

สวิตซ์ที่ควบคุมด้วยแสง



นายณัฐภูมิ ตีรกิตติ
นายเจษฎา จักรวาพนรสิงห์



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

ป.พ.

สท 3A2

2540

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 31653

วัน, เดือน, ปี 19 พ.ค. 2541

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Light Activated Switch

Mr.Nuttapoom Teerakitti

Mr.Jedsada Jakkrawannorasing



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สวิทซ์ที่ควบคุมด้วยแสง
โดย นายณัฐภูมิ ตีรกิตติ
นายเจษฎา จักรวาพนรสิงห์
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชค


ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิจัย)

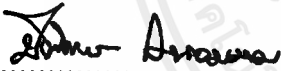
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



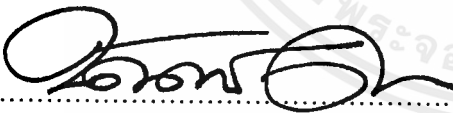
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชค)

ประธานกรรมการ



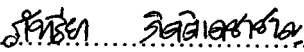
(อาจารย์ปีติพร ถนนอมงาม)

กรรมการ



(อาจารย์บัณฑิตย์ ดำรงศักดิ์)

กรรมการ



(อาจารย์ภัทริยา กิตติเดชาชาญ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สิทธิที่ควบคุมด้วยแสง
โดย	นายณัฐภูมิ ตีรภิกคิต
	นายเจษฎา จักรวาฬนรสิงห์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชคิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2540

บทคัดย่อ

เราได้สร้างชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีระดับการบริโภคพลังงานต่ำ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีหลักการอย่างง่ายและมีราคาถูกขึ้น สิ่งประดิษฐ์นี้จะตอบสนองกับความเข้มแสงภายนอกโดยใช้ตัวตรวจจับแสงที่มีชื่อว่า LDR ในส่วนของวงจรตรวจจับแสงจะถูกตั้งค่าความเข้มแสงภายนอกที่จะตรวจจับไว้ที่ระดับความเข้มแสงที่ปลอดภัยต่อสายตา โดยที่ระดับความเข้มแสงที่เราตั้งค่าไว้จะเป็นระดับที่ทำให้หลอดฟลูออเรสเซนต์สว่างขึ้นหรือดับลงโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด สัญญาณที่ผ่านการตรวจจับโดย LDR จะอยู่ในรูปของแรงดันจะถูกป้อนไปยังวงจรเปรียบเทียบ ซึ่งเราจะใช้ OP-AM LM741 ที่ได้ตั้งค่าแรงดันอ้างอิงไว้แล้ว เอาท์พุทที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบจะต่อเข้ากับวงจรทรานซิสเตอร์อย่างง่าย ซึ่งทำหน้าที่บังคับให้หน้าสัมผัสรีเลย์ไฟฟ้าเชิงกลทำงาน (สัมผัส/ไม่สัมผัส) เป็นผลให้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สว่างขึ้นหรือดับลงโดยอัตโนมัติ

Special Project Title	Light Activated Switch
Name	Mr. Nuttapoom Teerakiti Mr. Jedsada Jakrawannorasing
Special Project Advisor	Asst. Prof. Wichit Sirichote
Department	Applied Physics
Academic Year	1997

Abstract

A low cost and simple concept device used for controlling energy consumption by a fluorescent light bulb has been built. The device was responded with the external light intensity by utilizing a light sensor, LDR. The circuit detects external light intensity with a preset value, with a preliminary study of eye's healthy, the preset value then providing triggering point for turning the light bulb on and off with a minimum energy usage. The signal provided by LDR detection in the form of voltage level is put to the comparator circuit. LM741 operation amplifier having the proper reference voltage setting. The output of comparator is connected to a simple transistor switch which in turns activating the electromechanical relay's contact making the light bulb on/off automatically.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ดังนี้

บิดา-มารดา

ผู้ที่ให้ชีวิต กำลังใจและทุนการศึกษาโดยรวมไปถึง
ช่วยอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชค

ผู้ซึ่งให้วิชาความรู้ คำแนะนำ หนังสือและอุปกรณ์ต่างๆ
ในการทำโครงการพิเศษ

คุณเชิดชัย แซ่ตั้ง

ผู้ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษทางด้านวงจร
อิเล็กทรอนิกส์

คุณชนพล อินเที่ยง

ผู้ที่ให้คำปรึกษาสิ่งต่างๆที่เป็นประโยชน์

คุณวรศักดิ์ คำชุ่ม

ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์

คุณฤกษ์นาวิ ดวงศรี

ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านยานพาหนะในการซื้อ
อุปกรณ์

คุณอนันต์ กาลกลั่นพจน์

ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิมพ์รายงาน

นางสาวเดือนตา นามชุมภู

ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องพรีนเตอร์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

สถานที่ให้วิชาความรู้ต่างๆมากมาย

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รวมทั้งเพื่อนๆและพี่น้องทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆมากมาย

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณทุกๆท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวด้วยความจริงใจ

นาย ฉัฐภูมิ ตีร์กิตติ

นาย เจษฎา จักรวาพนรสิงห์

ง
สารบัญเรื่อง

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ-ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 วัดอุประสงค์	1
1.2 วิธีการดำเนินงาน	1
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	3
2.1.1 การกระทำซึ่งกันและกันระหว่างแสงและวัสดุ	3
2.1.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	6
2.1.3 ชนิดการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	8
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ	8
2.1.3.2 กฎการเลือกในการดูดกลืนแสงระหว่าง แถบพลังงาน	9
2.1.3.3 การดูดกลืนแสงแบบตรง	11
2.1.3.4 การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง	13
2.1.3.5 การดูดกลืนแสงของ exciton	15
2.1.4 ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง	16
2.1.5 ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก	19
2.1.5.1 ปรากฏการณ์เดมเบอร์	19
2.1.5.2 ปรากฏการณ์ PEM (Photo-Electro-Magnetic Effect)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 (ต่อ)

2.1.5.3	ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่เกิดจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ	21
2.2	ชนิดและคุณสมบัติของรีเลย์	24
2.2.1	ระบบคอนแทคของรีเลย์ (Relay Contact System)	25
2.2.2	รีเลย์แบบต่างๆ	27
2.2.3	รีเลย์แบบไฟฟ้า-กล	28
2.2.3.1	รีเลย์แบบอาศัยแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	28
2.2.3.2	รีเลย์แบบดูดแกนเหล็ก	29
2.2.3.3	รีเลย์แบบขดลวดเคลื่อนที่	30
2.2.3.4	รีเลย์แบบเหนี่ยวนำ	32
2.2.3.5	รีเลย์แบบใช้ความร้อน	34
2.2.3.6	รีเลย์แบบอื่นๆ	34
2.2.3.7	รีเลย์แบบใช้มอเตอร์	35
2.2.3.8	รีเลย์แบบกล	35
2.2.3.9	รีเลย์แบบวัดอุณหภูมิ	36
2.2.3.10	รีเลย์แบบถ่วงเวลา	36
2.2.3.11	การทำงานของคอนแทค	37
2.2.4	รีเลย์แบบสแตติก	38
2.3	ทฤษฎีและหลักการของออปแอมป์	39
2.3.1	คุณสมบัติเด่นของออปแอมป์	40
2.3.2	ออปแอมป์แบบพื้นฐาน	40
2.3.4	วงจรตัวอย่างออปแอมป์	42
2.3.5	สเปกที่ใช้ในเรื่องออปแอมป์	43
2.4	ความรู้ทั่วไปและหลักการของหลอดฟลูออเรสเซนต์	45
2.4.1	หลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป	45
2.4.2	สีและการกระจายพลังงานทางสเปกตรัม	46
2.4.3	หลอดฟลูออเรสเซนต์ขั้วแคโทดร้อน	49
2.4.3.1	หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด preheat	50
2.4.3.2	หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด instant start	54

บทที่ 2 (ต่อ)

2.4.3.3	หอดูดพลูออเรสเซ็นซ์ชนิด rapid start	54
2.4.3.4	หอดูดพลูออเรสเซ็นซ์พิเศษ	58
2.4.4	คุณลักษณะขีดความสามารถของหอดูดพลูออเรสเซ็นซ์	63
2.4.4.1	การกระจายพลังงาน	63
2.4.4.2	ค่าการเสื่อมของหอดูด	63
2.4.4.3	ผลของการปิดเปิดใช้งานต่ออายุการใช้งานของหอดูด	65
2.4.4.4	ผลของอุณหภูมิ	65
2.4.4.5	ผลของความชื้น	65
2.4.4.6	ข้อดีและข้อเสียของหอดูดพลูออเรสเซ็นซ์	65
2.4.5	บัลลาสต์สำหรับหอดูดพลูออเรสเซ็นซ์	66

บทที่ 3 แนวทางในการออกแบบและการทำงานของวงจร

3.1	บล็อกไดอะแกรมของชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง	68
3.2	แนวทางในการออกแบบ	69
3.2.1	ความต้องการของวงจรสวิทช์ทำงานด้วยแสง	69
3.2.2	ส่วนวงจรเปรียบเทียบแรงดันและขยายสัญญาณ	69
3.2.3	ส่วนวงจรพลูออเรสเซ็นซ์และรีเลย์	70
3.3	การทำงานของวงจร	71

บทที่ 4 ผลการทดลอง

75

บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

5.1	สรุปผลการดำเนินงาน	76
5.2	แนวทางการพัฒนา	76

บรรณานุกรม

ประวัติผู้เขียน

ช
สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงชนิดต่างๆ	4
ตารางที่ 2.2 แสดงแถบความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและกราฟมาตรฐาน ผลตอบสนองแถบสีของแสงต่อตา	45
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของแสงสีขาวในการนำไปใช้กับงานต่างๆ	48
ตารางที่ 2.5 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอิน สตาร์ตแบบหลอดแก้วยาว	53
ตารางที่ 2.6 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรพิด สตาร์ตแบบหลอดแก้วยาว	55
ตารางที่ 2.7 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ชนิดแรพิดสตาร์ตแบบหลอดแก้วยาวประเภทให้แสงมาก (HO) และ ให้แสงมากที่สุด (VHO)	56
ตารางที่ 2.8 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลม	57
ตารางที่ 2.9 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ตัวยู	59
ตารางที่ 2.10 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาดเล็กสำหรับรูป อายุการใช้งานประมาณ 5000 ชั่วโมง	60
ตารางที่ 2.11 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสง ของหลอดฟลูออเรสเซนต์สะท้อนแสง	62
ตารางที่ 2.12 แสดงค่าพิกัดต่างๆ ของบัลลาสต์หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีต	67
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสง	75

๗
สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการ transition ที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงชนิดต่างๆในสารกึ่งตัวนำ	6
รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงชนิดต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำ	7
รูปที่ 2.4 โมเดลแถบพลังงานแสดงการดูดกลืนแสงแบบตรง	12
รูปที่ 2.5 การเกิด exciton และการดูดกลืนแสงด้วย exciton	14
รูปที่ 2.6 (ก) การเกิด photo-conduction effect (ข) สเปกตรัมของ photo-conductivity	16
รูปที่ 2.7 ลักษณะตัวอย่างวัสดุใช้วัด photo-conductivity (ถ้าความหนา d มีค่าน้อยกว่า penetration depth δ ของแสงจะทำให้เกิด Dember effect	17
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมความไวแสงของวัสดุต่างๆ	18
รูปที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์ PEM	20
รูปที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์ photovoltaic ชนิดต่างๆ	22
รูปที่ 2.11 คอนแทคของรีเลย์	26
รูปที่ 2.12 คอนแทคของรีเลย์	26
รูปที่ 2.13 รีเลย์แบบขดลวดเคลื่อนที่ชนิดหมุน	30
รูปที่ 2.14 รีเลย์แบบเลื่อนตามแกน	31
รูปที่ 2.15 แรงดูดในรีเลย์แบบเหนี่ยวนำ	32
รูปที่ 2.16 รีเลย์แบบบุคโซลต์	35
รูปที่ 2.17 วงจรภายในของออปแอมป์ในไอซี	41
รูปที่ 2.18 การต่อแหล่งจ่ายไฟกับตัวไอซี	42
รูปที่ 2.19 แสดงการหากระแสในไบอัสที่อินพุต	43
รูปที่ 2.20 แสดงการหาแรงดัน V_{os} ของออปแอมป์ที่อินพุต	44
รูปที่ 2.21 แสดงรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำการกระตุ้นสารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ด้านในหลอด	46
รูปที่ 2.22 แสดงการกระจายพลังงานทางสเปกตรัมของหลอดฟลูออเรสเซนต์	47
รูปที่ 2.23 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดฟริซิด	49
รูปที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบภายในของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดฟริซิด	50
รูปที่ 2.25 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอินสแตนต์สตาร์ท	53

รูปที่ 2.26 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรพิดสตาร์ท	54
รูปที่ 2.27 แสดงขั้วหลอดแบบหน้าสัมผัสคู่ซ้อน	56
รูปที่ 2.28 หลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลม	57
รูปที่ 2.29 แสดงการใช้โคมสี่เหลี่ยมด้านเท่า 60*60 cm ² ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ตัวยู 40 W จำนวน 2 หลอด	58
รูปที่ 2.30 หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำเร็จรูป	59
รูปที่ 2.31 แสดงการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำหรับรูปชนิดที่ต่อบัลลาสต์อยู่ภายนอก	61
รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของหลอดฟลูออเรสเซนต์สะท้อนแสง	61
รูปที่ 2.33 การกระจายพลังงานแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์	62
รูปที่ 2.34 แสดงเส้นโค้งของฟลักซ์แสงสว่างที่เหลืออยู่ตามเวลาใช้งาน	63
รูปที่ 2.35 แสดงกราฟกำหนดอายุการใช้งานต่อชั่วโมง- ครั้งของการเปิดปิดใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์	64
รูปที่ 2.36 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไปประเภทให้แสงมาก (HO) และ ให้แสงมากที่สุด (VHO)	64
รูปที่ 2.37 แสดงอุณหภูมิขดลวดบัลลาสต์ที่เพิ่มขึ้นต่ออายุการใช้งาน	66
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนเปรียบเทียบแรงดันของวงจร	69
รูปที่ 3.2 วงจรแสดงการเชื่อมต่อกับขดหลอดฟลูออเรสเซนต์	70
รูปที่ 3.3 แสดงวงจรสมบูรณ์ของชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง	71
รูปที่ 3.4 แสดงส่วนตรวจจับทางแสง	72
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรส่วนต่างๆของชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง	73
รูปที่ 3.6 แสดงกล่องชุดทำงานด้วยแสงพร้อมต่อพ่วงวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์	73
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์สภาวะถูกทำให้แอกทีฟ	74
รูปที่ 4.1 วงจรแสดงชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง	75

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้จำนวนอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในด้านการผลิตและอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้น แต่การใช้พลังงานนั้นเป็นการใช้พลังงานแบบไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ และทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์จากสาเหตุเหล่านี้จึงทำให้เกิดโครงการนี้ขึ้นมา โดยโครงการนี้จะเป็นการสร้างสวิทช์ที่ควบคุมด้วยแสงเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าโดยเปล่าประโยชน์ โดยสวิทช์ที่ควบคุมด้วยแสงในโครงการนี้เป็นอุปกรณ์ต่อพ่วงที่สามารถเพิ่มเข้าไปในวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ตามบ้านเรือนได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยที่ไม่ต้องเคลื่อนย้ายชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ติดตั้งอยู่เดิม เพื่อต้องการจะลดพลังงานส่วนที่สูญเสียอย่างเปล่าประโยชน์เนื่องจากการลืมปิดไฟ ไม่มีคนอยู่บ้าน หรืออะไรก็ตาม ชุดสวิทช์ที่ควบคุมด้วยแสงนี้ประกอบด้วย LDR ที่ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแสงเป็นสำคัญและอุปกรณ์อย่างอื่นที่มีราคาไม่แพงนัก ทำให้ทุกบ้านเรือนสามารถนำไปติดตั้งได้เพื่อใช้ในการประหยัดพลังงาน

1.1 วัตถุประสงค์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้เกิดเป็น โครงการสวิทช์ที่ควบคุมด้วยแสงขึ้น โดยที่โครงการนี้จะมีวัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์
2. เพื่อศึกษาการทำงานของ LDR
3. เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จะสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์
4. เพื่อให้ทุกบ้านเรือนสามารถหาซื้อไปใช้ได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องราคาแพง

1.2 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการในการสร้างสวิทช์ที่ควบคุมด้วยแสงนั้น ได้ทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษารูปแบบของวงจรโดยรวมและความต้องการในส่วนต่างๆของวงจร
2. ออกแบบและวิเคราะห์วงจรส่วนต่างๆ
3. จัดหาอุปกรณ์และดำเนินการทดลอง
4. วิเคราะห์ผลและทำการปรับปรุงส่วนที่บกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ออกแบบและสร้างชุดสวิตซ์ที่ควบคุมด้วยแสง
6. บันทึกผลและสรุป
7. หาแนวทางพัฒนาขั้นต่อไป

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงหลักการทำงานของวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์
2. ทราบถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของตัว LDR
3. เป็นการช่วยประหยัดพลังงานของชาติ
4. ให้ประชาชนโดยทั่วไปได้ใช้ของดีราคาถูก



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

2.1.1 การกระทำซึ่งกันและกันระหว่างแสงและวัสดุ

เมื่อฉายแสงลงบนวัสดุใดๆ แสงที่ฉายไปนั้นจะได้รับอิทธิพลบางอย่างจากวัสดุนั้น เช่น

- (1) ถูกดูดกลืน (absorption) โดยวัสดุ
- (2) ถูกสะท้อนกลับ (reflection) ที่ผิววัสดุ
- (3) เกิดการหักเห (refraction) และเกิดปรากฏการณ์แพร่กระจาย (dispersion)
- (4) แสงที่มีทิศทางโพลาไรซ์เฉพาะทิศใดทิศหนึ่งเท่านั้นที่จะทะลุผ่านวัสดุได้

นอกจากนี้คุณสมบัติทางแสงเหล่านี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้อีก ถ้าวัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์ดูดกลืน การสะท้อน การหักเห การแพร่กระจาย และการโพลาไรซ์เซชันเหล่านี้ สามารถอธิบายวิเคราะห์ได้จากวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) เป็นพื้นฐาน

อนึ่งเราทราบคุณสมบัติของวัสดุนั้น สามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของอนุภาค เช่น อะตอม โมเลกุล และอิเล็กตรอน ซึ่งประกอบเป็นวัสดุนั้น พฤติกรรมของอนุภาคต่างๆเหล่านั้นสามารถพิจารณาได้ทั้งทางแบบกลศาสตร์คลาสสิกและกลศาสตร์ควอนตัม อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแสงจะอธิบายได้ดีกว่าถ้าใช้ทฤษฎีควอนตัมอธิบาย

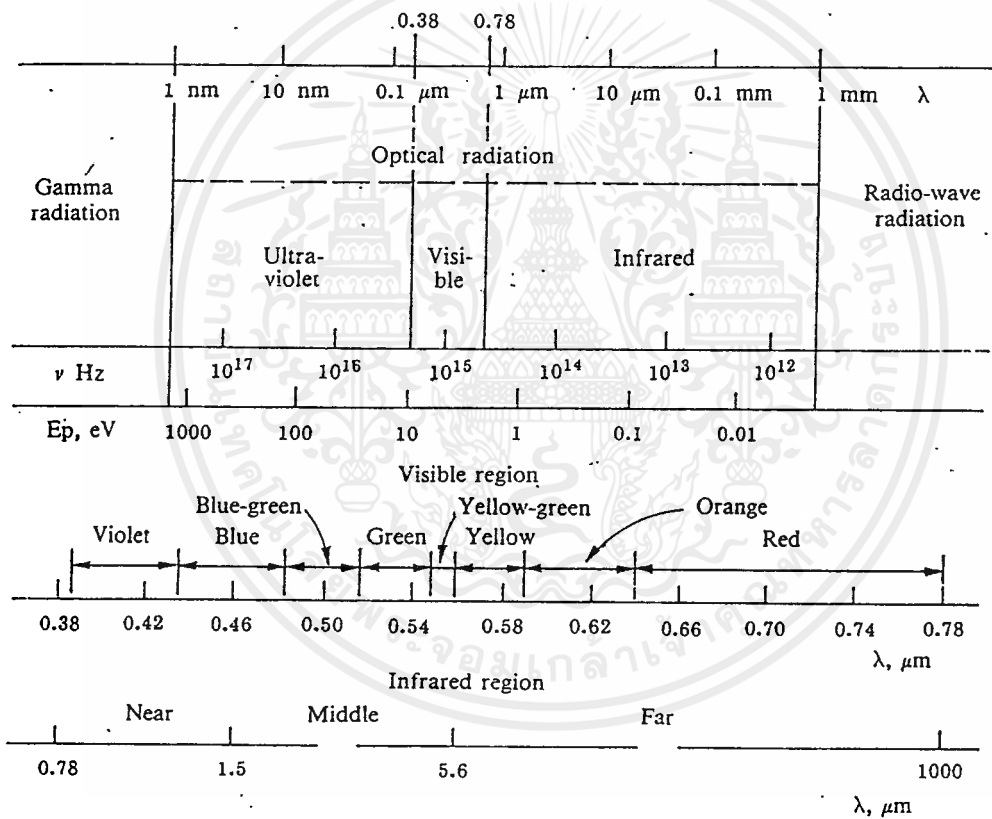
ส่วนสำคัญที่เราต้องพิจารณา ก็คือ กระบวนการดูดกลืนแสงของวัสดุเป็นอย่างไร และเมื่อวัสดุดูดกลืนแสงแล้ววัสดุนั้นแสดงปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงอย่างไรบ้าง ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงชนิดต่างๆ

การดูดกลืนแสงในก๊าซและของเหลว		<ul style="list-style-type: none"> ● เกิดจากการสั่นและหมุนของโมเลกุล ● เกิดจากการดูดกลืนของก๊าซในสภาพพลาสมา
การดูดกลืนแสงในของแข็ง	โลหะ	<ul style="list-style-type: none"> ● เกิดจากการดูดกลืนของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า
	สารกึ่งตัวนำ	<ul style="list-style-type: none"> ● เกิดจากการดูดกลืนของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า
	สารกึ่งตัวนำและฉนวน	<ul style="list-style-type: none"> ● เกิดจากการดูดกลืนของอิเล็กตรอน-โฮล ● เกิดจากการ transition ระหว่างแถบพลังงาน <ul style="list-style-type: none"> - การดูดกลืนแบบตรง - การดูดกลืนแบบไม่ตรง ● เกิดจากการ transition ที่มีระดับพลังงานของสารเจือปนหรือ defect ต่างๆ ● เกิดจากการสั่นของโครงผลึก ● เกิดจากการโพลาไรซ์เซชันของไดอิเล็กทริก
การดูดกลืนไมโครเวฟด้วยวิธี Magnetic Resonance		<ul style="list-style-type: none"> ● Nuclear magnetic resonance ● electron spin resonance
ปรากฏการณ์ photoelectric		<ul style="list-style-type: none"> ● การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยแสง (electron emission) ● การมี photoconductivity ● การมี photovoltaic effect <ol style="list-style-type: none"> (1) photovoltaic effect (2) ปรากฏการณ์ Dember (3) ปรากฏการณ์ Photo-Electro Magnetic
ปรากฏการณ์ magneto optical		<ul style="list-style-type: none"> ● ปรากฏการณ์ Faraday ● ปรากฏการณ์ pockels

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

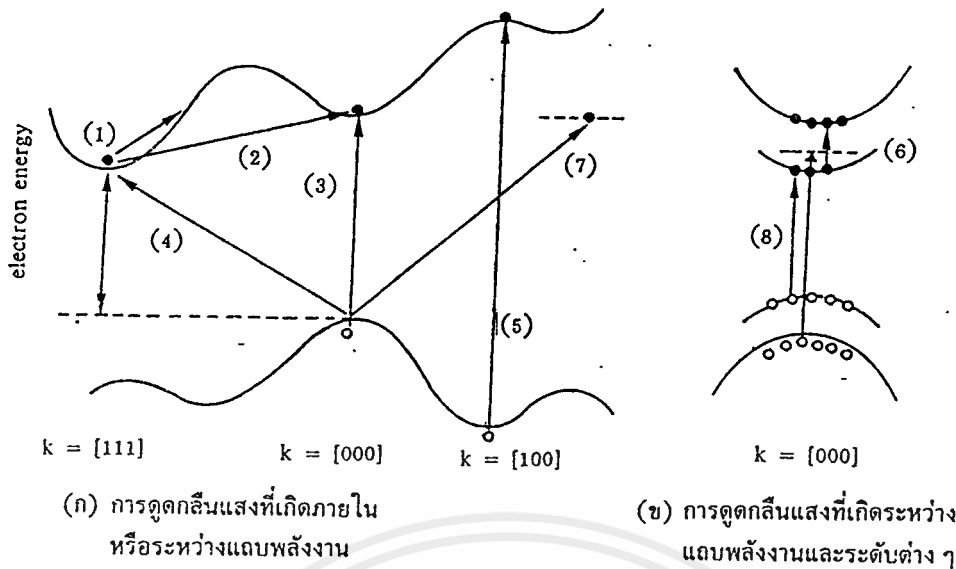
ปรากฏการณ์ electro-optical	<ul style="list-style-type: none"> ● ปรากฏการณ์ Kerr ● ปรากฏการณ์ Pockels
การแผ่รังสีแสง emission & radiation (1) EL ที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (2) EL ที่เกิดจากการฉีดพาหะ (LED)	<ul style="list-style-type: none"> ● Luminescence (1) Photoluminescence (2) Electroluminescence <ul style="list-style-type: none"> - ปรากฏการณ์ destrian - ปรากฏการณ์ Lossev



