษณะเชิงเส้นตรงกับแรงดัน เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานชั้นดี R_{sh} ได้จากความลาดของเส้นตรงนี้ ความต้านทานชั้นดีนี้เป็นสาเหตุของการเกิดกระแสไฟฟ้ารบกวนชนิดเทอร์มอล (thermal noise current) ผู้ผลิตทั่วไปจะให้ค่า ที่แรงดันไบแอสย้อน $V_R = -10 \text{ mV}$ ซึ่งผู้ใช้สามารถคำนวณหา R_{sh} ได้จากสูตร $R_{sh} = 10 \text{ (mV)} / I_d \text{ } \Omega$

2.4.3 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด

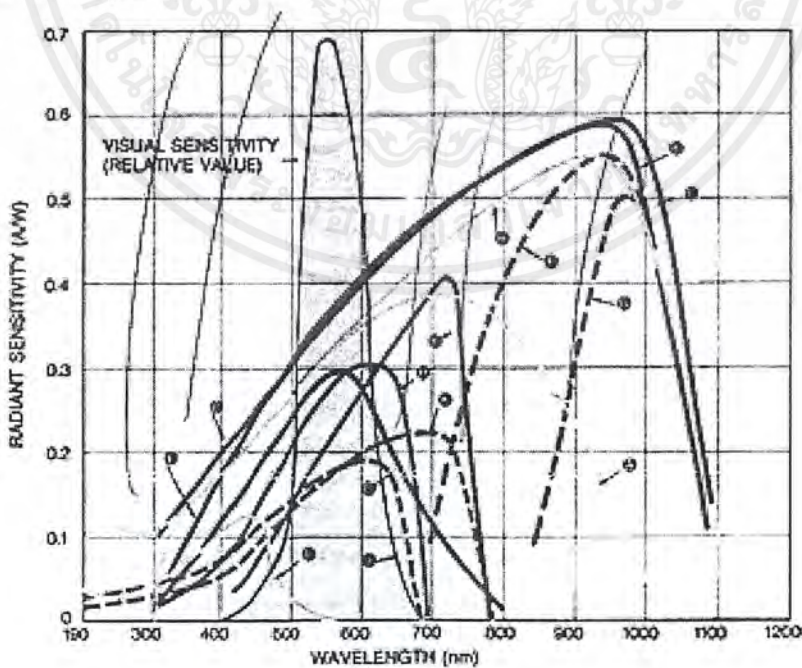
2.4.3.1 สเปกตรัมผลตอบสนอง

ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะไม่เกิดการดูดกลืนแสง ความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืนได้จะต้องมีค่าดังนี้

$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g} \quad (\text{nm})$$

ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้อง ฤทธิ์ของวัสดุ Si มีค่า E_g เท่ากับ 1.1 eV ดังนั้นความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนด้วย Si ต้องสั้นกว่า 1,100 nm หรือฤทธิ์ของวัสดุ GaAs มีค่า E_g เท่ากับ 1.4 eV ดังนั้นความยาวคลื่นแสงของแสงที่จะถูกดูดกลืนด้วย GaAs ต้องสั้นกว่า 700 nm ตัวอย่างลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 2.30.a การที่สเปกตรัมมีลักษณะเป็นภูเขาเพราะว่าระยะทางแทรกซึม (penetration depth) ของแสงจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นสั้นลง ดังนั้นผลตอบสนองด้านความยาวคลื่นสั้นจึงลดลงด้วย

ขีดจำกัดด้านความยาวคลื่นแสงที่โฟโตไดโอดจะตอบสนองได้นั้น นอกจากจะขึ้นกับวัสดุสารกึ่งตัวนำแล้ว ยังขึ้นกับความสามารถในการทะลุผ่านแสงของวัสดุกระจกด้านหน้าของโฟโตไดโอดด้วย ตัวอย่างเช่นกระจกชนิดโบรอนซิลิเกต (boron-silicate glass) ให้แสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า 300 nm ผ่านได้ ถ้าต้องการให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 300nm ต้องใช้หน้าต่างกระจกชนิดควอตซ์ (quartz)



a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ชนิดของโฟโตไดโอด | คุณสมบัติเด่น | ช่วง ตอบสนอง (nm) | ยอด สเปกตรัม (nm) | สัญลักษณ์ ในรูป |
|--------------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| โฟโตไดโอดชนิด Si | ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเล็ต ถึง แสงมองเห็น | 190-1000 | 720 | A |
| | ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเล็ต ถึง อินฟราเรด | 190-1100 | 960 | B |
| | ตอบสนองย่านแสงมองเห็น ถึง อินฟราเรด | 320-1100 | 960 | C |
| | ตอบสนองย่านแสงมองเห็น | 320-730 | 560 | D |
| พินโฟโตไดโอดชนิด Si | ตอบสนองเร็วมาก สำหรับการสื่อสารด้วยแสง การเชื่อมข้อมูลด้วยเส้นใยแสง | 320-1100 | 960 | E |
| | ชนิดไม่ตอบสนองต่อแสงมองเห็น | 700-1100 | 960 | F |
| | ชนิดไม่ตอบสนองต่อแสงมองเห็น | 840-1100 | 980 | G |
| โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดแพร์ซึม) | ตอบสนองย่านแสงมองเห็น | 300-680 | 640 | H |
| | ตอบสนองย่านแสงมองเห็นและไวต่อแสงสีแดง | 400-760 | 710 | I |
| โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดชอตต์กี) | ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเล็ต ถึง แสงมองเห็น | 190-680 | 610 | J |
| | ตอบสนองย่านแสงมองเห็นและไวต่อแสงสีแดง | 190-760 | 710 | K |
| โฟโตไดโอดชนิด GaP | ตอบสนองย่านแสงอัลตราไวโอเล็ตถึง สีเขียว | 190-550 | 440 | L |

b

รูปที่ 2.30 ตัวอย่างลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

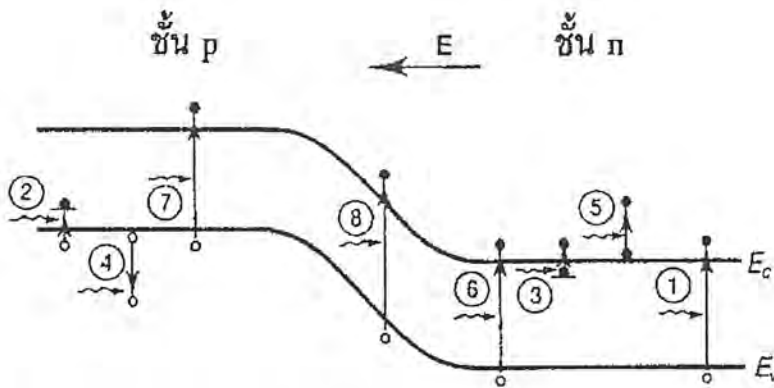
2.4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโตไดโอดมาก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสไฟฟ้ามีเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นดีขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลดลง

สำหรับด้านกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยเนื่องจากค่าอุณหภูมิสูงขึ้นความน่าจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปแถบคอนดักชันจะมีค่ามากขึ้นดังนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานชั้นดี ลดลงและสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล และสัญญาณรบกวนชนิดช็อตเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าแรงดันวงจรเปิดของโฟโตไดโอดก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น จะลดลงอย่างเชิงเส้น

2.4.3.4 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต

โฟโตไดโอดจะผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อพลังงานโฟตอน ของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แต่ยังไม่ได้พิจารณาว่าการดูดกลืนแสงหรือการผลิตพาหะโฟตอนเหล่านี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้เข้าไปเผยแพร่บนฐานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่าง ๆ ในรอยต่อ pn ในสภาพกำลังมีการไบแอสย้อน

โตนันเกิดขึ้นในส่วใดของโฟโตไดโอดใน กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตพาหะที่เกิดขึ้นใน โฟโตไดโอดจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและผลิต โฟโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพ

