

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน  
Vibration Detection System



โดย  
นายปัญญาธิร์ เต็มเมธารัตน์  
นายพนัส รัตนพฤตมากุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เลขที่.....  
เลขที่.....  
วันที่.....

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

55450

9 พ.ค. 2548

เครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน  
Vibration Detection System

โดย

นายปริญทร์ เต็มเมธารัตน์ 43010265

นายพนัส รัตนพุดผากุล 43010282

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุริยณ สมถาวรพานิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน  
Vibration Detection System

นายปัญรินทร์ เค่นเมธารัตน์ 43010265

นายพนัส รัตนพุดผากุล 43010282



ปริญญานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบแล้ว

ลงชื่อ..... อาจารย์ที่ปรึกษา

( รศ. ดร. สุริภณ สมควรพาณิชย์ )

วันที่ 19 / 4 / 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจจับการสิ้นสะท้อนนี้สำเร็จลงไปด้วยดี  
เนื่องจากมีอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุริภณ สมควรพาณิชย์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือ ตลอดจน  
คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ในภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ช่วยเหลือเมื่องานประสบ  
ปัญหาในระหว่างการดำเนินงาน

ผู้จัดทำจึงขอขอบคุณทุกคนมา ณ. โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องตรวจจับการสั้นสะพาน

นายปัญรินทร์ เค่นเมธารัตน์

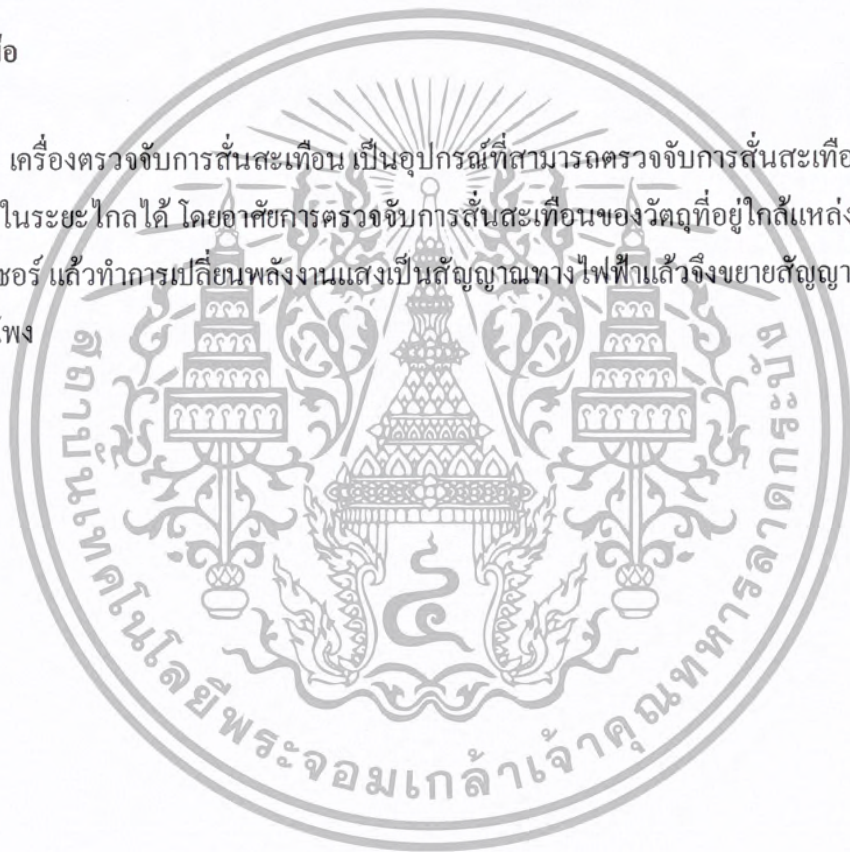
นายพนัส รัตนพฤษภากุล

รศ. ดร. สุริภณ สมควรพาณิชย์

ปีการศึกษา 2546

### บทคัดย่อ

เครื่องตรวจจับการสั้นสะพาน เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการสั้นสะพานที่มีแหล่งกำเนิดเสียงอยู่ในระยะไกลได้ โดยอาศัยการตรวจจับการสั้นสะพานของวัตถุที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดเสียงด้วยแสงเลเซอร์ แล้วทำการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจึงขยายสัญญาณเพื่อแสดงผลทางลำโพง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Vibration Detection System

Mr. Panyarin denmetharat  
Mr. Panus Ratanaplaithakul  
Dr. Suripon Somkwonpanit  
Education Year 2003

### Abstract

Vibration Detection System is device that can detect vibration that the source is far. By this device can detect object's vibration that is near sound source by LASER lights. Then transform light power to electrical signal. Finally amplify the signal for speaker.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

Abstract

สารบัญ

สารบัญรูปภาพ

บทที่ 1 บทนำ

หน้า 1

บทที่ 2

2.1. สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง

หน้า 2

2.2. โฟโตไดโอด

หน้า 8

2.3. แสงเลเซอร์

หน้า 26

2.4. วงจรกรองความถี่ (filter)

หน้า 38

2.5. การออกแบบดิจิทัลดีเทคเตอร์

หน้า 40

บทที่ 3 การออกแบบวงจร

3.1. ขั้นตอนการออกแบบ

หน้า 47

3.2. วงจร 555 Astable

หน้า 47

3.3. วงจร photodetector

หน้า 48

3.4. วงจร detector ที่ใช้

หน้า 49

3.5. วงจร Low pass filter

หน้า 50

3.6. วงจรปรับระดับแรงดัน

หน้า 51

3.7. วงจรขับลำโพง

หน้า 51

3.8. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

หน้า 52

3.9. ไฟล์ซอร์ทการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

หน้า 53

3.10. ไฟล์ซอร์ทการทำงานของโปรแกรม

หน้า 54

บทที่ 4 ผลการทดลอง

หน้า 55

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

หน้า 72

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 แสดง Block diagram ของเครื่องตรวจจับการสั้นสะเทือน	หน้า 1
รูปที่ 2 ตัวอย่าง โครงสร้างของ โฟโตไดโอดชนิดต่างๆ	หน้า 10
รูปที่ 3 วงจรสมมูลของ โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn	หน้า 12
รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าใน โฟโตไดโอด	หน้า 13
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง โฟโตไดโอดและแสงอินฟราเรด	หน้า 14
รูปที่ 6 วงจรพื้นฐานการต่อ โฟโตไดโอดกับออปแอมป์	หน้า 19
รูปที่ 7 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อ pn ในสภาพกำลังมีการไปแอสซ็อน	หน้า 21
รูปที่ 8 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของ โฟโตไดโอดย่านปลอดพาหะ	หน้า 21
รูปที่ 9 เส้นลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันในรอยต่อ pn	หน้า 23
รูปที่ 10 การอธิบายความเป็นโคฮีเรนต์ชนิดเวลาของแสงเลเซอร์	หน้า 27
รูปที่ 11 การกระตุ้นอิเล็กตรอน	หน้า 28
รูปที่ 12 การปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาติ	หน้า 29
รูปที่ 13 การเปล่งแสงแบบเร้า	หน้า 30
รูปที่ 14 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน	หน้า 31
รูปที่ 15 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่โคปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก	หน้า 33
รูปที่ 16 รอยต่อพีเอ็นที่โคปสารเจือปนด้วยความเข้มข้นสูงมาก	หน้า 33
รูปที่ 17 รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด	หน้า 34
รูปที่ 18 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้าในเลเซอร์ไดโอด	หน้า 34
รูปที่ 19 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน	หน้า 35
รูปที่ 20 ตัวอย่างสเปกตรัมของแสงเลเซอร์	หน้า 36
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวแตกหักและช่องว่างพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำต่างๆ	หน้า 36

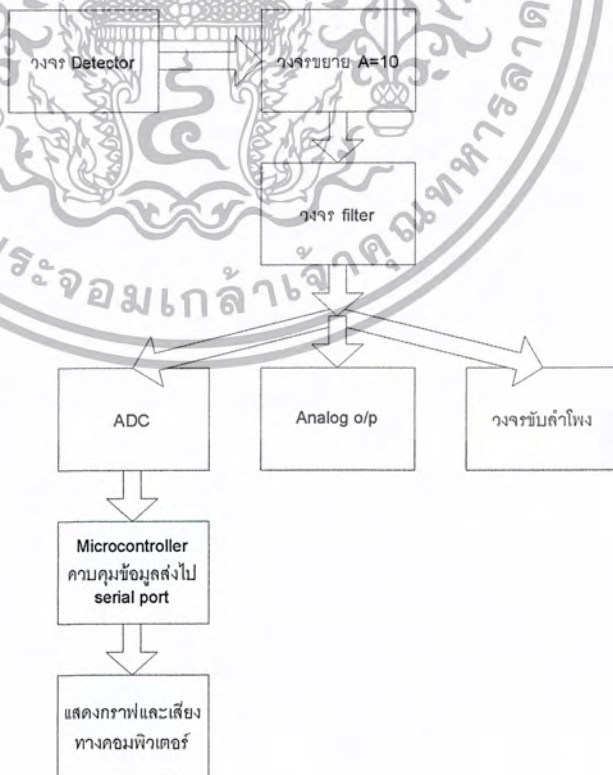
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# บทที่ 1

## บทนำ

เสียงเป็นพลังงานทางกลซึ่งสามารถเดินทางโดยอาศัยตัวกลาง การที่เราได้ยินเสียงนั้นเกิดจากการที่แหล่งกำเนิดเสียงสั่นสะเทือน แล้วเสียงนั้นเดินทางผ่านอากาศมาเข้าสู่หูของเราซึ่งทำให้เราสามารถได้ยินเสียงได้ ซึ่งกำลังของเสียงจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยปกติของคนเราจะสามารถรับฟังเสียงที่มีความถี่ประมาณ 20-20000 Hz ซึ่งหลักการของเครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือนนี้ใช้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดเสียง โดยอาศัยวงจรถักแสงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แล้วทำการกรองเอาเฉพาะ AC Signal ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการสั่นสะเทือนของเสียงโดยใช้วงจรถักแสง โดยสัญญาณที่ได้นี้มีขนาดเล็กเราต้องทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอที่จะสามารถขับลำโพงได้



รูปที่ 1 แสดง Block Diagram ของเครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่เฉพาะที่ออกการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการพาณิชย์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### 2.1 สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

การตรวจรับแสงหรือวัดแสงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการใช้งานแสงให้ประโยชน์ เช่น วัดความเข้มของแสง วัดเฟสของแสง และนำข้อมูลที่ได้ออกไปประมวลใช้งานต่อไป เนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นตั้งแต่ระดับไม่ถึง  $1 \mu\text{m}$  ไปจนถึงพัน  $\mu\text{m}$  และความเข้มของแสงก็มีมากน้อยตามแต่สภาพการใช้งาน ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงขึ้นมาหลายชนิดเพื่อใช้งานในย่านความยาวคลื่นแตกต่างกันและวัตถุประสงค์ต่างกัน บทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงว่ามีการแบ่งเป็นชนิดต่างๆอย่างไรบ้างและจะกล่าวถึงข้อพิจารณาในการเลือกใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงว่าควรพิจารณาอะไรบ้างและหลังจากบทนี้ ก็จะอธิบายรายละเอียดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงแต่ละชนิด เช่น โฟโตมิสดีฟลายเออร์ โฟโตเซลล์ โฟโตไดโอด พินโฟโตไดโอด โฟโตทรานซิสเตอร์ อะวาลันซ์โฟโตไดโอด ccd เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตคัปเปอเรอร์ ฯลฯ เป็นต้น นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้ให้ความสำคัญกับการวัดแสงอินฟราเรดเป็นพิเศษอีกด้วยเพราะแสงอินฟราเรดมีประโยชน์ในการใช้งานที่กว้างขวางมาก อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อทางด้านการศึกษาด้วยแสงและความมั่นคงของประเทศด้วย ดังนั้นจึงมีบทเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงอินฟราเรดด้วย

#### 2.1.1 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสง

สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง (light detector) หมายถึง สิ่งประดิษฐ์ที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้

ตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงและเป็นตัวตรวจรับแสงชนิดหนึ่ง (แต่ไม่ได้เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า) สามารถส่งสัญญาณไปให้ประสาทรับแสงได้รับรู้ภาพ แต่ตาของมนุษย์มีข้อเสียที่มองภาพในที่มืดๆ ไม่ดีหรือไม่เห็นเลย และช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นค่อนข้างจำกัด ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้เฉพาะในย่าน  $400\text{-}700 \text{ nm}$  โดยประมาณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่ไวต่อแสงในย่านต่างๆ ตั้งแต่แสงเหนือม่วงไปจนถึงแสงอินฟราเรด

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลแสงได้ในหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละชนิดไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน บางชนิดมีความสามารถขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณได้ในตัว บางชนิดตอบสนองด้านเวลารวดเร็วมาก บางชนิดจับภาพได้ทั้งแบบ 1 มิติและ 2 มิติ หลายชนิดมีความเชื่อถือได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน ในกระบวนการตรวจรับแสง อาจตรวจวัดแสงในรูปของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ หรือสัญญาณความร้อนก็ได้

### 2.1.2 ข้อพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงหลายแสงมีการแทรกสอดกัน (interference) และแสงเดินทางได้ด้วยความเร็วสูงมาก ในการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ หลายด้าน เช่น

- ความเข้มของแสงที่จะตรวจรับ
- ความยาวคลื่นแสงที่จะถูกคลื่นได้
- ความเร็วการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง
- เสถียรภาพและราคาของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

ต่อไปจะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

#### 1. สภาพตอบสนอง (Responsivity)

ถ้าให้  $P_{in}$  คือ ความเข้มของแสง (หน่วย radiant flux) ที่เข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงและ  $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง นิยามของ “สภาพตอบสนอง” หรือ “เรสปอนซิวิตี” (responsivity)  $R$  คือ (วัดแสงแบบต่อเนื่อง)

$$R = \frac{V_s}{P_{in}} \quad (2.1.1)$$

ถ้ามีการตัดแสงอินพุตด้วยชอปเปอร์ด้วยความถี่เชิงมุม  $\omega$  และค่าคงที่เวลา (time constant) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงคือ  $T$  จะได้ว่า  $R(\omega)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ของการชอปแสงว่า

$$R(\omega) = \frac{R}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (2.1.2)$$

โดยที่  $R$  หรือ  $R(\omega)$  มีหน่วยเป็น V/W

ถ้าเอาต์พุตที่วัดคือ กระแสไฟฟ้า หน่วยของสภาพตอบสนองคือ A/W ค่าสภาพตอบสนองนี้เป็นการบ่งชี้ว่าถ้าแสงอินพุตมีกำลัง 1 W สิ่งประดิษฐ์จะให้เอาต์พุตเท่าไรนั่นเอง

### 2. ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency)

ได้แก่อัตราส่วนระหว่างจำนวนของโฟตอนที่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโต (photocurrent) ต่อจำนวนของโฟตอนที่วิ่งสู่ถึงประจักษ์ตรวจรับแสง

### 3. ดีเทกทิวิตี หรือความสามารถของการตรวจรับ (Detectivity)

ดีเทกทิวิตีนิยมใช้สัญลักษณ์ว่า  $D^*$  (อ่านว่า D star) หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณรบกวนในกรณีที่กำลังของแสงอินพุตมีค่าเท่ากับ 1 W โดยทำการวัดแบบมีการเปิดและปิดแบบ AC ค่า  $D^*$  จะไม่ขึ้นกับพื้นที่รับแสง แต่จะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้  $D^*$  เปรียบเทียบคุณภาพของสิ่งประจักษ์ตรวจรับแสงชนิดต่างๆ ด้วยกันได้  $D^*$  เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$D^* = \sqrt{a \cdot \Delta f} \cdot R / I_n \quad (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}) \quad (2.1.3)$$

โดยที่ a : พื้นที่รับแสง ( $\text{cm}^2$ )

$\Delta f$ : แบนด์วิดท์ (band width) หรือความถี่ของการวัด (Hz)

R : สภาพตอบสนอง (responsibility) (A/W)

$I_n$  : กระแสไฟฟ้ารบกวน (current noise) (A)

(พารามิเตอร์ R,  $I_n$  ใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าก็ได้)

โดยทั่วไป  $D^*$  จะเป็นฟังก์ชันของ 1. ความยาวคลื่นของแสง 2. ความถี่ของการชอปแสง (chopping frequency of light) และ 3. แบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน (noise band width) โดยทั่วไปจะใช้ค่า 1 Hz เป็นเกณฑ์มาตรฐานของแบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน แสดงตัวอย่างค่า  $D^*$  ของวัสดุต่างๆ ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง

### 4. กำลังเอาต์พุตเทียบสัญญาณรบกวน (Noise Equivalent Power : NEP)

ค่า NEP ได้แก่ค่าที่แสดงพลังค์ของแสง (radiant flux : W) ต่ำสุดที่ทำให้ S/N เท่ากับ 1 ใช้เป็นเกณฑ์บอกชี้ว่าสิ่งประจักษ์จะสามารถวัดแสงที่มีความเข้มสูงสุดได้เท่าไร เพราะถ้า S/N น้อยกว่า 1 ก็จะทำให้การวัดแสงยากลำบากมาก NEP มีหน่วยเป็น ( $\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ ) และมีสูตรว่า

$$\text{NEP} = a^{1/2} / D^* \quad (2.1.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a : พื้นที่รับแสง

$D^*$  : ดีเทกทิวิตี

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตคอนดักทิฟในย่านการทำงานไม่เกินหลาย kHz มักเป็นชนิด  $1/f$  ( $1/f$  noise) และในย่าน MHz ขึ้นไปมักเป็นสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล (thermal noise) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวเชิงความร้อนของพาหะในสารกึ่งตัวนำ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นใน

สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายนอกมักเป็นสัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) ซึ่งเกิดจากการไหลอย่างไม่ต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าโฟโต

#### 5. ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Response)

โดยปกติสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงจะมีผลตอบสนองไม่เท่ากันถ้าความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Response) ใช้สัญลักษณ์ว่า  $R(\lambda)$  ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความเข้มแสงอินพุต  $P(\lambda)$  กล่าวคือ

$$R(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (\text{A/W}) \quad (2.1.5)$$

สูตรนี้แสดงค่าตอบสนองสเปกตรัมที่มีค่าแบบสัมบูรณ์ตามความเป็นจริง (absolute spectral response) และถ้าเราทำการนอร์มัลไลซ์สูตรนี้ด้วยค่าผลตอบสนองของแสงที่ความยาวคลื่นใดๆ เราจะได้ค่าตอบสนองเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ (relative spectral response)

#### 6. เวลาตอบสนอง (Response Time)

ในการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงบางครั้งต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็วมมาก อาจจะมีเร็วถึงระดับไมโครวินาที นาโนวินาที หรือพิโกวินาที สิ่งประดิษฐ์บางชนิดทำงานช้า บางชนิดทำงานเร็ว เพราะฉะนั้นผู้ใช้ต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ความเร็วตอบสนอง (response speed) ถูกกำหนดด้วยสาเหตุ 2 ข้อคือ

- ค่าเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) เป็นค่าเฉพาะตัวที่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผลิต การเปิดและปิดแสงทำให้เกิดคลัตเตอร์ (clutter) ค่าเวลาผ่อนคลายนี้นับจากเวลาที่มีการเปิดหรือปิดแสง

จนถึงเวลาที่คลัตเตอร์เข้าสู่สภาพคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าคงที่เวลาซีอาร์ (CR time constant) ได้แก่ผลคูณของ  $C$  และ  $R$  โดยที่  $C$  คือความจุไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง และ  $R$  คือค่าความต้านทานของโหลด การวัดค่าคงที่เวลาซีอาร์ ทำโดยการตัดแสงที่เข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงและวัดระยะเวลาที่ทำให้เอาต์พุตลดลงเหลือเศษหนึ่งส่วนเอ็กซ์โพเนนเชียลของค่าเริ่มต้นเมื่อตอนมีแสง ในกรณีเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ ค่าคงที่เวลาซีอาร์จะมีค่าเท่ากับ  $C/g$  โดยที่ค่า  $C$  คือความจุไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ และ  $g$  คือความนำความร้อน (thermal conductance)

ในกรณีวัสดุชนิดโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) นั้น จำนวนของศูนย์กลางแตริป (trapping centers) และศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ (recombination centers) จะเป็นตัวกำหนดความเร็วตอบสนองที่สำคัญ

#### 6. อัตราขยาย (Gain) และความเป็นเชิงเส้น (linearity)

อัตราขยาย (Gain:  $G$ ) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงคือ อัตราส่วนของจำนวนของพาหะที่เกิดจากแสงต่อจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน นั่นคือ

$$G = \frac{I_{ph}}{qN_{ph}} \quad (2.1.6)$$

โดยที่  $I_{ph}$  : กระแสไฟฟ้าโฟโตเอาต์พุต

$N_{ph}$  : จำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในสิ่งประดิษฐ์

$q$  : ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

ถ้าสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงทำจากสารกึ่งตัวนำ (photoconductor) ค่า  $G$  นี้อาจแสดงผลได้ด้วยอัตราส่วนของเวลาอายุพาหะ (life time) ต่อเวลาที่พาหะใช้ในการเดินทางจากขั้วด้านหนึ่งไปสู่ขั้วอีกด้านหนึ่ง  $t$  (transit time) คือ

$$G = \frac{\tau}{t} = \frac{\tau \mu V}{l^2} \quad (2.1.7)$$

โดยที่  $\mu$  : ความคล่องตัว (mobility) ของพาหะ

$v$  : แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

$l$  : ระยะห่างของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปค่าอัตราขยายที่ดี และความเร็วตอบสนองที่ดีจะขึ้นกับชนิดของวัสดุและเงื่อนไขการผลิตด้วย ค่าทั่วไปแสดงดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบค่าอัตราและเวลาขาขึ้นของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดต่างๆ

	อัตราขยาย	เวลาขาขึ้น	ความเข้มแสงต่ำสุดที่วัดได้	$D^*$
โฟโตเซลล์ชนิด Cds	$10^5$	$10^{-3}$	$10^{-6} \sim 10^{-2}$	$10^{14}$
โฟโตเซลล์ PbS	10~100	$10^{-5}$	$10^{-11} \sim 10^{-5}$	$10^{11}$
โฟโตไดโอดชนิด Si (p-n)	1	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	$10^{-13} \sim 10^{-2}$	$10^{13}$
พินโฟโตไดโอดชนิด Si (p-n)	1	$10^{-9}$	$10^{-13} \sim 10^{-2}$	$10^{13} \sim 10^{14}$
อะวาลันซ์โฟโตไดโอดชนิด Si	$10^2$	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	$10^{-14} \sim 10^{-5}$	$10^{14}$
โฟโตไดโอดชนิด InSb (195K~77K)	1	$10^{-6}$	$10^{-11} \sim 10^{-6}$	$10^{10} \sim 10^{11}$
หลอดสุญญากาศ	1	$10^{-9}$	$10^{-11} \sim 10^{-3}$	$10^{13}$
โฟโตมัลติพลายเออร์	$10^6$	$10^{-9}$	$10^{-17} \sim 10^{-6}$	$10^{16}$

คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (linearity) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงอินพุตและขนาดของสัญญาณเอาต์พุตว่าจะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เพียงไร นับเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาด้วย โดยทั่วไปแล้ว

1. ในกรณีที่แสงอินพุตมีความเข้มต่ำ กระแสไฟฟ้ามืดจะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น และ
2. ถ้าแสงอินพุตมีความเข้มสูง ค่าความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์จะเป็นตัวกำหนดความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นผู้ใช้จะต้องเลือกชนิดของสิ่งประดิษฐ์ให้ถูกต้องตรงสภาพของการทำงาน และตรงวัตถุประสงค์ของการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn เมื่อมีแสงตกกระทบบนรอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอด จะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบันโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ pn มีราคาไม่แพงและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si, GaAs, GaAsP และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ กัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอดและอะวาลันซ์โฟโตไดโอดซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดแบบ pn

### 2.2.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบบน ปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิด เช่น

- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn (pn photodiode) และแบ่งออกเป็น
  - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชัน (planar diffusion)
  - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (low capacitance planar diffusion)
  - ชนิดรอยต่อ pnn<sup>+</sup>
- พินโฟโตไดโอด (pin photodiode)
- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky photodiode)
- อะวาลันซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode)

โฟโตไดโอดทั้งหมดเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นโดยทั่วไปคือ

1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง (wide spectral response)

4. มีความคงทนทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
5. มีขนาดกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ จุดเด่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ สรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

1) โฟโตไดโอดชนิดเพลนาร์คิฟิวชัน (Planar diffusion type) มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ pn และมีฉนวน  $\text{SiO}_2$  เคลือบทับ มีกระแสไฟฟ้ามืดค่าน้อย วัสดุที่ใช้ได้แก่ Si GaAsP Ge และ GaAs เป็นต้น

โฟโตไดโอดชนิดต่างๆ	คุณสมบัติ
โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย
โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอนความจุไฟฟ้าต่ำ	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง
โฟโตไดโอดชนิด $\text{pn}^+$ ซิลิคอน	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง ตัดทอนแสงอินฟราเรด
พินโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน	ตอบสนองเร็วมาก
โฟโตไดโอดชนิดรีดคัททิกของ GaAsP, GaP	ตอบสนองแสงผ่านอัตราไวโอเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 <p style="text-align: center;">อะวาลันซ์โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน</p>	<p>มีความสามารถขยาย สัญญาณตอบสนองเร็ว มาก</p>
--	---

## รูปที่ 2 ตัวอย่าง โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

2) โฟโตไดโอดชนิดแพลนาร์ดีฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (Low capacitance planar diffusion type) เป็นชนิดที่ออกแบบให้สารเจือปนในชั้น  $n$  มีปริมาณน้อย ทำให้ชั้น  $n$  มีความต้านทานสูงและชั้นปกปิดพาหะก่อนข้างหนา เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของชนิดแรก นอกจากนี้เนื่องจากชั้น  $p$  มีความบางมาก จึงตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

3) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ  $pn^+n^+$  สารกึ่งตัวนำชั้น  $n^+$  มีค่าสภาพความต้านทานต่ำโดยการโด๊ปด้วยสารเจือปนปริมาณมากๆ และชั้น  $n^+$  หนาหลายๆจนทำให้ที่รอยต่อระหว่างชั้น  $n$  และชั้น  $n^+$  เปรียบเสมือนชั้นปกปิดพาหะ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ไม่มีผลตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด จึงใช้วัดแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

4) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ  $pin$  หรือพินโฟโตไดโอด ที่บริเวณตรงระหว่างชั้น  $p$  และ  $n$  มีการใส่ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic ย่อว่า  $i$ ) ทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้รวดเร็วมากเป็นพิเศษ เพราะชั้น  $i$  หนาและมีค่าแกลปาซิแดนซ์น้อยมาก ในการใช้งานจะใช้วิธีไบแอสแบบย้อนจึงทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วมีค่าน้อย

5) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky Photodiode) เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางมากๆ ลงบนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ เช่น เคลือบทองคำลงบน  $GaAsP$  ชนิด  $n$  เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นบางมาก ดังนั้นโฟโตไดโอดชนิดนี้จึงต้องตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านมองเห็น ไปจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี

6) โฟโตไดโอดชนิดอะวาลันซ์ (Avalanche photodiode) เป็นโฟโตไดโอดที่มีการขยายสัญญาณอยู่ภายใน ทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าสูงป้อนเข้าสู่รอยต่อ  $pn$  แบบย้อนกลับจนทำให้พาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงถูกเร่งให้วิ่งไปชนกับอะตอมตัวอื่นๆ และเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electrons) ขึ้นมาใหม่ และกระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นซ้ำๆ กันซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์อะวาลันซ์ (avalanche effect) ทำให้สามารถตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากๆ ได้

ดี เพราะโฟโตไดโอดชนิดนี้กลไกของการขยายสัญญาณอยู่ภายใน นอกจากนี้ก็มีผลตอบสนองที่รวดเร็วมากด้วย

## 2.2.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อติดกับชนิด n เป็นรอยต่อ pn ที่รอยต่อ pn นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ  $1\ \mu\text{m}$  ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ pn เป็นย่านปลอดพาหะในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโคปสารเจือปนของชั้น p ชั้น n และชั้นล่างสุด ( $n^+$ ) ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่สูงที่ต้องการได้

เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือถ้า

$$h\nu \geq E_g \quad (2.2.1)$$

แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน และแถบที่เวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

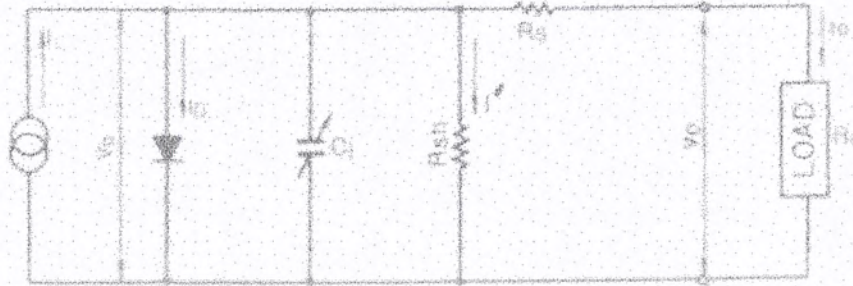
### 2.2.2.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 2 โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆ นั้นคือ

$I_L$  : กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดจากแสง  $I_D$  : กระแสไฟฟ้ามืดในไดโอด

$C_j$  : ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ pn  $R_{sh}$  : ความต้านทานชั้นดี

$R_s$  : ความต้านทานอนุกรม  $I'$  : กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

$V_D$  : แรงดันไฟฟ้าคร่อมไดโอด

$I_0$  : กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

$V_0$  : แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากวงจรนี้ สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต  $I_0$  ได้ว่า

$$I_0 = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left( \exp \frac{eV_d}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.2.2)$$

$I_s$  ในสมการนี้คือกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับอิมิตัวของโฟโตไดโอด จากสมการนี้เราสามารถคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตวงจรเปิด  $V_{op}$  ได้จากการให้  $I_0 = 0$  นั่นคือ

$$V_{op} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right) \quad (2.2.3)$$

ถ้า  $I'$  มีค่าน้อยมาก เราอาจไม่คิดค่า  $I'$  ก็ได้ ส่วน  $I_s$  จะเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังนั้น  $V_{op}$  จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $V_{op}$  จะลดลง และ  $V_{op}$  จะแปรผันตรงกับ  $I_L$  แบบ  $I_L$  แต่ถ้าแสงมีความเข้มน้อยมาก ความสัมพันธ์เหล่านี้จะไม่ชัดเจน

ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลัดวงจร สามารถคำนวณได้จากการให้ และ ดังนั้น

$$I_{sh} = I_L - I_s \left( \exp \frac{e(I_{sh} \cdot R_s)}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sh} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการนี้ พจน์ทางขวาพจน์ที่ 2 และ 3 จะเป็นตัวกำหนดลักษณะความเป็นเชิงเส้นของ  $I_{sh}$  ถ้า  $R_{sh}$  มีค่าไม่เกิน  $10 \Omega$  และถ้า  $R_{sh}$  มีค่าระหว่าง  $10^7 \sim 10^{11} \Omega$  จะทำให้สามารถตัดพจน์ที่ 2 และ 3 ทางขวาทิ้งได้

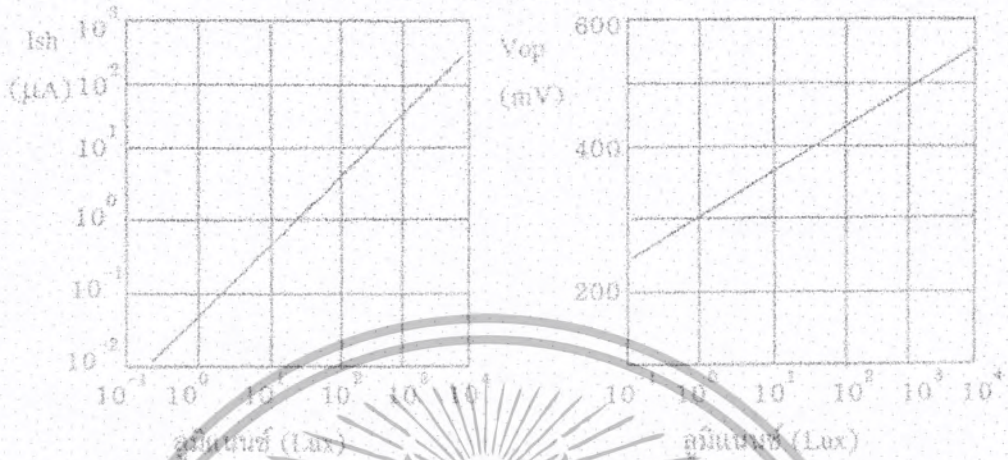
### 2.2.2.2 เส้นกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ในขณะที่ยังไม่ส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้เป็นตัวเรกติฟายเออร์ดังแสดงในรูปที่ 3 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดจะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่หมายเลข 2 และถ้าความเข้มของแสงมากขึ้นก็จะเป็นหมายเลข 3 ในขณะที่กำลังส่องแสงอยู่เราทำการวัดกระแสลัดวงจรโฟโตไดโอดจะได้ค่า  $I_{sh}$  หรือ  $I'_{sh}$  โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปสู่แคโทด ถ้าเป็นวงจรเปิดเราจะได้แรงดันวงจรเปิด  $V_{op}$  หรือ  $V'_{op}$  และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $I_{sh}$  จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงในลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 4 (ก)

### รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด

เส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพมืดและมีรูปร่างเหมือนของไดโอดทั่วไป

เส้นหมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง



รูปที่ 5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $I_{sh}$  ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด  $V_{op}$  และความเข้มของแสงอินพุต

ถ้าความเข้มของแสงอยู่ในช่วง  $10^{-2} - 10^{-3}$  (w)  $I_{sh}$  จะเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงประมาณ 6-8 หลัก ความเข้มของแสงที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำให้  $I_{sh}$  เปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับค่า NEP (Noise Equivalent Power) ของโฟโตไดโอด ส่วนความเข้มของแสงที่สูงที่สุดที่ยังคงทำให้  $I_{sh}$  เป็นเส้นตรงจะขึ้นกับค่าความต้านทานของโหลดและแรงดันไบแอสย้อนตามสมการต่อไปนี้

$$P_{max} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_s + R_L) \cdot R_L} \quad (2.2.5)$$

โดยที่  $P_{max}$  : ความเข้มของแสงที่สูงที่สุดที่กระแสไฟฟ้ายังเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงกับความเข้มของแสง

$V_{Bi}$  : ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) (V)

$V_R$  : แรงดันป้อนย้อนกลับ (V)

$R_L$  : ความต้านทานโหลด ( $\Omega$ )

$R$  : เรสพอนซิวิตีหรือความไวของโฟโตไดโอด (A/W) ที่ความยาวคลื่น

$R_s$  : ความต้านทานอนุกรม ( $\Omega$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงดันวงจรเปิด  $V_{op}$  ผันแปรตรงกับค่า  $\ln P$  ( $P$  คือความเข้มของแสง) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้  $V_{op}$  เปลี่ยนแปลงมากด้วย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้  $V_{op}$  เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสง

## 2.2.3 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด

### 2.2.3.1 สเปกตรัมผลตอบสนอง

ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $E_g$ ) จะไม่เกิดการดูดกลืนแสง ความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนได้จะต้องมีค่าดังนี้

$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g} \quad (\text{nm}) \quad (2.2.6)$$

ตัวอย่างเช่น เช่นอุณหภูมิห้อง 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 ระยะทางแทรกซึม (penetration depth) ของแสงจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นสั้นลง ดังนั้นผลตอบสนองด้านความยาวคลื่นสั้นจึงลดลงด้วย

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

### 2.2.3.2 การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดจะมีความสามารถในการวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมากๆ ได้ดีเพียงไรจะขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวน (noise current) ที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด  $i_n$  เกิดจาก

1) สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล  $i_j$  (thermal noise หรือ Johnson noise) เกิดจากความต้านทานแบบชันต์ (shunt resistance) และ

2) สัญญาณรบกวนชนิดช็อต  $i_s$  (shot noise) เกิดจากกระแสไฟฟ้ามีดและกระแสไฟฟ้าโฟโตไดโอด สัญญาณรบกวนโดยรวมในโฟโตไดโอด  $i_n$  มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_n = \sqrt{i_j^2 + i_s^2} \quad (A) \quad (2.2.7)$$

ถ้าโฟโตไดโอดถูกใช้งานกับวงจรขยายแบบออปแอมป์ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโฟโตไดโอดจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุตออฟเซตออปแอมป์ ทำให้สามารถตัดการพิจารณากระแสไฟฟ้ามืดออกไปได้ ดังนั้น  $i_n$  จึงมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้ารบกวนชนิดเทอร์มอลดังนี้

$$i_n = i_j = \sqrt{\frac{4kTB}{R_{sh}}} \quad (A) \quad (2.2.8)$$

โดยที่  $B$  คือแบนด์วิดท์ของสัญญาณรบกวน  $k$  คือค่าคงที่โบลต์ซมันน์  $= 1.38 \times 10^{-23}$  J/K และ  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์  $R_{sh}$  คือ ความต้านทานชั้นดีของโฟโตไดโอด

$$i_n = i_j = \sqrt{4kTB \left( \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_L} \right)} \quad (2.2.9)$$

ถ้าโฟโตไดโอดถูกใช้งานกับวงจรจะต้องมีกระแสไฟฟ้ามืดไหลเสมอ และถ้าแรงดันไฟฟ้าไบแอสเกิน 1-2 จะทำให้  $i_s \gg i_j$  ดังนั้น  $i_n$  มีค่า

$$i_n = i_s = \sqrt{2qI_{dB}} \quad (A) \quad (2.2.10)$$

โดยที่  $I_d$  คือกระแสไฟฟ้ามืด และ  $q$  คือประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

นอกจากนี้เนื่องจากการส่องแสงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าโฟโต  $I_L$  ไหล และถ้า  $I_L \gg 0.026 / R_{sh}$  หรือถ้า  $I_L \gg I_d$  จะทำให้  $i_n$  มีค่าขึ้นกับ  $i_s$  ตามสมการ

$$i_n = i_s = \sqrt{2qI_L B} \quad (A) \quad (2.2.11)$$

สัญญาณรบกวน  $i_n$  เหล่านี้แปรผันตรงกับรากที่สองของ  $B$  ดังนั้นจึงอาจใช้หน่วยของ  $i_n$  เป็น  $(A/Hz)^{1/2}$

จากนิยามของ  $NEP$  (Noise Equivalent Power) ซึ่งแสดงค่าความเข้มของแสงต่ำสุดที่จะทำให้อัตราส่วนของสัญญาณกระแสไฟฟ้าโฟโตต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$NEP = \frac{i_n}{S} \quad (W/Hz^{1/2}) \quad (2.2.12)$$

โดยที่  $i_n$  : กระแสไฟฟ้ารบกวน (A)

$S$  : เรสปอนซิวิตี (A/W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าโฟโตไดโอดเป็นชนิดอะวะลาณซ์โฟโตไดโอด ซึ่งมีความสามารถในการขยายสัญญาณเอาต์พุตได้ (ในขณะที่โฟโตไดโอดธรรมดา ไม่สามารถขยายสัญญาณเอาต์พุต) จะทำให้มีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าสมมติให้สัมประสิทธิ์การขยายทวีคูณ  $M$  (Gain) มีค่าเท่ากับ 1 และ กระแสไฟฟ้าโฟโตเท่ากับ  $I_L$  และสัมประสิทธิ์ของสัญญาณรบกวนส่วนเพิ่มนี้ (excess noise factor) เท่ากับ  $F$  กระแสไฟฟ้ารบกวนส่วนเพิ่ม จะมีค่าเท่ากับ  $i_n$

$$i_n = \sqrt{2qI_L M^2 F B} \quad (2.2.13)$$

ถ้า  $M$  มีค่าประมาณ 10-100 จะได้ค่า  $F$  โดยประมาณ  $F = M^x$  โดยที่  $x$  เรียกว่าดัชนีของสัญญาณรบกวนส่วนเกิน (excess noise index) และ  $x$  มีค่าประมาณ 0.3-0.5

ข้อดีของการใช้อะวะลาณซ์โฟโตไดโอดเมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดธรรมดาได้แก่สามารถใช้ไหลลดความต้านทานค่าน้อยๆได้ และใช้ตัวต้านทานอินพุตในวงจรสแต็ปต่อไปได้ ทำให้สามารถทำงานได้รวดเร็วมากและสามารถตรวจวัดสัญญาณแสงอินพุตที่มีความเข้มต่ำๆ ได้อย่างดี (รายละเอียดดูได้ในบทเรื่องอะวะลาณซ์โฟโตไดโอด)

### 2.2.3.3 การไบแอสยอนโฟโตไดโอด

เนื่องจากโฟโตไดโอดทำงานโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ดังนั้นโฟโตไดโอดสามารถให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้แม้จะไม่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าจากวงจรภายนอก แต่การป้อนแรงดันไบแอสแบบยอนเข้าสู่โฟโตไดโอดขณะทำงานด้วยจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดมีความเร็วตอบสนองได้ดีขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีขึ้น โดยปกติกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโฟโตไดโอดขึ้นกับความเข้มของแสง กล่าวคือ การเกิดจำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นกับความเข้มของแสง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการไบแอสยอนจะทำให้ ชั้นปลอดพาหะมีความหนาเพิ่มขึ้นได้บ้าง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มได้บ้างเล็กน้อยตามขนาดของแรงดันไบแอสยอน

### 2.2.3.4 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดหมายถึง เวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนถึงการมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น  $t_r$  หรือค่าช่วงเวลาขาลง  $t_f$  นิยามของ  $t_r$  ได้แก่ช่วงระยะที่สัญญาณเอาต์พุตเพิ่มจาก 10% -

90%  $t_f$  มีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับแฟกเตอร์ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของหอสมุดกลางพระจอมเกล้าลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่าคงที่เวลา  $T_1$  (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้า  $C_t$  ของโฟโตไดโอด และค่าความต้านทานของโหลด  $R_L$  ( $C_t$  เป็นผลรวมทั้งของตัวโฟโตไดโอด  $C_j$  และภาชนะที่บรรจุโฟโตไดโอด)
2. ค่าเวลาการแพร่ซึม  $T_2$  (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกชั้นปลอดพาหะ ถ้ากรณีที่ค่าคงที่เวลามีค่ามากกว่าค่าเวลาการแพร่ซึม กล่าวคือถ้า  $T_1 > T_2$  จะได้รูปใกล้เคียงของ  $t_r$  ว่าเท่ากับ

$$t_r = 2.2\tau_t = 2.2C_t \times R_L \quad (2.2.14)$$

จากสมการนี้ ทำให้เราทราบว่า ถ้าต้องการให้ช่วงเวลาขาขึ้น  $t_r$  มีค่าน้อยๆ จะต้องออกแบบให้  $C_t$  หรือ  $R_L$  มีค่าน้อย นอกจากนี้โดยปกติ  $C_j$  (ของรอยต่อ p-n ในโฟโตไดโอด) แปรผันตรงกับพื้นที่รับแสง  $A$  และแปรผกผันกับ  $V_R$  และสภาพต้านทาน  $p$  ของวัสดุแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำตามสูตร

$$C_j \propto A \{(V_R + 0.5) \times p\}^{-1/2 \sim 1/3} \quad (2.2.15)$$

เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองที่ความเร็วสูงๆ จึงควรออกแบบให้  $A$  มีค่าน้อยและ  $p$  มีค่ามากและมีการไบแอสย้อนด้วย แต่ต้องระวังการไบแอสย้อนขณะที่แสงมีความเข้มน้อยจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามืดซึ่งจะเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนได้

#### 2.2.3.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโตไดโอดมาก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสไฟฟ้ามืดเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดิ่งขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลดลง

สำหรับด้านกระแสไฟฟ้ามืดนั้น เนื่องจากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความนำจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ให้ขึ้นไปแถบคอนดักชันจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้ามืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นถ้าอุณหภูมิเพิ่มจาก  $5^\circ\text{C}$  ไปที่  $10^\circ\text{C}$  จะพบว่ากระแสไฟฟ้ามืดจะเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานชั้นดี  $R_{sh}$  ลดลงและสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอลและสัญญาณรบกวนช็อตเพิ่มเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าแรงดันวงจรเปิด

$V_{op}$  ของโฟโตไดโอดก็ดีขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยที่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น  $V_{op}$  จะลดลงอย่างเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.6 โฟโตไดโอดออปแอมป์

การใช้ออปแอมป์กับโฟโตไดโอด โดยให้ด้านอินพุตของออปแอมป์เป็นตัวรับกระแสไฟฟ้า จะทำให้โฟโตไดโอดจ่ายกระแสลัดวงจร  $I_{sh}$  ได้ใกล้ค่าอุดมคติมากที่สุด รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์ ในย่านที่ความถี่ไม่สูงมากนัก เราจะได้แรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  มีค่า

$$V_{out} = -(I_{sh} \times R_f) \quad (V) \quad (2.2.16)$$

ในวงจรนี้แม้จะไม่มีกรไบแอสย้อน แต่ก็จะได้แรงดันเอาต์พุตที่สูงพอสมควรซึ่งขึ้นกับค่า  $R_f$  และ  $I_{sh}$  เท่านั้น แรงดันเอาต์พุตสูงสุดจะถูกกำหนดโดยค่าแรงดันอิมิต์ของออปแอมป์ ส่วนความจุไฟฟ้าที่ใช้ป้อนกลับโดยทั่วไปจะใช้ค่าสูงกว่า  $pF$   $C_f$  จะเป็นตัวกำหนดค่าความถี่สูงสุดในการทำงานของวงจรจากสูตรของค่าคงที่เวลา  $C_f \times R_f$  และ  $C_f$  นี้จะช่วยลดความไม่เสถียรภาพของโฟโตไดโอดในย่านความถี่สูงๆ ได้ด้วย



### รูปที่ 6 วงจรพื้นฐานการต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์

ที่ด้านอินพุตของออปแอมป์อาจมีกระแสไฟฟ้าไบแอส  $I_B$  ไหลเข้าหรือออกได้ ดังนั้นจึงควรเลือกออปแอมป์ที่มีกระแสไฟฟ้าไบแอสที่มีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ดังนั้นจึงอาจเลือกใช้ FET OP-AMP ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าไบแอสขนาด  $0.1pA$  นอกจากนี้แล้วควรระวังการเกร็ดกระแสไฟฟ้าวรที่แผ่นวงจรหรือสวิตช์ด้วย

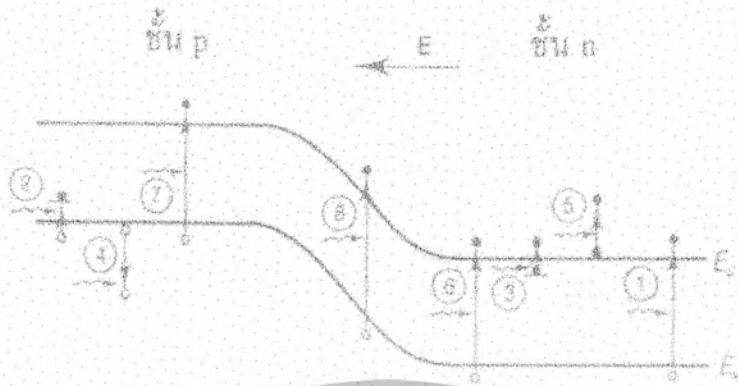
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการทํางานพื้นฐานของโฟโตไดโอด โดยได้กล่าวไว้ว่าโฟโตไดโอดจะผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ ช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ แต่เรายังไม่ได้มีการพิจารณากันอย่างละเอียดว่าการดูดกลืนแสงที่ดีหรือการผลิตพาหะโฟโตก็คือนั้นเกิดขึ้นที่ส่วนในใดของโฟโตไดโอด ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณากลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตพาหะที่เกิดขึ้นส่วนในใดของโฟโตไดโอด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและผลิตโฟโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพ

รูปที่ 6 แสดงภาพกำลังมีแสงส่องเข้าทางด้านชั้น  $p$  และกำลังมีการไบแอสแบบย้อนกลับที่รอยต่อ  $pn$  หมายเลขต่างๆ ในรูปแสดงกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆ โดยหมายเลขต่างๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

- 1) เป็นการดูดกลืนแสงด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่เข้าไปด้านหลังและห่างไกลชั้นปลอดพาหะ (ในรูปนี้ชั้น  $n$  อยู่ด้านหลัง แต่อาจสลับกับชั้น  $p$  ก็ได้) ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน / โฮลได้ แต่เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในชั้นนี้ ดังนั้นพาหะที่เกิดจาก 1) นี้ จะเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่ซึมเท่านั้น ซึ่งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตมากนัก
- 2) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น  $p$  ระหว่างแถบเวเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับ โฮลจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตเช่นกัน
- 3) เหมือนกรณีข้อ 2) แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับโคเนอร์และแถบคอนดักชัน และไม่มีผลต่อเอาต์พุต
- 4) เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบเวเลนซ์ของชั้น  $p$  และเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
- 5) เหมือนกรณีข้อ 4) แต่เป็นการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชันและไม่มีผลต่อเอาต์พุต
- 6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น  $n$  ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่ซึมไปสู่ชั้น  $n$  ด้านหลังและพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะ



รูปที่ 7 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆ ในรอยต่อ pn ในสภาพกำลังมีการไบแอสย้อน



รูปที่ 8 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตไดโอดย่านปลอดพาหะอยู่ระหว่างตำแหน่ง  $X_1$  และ  $X_2$

และ โสลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น p และ โสลเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

7) เหมือนกรณีข้อ 6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะ และ อิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอน / โฮลในชั้นปลอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ชั้น  $n$  และชั้น  $p$  ตามลำดับ และจะมีผลต่อเอาต์พุตมากที่สุด

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ กลไกหมายเลข 6) - 8) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข 8) จะมีผลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากที่สุด

เนื่องจากจำนวนของพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงนั้นแปรผันตรงกับกำลังของแสงหรือจำนวนของโฟตอนที่เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการทราบค่ากำลังของแสงที่ตำแหน่งต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำจึงมีความสำคัญมาก ขอพิจารณารูปที่ 7 ให้แทนในแนวนอนคือความลึก กล่าวคือตำแหน่งในสารกึ่งตัวนำและแกนในแนวตั้งคือกำลังของแสง ให้กำลังของแสงอินพุตเริ่มแรกมีค่า  $P_0$  ให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำคือ  $R$  ดังนั้นกำลังของแสงที่เข้าสู่สารกึ่งตัวนำคือ  $P_0(1-R)$  ในขณะที่แสงเดินทางอยู่ในสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกดูดกลืนและกำลังของแสงจะลดลงอย่างโพเนนเชียลตามระยะทางดังนี้

$$P(x) = P_0(1-R)\exp(-\alpha x) \quad (2.2.17)$$

โดยที่  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

#### 2.2.4.1 กระแสไฟฟ้าที่ผลิตในชั้นปลอดพาหะ

ความสำคัญของการเกิดกระแสไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะเริ่มเป็นที่ทราบกันครั้งแรกในช่วง ค.ศ. 1959 ในรูปที่ 7 ถ้าให้  $x_1$  และ  $x_2$  แสดงตำแหน่งขอบของชั้นปลอดพาหะในชั้น  $p$  และ  $n$  ตามลำดับ ดังนั้นกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในชั้นปลอดพาหะนี้ ( $x_2 - x_1$ ) จึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P(x_1) - P(x_2) = P_0(1-R)[\exp(-\alpha x_1) - \exp(-\alpha x_2)] \quad (2.2.18)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตในชั้นปลอดพาหะนี้จึงเท่ากับ

$$J_{oDL} = \frac{e\eta_i}{hv} \phi_0(1-R)[\exp(-\alpha x_1) - \exp(-\alpha x_2)] \quad (2.2.19)$$

โดยที่  $\eta_i$  คือประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นอัตราส่วนของจำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในชั้นปลอดพาหะในหนึ่งหน่วยปริมาตร ต่อจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในชั้นนี้ และ  $\phi_0$  คือ ฟลักซ์ของแสงอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ช่วยบอกให้เราทราบว่าโฟโตไดโอดที่ดีควรรออกแบบดังนี้

1. ควรมีค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในสูง
2. ควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำ
3.  $x_1$  ควรมีค่าน้อย นั่นคือรอยต่อควรรอยตื้นและความหนาของชั้นปลอดพาหะ  $x_2 - x_1$  ควรมีค่ามาก