รูปที่ 2.1 การแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสดงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง รูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งชนิดของคลื่นแม่เหล็กออกตามความยาวคลื่นหรือความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีตั้งแต่คลื่นสั้นรังสีแกมมา (γ) ซึ่งถูกเปล่งแสงออกมาจากวัสดุกัมมภาพรังสีไปจนถึงความยาวคลื่นซึ่งมีความถี่ต่ำขนาดไม่ถึง 100 Hz เรียกว่าความถี่เชิงพาณิชย์ ดังนั้นความหมายอย่างกว้างๆของแสงจึงรวมจากคลื่นวิทยุ ซึ่งมีความถี่ต่ำไปจนถึงคลื่นสั้น คลื่นไมโครเวฟ แสงอินฟราเรด แสงมองเห็น แสงเหนือม่วง รังสีเอ็กซ์ และรังสี

เอกแกมมา แต่ในความหมายแคบแล้วคำนี้มักจะหมายถึงความถี่เฉพาะช่วงจากแสงอินฟราเรดไปถึงเอกแกมมา อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กระบวนการ transition ที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงชนิดต่างๆในสารกึ่งตัวนำ

แสงเหนือม่วง ในที่นี้จะขอให้คำจำกัดความของแสงเป็นแสงในช่วงจากแสงอินฟราเรดถึงแสงเหนือม่วง

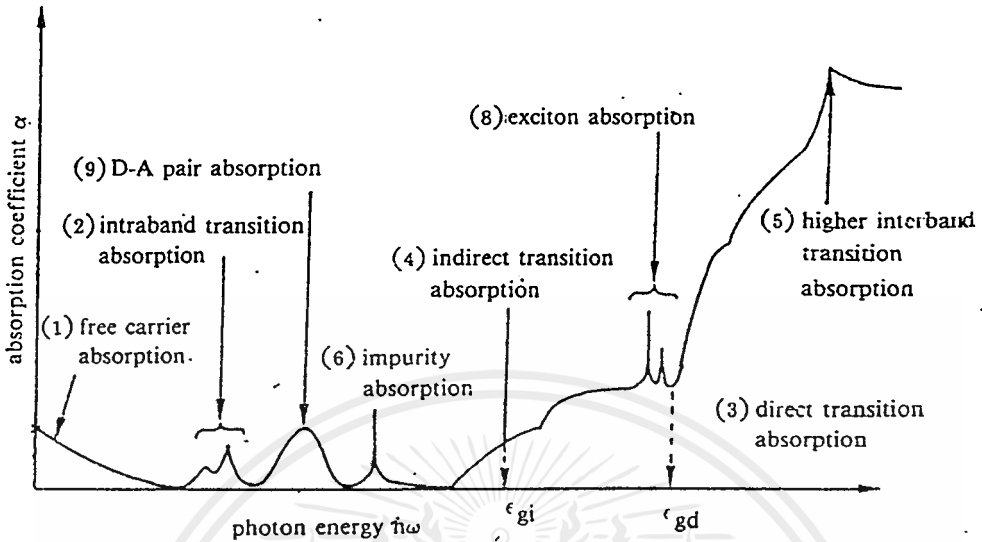
2.1.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

ในสารกึ่งตัวนำนั้นมีขนาดของช่องว่างพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง (band gap) และภายในช่องว่างพลังงานนั้นอาจจะมีระดับพลังงานของสารเจือปน (impurity level) หรือจุดบกพร่อง (defect level) ต่างๆ ซึ่งจัดว่าเป็นพวก localized state ในการศึกษาถึงลักษณะการดูดกลืนของแสงในสารกึ่งตัวนำนั้นเราจะใช้วิธีการทางแสง เราแบ่งชนิดของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับ การตอบสนองของอิเล็กตรอนกับโฟตอนที่มาตกกระทบ ได้ 4 ประเภท ดังนี้

- (1) อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอม
- (2) วาเลนซ์อิเล็กตรอน
- (3) อิเล็กตรอนอิสระ
- (4) อิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยสารเจือปน (impurity center) หรือถูกจับด้วย lattice defect ต่างๆ

รูปที่ 2.2 แสดงการแบ่งชนิดของการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ โดยใช้แผนภูมิแถบพลังงานเป็นหลักในการกำหนดชนิดของการดูดกลืนแสง

- (ก) การดูดกลืนภายในแถบพลังงานเดียวกัน (Intraband absorption)
- การดูดกลืนของพาหะอิสระ (Free carrier absorption) (1)
 - การดูดกลืนที่ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ valley อื่น valley-to-valley transition absorption (2)



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงชนิดต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำ

- (ข) การดูดกลืนระหว่างแถบพลังงาน (interband absorption)
- การดูดกลืนพื้นฐาน (Fundamental absorption)
 - การดูดกลืนแบบตรง (Direct absorption) (3)
 - การดูดกลืนแบบไม่ตรง (Indirect absorption) (4)
 - การดูดกลืนที่ higher Interband absorption (5)
- (ค) การดูดกลืนระหว่างแถบพลังงานและ localized states
- การดูดกลืนของสารเจือปน (Impurity absorption) (6)
 - การดูดกลืนแบบ Isoelectronic trap (7)
 - การดูดกลืนของ exciton (8)
- (ง) การดูดกลืนระหว่าง localized states ด้วยกัน
- การดูดกลืนของ คู่โดเนอร์-แอกเซ็ปเตอร์ (Donor-Acceptor pair) (9)

2.1.3 ชนิดของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.1 การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ

การดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากพาหะอิสระ มีสาเหตุจากการที่เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานเดียวกันได้รับความเร่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและถูกกระเจิงจนสูญเสียพลังงานไป ถ้าความถี่ของแสงมีค่าเข้าใกล้ความถี่ที่เกิดจากเวลาผ่อนคลายของการกระเจิงของพาหะอิสระ หรือเข้าใกล้ความถี่พลาสมาของพาหะ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะพิเศษแตกต่างกัน

สมการกลศาสตร์ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานนำไฟฟ้าและได้รับสนามไฟฟ้าที่มีความถี่เชิงมุม ω จะเขียนได้ว่า

$$m_e^* \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{e}{\mu_e} \frac{dx}{dt} = -eE \exp(i\omega t) \quad (12.12)$$

โดยที่ m_e^* คือมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน μ_e คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอน และ x คือตำแหน่งของอิเล็กตรอน เทอมที่ 2 ทางด้านซ้ายของสมการที่ (12.12) แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม ($m_e^* v / \tau$) หรือแรงเสียดทาน เทอมแรกนั้นแสดงแรงเร่ง ดังนั้นผลของทั้งสองเทอมทางด้านซ้ายจึงมีค่าเท่ากับแรงจากสนามไฟฟ้าเทอมทางด้านขวามือ

จากสมการที่ (12.12) magnitude ของการสั่นของอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นตัวเลข complex (x_0) คือ

$$x_0 = \frac{eEx / m_e^*}{\omega^2 - i\omega e / \mu_e m_e^*} \quad (12.13)$$

ถ้าให้ n คือความเข้มข้นของจำนวนอิเล็กตรอน ค่า complex relative dielectric constant : ϵ_s สามารถเขียนในรูปเทอมของโพลาริเซชัน P ที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอน และในรูปของสนามไฟฟ้า E ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} \\ &= 1 - \frac{nex_0}{\epsilon_0 E} \end{aligned} \quad (12.14)$$

ถ้าแทนค่าสมการที่ (12.13) ลงในสมการที่ (12.14) และแทนค่าจินตภาพสมการที่ (12.14) ลงในสมการที่ (12.11) จะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนอิสระ การดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากโฮลอิสระในแถบพลังงานวาเลนซ์คำนวณได้โดยวิธีเดียวกัน ผลรวมทั้งหมดของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ คือ

$$\alpha_{fr} = \frac{e^3 \lambda^2}{4\pi^2 c^3 n \epsilon_0} \left(\frac{n}{m_e^* \mu_e} + \frac{p}{m_h^* \mu_h} \right) \quad (12.15)$$

ซึ่งสัญลักษณ์ห้อยท้าย e และ h หมายถึงของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ จากสมการที่ (12.15) ทำให้เราทราบว่าลักษณะพิเศษของการดูดกลืนแสงของพาหะอิสระก็คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α_{fr} แปรตรงกับควมยาวคลื่นยกกำลังสอง

2.1.3.2 กฎการเลือกในการดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน

การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่อีกแถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสง และค่าแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้นจะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎนี้เรียกว่า “กฎการอนุรักษ์พลังงาน” นอกจากกฎที่ว่าด้วยการอนุรักษ์พลังงานนี้แล้ว ยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมด้วยดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

ฮามิลโตเนียน (H) ซึ่งแสดงพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$H = \frac{1}{2m} (p + eA)^2 + V(r) \quad (12.16)$$

โดยที่ p คือโมเมนตัม และ r คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอิเล็กตรอน A คือเวกเตอร์โพเทนเชียลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าให้ j แสดงเวกเตอร์จำนวนคลื่น (Wave number Vector) ของแสงที่มีความถี่เชิงมุม ω และ e_j แสดงเวกเตอร์ของการโพลาไรเซชันเวกเตอร์โพเทนเชียล A จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} A &= A_0 e_j \cos(j \cdot r - \omega t) \\ &\equiv A_0 \frac{1}{2} e_j [\exp\{i(j \cdot r - \omega t)\} + \exp\{-i(j \cdot r - \omega t)\}] \end{aligned} \quad (12.17)$$

ถ้าให้ gauge ว่า $\nabla \cdot A = 0$ จะได้ว่า $p \cdot A = A \cdot p$ ดังสมการที่ (12.17) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$H = \frac{1}{2m} p^2 + \frac{e}{2m} (p \cdot A + A \cdot p) + \frac{1}{2m} (eA)^2 + V(r) \quad (12.18)$$

เนื่องจากค่า A นั้นมีค่าน้อยกว่าเทอมอื่นๆมาก เทอมที่มี A^2 จึงไม่ต้องพิจารณา ถ้าใช้สัญลักษณ์ว่า $p = (\hbar/i) \nabla$ และ $p^2 = -\hbar^2 \nabla^2$ สมการที่ (12.18) จะมีรูปใหม่คือ

$$\begin{aligned} H &= \underbrace{-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(r)}_{H_0} - \underbrace{\frac{ie\hbar}{m} A \cdot \nabla}_{H'} \\ &= H_0 + H' \end{aligned} \quad (12.19)$$

โดยที่ H_0 นั้นแสดงฮามิลโทเนียนกรณีไม่มีการ perturbation คือไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ H' นั้นแสดงฮามิลโทเนียนที่เกิดจาก perturbation โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการที่ (12.19) สามารถหาคำตอบได้โดยการใช้ทฤษฎีของ perturbation ที่คำนึงถึงตัวแปรเวลา ก่อนอื่นสมการคลื่นกรณีไม่มีการ perturbation คือ $H_0 \Phi = E \Phi$ นั้น มีคำตอบเป็นรูปของฟังก์ชันของ Bloch กล่าวคือ $\Phi_k(r) = \exp(ik \cdot r) \mu_k(r) / \sqrt{N}$ ในที่นี้ $\mu_k(r)$ คือฟังก์ชันที่มีคาบเท่ากับคาบของโครงผลึก ต่อไปนี้ถ้าให้ r_n เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งแสดงตำแหน่งของโครงผลึก และเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามา ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (W_{12}) ของอิเล็กตรอนจาก wave number มีค่า k_1 ไปสู่ค่า k_2 ต่อหนึ่งหน่วยเวลา แสดงได้ดังนี้

$$W_{12} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \int \varphi_{k_2}^*(r) H' \varphi_{k_1}(r) dr \right|^2 \quad (12.20)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (12.19) และฟังก์ชัน Bloch ลงในสมการที่ (12.20) และใช้เงื่อนไขการเป็นคาบของฟังก์ชัน Bloch ว่า $\mu_k(r + r_n) = \mu_k(r)$ จะได้ว่า

$$W_{12} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \frac{ie\hbar A_0}{2mN} e_j \sum_{\text{cell}} \int_{\text{unit}} \exp\{i(k_1 - k_2 + j)(r + r_n)\} \mu_{k_2}^*(r + r_n) (\nabla + ik_1) \mu_{k_1}(r + r_n) dr \right|^2 \quad \dots\dots(12.21)$$

จากสมการที่ (12.21) จะเห็นได้ว่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะนั้นมีเทอม $\sum_n \exp\{i(k_1 - k_2 + j)r_n\}$ และถ้า

$$(k_1 - k_2 + j) = 0 \quad (12.22)$$

ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะจะไม่เป็นศูนย์ นอกจากนี้ถ้าเราเปรียบเทียบว่า ค่าคงที่ของระยะห่างของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นแสงมาก เป็นที่น่าสังเกตว่าเนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าระยะห่างของโครงสร้างมาก ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็น wave number แล้ว เวกเตอร์ wave number ของแสง j จะมีค่าน้อยกว่า $|k_1 - k_2|$ มาก สมการที่ (12.22) จึงเขียนใหม่ได้ว่า $|k_1 - k_2| = 0$ ซึ่งหมายความว่า ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น ค่า wave number k ก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม $\hbar k$ ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงจะต้องคงที่เสมอ กฎข้อนี้เรียกว่า กฎแห่งการเลือกของโมเมนตัม (momentum selection rule) หรือกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

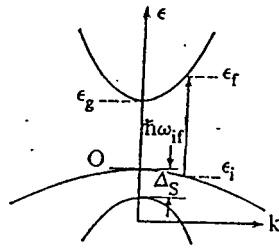
2.1.3.3 การดูดกลืนแสงแบบตรง

จะกล่าวถึงวิธีหาสมการที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $\alpha(\omega)$ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปสู่แถบพลังงานนำไฟฟ้า (กรณีที่ 3 ในรูปที่ 2) ให้นิยามของ $\alpha(\omega)$ ว่ามีค่า ตามสมการ $\alpha = -\left(\frac{dI}{dZ}\right)\left(\frac{1}{I}\right)$ ดังนั้นปัญหาจึงมีว่าจะคำนวณค่าได้อย่างไร ค่า $\alpha = -\left(\frac{dI}{dZ}\right)$ มีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและหนึ่งหน่วยเวลา จากระดับพลังงาน ϵ_i ไปสู่ ϵ_f คูณด้วยพลังงานโฟตอน $\hbar\omega$ ของแสง นั่นคือ

$$\alpha(\omega) = W_{if} \frac{\hbar\omega}{I} \quad (12.23)$$

ในที่นี้ I คือพลังงานของคลื่นแม่เหล็กที่เดินทางผ่านหนึ่งหน่วยระนาบ xy และหนึ่งหน่วยเวลา ค่าที่แท้จริงของ I คือ ค่าเฉลี่ยด้วยเวลาของเทอมจำนวนจริงของ pointing vector $E \times H$ นั่นคือ

$$I = \frac{1}{2} n \epsilon_0 \omega^2 c A_0^2 \quad (12.24)$$



รูปที่ 2.4 โมเดลแถบพลังงานแสดงการดูดกลืนแสงแบบตรง

แทนค่าสมการที่ (12.24) ลงในสมการที่ (12.23)

$$\alpha(\omega) = \frac{2\bar{h}}{c^2 A_0^2 \omega n \epsilon_0} W_{if} \tag{12.25}$$

จากสมการที่ (12.25) ถ้าเราทราบค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะ W_{if} ของอิเล็กตรอนระหว่างแถบพลังงาน เราก็จะทราบค่า $\alpha(\omega)$ ต่อจากนี้จะอธิบายวิธีการหาค่า W_{if} เราทราบแล้วว่าเมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้น จะทำให้สถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้น แต่จากกฎของการเลือกโมเมนตัม โมเมนตัมของอิเล็กตรอนก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลง ถ้าเขียนรูปอธิบายกฎการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการดูดกลืนแสงจะได้ดังรูปที่ 2.4

โคออร์ดิเนตของแถบพลังงานในรูป คือ wave number k (นั่นคือ โมเมนตัม $\hbar k$) ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจากกฎการเลือกโมเมนตัม อิเล็กตรอนจะต้องกระโดดขึ้นสู่ระดับพลังงานที่สูงในลักษณะแนวตั้งเสมอ เราเรียกการเปลี่ยนสถานะหรือการดูดกลืนแสงแบบนี้ว่า direct transition หรือ direct absorption แทนค่าสมการที่ (12.22) ลงในสมการที่ (12.21) และ $k_1=k_2=k$ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะมีค่า

$$W_{12} = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \frac{ie\hbar A_0}{2m} \right|^2 \left| e_j \left\{ \int_{\text{unit cell}} \mu_k^*(r) \nabla \mu_k(r) dr + ik \int_{\text{unit cell}} \mu_k^*(r) \mu_k(r) dr \right\} \right|^2 \tag{12.26}$$

ในสมการข้างบนนี้เทอมที่สองขวามือมีค่าน้อยกว่าเทอมแรกทางขวามือมาก ดังนั้นตามปกติความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงสถานะจะขึ้นกับผลของการอินทิกรัลในเทอมแรกเป็นสำคัญ นั่นคือจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของฟังก์ชันของ μ_k^* และ μ_k ตัวอย่างเช่น ถ้ารูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ $\mu_k^*(r)$ มีลักษณะเป็น S orbital และฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ $\mu_k^*(r)$ มีลักษณะเป็น p orbital ค่าของ $\mu_k^*(r)\nabla\mu_k^*(r)$ จะเป็นฟังก์ชันแบบคู่ ผลของการอินทิกรัลเทอมแรกจะไม่เป็นศูนย์ ทำให้ W_{12} มีค่าใดๆ ค่าหนึ่งและนั่นก็คือจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะด้วยแสง (optical transition) การเปลี่ยนสถานะที่เป็นไปได้เช่นนี้เรียกว่า 'allowed transition' แต่ถ้าหากว่าฟังก์ชันคลื่นของการเปลี่ยนสถานะ ทั้งก่อนเปลี่ยนสถานะและหลังเปลี่ยนสถานะมีลักษณะสมมาตรกัน และเป็นฟังก์ชันคู่ด้วยกัน หรือเป็นฟังก์ชันคี่ด้วยกันทั้งสอง ค่าของ $\mu_k^*(r)\nabla\mu_k^*(r)$ จะเป็นฟังก์ชันคี่ซึ่งทำให้การอินทิกรัลของเทอมแรกมีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากว่า ค่าที่ k ไม่เท่ากับศูนย์มีการเหลื่อมล้ำกันของฟังก์ชันคลื่นอันเนื่องมาจากผลของการ interact ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง การอินทิกรัลในสมการที่ (12.28) จะไม่เป็นศูนย์ ทำให้ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะมีค่าใดๆ เกิดขึ้น เราเรียกการเปลี่ยนสถานะลักษณะนี้ว่า forbidden transition

ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะแบบ forbidden transition มีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนสถานะแบบ allowed transition มาก และพบเห็นในวัสดุเพียงบางอย่างเท่านั้น เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบ direct allowed transition : α_{du} ได้ว่า

$$\alpha_{du} = \frac{e^2 (2m_r)^{3/2} |M_{if}|^2}{2\pi m^2 n c \epsilon_0 \hbar^2 \omega} (\hbar\omega - \epsilon_g)^{1/2} \quad (12.27)$$

2.2.3.4 การดูดกลืนแสงแบบไม่ตรง

หัวข้อก่อนนี้คือการดูดกลืนแสงแบบตรง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบพลังงานนำไฟฟ้า โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า wave number ซึ่งเกิดขึ้นในวัสดุที่ยอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ อยู่ในแนวตั้งตรงกับก้นต่ำสุดของแถบพลังงานนำไฟฟ้า แต่ในวัสดุบางอย่างถึงแม้ว่ายอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์จะไม่อยู่ในแนวตั้ง (ของ space k) ตรงกับก้นต่ำสุดของแถบพลังงานนำไฟฟ้า เราก็ยังสามารถสังเกตเห็นโครงสร้างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนเท่ากับความแตกต่างพลังงานของ (ϵ_{pi}) แถบพลังงานทั้งสอง การดูดกลืนแสงเป็นไปได้โดยอิเล็กตรอนจะรับหรือคายพลังงานโฟนอน (ϵ_p) ให้กับโครงผลึก หรือ localized states ซึ่งการรับหรือคายพลังงาน ϵ_p ของโฟนอนนี้จะช่วยให้เป็นไปได้ตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม กล่าวคือเราจะได้สมการว่า

2.2.3.5 การดูดกลืนแสงของ Exciton

ในหัวข้อก่อนๆ เราได้กล่าวไว้ว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงาน (interband transition) อิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นสู่แถบพลังงานนำไฟฟ้าและกลายเป็นพาหะอิสระ ส่วนโฮลที่เหลืออยู่ในชั้นแถบพลังงานวาเลนซ์ก็จะกลายเป็นพาหะอิสระเช่นกัน พาหะอิสระเหล่านี้จะช่วยให้สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเป็น “ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง (photo-conductive effect)” นอกจากปรากฏการณ์เช่นนี้แล้ว บางครั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงไม่สามารถกระโดดขึ้นไปถึงแถบพลังงานนำไฟฟ้า เพราะถูกแรงคูลอมบ์จากโฮลดึงดูดตัวไว้ ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปได้แค่ระดับพลังงานใกล้เคียงกับแถบพลังงานนำไฟฟ้า กล่าวคือหยุดอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามนั่นเอง คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ดึงดูดกันด้วยแรงคูลอมบ์นี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นอิสระ ทำให้ไม่มีผลต่อการนำไฟฟ้า เราเรียกสภาพคู่อิเล็กตรอนและโฮลในลักษณะนี้ว่า “exciton” การดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลด้วยแรงคูลอมบ์นี้เปรียบเสมือนเป็นอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งพลังงานดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสถูกการ quantization เป็นระดับพลังงานต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ส่วนรูปที่ 2.5 (ข) แสดงตัวอย่างระดับพลังงานของ exciton ซึ่งปรากฏอยู่ในแถบพลังงาน สภาพเป็น exciton นี้เป็นสภาพที่มีพลังงานอยู่ในตัว (ที่ได้รับจากแสง) จึงจัดว่าเป็นสภาพที่อยู่ในสถานะกำลังกระตุ้น (exciton states) รูปที่ 2.5 (ค) แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจาก exciton exciton ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนมีค่าใกล้เคียงค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) เรียกว่าเป็นแบบ Frenkel ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลึกหลายเท่าถึงหลายสิบท่า เรียกว่าเป็นแบบ Wannier

ถ้าให้ ϵ เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของผลึก r เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล แรงคูลอมบ์จะมีค่าเท่ากับ $-e^2 / 4\pi\epsilon r$ ดังนั้นตามที่แสดงในรูปที่ 12.5(ข) ระดับพลังงาน ϵ_n ซึ่งนับจากขอบแถบพลังงานนำไฟฟ้าลงมา มีค่า

$$\epsilon_n = \frac{-m_r e^4}{32\pi^2 \epsilon^2 \hbar^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (12.31)$$

โดยที่ m_r คือ reduced effective mass ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล n คือตัวเลขจำนวนเต็มบวก จากสมการที่ (12.31) ทำให้ระดับพลังงานของ exciton ในรูปที่ 12.5 (ค) มีลักษณะเป็นยอดแหลม ในทางปฏิบัติความแตกต่างของพลังงานจากขอบแถบพลังงานนำไฟฟ้าลงมาถึงชั้น exciton ที่ $n = 1$ มีค่าน้อยมากเพียงไม่กี่ meV ดังนั้นการทดลองวัดคุณสมบัติของ

exciton จะต้องกระทำที่อุณหภูมิต่ำมากๆ จึงจะเห็นยอดแหลมของสเปกตรัมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของ exciton

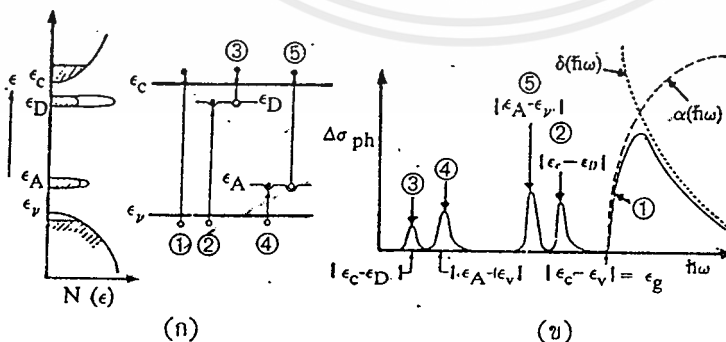
นอกจาก exciton ที่อยู่เป็นอิสระแล้ว exciton อาจถูกจับให้อยู่ในระดับชั้นพลังงานของสารเจือปนก็ได้