จากรูป 2.31 สภาพแสงกำลังมีแสงส่องเข้าทางด้านชั้น p และกำลังมีการ ไบอัสย้อนกลับ ที่รอยต่อ pn หมายเลขต่าง ๆ แสดงกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

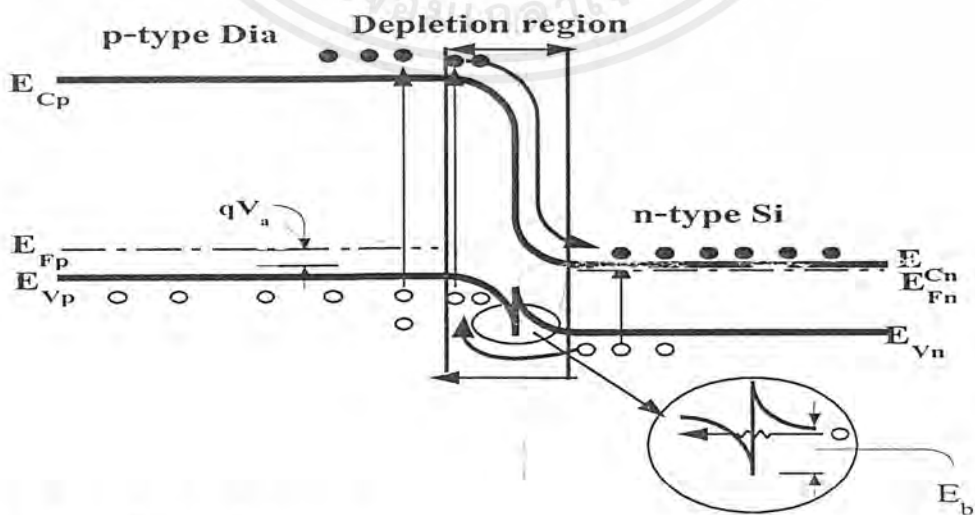
1. เป็นการดูดกลืนแสงด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ด้านหลังและห่างไกลจากรกชั้นปลอดพาหะ(ในรูปนี้ ชั้น n อยู่ด้านหลังแต่อาจสลับกับชั้น p ก็ได้) ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับ ช่องว่างพลังงานก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน/โฮล แต่เนื่องจากไม่มี สนามไฟฟ้าในชั้นนี้ดังนั้นพาหะที่เกิดจาก (1)นี้จะเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่ซึมเท่านั้นซึ่ง พาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตมากนัก
2. เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ระหว่างแถบวาเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์แต่ในที่สุดพาหะ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะตกลงมารวมกับโฮลจึงไม่มีบทบาทต่อเอาท์พุตเช่นกัน
3. เหมือนกรณี 2 แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างระดับ โดเนอร์และแถบคอนดักชัน ไม่มี ผลต่อเอาท์พุต
4. เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระในแถบวาเลนซ์ในชั้น p และเพียงแต่ระดับพลังงานของ โฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาท์พุต
5. เหมือนข้อ 4 แต่การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชันและไม่มีผลเอาท์พุต
6. เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น n ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมากอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่ซึม ไปสู่ชั้น n ด้านหลังและพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้น ปลอดพาหะและโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ผ่านไปสู่ชั้น p และ โฮล เหล่านี้จะมีผลต่อเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เหมือนกรณี 6 เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมากพาหะอิเล็กตรอนข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะแต่ อิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อเอาท์พุท
8. เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอน/โฮลในชั้นปลอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ชั้น n และ p ตามลำดับและจะมีผลต่อเอาท์พุทมากที่สุด

จากชั้นต้นกลไกหมายเลข 6-8 โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข 8 จะมีผลต่อการผลิตกระแสเอาท์พุทมากที่สุดเนื่องจากจำนวนพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงนั้นแปรผันตรงกับกำลังของแสงหรือจำนวนโฟตอนที่เดินทางสู่สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการทราบค่ากำลังของแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญมากจากรูปให้แกนแนวนอนมีความลึกกล่าวคือในสารกึ่งตัวนำและแกนตั้งคือกำลังของแสง ให้กำลังของแสงอินพุตเริ่มแรกมีค่า p_0 ให้สัมประสิทธิ์สะท้อนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำคือ R ดังนั้นกำลังของแสงที่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำคือ ในขณะที่แสงเดินทางอยู่ในสารกึ่งตัวนำแสงจะถูกดูดกลืนและกำลังของแสงจะลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียลตามระยะทาง

หลักการทํางานของโฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชรจะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นรอยต่อเป็นแบบซิงเกิลเฮเทอโร (Single Hetero-Junction นิยม SH) โดยรอยต่อนี้ได้แก่รอยต่อ $p-n$ ที่ใช้เป็นตัววัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นช่องว่างพลังงานของชั้น p จึงไม่เท่ากับชั้น n โดยจะมีลักษณะโครงสร้างรอยต่อ ดังรูป 2.23 ที่ด้านรับแสงจะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบฟิล์มเพชรชนิด p และต่อติดกับสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนชนิด n เป็นรอยต่อ



รูปที่ 2.32 โครงสร้างโฟโตไดโอดรอยต่อเฮเทอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการทดลอง

3.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ฟิล์มเพชรสามารถเกิดบนฐานรองที่ไม่ใช่เพชรหลายชนิดด้วยกัน ในรายงานเล่มนี้จะเลือกใช้ฐานรองเพียงอย่างเดียวคือ Si เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีโซอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ก่อนที่จะนำแผ่นฐานรองซิลิกอนไปใช้ในการทดลอง จำเป็นต้องมีกระบวนการเตรียมแผ่นฐานรองดังกระบวนการต่อไปนี้

3.1.1 การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิกอนเริ่มต้น (Initial cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water; DI) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำ DI
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำ DI
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมันล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิวฐานรองเพื่อกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียสของเพชรเร็วขึ้น โดยการเตรียมพื้นผิวฐานรองจะมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการเตรียมพื้นผิวของฐานรองจะถูกเลือกใช้ให้เหมาะสมตามกระบวนการทดลองและสร้าง

3.2 การเตรียมพื้นผิวฐานรองโดยการขัดด้วยครีมเพชร

การเตรียมพื้นผิวฐานรองวิธีนี้จะใช้ครีมเพชรขนาดต่างๆ คือ 0.25 ไมโครเมตร ขัดที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน ซึ่งมีลักษณะเรียบและขัดมันเป็นกระจกเงา (Mirror polished) ใช้เวลาในการขัดประมาณ 3 ชั่วโมง ผลจากการขัดด้วยครีมเพชรจะทำให้เกิดรอยขีดเล็ก ๆ ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน โดยขนาดของรอยขีดที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของครีมเพชรที่ใช้ภายหลังจากขัดแผ่นซิลิกอนเรียบร้อยแล้วต้องนำแผ่นซิลิกอนไปทำความสะอาด โดยกระทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อุลตราโซนิคแผ่นซิลิกอนในไตรคลอโรเอทิลีน เป็นเวลา 10 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน 10 นาที
- อุลตราโซนิคในน้ำ DI 10 นาที
- เป่าแผ่นซิลิกอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูรอยขีดที่เกิดจากการขัดในกรณีที่รอยขีดที่เกิดมีจำนวนน้อยต้องนำแผ่นซิลิกอนไปขัดใหม่ โดยรอยขีดที่เกิดขึ้นนี้เป็นสิ่งสำคัญในการกระตุ้นให้เกิดการนิวเคลียสของฟิล์มเพชร