การไบแอสย้อนเข้าสู่โฟโตไดโอดมีส่วนช่วยทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตมีค่ามากขึ้นเพราะว่าการไบแอสย้อนทำให้ชั้นปลอดพาหะมีความหนามากขึ้น ( $\propto V^{1/2}$ ) นั่นคือช่วยเพิ่มค่าของ  $x_2 - x_1$  ดังแสดงในรูปที่ 8 นอกจากนี้จากสมการ จะพบว่าถ้าเพิ่มกำลังของแสงจะทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตเอาต์พุตเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับกำลังของแสง ในรูปที่ 8 ตามปกติเราจะใช้งานโฟโตไดโอดในจตุภาค (quadrant) ที่ 3 และถ้าใช้งานในจตุภาคที่ 4 ก็จะเป็นกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 9 เส้นลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันในรอยต่อ pn ภายใต้การส่องด้วยแสงที่มีกำลังต่างๆ

#### 2.2.4.2 ประสิทธิภาพและเรสปอนซิวิตี

นิยามของคำว่า “ประสิทธิภาพภายนอก” (external efficiency) ของโฟโตไดโอด คือ อัตราส่วนของจำนวนของพาหะที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้าต่อจำนวนของโฟตอนอินพุต นั่นคือ

$$\eta_e = (1 - R) \eta_i [\exp(-\alpha x_1) - \exp(-\alpha x_2)] \quad (2.2.20)$$

นอกจากนี้เรานิยาม เรสปอนซิวิตี หรือ สภาพตอบสนอง  $R_s$  (responsivity) ของโฟโตไดโอดว่า คืออัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต  $I_o$  ต่อกำลังของแสงอินพุต  $P_o$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือเผยแพร่ข้อมูลด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{I_o}{P_o} \quad \text{AW}^{-1} \quad (2.2.21)$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\eta_e = \frac{I_o / e}{P_o / hv} = R_s \frac{hc}{e\lambda} \quad (2.2.22)$$

### 2.2.4.3 กระแสไฟฟ้าแพร่ซึม

การดูดกลืนแสงที่บริเวณใกล้ๆ กับชั้นปกคลุมพาหะทำให้เกิดพาหะอิสระขึ้นมาใหม่ได้ และถ้าพาหะเหล่านี้ไหลด้วยกระบวนการแพร่ซึมซึ่งเกิดจากความพลัดของความหนาแน่นของพาหะก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึม (diffusion current) ไหลในโฟโตไดโอด กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมนี้เกิดขึ้นที่นอกชั้นปกคลุมพาหะ เขตที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมของโฮลได้แก่บริเวณในชั้น n ตั้งแต่  $x_2$  ไปเป็นระยะทาง  $L_p$  และเขตที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมของอิเล็กตรอนได้แก่บริเวณในชั้น p เป็นระยะทาง  $L_n$  ก่อนถึง พาหะ โฮลจะไหลจากขวาไปซ้ายและอิเล็กตรอนจะไหลจากซ้ายไปขวา โดยที่  $L_p$  และ  $L_n$  คือระยะทางการแพร่ซึม (diffusion length) ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

เราจะเริ่มจากการใช้สมการต่อเนื่องเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการแพร่ซึมของโฮลดังนี้

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p - p_o}{\tau_p} + g(x) = 0 \quad (2.2.23)$$

โดยที่  $D_p$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล

$p_o$  คือความหนาแน่นของโฮลในสภาพสมดุลเชิงความร้อน

$\tau_p$  คือเวลาอายุของโฮล

$g(x)$  คืออัตราการผลิตโฮลด้วยแสงต่อหน่วยเวลาโดย

$$g(x) = \frac{\eta_i \phi_o (1 - R) \alpha}{hv} \exp(-\alpha x) \quad (2.2.24)$$

ในการหาผลเฉลยของสมการ จะใช้เงื่อนไขขอบเขตดังนี้คือ

$$P = P_o \quad \text{ที่ } x = \infty$$

$$P = 0 \quad \text{ที่ } x = x_2$$

$$p = p_0 - [p_0 + B \exp(-\alpha x_2)] \exp\left(\frac{x_2 - x}{L_p}\right) + B \exp(-\alpha x) \quad (2.2.25)$$

โดยที่

$$B = \frac{\eta_i \phi_0 (1-R)}{h\nu D_p} \frac{\alpha L_p^2}{(1 - \alpha^2 L_p^2)} \quad (2.2.26)$$

เนื่องจากนิยามของกระแสไฟฟ้าแพร่มุมคือ

$$J_{diff} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.2.27)$$

ดังนั้น

$$J_{diff} = \frac{-e\eta_i \phi_0 (1-R)}{h\nu} \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} \exp(-\alpha x_2) - \frac{ep_0 D_p}{L_p} \quad (2.2.28)$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่มุมของอิเล็กตรอนซึ่งเกิดในชั้น p ในโฟโตไดโอดก็สามารถเขียนได้ดังนี้

$$J_{diff} = \frac{-e\eta_i \phi_0 (1-R)}{h\nu} \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha L_n} \exp(-\alpha(x_1 - L_n)) - \frac{en_0 D_n}{L_n} \quad (2.2.29)$$

อย่างไรก็ตาม พจน์กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่มุมเหล่านี้มีค่าน้อยกว่าพจน์กระแสไฟฟ้าที่เกิดในชั้นปลอดพาหะ

### 2.3 แสงเลเซอร์

คำว่า เลเซอร์ (laser) ย่อมาจาก “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ซึ่งแปลเป็นไทยได้ความหมายว่า “แสงที่ได้รับการขยายสัญญาณโดยการเปล่งแสงแบบเร่งเร้า”

คุณสมบัติของแสงเลเซอร์ที่แตกต่างไปจากแสงทั่วๆ ไปดังนี้

1. แสงเลเซอร์เป็นแสงสีเดียวที่มีสเปกตรัมเป็นเส้นคมและมีความกว้างของสเปกตรัมเข้าใกล้ศูนย์
2. เลเซอร์เป็นแสงขนานที่เปรียบเสมือนกับเป็นแสงที่ถูกเปล่งออกมาจากต้นกำเนิดแบบจุดที่อยู่ไกลมากด้วยระยะทางอนันต์
3. แสงเลเซอร์เป็นแสงขนานที่บานออกน้อยมาก
4. แสงเลเซอร์เป็นคลื่นแสงที่มีรูปเป็นคลื่นไซน์อย่างสม่ำเสมอ

แสงโคฮีเรนต์และแสงอินโคฮีเรนต์

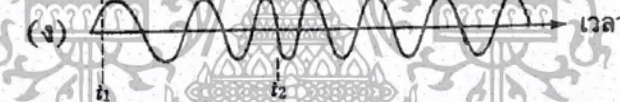
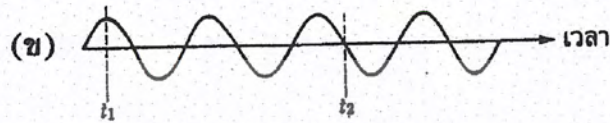
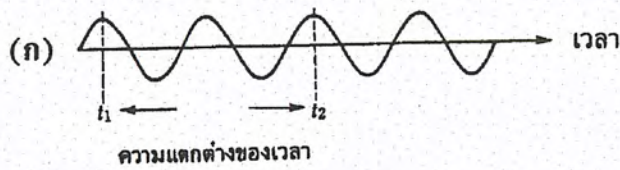
เริ่มแรกเราจะมาพิจารณาปรากฏการณ์ของการแทรกสอดของแสงว่าเป็นอย่างไรขอให้ออกนึกถึงเวลาเราวิ่งก้อนหิน 2 ก้อนลงในน้ำพร้อมๆ กัน จะทำให้ผิวน้ำที่เกิดเป็นคลื่นรูปวงกลมและแผ่ขยายกว้างออกไป เมื่อส่วนของยอดเขาและยอดเขา หรือหุบเขาและหุบเขาวิ่งมาพบกันจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นสูงขึ้น แต่ตรงที่ยอดเขาพบกับหุบเขาจะมีแอมพลิจูดลดลง ดังนั้นถ้าสังเกตดีๆ เราจะพบว่าบนผิวน้ำนั้นจะมีคลื่นใหม่ที่มีรูปร่างแตกต่างไปจากรูปวงกลมเราเรียกปรากฏการณ์การรวมกันของคลื่นเช่นนี้ว่า การแทรกสอด

ทางด้านคลื่นแสง ในชีวิตประจำวัน การสังเกตการเกิดการแทรกสอดของแสงธรรมชาติจะทำได้ยากมากแต่ถ้าเป็นแสงเลเซอร์จะสังเกตได้ง่าย เพราะเลเซอร์เป็นแสงชนิด โคฮีเรนต์ คุณสมบัติของความเข้มโคฮีเรนต์มี 2 ชนิด

#### 1. ความเป็นโคฮีเรนต์ชนิดเวลา (Temporal Coherence)

สมมุติว่าคลื่นแสงที่เรากำลังพิจารณานั้น มีค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวและมีรูปร่างเป็นคลื่นไซน์ ถ้าเราทำการวัดแสง ณ ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ณ ที่เวลา  $t_1$  และที่เวลา  $t_2$  และพบว่าเฟสที่เวลา  $t_1$  และเฟสที่เวลา  $t_2$  มีความสัมพันธ์กันอย่างคงที่ เช่น มีเฟสตรงกัน หรือมีเฟสต่างกันเท่ากับ  $90^\circ$  เป็นต้น เราเรียกแสงเช่นนี้ว่ามีความเป็นโคฮีเรนต์ชนิดเวลา ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9 (ก) และ (ข) แต่ถ้าเป็นกรณีในรูปที่ 9 (ค) และ (ง) เนื่องจากคลื่นแสงทั่วไปมีรูปคลื่นไม่แน่นอน ดังนั้นเฟสของคลื่นที่วัดที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  จึงได้ค่าไม่คงที่ เราจึงเรียกแสงทั่วไปว่าเป็นแสงชนิดอินโคฮีเรนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 การอธิบายความเป็นโคฮีเรนซ์ชนิดเวลาของแสงเลเซอร์

- (ก) เป็นกรณีแสงชนิดโคฮีเรนต์ เพราะ ณ ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เฟสมีสัทสัมพันธ์ที่คงที่
- (ข) เป็นกรณีแสงชนิดโคฮีเรนต์ เพราะ ณ ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เฟสมีความสัมพันธ์แบบ สหสัมพันธ์ ที่ค่าต่างกัน  $90^\circ$
- (ค) เป็นกรณีแสงชนิดอินโคฮีเรนต์ เพราะ ณ ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เฟสไม่มีสัทสัมพันธ์เลย
- (ง) เป็นกรณีแสงชนิดอินโคฮีเรนต์ เพราะ ณ ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ความสัมพันธ์ของเฟสมีการ เปลี่ยนแปลง

2. ความเป็นโคฮีเรนซ์ชนิดปริภูมิ (Spatial Coherence)

ถ้าแสงเดินทางแบบเป็นลำขนานและมีระนาบคลื่น ที่มีความเป็นระเบียบ แต่ระนาบคลื่น ของแสงนั้นก็ยังคงเป็นระเบียบอยู่เช่นเดิม เราเรียกแสงเช่นนี้ว่า แสง โคฮีเรนต์ชนิดปริภูมิ สำหรับ ระดับขั้นความดีของแสงโคฮีเรนต์ชนิดปริภูมินั้นกำหนดได้จากการวัดเฟส ณ ที่ตำแหน่งจุด 2 จุด ที่ห่างกันว่าเฟสของแสงจะมีความสัมพันธ์กันอย่างไรก็ได้คิขนาดไหน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทั่วไปของแสงเลเซอร์

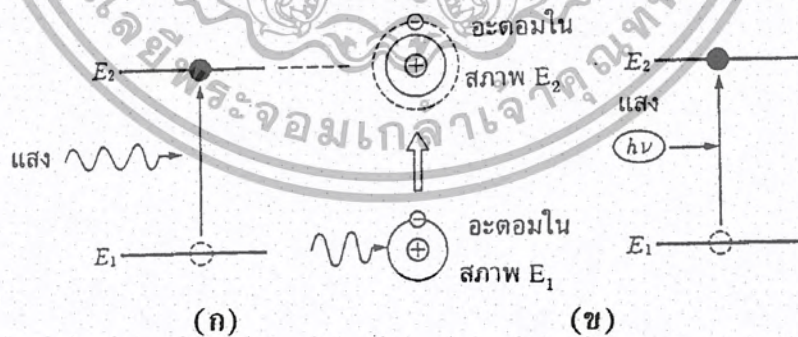
แสงเลเซอร์มีคุณสมบัติเด่นหลายข้อ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเป็นแสงสีเดียว ในทางทฤษฎีแล้วความกว้างของความถี่ของเส้นสเปกตรัมมีค่าน้อยมาก เพียงไม่กี่ Hz (ในกรณีแสงธรรมชาติ เส้นสเปกตรัมมีความกว้างหลายพัน MHz)
2. มีความขนานของลำแสงดีมาก
3. สามารถรวมแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดสเปกตรัมเล็กๆ ได้ดีมาก ในทางทฤษฎีค่าของขนาดสเปกตรัมจะเล็กถึงความยาวคลื่นแสงของเลเซอร์
4. มีความเข้มของพลังงาน (energy density) (พลังงาน/พื้นที่หน้าตัด) ที่สูงมาก
5. มีโคฮีเรนซ์ดีมาก
6. สามารถรวมพลังงานของแสงไว้มากๆแล้วยังออกมาเป็นแสงพัลส์ที่มีพลังงานสูงมากๆได้

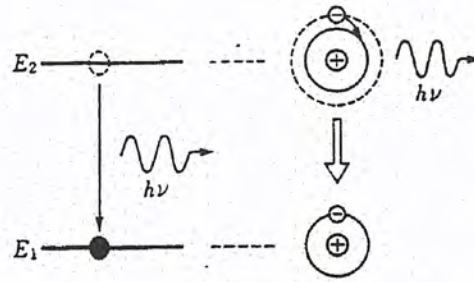
หลักการกำเนิดแสงเลเซอร์

1. การดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง

ในรูปที่ 10 (ก) ถ้ายิงคลื่นแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่  $\nu$  เข้าสู่อะตอมซึ่งมีสถานะระดับพลังงานที่อนุญาต ได้ที่ระดับ  $E_1, E_2$  และถ้า  $\nu$  มีค่าเท่ากับ  $(E_2 - E_1)/h$  จะทำให้อะตอมตัวนั้นดูดกลืนแสงที่มีความถี่  $\nu$  แบบเรโซแนนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและจะทำให้สถานะพลังงานของอะตอมถูกกระตุ้นและเปลี่ยนจากระดับ  $E_1$  ไปสู่  $E_2$  การดูดกลืนแสงเช่นนี้ก็คือการดูดกลืนพลังงานโฟตอน  $h\nu$  ของแสงนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)



รูปที่ 11 การกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วย (ก) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและด้วย (ข) โฟตอนของแสง



รูปที่ 12 การปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาติ (การเปลี่ยนสถานะชนิดเกิดขึ้นเอง)

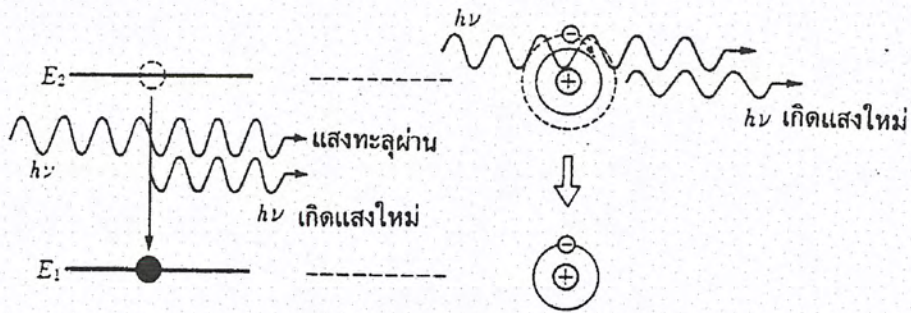
ต่อจากนั้น โดยธรรมชาติแล้ว อะตอมที่อยู่ระดับกระตุ้นที่  $E_2$  นี้จะไม่เสถียรภาพ ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป (อย่างรวดเร็วมาก) ระยะเวลาหนึ่ง อะตอมตัวนี้จะคายพลังงานส่วนเกินซึ่งมีค่าเท่ากับ  $E_2 - E_1$  ออกเป็นพลังงานโฟตอน  $h\nu$  และ ตัวเองจะเปลี่ยนสถานะกลับมายังระดับ  $E_1$  พลังงานโฟตอนที่ถูกคายออกมานี้จะมีค่าเท่ากับ  $h\nu = E_2 - E_1$  ดังที่แสดงในรูปที่ 11

เราเรียกการเปลี่ยนแปลงสถานะชนิดที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติเช่นนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะชนิดเกิดขึ้นเอง (spontaneous transition) และเรียกการเปล่งแสงโดยธรรมชาติว่า การเปล่งแสงชนิดเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) และเรียกแสงที่ถูกเปล่งออกมาเช่นนี้ว่า แสงชนิดเกิดขึ้นเอง (spontaneous light) แสงชนิดเกิดขึ้นเองเป็นแสงชนิดอินโคฮีเรนต์ เพราะมีเฟสหลายเฟสและมีความยาวคลื่นหลายค่าผสมกันอยู่ทั้งนี้เพราะแสงชนิดเกิดขึ้นเองถูกเปล่งออกมาจากอะตอมหลายตัวที่มี  $E_2$  ที่ค่าแตกต่างกัน เราไม่สามารถใช้แสงชนิดเกิดขึ้นเองเป็นแสงเลเซอร์

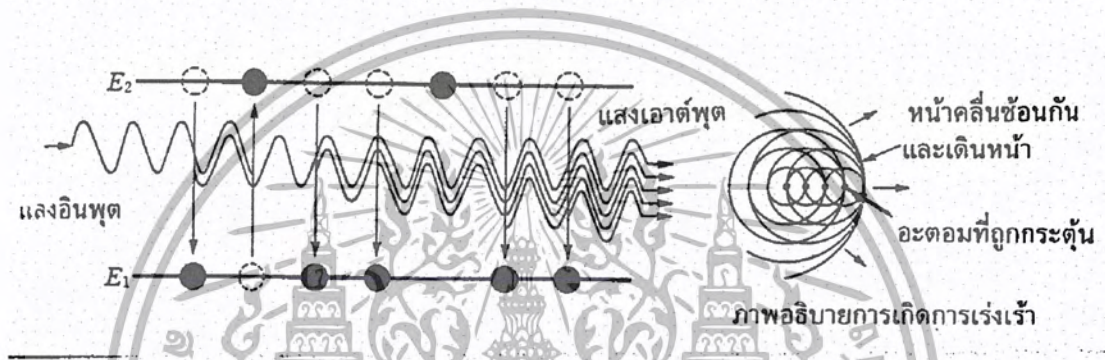
## 2. การเปล่งแสงแบบเร่งเร้าและการขยายสัญญาณแสง

ในรูปที่ 12 ในขณะที่อะตอมถูกกระตุ้นและอยู่ที่ระดับพลังงานสูงที่  $E_2$  และก่อนที่อะตอมจะเปลี่ยนสถานะลงสู่  $E_1$  ถ้ามีแสงที่มีพลังงานโฟตอน  $h\nu = E_2 - E_1$  เดินทางเข้ามา จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์อันเป็นสาเหตุให้อะตอมที่อยู่ที  $E_2$  ถูกเร่งเร้าให้เปลี่ยนสถานะจาก  $E_2$  ลงมาสู่  $E_1$  และอะตอมก็จะคายพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับ  $h\nu = E_2 - E_1$  ออกมาด้วย และเป็นโฟตอนที่มีความถี่เดียวและมีเฟสเดียวและมีโพลาไรเซชันเท่ากันหมด เราเรียกการเปล่งแสงเช่นนี้ว่า การเปล่งแสงแบบเร่งเร้า (stimulated emission) และเป็นหลักการของการเกิดเลเซอร์

ในกรณีของการเปล่งแสงแบบเร่งเร้า แสงอินพุตที่ส่องเข้าสู่วัสดุในตอนแรกนั้น จะทำหน้าที่เพียงอย่างเดียวคือ เร่งเร้าให้อะตอมเปลี่ยนสถานะจาก  $E_2$  ลงสู่  $E_1$  เท่านั้น แสงอินพุตที่ส่องเข้าสู่วัสดุนี้จึงมิได้ถูกดูดกลืนแต่อย่างใด จึงยังคงเดินทางในวัสดุได้ ดังนั้นเมื่อรวมจำนวนโฟตอนที่อะตอมปล่อยออกมา 1 ตัว และโฟตอนอินพุตก็จะได้โฟตอนรวม 2 ตัว ด้วยเหตุนี้เราจึงเรียกการเปล่งแสงแบบเร่งเร้าว่าเป็นปรากฏการณ์ของการขยายสัญญาณแสง (light amplification) ด้วย



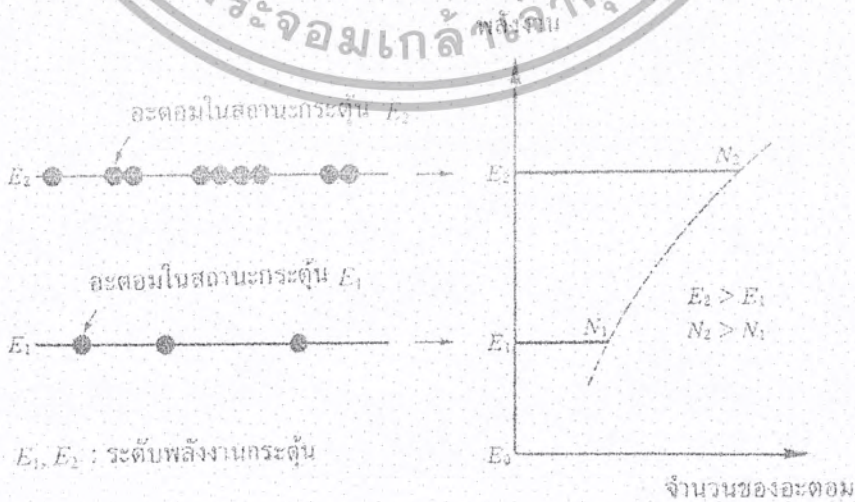
(ก) การเกิดการเร่งเร้าแสง



(ข) การขยายแสงด้วยปรากฏการณ์เร่งเร้า

รูปที่ 13 (ก) ปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบเร่งเร้า และ (ข) การขยายกำลังของแสงด้วยปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบเร่งเร้า

ในรูปที่ 12 (ข) นั้น ถ้าที่ระดับกระตุ้นที่  $E_2$  นี้มีอะตอมหลายตัว ก็จะทำให้เกิดการขยายสัญญาณแสงเป็นจำนวนมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 14 ลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน

เรามีทฤษฎีข้อสำคัญอยู่ข้อหนึ่งว่าการเปล่งแสงแบบเร้านี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะกรณีที่อะตอมที่อยู่ระดับ  $E_2$  (พลังงานสูง) มีจำนวนมากกว่าอะตอมที่อยู่ระดับ  $E_1$  (พลังงานต่ำ) เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 13 เราเรียกปรากฏการณ์ที่อะตอมที่อยู่ระดับพลังงานสูงมีจำนวนมากกว่าอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานต่ำว่า “ปรากฏการณ์ประชากรผกผัน” หรือ “ปรากฏการณ์พอพูเลชันอินเวอร์ชัน” (population inversion effect)

### 2.1 ปรากฏการณ์ประชากรผกผัน (Population Inversion Effect)

เงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบเร้า (ซึ่งก็คือการเกิดเลเซอร์) นั้นแสดงในรูปที่ 13 กล่าวคือ

$$E_2 > E_1 \quad \text{และ} \quad N_2 > N_1$$

สมการนี้มีความหมายว่าจำนวนของอะตอม  $N_2$  ที่ระดับ  $E_2$  ต้องมีมากกว่าจำนวนของอะตอม  $N_1$  ที่ระดับ  $E_1$  เราเรียกเงื่อนไขเช่นนี้ว่า เงื่อนไขประชากรผกผัน (population inversion condition)

ในสภาพสมดุลเชิงความร้อนตามธรรมชาตินั้น โดยทั่วไปอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานสูงกว่าจะมีจำนวนน้อยกว่าอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานต่ำกว่าเสมอ ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอะตอมและระดับพลังงานจะเป็นไปตามกฎการแจกแจงของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's distribution) โดยอัตราส่วนระหว่าง  $N_2/N_1$  คือ

$$N_1/N_2 = \exp(-(E_2 - E_1)/kT) \quad (2.3.1)$$

โดยที่  $k$  คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ และ  $T$  คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจาก  $E_2 > E_1$  ดังนั้นจากสมการนี้  $N_1$  จึงมีค่ามากกว่า  $N_2$  เสมอ ดังนั้นในอะตอมทั่วไปจึงไม่เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน

ในการทำให้เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผันได้นั้น เราจะต้องเลือกอะตอมที่มีเวลาอายุ  $\tau_1$  ที่ระดับพลังงานกล่าวคือ

$$\text{ที่ระดับพลังงาน } E_2 > E_1 \quad \text{ต้องทำให้เวลาอายุ } \tau_2 > \tau_1$$

ถ้า  $\tau_2 > \tau_1$  และเราทำการกระตุ้นอะตอมจำนวนมากๆ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์  $N_2 > N_1$  ซึ่งก็คือเกิดเงื่อนไขประชากรผกผันขึ้นมา เราสามารถแสดงปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ด้วยสมการดังนี้

$$N_1/N_2 = \exp(-(E_2 - E_1)/kT) \quad (2.3.2)$$

เนื่องจาก  $E_2 > E_1$  ดังนั้นจากสมการนี้ จะได้  $N_2 > N_1$  ก็ต่อเมื่อ  $T < 0$  แต่ในสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

“การแจกแจงอุณหภูมิเชิงลบ” (negative temperature distribution) เงื่อนไขของการเกิดสภาพประชากรผกผันนี้เป็นสิ่งที่มีค่ามิได้ที่จะทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบเร่งเร็ว หรือการเปล่งแสงเลเซอร์

## 2.2 อัตราการขยายแสง (Magnification of Light Amplification)

$$G = I(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp(AL) = \exp[(N_2 - N_1)p^*L/c] \quad (2.3.3)$$