2.1.4 ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง

เมื่อฉายแสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนจากแสงและอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานต่ำไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า ซึ่งอาจเป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานนำไฟฟ้า หรือระหว่างแถบพลังงานการนำและแถบพลังงานวาเลนซ์กับ localized states ที่อยู่ภายในแถบพลังงานต้องห้าม เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น ที่ระดับเดิมของอิเล็กตรอนนั้นจะเหลือเป็นช่องว่าง หรือที่เรียกว่า "โฮล" อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าและโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์จะเป็นพาหะอิสระที่ช่วยให้การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำดีขึ้น เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า "ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductive effect)" ปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสงมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ

(1) intrinsic photo-conductivity ซึ่งเกิดจากคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานนำไฟฟ้า

(2) extrinsic photo-conductivity ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานของสารเจือปนขึ้นไปสู่แถบพลังงานนำไฟฟ้า หรือเกิดจากการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบพลังงานวาเลนซ์ให้ขึ้นไปสู่ชั้นระดับพลังงานของสารเจือปน และเหลือโฮลไว้ในแถบพลังงานวาเลนซ์ รูปที่ 2.6 แสดงการเกิด photo-conductivity ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.6 (ก) การเกิด photo-conduction effect

1 : intrinsic photo-conductivity

2-5 : extrinsic photo-conductivity

(ข) สเปกตรัมของ photo-conductivity

ถ้าให้ n_0 และ p_0 คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในสภาพสมดุล และถ้าให้ Δn และ Δp คือปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและของโฮลที่เพิ่มขึ้น (excess carrier) อันเนื่องจากแสง สภาพนำไฟฟ้าขณะมีแสง (σ) มีค่าเท่ากับ

$$\sigma = e(n_0 + \Delta n)\mu_e + e(p_0 + \Delta p)\mu_h \tag{12.32}$$

ในทางปฏิบัติในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง เรามักจะแสดงผลด้วยอัตราส่วนระหว่างส่วนที่เพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าอันเนื่องจากแสง ($\Delta\sigma_{ph}$) และสภาพนำไฟฟ้าเมื่อไม่มีแสง (σ_0) อัตราส่วนของ $\Delta\sigma_{ph} / \sigma_0$ มีค่าดังนี้

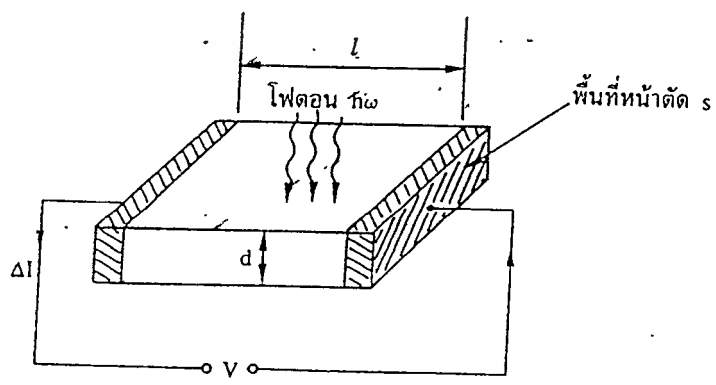
$$\frac{\Delta\sigma_{ph}}{\sigma_0} = \frac{\Delta n\mu_e + \Delta p\mu_h}{n_0\mu_e + p_0\mu_h} \tag{12.33}$$

ถ้าเป็นการกระตุ้นแบบ intrinsic photo-conductivity ระหว่างแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานนำไฟฟ้า ค่า Δn จะมีค่าเท่ากับ Δp และถ้าให้ $b = \mu_e / \mu_h$ สมการที่ 12.33 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{\Delta\sigma_{ph}}{\sigma_0} = \frac{\Delta n(1+b)}{n_0b + p_0} \tag{12.34}$$

ถ้าให้ τ_e และ τ_h คืออายุขีวิต (life time) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ และ g คือจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงในหนึ่งหน่วยเวลา จะได้ว่า $\Delta n = g\tau_e$ และ $\Delta p = g\tau_h$ ดังนั้น

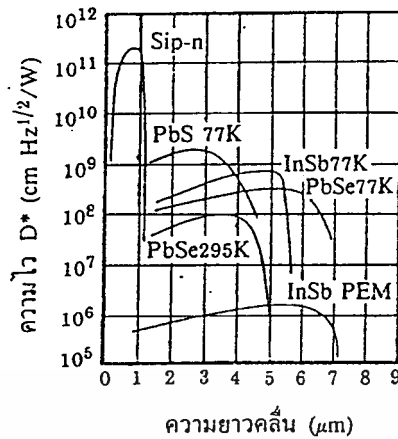
$$\Delta\sigma_{ph} = eg(\mu_e\tau_e + \mu_h\tau_h) \tag{12.35}$$



รูปที่ 2.7 ลักษณะตัวอย่างวัสดุใช้วัด photo-conductivity (ถ้าความหนา d มีค่าน้อยกว่า

penetration depth δ ของแสงจะทำให้เกิด Dember effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมความไวแสงของวัสดุต่างๆ

ถ้าให้สารกึ่งตัวนำมีขนาดตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 และปล่อยแรงดันไฟฟ้า V เข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ปริมาณส่วนที่เพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า ΔI อันเนื่องมาจากแสง (photocurrent) คือ

$$\Delta I = \frac{\Delta \sigma_{ph} S V}{l} = e g l S (\mu_e \tau_e + \mu_h \tau_h) \frac{V}{l^2} \quad (12.36)$$

โดยที่ $g l S$ คือจำนวนทั้งหมดของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกผลิตขึ้นในวัสดุทั้งก้อน $l^2 / V \mu_e = l / \mu_e E$ และ $l^2 / V \mu_h = l / \mu_h E$ คือเวลาที่อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ใช้ในการเดินทางจากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปสู่อีกขั้วหนึ่ง (transit time) ถ้าให้ transit time ของอิเล็กตรอนและโฮลแสดงด้วย T_e และ T_h ตามลำดับ จากสมการที่ 12.36 จะได้

$$\frac{\Delta I}{e g l S} = \frac{\tau_e}{T_e} + \frac{\tau_h}{T_h} = G \quad (12.37)$$

โดยที่ G มีชื่อเรียกว่า photo-conductive gain ซึ่งแสดงค่าให้เราทราบว่าคู่อิเล็กตรอนโฮลที่ถูกผลิตด้วยแสงนั้น ถูกนำไปใช้เป็น photocurrent ได้มากน้อยเพียงไร ต่อไปลองพิจารณาคุณลักษณะสเปกตรัมของ photocurrent เนื่องจากปรากฏการณ์ photoconductive เกิดจากการเปลี่ยนสถานะ (transition) ของพาหะระหว่างแถบพลังงานกับแถบพลังงาน หรือระหว่างแถบพลังงานกับระดับ localized ด้วยการกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนของแสง ดังนั้น photocurrent จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนนั้นมีค่ามากกว่าความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของแถบพลังงานทั้งสอง หรือระหว่างแถบพลังงานกับระดับ localized states นั่นคือ มีค่า threshold energy ของโฟตอน $\hbar \omega$ เนื่องจากความสามารถในการเปลี่ยนสถานะนั้นขึ้นกับลักษณะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

density of states ของแถบพลังงานหรือระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงคาดได้ว่า สเปกตรัมของ photocurrent จะแปรตรงกับ density of states แต่ในทางปฏิบัติจะมีแฟกเตอร์อื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น มีการรวมตัวของพาหะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ และเมื่อค่าพลังงานโฟตอน เพิ่มขึ้น ค่า penetration depth ของแสงก็ลดลงด้วย ทำให้ความหนาแน่นของพาหะที่เกิดจากแสง ลดลง ดังนั้นโดยทั่วไปสเปกตรัมของ photocurrent ที่วัดได้จริงๆ จึงมีลักษณะดังเช่นรูปที่ 2.6 (ข) รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของ photo-current ของสารกึ่งตัวนำบางชนิด

12.1.5 ปรางุการณ์โฟโตโวลตาอิก

การฉายแสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดปรางุการณ์ photoconductive และถ้าหากว่าภายในสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดความไม่สมดุลของจำนวนของพาหะตามสถานที่หรือมี สนามไฟฟ้าอยู่ เช่นที่บริเวณรอยต่อ p-n จะทำให้พาหะคืออิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงไหล ด้วยการ diffusion หรือการ drift และก่อนให้เกิดพลังงานไฟฟ้าออกมา เราเรียกปรางุการณ์เช่นนี้ ว่า photo-voltaic effect

12.1.5.1 ปรางุการณ์เดมเบอร์

ถ้าให้สารกึ่งตัวนำมีลักษณะดังเช่นรูปที่ 7 และความหนา d นั้นมีค่าน้อยกว่า penetration depth : δ ของแสงมาก การส่องแสงลงในทิศทางตามรูปที่ 12.7 จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างที่ผิวด้านบนและที่ผิวด้านล่าง เราเรียกปรางุการณ์นี้ว่า “ปรางุการณ์เดมเบอร์” (Dember effect) ปรางุการณ์นี้เกิดจากการที่เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกผลิตด้วยแสงที่บริเวณผิวด้านบนและพยายามแพร่กระจายเข้าสู่ส่วนลึกของสารกึ่งตัวนำ แต่จากการที่สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอิเล็กตรอนและของโฮลมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดการแบ่งขั้วขึ้นที่ผิวด้านบนและล่าง

ถ้าให้ Δn และ Δp คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและของโฮลที่ถูกผลิตด้วยแสงที่บริเวณผิวด้านบนตามลำดับ และ E_0 คือสนามไฟฟ้าเดมเบอร์ เราจะเขียนสมการการแพร่กระจายในทิศทางความลึก x ของวัสดุ ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} J_n &= e(n_0 + \Delta n)\mu_e E_D + eD_e \frac{d\Delta n}{dx} \\ J_p &= e(p_0 + \Delta p)\mu_h E_D + eD_h \frac{d\Delta p}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (12.38)$$

โดยที่ n_0 และ p_0 คือ ความหนาแน่นของพาหะในสถานะสมดุล และในสถานะสมดุลนี้ $\Delta n = \Delta p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในชั้นเรียนเท่านั้น และเนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ดังนั้น เราจึงสามารถนำเอาสมการ (12.38) ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณได้ทันทีโดยไม่ต้องคำนึงถึงทิศทางของกระแสไฟฟ้าไหล อย่างไรก็ตามถ้าหากเราต้องการทราบค่าของ Δn และ Δp ในกรณีที่แสงส่องเข้ามาในทิศทางตามความลึก x ของวัสดุ เราจะต้องแก้สมการ (12.38) ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการแก้สมการ (12.38) นี้จะทำได้โดยการใช้สมการ (12.38) แทนค่าของ J_n และ J_p ในสมการ (12.38) แล้วจึงแก้สมการ (12.38) ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการแก้สมการ (12.38) นี้จะทำได้โดยการใช้สมการ (12.38) แทนค่าของ J_n และ J_p ในสมการ (12.38) แล้วจึงแก้สมการ (12.38) ใหม่อีกครั้งหนึ่ง

$$J = J_n + J_p = 0 \quad (12.39)$$

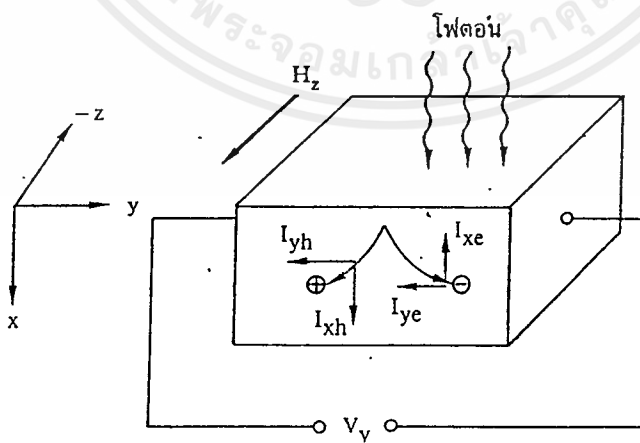
เมื่อหาผลเฉลยของสมการที่ (12.39) และคำนวณค่าแรงดันเดมเบอร์ V_D โดยใช้สูตรของอินสไตน์ $D = k_B T / \mu e$

$$V_D = \int_0^d E_D dx = \frac{k_B T}{e} \left(\frac{b-1}{b+1} \right) \ln \left\{ 1 + \frac{(b+1)\Delta n}{bn_0 + p_0} \right\} \quad (12.40)$$

โดยที่ b คืออัตราส่วนระหว่างความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้า $\mu_e = \mu_h$ กล่าวคือ $b = 1$ จะทำให้ $V_D = 0$ แต่ถ้า $b \neq 1$ ก็จะได้ค่า V_D ซึ่งมีค่าน้อยใกล้เคียง $k_B T / e$

12.1.5.2 ปฏิกิริยาการเกิด PEM (Photo-Electro-Magnetic Effect)

ในสารกึ่งตัวนำที่เกิดปรากฏการณ์เดมเบอร์ ถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะทำให้กระแสไฟฟ้าแพร่กระจายที่เกิดจากปรากฏการณ์เดมเบอร์นั้นได้รับแรงลอเรนซ์ และเกิดแรงดันของ Hall ขึ้น เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ PEM (Photo-Electro-Magnetic)”



รูปที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์ PEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเคมเบอร์และมุมของฮอลล์ θ มีค่าน้อย ทำให้ $\theta = \tan \theta = \mu H_z$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเคมเบอร์ที่เกิดจากการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนและโฮลเป็นระยะทาง L (diffusion Length) จะถูกสนามแม่เหล็กบังคับให้บิดเบนไปทางแกน y เป็นระยะทาง $\mu H_z L$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้า PEM (I_{PEM}) ที่ไหลในหนึ่งหน่วยระยะทางคือ

$$\begin{aligned} I_{PEM} &= egH_z (\mu_e L_n + \mu_h L_p) \\ &= egH_z \left(\frac{k_B T}{e} \right)^{1/2} (\mu_e^{3/2} \tau_e^{1/2} + \mu_h^{3/2} \tau_h^{1/2}) \end{aligned} \quad (1241)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า PEM จะมีค่าดังนี้

$$V_{PEM} = \frac{egH_z (\mu_e L_n + \mu_h L_p)}{S} \rho \quad (12.42)$$

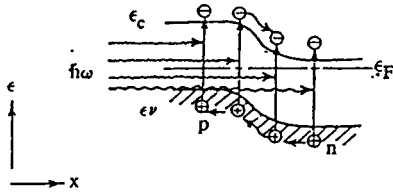
โดยให้ ρ เป็น resistivity ของสารกึ่งตัวนำ และ S เป็นพื้นที่หน้าตัด

จากสมการที่ 12.42 จะเห็นได้ว่า ถ้าวัสดุมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงสูงและความคล่องตัวก็มีค่าสูงด้วย วัสดุนั้นจะแสดงผลของปรากฏการณ์ PEM ได้เด่นชัดด้วย เช่น InSb InAs ประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กได้

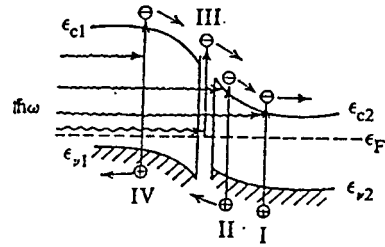
2.1.5.3 ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

ที่บริเวณรอยต่อ p-n ในสารกึ่งตัวนำ หรือที่ grain boundary ซึ่ง เป็นรอยต่อหรือผิวที่เกิดจากวัสดุที่มีค่า electron affinity หรือระดับเฟอร์มิที่แตกต่างกัน จะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อหรือที่ผิว ดังนั้นถ้าเราส่องแสงลงที่รอยต่อหรือผิวนั้น พาหะที่เกิดจากแสงคืออิเล็กตรอนและโฮล ก็จะถูกสนามไฟฟ้านั้นแยกตัวให้วิ่งไป ทิศทางตรงข้ามกัน

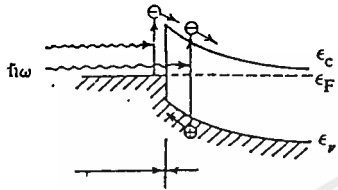
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



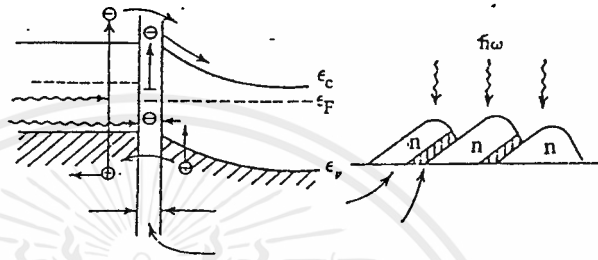
(ก) Photovoltaic effect ในรอยต่อ p-n



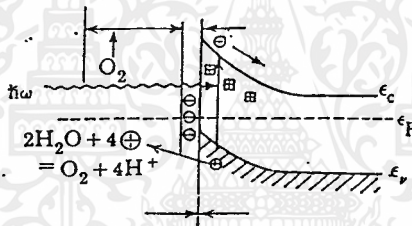
(ข) Photovoltaic effect ในรอยต่อ hetero-junction



(ค) Photovoltaic effect ในรอยต่อ metal-semiconductor schottky barrier



(ง) Photovoltaic effect ในรอยต่อที่มี grain boundary



(จ) Photovoltaic effect ในรอยต่อ semiconductor-electrolysis

รูปที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์ photovoltaic ชนิดต่างๆ

ทำให้เกิดการแตกเป็นขั้วประจุไฟฟ้าและเกิดแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อหรือผิวของวัสดุชนิดต่างๆ ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกได้ รูป (ก) เป็นรอยต่อของ p-n แบบ homojunction รูป (ข) เป็น p-n heterojunction รูป (ค) เป็น Schottky-barrier รอยต่อแบบ (ก) และ (ข) ถูกนำไปใช้งานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อย่างกว้างขวาง ในกรณี (ง) เป็นรอยต่อระหว่างเม็ดผลึกด้วยกัน ซึ่งให้แรงดันไฟฟ้าสูงแต่มีความต้านทานอนุกรมสูง จึงได้กระแสไฟฟ้าน้อย ประสิทธิภาพต่ำ ได้แก่ วัสดุพวก ZnO CdS ZnSe ถูกนำไปใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับคลื่นแสง

นอกจากรอยต่อระหว่างวัสดุของแข็งด้วยกันแล้ว อาจเป็นรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวที่นำไฟฟ้าก็ได้ ถ้าวัสดุทั้งสองมีค่า electrochemical potential ต่างกัน ก็จะเกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อได้ ถ้าวัสดุของแข็งมีความไวต่อแสง (เช่น สารกึ่งตัวนำ) และในของเหลวนั้นเติมสารที่ไวต่อแสง (dye) ลงไป เมื่อฉายแสงลงสู่รอยต่อนั้น ก็จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงพลังงานจากแสงเป็นไฟฟ้า หรือจากแสงเป็นพลังงานเคมีได้ รูป (จ) แสดงตัวอย่างลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิด n และของเหลวอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราจุ่ม GaP ชนิด n ลงไปในน้ำยาของสารละลาย NaSO_4 (0.1 mol/l) จะเกิดความต่างศักย์ระหว่างวัสดุทั้งสอง สารละลายที่ใกล้ผิวสารกึ่งตัวนำจะมีประจุเป็นลบ เกิดเป็นชั้นที่เรียกว่า Helmholtz ดังนั้นที่ผิวของ GaP ก็จะกลายเป็น space charge layer ที่เกิดจาก ionized donor ประจุบวก และที่ผิวนั้นก็กลายเป็น inversion layer ชนิด p ในสภาพเช่นนี้ถ้าเราส่องแสงที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานของ GaP ลงสู่รอยต่อนี้ ก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลและแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้ ปรากฏการณ์นี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเปียก และทำปฏิกิริยา photo-electrolytic reaction ซึ่งถูกค้นพบโดย Honda และ Fujishima และมีชื่อเรียกว่า Honda-Fujishima Effect

โดยสรุปแล้วปฏิกิริยาหรือปรากฏการณ์โฟโตโวลทาอิกนี้มีความสำคัญมาก เพราะสามารถนำไปใช้งานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์และสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดต่างๆ ได้

2.2 ชนิดและคุณสมบัติของรีเลย์

เราอาจจะให้คำจำกัดความของรีเลย์ ได้ดังนี้

รีเลย์ (Relay) คือ อุปกรณ์ที่วัด หรือรับสัญญาณควบคุม และต่อจากนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้วในวงจรไฟฟ้าทางออก (output circuit) หนึ่งวงจร หรือมากกว่า

รีเลย์ป้องกัน (Protective Relay) คือ รีเลย์ที่จะทำงานเมื่อเกิดภาวะผิดปกติในระบบกำลังงานไฟฟ้า และจะไปควบคุมไคตัดวงจรเพื่อให้ตัดวงจรแยกส่วนที่เสีย (คือส่วนที่มีการลัดวงจร) ออกจากระบบ โดยให้มีการขาดหายในด้านบริการของระบบ (service) น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

โดยปกติค่าต่างๆของระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าของแรงดัน รีเลย์เป็นเครื่องมือที่จะทำงานเมื่อสถานะในวงจรไฟฟ้าหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ในทำนองที่จะทำให้การทำงานของเครื่องอุปกรณ์ หรือเครื่องจักรของวงจรเดียวกัน หรือวงจรอื่นเปลี่ยนแปลงไปด้วย รีเลย์ในยุคแรกๆ มักจะเป็นแบบไฟฟ้า-กล (electromechanical) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายเป็นเวลานาน จนกระทั่งในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่มาก ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างและการทำงานที่ง่าย และทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ รีเลย์แบบนี้เป็นที่นิยมใช้ในระบบกำลังงานไฟฟ้า แม้กระทั่งในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้อยู่

ได้เคยมีการสร้างรีเลย์ และระบบรีเลย์แบบที่ใช้หลอดสุญญากาศ (vacuum tube) ขึ้นมาเหมือนกัน แต่โดยมากมักไม่นิยมใช้ในระบบกำลังงานไฟฟ้า เนื่องจากมีความไม่แน่นอนในการทำงาน ซึ่งบางครั้งก็เนื่องจากหลอดใหม่ หรือลักษณะการทำงานและสมรรถนะ (performance characteristics) เปลี่ยนแปลงไป ทำให้การใช้รีเลย์แบบนี้ไม่ค่อยเหมาะสมสำหรับใช้ระบบกำลังงานไฟฟ้า

ในช่วงปีหลังๆนี้ได้มีการพัฒนา และสร้างรีเลย์แบบสเตติก (static) หรือโซลิตสเทท ซึ่งเป็นที่ยอมรับ และนิยมใช้กันมากขึ้นเรื่อยๆ ได้มีการออกแบบวงจรให้มีลักษณะการทำงานที่ไม่ต้องขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะการทำงานของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงไป อันสืบเนื่องมาจากอุณหภูมิเปลี่ยนหรือเนื่องจากอายุในรีเลย์ และระบบรีเลย์แบบนี้อาจจะทำให้เวลาทำงานสนองตอบสั้นเท่าไรก็ได้ตามที่ต้องการ คือ ชิ้นส่วน หรือส่วนประกอบพื้นฐานส่วนใหญ่ทำงานได้เร็วมาก บางครั้งเร็วเกินไปจนต้องเพิ่มวงจรถ่วงเวลา เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานผิดพลาด อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ ซึ่งเกิดขึ้นในวงจรกำลังไฟฟ้า การใช้รีเลย์ในการทำงานแบบต่างๆในระบบป้องกันนั้น อาจจะทำให้ได้โดยใช้วงจรแบบโซลิตสเททแบบต่างๆ ได้หลายแบบด้วยกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะแสดงวงจรแบบโซลิตสเททหลายๆ ที่ใช้ในการป้องกันแต่ละแบบได้ แต่อย่างไรก็ตามในที่นี้ก็จะให้ตัวอย่างบางตัวอย่างไว้โดยสังเขป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการในการป้องกันวงจรในระบบกำลังงานไฟฟ้า ไม่ขึ้นอยู่กับแบบหรือชนิดของรีเลย์ที่ใช้เป็นต้นว่า

2.2.1 ระบบคอนแทกของรีเลย์ (Relay Contact System)

ในรีเลย์แบบไฟฟ้ากล กลไกที่ใช้ทำงานจะเป็นตัวไปทำให้คอนแทกของรีเลย์ปิดหรือเปิด และเมื่อพูดว่ารีเลย์ทำงานจะหมายความว่า รีเลย์ปิดหรือเปิดคอนแทกแล้วแต่กรณี รีเลย์ส่วนใหญ่จะมีสปริงดึงไว้ หรือใช้น้ำหนักตัวเองถ่วงไว้ เพื่อจะได้กลับคืนสู่สภาพเดิม เมื่อค่าเปลี่ยนแปลง ที่ทำให้มันทำงานนั้นหมดไป

คอนแทกในรีเลย์มี 2 ชนิด คือ คอนแทกชนิดที่โดยปกติเปิดอยู่ (เรียกว่า normally open or make contact หรือคอนแทกแบบ a) และคอนแทกชนิดที่โดยปกติปิดอยู่ (เรียกว่า normally closed or break contact หรือ คอนแทกแบบ b)

เมื่อรีเลย์ทำงานโดยคอนแทกแบบ a หรือเปิดคอนแทกแบบ b จะเรียกว่า รีเลย์ทำงานหรือพิคอัพ (pick up) และค่าต่ำสุดที่จะทำให้รีเลย์ทำงาน (เมื่อค่อยๆเพิ่มค่าจากศูนย์ขึ้นไป) เรียกว่า “ค่าทำงาน” หรือ “ค่าพิคอัพ” ของรีเลย์