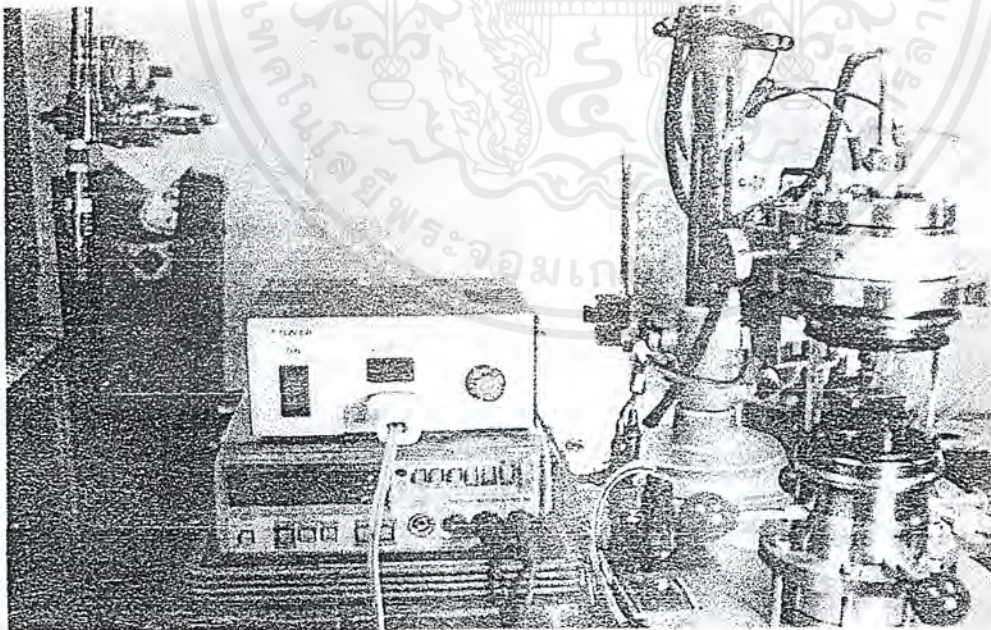
รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างครีมเพชรที่ใช้ในการขัดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชร

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD (Hot filament CVD) โดยใช้ชุดทดลองที่ประกอบขึ้นซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจากรูปชุดทดลองที่สร้างขึ้นนั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

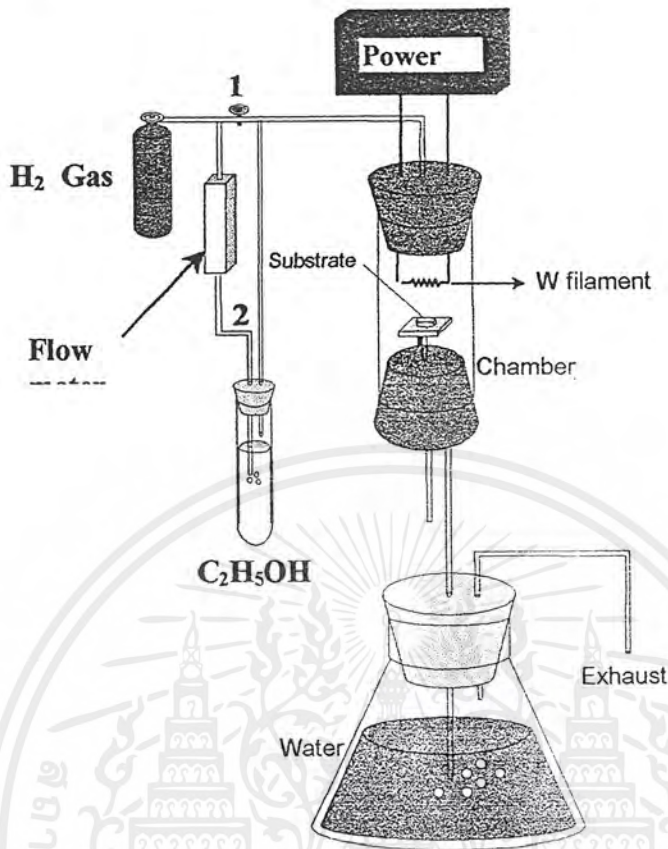
1. ถังแก๊สไฮโดรเจน
2. Regulator ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจน
3. Flow meter ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่ผ่านเข้าไปในแหล่งจ่าย
4. แหล่งจ่ายเอทิลแอลกอฮอล์
5. Chamber ทำจากท่อควอทซ์ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
6. ขั้วจ่ายไฟกระแสตรง
7. นาฬิกาจับเวลา
8. สวิตช์พัลสมระบายความร้อน
9. สวิตช์ Power
10. ปุ่มปรับกระแส
11. DC-Ampmeter
12. แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 3 ชูต
13. ขวดใส่น้ำสำหรับเช็คแก๊สไฮโดรเจนที่ไหลออก



รูป 3.2 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งชุดทดลองข้างต้น สามารถเขียนเป็นระบบอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบอย่างง่ายของการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

ในการสร้างฟิล์มเพชรจะใช้เงื่อนไขในการสร้างดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มเพชร

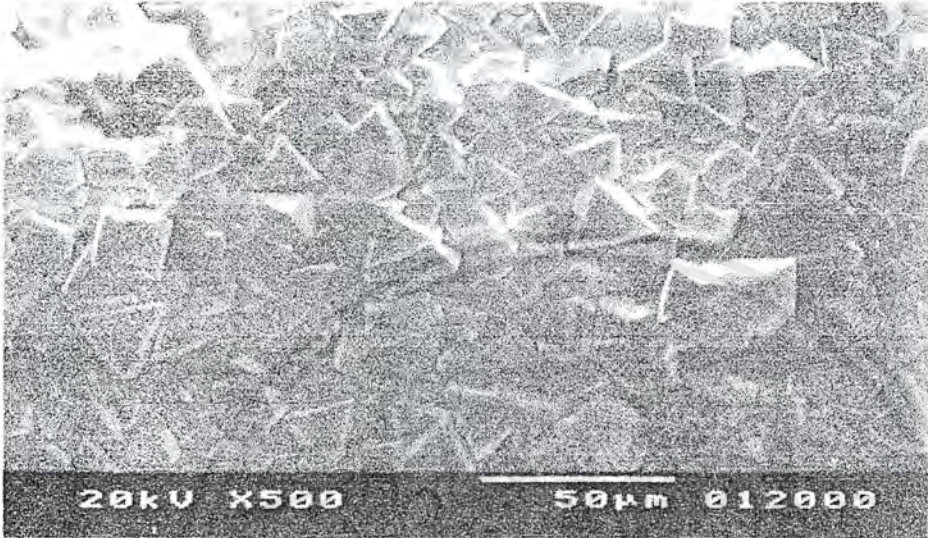
| | |
|---|--|
| อุณหภูมิไส้หลอด | $\approx 2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| อุณหภูมิฐานรอง | $940\text{-}960\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อก๊าซไฮโดรเจน | 14% โดยปริมาตร |
| ความดัน | 1 atm |
| ระยะห่างระหว่างไส้หลอดกับฐานรอง | 2 มิลลิเมตร |
| ระยะเวลาในการสร้าง | ≈ 20 นาที |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการทดสอบฟิล์มเพชร

3.4.1 ตรวจสอบลักษณะของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM

หลังจากที่สร้างฟิล์มเพชรเสร็จแล้วนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง SEM จะได้ดังรูป 3.4 จากรูปจะเห็นผิวหน้าของฟิล์มเพชรมีลักษณะเป็นระนาบ (111)



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

3.4.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชรด้วยเครื่อง Raman spectroscopy

หลังจากตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM แล้ว จากนั้นก็นำฟิล์มเพชรมาตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นเพชรด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy จากรูป Raman Spectrum จะเห็นได้ว่าค่ายอดสูงสุดของ Spectrum จะอยู่ที่ 1333 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติ โดยที่เพชรธรรมชาติจะมีค่ายอดสูงสุดของ Spectrum จะอยู่ที่ 1332 cm^{-1}



รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของโครงสร้างเพชรด้วย Ramann spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด (Photo diode) ระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีและซิลิกอนชนิดเอ็น

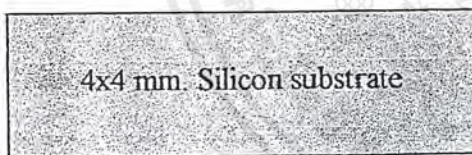
3.5.1 กระบวนการสร้างฟิล์มเพชรชนิดพี

สร้างฟิล์มเพชรชนิดพีโดยจะมีอัตราส่วนของ โบรอน ไตรออกไซด์ และเอทิลแอลกอฮอล์ โดยโบรอน คาร์บอน (B/C) ที่มีหน่วยเป็น ppm ซึ่งในการทดลองจะใช้ความเข้มข้น B/C 10 ppm และต้องใช้โบรอน ไตรออกไซด์ น้ำหนัก 0.001 กรัม ผสมลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นนำไปกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก (agnetic stirring) จนกระทั่งโบรอน ไตรออกไซด์ละลายหมดที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นเราจะได้สารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$ และนำไปสร้างฟิล์มเพชรลงบนฐานรองซิลิกอน ชนิดเอ็น หลังจากนั้นนำฟิล์มมาทำความสะอาดพื้นผิวฐานรอง

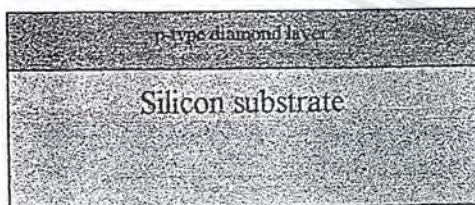
3.5.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร

ในกระบวนการนี้จะมีการสร้างรอยสัมผัสโลหะกับฟิล์มเพชร 2 ลักษณะ นั่นคือ การสร้างรอยสัมผัสแบบขดคดก็โดยใช้โลหะลูมิเนียมเป็นขั้วสัมผัสบนฟิล์มเพชรชนิดอินทรีนซิค และการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกโดยใช้โลหะทองแดงและทองคำเป็นขั้วสัมผัส และในโครงการนี้ซึ่งเป็นการสร้างอุปกรณ์โฟโตไดโอดจะเป็นการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิกเท่านั้น

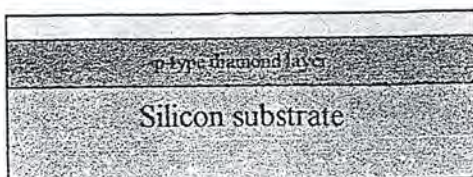
ในขั้นตอนนี้ใช้โลหะทองคำสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มิก โดยมีขั้นตอนการสร้างสามารถอธิบายขั้นตอนทั้งหมดได้ด้วยแผนภาพใน รูปที่ 3.6 รอยสัมผัสที่สร้างเสร็จจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเพชรชนิดพีต่อไป



ทำฐานรองซิลิกอน ระบาย (100) ผ่านการทำความสะอาดการเตรียมพื้นผิวฐานรองด้วยการขัดด้วยครีมเพชรขนาด 0.25

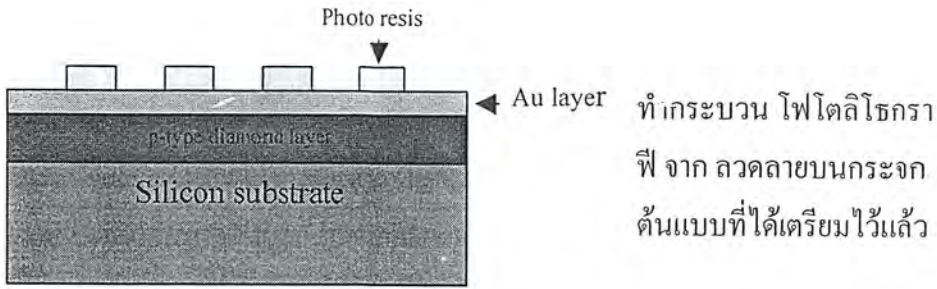


สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยใช้แหล่งจ่ายคาร์บอน เป็นสารละลาย $C_2H_5OH + B_2O_3$

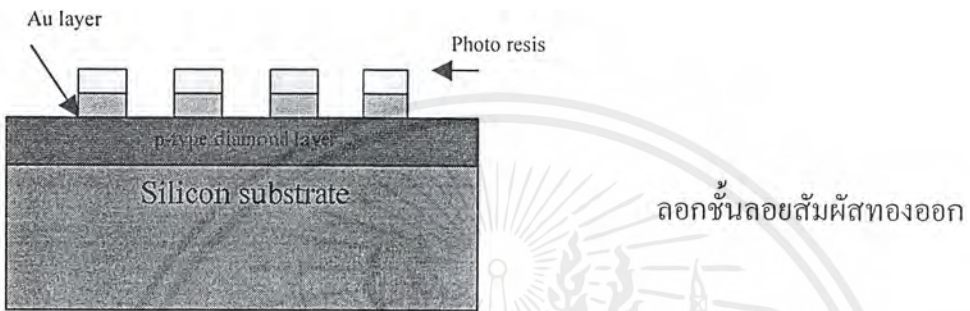


เคลือบโลหะทองคำด้วย Vacuum Evaporator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ทำกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี จาก ลวดลายบนกระจก ดันแบบที่ได้เตรียมไว้แล้ว

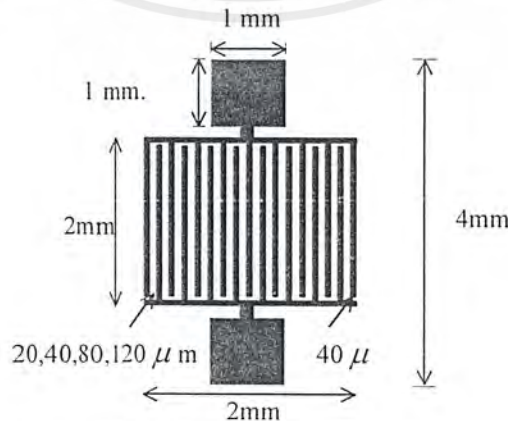


ลอกชั้นลอยสัมผัสทองออก



สุดท้ายจะได้ลายของลอสสัมผัสโอห์มิกตามที่ออกแบบไว้

รูปที่ 3.6 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างฟิล์มเพชรกับ โลหะทองคำ โดยลวดลายจากการออกแบบลายของทองคำนั้นจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลวดลายโลหะทองคำที่ใช้สร้างโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าค่าระยะห่างระหว่างซี่ของลายทองคำแต่ละอันจะมีการเปลี่ยนค่าทั้งหมด 4 ค่า 20um ,40um,80um,120um ทั้งนี้เพื่อเป็นศึกษาผลของระยะห่างของซี่ของทองคำซึ่งตัวโอห์มิกคอนแทคที่มีผลต่อปริมาณกระแสในตัวโฟโตไดโอดจะสังเกตได้ว่ายิ่งระยะห่างมากพื้นรับแสงซึ่งเป็นโครงสร้างเพชรซิคที ยิ่งมากแต่ในการทดลองนี้ได้มีการชดเชยพื้นที่รับแสงรวมของตัวโฟโตไดโอดทั้งหมดให้เท่ากัน นั่นคือเมื่อระยะห่างของแต่ละซี่มีระยะมากขึ้นจะมีการชดเชยพื้นที่ของทองคำไว้ในส่วนอื่น ทำให้ทั้ง 4 การทดลองมีพื้นที่รับแสงเท่ากันทุกอัน แต่จะเปลี่ยนแปลงเพียงระยะห่างของตัวโอห์มิกคอนแทคเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

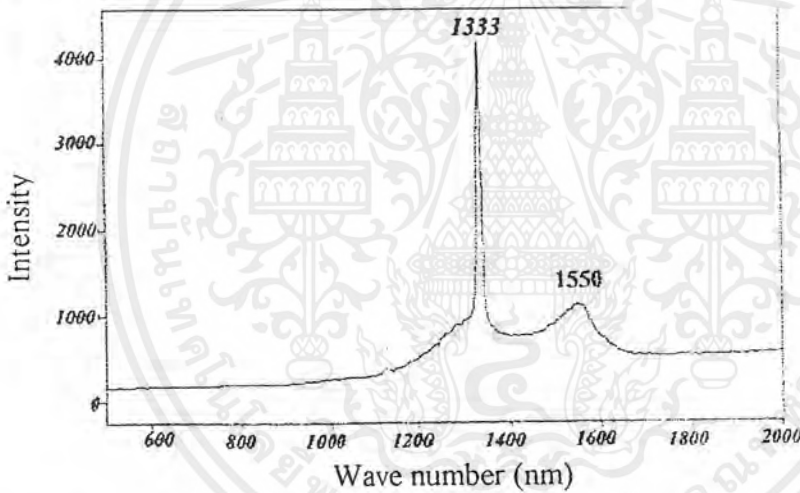
บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างตามลำดับขั้นตอน ในบทที่ 3 และเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดไว้เพื่อทดลอง และตรวจสอบ ในบทนี้จะเสนอถึง ผลการทดลอง พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ ผลการทดลอง ที่ได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร

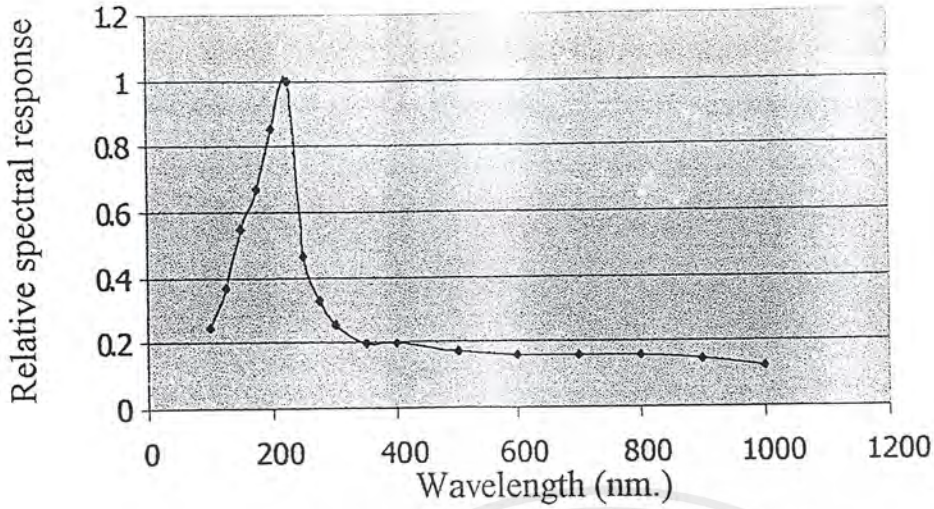
ก่อนที่จะนำฟิล์มเพชรที่ทำการสังเคราะห์ได้ ไปสร้างเป็น Photo diode ที่มีรอยต่อเนื้อสารระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิด พี และ ซิลิกอนชนิด เอ็น โดยจะเสนอถึงคุณสมบัติของฟิล์มเพชร โดยทำการวิเคราะห์ ด้วย Raman Spectrecopy และ Scaning Electron Microscopy เพื่อตรวจสอบความเป็นเพชร ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม เพชร ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี HFCVD ตามลำดับ



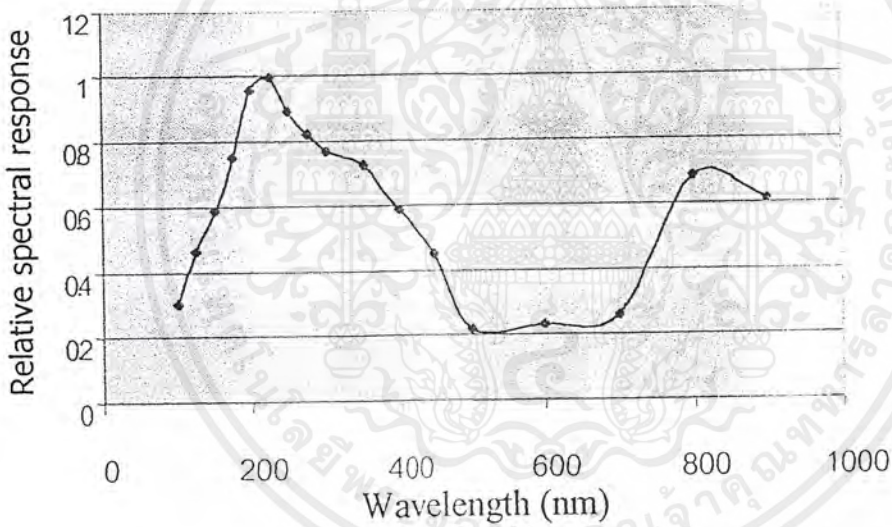
รูปที่ 4.1 ลักษณะของ Raman spectrum ของฟิล์มเพชรจากการสังเคราะห์ด้วยวิธี HFCVD

จากรูป 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่ายอด Raman spectrum ที่วัดได้จากฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์นี้ มีค่าอยู่ที่ 1333 cm^{-1} อย่างชัดเจนถือได้ว่าฟิล์มเพชรนี้ มีค่าใกล้เคียงกับเพชรธรรมชาติแม้ว่าจะมีค่ายอดของกราฟไฟต์รวมอยู่ด้วยแต่ความสูงของยอดกราฟค่ามาก นั่นคือ ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นเพชรและมีปริมาณของกราฟไฟต์ น้อยมาก นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจสอบด้วยวิธี SEM จะได้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ ในรูปที่ 4.2 เป็นตัวอย่าง ของ ฟิล์มเพชร ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองของความยาวคลื่นแสงต่างๆ ที่มีต่อ ฟิล์มเพชร (I-type)



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองของความยาวคลื่นแสงต่างๆ ที่มีต่อ Photo diode
(diamon film p-type/silicon n-type)

จะเห็นได้ว่า ในรูปที่ 4.3 แสงจะมีผลตอบสนองได้ดีที่สุดที่มีต่อ เนื้อสาร silicon อยู่ที่ช่วงประมาณ 700 nm. รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของแสงที่มีต่อฟิล์มเพชร ที่ดีจะอยู่ในช่วงประมาณ 225 nm. และรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็น Photo diode ที่ รอยต่อของเนื้อสารระหว่าง (diamon film p-type/silicon n-type) จะตอบสนองแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

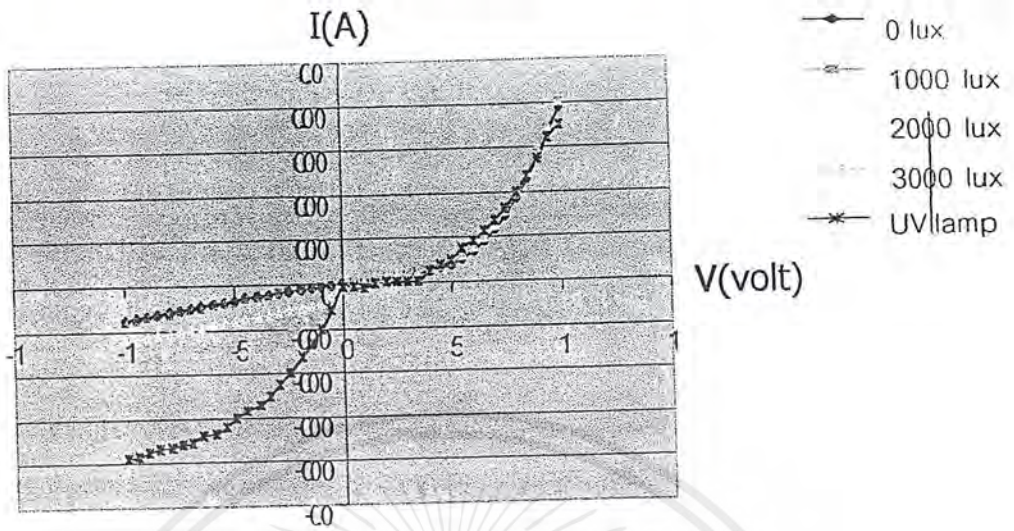
ประมาณ 225 nm. จากรูปกราฟ ทั้ง 3 สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่เนื้อสารที่เป็น silicon จะมีผลตอบสนองของแสงที่ความถี่ต่ำ ได้ดีกว่าเนื้อสารที่เป็น ฟิสิกส์ เพราะค่าระดับพลังงาน E_g ของ silicon ซึ่งมีค่าประมาณ 1.1 eV จะมีค่า น้อยกว่า ระดับพลังงาน E_g ของ ฟิสิกส์ ที่มีค่าประมาณ 5.57 eV โดยที่เราสามารถหาผลตอบสนองของแสงได้จากค่าระดับพลังงาน E_g ได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g} \quad (\text{nm})$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของแสง จะอยู่ที่ ค่าระดับพลังงานต่างๆกัน ส่วนในรูปกราฟที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ารูปกราฟจะได้ผลตอบสนองที่เห็นเด่นชัดมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงที่ความยาวคลื่นประมาณ 225 nm. และที่ช่วงประมาณ 700 nm. เนื่องจาก Photodiode ที่ทำการสร้าง จะมีเนื้อสารของฟิสิกส์และซิลิกอนอยู่ทำให้ผลตอบสนองที่ได้ ออกมาเป็น 2 ขด ส่วนในช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงประมาณ 225 nm. จะตอบสนองได้ดีกว่า ที่ ช่วงความยาวคลื่น ประมาณ 700 nm. เพราะว่าการให้แสงกับ Photodiode แสงจะตกกระทบบที่เป็นส่วนของฟิสิกส์ก่อนที่จะผ่านไปยัง silicon อาจเป็นผลทำให้ ผลตอบสนองของแสง ที่มีต่อฟิสิกส์ มีค่า response สูงกว่า ผลตอบสนองของแสง ที่มีต่อ เนื้อสาร silicon นั้นเอง