สมการนี้ชี้ให้เห็นว่า ถ้าจำนวนของประชากรผกผัน ( $N_2 - N_1$ ) ยังมีมากและแสงเดินทางในวัสดุนี้ระยะทางไกลมาก ก็จะได้อัตราการขยายแสง  $G$  เพิ่มมากขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล

เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (เลเซอร์ไดโอด)

คุณสมบัติเด่นของเลเซอร์ไดโอดซึ่งเลเซอร์ชนิดอื่นไม่มี ได้แก่

1. มีขนาดเล็กและเบา
2. มีประสิทธิภาพสูง
3. สามารถลดอุณหภูมิของการเปล่งแสงด้วยกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง
4. มีอายุการใช้งานยาวนาน
5. ผลิตจำนวนมากได้ง่ายและราคาถูก

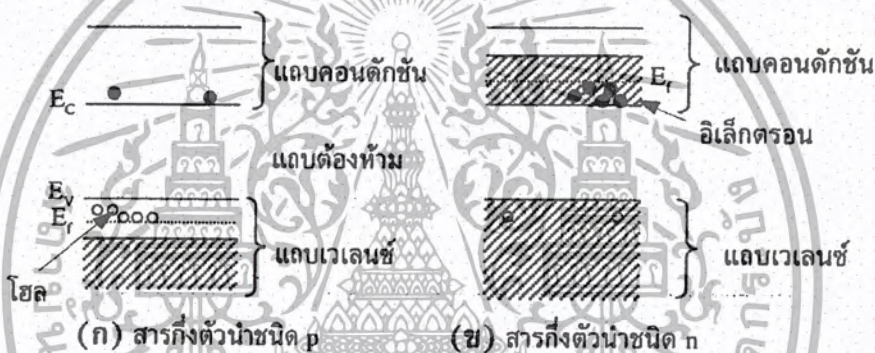
กลไกการเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด

โครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอดคือ รอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct band gap) เช่น GaAs สารเจือปนสำหรับชนิด p ได้แก่ Zn หรือ Be และสารเจือปนสำหรับชนิด n ได้แก่ Te หรือ Si ลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n แสดงในรูปที่ 14 โดยที่เนื่องจากการโด๊ปสารเจือปนนั้นจะโด๊ปมาก ดังนั้นระดับพลังงานแฟร์มี ( $E_f$ ) จึงล้าเข้าไปในแถบเวเลนซ์ สำหรับชนิด p และเข้าไปในแถบคอนดักชันสำหรับชนิด n เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปไปมากเช่นนี้ว่า degenerated semiconductor เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้ง 2 ชนิดนี้มาสร้างเป็นรอยต่อ p-n แบบไดโอดจะได้แถบพลังงานดังที่แสดงในรูปที่ 15

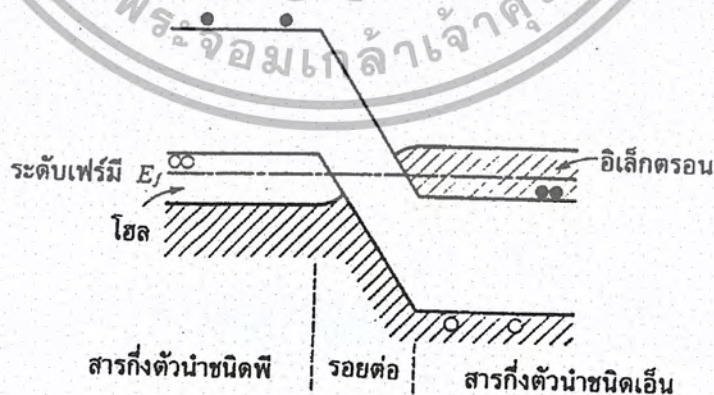
ในการกระตุ้นพาหะเพื่อให้เกิดเลเซอร์นั้น จะใช้วิธีฉีดกระแสไฟฟ้าจากภายนอกให้ไหลเข้าสู่รอยต่อ p-n โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสตาม นั่นคือ ป้อนแรงดันบวกเข้าด้าน p และป้อนแรงดันลบเข้าด้าน n จะทำให้แถบพลังงานเปลี่ยนรูปเป็นรูปที่ 16 อิเล็กตรอนจะไหลจากด้าน n เข้าสู่รอยต่อ และโฮลจะไหลจากด้าน p เข้าสู่รอยต่อ ที่บริเวณรอยต่อจะมีคู่อิเล็กตรอนและโฮล

เกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกัน (recombine) จะเกิดการเปล่งแสงออกมา การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยพลังงานโฟตอนเท่ากับช่องว่างพลังงานของรอยต่อ ( $E_g = h\nu$ ) หลักการเปล่งแสงเช่นนี้คล้ายกับ  
 กรณีของ LED แต่การทำให้เกิดเลเซอร์นั้นจะต้องฉีดกระแสไฟฟ้าให้มากเป็นพิเศษดังที่แสดงใน  
 รูปที่ 17 ถ้ากระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย การเปล่งแสงจะเป็นแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous) และเมื่อ  
 เพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงกว่ากระแสไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold current) ( $I_{th}$ ) จะเกิด  
 ปรากฏการณ์ประชากรผกผัน กล่าวคือ ถ้าจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าค่าๆหนึ่ง ก็  
 จะทำให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลและเกิดการเปล่งแสงแบบเร่งเร้า (stimulated  
 emission) ที่ด้านข้างภายนอกของรอยต่อ p-n จะถูกออกแบบให้เป็นผิวมันแบบกระจก ให้ทำ  
 หน้าที่เป็นออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) แสงที่สะท้อนกลับไปมาภายในเรโซเนเตอร์  
 นี้ จะกลายเป็นแสงเลเซอร์วิ่งออกสู่ภายนอกในที่สุด

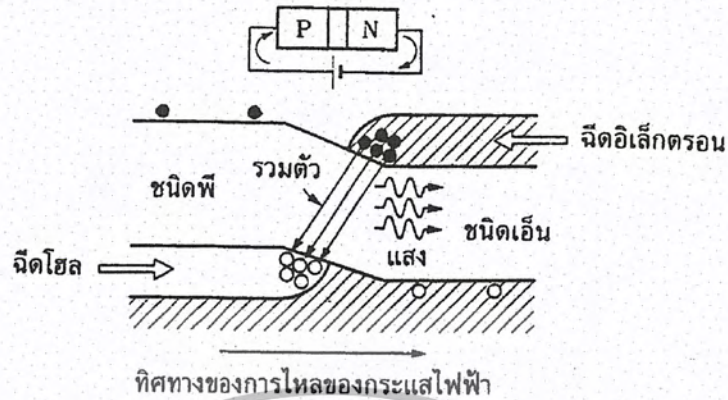


รูปที่ 15 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่โคปสารเชื่อมด้วยความเข้มสูงมาก



รูปที่ 16 รอยต่อพีเอ็นที่โคปสารเชื่อมด้วยความเข้มสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 รอยต่อพีเอ็นที่กำเนิดแสงเลเซอร์ในเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 18 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้าในเลเซอร์ไดโอด

ในรูปที่ 17 เมื่อเกิดการเปล่งแสงแบบเร่งเร็ว กระแสไฟฟ้าจะไหลเพิ่มอย่างรวดเร็ว เราเรียกระแสไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบเร่งเร็วกว่า กระแสไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold current) ( $I_{th}$ )

ลักษณะสมบัติของเลเซอร์ไดโอด

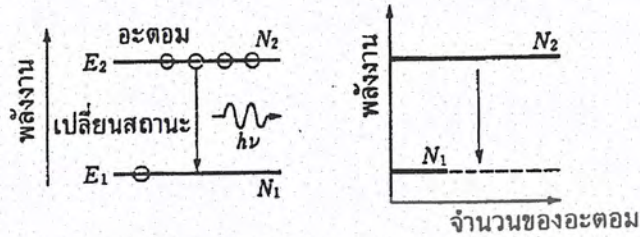
1. ความยาวคลื่นของแสงเอาต์พุต

ความยาวคลื่นของแสงเอาต์พุตของเลเซอร์ไดโอดจะถูกกำหนดโดยช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาผลิตเป็นเลเซอร์ไดโอด แต่เนื่องจากการแจกแจงของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันและของโฮลในแถบเวเลนซ์มีลักษณะแผ่ออกเป็นแถบกว้างหลายระดับดังที่แสดงในรูปที่

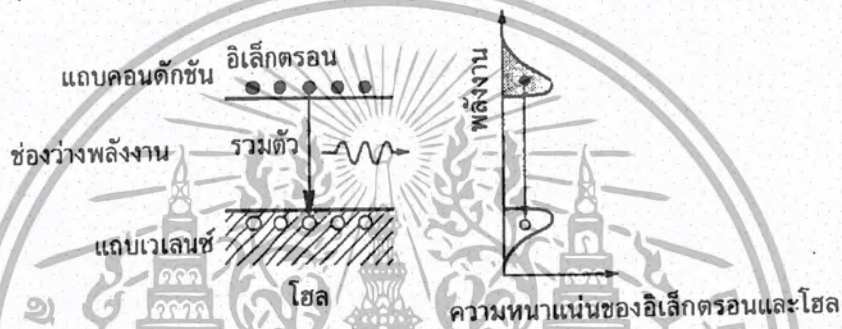
18 (ข) และเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของพาหะเหล่านั้น มิได้เกิดระหว่างขอบล่างสุดของแถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนดักชันและขอบบนสุดของแถบเวเลนซ์เท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะของพาหะจึงเกิดได้ในลักษณะวงกว้าง จึงทำให้สเปกตรัมของแสงเอาต์พุตมีรูปแผ่กว้างกว่ากรณีของเลเซอร์ชนิดกึ่ง



(ก) การเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผันและการเปลี่ยนสถานะในกรณีเลเซอร์ชนิดกึ่ง

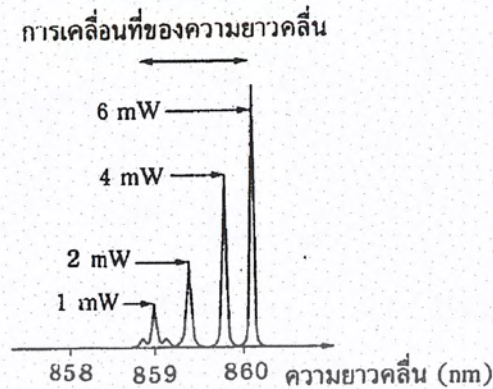


(ข) การเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผันและการเปลี่ยนสถานะในกรณีเลเซอร์ไดโอด

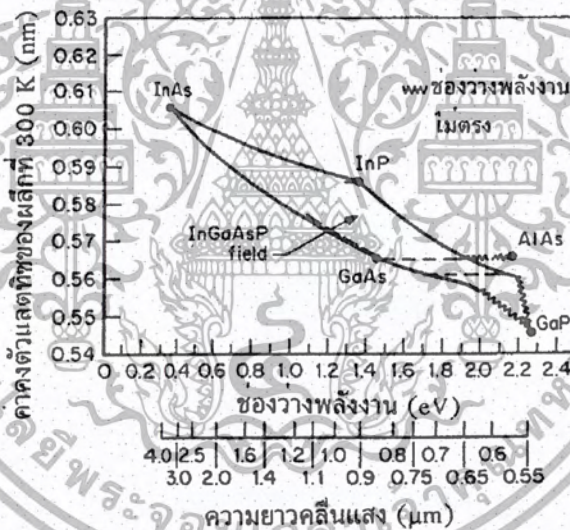
รูปที่ 19 เปรียบเทียบการเกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผันในกรณี (ก) เลเซอร์ชนิดกึ่ง และ (ข) เลเซอร์ไดโอด

นอกจากนี้ ถ้าอุณหภูมิของเลเซอร์ไดโอดสูงขึ้น ก็จะทำให้การแจกแจงของพาหะกว้างขึ้น จึงทำให้สเปกตรัมยิ่งกว้างขึ้นด้วย การเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากๆ จะทำให้เอาต์พุตสูงขึ้น แต่จะทำให้ชั้นเอกทิพมีอุณหภูมิสูงขึ้นและช่องว่างพลังงาน จะแคบลง และส่งผลให้สเปกตรัมเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นได้ดังที่แสดงในรูปที่ 19 ด้วยเหตุผลเหล่านี้ บางครั้งจึงบอกไม่ได้ชัดเจนว่า เลเซอร์ไดโอดที่กำลังใช้งานให้แสงที่มีความยาวคลื่นเท่าใด แต่อาจบอกเป็นย่านกว้างๆ เช่น ย่าน  $0.8 \mu\text{m}$  เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการต้องการเลเซอร์ไดโอดย่านความยาวคลื่นเท่าไร สามารถเลือกได้ตามขนาดของช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำดังที่แสดงในรูปที่ 20 และควรเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานชนิดตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 ตัวอย่างสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังเอาต์พุตทำให้สเปกตรัมเคลื่อนที่ไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวแกดทิซและช่องว่างพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำต่างๆ

## 2. ลักษณะสมบัติกำลังเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้า

เราเรียกความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (injection current) ที่ฉีดเข้าสู่เลเซอร์ไดโอด และพลังงานเอาต์พุตว่า ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต (input-output characteristics)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าฉีดเริ่มเปลี่ยน ( $I_{th}$ ) และอุณหภูมิของชั้นแอคทิฟ ( $T_J$ )

คือ

$$I_{th} = I_{th0} \exp(T_J / T_0) \quad (2.3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระแสไฟฟ้าฉีดเริ่มเปลี่ยนที่อุณหภูมิห้อง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_0$  : ค่าคงตัวที่ขึ้นกับวัสดุ มีชื่อเรียกว่า “อุณหภูมิลักษณะ” (characteristic temperature)

### 3. ลักษณะสมบัติของโหมดตามขวาง (Transverse Mode)

โดยทั่วไปเนื่องจากพื้นที่ตัดขวางของบริเวณที่เปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอดมีขนาดเล็กมากเพียง  $\mu\text{m}^2 \sim$  หลายสิบ  $\mu\text{m}^2$  จึงทำให้แสงเอาต์พุตถูกหักเหให้แผ่กว้างออก ถ้าให้  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนตัดขวางของชั้นแอททิฟ และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง จะได้มุมของการบานออกของแสง  $\theta_d$  เท่ากับ

$$\theta_d \approx \lambda/D \quad (2.3.5)$$

ดังนั้น ถ้า  $D$  ยิ่งเล็ก มุม  $\theta_d$  ก็ยิ่งกว้างขึ้น นอกจากนี้ถ้าส่วนตัดขวางของชั้นแอททิฟมีรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะทำให้มุม  $\theta_d$  ในทิศทางคั่นสั้นนั้นกว้างออกมาเป็นพิเศษ จึงทำให้ลักษณะของบีมมีรูปเป็นวงรี

### 4. ลักษณะสมบัติของโหมดตามยาว (Longitudinal Mode)

ลักษณะของโหมดตามยาวของเลเซอร์ไดโอดจะขึ้นกับความยาวของออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator length) (= ผลคูณของความยาวของเลเซอร์ไดโอดและดัชนีหักเหแสง) และความยาวคลื่นแสงเลเซอร์

ส่วนในกรณีเลเซอร์ไดโอด โครงสร้างทางนำแสงและสไตรป์จะมีซิงเกิลโหมดตามยาว ถ้ากระแสไฟฟ้ามี่ค่าน้อยๆ สเปกตรัมจะเป็นมัลติโหมด แต่ถ้ากระแสไฟฟ้ามี่ค่ามากๆ จะกลายเป็นซิงเกิลโหมด

เลเซอร์ไดโอดที่เปล่งแสงที่ตามองเห็น

เลเซอร์ไดโอดที่ใช้งานในการสื่อสารด้วยแสงเป็นชนิดย่านอินฟราเรดซึ่งตาคนมองไม่เห็น นิยมใช้ย่าน  $1.3 \mu\text{m} - 1.5 \mu\text{m}$  ทั้งนี้เพราะเส้นใยนำแสงได้ดีที่สุดในย่านนี้ทำให้การสูญเสียสัญญาณน้อยที่สุด แต่ในการใช้งานบางอย่างมีความจำเป็นต้องใช้แสงเลเซอร์ที่ตามองเห็น เช่น การใช้งานในเครื่องเลเซอร์คัต บาร์โค้ด เลเซอร์พริ้นเตอร์ ทั้งนี้เพราะถ้าตามองเห็นแสง จะสะดวกต่อการสังเกตและปรับแต่งลำแสงตามที่ต้องการ และที่สำคัญการที่ความยาวคลื่นแสงสั้นลงนั้น จะทำให้สามารถปรับจุดโฟกัสได้คมและเล็ก ทำให้สามารถอ่านและบันทึกข้อมูลได้มากขึ้น นอกจากนี้วัสดุไวแสงส่วนใหญ่มักจะไวต่อแสงที่ตามองเห็น ดังนั้นปัจจุบันความต้องการเลเซอร์ไดโอดที่เปล่งแสงที่ตามองเห็นจึงเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานกว้างพอที่จะเปล่งแสงมองเห็นได้แก่  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  โดยถ้ามีส่วนผสมของ Al มาก ก็จะทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น โครงสร้างที่ใช้จะเป็นชนิดคัปเบิลเฮเทโร โดยชั้นแคลด์ คือ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  และ ชั้นแอกทิฟคือ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  และ  $x > y$  เช่น ถ้าให้  $y = 0.16$  และ  $x = 0.5$  จะได้แสงเลเซอร์ย่าน 740 ~ 780 nm ตรงกับย่านแสงสีแดง

โดยหลักการแล้ว ถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมของ Al (ค่า  $y$ ) อีก ก็อาจได้แสงสีส้ม มีเขียว แต่ในทางปฏิบัติ ถ้า  $y$  มีค่ามากกว่า 0.2 วัสดุจะเริ่มเปลี่ยนสภาพจากการมีช่องว่างพลังงานชนิดตรงไปเป็นช่องว่างพลังงานชนิดไม่ตรง ทำให้กระแสไฟฟ้าจิดเริ่มเปลี่ยนสูงขึ้นมาก และประสิทธิภาพของการเปล่งแสงเลเซอร์จะลดลงและในที่สุดก็จะไม่เป็นแสงเลเซอร์อีกต่อไป นอกจากนี้ทางด้านชั้นแคลด์นั้น ถ้า  $x$  มีค่ามากกว่า 0.5 ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนระหว่างชั้นแอกทิฟและชั้นแคลด์มากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ก้อนผลึกแตกหักได้ง่าย ดังที่กล่าวมานี้ค่อนข้างยากที่จะผลิตเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่นสั้นๆ ด้วยตระกูล AlGaAs

## 2.4 วงจรกรองความถี่ (filter)

วงจรกรองความถี่ แบ่งเป็นประเภทหลักได้คือ

1. Passive Filter คือ วงจรกรองความถี่ประกอบด้วย passive element มีข้อดีคือ sensitivity ต่ำ

มีข้อเสียคือ ที่ความถี่ต่ำๆ ต้องใช้ bulky inductor

2. Active Filter คือ วงจรกรองความถี่ที่มี active element

มีข้อดีคือ small size, ออกแบบโดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าโหลด, มีค่า Gain

มีข้อเสียคือ ออกแบบให้มีค่า low sensitivity ได้ยาก, ใช้งานได้กับ ความถี่ต่ำๆ

ชนิดของวงจร filter

### 1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

ที่ความถี่ต่ำ สัญญาณจะสามารถผ่านได้เราเรียกส่วนนี้ว่า passband เมื่อความถี่สูงขึ้นจนถึงค่าความถี่คัทออฟ ( $\omega_p$ ) ถ้าความถี่มากกว่าความถี่คัทออฟ สัญญาณจะถูกลดทอนลง โดยที่ LP filter จะมี transfer function คือ

$$Gain = \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} \quad (2.4.1)$$

### 2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านได้ แต่จะลดทอนสัญญาณความถี่ต่ำ โดยมี transfer function คือ

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (2.4.2)$$

### 3. วงจรกรองความถี่กลางผ่าน (Band-pass Filter)

จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ระหว่าง  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ผ่านได้ และจะลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ นอกเหนือจากนี้มี transfer function คือ

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{\omega_p Q_p s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p}s + \omega_p^2} \quad (2.4.3)$$



**2.5 การออกแบบดิจิทัลฟิลเตอร์**

โดยปกติแล้วการออกแบบโดยตัวกรองสัญญาณนั้น กระทำโดยการทำการประมาณค่า ให้ตัวกรองที่ออกแบบมีผลตอบสนองความถี่ได้ใกล้เคียงกับ ผลตอบสนองอุดมคติดังรูป 22 ให้มากที่สุด โดยตามรูป  $W_C$  เป็นค่าความถี่ตัด (cut off frequency) จากผลตอบสนองความถี่อุดมคติ  $H_d(W)$  สามารถกระจายให้อยู่ในพจน์ของโดเมนเวลาโดยการประยุกต์ใช้ การแปลงฟูริเยอร์ได้



รูปที่ 22 ผลตอบสนองแอมพลิจูดอุดมคติ

$$H_d(w) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_d(k) e^{-jk\omega T} \tag{2.5.1}$$

โดยที่ในกรณีนี้ ผลตอบสนองอิมพัลส์  $h_d(k)$  หาได้จาก

$$h_d(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_s/2}^{\omega_s/2} H_d(w) e^{jk\omega T} d\omega \tag{2.5.2}$$

แต่จากสมการ (2.5.2) ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขมีค่าเป็น

$$H(w) = \sum_{k=-M}^M C_k \cdot e^{-jk\omega T} \tag{2.5.3}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.5.1) และ (2.5.3) จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองจะใกล้เคียงผลตอบสนอง อุดมคติก็ต่อเมื่อ  $M = \infty$  แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก เราจึงทำการตัดปลายอนุกรมฟูริเยอร์ ให้เหลือเท่าที่จำเป็น และจัดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $C_k = H_d(k)$  ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $k = -M, \dots, 0, \dots, M$  ส่วนความยาวของตัวกรอง  $N = (2M+1)$   $M = (N-1) / 2$

รูป 23 (a) - (c) ได้แสดงผลตอบสนองแอมพลิจูดเมื่อเปรียบเทียบกรณี  $M = 3, 5$  และ 10 ตามลำดับ จาก ทั้ง 3 ผลตอบสนองแอมพลิจูดสังเกตเห็นว่า ถ้า  $M$  หรือ  $N$  มีค่ามากมีผลทำให้

- 1) ผลตอบสนองแอมพลิจูดใกล้เคียงผลตอบสนองอุดมคติมากขึ้น
- 2) จำนวนลูกคลื่น (ripple) มากขึ้น โดยที่คาบของลูกคลื่นลดลง
- 3) ผลตอบสนองแอมพลิจูดมีความคมมากขึ้น หรือ บริเวณความถี่ที่ผลตอบสนองเปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปเป็นค่า ใกล้เคียงศูนย์ หรือ เรียกแถบเปลี่ยนสถานะ แคบลง



รูปที่ 23 ผลตอบสนองแอมพลิจูดสำหรับตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลข

ปรากฏการณ์ที่บริเวณใกล้จุดเปลี่ยนจากแอมพลิจูดหนึ่งเป็นศูนย์ เกิดมีลูกคลื่นมีชื่อเรียกว่า ปรากฏการณ์ กิบส์ (Gibb's phenomena) ผลนี้เนื่องมาจากการที่ผลตอบสนองอุดมคติถูกแทนด้วย อนุกรมฟูรีเยอร์ จำนวนจำกัด ซึ่งหมายถึงถูกแทนด้วยเซตของฟังก์ชัน ความถี่ของการแกว่ง จำนวนจำกัดด้วย ซึ่งจำนวนนี้ไม่เพียงพอที่ผลรวมจะรวมกันแล้วเป็นเส้นตรงได้ ส่วนการที่ผลตอบสนองไม่เปลี่ยนจากค่าหนึ่งไปศูนย์ทันทีทันใด แต่เกิดมีแถบเปลี่ยนสถานะขึ้น ก็เพราะผลตอบสนองความถี่อุดมคติถูกเขียนแทนด้วยเซตของสัญญาณความถี่ จำนวนจำกัด หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(w) = \sum_{k=-M}^M C_k \{ \cos(kw) - i \sin(kw) \} \quad (2.5.5)$$

ซึ่ง  $H(W)$  ประกอบขึ้นจากสัญญาณไซน์ และ โคไซน์จำนวนจำกัดมารวมกัน ความถี่สูงสุดของสัญญาณจะเป็น  $M W$  ดังนั้นสัญญาณในโดเมนเวลา ช่วงเวลา  $T_t$  ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณจะเปลี่ยนได้เร็วที่สุดจะเป็น

$$T_t = 1 / (M \cdot w)$$

ซึ่งเห็นได้ว่า ถ้า  $M$  มากขึ้น แถบเปลี่ยนสถานะ ก็จะแคบลง

โดยทั่วไปในการออกแบบตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขเรตต้องการ (ก) ลดจำนวนลูกคลื่นให้น้อยที่สุด และ (ข) ให้มีช่วงแถบเปลี่ยนสถานะแคบ ซึ่งทั้งสองข้อนี้ไม่สามารถทำได้พร้อมกันคือถ้าลดจำนวนลูกคลื่น แถบเปลี่ยนสถานะจะกว้างขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งการลดทั้งสองข้อนี้จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป ถ้าการออกแบบตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลขโดยวิธีเขียนอนุกรมฟูรีเยอร์ อาจสรุปเป็นขั้นตอนได้คือ

- 1) กำหนดผลตอบสนองอุดมคติที่ต้องการ โดยกำหนดความถี่ตัด
- 2) ทำการอินทิเกรตผลตอบสนองอุดมคติเพื่อหา ถ้าดับผลตอบสนองอิมพัลส์  $h_d(k)$
- 3) เลือกให้สัมประสิทธิ์  $C_k = h_d(k)$

การออกแบบโดยใช้วินโดว์ (Window method)

ในตอนท้ายของหัวข้อ 5.2 เราแสดงให้เห็นว่าการถ่วงน้ำหนักอนุกรมฟูรีเยอร์ให้เหมาะสมสามารถทำให้ลูกคลื่นที่เกิดบนผลตอบสนองความถี่ลดน้อยลงไปได้ โดยทั่วไปการถ่วงน้ำหนักอาจทำได้หลายวิธี ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อนี้ และเพื่อความสะดวกในการอธิบายขอแนะนำขั้นตอนในการออกแบบมากว่าถึงอีกครั้งหนึ่งจากเดิมที่เราตัดปลายอนุกรมฟูรีเยอร์ เพื่อให้ได้ความยาวตามต้องการนั้น เปรียบเสมือนกับที่เราทำการเจาะช่องคล้ายเป็น วินโดว์ หรือ หน้าต่าง ที่มีรูปร่างต่างๆกัน และเมื่ออนุกรมฟูรีเยอร์จำนวนอนันต์พจน์ผ่านหน้าต่างนี้ออกไป อนุกรมนี้จะถูกถ่วงน้ำหนัก หรือ ถูกตัดปลายตามต้องการ