เมื่อรีเลย์ทำงานโดยคอนแทกแบบ a เปิดกลับไปยังตำแหน่งหยุดหรือรีเซท หรือคอนแทกแบบ b ปิด จะเรียกว่ารีเลย์ “คืนสู่ตำแหน่งเดิม” และค่าสูงสุดที่จะทำให้รีเลย์ทำเช่นนั้น (เมื่อค่อยๆลดจากค่าพิคอัพลงมา) จะเรียกว่า “ค่าสู่ตำแหน่งเดิม” ของรีเลย์

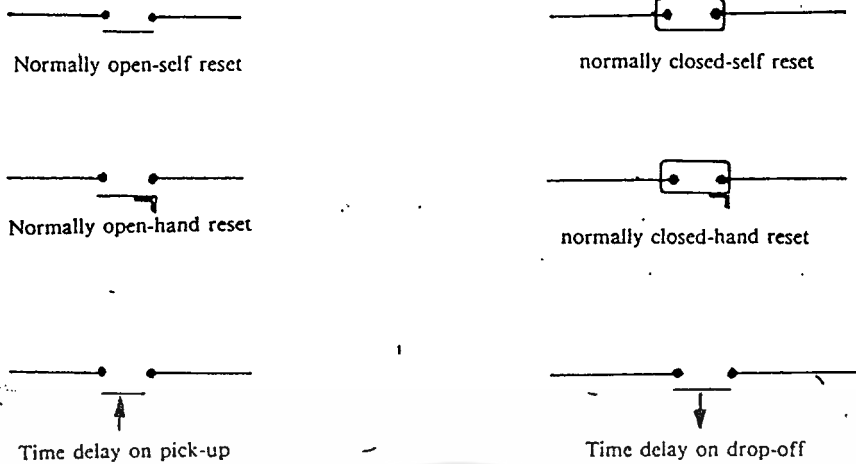
เมื่อรีเลย์เปิดคอนแทก a แต่ไม่คืนสู่ตำแหน่งเดิม เราจะเรียกว่ารีเลย์หลุด (drop-out) และค่าสูงสุดที่ทำให้เกิดเช่นนี้จะเรียกว่า ค่าหลุด หรือค่าดรอปเอาท์

คอนแทกของรีเลย์อาจจะเป็นแบบคืนสู่ตำแหน่งเดิมเอง เรียกว่าคืนตัวเอง (self reset) หมายความว่า คอนแทกจะอยู่ในตำแหน่งที่ทำงาน (เปิด หรือ ปิด) เฉพาะเมื่อมีค่าควบคุม (controlling quantity) เช่น กระแสหมดไป คอนแทกก็จะกลับคืนสู่ที่เดิมเอง

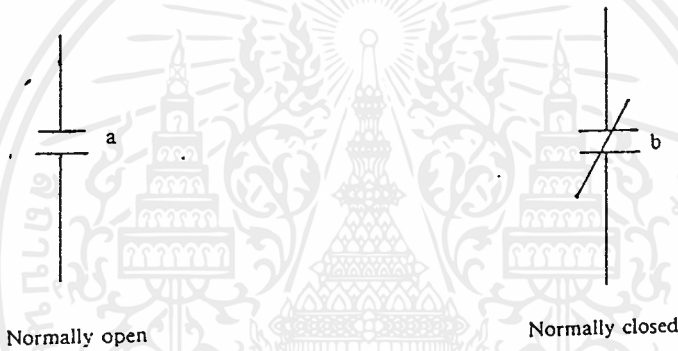
คอนแทกอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ต้องใช้มือ หรือ ไฟฟ้าทำให้กลับสู่ตำแหน่งเดิม คอนแทกแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำงานเมื่อค่าที่ควบคุมมีค่าถึงค่าๆ หนึ่งแล้ว ถึงแม้ว่าค่านั้นจะหายไป คอนแทกก็ยังอยู่ในตำแหน่งนั้น จะต้องใช้มือหรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดึงมันกลับมาสู่ตำแหน่งเดิม

รีเลย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการป้องกันวงจร จะเป็นแบบที่คืนสู่ตำแหน่งเดิมเอง แต่ถ้าต้องการก็อาจจะทำให้เป็นแบบที่ต้องใช้มือดึงกลับได้ โดยใช้อุปกรณ์ช่งบางอย่าง

สำหรับรีเลย์แบบที่ต้องใช้มือ หรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้าดึงกลับนั้น มักจะใช้เมื่อจำเป็น ต้องมีสัญญาณต่อเนื่อง หรือต้องการให้อยู่ในสภาวะล็อกไว้ (lock-out)



รูปที่ 2.11 คอนแทคของรีเลย์



รูปที่ 2.12 คอนแทคของรีเลย์

รูปที่ 2.11 แสดงคอนแทคแบบต่างๆ ซึ่งปกติจะเขียนไว้ในตำแหน่ง ที่มันยังไม่ทำงาน (un-operated หรือ de-energized) ไม่ว่าในการทำงานตามปกติมันจะอยู่ในตำแหน่งพิคอัพ แต่ในแผนภูมิ (Diagram) จะเขียนคอนแทคอยู่ในตำแหน่งเดิม คือในตำแหน่งไม่พิคอัพ ในบางกรณีคอนแทคอาจเขียนเป็นดังรูปที่ 2.12

รีเลย์ที่ใช้ในการป้องกันวงจร โดยมากมักจะมีหน้าที่ปลดปล่อย หรือ ทริพ ไกต์ดวงจร โดยที่กลไกในการปลดปล่อย หรือ ทริพ อาจจะเป็นแบบขดลวดโซลินอยด์ (solenoid) และมีแกนเหล็ก ซึ่งจะปลดสลัก (latch) โดยตรง ในกรณีที่กลไกตัดดวงจรเป็นแบบลมอัดแรง (air-blast หรือ pneumatic) อาจใช้แบบลิ้น (valve) ซึ่งจะทำงานโดยระบบไฟฟ้า รีเลย์อาจจะไปบังคับ (energize) วงจรทริพหรือขดลวดทริพ (tripping coil) โดยตรง หรืออาจจะบังคับรีเลย์ช่วย หรือ ออกซิเลียรี (auxiliary relay) แล้วแต่ค่ากำหนด (rating) ของขดลวด และจำนวนวงจรที่บังคับ

รีเลย์เป็นเครื่องวัดที่เที่ยงตรง ดังนั้นคอนแทคของมันจึงไม่ควรทำหน้าที่ตัด หรือ ต่อดวงจรในค่ากระแสสูงๆ รีเลย์แบบดูดแกนเหล็ก (attracted armature) ซึ่งจะรวมลักษณะของเครื่องวัด

และคอนแทคเตอร์ (contactors) เข้าไว้ด้วยกัน จึงมีลักษณะอยู่ระหว่างกลางของเครื่องสองแบบนี้ ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่า ถ้าออกแบบให้ก่อนไปทางคอนแทคเตอร์ รีเลย์ก็อาจจะตัดต่อวงจรแบบคอนแทคเตอร์ได้พอสมควร

รีเลย์แบบอื่น ส่วนใหญ่จะมีแรงกระทำที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ เมื่อรีเลย์อยู่ในตำแหน่งที่ปรับไว้ แรงไฟฟ้า-กลจะถูกต้านไว้โดยแรงยึด ซึ่งกรณีนี้ก็จะจำกัดความสามารถในการปิดวงจรของคอนแทคไปมาก ถ้ามีคอนแทคหลายๆตัวในเครื่องเดียวกันก็จะยิ่งยากที่จะปิดคอนแทคพร้อมกันหลายๆตัว โดยเฉพาะถ้าปรับแนวไม่ดี ดังนั้นจึงมักจะไม่ค่อยใช้คอนแทคหลายๆคู่ และโดยปกติมักจะใช้คอนแทคเตอร์เข้าช่วยเพื่อจะตัด หรือต่อวงจร ถึงแม้ว่าในบางกรณีจะใช้รีเลย์ปิด-เปิดวงจรที่ทริพไกต์ดวงจรขนาดเล็กโดยตรง (โดยมากจะใช้เป็นแบบดูดแกนเหล็ก) ซึ่งติดตั้งในกล่องเดียวกับรีเลย์ที่วัด

2.2.2 รีเลย์แบบต่างๆ

รีเลย์อาจจะออกแบบให้ทำงานสนองตอบค่าอะไรก็ได้ ดังนั้นรีเลย์จึงมีหลายแบบ แต่โดยทั่วไปแล้วมักแบ่งออกเป็นดังนี้

1. แบบดูดแกนเหล็ก (attracted armature)
2. แบบขดลวดเคลื่อนที่ (moving coil)
3. แบบเหนี่ยวนำ (induction)
4. แบบความร้อน (thermal)
5. แบบทำงานโดยมอเตอร์ (motor operated)
6. แบบกล (mechanical)
7. แบบเครื่องขยายแม่เหล็ก (magnetic amplifier)
8. แบบเทอร์โม ไม โอนิก (thermionic)
9. แบบสารกึ่งตัวนำ (semiconductor)
10. แบบโฟโตอิเล็กตริก (photo-electric)

บางครั้งอาจแบ่งออกเป็นเพียง 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. แบบไฟฟ้า-กล (electromechanical) ซึ่งรวมแบบ 1 ถึงแบบ 6
2. แบบสแตติก (static-relay) ซึ่งรวมแบบ 7 ถึงแบบ 10

2.2.3 รีเลย์แบบไฟฟ้า-กล

(Electromechanical Relays)

รีเลย์แบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายที่สุดในปัจจุบัน คือเป็นแบบที่มีคอนแทกเคลื่อนที่ได้ (moving contacts) ซึ่งจะเคลื่อนไปปิด หรือเปิดวงจรไฟฟ้าหนึ่งวงจร หรือมากกว่า โดยมีคอนแทกแบบตรึงอยู่กับที่ (fixed contacts) รอรับอยู่ โดยปกติอุปกรณ์ประเภทนี้จะอยู่เฉยๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้า หรือค่าอื่นเกิดขึ้น จึงจะเคลื่อนตัวไปปิดหรือเปิดวงจร

โดยทั่วไปมักจะแบ่งรีเลย์นี้ออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานของมัน คือ

1. รีเลย์แบบอาศัยแรงดึงดูดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
(electromagnetic attraction)
2. รีเลย์แบบอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
(electromagnetic induction)

นอกจากสองแบบใหญ่ๆ นี้แล้ว ยังมีรีเลย์แบบใช้ความร้อน แบบทำงานโดยมอเตอร์ และแบบกล

2.2.3.1 รีเลย์แบบอาศัยแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

หลักการทำงาน

แรงของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดูดส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของรีเลย์ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับฟลักซ์ในช่องว่าง (air gap) ยกกำลังสอง และพื้นที่หน้าตัดให้ผล (effective area) ของขั้วแม่เหล็ก และถ้าคิดว่าแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานในช่วงที่ไม่อิ่มตัว แรงดึงดูดนี้ก็จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสที่ไหลในขดลวดของแม่เหล็กไฟฟ้ายกกำลังสอง และถ้าคิดแรงเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจจะเป็นน้ำหนักของแกนเหล็ก หรือสปริง (K_2) จะได้สมการ

$$F = K_1 I^2 - K_2 \quad (12.43)$$

F = แรงสุทธิ (net force) ที่กระทำบนส่วนที่เคลื่อนที่

K_1 = ค่าคงที่ใช้เปลี่ยนค่า I^2 ให้เป็นแรง

I = ค่าของกระแสให้ผล (RMS) ที่ไหลในขดลวดของแม่เหล็กไฟฟ้า

K_2 = ค่าเหนี่ยวนำ (ซึ่งจะรวมความฝืดด้วย)

เมื่อรีเลย์อยู่ในสภาวะที่กำลังจะเริ่มทำงาน แรงผลลัพท์จะเท่ากับ 0 ซึ่งจะให้ลักษณะการทำงาน (operating characteristics) ดังนี้

$$K_1 I^2 - K_2 = 0 \quad (12.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \left[\frac{K_2}{K_1} \right]^{1/2} = \text{ค่าคงที่} \quad (12.45)$$

ค่ากระแสนี้เป็นค่าต่ำสุดที่จะทำให้รีเลย์เริ่มทำงาน

2.2.3.2 รีเลย์แบบดูดแกนเหล็ก (attracted armature relays)

รีเลย์แบบแกนเหล็ก (armature relays) เป็นรีเลย์แบบที่ง่ายที่สุดและใช้กันมากที่สุด รีเลย์แบบนี้จะมีรูปร่างหลายลักษณะและใช้งานในลักษณะต่างๆ กันตั้งแต่เป็นเครื่องวัดที่แม่นยำ จนกระทั่งเป็นแบบที่ทำงานแบบโลจิก

รีเลย์แบบดูดแกนเหล็กนี้ โดยมากจะประกอบด้วยแกนเหล็ก ซึ่งมีขดลวดพันอยู่ ทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าไปดูดแกนเหล็กเคลื่อนที่ ซึ่งยึดไว้ในแบบใดแบบหนึ่ง เพื่อสามารถทำให้แกนเหล็กนี้เคลื่อนตัวเข้าออกในสนามแม่เหล็กได้ การเคลื่อนตัวนี้จะมีการควบคุมโดยใช้แรงเหนี่ยวนำ ซึ่งอาจจะเป็นน้ำหนักของแกนเหล็กเอง หรือแรงสปริงก็ได้

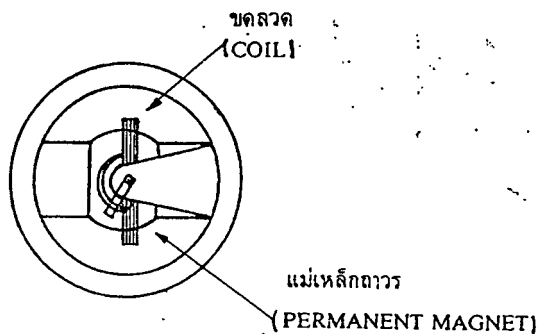
ตามปกติแกนของแม่เหล็กจะเป็นรูปตัว U โดยที่บางส่วนของแกนนี้ จะมีขดลวดพันอยู่ ซึ่งจะเป็นขดลวดให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (energizing coil) แกนเหล็กที่เคลื่อนที่ได้มักจะทำด้วยเหล็กเบา ซึ่งมีรูปร่างง่ายๆ จัดวางไว้ในลักษณะที่จะเคลื่อนไปปิดวงจรแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระแสเข้าไปในขดลวด แกนเหล็กที่เคลื่อนที่ได้นี้อาจจะมีคอนแทคติดอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อเคลื่อนตัวตามแกนเหล็กจะไปแตะกับคอนแทคอีกตัวหนึ่ง ซึ่งตรึงอยู่กับที่ หรือแกนที่ติดอยู่กับแกนเหล็กนี้ จะไปกดคอนแทคทั้งสองให้แตะ ในบางกรณีอาจมีหลายคอนแทคซึ่งทำงานพร้อมๆ กันก็ได้

เมื่อช่องว่าง (gap) ของแกนเหล็กน้อยลง ความหนาแน่นของฟลักซ์จะเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนาแน่นของฟลักซ์เพิ่มขึ้น แรงดึงของแม่เหล็กก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการที่รีเลย์จะกลับสู่ตำแหน่งเดิมเมื่อได้ทำงานไปแล้ว กระแสจะต้องลดลงอย่างมาก อัตราส่วนระหว่างกระแสที่ทำให้รีเลย์คืนสู่ตำแหน่งเดิม กับกระแสที่ทำให้รีเลย์ทำงาน จะเรียกว่า “อัตราส่วนคืนกลับ” (returning ratio)

ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 1 หมายความว่า จะทำให้อุปกรณ์นี้ทำงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งตามปกติก็จะมีผลดีเนื่องจากจะทำให้การทำงานที่ดี และการปิดคอนแทคแน่นนอน แต่ถ้าค่ากลับสู่ตำแหน่งเดิมต่ำเกินไปอาจจะมีข้อเสียคือ ข้อเสียดังกล่าวนี้จะลดลงได้ ถ้ามีการป้องกันมิให้แกนเหล็กปิดวงจรแม่เหล็กโดยสมบูรณ์ และหรืออาจจะทำให้ดีขึ้นโดยใช้สปริงช่วย

โดยการใช้สปริงที่แข็งแรงอาจช่วยทำให้การทำงานของรีเลย์เป็นแบบตามส่วน (proportional) แทนที่จะปิดทันที (snap action) แต่ก็อาจจะทำให้การปิดคอนแทคไม่ดีเหมือนเดิม รีเลย์แบบธรรมดาอาจจะมีค่าปลดปล่อยเพียง 25% ของค่าพิคอัพ แต่อาจจะสูงถึง 90% หรือมากกว่า

นั่นถ้าออกแบบพิเศษ ในกรณีแรกรีเลย์เป็นแบบทำงานด้วยความเร็วสูง (high speed) แรงดึงไม่ช้าเกินไป ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รีเลย์แบบขดลวดเคลื่อนที่ชนิดหมุน

ในการปิดวงจรจะสูง และคอนแทกทนกระแสค่าสูงได้ ส่วนกรณีหลังรีเลย์จะทำงานช้ากว่า ด้วยแรงดึงที่อ่อนกว่า และคอนแทกจะทนกระแสได้ไม่มากนัก

2.2.3.3 รีเลย์แบบขดลวดเคลื่อนที่ (Moving Coil Relays)

ในการแบ่งประเภทของรีเลย์ชนิดนี้จะรวมถึงรีเลย์แบบหมุน (rotary type) หรือแบบเลื่อนตามแกน (axial type) ซึ่งใช้สนามแม่เหล็กถาวร และแบบไดนาโมมิเตอร์ (dynamometer) ซึ่งใช้สนามเป็นขดลวด

(1) รีเลย์แบบขดลวดเคลื่อนที่ชนิดหมุน และใช้แม่เหล็กถาวร

(Rotary Type Moving Coil Permanent Magnet Relays)

รีเลย์แบบนี้ลักษณะดังแสดงไว้ในรูป 2.13

ขดลวดขนาดเบาซึ่งหมุนได้ตามแก้ม จะอยู่ในสนามแม่เหล็กเชิงรัศมี (radial) ซึ่งเกิดจากแม่เหล็กถาวร ขดลวดนี้จะหมุนได้ในช่วงที่ต้องทำงาน ซึ่งอาจจะกว้างมาก หรือถ้าต้องการทำงานที่รวดเร็วก็อาจจะเพียง 2-3 องศา มีสปริงแบบลานนาฬิกา (spiral) ติดอยู่เพื่อใช้เป็นแรงเหนี่ยวรั้ง ตามปกติการที่จะต่อคอนแทกเข้ากับขดลวดจะต้องใช้สายต่อแบบลานนาฬิกาอย่างน้อย 3 เส้นอยู่แล้ว ดังนั้น ในบางกรณีอาจใช้ขดลวดนี้เป็นสปริงด้วยเลขก็ได้

สนามแม่เหล็กที่ใช้พยายามจัดให้มีความเข้มสม่ำเสมอ (uniform) ตลอดช่วงการทำงาน (operating arc) ดังนั้นสำหรับค่ากระแสค่าหนึ่ง แรงดูดที่ขดลวดจะมีค่าคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของขดลวด จึงสามารถจะจัดให้รีเลย์ทำงานที่ค่าต่างกันได้ในระยะทางที่คอนแทกจะต้องเคลื่อนไป (ในกรณีที่ช่วงทำงานของรีเลย์กว้าง) หรือถ้าจำกัดช่วงเดินทางของคอนแทกก็อาจจะตั้งค่าได้โดยการปรับแรงดึงของสปริงซึ่งก็จะได้ลักษณะเช่นเดียวกัน

ขดลวดอาจจะพันโดยไม่มีการแกน หรือแบบ (former) หรืออาจจะพันบนแกนซึ่งทำได้ด้วยฉนวนก็ได้ แต่บางครั้งขดลวดจะพันบนแกนอลูมิเนียม หรือทองแดง ซึ่งก็มีลักษณะเป็นขด

ลวดลัดวงจร (short circuited winding) เพื่อจะใช้เป็นแรงเหนี่ยวรั้งขณะเคลื่อนตัว (dynamic drag) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อด้านการเคลื่อนตัวของขดลวดเพราะเมื่อขดลวดเคลื่อนที่จะเกิดกระแสไหลวนเวียนอยู่ใน อลูมิเนียม หรือทองแดง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเหนี่ยวยวรั้งการหมุนของขดลวด วิธีการนี้จะใช้เป็น ระบบ แคมป์ (damping) ได้ดี และถ้าทำให้มีค่าสูงพอจะสามารถถ่วงเวลาได้ด้วย

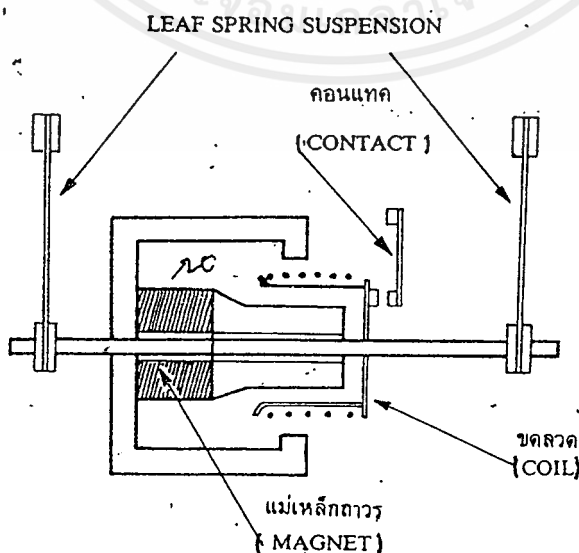
มีอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเสริมให้มีแคมป์มากขึ้น คือ ใช้ความต้านทานค่าต่ำ ต่อขนานกับขดลวดเคลื่อนที่ ดังนั้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวยวรั้ง back e.m.f. ในขดลวดจะทำให้มี กระแสไหลในขดลวด และในความต้านทานที่ต่อขนาน ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงแคมป์ขึ้นอีก (damping force)

รีเลย์แบบนี้มีความไวมาก ในกรณีพิเศษอาจจะมีแบบที่เป็นกัลวานอมิเตอร์ (galvanometer class) ได้โดยกำลังไฟฟ้าเพียง 0.02 วัตต์

ในการหมุนกลับ อัตราส่วนของค่าคืนสู่ตำแหน่ง กับค่าพิคอัพจะเท่ากับ 1 แต่เนื่องจากความฝืดของแกน การสัมผัสของคอนแทคจึงทำให้ค่าคืนสู่ตำแหน่งเดิมมีค่าเพียง 98% ของค่าที่ตั้งไว้ (setting)

(2) รีเลย์แบบเลื่อนตามแกน และใช้แม่เหล็กถาวร

ในรีเลย์แบบนี้ ขดลวดรูปทรงกระบอกจะแขวนไว้ด้วยสปริงแบบใบ (leaf springs) และอยู่ในสนามแม่เหล็กถาวรที่เป็นแบบศูนย์ซ้อนทับ (concentric) ดังแสดงในรูป 2.14 ขดลวดนี้สามารถเคลื่อนตัวได้ตามแนวแกนในระยะสั้นๆ การต่อขดลวดและวงจรของคอนแทคทำ โดยใช้เส้นเอ็น (ligament) ซึ่งจะให้แรงเหนี่ยวยวรั้งต่ำ คล้ายกับในกรณีของรีเลย์แบบหมุนขดลวดมักจะพบบนแบบโลหะ ซึ่งจะให้มีแรงแคมป์ด้วย



รูปที่ 2.14 รีเลย์แบบเลื่อนตามแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีเลย์แบบนี้มีความไวน้อยกว่าแบบหมุน แต่จะมีลักษณะที่แข็งแรงมาก ข้อดีอีกประการหนึ่งคือไม่มีจุดค้ำหมุน (bearings) แต่มีข้อเสียคือจะมีแรงโน้มถ่วงของโลก ฉะนั้นการตั้งศูนย์ในแนวตั้งสำหรับรีเลย์จึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

(3) รีเลย์แบบไดนาโมมิเตอร์

รีเลย์แบบนี้มีลักษณะคล้ายกับรีเลย์แบบหมุนที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่จะมีสนามแม่เหล็กซึ่งอาจจะใช้ไส้แกนเหล็ก (iron cored) เพื่อจะให้สนามเชิงรัศมีเหมือนกันในกรณีของรีเลย์แบบใช้แม่เหล็กถาวร หรืออาจจะเป็นแบบไส้แกนอากาศ (air cored) ก็ได้

ในขณะที่รีเลย์แบบใช้แม่เหล็กถาวรเป็นรีเลย์แบบที่ใช้ไฟกระแสตรงหรือถ้าใช้กับไฟกระแสสลับ จะต้องมีส่วนแปลงสภาพกระแส (rectifier) รีเลย์แบบไดนาโมมิเตอร์เป็นแบบที่ใช้ได้ทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ อย่างไรก็ตามรีเลย์แบบนี้จะมีความไวน้อยกว่าแบบใช้แม่เหล็กถาวรเนื่องจากจำเป็นต้องสร้างแม่เหล็กด้วยไฟฟ้าดังนั้นจึงใช้ในกรณีพิเศษบางกรณีเท่านั้น