4.3 ศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อ โฟโตไดโอด

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความเข้มของแสง โดยจะทำการทดลองให้ความเข้มแสงที่ค่าต่างๆ ให้กับ โฟโตไดโอด คือ แสงจากไฟทั้งสแตน จะให้ความเข้มแสงที่ 0, 1000, 2000 , 3000 lux ตามลำดับ และให้ แสง ที่อยู่ในย่าน อุลตราไวโอเลต ซึ่งหลังจากทำการทดลองแล้วจะได้ผลของความเข้มแสง ที่ ความเข้มค่าต่างๆ ได้ดังรูปกราฟข้างล่างนี้

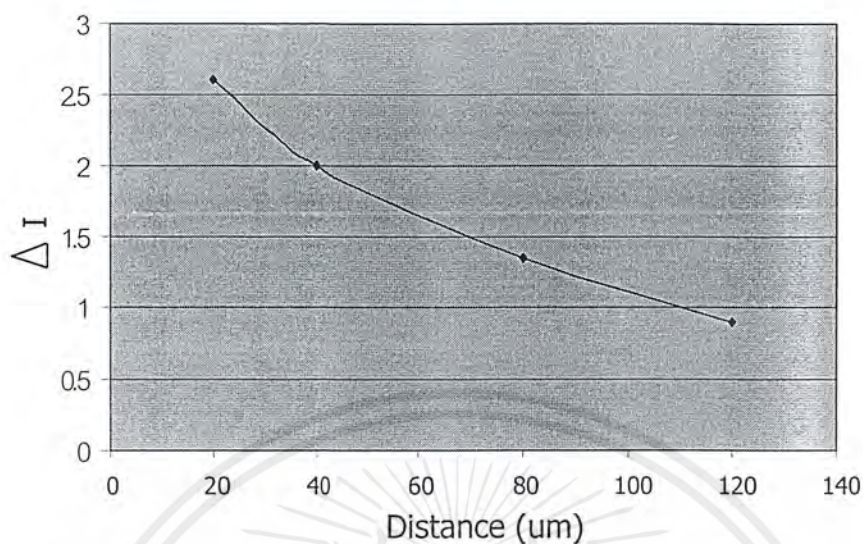


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงคุณสมบัติ แรงดันและกระแสของโฟโตไดโอดที่ความเข้มต่างๆ

จากรูปกราฟที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า แสงไฟทั้งสแตนที่ความเข้มแสง 0 lux จะให้ กระแสย้อนกลับแก่ Photodiode น้อยที่สุด และเมื่อ เพิ่มความเข้มแสงตามค่าที่กล่าวมาข้างต้นตามลำดับ จะเป็นผลทำให้ Photodiode มีกระแสมากขึ้น ส่วนที่แสงย่านอุลตราไวโอเลต จะให้กระแสได้มากกว่าแสงทั้งสแตน เนื่องจากมีความเข้มสูง

4.4 ศึกษาภาระห่างของลวดลายทองคำที่มีผลต่อกระแสที่ได้รับจากแสง

ในส่วนของการทดลองนี้จะศึกษาทดลองและวิเคราะห์ผลของระยะห่างของลวดลายทองคำโดยจะทำการออกแบบลวดลายที่มีระยะห่างของ Contact ที่ 20 , 40 , 80 , 120 ไมครอน ตามลำดับ ในขั้นตอนแรกจะทำการถ่ายลวดลายที่ระยะห่าง 20 ไมครอนลงบนฟิล์มเพชร จากนั้น นำไปวัดผลของกระแส โดยเมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้ว จะนำเอา ชิ้นงานที่ได้ทำการทดลอง ไปสกัดเอาลวดลายทองคำออก แล้วทำการถ่ายลวดลายที่ระยะต่างๆต่อไปเรื่อยๆตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถแสดงได้ด้วยกราฟ ของกระแสต่อ ระยะห่าง ได้ดังนี้

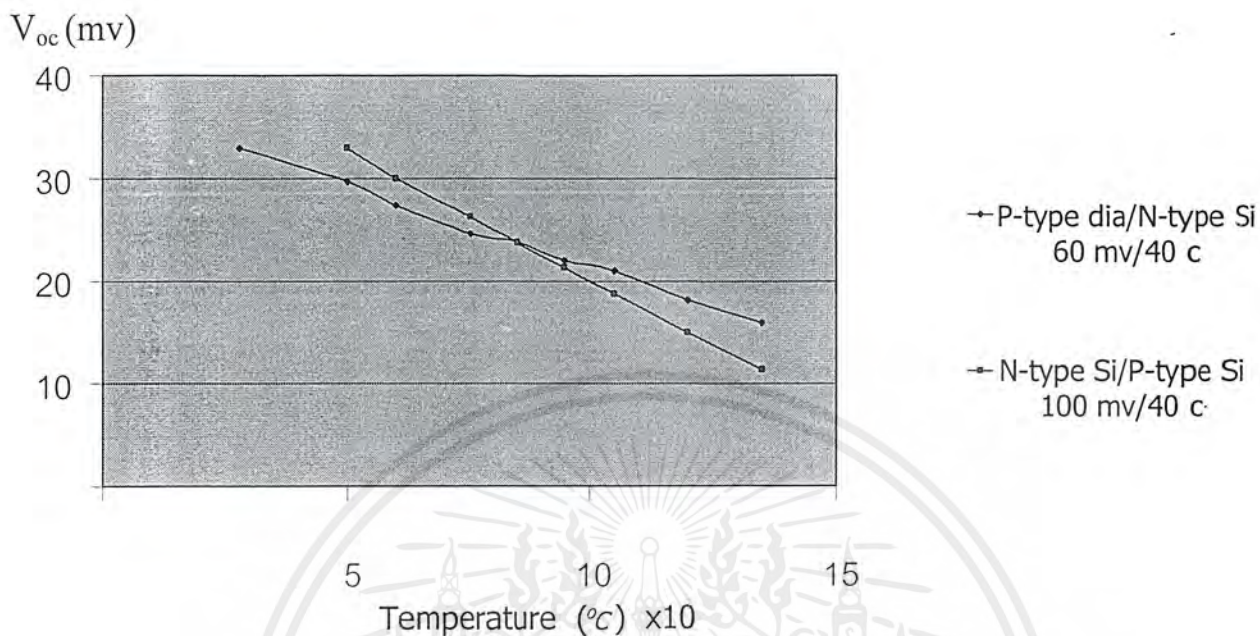


รูปที่ 4.7 รูปกราฟแสดงผลของกระแสต่อระยะห่างของลวดลายทองคำ ต่างๆ

จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างของลายโลหะทองคำที่ 20 um. จะให้ผลของกระแสที่สูงกว่า ซึ่งในช่วงที่ให้แสงนั้น แสงจะทำการกระตุ้นให้เกิด คู่พาหะ อิเล็กตรอน ,โฮล โดยที่ อิเล็กตรอนจะข้ามชั้นพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่ ของแถบ คอนดักชัน จนกระทั่ง คู่พาหะ อิเล็กตรอน,โฮล เกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) ซึ่งในช่วงนี้ ระยะห่างของ โลหะ กับสารกึ่งตัวนำ จะมีผลต่อ คู่พาหะ อิเล็กตรอน,โฮล ที่ทำการ รวมตัวใหม่ คือ ถ้า ระยะห่างของ โลหะแคบ จะทำให้คู่พาหะ สามารถนำกระแสได้ และถ้าระยะห่าง มากขึ้น ในการรวมตัวจะสามารถนำกระแสได้ในเฉพาะส่วนที่ อิเล็กตรอน ไปถึงชั้นโลหะได้