ขอเริ่มจาก ถ้าให้  $H_d(w)$  แทนผลตอบสนองความถี่อุดมคติ และผลตอบสนองนี้ สามารถเขียนแทนด้วยอนุกรมฟูรีเยอร์ยาวอนันต์พจน์ ได้คือ

$$H_d(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d(n) e^{-jn\omega T} \quad (2.5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $h_d(n)$  หาได้จาก

$$h_d(n) = (1/2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} H_d(w) e^{jn\omega T} d\omega \quad (2.5.7)$$

หรือ

$$h_d(n) = (1/w_s) \int_{-w_s/2}^{w_s/2} H_d(w) e^{jn\omega T} d\omega \quad (2.5.8)$$

โดยที่  $W_s$  เป็นค่าความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง ตามที่ทราบกันแล้วว่าการนำสมการ (2.5.7) และ (2.5.8) ไปใช้ในการออกแบบตัวกรองไม่ป้อนกลับเชิงเลข ที่ผ่านมาก่อปัญหา 2 ประการคือ ประการแรก คือต้องการตัดปลายอนุกรมในสมการ (5.5.1) ให้เป็นอนุกรมจำนวนพจน์จำกัด หรือ

$$H_d(w) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} H_d(w) e^{-jnwT} \quad (2.5.9)$$

ซึ่งผลลัพธ์ก็คือ ทำให้เกิดลูกคลื่นบนผลตอบสนองแอมพลิจูด ประการที่สองก็คือ เมื่อตัดปลายอนุกรมแล้ว อนุกรม (5.5.3) จะยังนำไปสร้างใช้งานไม่ได้ เพราะผลตอบสนองอิมพัลส์เริ่มจากลำดับที่  $n = -(N-1)/2$  ซึ่งสำหรับระบบเวลาจริงไม่สามารถสร้างลำดับที่เวลาเป็นลบได้ ข้อนี้แก้ไขได้ โดยการเลื่อนหรือหมุนงผลตอบสนองอิมพัลส์ออกไปโดยให้เริ่มจากค่า  $n = 0$  หรือ

$$H(w) = \sum_0^{N-1} h(n) e^{-jnwT} \quad (2.5.10)$$

ซึ่งการทำแบบนี้มีผลดีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2 คือ ทำให้ตัวกรองมีผลตอบสนองเฟสเป็นเชิงเส้น

สังเกตจากสมการข้างบน จะเห็นได้ว่ากรณีที่เรากัดปลายอนุกรมฟูรีเยอร์ก็คือ การที่เราทำการเลือกให้

$$\begin{aligned} h(n) &= h_d(n) && \text{เมื่อ } 0 \leq n \leq N-1 \\ &= 0 && \text{เมื่อ } n \text{ เป็นค่าอื่น} \end{aligned} \quad (2.5.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการนี้ ถ้าหากเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปก็คือ การนำเอาลำดับ  $h_d(n)$  มาคูณค่ากับลำดับจำกัด  $w(n)$  หรือ

$$h(n) = h_d(n) \cdot w(n) \quad (2.5.12)$$

โดยที่ แทนลำดับของวินโดว์แบบต่างๆ สำหรับในกรณีนี้ นั้นวินโดว์เป็น วินโดว์สี่เหลี่ยม (rectangular window) ที่ลำดับ  $w(n)$  มีคุณสมบัตินิยามเป็น

$$w_R(n) = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{เมื่อ } n \text{ เป็นค่าอื่น} \end{cases} \quad (2.5.13)$$

ซึ่งในเบื้องต้นนี้ เราลองมาทำความเข้าใจถึงคุณสมบัติผลตอบสนองความถี่ของวินโดว์สี่เหลี่ยม ว่าเป็นอย่างไร และเมื่อประยุกต์ใช้วินโดว์นี้จะทำให้เกิดผลอะไรบ้าง

**คุณสมบัติของวินโดว์สี่เหลี่ยม (rectangular window)**

สำหรับวินโดว์สี่เหลี่ยมของนิยามเป็นนัยทั่วไปได้โดย

$$w_R(n) = \begin{cases} 1 & \text{สำหรับ } |n| \leq (N-1)/2 \\ 0 & \text{เมื่อ } n \text{ เป็นค่าอื่น} \end{cases} \quad (2.5.14)$$

ผลตอบสนองความถี่ของวินโดว์แบบนี้ ทำได้โดยการประยุกต์ใช้ ผลการแปลงซาด เข้ากับลำดับ (5.5.8) แล้ว แทนค่าให้  $Z = e^{-j\omega T}$  เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$W_R(\omega) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} e^{-j\omega n T} \quad (2.5.15)$$

$$= \sin(\omega N T / 2) / \sin(\omega T / 2)$$

**คุณสมบัติผลตอบสนองแอมพลิจูดของวินโดว์สี่เหลี่ยม**

- (1) ความกว้างของโหลบลึก (main lobe) มีค่า  $4\pi/N$  และ มีค่าขนาดเป็น  $N$
- (2) เมื่อ  $N$  มีค่ามากขึ้น ความกว้างของโหลบลึกลดลง แต่ค่าขนาด  $N$  มากขึ้น
- (3) โหลบข้าง (side lobe) มีการแกว่งโดยผ่านจุดศูนย์กลางทุกค่าความถี่  $2\pi/N$  และ มีค่าขนาดลดลงไปเรื่อย และ  $W_R(\omega) = 0$  ณ ค่าความถี่  $\omega = m\omega_a/N$  เมื่อ  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$  ผลนี้เห็นได้ว่า ถ้า  $N$  มีค่ามาก โหลบข้างจะเข้ามารวมกันใกล้ความถี่  $\omega = 0$  มากขึ้น
- (4) ถ้านิยามให้พจน์ อัตราการคลื่น (ripple ratio หรือ RR) เป็น [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RR = \text{ค่าขนาดสูงสุดของโหลบข้าง} \div \text{ค่าขนาดสูงสุดของโหลบหลัก} \times 100 \quad (2.5.16)$$

การที่เราเอาลำดับผลตอบสนองอิมพัลส์ มาคูณค่ากับลำดับของวินโดว์ ตามสมการ (5.5.6) ซึ่งปฏิบัติการณ์ในโดเมนเวลา เมื่อเราพิจารณาในโดเมนความถี่ก็เท่ากับเป็นการนำเอา ผลตอบสนองความถี่ออกมาทำการคูณการประสานกับ ผลตอบสนองความถี่ของวินโดว์ หรือ

$$H(w) = (1/2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} H_d(\exp(j\theta)) W_R(\exp(j(w-\theta))) d\theta \quad (2.5.17)$$

ผลการประสานนี้อธิบายได้โดยใช้แผนภาพรูป 5.5.2 ซึ่งเห็นได้ชัดว่า

- (1) ค่าความชันของโหลบหลักของสเปกตรัมของวินโดว์ ทำให้เกิดแถบเปลี่ยนสถานะของ ผลตอบสนองความถี่ เพราะฉะนั้นถ้า  $N$  มาก ก็จะทำให้แถบเปลี่ยนสถานะแคบลง
- (2) ลูกคลื่นบนผลตอบสนองความถี่ เป็นผลมาจากโหลบข้าง ของสเปกตรัมของวินโดว์ ดังนั้นถ้าเลือก  $N$  ค่ามาก โหลบข้างเลื่อนเข้าใกล้ความถี่  $W=0$  มากขึ้น เป็นผลทำให้เกิดลูกคลื่นบนยอดของผลตอบสนองความถี่มากขึ้น

ด้วยผลทั้งสองประการนี้เราจึงต้องหาวินโดว์ หรือคัดแปลงวินโดว์ดีเลิศขึ้นเพื่อให้คุณสมบัติ คือ

- (1) ให้โหลบหลักของผลตอบสนองความถี่แคบ แต่ภายในโหลบหลักสามารถครอบคลุมพลังงานของสัญญาณทั้งหมดไว้ให้ได้มากที่สุด
- (2) ให้ผลตอบสนองความถี่ของวินโดว์มีค่าขนาดของโหลบข้างน้อย และมีค่าขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความถี่สูงขึ้น

สำหรับลำดับแบล็กแมนวินโดว์ (Blackman window) สามารถเขียนได้คือ

$$W_B(n) = 0.42 + 0.5 \cos(2n\pi/[N-1]) + 0.08 \cos(4n\pi/[N-1]) \quad \text{เมื่อ } |n| \leq (n-1)/2$$

$$= 0 \quad \text{กรณีอื่น} \quad (2.5.18)$$

สเปกตรัมความถี่ไม่ได้แสดงการหาค่าไว้ แต่วินโดว์แบบนี้ให้คุณสมบัติดีกว่า แบบฮานและแบบแฮมมิง คือสามารถถ่ายพลังงานเข้าไปในโหลบหลักได้มากกว่า ดังได้แสดงคุณสมบัติเพื่อเป็นการเปรียบเทียบไว้ในตาราง 5.5.3 ตารางยังแสดงให้เห็นคุณสมบัติอีกประการของวินโดว์คือ ในวินโดว์ทุกแบบนั้นถึงแม้  $N$  มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราลูกคลื่น มีค่าประมาณคงที่ คือไม่แปรตามค่าของ  $N$

## ตาราง สรุปคุณสมบัติของวินโดว์

ชนิดของ วินโดว์	Main-lobe width	Ripple ratio% N=31	Peak-amp. Of side-lobe (dB)	Main- stopband att <sup>n</sup> (dB)
สี่เหลี่ยม	$2 W_a / N$	21.80	-13	-21
ฮาน	$4 W_a / N$	2.67	-31	-44
แฮมมิง	$4 W_a / N$	0.82	-41	-53
แบล็กแมน	$6 W_a / N$	0.12	-57	-74

วินโดว์	Ripple ratio		
	N = 11	N = 21	N = 31
สี่เหลี่ยม	22.34	21.89	21.80
ฮาน	2.62	2.67	2.67
แฮมมิง	1.47	0.93	0.82
แบล็กแมน	0.08	0.12	0.12

โดยที่  $W_a$  คือความถี่ในการสุ่ม ( $=2\pi$ )

### บทที่ 3

#### การออกแบบวงจร

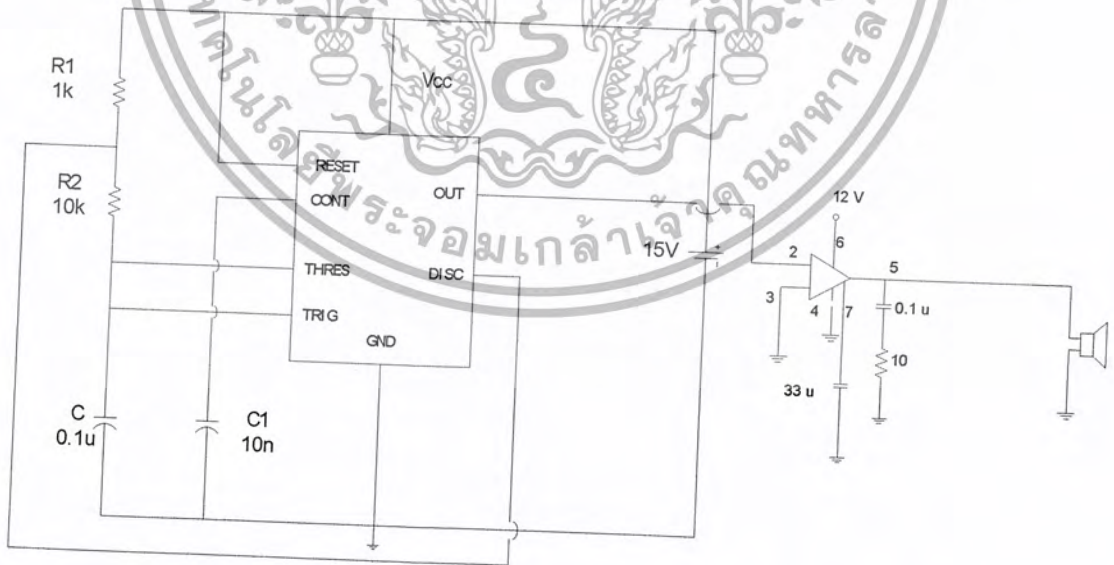
##### 3.1 ขั้นตอนการออกแบบ

เครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือนจะมีหลักการทำงาน โดยจะทำการยิงเลเซอร์ไปกระทบกับตัวกลางที่กำลังสั่นอยู่ โดยเกิดจากแหล่งกำเนิดเสียง ในที่นี้จะใช้วงจรกำเนิดความถี่ เมื่อแสงเลเซอร์สะท้อนกลับมา ที่ตัว ดีเทกเตอร์ จะมีวงจรดีเทกเตอร์ รับค่าความเข้มแสง และความถี่ที่เปลี่ยนไป เนื่องจากเกิดจากการสั่นของตัวกลางที่เปลี่ยนไปตามความถี่และ ขนาดของ source โดยจะมี การทำงานคร่าวๆดังนี้

- ทำการยิงเลเซอร์ออกไปกระทบตัวกลางที่สั่นอยู่เนื่องจากคั่นกำเนิดเสียง
- ใช้ วงจร photodiode มารับค่าความเข้ม และความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป
- นำสัญญาณที่ได้ไปผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป
- นำสัญญาณที่ได้ผ่าน วงจรขยายและวงจรขับลำโพง ออกสู่ลำโพง

##### 3.2 วงจร 555 Astable

เป็นวงจรกำเนิดความถี่โดยเลือกใช้วงจรตั้งรูปที่ 21



รูปที่ 24 วงจรกำเนิดความถี่ 555 Astable โดยต่อกับวงจรขับลำโพง

โดยมีค่าในการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C}$$

โดยเลือกให้ เพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ

$$R_1 = 1k \quad R_2 = 10k \quad C = 0.1\mu$$

จะได้วงจรกำเนิดความถี่ที่ 685.7 Hz

### 3.3 วงจร photodetector

จะใช้ วงจร amplifier transimpedance โดยจะมีวงจร typical ดังรูปที่ 22 ซึ่งก็คือ วงจร basic current-to-voltage



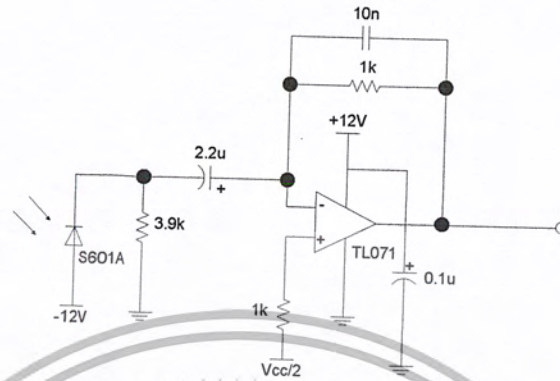
รูปที่ 25 วงจรพื้นฐานดีเทกเตอร์ แบบ amplifier transimpedance

โดยจะมีค่า  $e_o$  คือ

$$e_o = i_p R_f + [(I_B -)R_f - (I_B +)R_C] + I_L R_f$$

ในการที่จะลด offset ของวงจร จะต้องทำให้  $I_B-$  มีค่าเท่ากับ  $I_{B+}$  เพื่อลด error ระหว่างกระแสอินพุทของ ออปแอมป์ จึงต้องกำหนดให้ ค่า  $R_f = R_c$  และเนื่องจาก ค่า เอาท์พุทส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจาก  $i_p R_f$  ถ้าต้องการกำลังขยายมากๆ จำเป็นที่จะต้องให้ค่าของ  $R_f$  มีค่ามากด้วย แต่ถ้ามากเกินไปแต่ถ้ามากเกินไป อาจจะทำให้ออปแอมป์เกิดการ sat. ได้ รวมทั้งจะเกิด noise มากด้วย เนื่องจากค่า  $R$  ที่มาก

3.4 วงจร Detector ที่ใช้



รูปที่ 26 วงจร transimpedance

จากรูปวงจรด้านบน จะมี Transfer Function เป็น

$$\frac{V_{out}}{I_{in}} = R_f \times \frac{S}{S + \frac{1}{C_i R_i}} \times \frac{1}{S + \frac{1}{C_f R_f}}$$

จะเห็นว่าค่า  $R_f$  คือ Gain ของ วงจร

และถ้าเราประมาณว่า ความถี่สูงคัทออฟ ( $F_{ch}$ )  $\gg$  ความถี่ต่ำคัทออฟ ( $F_{cl}$ )

จาก Transfer Function มองได้ว่ามีวงจร High Pass เกิดกับวงจร Low Pass

$\frac{S}{S + \frac{1}{C_i R_i}}$  คือ โพลของ High Pass

$\frac{1}{S + \frac{1}{C_f R_f}}$  คือ โพลของ Low Pass

- การออกแบบเราจะให้
- $R_f = 1k \Omega$
  - $C_f = 10n F$
  - $R_i = 3.9k \Omega$
  - $C_i = 2.2u F$

เราจะได้

$$\text{Gain} = 1 \frac{V}{mA}$$

$$F_{ch} = \frac{1}{2\pi \times 1k \times 10n} = 15.92 \text{ kHz}$$

$$F_{cl} = \frac{1}{2\pi \times 3.9k \times 2.2\mu} = 18.55 \text{ Hz}$$

ซึ่งจะอยู่ในย่านความถี่เสียง

### 3.5 วงจร Low Pass filter

ใช้ในการกรองความถี่สูงออกไปจากสัญญาณที่เข้ามาจะได้วงจรดังรูปที่ 25



รูปที่ 27 วงจร Low Pass filter

ถ้าเราทำการหา transfer function จะได้  $T(s)$  คือ

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{k}{s^2 + s \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-k}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

โดยในการหาค่า ;

$$k = 3 - \frac{1}{Q_p}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} = 2\pi \times F_{cl}$$

การออกแบบถ้ากำหนด  $C_1 = C_2 = 10nF$  และ  $R_1 = R_2$  และ  $Q_p = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$\omega_p = \frac{1}{RC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

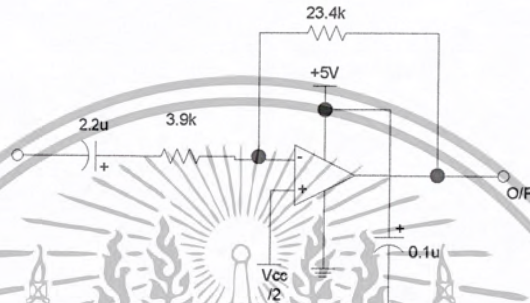
ถ้าต้องการ  $F_{cl} = 5 \text{ kHz}$  ดังนั้น  $\omega_p = 2\pi \times 5k = 31.42 \text{ k rad/s}$

จะสามารถคำนวณค่า  $R_1 = R_2 = 3.18k\Omega$

และ  $R_A = 1k\Omega$  ;  $R_B = 1.59k\Omega$

และ  $\text{Gain} = k = 1.59$

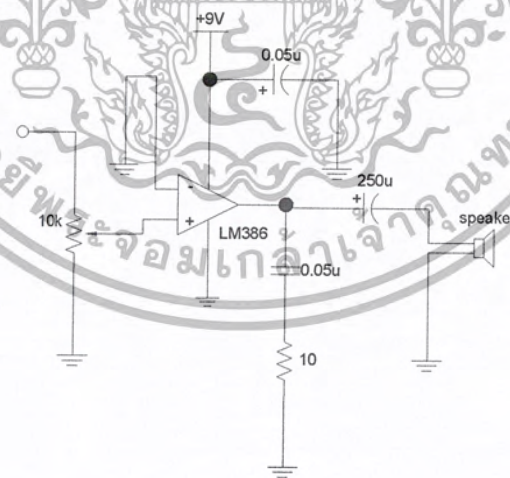
### 3.6 วงจรปรับระดับแรงดัน



รูปที่ 28 วงจรปรับระดับแรงดัน

เพื่อทำการปรับระดับแรงดันให้เป็น 0-5V เพื่อป้อนสัญญาณเข้าสู่ ADC

### 3.7 วงจรขับลำโพง

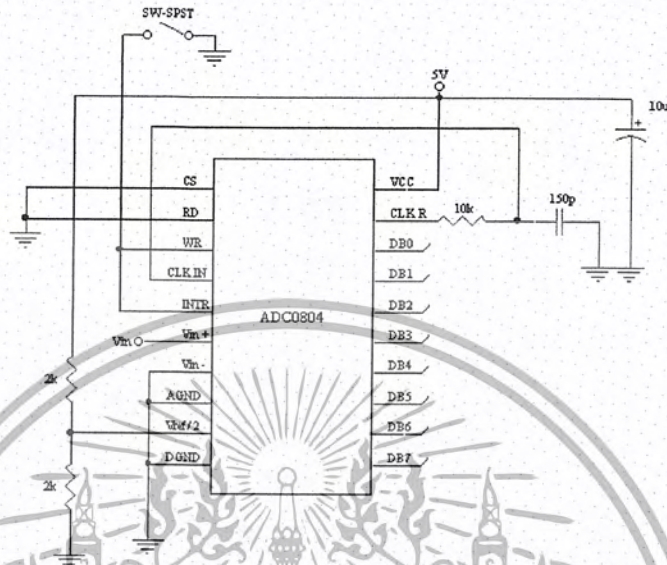


รูปที่ 29 วงจรขับลำโพงที่ใช้งาน

ต่อเพื่อขับเสียงที่ออกจากลำโพงให้ชัดเจนขึ้น โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 30 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

จะใช้ IC เบอร์ ADC0804 ซึ่งสามารถแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต และสามารถปรับความละเอียดได้โดยการปรับค่าของ  $V_{ref}/2$

1. แรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) เนื่องจาก ADC0804 มี ดิจิตอลเอาต์พุต 8 บิต ซึ่งจะมีสถานะทั้งหมด 256 ค่า ดังนั้น

$$\frac{V_{ref}}{256} = \Delta V$$

จากวงจร  $\frac{V_{ref}}{2}$  ประมาณ 2.5V

ดังนั้น ถ้า  $V_{ref} = 5V$  เราจะได้ความละเอียด ( $\Delta V$ ) = 19.5 mV

2. สัญญาณนาฬิกา (Clock) เนื่องจาก ADC0804 ได้ออกแบบมาเพื่อต่อเป็น RC Oscillator เอาไว้แล้ว โดยเลือกใช้ค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุจาก

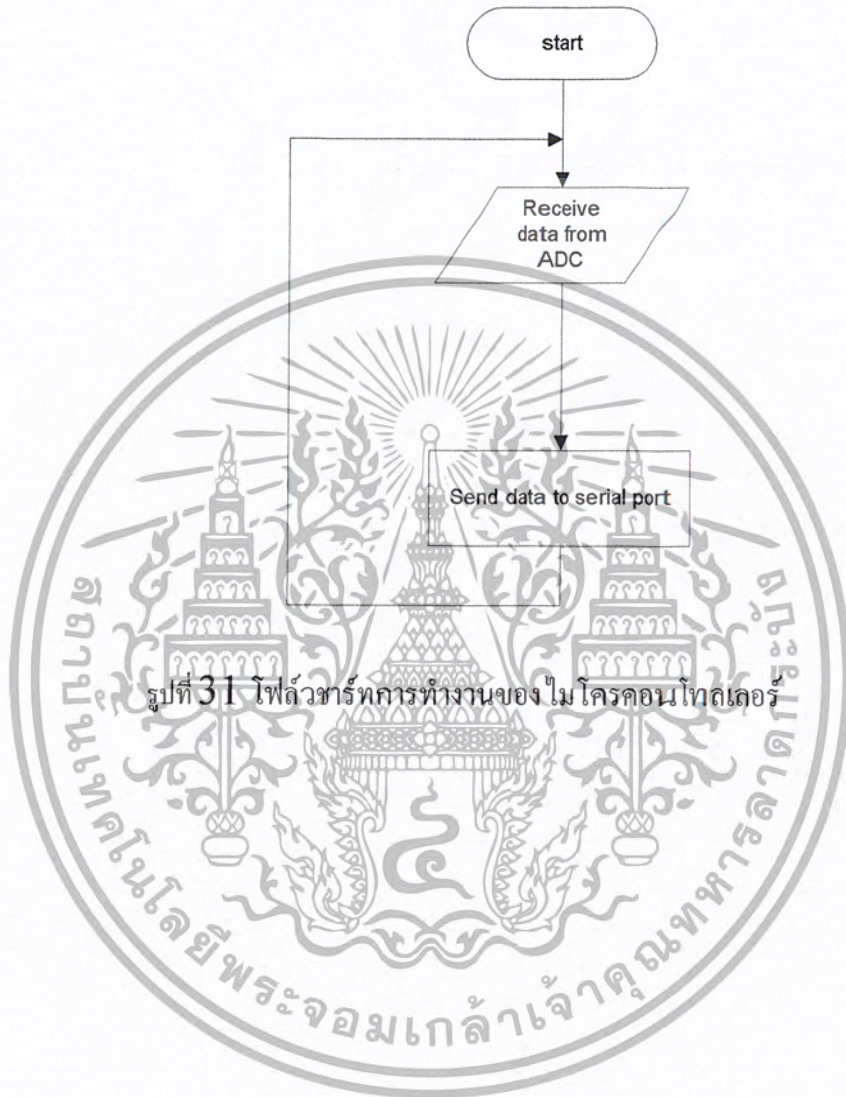
$$F_{clk} = \frac{1}{1.1RC}$$

จากวงจร  $R = 10 \text{ k}\Omega$  ,  $C = 150 \text{ pF}$  จะสามารถคำนวณ

$F_{clk}$  ประมาณ 600 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 ไฟล์ชาร์ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ (AT89C2051)