2.2.3.4 รีเลย์แบบเหนี่ยวนำ

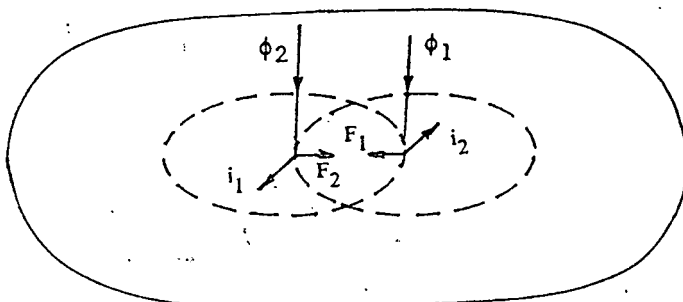
รีเลย์แบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยใช้หลักการเดียวกันกับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (induction motor) แรงดูดจะเกิดขึ้นโดยให้ตัวนำซึ่งหมุนได้ (ซึ่งอาจจะเป็นจานหรือถ้วย) อยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองสนามซึ่งต่างกันในตำแหน่งและเวลา ตัวนำอาจจะอยู่ในรูปของจานหรือถ้วยโลหะ ซึ่งโดยมากมักจะเป็นอลูมิเนียมหรือทองแดง สนามทั้งสองอาจได้มาจากกระแสเดียวกันโดยจัดให้ไปหล่อเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้าสองตัว และทำให้มุมของฟลักซ์ทั้งสองต่างกัน หรือสนามทั้งสองอาจจะได้มาจากกระแสสองกระแส ซึ่งไปหล่อเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้าสองตัว ในทุกๆ กรณีการสนองตอบจะให้ค่าแรงดูดดังนี้

$$T = K\phi_1\phi_2 \sin\theta \quad (12.46)$$

โดยที่ T = แรงดูด

$\phi_1\phi_2$ = ฟลักซ์ซึ่งเกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสอง

θ = มุมระหว่างฟลักซ์ ϕ_1 และ ϕ_2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.15 แรงดูดในรีเลย์แบบเหนี่ยวนำ กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติฟลักซ์ ϕ_1 และ ϕ_2 ซึ่งมีมุมต่างกัน θ ฟังก์ชันแผ่นตัวนำตั้งในรูป 2.15 และกำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ฟลักซ์แต่ละจำนวนจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันขึ้นรอบๆ ตัวมันบนบานหมุน และเนื่องจากงานทำด้วยสารตัวนำ จึงทำให้เกิดกระแสไหล ดังแสดงในรูป 2.15 กระแสที่เกิดจากฟลักซ์จำนวนหนึ่งจะทำปฏิกิริยา กับฟลักซ์อีกจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดแรงกระทำขึ้นบนงานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ค่าต่างๆ อาจจะเขียนได้ดังนี้

$$\phi_1 = \Phi_1 \sin \omega t \quad (12.47)$$

$$\phi_2 = \Phi_2 \sin \omega t + \theta \quad (12.48)$$

เนื่องจากงานหมุนทำด้วยวัสดุตัวนำค่อนข้างใหญ่ จึงอาจถือได้ว่าทางที่กระแสทั้งสองไหลผ่านมีค่าความเหนี่ยวนำน้อยมาก ดังนั้น กระแสที่ไหลในงานหมุนจะถือว่าไม่มีมุมเฟสเท่ากับแรงดันที่ทำให้มันไหล ดังนั้น

$$i_1 \propto \frac{d\phi_1}{dt} = K_1 \Phi_1 \cos \omega t \quad (12.49)$$

$$i_2 \propto \frac{d\phi_2}{dt} = K_2 \Phi_2 \cos(\omega t + \theta) \quad (12.50)$$

$$F_1 \propto \phi_1 i_2 \quad (12.51)$$

$$F_2 \propto \phi_2 i_1 \quad (12.52)$$

เนื่องจากแรงทั้งสองจะมีทิศตรงข้ามกัน ดังนั้น แรงผลลัพธ์จะเป็น

$$T = (F_2 - F_1) \propto (\phi_2 i_1 - \phi_1 i_2) \quad (12.53)$$

$$\begin{aligned} T &= K_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin(\omega t + \theta) \cos \omega t - \Phi_1 \Phi_2 \sin \omega t \cos(\omega t + \theta) \\ &= K_1 \Phi_1 \Phi_2 \{ \sin \omega t + \theta \cos \omega t - \sin \omega t \cos(\omega t + \theta) \} \\ &= K_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta \\ &= K \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta \end{aligned} \quad (12.54)$$

เนื่องจากฟลักซ์ที่คิดเป็นคลื่นแบบไซน์ซoidal (sinusoidal) จึงอาจแทนค่าสูงสุดฟลักซ์ได้ด้วยค่าให้ (RMS) ของฟลักซ์

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือค่าแรงคูณผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าเท่ากันหมดตลอดเวลา ซึ่งก็ไม่ได้เนื่องมาจากที่สมมุติไว้แรงที่กระทำบนงานมีค่าสม่ำเสมอโดยไม่มีการสั่น (no vibration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงผลักรจะมีทิศทางจากจุดที่ฟลักซ์ซึ่งมีมูมนำ (leading) ไปยังจุดที่มีฟลักซ์มูมล่า (lagging) เหมือนกับว่า ฟลักซ์เคลื่อนตัวผ่านงานหมุน และลากงานหมุนไปด้วย

จะเห็นได้ว่าแรงผลักรที่กระทำบนงานเกิดขึ้นเนื่องจากฟลักซ์ ซึ่งมีมูมไม่เท่ากัน ฟลักซ์จำนวนเดียวไม่ทำให้เกิดแรงผลักรได้ จะต้องมีฟลักซ์อย่างน้อย 2 จำนวน และแรงผลักรจะมีค่าสูงสุดเมื่อฟลักซ์ทั้งสองมีมูมต่างกัน 90° และทิศทางของการหมุนจะขึ้นอยู่กับฟลักซ์จำนวนที่มีมูมนำ

ฟลักซ์ Φ_1 และ Φ_2 เกิดจากกระแส I_1 และ I_2 ดังนั้นจึงอาจเขียนเป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้

$$T = KI_1 I_2 \sin \theta \quad (12.55)$$

2.2.3.5 รีเลย์แบบใช้ความร้อน

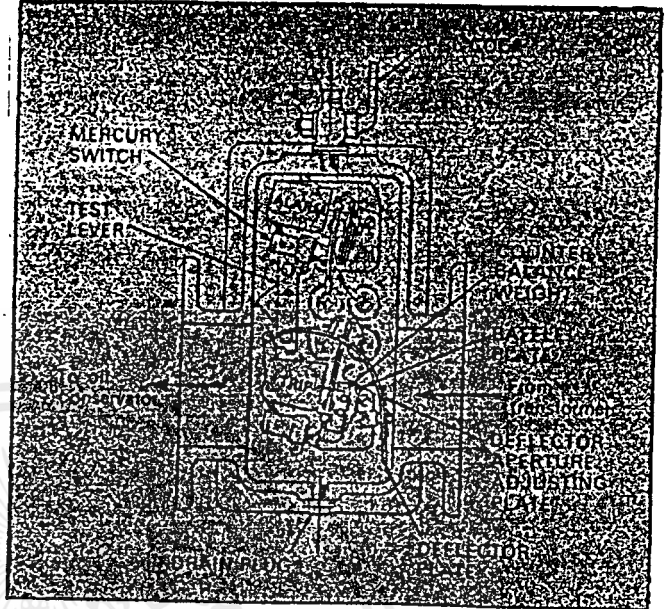
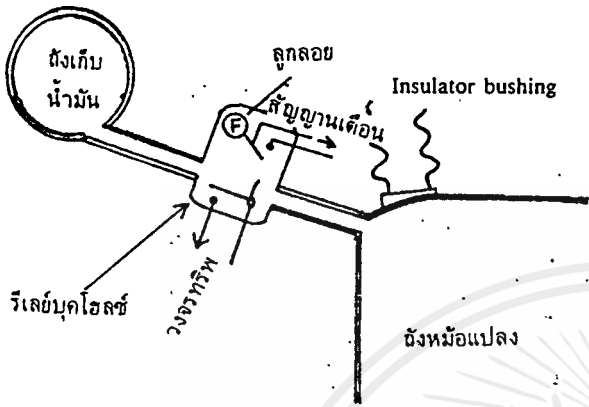
รีเลย์ประเภทนี้จะเป็นแบบที่อาศัยผลที่ได้จากความร้อน (thermal effects) ในลักษณะต่างๆ แบบที่นิยมใช้มากที่สุด จะเป็นแบบที่อาศัยหลักที่ว่าเมื่อโลหะถูกความร้อนจะขยายตัว ตามปกติส่วนที่ไวต่อความร้อน (sensitive element) จะประกอบด้วยโลหะต่างชนิดสองชิ้นเชื่อมติดกันอยู่ เรียกว่า ไบ-เมทัล (bi-metal) เมื่อโลหะที่เชื่อมติดกันนี้ถูกความร้อน จะโค้งตัวเนื่องจากการขยายตัวของแผ่นโลหะทั้งสองไม่เท่ากัน

ในทางปฏิบัติการใช้ไบ-เมทัลนี้ อาจจะใช้เป็นแผ่นตรงๆหรือนำมาขดเป็นรูปนาฬิกาก็ได้ และความร้อนที่ให้อาจจะได้มาจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในโลหะนั้นโดยตรง หรือผ่านขดลวดให้ความร้อน (heating element) ซึ่งพันอยู่รอบๆโลหะ หรือโดยการแผ่รังสีความร้อน (radiation) จากส่วนที่ให้ความร้อน (heating element) ซึ่งอยู่ใกล้ๆกับไบ-เมทัลเอง

รีเลย์ประเภทนี้มักจะใช้เพื่อป้องกันภาระเกินขนาด (overload) ระยะเวลาที่ถ่วงไว้ให้ทำงาน (operating time delays) จะมีค่าต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบส่วนที่ไวต่อความร้อน (thermo-sensitive element) และตัวให้ความร้อน (heater) และมวลความร้อน (thermal mass) และฉนวน (insulation) ที่ใช้มวลความร้อนของตัวให้ความร้อน มักจะทำให้เกิดปัญหาในแบบนี้ โดยมักจะทำให้พุ่งเลย (overshoot) ถ้าค่าของกระแสลดลงก่อนที่จะทำให้เกิดการทริพ

2.2.3.6 รีเลย์แบบอื่นๆ

ได้เคยมีการสร้างและใช้รีเลย์กันมากมายหลายแบบ บางแบบก็เลิกใช้ไปแล้ว เพราะล้าสมัย ในที่นี้จะพูดถึงเฉพาะบางแบบที่สำคัญ



รูปที่ 2.16 รีเลย์แบบบุคโฮลซ์

2.2.3.7 รีเลย์แบบใช้มอเตอร์

รีเลย์ประเภทนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเล็กๆขับเคลื่อนคอนแทค โดยใช้เพื่อทดความเร็ว และอาจถ่วงเวลาได้ หรืออาจใช้ควบคุมลำดับ (sequence) การทำงานซึ่งซับซ้อนอาจบังคับไกตัดต่อวงจรแบบอัตโนมัติได้ซ้ำๆกันหลายครั้ง (repeated automatic reclosure) หรืออาจใช้สำหรับการเข้าจังหวะ (synchronization) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า

2.2.3.8 รีเลย์กล (Mechanical relays)

รีเลย์แบบนี้ทำงานโดยอาศัยความดัน หรือการไหลของของเหลว หรือระดับของของเหลว เป็นต้น แบบที่ใช้มากที่สุดตอนนี้ คือ รีเลย์แบบ “บุคโฮลซ์” (buchholz) ซึ่งใช้สำหรับป้องกันหม้อแปลงชนิดขดลวดแช่อยู่ในน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วยระบบลูกลอย 1 หรือ 2 ตัว อยู่ในกล่องปิด ซึ่งต่ออยู่กับท่อที่ต่อเชื่อมถึงของหม้อแปลงไปยังถังพักน้ำมันข้างบน (conservator) ดูรูปที่ 2.16

การเกิดสภาวะผิดปกติหรือการลัดวงจรในหม้อแปลง จะทำให้น้ำมันสลายตัวเกิดเป็นแก๊ส เช่น ไฮโดรเจน ,คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะผ่านขึ้นมาตามท่อที่ต่อไปยังถังพักน้ำมัน และจะค้างอยู่ในรีเลย์ ทำให้ระดับน้ำมันในตัวรีเลย์ลดลง เมื่อน้ำมันเต็มตัวรีเลย์ ลูกลอยซึ่งติดสวิทช์ปรอท (mercury switch) จะอยู่ในระดับสูง ในตำแหน่งซึ่งเปิดคอนแทคเมื่อระดับน้ำมันลดลงลูกลอยตัวบน ก็จะตกลงมาถึงระดับหนึ่ง และจะไม่ปิดคอนแทค ซึ่งปกติจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทวไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งสัญญาณเตือนให้ผู้ควบคุมทราบว่าจะเกิดเหตุผิดปกติขึ้นในหม้อแปลง ส่วนในกรณีที่เกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรงจะเกิดแก๊สเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะดันให้น้ำมันไหลผ่านตัวรีเลย์อย่างรวดเร็ว และเป็นจำนวนมาก ถูกลอยตัวล่องซึ่งติดอยู่ที่ปากช่องที่น้ำมันไหลเข้าจะถูกน้ำมันดันไปและจะเคลื่อนตัวไปปิดคอนแทค ซึ่งจะไปยังบังคับไกด์วงจรให้วงจรแยกหม้อแปลงออกจากระบบทันที

2.2.3.9 รีเลย์แบบวัดอุณหภูมิ (Temperature Measuring Relays)

รีเลย์แบบนี้แยกออกจากแบบใช้ความร้อนที่ได้อธิบายแล้ว แม้ว่าบางครั้งการทำงานของรีเลย์ทั้งสองจะคล้ายกัน เมื่อใช้รีเลย์แบบนี้เพื่อปรับบังคับ (regulate) ก็มักจะเรียกกันว่า “เทอร์โมสแตท (thermostat) และเมื่อใช้เพื่อให้สัญญาณเตือน หรือเพื่อทริป (trip) ก็มักจะเรียกว่า “เทอร์โมมิเตอร์สำหรับปิดคอนแทค” (Contact Making Thermometer) รีเลย์แบบนี้อาจเป็นแบบไบ-เมทัล หรืออาจใช้การขยายตัวของของเหลว ซึ่งบรรจุอยู่ในกระเปาะ และมีท่อเล็กๆ ต่อไปยังอุปกรณ์ซึ่งวัดความดัน รีเลย์แบบที่ใช้เทอร์โม-คัปเปิล (thermo-couple) และแบบที่ใช้ความต้านทานซึ่งเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิก็ใช้ได้เหมือนกัน

2.2.3.10 รีเลย์แบบถ่วงเวลา (Time Delay Relays)

รีเลย์แบบถ่วงเวลาจะมีการทำหลายๆแบบด้วยกัน ซึ่งบางครั้งก็จะแบ่งออกเป็นแบบถ่วงเวลาสั้น ปานกลาง หรือนาน

รีเลย์แบบถ่วงเวลาสั้นๆ มักจะเป็นแบบแท่งทองแดงรูปทรงกระบอก ซึ่งล้อมรอบส่วนของวงจรแม่เหล็กไว้ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์จะถูกถ่วงให้ช้าลง โดยกระแสวนเวียนในแท่งทองแดงนี้ ทำให้การทำงานถูกถ่วงเวลาให้ช้าลง และคืนสู่ตำแหน่งเดิมช้าลงด้วย ในช่วงจาก 1-3 ส่วนพันวินาที แล้วแต่แบบและการปรับตั้งรีเลย์พวกนี้จะต้องหล่อเลี้ยงด้วยไฟกระแสตรง

อีกวิธีหนึ่ง คือ ใช้รีเลย์แบบใช้ความร้อนเพื่อการถ่วงเวลาไป 2-3 วินาที

รีเลย์แบบถ่วงเวลาปานกลาง คือถ่วงถึง 120 วินาที โดยมากมักใช้รีเลย์ ซึ่งมีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำงานโดยมีเบรกควบคุม (controlling brake) เหนียวรั้งไว้ เบรกมีหลายแบบแต่ที่นิยมใช้กันมาก คือแบบกระแสวนเวียน (eddy current) ซึ่งตัวหมุนจะหมุนอยู่ในสนามของแม่เหล็กถาวร

รีเลย์แบบถ่วงเวลานาน ประกอบด้วยมอเตอร์เล็กๆซึ่งอาจเป็นแบบกระแสตรงหรือกระแสสลับก็ได้ มอเตอร์จะไปบังคับการปิดคอนแทคโดยใช้เฟืองทดรอบ

2.2.3.11 การทำงานของคอนแทค

การตอบสนองทางออก (output response) ของรีเลย์แบบไฟฟ้ากลขึ้นอยู่กับการทำงานของคอนแทคซึ่งจะต้องปิดหรือเปิดอย่างสมบูรณ์และแน่นอน ผิวของคอนแทคมักจะเป็นปุ่มมน เพื่อให้การสัมผัสเป็นจุด หรือเป็นเส้นได้ ซึ่งจะทำให้แรงดันของคอนแทคเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มของคอนแทคแตกได้ง่าย ซึ่งจะเป็นผลให้ความต้านทานของคอนแทคต่ำ

ผิวของคอนแทคจะต้องสะอาดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตามปกติมักจะใช้เงินเป็นผิวของคอนแทค ซึ่งจะไม่เกิดสนิม (oxide) มากนัก ยกเว้นจะมีฝ้ายเป็นฟิล์มบางๆ ซึ่งทะลุผ่านเข้าไปได้ง่าย แต่ในบรรยากาศซึ่งสกปรกอาจเกิดซัลไฟด์ของเงิน (silver sulphide) ขึ้นได้ ซึ่งถึงแม้จะมีความต้านทานต่ำกว่าแต่ถ้ามีจำนวนมาก จะทำให้การปิดคอนแทคสัมผัสได้ไม่ดี และซัลไฟด์นี้ปกติจะอ่อน และหลุดออกได้ง่ายโดยการเสียดสี เมื่อผิวคอนแทคเลื่อนไปมา

ในกรณีพิเศษอาจใช้คอนแทคเป็นทอง ทองขาว (platinum) พัลลาเดียม (palladium) โรเดียม (rhodium) หรือทังสเตน (tungsten) หรือสารผสมของโลหะเหล่านี้ โลหะสีชนิดแรกจะเหมาะสำหรับรีเลย์ที่มีความไวสูงมากเนื่องจากจะไม่เกิดฝ้ายขึ้นได้ ส่วนทังสเตนนั้นแม้ว่าจะมีความต้านทานสูงกว่า แต่ก็สามารถทนต่อการเกิดประกายไฟได้ดีโดยไม่ไหม้

สิ่งที่สำคัญ คือ ต้องป้องกันไม่ให้มีฝุ่น ซึ่งตามปกติมักจะเป็นฉนวน เช่น ผงของซีเมนต์แห้ง อาจจะถูกกดโดยคอนแทค ทำให้เป็นเหมือนกับมีแผ่นฉนวนกั้นอยู่ทำให้โลหะ กับโลหะแตะกันโดยตรงไม่ได้ แม้ว่า ช่องว่างมีเพียง 1 ในพันของนิ้ว ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันที่สัมผัสจะต่ำ

การปิดเปิดไม่ดีอาจเนื่องจากฟิล์มเหนียวๆ หรือสิ่งสกปรกจากอากาศ หรือสารประกอบเรซิน ซึ่งออกมาจากวัสดุฉนวน ในการออกแบบจะต้องเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีไอออกน้อยที่สุด และจะต้องใส่รีเลย์ไว้ในกล่อง ซึ่งปิดผนึกไว้อย่างดี อย่างไรก็ตามควรมีรูหายใจ และก็ต้องใส่ไส้กรอง ซึ่งจะกรองฝุ่นและไอ

ไม่ควรทำความสะอาดคอนแทคด้วยกระดาษทรายโดยเด็ดขาด ไม่ว่าจะเป็นอย่างละเอียดแค่ไหนก็ตาม เพราะเม็ดทรายอาจจะฝังเข้าไปอยู่ที่ผิวของคอนแทคได้ ทำให้การปิดคอนแทคไม่ดี เมื่อคอนแทคใหม่เข้ามาจะทำความสะอาดโดยใช้ตะไบละเอียดแล้วขัดโดยการถูให้เรียบ

ด้วยเหตุผลเดียวกันก็ไม่ควรใช้ผง หรือน้ำยาขัดโดยเด็ดขาด การทำความสะอาดอาจใช้น้ำยาละลาย (solvent) บริสุทธิ์ เช่น ไตรคลอเอทิลีน (trichlorethylene) เพียงเล็กน้อย โดยใช้แปรงละเอียด เสร็จแล้วจะต้องแปรงส่วนที่ค้างอยู่ออกให้หมด แล้วปล่อยให้คอนแทคแห้ง น้ำยาที่เหลือใช้จะต้องไม่ใส่กลับเข้าไปในขวดอีก มิฉะนั้นน้ำยาจะเสื่อมสภาพและใช้ไม่ได้อีกเลย

ความสามารถในการตัดวงจร (interrupting capacity) ของคอนแทคเป็นเรื่องยุ่งยาก เพราะขึ้นอยู่กับกระแสแรงดันของวงจร (ไม่ว่าจะเป็นกระแสตรง หรือสลับ) ตัวประกอบ

กำลังไฟฟ้าของวงจร และความเร็วที่คอนแทกแยกจากกัน อย่างไรก็ตามพอจะให้ข้อสังเกตได้ ดังนี้

1. ภาระไฟฟ้าความต้านทาน (resistive load) การตัดวงจรออกนั้นทำได้ง่าย แต่อาจมีปัญหาบ้างขณะปิดคอนแทก เพราะกระแสจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มถึงค่าสูงสุด ก่อนที่ผิวของคอนแทกจะแตะกันอย่างสมบูรณ์

2. ภาระไฟฟ้าความเหนี่ยวนำ (inductive load) การตัดวงจรทำได้ค่อนข้างจะลำบาก แต่การปิดวงจรได้ง่ายหน่อยถ้าคอนแทกไม่กระเด็น หรือสั้น เพราะกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งจะทำให้คอนแทกมีเวลาแตะกันอย่างสมบูรณ์ก่อนที่กระแสจะมีค่าสูงสุด ลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถใช้คอนแทกเบาๆ ความเร็วสูงเพื่อปิดวงจรภาระไฟฟ้าความเหนี่ยวนำ แต่ต้องจัดหาวิธีที่เหมาะสมในการตัดวงจร

3. ภาระไฟฟ้าคาปาซิทีฟ (capacitive load) การปิดวงจรทำได้ยากที่สุด เพราะกระแสที่ไหลเพื่อชาร์จ (charge) ตัวเก็บประจุมีค่าสูง ฉะนั้นถ้าไม่มีความต้านทาน หรือความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ คอนแทกอาจจะชำรุดได้ แม้ว่าตัวเก็บประจุจะมีขนาดเล็กก็อาจจะทำให้คอนแทกละลายเชื่อมติดกันได้ ในกรณีของรีเลย์แบบเหนี่ยวนำ หรือแบบขดลวดเคลื่อนที่ ซึ่งแรงดูดที่จะทำให้กลับคืนสู่ตำแหน่งเดิมได้มาจากแรงดึงของสปริงอ่อน การละลายเชื่อมติดกันจนรีเลย์คืนสู่ตำแหน่งเดิมไม่ได้ อาจเกิดจากการชาร์จตัวเก็บประจุ ซึ่งมีค่า C เพียง 0.0002 ไมโครฟารัด ที่แรงดัน 250 V เท่ากัน

4. ภาระไฟฟ้าอื่นๆ เช่น หลอดไฟแบบมีไส้โลหะ (filament) มอเตอร์เล็กๆ แบบสตาร์ทโดยตรง (direct-on started) อาจจะทำให้กระแสขณะเปิดวงจรมีค่าสูง การที่คอนแทกทำงานได้ไม่ดี โดยมากจะเนื่องจากค่ากระแสสูงในระยะแรก ซึ่งบางครั้งมีตัวเวลาคงที่ (time constant) ต่ำจนเครื่องวัดจับไม่ได้

ในกรณีทั่วไป ส่วนใหญ่รีเลย์จะต้องปิดวงจรควบคุมการทรูปของไกตัดวงจร แต่การตัดวงจรทรูปมักจะใช้กลไกอื่นของไกตัดวงจรเอง ไม่ใช่คอนแทกของรีเลย์

2.2.4 รีเลย์แบบสถิติก (Static Relays)

ในปัจจุบันระบบกำลังไฟฟ้าได้ขยายตัวและเพิ่มความสลับซับซ้อนมากขึ้น ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้รีเลย์ป้องกันที่มีสมรรถนะสูงขึ้น และมีลักษณะสมบัติที่พิเศษมากขึ้น พิเศษดังกล่าวนี้อาจทำได้โดยใช้รีเลย์แบบสถิติก ซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นมากในระยะหลังนี้ เนื่องจากการพัฒนาสารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหลายได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีผู้ผลิตรีเลย์แบบสถิติกออกมาจำหน่ายทดแทนรีเลย์แบบไฟฟ้ากลมากขึ้นเรื่อยๆ ปัญหาที่กระตุ้นให้มีการเร่งพัฒนามีเลย์แบบสถิติก คือ