4.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ โฟโตไดโอด

ในส่วนของการทำการทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อโฟโตไดโอด โดยในการทดลอง จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด ซึ่ง จะทำการทดลอง โดยใช้ โฟโตไดโอด ที่สร้างจาก ซิลิกอน และโฟโตไดโอดที่สร้างจาก ฟอสฟอรัส โดยจะได้ผลของการเปลี่ยนแปลงกระแสได้ดังรูปกราฟข้างล่างนี้



รูปที่ 4.8 รูปกราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อโฟโตไดโอด

จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ แรงดันที่ตกคร่อมโฟโตไดโอดที่ค่าที่ลดลง โดยอัตราการลดลงของ โฟโตไดโอดทั้ง 2 ชนิด จะไม่เหมือนกัน เพราะว่า ที่เนื้อสาร ซิลิกอนนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงๆ ได้มากกว่า ฟิล์มเพชร จึงทำให้ โฟโตไดโอด ที่สร้างจาก ฟิล์มเพชร มีการลดลงของแรงดันที่ต่ำกว่า แบบ ซิลิกอน

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองการวัดผลของกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากฟิล์มเพชร โดยมีการออกแบบลวดลาย โลหะทองคำที่ระยะห่างต่างๆกัน คือ 20 μm , 40 μm , 80 μm และ 120 μm ซึ่งเป็นส่วนของพื้นที่ที่แสงโคนพื้นผิวของฟิล์มเพชร ที่ระยะ 20 μm , 40 μm , 80 μm และ 120 μm จะได้กระแสจากฟิล์มเพชรคือ 2.65 nA, 2 nA, 1.35 nA และ 0.8 nA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ที่ระยะห่างของลวดลายโลหะทองคำ เพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้า มีแนวโน้มที่ลดลงและจากกราฟ ผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้า จะมีค่าลดลง แบบ ไฮเพอร์โบล่า หรือสามารถ อธิบายผลการเปลี่ยนแปลงของกระแส จากระยะห่าง ของลายโลหะทองคำได้จาก

$$I = \frac{V \cdot A}{\rho l}$$

กำหนดให้ $k = \frac{V \cdot A}{\rho}$ จะได้

$$I = \frac{k}{l}$$

ผลการทดลองการวัดผลตอบสนองของแสงที่มีต่อ โฟโตไดโอด จะทำการทดลองวัดผลของกระแสที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 nm ถึง 1000 nm โดยทำการวัดที่ฟิล์มเพชร , วัดที่โฟโตไดโอด ที่สร้างจาก ซิลิกอน และ โฟโตไดโอดที่สร้างจากฟิล์มเพชร จะเห็นได้ว่า วัดที่ฟิล์มเพชร จะมีผลตอบสนองของความยาวคลื่น ดีที่สุดที่ประมาณ 225 nm แต่กระแสที่ได้จะมีค่าน้อยมาก จะอยู่ในช่วง nA ในการวัดโฟโตไดโอด ที่สร้างจาก ซิลิกอน จะมีผลตอบสนอง ความยาวคลื่น ที่ดีที่สุดคือประมาณ 700 nm ส่วนในการวัดผลตอบสนองของโฟโตไดโอด ที่สร้างจากฟิล์มเพชร จะมีผลตอบสนองความยาวคลื่น ได้ดีทั้ง 2 ย่าน คือ ที่ 225 nm และ 700 nm เนื่องจาก โฟโตไดโอด มีรอยต่อของ 2 เนื้อสารอยู่ คือ ฟิล์มเพชร และ ซิลิกอน แต่ ที่ 225 nm จะให้ผลตอบสนองดีที่สุดเนื่องจาก ที่ ฟิล์มเพชร ได้รับแสง ก่อน ซิลิกอน ทำให้ มีความเข้มแสงสูงกว่า และ กว่าแสง จะเข้าไปในซิลิกอน ความเข้มแสงจะลดลงดังที่ได้กล่าวในส่วน ของ บทที่ 2 จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ที่ เนื้อสาร ต่างชนิดกัน จะมีค่า พลังงานแถบต้องห้าม ต่างกัน สามารถอธิบาย ได้จากสมการข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

จากสมการจะเห็นว่าที่ E_g ต่างกัน จะทำให้ความยาวคลื่นต่างกันด้วย

ผลการทดลองวัดผลของความเข้มของแสงที่มีต่อโฟโตไดโอด ในส่วนนี้จะให้แหล่งจ่ายแสง 2 แหล่ง คือแสงทั้งสแตน และแสงอุลตราไวโอเล็ต โดยให้ความเข้มแสงที่ 0, 1000, 2000, 3000 lux ตามลำดับ กระแสไหลย้อนกลับของโฟโตไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นในส่วนของแสงอุลตราไวโอเล็ตกระแสย้อนกลับที่ได้จะมีค่ามากที่สุด

ผลการทดลองวัดผลของอุณหภูมิแรงดันตกคร่อมโฟโตไดโอด 2 แบบ คือ ที่เป็นฟิล์มเพชรและซิลิกอน โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้แรงดันโฟโตไดโอดมีค่าลดลง ในกราฟผลการทดลองจะได้อัตราลดลงของแรงดันที่โฟโตไดโอดชนิด P-type Si / N-type Si และ P-type dia / Ntype Si คือ 100 mV / 40°C และ 60 mV / 40°C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก สมบัติทางกายภาพของสารที่นำมาใช้เป็นฐานรองในการสังเคราะห์เพชร

| สาร | จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$) | ค่าคงที่แลตทิซ (\AA) | ความหนาแน่น (g/cm^3) | ความนำความร้อน (W/cm deg) | สัมประสิทธิ์การกระจาย ความร้อน (10^{-6}) | พลังงานพื้นผิว (Jm^{-2}) | ความต้านทาน ($\mu\Omega\text{cm}$) | ฟังก์ชันงาน (eV) |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|--|---|---------------------|
| Si | 1412 | 5.42 | 2.33 | 0.83 | 24 | 1.46(111) | 3.5×10^{11} | 4.1 |
| Diamond (cubic) (hexagonal) | 3057 | 3.567 | 3515 | 6.59 | 0.8 | 5.3(111) | - | 4.39 |
| | | 2.52 | 3520 | | | 6.5(110) | | |
| a-axis | | 1.42 | | | | 9.2(100) | | |
| c-axis | | | | | | | | |
| Graphite(hexagonal) | 3797 | 2.46 | 2260 | Negative | 0.6-4.3 | 2.80(10 $\bar{1}0$) | 350-6300 | - |
| | | 6.71 | | | | 0.17(0001) | | |
| a-axis | | 4.04 | 2.7 | 2.38 | 23.8 | 1.085/0.939 | 2.45 | 3.74 |
| c-axis | | 3.61 | 8.96 | 4.16 | 16.8 | 2.08(100) | 1.56 | 4.47 |
| Al | 660 | 3.92 | 21.45 | 0.699 | 9.0 | 2.691/2.055 | 9.81 | 5.29 |
| Cu | 1083 | 3.16 | 19.3 | 1.69 | 4.4 | 3.468/2.487 | 4.9 | 4.50 |
| Pt | 1769 | 3.14 | 10.22 | 1.38 | 5.1 | 2.877/2.116 | 5.2 | 4.27 |
| W | 3380 | 4.07 | 19.3 | 3.11 | 14.2 | 1.626/1.345 | 2.04 | 4.58 |
| Mo | 2615 | | | | | | | |
| Au | 1063 | | | | | | | |