รูปที่ 31 ไฟล์ชาร์ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

## 3.10 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 32 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

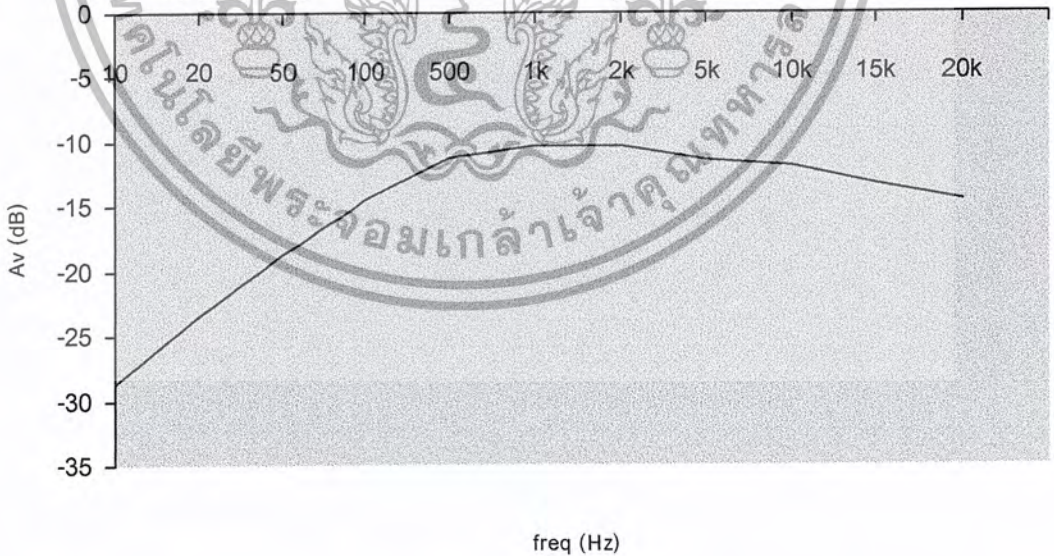
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 วงจร Detector

จากวงจร Detector ป้อน  $V_{in}$  เป็นสัญญาณพัลส์ จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ขนาด 3.28 Vp-p โดยป้อนให้กับ LED สีแดง วัดสัญญาณที่ Output เทียบกับค่าความถี่ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดง Output เทียบกับค่าความถี่ต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

ความถี่ (Hz)	10	20	50	100	500	1k	2k	5k	10k	15k	20k
Output (mVp-p)	120	220	380	640	900	1000	1000	880	840	720	640
$A_v$ (dB) = $20\text{Log}(V_{out}/V_{in})$	-28.7	-23.5	-18.7	-14.5	-11.2	-10.3	-10.3	-11.4	-11.8	-13.2	-14.5



กราฟที่ 4.1 แสดงอัตราขยายแรงดัน  $A_v$  (dB) กับ ความถี่ Frequency (Hz) ของวงจร Detector

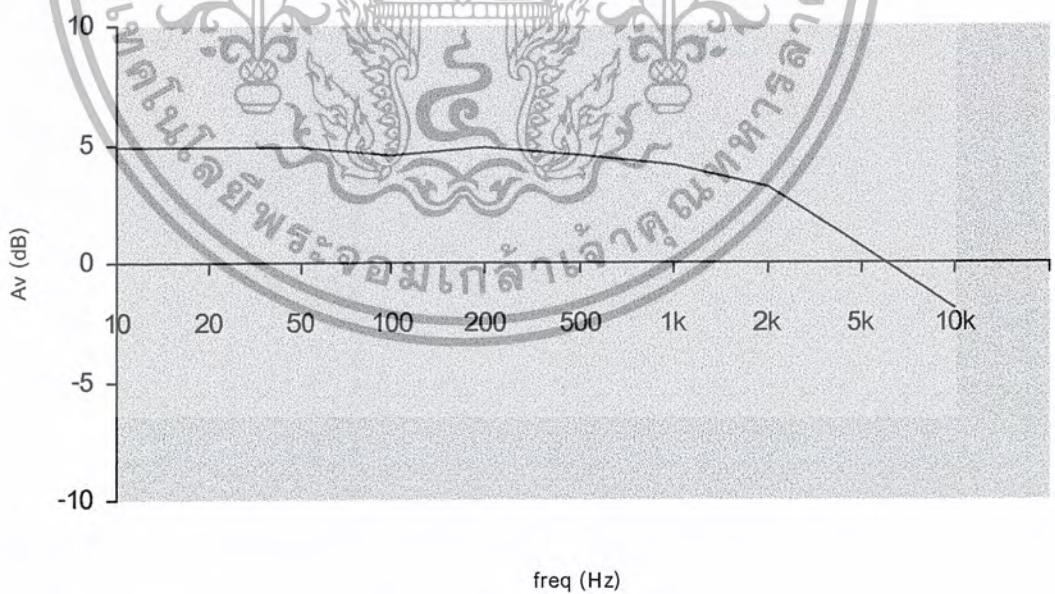
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากวงจร Low Pass Filter ป้อน  $V_{in}$  เป็นสัญญาณรูปไซน์ จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ขนาด 500m Vp-p โดยป้อนที่ความถี่ค่าต่างๆ เพื่อดูคุณสมบัติของวงจร วัดสัญญาณที่ Output เทียบกับค่าความถี่ต่างๆ

ตารางที่ 4.2 แสดง Output เทียบกับค่าความถี่ต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ความถี่ (Hz)	10	20	50	100	200	500	1k	2k	5k	10k
Output (mVp-p)	880	880	880	840	880	840	800	720	540	400
$A_v$ (dB) = $20\text{Log}(V_{out}/V_{in})$	4.91	4.91	4.91	4.51	4.91	4.51	4.1	3.2	0.67	-1.9

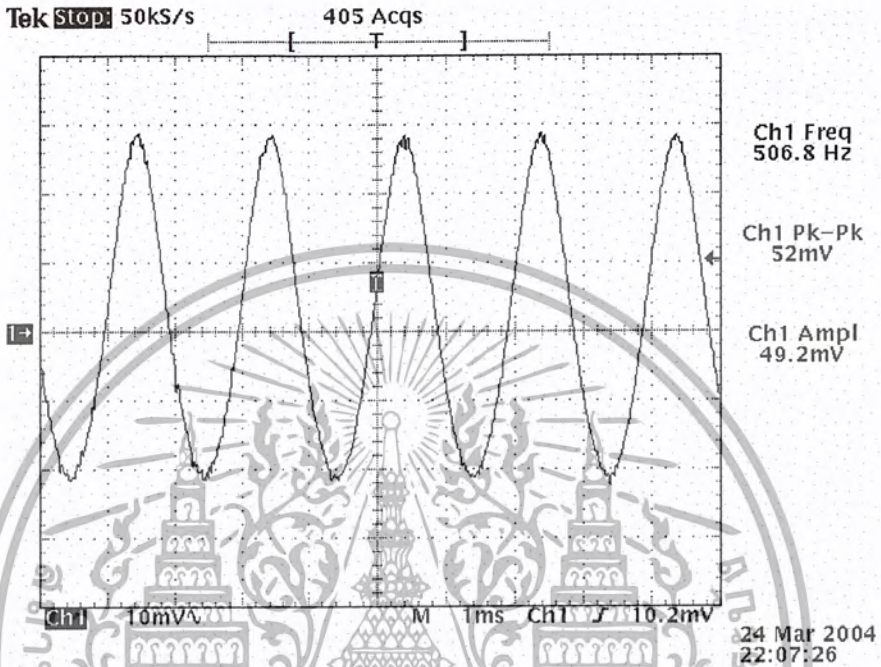


กราฟที่ 4.2 แสดงอัตราขยายแรงดัน  $A_v$  (dB) กับ ความถี่ Frequency (Hz) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

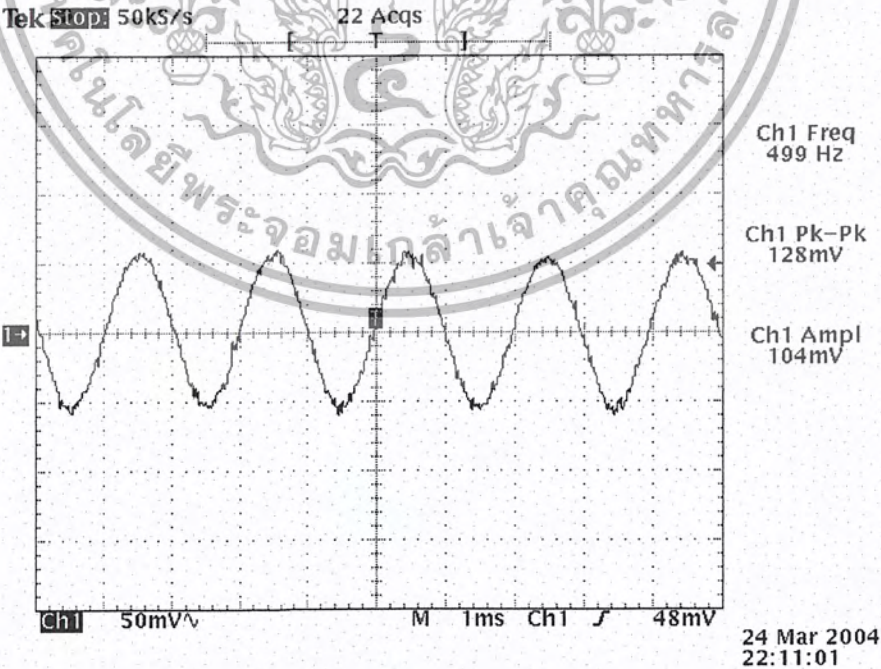
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟผลการทดลอง

4.3 ป้อนสัญญาณ sine ผ่านวงจรขับ LED เพื่อดูรูปสัญญาณของแต่ละภาค

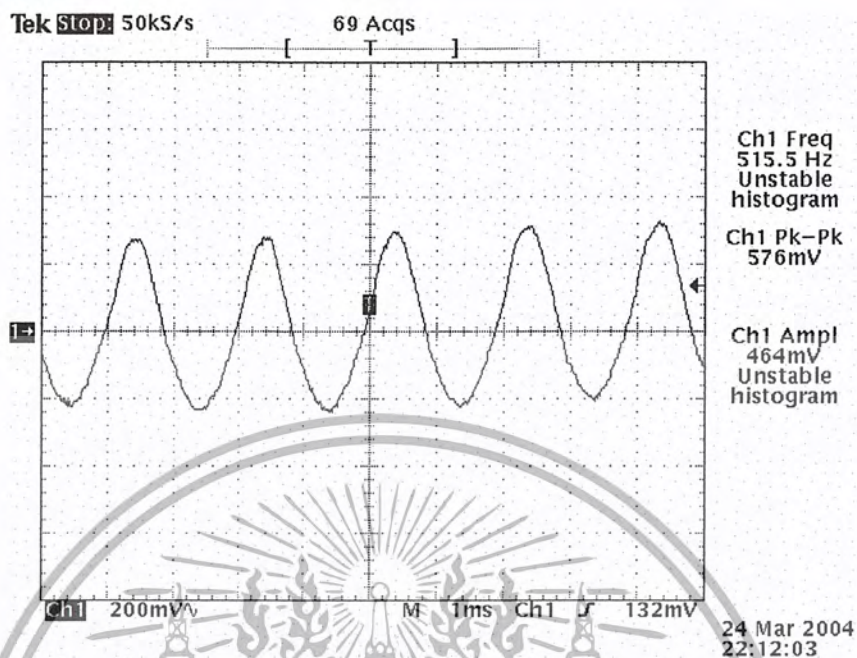


กราฟที่ 4.3.1 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง LED

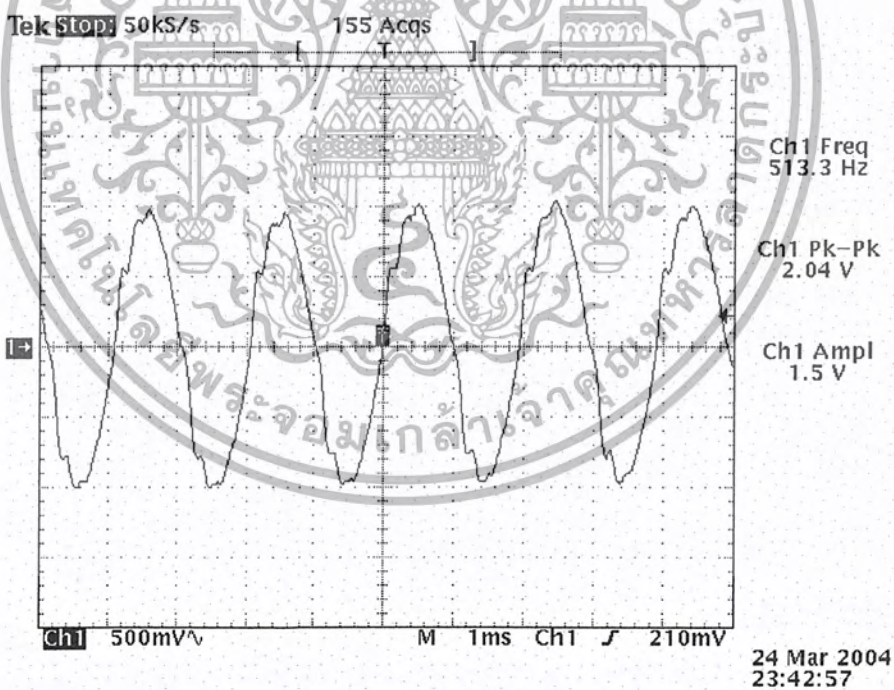


กราฟ 4.3.2 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

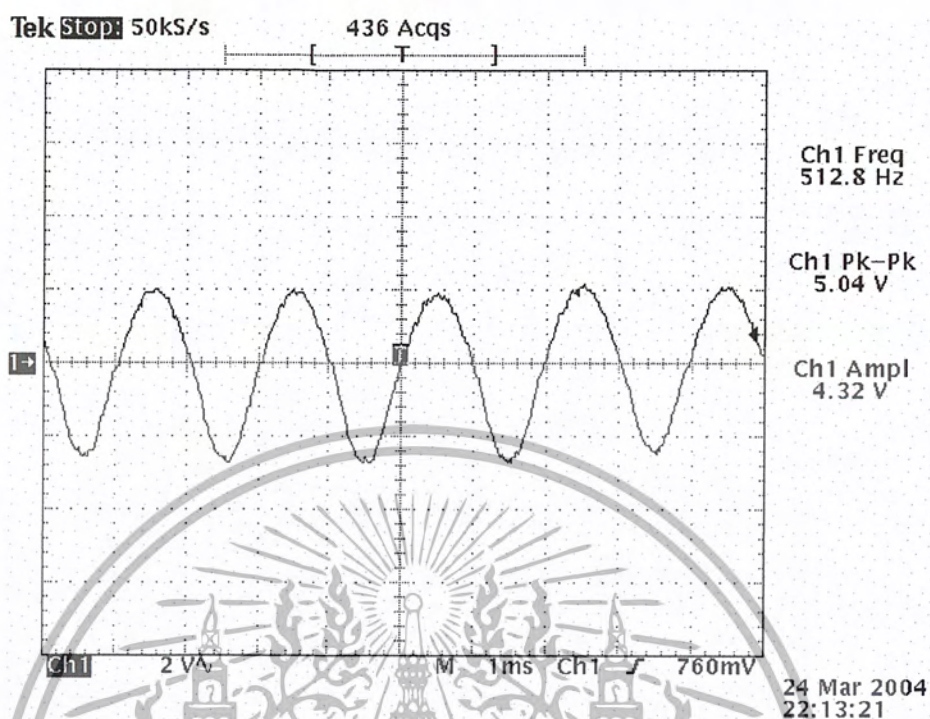


กราฟ 4.3.3 แสดงรูปสัญญาณเมื่อผ่านวงจร filter



กราฟ 4.3.4 แสดงรูปสัญญาณที่ อนุาลอกเอาท์พุท

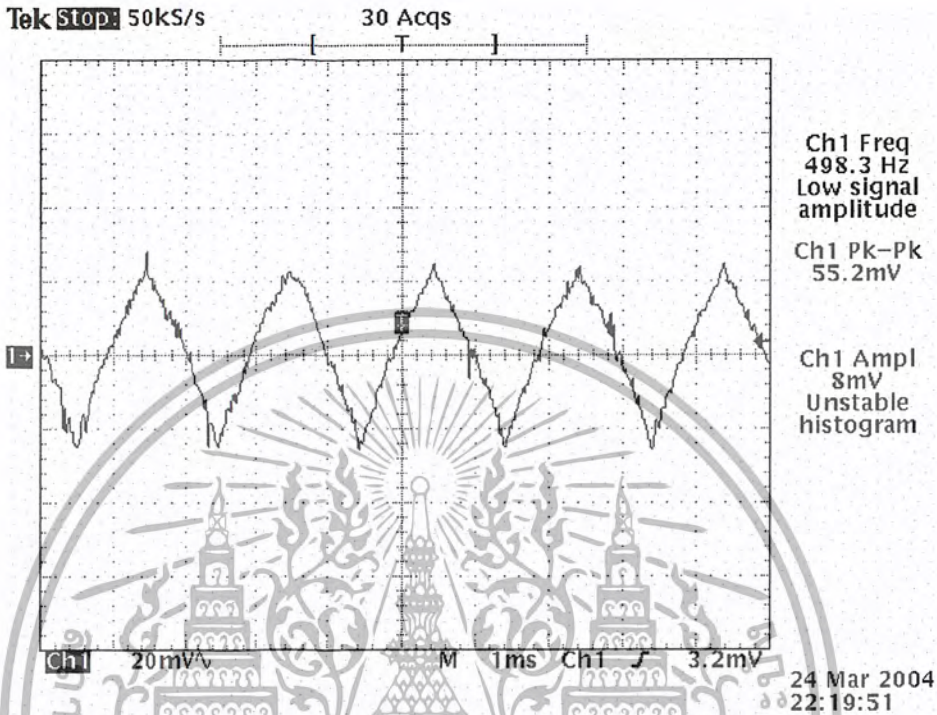
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



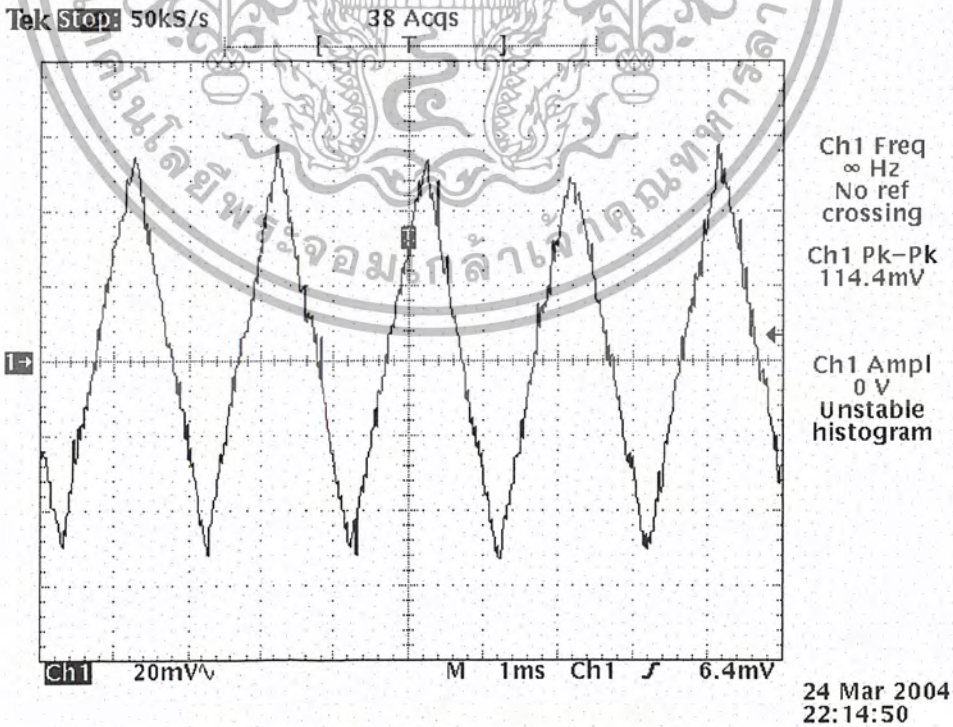
กราฟ 4.3.5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ลำโพง



### 4.4 ป้อนสัญญาณ triangle ผ่านวงจรจับ LED เพื่อดูรูปสัญญาณของแต่ละภาค

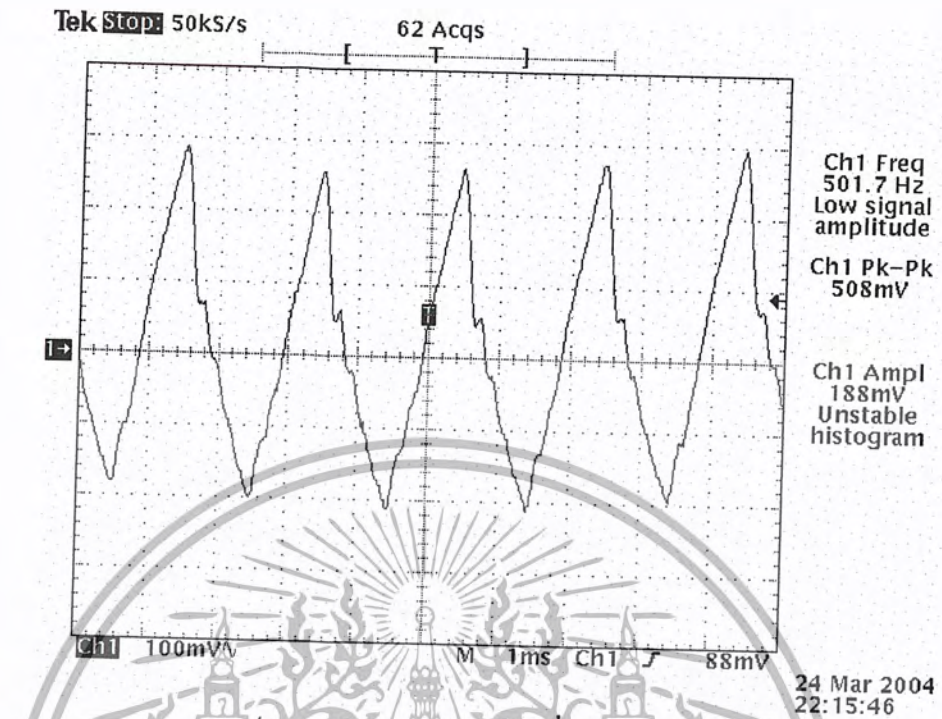


กราฟ 4.4.1 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง LED

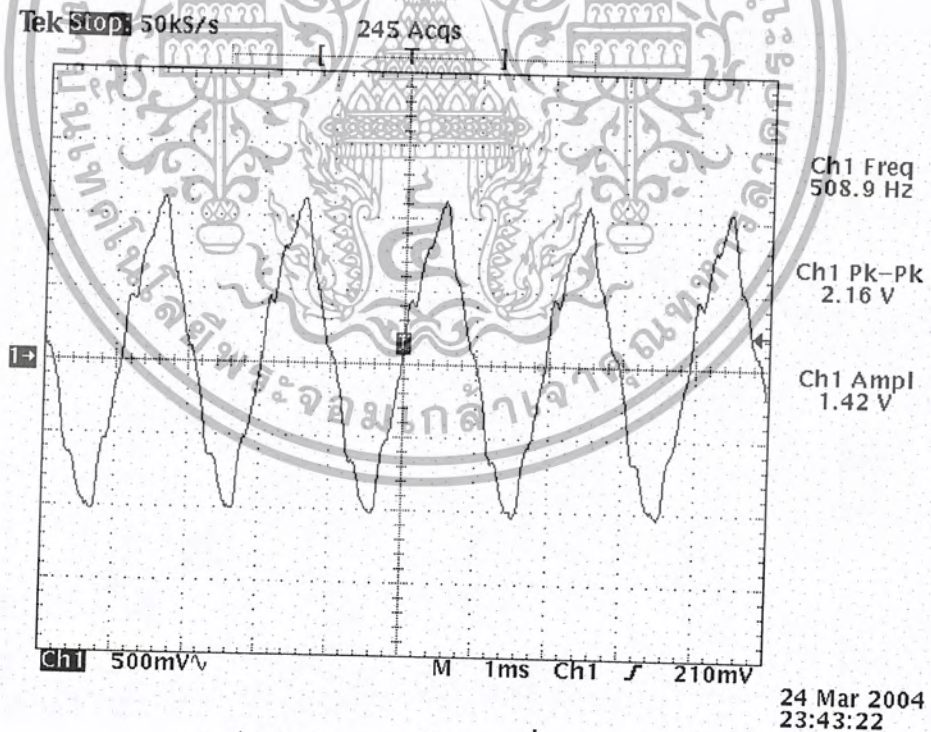


กราฟ 4.4.2 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

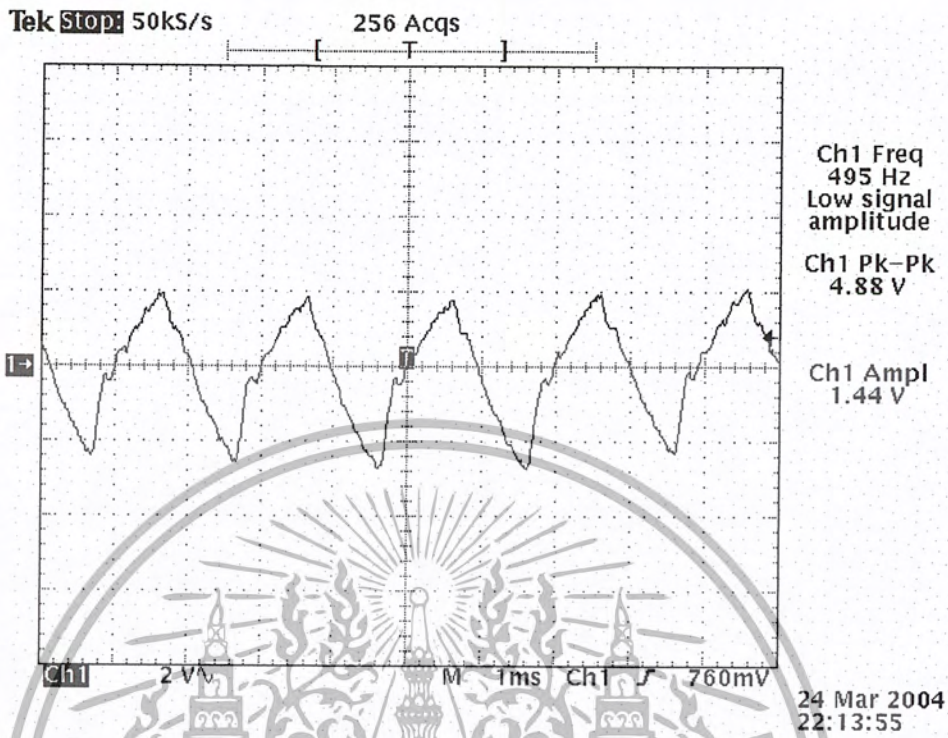


กราฟ 4.4.3 แสดงรูปสัญญาณเมื่อผ่านวงจร filter



กราฟ 4.4.4 แสดงรูปสัญญาณที่ อนุาลอกเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