- (ก) เพื่อให้ได้สมรรถนะและลักษณะสมบัติที่ดีกว่ารีเลย์แบบไฟฟ้า-กล เช่น ทำงานได้รวดเร็ว โดยมีความถูกต้องสูงกว่า และมีความไวสูงกว่ากรณีของรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล
- (ข) เพื่อให้ผลิตได้ง่ายกว่า รีเลย์แบบไฟฟ้า-กล
- (ค) เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการบำรุงรักษา
- (ง) เพื่อสามารถผลิตเป็นแบบมาตรฐานได้ง่ายกว่า

หน้าที่และการทำงานแทบทุกชนิดของรีเลย์แบบไฟฟ้า-กล อาจใช้รีเลย์แบบสแตติกทำงานแทนได้ และในหลายกรณีทำงานได้ดีกว่า ทั้งในแง่สมรรถนะและราคาด้วย

ในการใช้งานของรีเลย์แบบต่างๆหลายแบบ เช่น รีเลย์กระแสเกิน รีเลย์แบบหลายคอนแทค อาจจะใช้รีเลย์แบบไฟฟ้า-กลแบบต่างๆต่อไปอีกนาน ยากที่จะใช้รีเลย์แบบสแตติกทดแทนได้ แต่ในการใช้งานที่ซับซ้อนและยุ่งยากมากกว่า เช่น การป้องกันแบบระยะทาง (distance protection) รีเลย์แบบสแตติกเริ่มที่จะมีการใช้มากขึ้นทุกที เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีมากกว่า

ในปัจจุบันเมื่อพูดถึงรีเลย์แบบสแตติก จะหมายถึงรีเลย์ที่ใช้ส่วนประกอบเป็นโซลิดสเตต (solid state components) เช่นทรานซิสเตอร์ ไดโอด ความต้านทาน ตัวเก็บประจุ เป็นต้น ส่วนรีเลย์ที่ใช้หลอดเทอร์โมไอออนิก (thermionic tubes) ซึ่งได้มีการเริ่มพัฒนากันก่อนนั้น มิได้ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์ และเกือบจะเรียกได้ว่าไม่มีการใช้กันแล้ว

คำจำกัดความของรีเลย์แบบสแตติก คือรีเลย์ที่ให้การตอบสนอง (response) ซึ่งได้มาจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แม่เหล็ก หรือส่วนประกอบอื่นใด โดยไม่มีส่วนเคลื่อนไหวกว้างไกลเลย รีเลย์แบบสแตติกอาจมีคอนแทคในวงจรทางออก (output circuit) หนึ่งคอนแทค หรือมากกว่าหนึ่งคอนแทคได้ เรียกว่า รีเลย์สแตติกแบบมีคอนแทค หรือรีเลย์แบบกึ่งสแตติก (semistatic relay) รีเลย์อีกแบบหนึ่ง คือ รีเลย์ที่ไม่มีคอนแทคในวงจรทางออกเลย เรียกว่า รีเลย์สแตติกแบบไม่มีคอนแทค หรือรีเลย์สแตติกแบบสมบูรณ์ (fully static relay)

2.3 ทฤษฎีและหลักการของออปแอมป์

วงจรรขยายทั่วไปที่ใช้ขยายสัญญาณทางไฟฟ้านั้นเราคงพอรู้จักกันดี แต่ยังมีวงจรรขยายชนิดหนึ่งที่รวบรวมคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของวงจรรขยายทั่วไปไว้ในตัวมัน และเราให้ชื่อวงจรรขยายนั้นว่า ออปเปอเรชันนัล แอมพลิฟายเออร์ (operational amplifier)

คำว่าออปเปอเรชันนัล แอมพลิฟายเออร์ (เรียกย่อๆว่าออปแอมป์) เริ่มแรกทีเดียวใช้เรียกเฉพาะวงจรรขยายสัญญาณความแตกต่างที่มีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมที่ออกแบบเพื่อใช้ในอนาล็อก คอมพิวเตอร์ ออปแอมป์ ออปแอมป์ดังกล่าวถูกใช้ให้ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่นการบวก

การลบ การคูณด้วยตัวคงที่ และการรวมสัญญาณแบบต่อเนื่อง เป็นต้น ซึ่งราคาในสมัยนั้นยังแพงมาก

ในระยะหลังได้มีผู้ผลิตออปแอมป์เป็นตัวไอซีที่มีขนาดเล็กและราคาถูกลง จึงมีผู้นิยมใช้กันมากขึ้น ประโยชน์ของออปแอมป์จึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรภายในตัวออปแอมป์เพียงเล็กน้อย แต่จะเน้นถึงวิธีการใช้งานหรือเลือกอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนภายนอกมาต่อเพื่อให้ออปแอมป์ทำงานตามที่ต้องการ วิธีการอ่านข้อมูลหรือสเปคของออปแอมป์

ออปแอมป์ยังเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างฟังก์ชันต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หรือใช้ออปแอมป์ทำการจำลองรูปแบบวงจรหรืออุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้เพื่อศึกษาหรือออกแบบได้เป็นอย่างดี จึงกล่าวได้ว่าออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ไอซีที่เป็นที่รู้จักกันได้ดี

2.3.1 คุณสมบัติเด่นของออปแอมป์

ออปแอมป์ที่เป็นไอซีเป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงมาก โดยปกติจะมีอัตราขยายสูงถึงหลายหมื่นหลายแสน และที่ข้อเด่นก็คือ เราสามารถกำหนดอัตราขยายให้กับออปแอมป์ได้โดยง่ายตามต้องการด้วยการต่อวงจรในลักษณะการป้อนกลับแบบลบ

ถ้าหากเราถือว่าออปแอมป์ที่ใช้เป็นออปแอมป์ในอุดมคติจะต้องมีคุณสมบัติเด่นดังต่อไปนี้

1. มีอัตราขยายแรงดันเป็นอนันต์
2. มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ หรือกล่าวได้ว่ากระแสอินพุตเป็นศูนย์นั่นเอง
3. มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์
4. มีผลตอบสนองต่อความถี่ได้จากสัญญาณไฟตรงถึงความถี่อนันต์

จากคำจำกัดความของออปแอมป์ในอุดมคติทำให้เราทราบว่า ไม่ว่าสัญญาณจะเป็นอย่างไร สัญญาณนั้นก็สามารถทำให้ออปแอมป์ทำงานได้ และถ้าต่อเชื่อมออปแอมป์กับวงจรอื่นก็ จะไม่มีผลทำให้วงจรอื่นทำงานผิดพลาดไป เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์เป็นอนันต์ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์

2.3.3 ออปแอมป์แบบพื้นฐาน

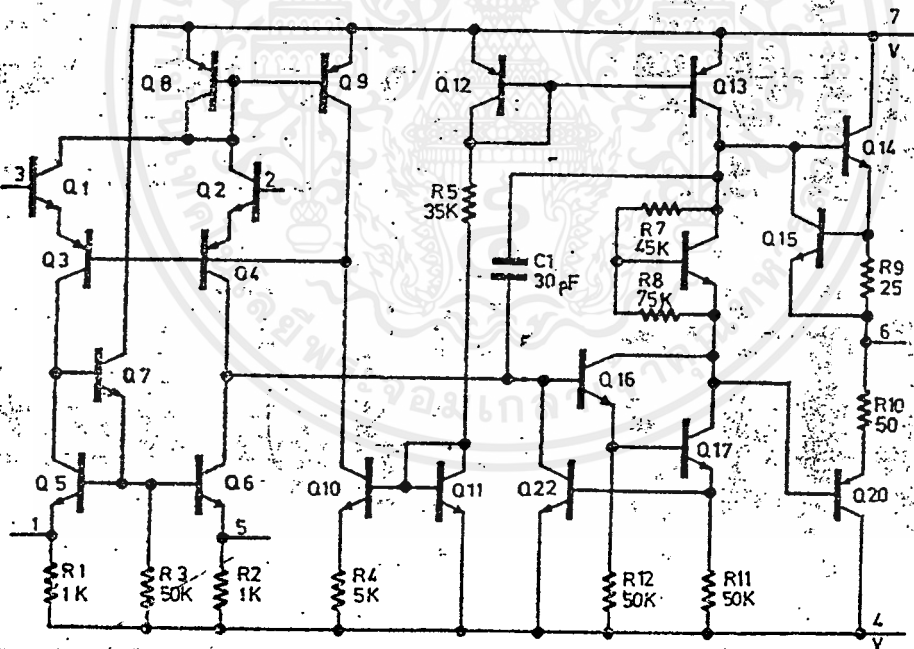
ออปแอมป์ส่วนใหญ่จะมีภาคต้นๆ ประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่าง อาจจะสอง-สามภาคเชื่อมต่อกันเพื่อให้มีอัตราขยายสูงๆ ซึ่งจำเป็นจะต้องมีแหล่งจ่ายไฟทั้งบวกและลบ วงจรขยายความแตกต่างมีสองอินพุตทำให้ขั้วเอาต์พุตสามารถเลือกได้ทั้งแบบมีการกลับเฟสและไม่กลับ

เฟสนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

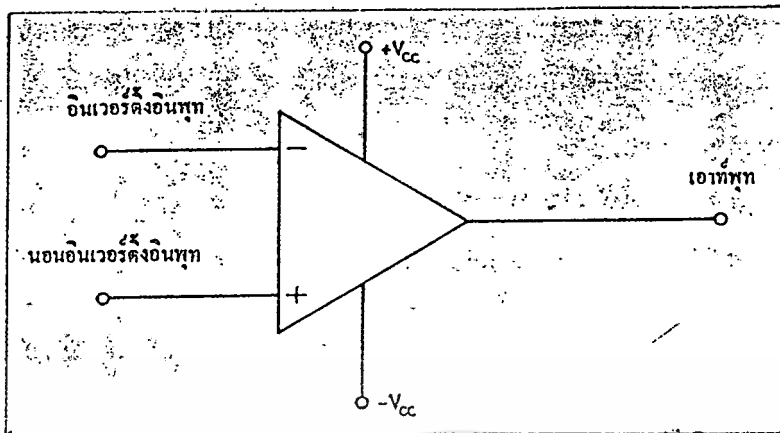
ในการใช้งานออปแอมป์มักจะมีการป้อนกลับแบบลบจากขั้วเอาต์พุตมายังขั้วลบ (inverting input) ด้วยตัวต้านทานหรืออิมพีแดนซ์เพื่อควบคุมอัตราขยายและผลตอบความถี่ให้ได้ตามที่ต้องการ

เช่นเดียวกับวงจรขยายทั่วไป สัญญาณที่เข้าที่อินพุตและออกมาที่เอาต์พุตจะมีการเลื่อนเฟส (นอกเหนือจากการกลับเฟส) อัตราการเลื่อนเฟสนี้จะขึ้นกับความถี่

ในกรณีที่การเลื่อนเฟสมากขึ้นจนเป็น 180 องศา เฟสค่านี้อาจจะไปรวมกับการกลับเฟส 180 องศา ซึ่งจะทำให้เกิดการป้อนกลับแบบเสริมกัน (แทนที่จะเป็นแบบลบ) วงจรขยายในสภาวะเช่นนี้จะไม่มีเสถียรภาพ จะเกิดการออสซิลเลทที่ความถี่ที่ทำให้การป้อนกลับแบบเสริม การที่เฟสเลื่อนมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นจะจำกัด แลบบความถี่ของออปแอมป์ วิธีแก้จะทำโดยเพิ่มวงจรชดเชยเฟสเข้าไป วงจรชดเชยเฟสส่วนมากจะประกอบด้วยตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุ หรืออาจจะเป็นตัวเก็บประจุอย่างเดียว



รูปที่ 2.17 วงจรภายในของออปแอมป์ในไอซี



รูปที่ 2.18 การต่อแหล่งจ่ายไฟกับตัวไอซี

2.3.4 วงจรตัวอย่างออปแอมป์

รูปที่ 2.17 แสดงถึงวงจรออปแอมป์และวงจรสมมูลย์ที่ปรากฏในข้อมูลของบริษัท โมโตโรล่า วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่าง 2 ภาค และตามด้วยวงจรขยายกำลัง วงจรขยายความแตกต่างทั้งคู่มีอัตราเกนที่ค่อนข้างสูงและมีเฟสเดียวกัน และอัตราขยายสูงมากที่ขั้วอินพุตของวงจรภาคแรกมีการป้องกันวงจร ในกรณีที่อินพุตแรงเกินไป (เช่นการต่อสายผิดโดยขั้วอินพุตไปต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยมิได้ตั้งใจ) ส่วนภาคสุดท้ายเป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงและเลื่อนระดับแรงดันเอาต์พุตให้คิดเทียบเท่ากับกราวด์ นอกจากนี้ยังมีวงจรป้องกันการลัดวงจรที่เอาต์พุตอีกด้วย

การต่อแหล่งจ่ายไฟเข้ากับตัวไอซี ไอซีส่วนใหญ่มักจะใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด คือบวกและลบเพื่อจ่ายให้กับวงจรขยายความแตกต่างค่าแรงดันทั้งสองมักจะเท่ากัน เช่น +9 กับ -9 โวลต์ สำหรับออปแอมป์ในรูปที่ 2.17 ใช้ไฟ +18 และ -18 โวลต์

ออปแอมป์ผิดปกติกับทรานซิสเตอร์ตรงที่ขั้วกราวด์มิได้บอกไว้ให้ต่อที่ใด ดังนั้นในการต่อแหล่งจ่ายไฟเราเอาขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟตัวหนึ่งและขั้วลบของอีกตัวหนึ่งเข้ากับไอซี ขั้วที่เหลือรวมเข้าด้วยกันแล้วต่อลงขั้วกราวด์หรือสายร่วม ดังรูปที่ 2.18

ในการศึกษาข้อมูลของผู้ผลิต โปรดระวังการต่อแหล่งจ่ายไฟเพราะบางทีข้อมูลบอกเป็น V_{CC} และ B_{EE} แทนที่จะบอกเป็น $V+$ และ $V-$

จากรูปที่ 2.18 สังเกตว่ามีตัวเก็บประจุต่อเพื่อตัดปลิงของแหล่งจ่ายไฟ ตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวนี้จะต้องต่อให้ขั้วของไอซีมากที่สุดไม่ใช่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ และควรใช้ชนิดคิสต์เซรามิก ค่าอยู่ในระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 ไมโครฟารัด

นอกจากนี้ไอซีบางชนิดที่เป็นกระป๋อง (metal case) ตัวกระป๋องควรจะต้องกับขั้วใดขั้วหนึ่งของวงจร ถ้าเป็นเช่นนี้ในการยึดตัวไอซีจะต้องไม่ยึดหรือติดกับจุดอื่นที่มีแรงดันต่างกัน เช่น ถ้ากระป๋องต่อกับขั้วของไฟลบของแหล่งจ่ายไฟ -18 โวลท์ ถ้ายึดไอซีติดกับแท่นที่เป็นกราวนด์อาจทำให้ไอซีเกิดการเสียหายได้อย่างไรก็ดีไอซีบางแบบเท่านั้นที่เป็นกระป๋องโลหะและบางแบบตัวกระป๋องก็ไม่ต่อกับอะไรเลย เพราะฉะนั้นการใช้งานควรพิจารณาให้แน่นอนเสียก่อน

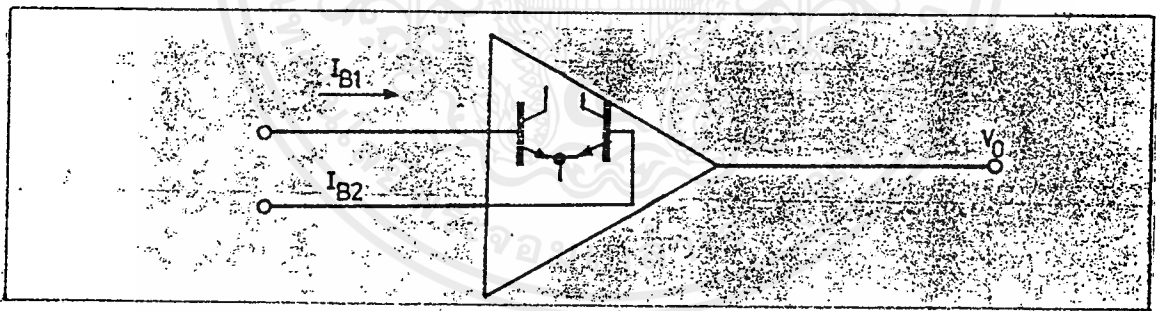
2.3.5 สเปกที่ใช้ในเรื่อออปแอมป์

ก่อนที่จะเข้าใการใช้งานออปแอมป์และวิเคราะห์การทำงานของออปแอมป์เราจำเป็นต้องรู้สเปกที่ใช้งานสำหรับออปแอมป์

กระแสไบอัสที่อินพุต (I_B) คือกระแสอินพุตที่เข้าไปยังขาอินพุตของออปแอมป์ โดยปกติออปแอมป์มีขาอินพุต 2 ขา ดังนั้นเราจึงกำหนดเป็นกระแสเฉลี่ยและกำหนดเป็น

$$I_B = \frac{I_{B1} + I_{B2}}{2} \quad (12.56)$$

โดยปกติค่ากระแสไบอัสนี้มีค่าน้อยมากอยู่ในช่วง 0.05-100 nA



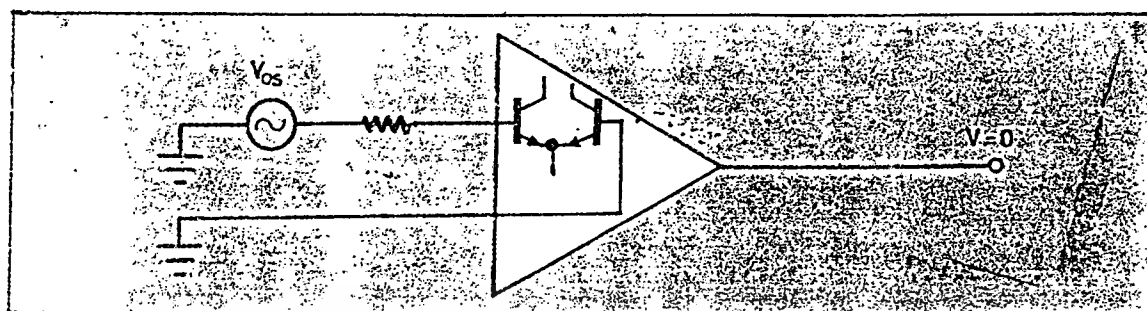
รูปที่ 12.19 แสดงการหากระแสไบอัสที่อินพุต

กระแสออฟเซตที่อินพุต (I_{OS}) คือค่าความแตกต่างของกระแสที่ไหลเข้าทางอินพุตของออปแอมป์ เมื่อแรงดันเอาท์พุทมีค่าเท่าศูนย์ หรือ

$$I_{OS} = I_{B1} - I_{B2} \quad (12.57)$$

ค่ากระแสออฟเซตจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.8-500 nA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงการหาแรงดัน V_{0s} ของออปแอมป์ที่อินพุต

แรงดันออฟเซตที่อินพุต (V_{0s}) คือค่าแรงดันที่จะต้องป้อนเข้าที่อินพุตของออปแอมป์ผ่านตัวต้านทานที่เท่ากันสองตัว เป็นผลทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20

อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{IN}) ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต เมื่อคิดเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอินพุต โดยปกติค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์จะมีค่าราวๆ 130 กิโลโอห์ม ถึง 30 เมกะโอห์ม

เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_O) คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงเอาต์พุตเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต โดยปกติจะมีค่าราวๆ 0.75-1000 โอห์ม

ผลตอบสนองต่อความถี่ คือค่าความถี่ที่ตัวออปแอมป์ยังสามารถทำงานได้ โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้หลายแบบ แต่แบบที่นิยมกันมากคือกำหนดด้วยความถี่คัทออฟหรือความถี่ 3 dB

2.4 ความรู้ทั่วไปและหลักการของหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.4.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป

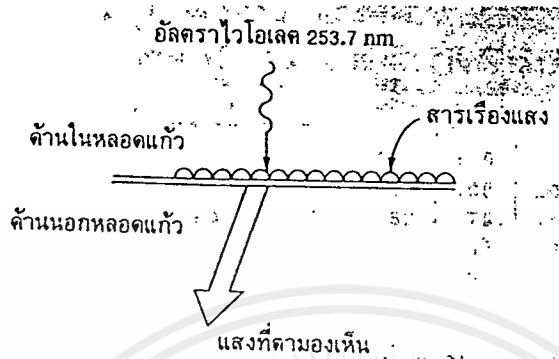
การจุดติดของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นอาศัยการปล่อยประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วหัวและขั้วท้ายของอิเล็กโทรด ภายในหลอดแก้วที่บรรจุด้วยก๊าซอาร์กอนและไอปรอทซึ่งมีความดันไอต่ำ ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดการปล่อยประจุในก๊าซ (gas discharge) การปล่อยประจุในก๊าซดังกล่าวจะทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต (แสงเหนือม่วง) รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้ถูกปล่อยออกมาโดยการกระตุ้นอะตอมของไอปรอท เนื่องจากการกระแทกของอิเล็กตรอนที่ได้รับการปล่อยออกมาจากขั้วอิเล็กโทรดและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในขณะเดียวกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีความยาวคลื่น 253.7 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงแถบความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและกราฟมาตรฐานผลตอบสนองแถบสีของแสงต่อตา

แถบสีของแสง	ความยาวคลื่น (nm)*	กราฟมาตรฐานผลตอบสนองแถบสีของแสงต่อตา
อัลตราไวโอเล็ต(เหนือม่วง)	253.7	ประสิทธิภาพแถบรังสีต่อตา
ม่วง	380-420	
คราม	420-440	
น้ำเงิน	440-490	
เขียว	490-560	
เหลือง	560-590	
แดง	590-630	
อินฟราเรด(ใต้แดง)	630-760	1000

* 1 nm = 1×10^{-9} m

รังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้จะไปกระตุ้นสารเรืองแสง (phosphor) ที่ฉาบไว้ด้านในของหลอดแก้ว ซึ่งจะเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นออกเป็นสีแสงต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับสารเรืองแสง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำการกระตุ้นสารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ด้านในหลอด

ส่วนขั้วอิเล็กทรอนิกส์นั้นเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. ขั้วแคโทดร้อน จะทำด้วยขดลวดทังสเตน นอกจากนี้ยังฉาบด้วยสารแบเรียมออกไซด์สตรอนเทียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอน เมื่อได้รับความร้อนที่จุดทำงานประมาณ 900 C°
2. ขั้วแคโทดเย็น การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของขั้วแคโทดเย็นนี้ จำเป็นต้องใช้ไฟแรงสูงที่จุดทำงานเมื่ออุณหภูมิประมาณ 150 C° หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดขั้วแคโทดเย็นนี้ให้ประสิทธิภาพต่ำ โดยทั่วไปจะสร้างให้ยาวและคืดให้สวยงามตามความต้องการด้านสถาปัตยกรรมมากกว่าที่จะใช้เพื่อให้แสงสว่าง ซึ่งจะไม่กล่าวรายละเอียด

2.4.2 สีและการกระจายพลังงานทางสเปกตรัม

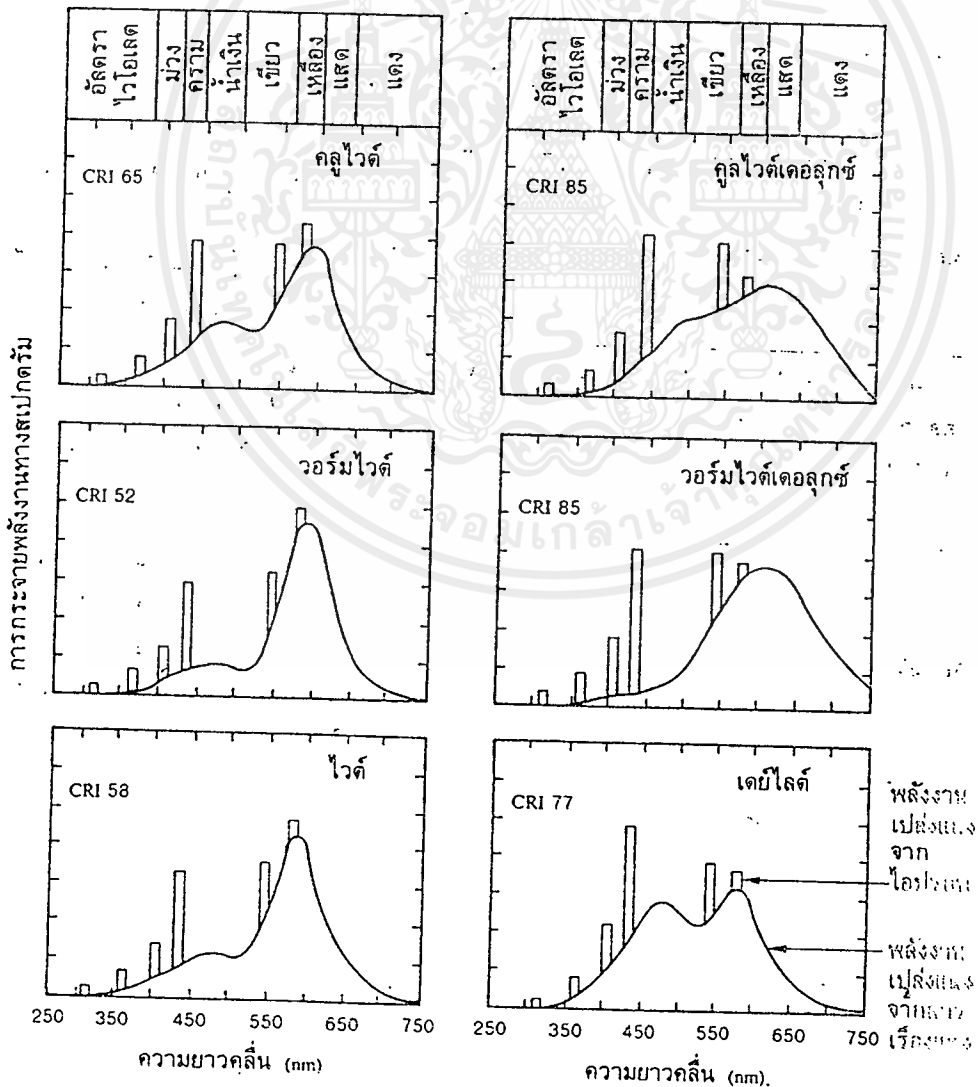
การกระจายแสงสีทางสเปกตรัมของหลอดฟลูออเรสเซนต์นั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการกระจายพลังงานที่เรียบและต่อเนื่อง ซึ่งได้จากการเปล่งแสงของสารเรืองแสง และส่วนที่สองเป็นพลังงานแถบแคบๆที่เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานแสงของไอปรอท โดยมีความยาวคลื่น 365, 404.7, 735.8, 546.1 และ 578 nm ดังนั้น ส่วนที่เกิดจากการเปล่งแสงของสารเรืองแสงจะสามารถเปลี่ยนแปลงให้มีสีสันต่างๆ เช่น สีขาว สีน้ำเงิน สีเขียว สีทอง สีชมพู หรือสีอื่นๆ ได้จากการใช้สารเรืองแสงแตกต่างกันดังนี้