ภาคผนวก ข คุณสมบัติต่างๆ ของเพชรสังเคราะห์

| Property | Value | Unit |
|--|-------------------------------------|---|
| Hardness | 10,000 | kg mm ⁻² |
| Strength, tensile | >1.2 | GPa |
| Strength, compressive | >110 | GPa |
| Sound velocity | 18,000 | m s ⁻¹ |
| Density | 3.52 | g cm ⁻³ |
| Young's modulus | 1.22 | GPa |
| Poison's ratio | 0.2 | Dimensionless |
| Thermal expansion coefficient | 0.0000011 | K ⁻¹ |
| Thermal conductivity | 20.0 | W cm ⁻¹ K ⁻¹ |
| Thermal shock parameter | 30,000,000 | W m ⁻¹ |
| Debye temperature | 2,200 | K |
| Optical index of refraction (at 591 nm) | 241 | Dimensionless |
| Optical transmissivity (from nm to far IR) | 225 | Dimensionless |
| Loss tangent at 40 Hz | 0.0006 | Dimensionless |
| Dielectric constant | 5.7 | Dimensionless |
| Dielectric strength | 10,000,000 | V cm ⁻¹ |
| Electron mobility | 2,200 | cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ |
| Hole mobility | 1,600 | cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ |
| Electron saturated velocity | 27,000,000 | cm ² s ⁻¹ |
| Hole saturated velocity | 10,000,000 | cm ² s ⁻¹ |
| On [111] surface Bandgap | 5.45 | eV |
| Resistivity | 10 ¹³ - 10 ¹⁶ | Ωcm |

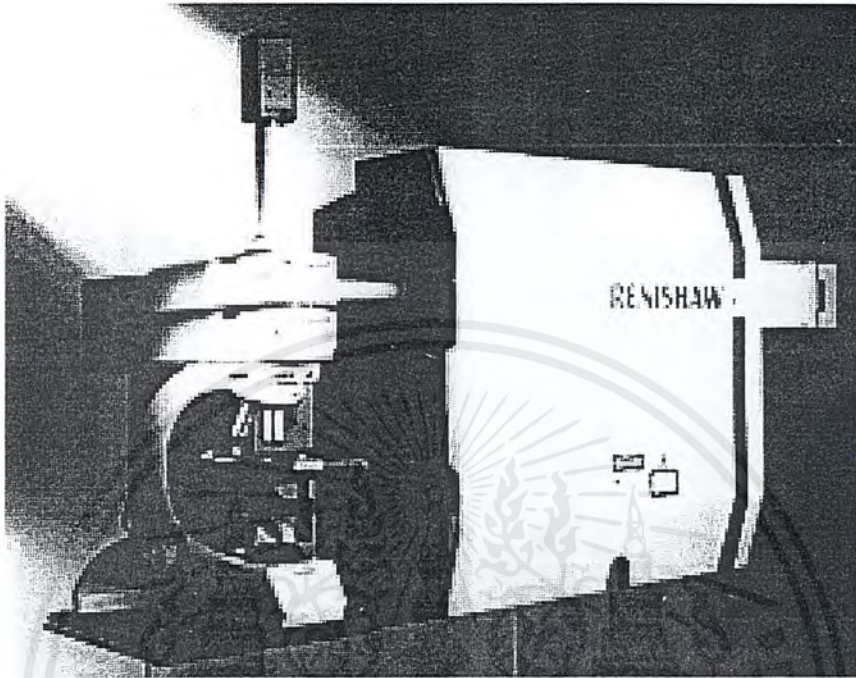
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค ลำดับการจดทะเบียนสิทธิบัตรของ GE ในยุคต้น ๆ

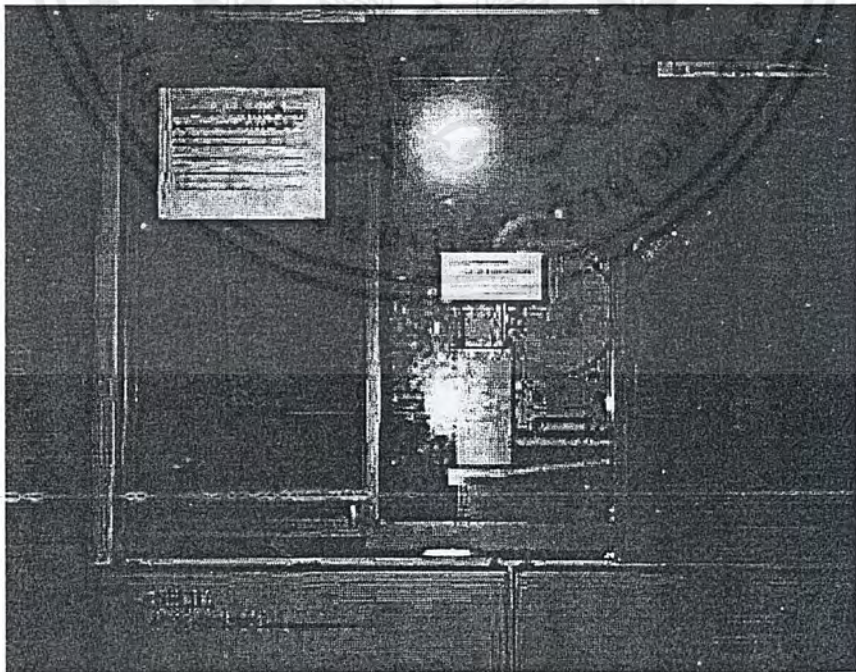
| | I | II | III | IV | V |
|-------------------|-------------------|--|--|---|--|
| Patent applicant | Hall | Hall, Strong, Wentorf | Hall | Bundy | Strong |
| 2/14/55 | File 48050 | File 488116 | | | |
| 8/29/55 | | | File 530935 | | |
| 1/10/57 | | Refile 635505 | | | |
| 4/29/57 | | | | File 655884 | File 655885 |
| 1/6/58 | Refile 707432 | Refile 707435 | | Refile 707436 | Refile 707433 |
| 6/21/60 | Pat.granted | | | | |
| 8/20/60 | | Pat.granted | Pat.granted | Pat.granted | Pat.granted |
| U.S Patent no. | 2,941,248 | 2,947,610 | 2,947,608 | 2,947,611 | 2,947,609 |
| Subject of Patent | Belt Apparatus | Diamond growth using one of 11 metals | Diamond growth with 3 metals using resistance inflection | Diamond growth using platinum at higher temperature | Diamond growth using some alloys |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง



ภาคผนวก ง-1 Raman spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- 1) คุณิต เครื่องงาม , “สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน” ,สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,พิมพ์ครั้งที่ 1 ,2542
- 2) รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”,แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,พิมพ์ครั้งที่ 1,สิงหาคม 2542
- 3) รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,พิมพ์ครั้งที่ 7,ธันวาคม 2538
- 4) Kanaan Kano , “Semiconductor Device” ,Prentice-Hall International,Inc.
- 5) Hans Joachim Moller , “Semiconductor for Solar Cells”, Artech House,London
- 6) Alan L.Fahrenbruch ,Richard H. Bube, “Fundamentals of Solar Cells”,Academic Press, inc.
- 7) Mis Tyagi , “Introduction to Semiconductor Materails and Devices”,John Willy&Sond
- 8) John M.Senior , “Optical Fiber Communications Principles and Practice”,1985 by Prentice-Hall International.,Inc London
- 9) Gerold W. Nuedeck, “The PN Junction Diode”,Second Edition
- 10) John Allison, “Electronic Engineering Semiconductors and Devices”,Mc Graw-hill International

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้