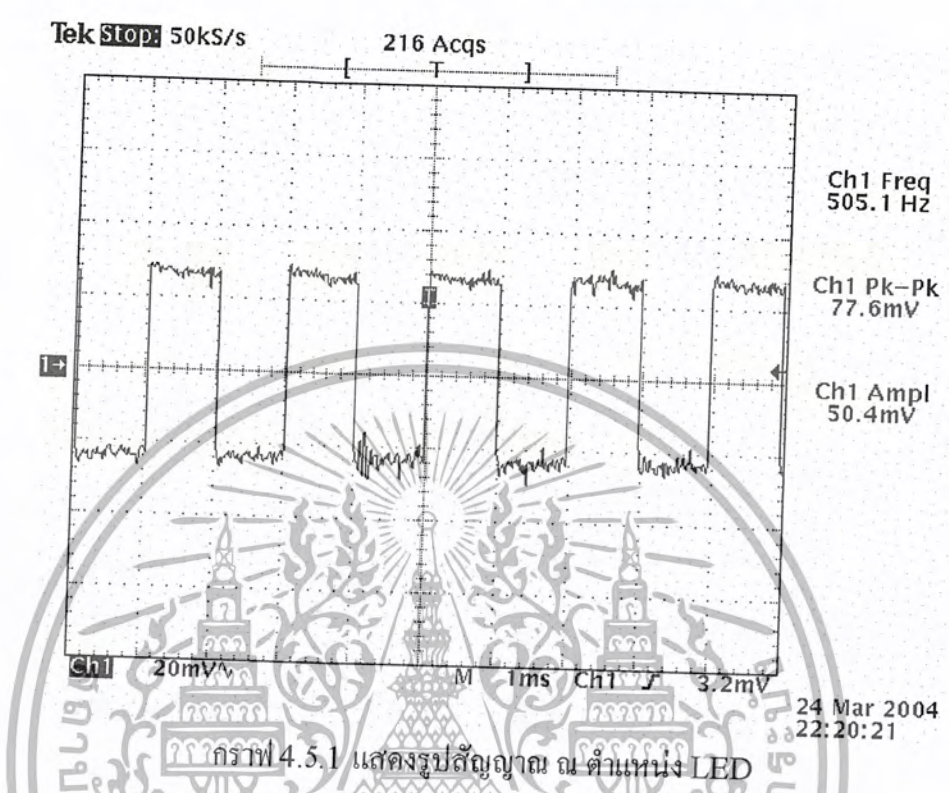


กราฟ 4.4.5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ลำโพง

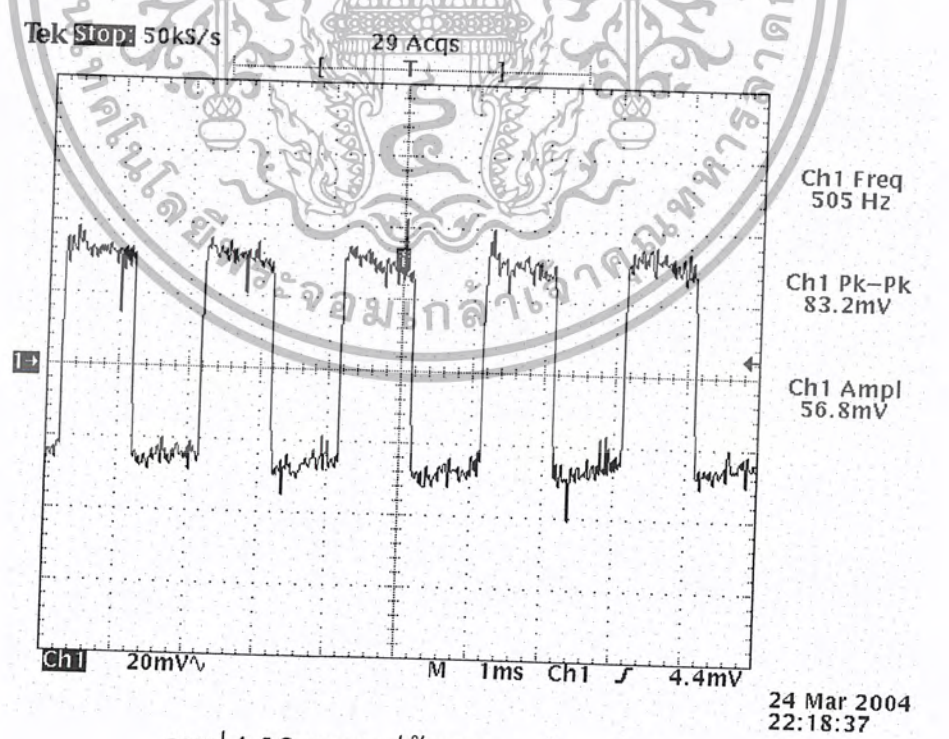


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5 ป้อนสัญญาณ square ผ่านวงจรขับ LED เพื่อดูรูปสัญญาณของแต่ละภาค

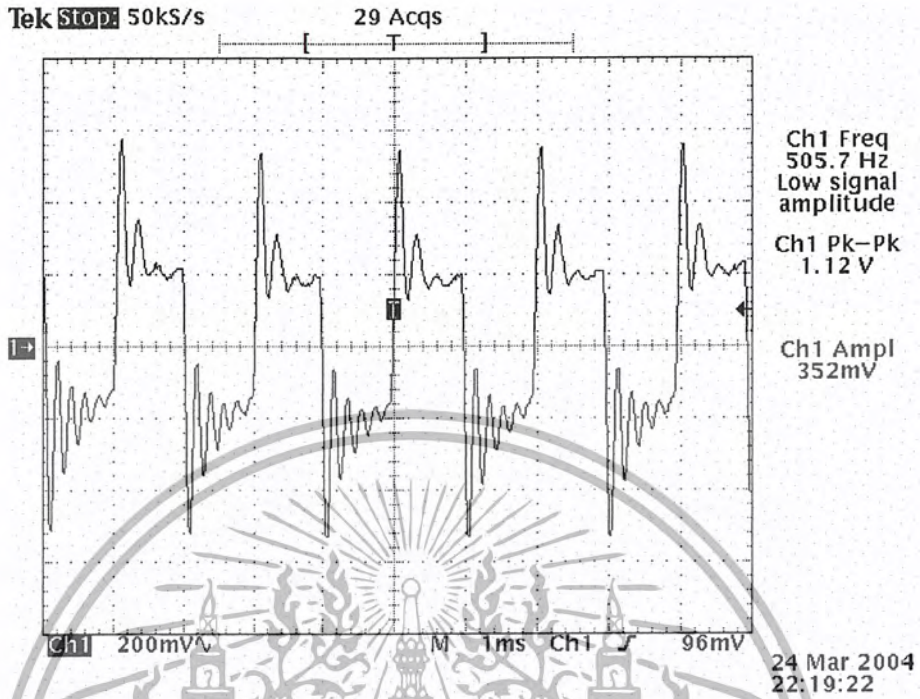


กราฟ 4.5.1 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง LED

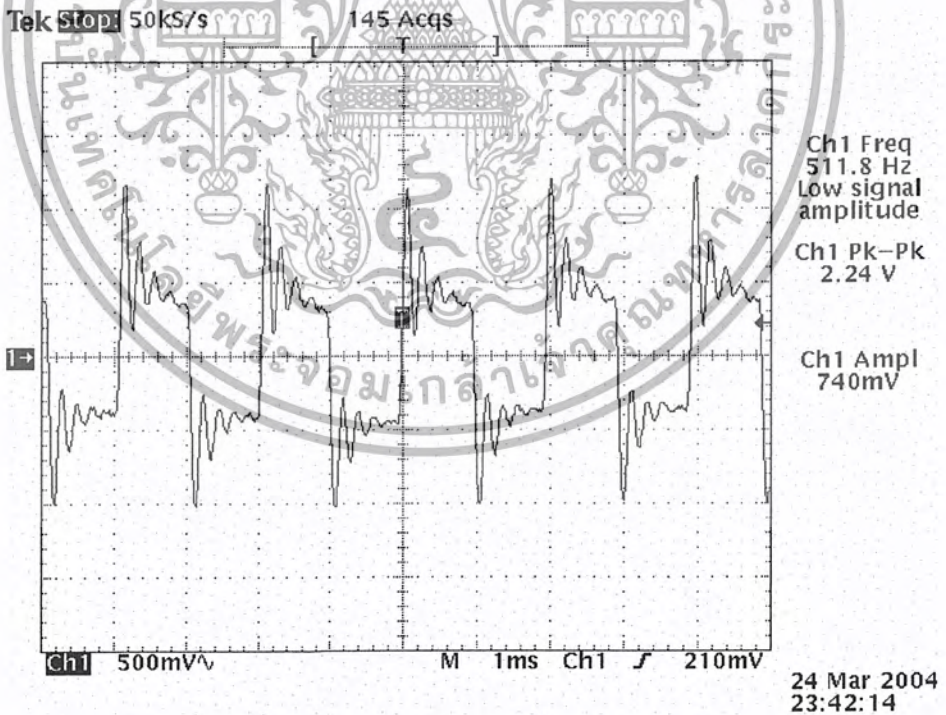


กราฟ 4.5.2 แสดงรูปสัญญาณ ณ ตำแหน่ง detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

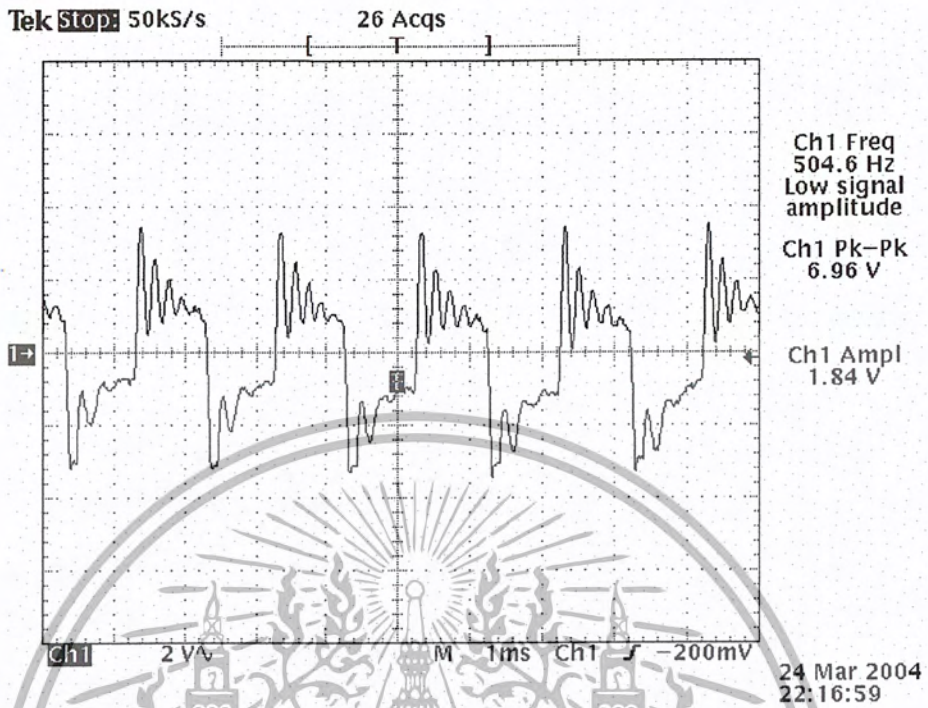


กราฟ 4.5.3 แสดงรูปสัญญาณเมื่อผ่านวงจร filter

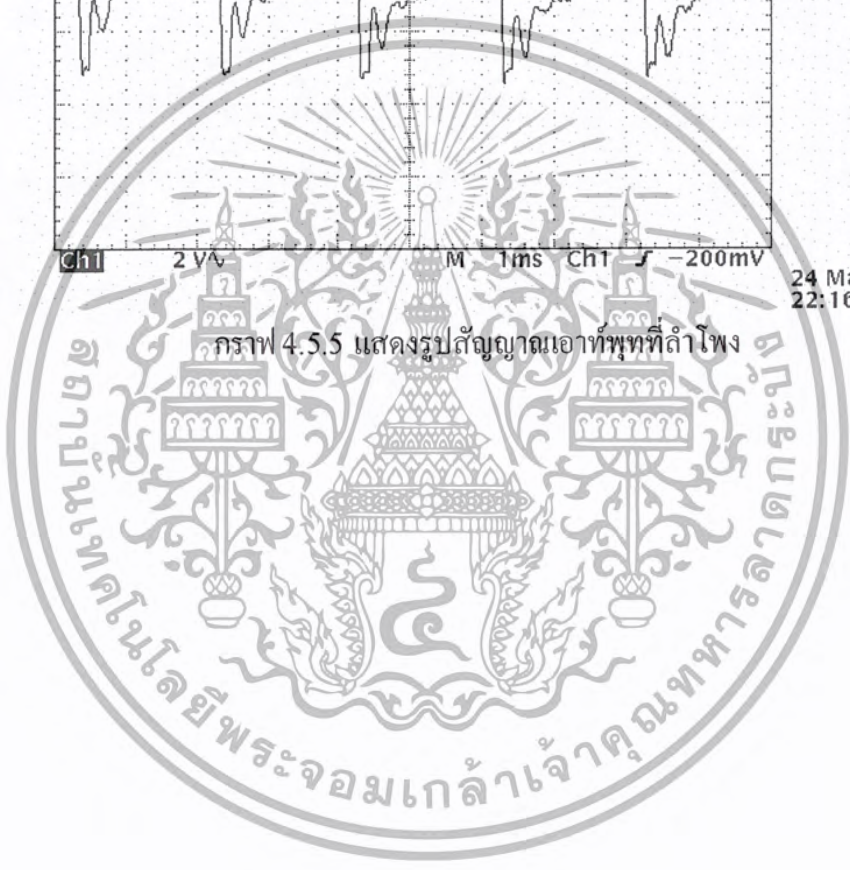


กราฟ 4.5.4 แสดงรูปสัญญาณที่ อนุบาลอกเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



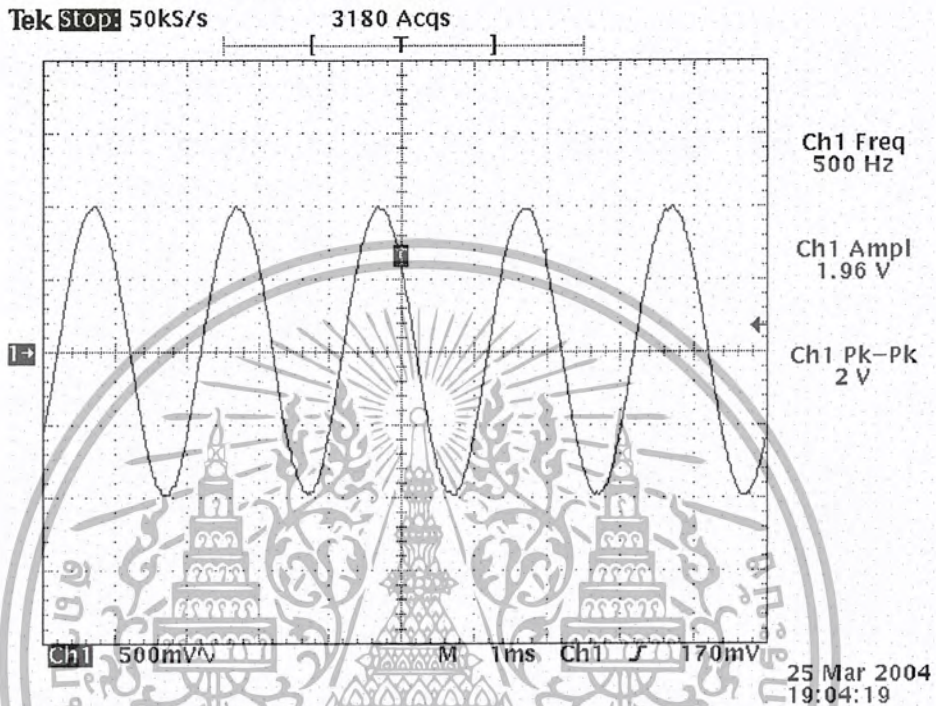
กราฟ 4.5.5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ลำโพง



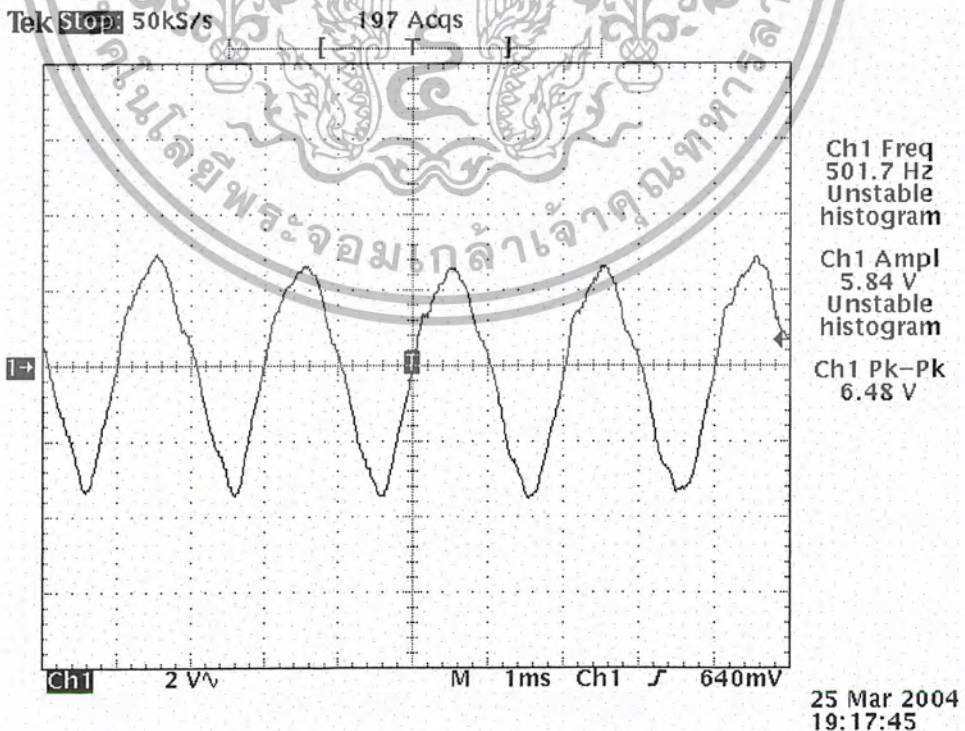
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การทดลองการตรวจจับการสั่นสะเทือนของวัตถุ

ป้อนสัญญาณ sine ความถี่ 500Hz ผ่านลำโพง เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณจากแหล่งกำเนิดและผลที่ได้จากการตรวจจับการสั่นสะเทือนของวัตถุ



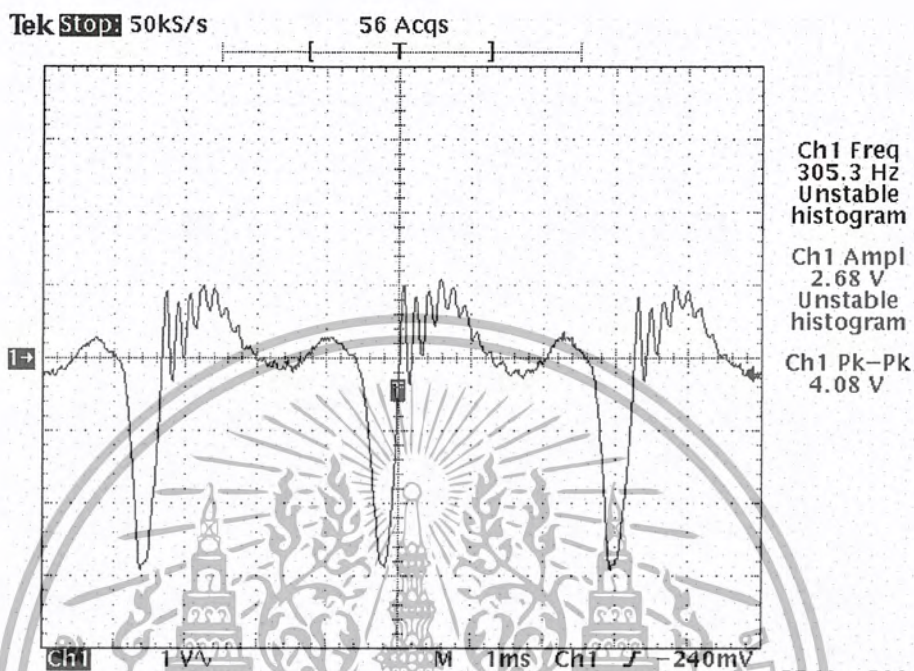
กราฟ 4.6.1 แสดงสัญญาณจากแหล่งกำเนิด



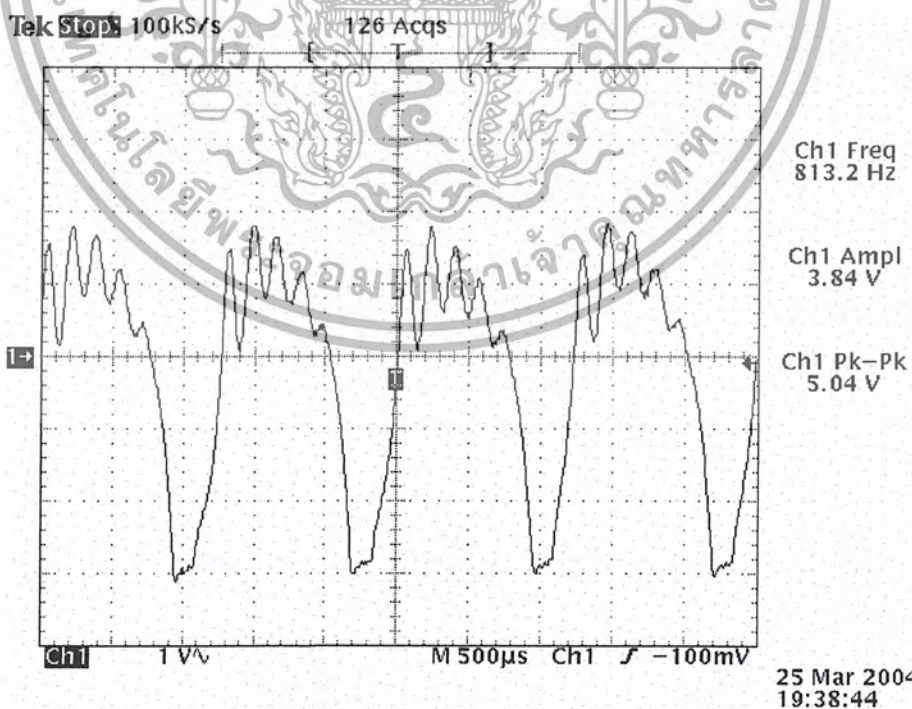
กราฟ 4.6.2 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนสัญญาณ sine ความถี่ต่างๆ เพื่อดูผลที่ได้จากการตรวจจับการสั่นสะเทือน

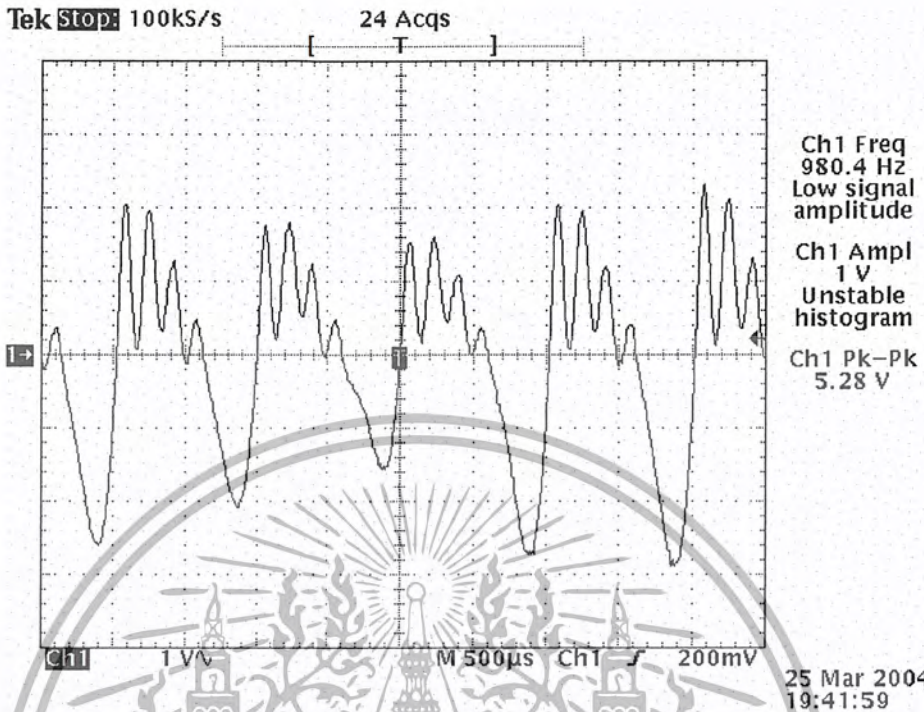


กราฟ 4.6.3 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 300Hz

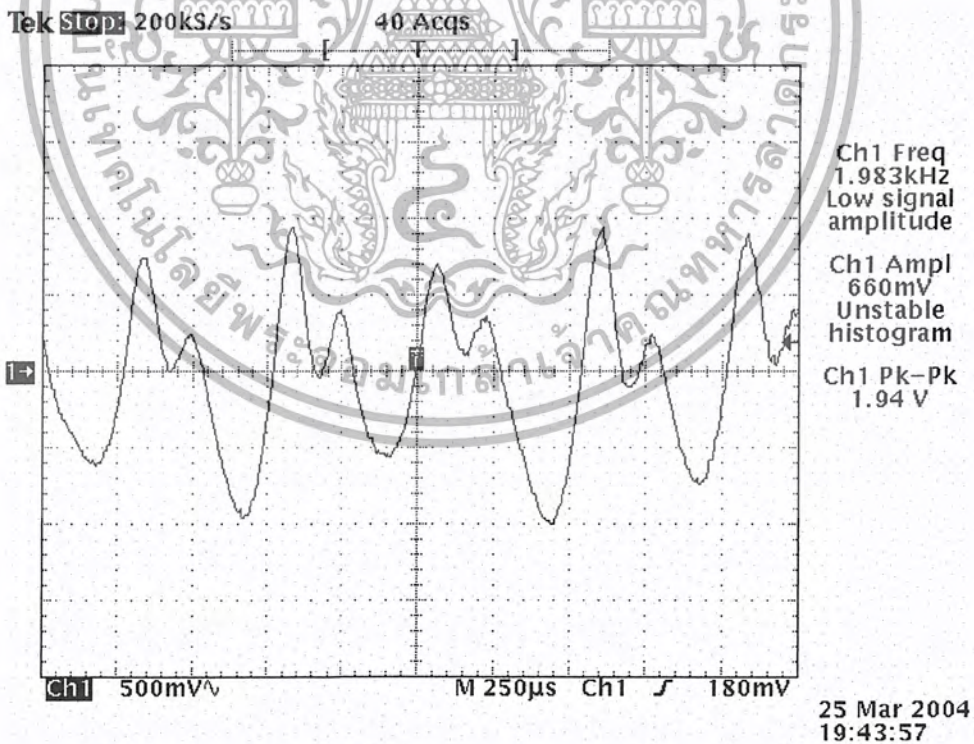


กราฟ 4.6.4 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 800Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