สีขาว ใช้สารเรืองแสง แคลเซียมฮาโลฟอสเฟออร์

สีชมพู ใช้สารเรืองแสง แคลเซียมบอเรต

- สีส้ม ใช้สารเรืองแสง สตรอนเตียมออกโทฟอสเฟต
- สีน้ำเงิน ใช้สารเรืองแสง แคลเซียมทังสเตน
- สีแดง ใช้สารเรืองแสง แมกนีเซียมเฮกซะโบรไมด์
- สีขาวน้ำเงิน ใช้สารเรืองแสง แมกนีเซียมทังสเตน
- สีเขียว ใช้สารเรืองแสง ซิงก์ซัลไฟด์
- สีเขียวอ่อน ใช้สารเรืองแสง สตรอนเตียมฮาโลฟอสเฟต

สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ให้สีต่างกันนี้ ขณะที่ยังไม่ได้เปิดใช้งานสีของหลอดก็ยังเป็นสีขาวขุ่นเหมือนหลอดขาวทั่วไป ยกเว้นหลอดชนิดที่ให้สีน้ำเงิน สีทอง และสีแดง หลอดเหล่านี้จะฉาบเมือกสีเอาไว้ภายในหลอดแก้วก่อนที่จะเคลือบสารเรืองแสงอีกชั้นหนึ่ง สำหรับหลอดแสงสีขาวน้ำเงินมีการปรับปรุงส่วนผสมของสารเรืองแสงสีขาวคือ คูโลไวต์ เดอลูคซ์คูโลไวต์ วอร์มไวต์ เดอลูคซ์วอร์มไวต์ และ เดไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการกระจายพลังงานทางสเปกตรัมของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อเผยแพร่โดยไม่หวังกำไร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของแสงสีขาวยในการนำไปใช้กับงานต่างๆ

สี	ดัชนีความถูกต้องของสี (CRI)	รหัสของสี			การนำไปใช้งาน
		ฟิลิปส์	ออสแรม	ซิลวาเนีย	
ทูลไวต์	65	33	20	CW	ใช้กับสำนักงาน โรงงาน อาคารพาณิชย์ และในโรงงานที่ต้องการเน้นความรู้สึกเย็นสบาย ให้แสงเป็นธรรมชาติแก่ภายนอกอาคาร
ทูลไวต์ เคอฤกษ์	85	84	21	CWX 184	นำไปใช้เช่นเดียวกับทูลไวต์ และให้ส่วนผสมสีแสงเพิ่มขึ้น ทำให้แสงสีมองดูเพิ่มความประทับใจสูง ค่าดัชนีบอกความถูกต้องของสีดีมาก
วอร์มไวต์	52	29	30	WW	เหมาะสมกับงานที่ต้องการเน้นความรู้สึกอบอุ่น ให้สีคล้ายๆ หลอดไส้ สามารถใช้ร่วมกับหลอดไส้ ทำให้ดูสดใสขึ้นเมื่อขึ้นงานเป็นสีแดงและสีเหลือง ส่วนสีน้ำเงินจะจางลง
วอร์มไวต์ เคอฤกษ์	85	83	31	WWX18 3	นำไปใช้เช่นเดียวกับวอร์มไวต์ สีของแสงออกไปทางเหลืองแดงเหมาะกับสถานที่ที่ต้องการความรู้สึกอบอุ่นนุ่มนวล และช่วยทำให้สิ่งของรอบข้างแลดูสวยงาม เช่น ที่อยู่อาศัย และอาคารพาณิชย์
ไวต์	58	35	23	W	สำหรับใช้ในงานแสงสว่างทั่วไป เช่น สำนักงาน โรงเรียน ที่อยู่อาศัยและต้องการเน้นสีเหลือง เหลืองเขียว และส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

เคิลต์	77	54	10	D	สำหรับสถานที่ทั่วไป เช่น สำนักงาน โรงเรียน อาคารพาณิชย์ และที่อยู่อาศัย
	94	57	19	DX 157	ให้แสงสีน้ำเงินซึ่งออกไปทางแสงธรรมชาติ ทำให้สีน้ำเงินและสีเขียวมองดูสดใส ส่วนสีแดง สีส้ม และสีเหลืองจะมองดูจืดจางลง

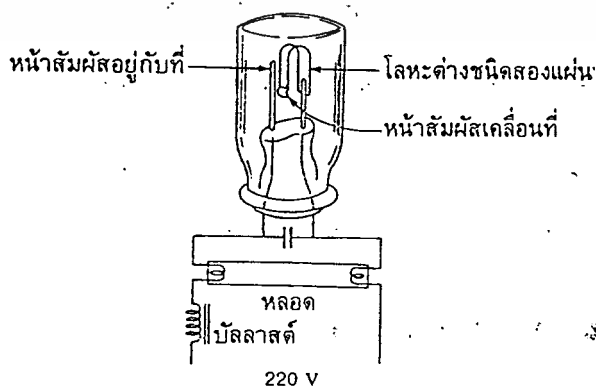
สำหรับหลอดแสงสีขาวนั้นมีผลทำให้สีของวัตถุที่มองเห็นภายใต้แสงของหลอดชนิดนี้มีความถูกต้องสูงซึ่งหมายถึงค่าดัชนีบอกความถูกต้องของสี (CRI) อยู่ระหว่าง 52 ถึง 94

การเลือกใช้ดัชนีบอกความถูกต้องของสีเพื่อนำไปใช้งานต่างๆที่ต้องการมองเห็นสีของวัตถุภายใต้การมองเห็นของแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แสงสีขาวประเภทต่างๆดังตารางที่ 2.3

2.4.3 หลอดฟลูออเรสเซนต์ขั้วแคโทดร้อน

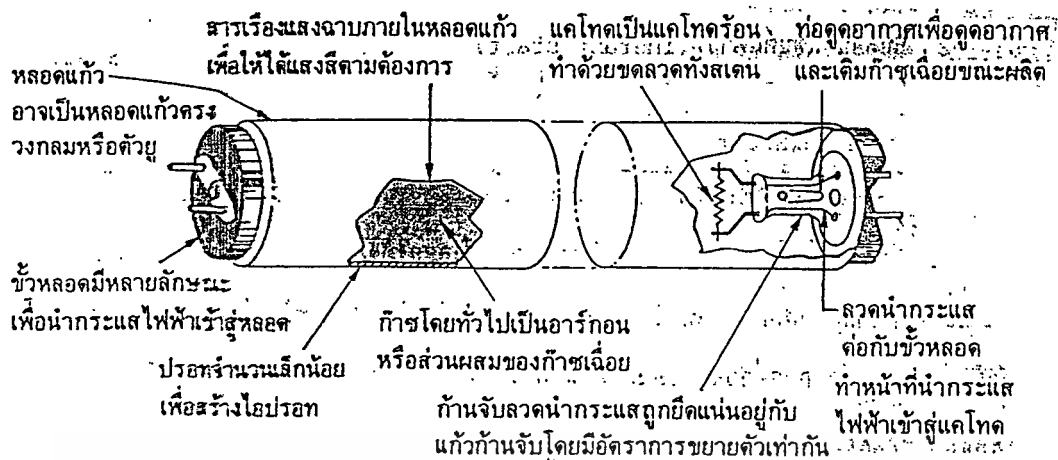
หลอดฟลูออเรสเซนต์ขั้วแคโทดร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ชนิดพรีฮีต (preheat)
2. ชนิดอินสแตนต์สตาร์ท (instant start)
3. ชนิดแรพิดสตาร์ท (rapid start)



รูปที่ 2.23 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงส่วนประกอบภายในของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีต

2.4.3.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีต

เป็นหลอดที่ผลิตจำหน่ายเป็นครั้งแรกในปี พ. ศ. 2481 หลอดชนิดนี้จะจุดติดได้ต้องทำการเผาไส้หลอดให้ร้อนเสียก่อนจึงจำเป็นต้องมีสแตร์เตอร์นอกจากนี้ยังต้องมีบัลลาสต์ทำหน้าที่สร้างไฟแรงสูงและจำกัดกำลังงานไฟฟ้า ดังจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป ส่วนการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีตแสดงดังรูป 2.23

จากรูปที่ 2.23 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่าน ช่วงแรกกระแสไฟฟ้าจะไม่สามารถไหลผ่านระหว่างขั้วหัวและขั้วท้ายของขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากความต้านทานภายในหลอดยังสูงอยู่ ในขณะที่เดียวกันกระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านสแตร์เตอร์ที่บรรจุด้วยก๊าซนีออน ทำให้ก๊าซนีออนในสแตร์เตอร์แตกตัวเป็นไอออนเปล่งแสง พร้อมทั้งเกิดความร้อนทำให้แผ่นโลหะต่างชนิดกัน 2 แผ่น (bimetallic) โค้งงอตัวไปชนกับหน้าสัมผัสที่อยู่กับที่ วงจรไส้หลอดทั้งสองจึงถูกต่อให้ครบวงจรไฟฟ้า การเผาไส้หลอดให้ร้อนก็จะเกิดขึ้น ความต้านทานของหลอดก็จะลดลง ในขณะที่เดียวกันหลอดสแตร์เตอร์เมื่อเย็นตัวลงก็จะปลดแยกวงจรไฟฟ้าเผาไส้หลอดออก การปลดวงจรทำให้สนามแม่เหล็กที่บัลลาสต์เกิดการยุบตัวเกิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูงขึ้นจากการเหนี่ยวนำในตัวเอง ดันให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง อิเล็กตรอนอิสระถูกกระแทกให้หลุดออกมา ทำให้ไอปรอทที่บรรจุอยู่ในหลอดแตกตัวเป็นไอออนกระตุ้นสารเรืองแสงให้หลอดเปล่งแสงออกมา

สำหรับส่วนประกอบภายในของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีตดังรูป 2.24

ส่วนแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีตดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ข้อเสียของหลอดชนิดนี้คือมีการกระพริบก่อนที่หลอดจะติด เนื่องจากต้องใช้เวลาหนึ่งในการเผาไส้หลอด

ตารางที่ 2.4 ค่าพลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออโรสเซสเซนต์ชนิดทรีสแตบบแบบหลอดแก้วยาว

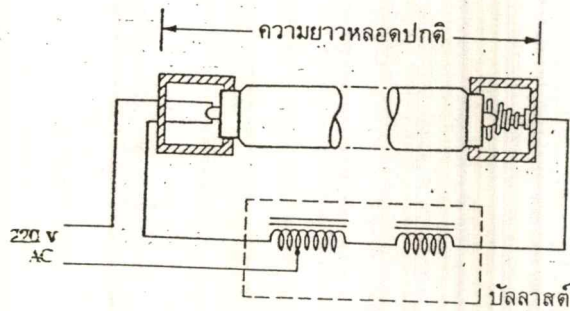
ชนิด วัตต์	ขนาดหลอด (mm)		อุณหภูมิ สีของแสง (K)	รหัสสี			ดัชนีบอกความ ถูกต้องของสี (CRI)	พลักซ์ แสงสว่าง (lm)	กำลังสูญเสีย บัลลาสต์ (W)	ประสิทธิภาพแสงสว่าง		อายุการ ใช้งาน (h)
	ความยาว	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง		ฟิลิปส์	ออสมรัม	ซิลวาเนีย**				เฉพาะหลอด	หลอดรวม บัลลาสต์	
4	150	15-16	2900	29	30	WW	52	140	2	35	23	6000
			4100	33	20	CW	65	35		23		
6	225	15-16	2900	29	30	WW	52	280	2	47	35	7500
			4100	33	20	CW	65	47		35		
8	300	15-16	2900	29	30	WW	52	410	2	51	41	7500
			4100	33	20	CW	65	51		41		
			3000	83	31	WWX 183	85	56		45		
			4000	84	21	CWX 184	85	56		45		
13	525	15-16	2900	29	30	WW	52	930	5	72	51	7500
			4100	33	20	CW	65	72		51		
			3000	83	31	WWX 183	85	77		55		
			4000	84	21	CWX 184	85	77		55		
แบบประหยัดพลังงาน			2900	29	30	WW	52	1200	9	67	44	7500
		4100	33	20	CW	65	1200	67		44		
		3400	35	23	W	87	1200	67		44		
		6500	54	10	D	77	950	53		35		
18	600	26	7500	57	19	DX 157	94	800		45*	29	7500
			3000	83	31	WWX 183	85	1450		81	53	
			4000	84	21	CWX 184	85	1450		81	53	
			2900	29	30	WW	52	1200		60	41	
20	600	38	4100	33	20	CW	65	1200	9	60	41	7500
			6500	54	10	D	77	1030		52	35	

ตารางที่ ๕.๕ (ต่อ) ค่าพิกัดแสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีซีตแบบหลอดแค้วยาว

วัด	ขนาดหลอด (mm)		อุณหภูมิ สีของแสง (K)	วัตต์			ดัชนีบอกความ ถูกต้องของสี (CRI)	ฟลักซ์ แสงสว่าง (lm)	กำลังสูญเสีย บัลลาสต์ (W)	ประสิทธิภาพแสงสว่าง (lm/W)		อายุการ ใช้งาน (h)
	ความยาว	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง		ฟิลิปส์	เอสแอม	จีว้าเนีย*				เฉพาะหลอด	หลอดรวม บัลลาสต์	
36	แบบประหยัดพลังงาน		2900	29	30	30	52	3100	10	86	67	15000
			4100	33	20	20	66	3100		80		
	3400	35	23	10	87	3100	86					
	6500	54	10	D	77	2000	69					
	7500	57	19	DX 157	94	3450	56*					
40	1200		3000	83	31	31	85	3450	10	86	75	15000
			4000	84	21	21	85	3450		95		
			2900	29	30	30	52	3100		78		
58	แบบประหยัดพลังงาน		4100	33	20	20	65	3100	12.5	78	62	15000
			6500	54	10	10	77	2600		56		
	2900	29	30	30	52	5000	86					
	4100	33	20	20	65	5000	86					
	3400	35	23	23	87	5000	86					
65	1500		6500	54	10	10	77	3900	12.5	67	55	15000
			7500	57	19	19	94	3300		57*		
			3000	83	31	31	85	5400		93		
65	1500		4000	84	21	21	85	5400	12.5	93	76	15000
			2900	29	30	30	52	4950		76		
			4100	33	20	20	65	4950		76		
65	1500		6500	54	10	10	77	4120	12.5	63	53	15000

*ที่ไม่ประหยัดพลังงานเนื่องจากเป็นหลอดที่ปรับปรุงดัชนีบอกความถูกต้องของสีถึง 94. ทำให้สูญเสียพลังงานมาก

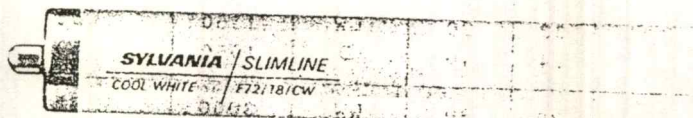
- ** MW = วอร์มไวต์ (warm white)
- CWX = คุลไวต์เดอลุกซ์ (cool white deluxe)
- MWX = วอร์มไวต์เดอลุกซ์ (warm white deluxe)
- D = เดย์ไลท์ (daylight)
- W = ไวต์ (white)
- DX = เดย์ไลท์เดอลุกซ์ (daylight deluxe)
- CW = คุลไวต์ (cool white)



รูปที่ 12.25 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอินสแตนต์สตาร์ท

ตารางที่ 2.5 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอินสแตนต์สตาร์ทแบบหลอดแก้วยาว

วัด	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	รหัสสี			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
			ฟิลิปส์	ออสแรม	ซิลวาเนีย			
15	450	38	33	20	CW	750	50	7500
20	600	38	29	30	WW	1080	54	7500
			33	20	CW	1060	53	
25	1000	19	29	30	WW	1900	76	7500
			33	20	CW	1850	74	
			54	10	D	1570	63	
38	1500	19	29	30	WW	3050	80	7500
			33	20	CW	3000	79	
			54	10	D	2550	67	
	1800	26	29	30	WW	3050	80	
			33	20	CW	3090	81	
			54	10	D	2650	70	
39	1200	38	29	30	WW	3000	77	9000
			33	20	CW	3000	77	
			54	10	D	2500	64	
55	1800	38	29	30	WW	4600	84	12000
			33	20	CW	4550	83	
			54	10	D	3800	69	
75	2400	38	29	30	WW	6300	84	12000
			33	20	CW	6300	84	
			54	10	D	5350	71	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.2 หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด instant start

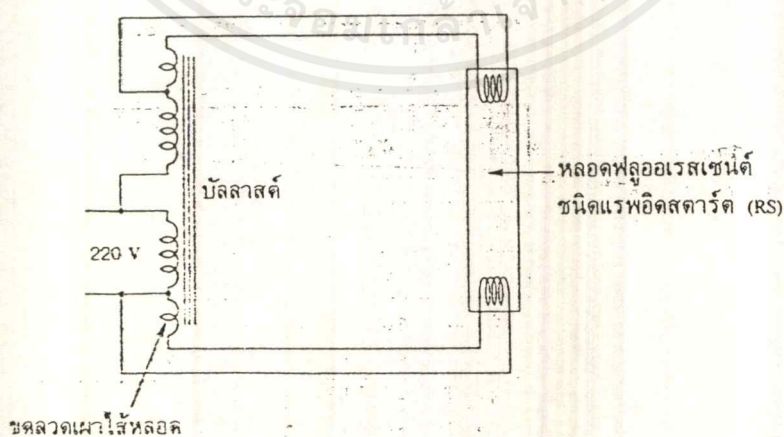
หรือบางที่เรียกหลอดชนิดนี้ว่า สลิมไลน์ (slimline) หลอดชนิดนี้เป็นการพัฒนามาจากหลอดชนิดพรีฮีตในปี พ.ศ 2487 ใช้เวลาในการจุดติดเร็วมากและไม่มีภาวะกระพริบ ไม่ต้องเผาไส้หลอดให้ร้อน ไม่ต้องใช้สตาร์ทเตอร์ บัลลาสต์ ทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง พอที่จะทำให้เกิดการปลดปล่อยลำอิเล็กตรอนให้หลอดติดทันทีดังรูป 2.25

สำหรับขั้วอิเล็กโทรดเนื่องจากไม่ต้องอุ่นไส้หลอดขั้วหลอดจึงเป็นแบบพินเดี่ยว ยกเว้นขนาด 40 W ขั้วหลอดเป็นแบบพินคู่แต่มีการเชื่อมต่อกันอยู่ภายในจึงทำหน้าที่ เหมือนกับขั้วหลอดแบบพินเดี่ยว สำหรับแสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดอินสแตนต์สตาร์ทแบบหลอดแก้วยาว แสดงในตารางที่ 2.5

2.4.3.3 หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด rapid start

ได้รับการผลิตใช้งานครั้งแรกในปี พ.ศ2495 เป็นหลอดที่สามารถจุดติดได้รวดเร็ว โดยไม่มีภาวะกระพริบและไม่ต้องใช้สตาร์ทเตอร์ หลอดชนิดนี้ต้องใช้กับบัลลาสต์พิเศษ โดยจะมีชุดขดลวดในบัลลาสต์เผาไส้หลอดไว้ตลอดเวลา แต่แรงดันที่ช่วยจุดหลอดให้ติดน้อยกว่าหลอดชนิดอินสแตนต์สตาร์ท ดังรูปที่ 2.26

สำหรับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อเผาไส้หลอดให้เป็นแบบพินคู่ หลอดชนิดนี้จะมีรหัสว่า RS กำกับอยู่ ส่วนแสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดเรพ อิดสตาร์ทแบบหลอดแก้วยาวแสดงในตารางที่ 2.6

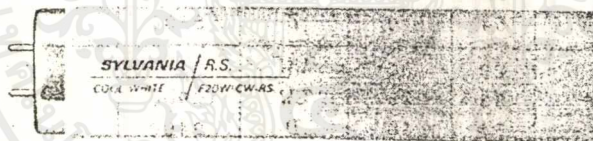


รูปที่ 2.26 แสดงการต่อวงจรของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดเรพอิดสตาร์ท

ตารางที่ 2.6 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรพิดสตาร์ทแบบหลอดแก้วยาว

วัตต์	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	รหัสสี			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
			ฟิลิปส์	ออสรัม	ซิลวาเนีย			
20W RS	600	38	29	30	WW	1150	58	8000
			33	20	CW	1150	58	
			54	10	D	1050	53	
40W RS	1200	38	29	30	WW	3000	75	20000
			33	20	CW	3000	75	
			54	10	D	2500	63	
			57	19	DX 157	1850	46	

วัตต์	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	รหัสสี			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
			ฟิลิปส์	ออสรัม	ซิลวาเนีย			
65W RS	1500	38	29	30	WW	4800	74	20000
			33	20	CW	4800	74	
			54	10	D	4000	62	
			57	19	DX 157	2850	44	
85W RS	2400	38	33	20	CW	7300	86	20000



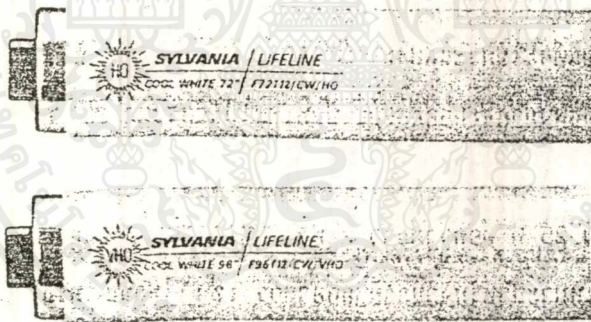
นอกจากนี้หลอดชนิดนี้ได้ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้ได้แสงสว่างมากๆ อีก 2 ประเภท คือ ประเภทให้แสงมาก (high output :HO) และ ประเภทให้แสงมากที่สุด (very high output :VHO) โดยทั่วไปหลอดฟลูออเรสเซนต์จะใช้กระแสประมาณ 425 mA เท่านั้น และใช้กำลังงาน 10 W ต่อความยาว 1 ฟุต ส่วนประเภทให้แสงมากจะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้ใช้กระแส 800 ถึง 1000 mA จะใช้กำลังงาน 14 W ต่อความยาว 1 ฟุต ส่วนประเภทให้แสงมากที่สุดถูกออกแบบให้ใช้กระแส 1500 mA คิดเป็นกำลังไฟฟ้าประมาณ 25 W ต่อความยาว 1 ฟุต หลอดชนิดนี้ถูกออกแบบให้สั้นแต่กินกระแสไฟฟ้ามากและให้แสงมากจึงเหมาะสำหรับงานภายนอกอาคาร เช่น ไฟถนน หรือ โคมฉายส่องอาคารที่ต้องการแสงมากใช้กับโคมสั้นแต่วัตต์สูง

สำหรับฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรพิดสตาร์ทประเภทให้แสงมากและให้แสงมากที่สุดแสดงในตารางที่ 2.7

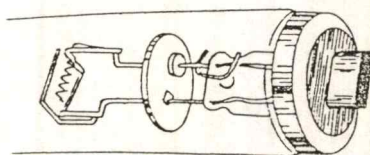
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของ หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดแรพิด-สตาร์ทแบบหลอดแก้วยาวประเภทให้แสงมาก (HO) และ ให้แสงมากที่สุด (VHO)