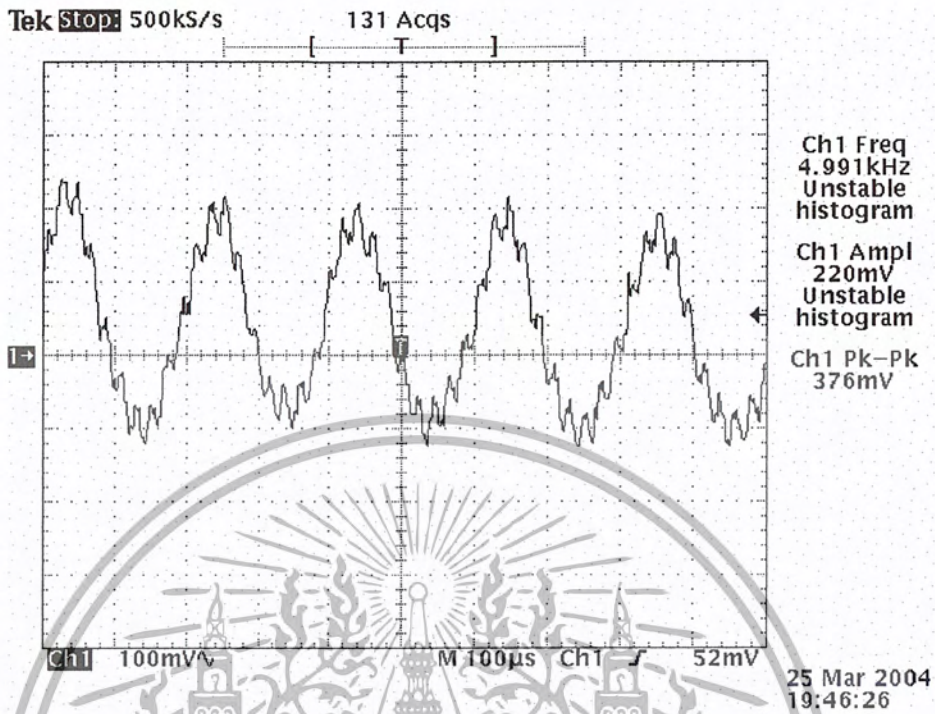


กราฟ 4.6.5 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 1kHz



กราฟ 4.6.6 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 2kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

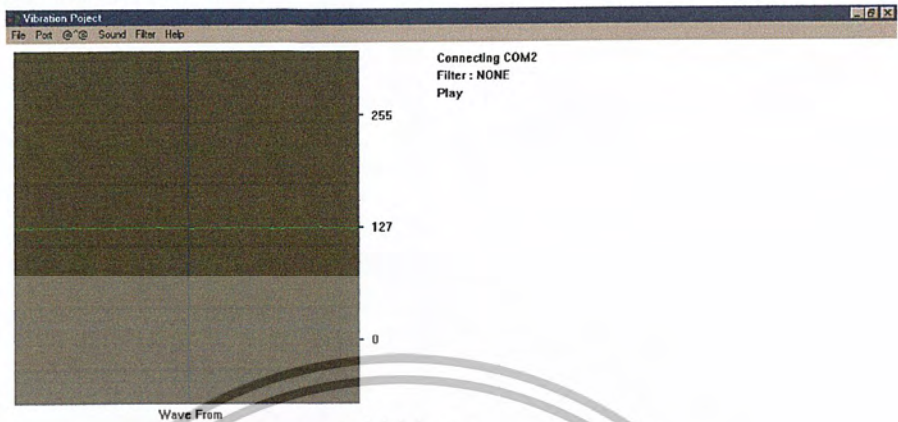


กราฟ 4.6.7 แสดงสัญญาณที่ได้จากการตรวจับการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ 5kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.7 การแสดงผลทางคอมพิวเตอร์

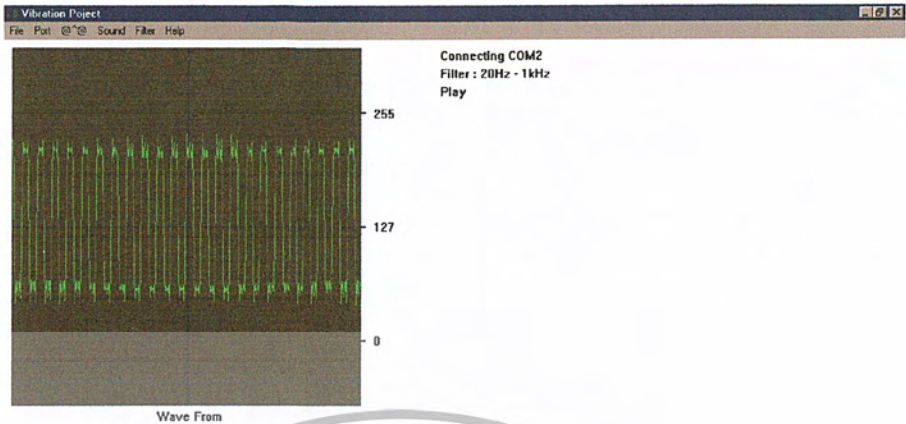


กราฟ 4.7.1 แสดงสัญญาณเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุต



กราฟ 4.7.2 แสดงสัญญาณเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็น Square Wave ความถี่ 300Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟ 4.7.3 แสดงสัญญาณเมื่อใช้จิจิตอลฟิเคเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุปและวิจารณ์

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการเครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือนมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดลองการตรวจจับการสั่นสะเทือนของวัตถุ โดยการยิงแสงเลเซอร์ไปตกกระทบที่วัตถุแล้วรับแสงที่สะท้อนกลับมา นำสัญญาณที่ได้มากรองความถี่ที่เราต้องการ โดยโครงการนี้สนใจเฉพาะความถี่เสียงที่คนเราสามารถได้ยิน

เริ่มต้น โดยการค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรดีเทคเตอร์ในแบบต่างๆ รวมถึงหลักการที่สำคัญในการใช้งานโฟโตไดโอด และศึกษาการสร้างการออกแบบวงจรกรองความถี่ให้ได้ค่าความถี่คutoff ตามที่เราต้องการ

ผลที่ได้จากการทดสอบวงจรกรองความถี่ จากกราฟจะแสดงให้เห็นถึงค่าความถี่คutoff ซึ่งค่าที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าที่ได้ทำการคำนวณไว้

โครงการเครื่องตรวจจับการสั่นสะเทือนนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ

1. พื้นผิวของวัตถุที่จะถูกตรวจจับการสั่นสะเทือนจะต้องสะท้อนแสงได้ดี
2. โฟโตไดโอดมีพื้นที่รับแสงค่อนข้างน้อยทำให้การใช้งานลำบาก
3. แนวของแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดจะต้องอยู่ในแนวตั้งฉากจะทำให้โฟโตไดโอดรับแสงได้ดีที่สุด

#### 5.2 ปัญหาในการทำงานและแนวทางแก้ไข

1. มีปัญหาในการเลือกใช้อุปกรณ์ดีเทคเตอร์ที่เหมาะสม แนวทางแก้ไข ค้นหาข้อมูลเพิ่มเติมและปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษา พร้อมทั้งทำการทดลองวงจรดีเทคเตอร์ในแบบต่างๆ เพื่อดูว่าวงจรแบบใดเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด
2. ขาดข้อมูลของโฟโตไดโอดเนื่องจากไม่สามารถหา datasheet ของโฟโตไดโอดได้ แนวทางการแก้ไข ต้องทำการทดลองโดยลองผิดลองถูกเพื่อวัดคุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอดเอง
3. ในการทดลองวงจรดีเทคเตอร์ ทำได้โดยการยิงแสงเลเซอร์ไปตกกระทบวัตถุที่กำลังสั่นแล้วรับค่าแสงที่มีความถี่ของการสั่นนั้น ซึ่งเป็นการทดลองที่ยุ่งยาก แนวทางการแก้ไข ป้อนสัญญาณที่มีความถี่ให้กับ LED สีแดง แล้วใช้อุปกรณ์ดีเทคเตอร์ตรวจจับแสงจาก LED นั้น

4. เนื่องจากสัญญาณที่เราต้องการที่จะตรวจจับนั้นมีระดับสัญญาณค่อนข้างต่ำ ทำให้มีโอกาสที่ Noise จะรบกวนสัญญาณได้ง่าย แนวทางการแก้ไข ใช้ Op-Amp ที่มีสัญญาณรบกวนน้อย และลด Noise ที่เกิดจาก Supply ให้เรียบยิ่งขึ้น

### 5.3 ผลที่ได้จากการทำโครงการ

ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโฟโตไดโอด และการใช้งานโฟโตไดโอดได้ดีมากยิ่งขึ้น และได้เรียนรู้ในหลักการและวิธีในการสร้างและออกแบบวงจรกรองความถี่ในแบบต่างๆ ครอบคลุมได้นำความรู้ในภาคทฤษฎีที่เคยเรียนรู้ไปประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมและดียิ่งขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

Photodiode amplifiers OP AMP SOLUTIONS ,JERALD G. GRAEME, Principal Engineer Gain Technology Corporation

ตั้งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่น 1-2 ,คู่มือ เครื่องาม , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542

PRINCIPLES OF ACTIVE NETWORK SYNTHESIS AND DESIGN, GOBIND DARYANANI ,Bell telephone Laboratories



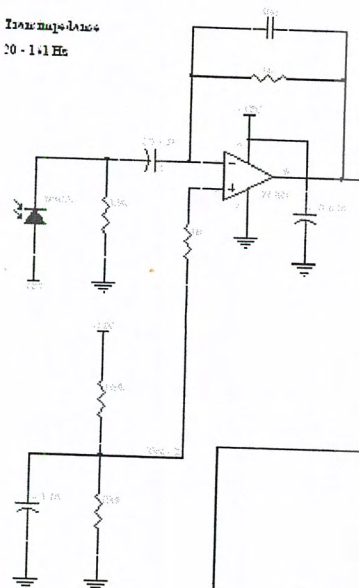
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

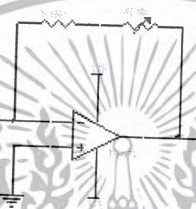
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isomorphance  
20 - 1.1 Hz

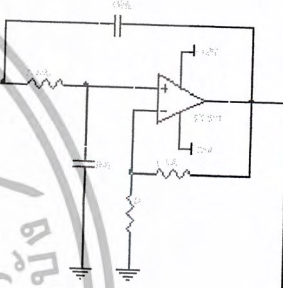


Gain = 1 - 10

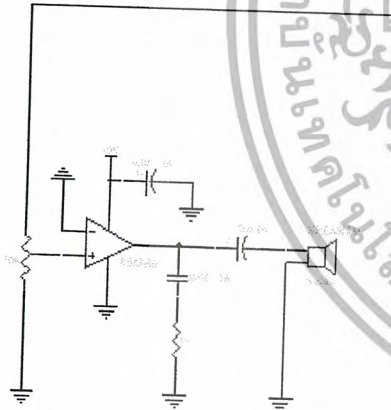
High Pass  
Fc = 50 Hz



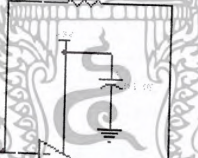
Sallen and Key  
Low Pass Filter  
Fc = 1 Hz  
Gain = 1



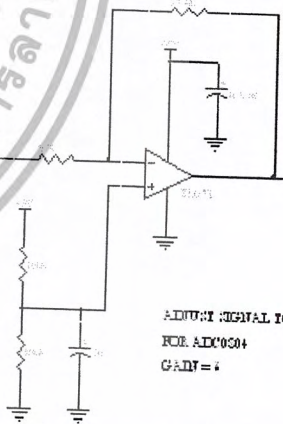
SPEAKER DRIVE CIRCUIT  
GAIN = 10



PORTABLE ELECTRONIC DEVICE  
GAIN = 1



ADJUST SIGNAL IC0-11  
FOR ADX0304  
GAIN = 1



NO.	REVISION	DATE





MOTOROLA

Order this document by TL071C/D

# TL071C,AC TL072C,AC TL074C,AC

## Low Noise, JFET Input Operational Amplifiers

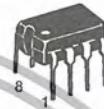
These low noise JFET input operational amplifiers combine two state-of-the-art analog technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input device for low input offset voltage. The BIFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents. Moreover, the devices exhibit low noise and low harmonic distortion, making them ideal for use in high fidelity audio amplifier applications.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin-compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar products.

- Low Input Noise Voltage:  $18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  Typ
- Low Harmonic Distortion: 0.01% Typ
- Low Input Bias and Offset Currents
- High Input Impedance:  $10^{12} \Omega$  Typ
- High Slew Rate:  $13 \text{ V}/\mu\text{s}$  Typ
- Wide Gain Bandwidth: 4.0 MHz Typ
- Low Supply Current: 1.4 mA per Amp

### LOW NOISE, JFET INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

#### SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

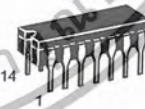
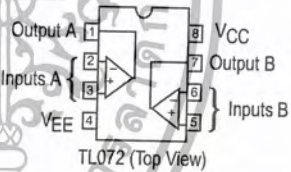
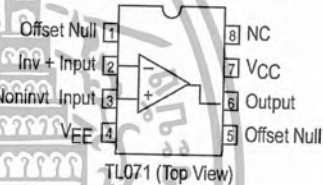


P SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626



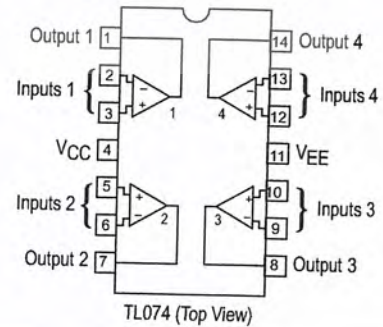
D SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)

#### PIN CONNECTIONS



N SUFFIX  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 646  
(TL074 Only)

#### PIN CONNECTIONS



#### ORDERING INFORMATION

Op Amp Function	Device	Operating Temperature Range	Package
Single	TL071ACD, CD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	SO-8
	TL071ACP, CP		Plastic DIP
Dual	TL072ACD, CD	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	SO-8
	TL072ACP, CP		Plastic DIP
Quad	TL074ACN, CN	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	Plastic DIP

© Motorola, Inc. 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TL071C, AC TL072C, AC TL074C, AC

## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	$V_{CC}$ $V_{EE}$	+18 -18	V
Differential Input Voltage	$V_{ID}$	$\pm 30$	V
Input Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 15$	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	$t_{SC}$	Continuous	
Power Dissipation Plastic Package (N, P) Derate above $T_A = +47^\circ\text{C}$	$P_D$ $1/\theta_{JA}$	680 10	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$	0 to +70	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C

- NOTES:** 1. The magnitude of the input voltage must not exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.  
2. The output may be shorted to ground or either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that power dissipation ratings are not exceeded.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ , $V_{EE} = -15\text{ V}$ , $T_A = T_{high}$ to $T_{low}$ [Note 3])

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input Offset Voltage ( $R_S \leq 10\text{ k}$ , $V_{CM} = 0$ ) TL071C, TL072C TL074C TL07_AC	$V_{IO}$	—	—	13 13 7.5	mV
Input Offset Current ( $V_{CM} = 0$ ) (Note 4) TL07_C TL07_AC	$I_{IO}$	—	—	2.0 2.0	nA
Input Bias Current ( $V_{CM} = 0$ ) (Note 4) TL07_C TL07_AC	$I_{IB}$	—	—	7.0 7.0	nA
Large-Signal Voltage Gain ( $V_O = \pm 10\text{ V}$ , $R_L \geq 2.0\text{ k}$ ) TL07_C TL07_AC	$A_{VOL}$	15 25	—	—	V/mV
Output Voltage Swing (Peak-to-Peak) ( $R_L \geq 10\text{ k}$ ) ( $R_L \geq 2.0\text{ k}$ )	$V_O$	24 20	—	—	V

- NOTES:** 3.  $T_{low} = 0^\circ\text{C}$  for TL071C, AC TL072C, AC TL074C, AC  
 $T_{high} = +70^\circ\text{C}$  for TL071C, AC TL072C, AC TL074C, AC

4. Input Bias currents of JFET input op amps approximately double for every  $10^\circ\text{C}$  rise in junction temperature as shown in Figure 3. To maintain junction temperature as close to ambient temperature as possible, pulse techniques must be used during testing.

Figure 1. Unity Gain Voltage Follower

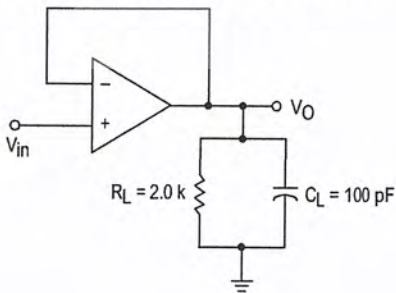
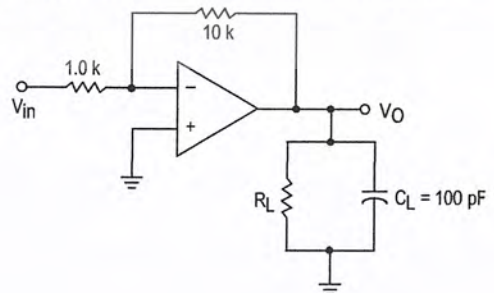


Figure 2. Inverting Gain of 10 Amplifier



# LM386

## Low Voltage Audio Power Amplifier

### General Description

The LM386 is a power amplifier designed for use in low voltage consumer applications. The gain is internally set to 20 to keep external part count low, but the addition of an external resistor and capacitor between pins 1 and 8 will increase the gain to any value from 20 to 200.

The inputs are ground referenced while the output automatically biases to one-half the supply voltage. The quiescent power drain is only 24 milliwatts when operating from a 6 volt supply, making the LM386 ideal for battery operation.

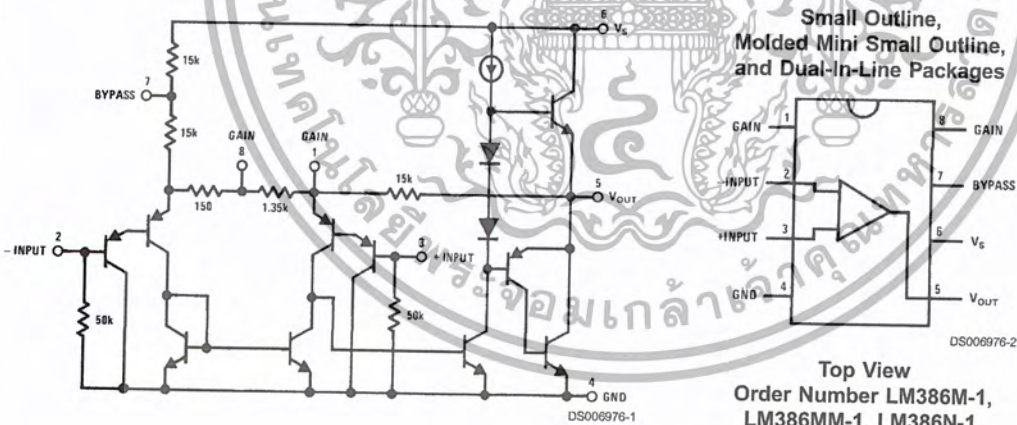
### Features

- Battery operation
- Minimum external parts
- Wide supply voltage range: 4V–12V or 5V–18V
- Low quiescent current drain: 4mA
- Voltage gains from 20 to 200
- Ground referenced input
- Self-centering output quiescent voltage
- Low distortion: 0.2% ( $A_V = 20$ ,  $V_S = 6V$ ,  $R_L = 8\Omega$ ,  $P_O = 125mW$ ,  $f = 1kHz$ )
- Available in 8 pin MSOP package

### Applications

- AM-FM radio amplifiers
- Portable tape player amplifiers
- Intercoms
- TV sound systems
- Line drivers
- Ultrasonic drivers
- Small servo drivers
- Power converters

### Equivalent Schematic and Connection Diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Absolute Maximum Ratings** (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage (LM386N-1, -3, LM386M-1)	15V
Supply Voltage (LM386N-4)	22V
Package Dissipation (Note 3) (LM386N)	1.25W
(LM386M)	0.73W
(LM386MM-1)	0.595W
Input Voltage	±0.4V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Operating Temperature	0°C to +70°C
Junction Temperature	+150°C
Soldering Information	

Dual-In-Line Package Soldering (10 sec)	+260°C
Small Outline Package (SOIC and MSOP) Vapor Phase (60 sec)	+215°C
Infrared (15 sec)	+220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	
Thermal Resistance	
$\theta_{JC}$ (DIP)	37°C/W
$\theta_{JA}$ (DIP)	107°C/W
$\theta_{JC}$ (SO Package)	35°C/W
$\theta_{JA}$ (SO Package)	172°C/W
$\theta_{JA}$ (MSOP)	210°C/W
$\theta_{JC}$ (MSOP)	56°C/W

**Electrical Characteristics** (Notes 1, 2) $T_A = 25^\circ\text{C}$ 

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage ( $V_S$ ) LM386N-1, -3, LM386M-1, LM386MM-1 LM386N-4		4 5		12 18	V
Quiescent Current ( $I_Q$ )	$V_S = 6V, V_{IN} = 0$		4	8	mA
Output Power ( $P_{OUT}$ ) LM386N-1, LM386M-1, LM386MM-1 LM386N-3 LM386N-4	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 9V, R_L = 8\Omega, THD = 10\%$ $V_S = 16V, R_L = 32\Omega, THD = 10\%$	250 500 700	325 700 1000		mW
Voltage Gain ( $A_v$ )	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}$ 10 $\mu\text{F}$ from Pin 1 to 8		26 46		dB
Bandwidth (BW)	$V_S = 6V, \text{Pins 1 and 8 Open}$		300		kHz
Total Harmonic Distortion (THD)	$V_S = 6V, R_L = 8\Omega, P_{OUT} = 125\text{ mW}$ $f = 1\text{ kHz}, \text{Pins 1 and 8 Open}$		0.2		%
Power Supply Rejection Ratio (PSRR)	$V_S = 6V, f = 1\text{ kHz}, C_{BYPASS} = 10\ \mu\text{F}$ Pins 1 and 8 Open, Referred to Output		50		dB
Input Resistance ( $R_{IN}$ )			50		k $\Omega$
Input Bias Current ( $I_{BIAS}$ )	$V_S = 6V, \text{Pins 2 and 3 Open}$		250		nA

**Note 1:** All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

**Note 2:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

**Note 3:** For operation in ambient temperatures above 25°C, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and 1) a thermal resistance of 107°C/W junction to ambient for the dual-in-line package and 2) a thermal resistance of 170°C/W for the small outline package.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ADC0801/ADC0802/ADC0803/ADC0804/ADC0805

## 8-Bit $\mu$ P Compatible A/D Converters

### General Description

The ADC0801, ADC0802, ADC0803, ADC0804 and ADC0805 are CMOS 8-bit successive approximation A/D converters that use a differential potentiometric ladder—similar to the 256R products. These converters are designed to allow operation with the NSC800 and INS8080A derivative control bus with TRI-STATE output latches directly driving the data bus. These A/Ds appear like memory locations or I/O ports to the microprocessor and no interfacing logic is needed.

Differential analog voltage inputs allow increasing the common-mode rejection and offsetting the analog zero input voltage value. In addition, the voltage reference input can be adjusted to allow encoding any smaller analog voltage span to the full 8 bits of resolution.

### Features

- Compatible with 8080  $\mu$ P derivatives—no interfacing logic needed - access time - 135 ns
- Easy interface to all microprocessors, or operates "stand alone"

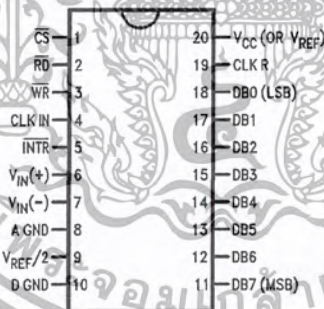
- Differential analog voltage inputs
- Logic inputs and outputs meet both MOS and TTL voltage level specifications
- Works with 2.5V (LM336) voltage reference
- On-chip clock generator
- 0V to 5V analog input voltage range with single 5V supply
- No zero adjust required
- 0.3" standard width 20-pin DIP package
- 20-pin molded chip carrier or small outline package
- Operates ratiometrically or with 5  $V_{DC}$ , 2.5  $V_{DC}$ , or analog span adjusted voltage reference

### Key Specifications

- Resolution: 8 bits
- Total error:  $\pm 1/4$  LSB,  $\pm 1/2$  LSB and  $\pm 1$  LSB
- Conversion time: 100  $\mu$ s

### Connection Diagram

ADC080X  
Dual-In-Line and Small Outline (SO) Packages



See Ordering Information

### Ordering Information

TEMP RANGE		0°C TO 70°C	0°C TO 70°C	-40°C TO +85°C
ERROR	$\pm 1/4$ Bit Adjusted	ADC0802LCWM	ADC0804LCN	ADC0801LCN
	$\pm 1/2$ Bit Unadjusted			ADC0802LCN
	$\pm 1/2$ Bit Adjusted	ADC0804LCWM		ADC0803LCN
	$\pm 1$ Bit Unadjusted			ADC0805LCN/ADC0804LCJ
PACKAGE OUTLINE		M20B—Small Outline	N20A—Molded DIP	

Z-80® is a registered trademark of Zilog Corp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้