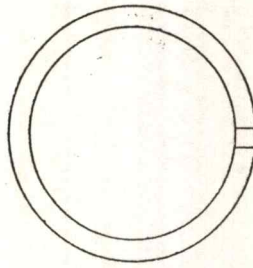
วัตต์	ความยาว (mm)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	วัสดุ			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
			ฟิลิปส์	ออสแรม	ซิลวาเนีย			
60W HO	1200	38	29	30	WW	4300	72	12000
			33	20	CW	4300	72	
			54	10	D	3600	60	
85W HO	1800	38	29	30	W	6475	76	12000
			33	20	CW	6650	78	
			54	10	D	5450	64	
115W VHO	1200	38	29	30	WW	6400	56	10000
			33	20	CW	6750	59	
			54	10	D	5600	49	
160W VHO	1800	38	29	30	WW	10300	64	10000
			33	20	CW	10900	68	
			54	10	D	9400	59	
215W VHO	2400	38	29	30	WW	14000	65	10000
			33	20	CW	15000	70	
			54	10	D	12400	58	



ส่วนหัวหลอดเป็นแบบหน้าสัมผัสคู่ซ่อนแสดงในรูปที่ 2.27 ภายในหลอดมี โล่ที่โลหะกลมสะท้อนกับความร้อนและควบคุมความดันไอปรอทไม่ให้สูงเกินไป เพื่อไม่ให้ประสิทธิภาพของแสงลดลง



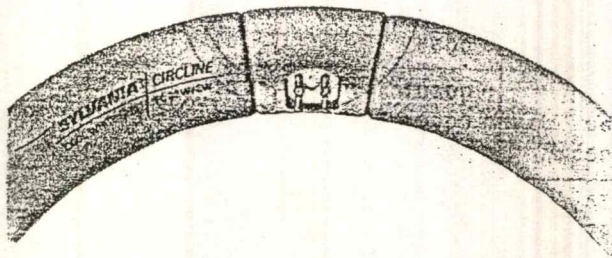
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.27 แสดงหน้าสัมผัสคู่ซ่อนในหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 หลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลม

ตารางที่ 2.8 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลม

ชนิดของหลอด	วัตต์	ขนาดหลอด (mm)		รหัสสี			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
		∅หลอด	∅วงกลม	ฟิลิปส์	ออสแรม	ซิลวาเนีย			
พรีฮีต	22W	28	210	29	30	WW	1250	57	7500
				33	20	CW	1250	57	
				54	10	D	1050	48	
	32W	32	305	29	30	WW	2100	66	7500
				33	20	CW	2050	64	
				54	10	D	1750	55	
40W	32	406	29	30	WW	2950	74	10000	
			33	20	CW	2900	73		
			54	10	D	2500	63		
แรพิดสตาร์ท	22W	28	210	33	20	CW	1250	57	18000
				54	10	D	1050	48	
				32W	32	305	33	20	
	54	10	D	1750			55		
	40W	32	406	33			20	CW	2900
	54			10	D	2500	63		

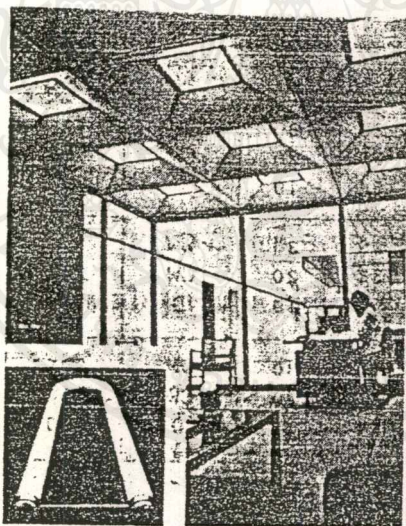


2.4.3.4 หลอดฟลูออเรสเซนต์พิเศษ

ถูกออกแบบรูปร่างของหลอดให้แตกต่างไปจากหลอดแก้วยาวตรง รูปร่างต่างๆ ถูกผลิตออกมาให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เช่น หลอดวงกลม (circline lamp) หลอดตัวยู (U-shape lamp) หลอดขนาดเล็กสำเร็จรูป และหลอดสะท้อนแสง (fluorescent reflector lamp)

1. หลอดวงกลม หลอดชนิดนี้ถูกสร้างจากหลอดแก้วยาวแล้วตัดให้เป็นวงกลม ดังรูปที่ 2.28 หลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลมนี้ผลิตขนาด 22, 32 และ 40 W มีทั้งชนิดฟรีฮีตและชนิดแรพิดสตาร์ท ดังตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะแสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์วงกลม

2. หลอดตัวยู ถูกสร้างจากหลอดแก้วยาวแล้วนำมาตัดเป็นตัวยูดังรูปที่ 2.29 ทำให้ประหยัดเนื้อที่ที่สามารถเลือกใช้หลอดขนาด 40 w จำนวน 2 หลอด ไปใส่ในดวงโคมเป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่า $60*60 \text{ cm}^2$ ได้ดี



รูปที่ 2.29 แสดงการใช้โคมสี่เหลี่ยมด้านเท่า $60*60 \text{ cm}^2$ ร่วมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ตัวยู 40 W จำนวน 2 หลอด

ส่วนลักษณะแสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ตัวยูดังในตารางที่ 2.9

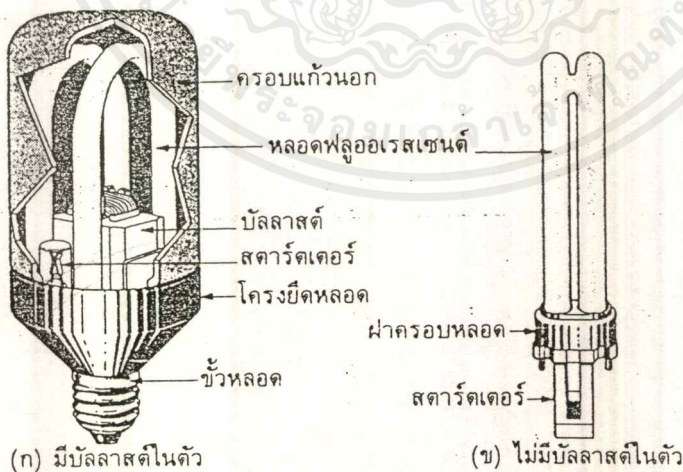
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ตัวยู

ชนิดของหลอด	ขนาด (mm)	ขนาด (mm)			วัสดุ			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
		∅หลอด	ยาว (หัวท้าย)		ฟิลิปส์	ออสแรม	ซิลวาเนีย			
ฟรีซีด	20	38	300	29 33	30 20	WW CW	1150 1150	58	7500	
	40	38	600	29 33	30 20	WW CW	2700 2700	68	10000	
	65	38	750	29 33	30 20	WW CW	4500 4500	69	10000	
แอฟอด-สตาร์ต	40 RS	38	570	33	20	CW	2800	70	18000	



3. หลอดขนาดเล็กสำเร็จรูป ได้ถูกพัฒนามาใช้แทนหลอดไส้เพื่อให้เป็นการประหยัดพลังงาน จึงสามารถใช้งานประดับและตกแต่งแทนหลอดไส้ได้ดี หลอดชนิดนี้มีทั้งแบบที่มีบัลลาสต์ในตัวเป็นชุดสำเร็จรูปและแบบที่แยกบัลลาสต์ออกมาต่างหากดังรูปที่ 2.30





รูปที่ 2.30 หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำเร็จรูป

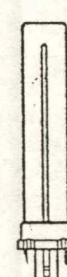
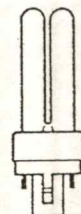
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอดชนิดนี้ผลิตตั้งแต่ขนาด 5 ถึง 36 W ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.10 แสดงฟลักซ์แสงสว่าง และคุณสมบัติทางแสง ถ้าเปรียบเทียบกับหลอดไส้ในตารางที่ หลอดขนาด 40 w ให้ฟลักซ์แสงสว่าง 430 lm ในตารางที่ 2.10 หลอดฟลูออเรสเซนต์ทรงไส้หลอดมีบัลลาสต์ในตัวขนาดเพียง 9 W เท่านั้น ก็ให้ฟลักซ์แสงสว่าง 425 lm แล้ว

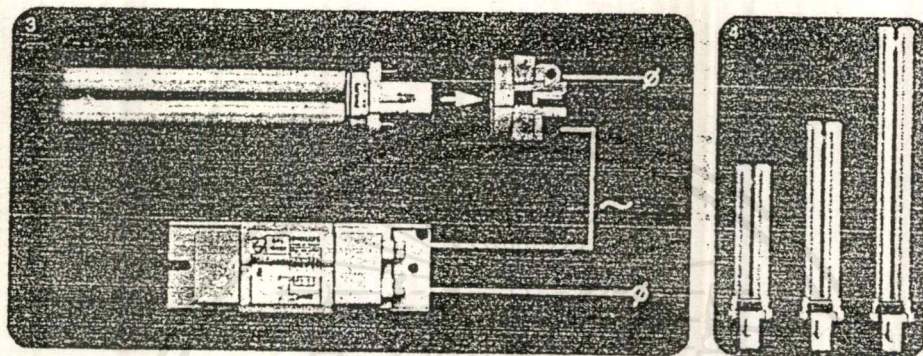
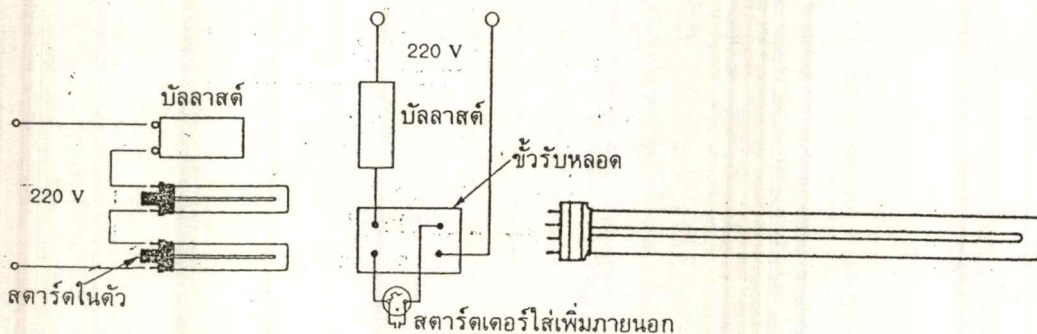
ตารางที่ 2.10 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็ก สำหรับรูป อายุการใช้งานประมาณ 5000 ชั่วโมง

หลอดวงกลมบัลลาสต์ในตัวหลอด E27						
วัตต์	ขนาดหลอด(mm)		อุณหภูมิสีของแสง	ฟลักซ์แสงสว่าง	ประสิทธิภาพแสงสว่าง	ลักษณะรูปทรง
	∅ หลอด	สูงหลอด	(K)	(lm)	(lm/W)	
12	165	100	2700	700	58	
18	165	100		1000	56	
24	216	100		1450	60	

หลอดฟลูออเรสเซนต์ทรงหลอดไส้มีบัลลาสต์ในตัวหลอด E27								
วัตต์	ขนาดหลอด(mm)		อุณหภูมิสีของแสง (K)	ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)		ประสิทธิภาพแสงสว่าง (lm/W)		ลักษณะรูปทรง
	∅ หลอด	สูงหลอด		ไส้	ขุ่น	ไส้	ขุ่น	
9	72	148	2700	425	375	47	42	 
13	72	158		600	525	46	40	
18	72	168		900	750	50	42	
25	72	178		1200	1050	48	42	

หลอดฟลูออเรสเซนต์ทรงขาตะเกียบไม่มีบัลลาสต์ในตัว						
วัตต์	ความยาว (mm)	อุณหภูมิสีของแสง (K)	สตาร์ทเคอร์ในตัว	ฟลักซ์แสงสว่าง	ประสิทธิภาพแสงสว่างเฉพาะหลอด	ลักษณะรูปทรง
				(lm)	(lm/W)	
5	82	2700	มี	250	50	 
7	114			400	57	
9	145			600	67	
10	85			600	60	
11	215			900	82	
13	117		900	69		
18	214		1250	69		
24	314		1800	73		
36	409		2900	81		

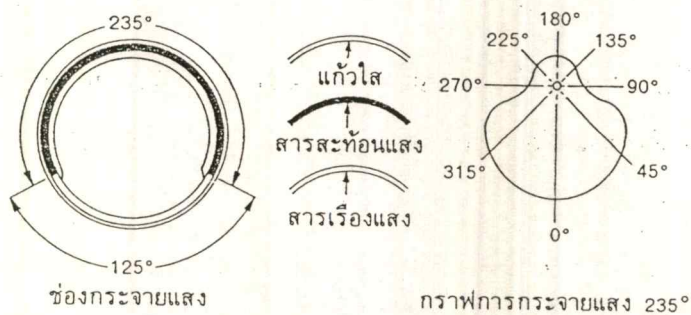
การต่อวงจร



รูปที่ 2.31 แสดงการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำหรับรูปชนิดที่ต่อบัลลัสต์อยู่ภายนอก

ส่วนรูปที่ 2.31 แสดงการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำเร็จรูปชนิดที่ต่อบัลลัสต์อยู่ภายนอก

4. หลอดฟลูออเรสเซนต์สะท้อนแสง หลอดชนิดนี้ภายในหลอดแก้วฉาบด้วยสารสะท้อนแสงเหมือนกับหลอดไส้ชนิด R และ PAR โดยจะเคลือบด้วยสารเรืองแสงสีขาวตลอด ยกเว้นเฉพาะตรงช่องกระจายแสงจะไม่เคลือบสารเรืองแสง โดยทั่วไปจะมีส่วนสะท้อนแสง 235 องศา และช่องกระจายแสง 125 องศา ดังรูปที่ 2.32

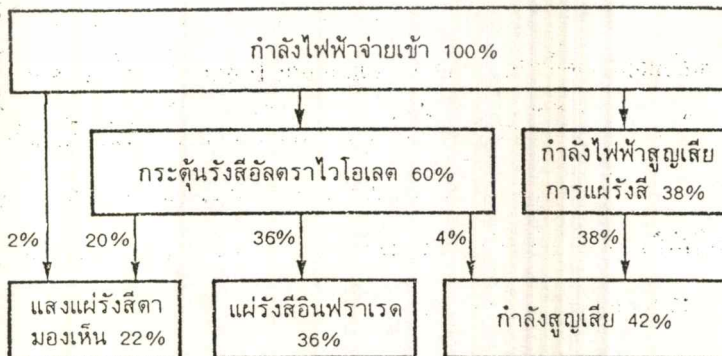
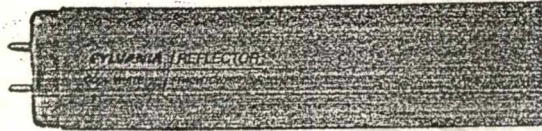


รูปที่ 2.32 แสดงลักษณะของหลอดฟลูออเรสเซนต์สะท้อนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ค่าฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์สะท้อนแสง

ชนิด	ขนาดหลอด (mm)		วัสดุ			ฟลักซ์แสงสว่าง (lm)	ประสิทธิภาพแสงส่องเฉพาะหลอด (lm/W)	อายุการใช้งาน (h)
	∅ หลอด	ยาว	ฟิลิปส์	ออสมรัม	ซิลวาเนีย			
40RS	38	1200	33	20	CW	2700	67	20000
65RS	38	1500	33	20	CW	4400	68	20000



รูปที่ 2.33 การกระจายพลังงานแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้หลอดชนิดนี้ในกรณีฝ้าเพดานที่มีการสะท้อนแสงต่ำ หรือในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฝุ่นมากและทำความสะอาดได้ยากลำบาก เช่น ติดตั้งไว้ที่สูงๆ รวมทั้งยังเหมาะสมในการติดตั้งในตู้โชว์และบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดไม่สามารถใช้โคมช่วยสะท้อนแสงได้ ส่วนฟลักซ์แสงสว่างและคุณสมบัติทางแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดนี้แสดงในตารางที่ 2.11

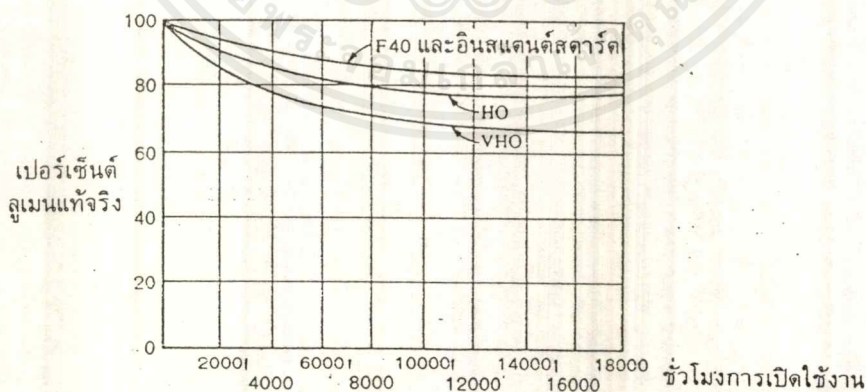
2.4.4 คุณลักษณะและขีดความสามารถของหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.4.4.1 การกระจายพลังงาน จากกำลังไฟฟ้าที่ป้อน 100 เปอร์เซ็นต์ หลอดฟลูออเรสเซนต์จะให้แสงแผ่รังสีที่ตามองเห็น 22 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.33

ดังนั้นประสิทธิภาพแสงสว่างของหลอดฟลูออเรสเซนต์จากตารางที่ 2.4 ถึง 2.11 พบว่าอยู่ระหว่าง 35 ถึง 93 lm/W และโดยเฉลี่ยจะอยู่ระหว่าง 75 ถึง 80 lm/W ซึ่งยังไม่รวมการสูญเสียของบัลลาสต์

2.4.4.2 ค่าการเสื่อมของหลอด หลอดฟลูออเรสเซนต์ช่วง 100 ชั่วโมงแรกของการใช้งาน ฟลักซ์แสงสว่างจะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่มีเสถียรภาพ แต่หลังจาก 100 ชั่วโมงไปแล้วจะลดลงอย่างช้าๆ และมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังรูปที่ 2.34

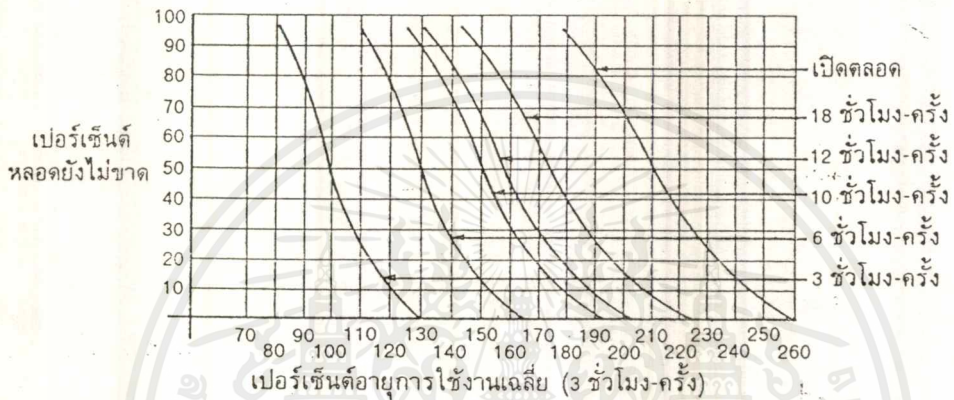
หลอดฟลูออเรสเซนต์ 40 W และหลอดชนิดดิสแตนต์สตาร์ทฟลักซ์แสงสว่างจะลดลงเหลือ 81 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้งานถึง 18000 ชั่วโมง สาเหตุที่หลอดฟลูออเรสเซนต์เสื่อมฟลักซ์แสงสว่างเนื่องจากสารเรืองแสงที่ฉาบไว้ในหลอดนั้นดำ ซึ่งเกิดจากสารเคลือบที่ขั้วอิเล็กโทรด



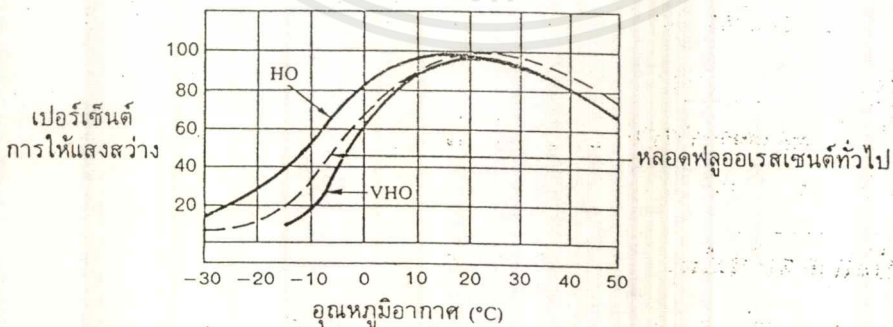
รูปที่ 2.34 แสดงเส้นโค้งของฟลักซ์แสงสว่างที่เหลืออยู่ตามเวลาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของหลอด	กวัตต์เปิดใช้งาน (ชั่วโมง-ครั้ง)					
	3	6	10	12	18	เปิดตลอด
40 W ฟรีฮีด	15000	17500	21250	22500	25000	28125
40 W แรพิดสตาร์ท	20000	24420	27750	28860	31600	37700
ให้แสงมาก (HO)	12000	14000	17000	18000	20000	22500
ให้แสงมากที่สุด (VHO)	10000	12500	14900	15980	17980	24980
75 W สลิมไลต์	12000	14000	17000	18000	20000	22500



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟกำหนดอายุการใช้งานต่อชั่วโมง-ครั้งของการเปิดปิดใช้งานของหลอดฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 2.36 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั่วไป ประเภทให้แสงมาก (HO) และ ให้แสงมากที่สุด (VHO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3 ผลของการปิดเปิดใช้งานต่ออายุการใช้งานของหลอด ในตารางที่ 2.4 ถึง 2.11 นั้นอายุการใช้งานสูงกว่าหลอดไส้อยู่มาก มีอายุตั้งแต่ 6000 ถึง 20000 ชั่วโมง โดยคิดที่วัฏจักรการใช้งาน 3 ชั่วโมง-ครั้ง (3 hour cycle) ซึ่งจากการทดสอบอายุการใช้งานหมายถึงเปิดไฟใช้งานเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 50 นาที แล้วปิดไฟนาน 10 นาที ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ สมมติว่าทำได้ 5300 ครั้งแล้วหลอดขาดก็แสดงว่าหลอดไฟมีอายุการใช้งาน $[2 \ 50/60 * 5300]$ หรือประมาณ 15000 ชั่วโมง ในการทดสอบนั้นหลอดไฟที่ผลิตออกมาแต่ละหลอดอาจจะไม่เหมือนกัน บางหลอดขาดเร็วบางหลอดขาดช้า จึงจำเป็นต้องใช้หลอดหลายๆ หลอดทำการทดสอบเป็นกลุ่ม เช่น ถ้าใช้ทั้งหมด 100 หลอด ทำการเปิดใช้งานทดสอบที่ 3 ชั่วโมง-ครั้ง ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งหลอดขาดเหลือ 50 เปอร์เซนต์ คือ 50 หลอด แสดงว่านั่นคืออายุการใช้งานที่แท้จริง ดังรูปที่ 2.35

จากรูปที่ 12.35 แสดงให้เห็นว่าถ้าเปิด-ปิดการใช้งานบ่อยๆ ครั้งหลอดจะขาดเร็ว แต่ถ้าไม่เปิด-ปิดการใช้งานบ่อยๆ หลอดจะขาดช้า เช่น หลอด 40 w ชนิดฟลูออโรเปิดไว้ตลอดอายุการใช้งานจะเป็น 28125 ชั่วโมง

2.4.4.4 ผลของอุณหภูมิ หลอดฟลูออโรสเซ็นต์จะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออุณหภูมิโดยรอบประมาณ 20 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิโดยรอบต่ำความดันของไอปรอทจะลดลง กำลังงานที่ผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่ำลงเป็นเหตุให้แสงสว่างลดลง ดังรูปที่ 12.36

ในขณะเดียวกันถ้าอุณหภูมิสูงจะผลิตความยาวคลื่นใกล้กับแถบที่ตามองเห็น ทำให้ผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ตลดลง แสงก็จะลดลงเช่นเดียวกัน

2.4.4.5 ผลของความชื้น การจุดของหลอดฟลูออโรสเซ็นต์ต้องอาศัยประจุไฟฟ้าสถิตย์รอบๆ ภายนอกหลอดแก้ว ความชื้นของอากาศภายนอกที่สูงกว่า 65 เปอร์เซนต์ ทำให้หลอดติดยากซึ่งบางครั้งอาจจำเป็นต้องเคลือบสารซิลิกอนภายนอกหลอดแก้ว อย่างไรก็ตามความสกปรกของหลอดก็มีผลทำให้หลอดจุดติดยาก การเช็ดทำความสะอาดหลอดอยู่เป็นประจำทำให้หลอดจุดติดได้ง่าย

2.4.4.6 ข้อดีและข้อเสียของหลอดฟลูออโรสเซ็นต์

ประโยชน์ของการเลือกหลอดฟลูออโรสเซ็นต์ให้แสงสว่าง

- ก. ให้แสงสว่างมากคือ ประมาณ 75 ถึง 80 lm/W
- ข. อายุการใช้งานยาวนาน 15000 ถึง 20000 ชั่วโมง
- ค. ให้แสงจ้าที่ตัวหลอดน้อยทำให้ไม่เกิดแสงบาดตา
- ง. กินไฟน้อยให้แสงมากเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้า เหมาะสำหรับ

ให้แสงสว่างทั่วไป เช่น ห้องเรียน ศูนย์การค้า อาคารพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรม

จ. หลอดให้ความร้อนต่ำไม่เป็นการสิ้นเปลืองเมื่อมีการใช้เครื่องปรับอากาศ

ข้อเสียของการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ให้แสงสว่าง

ก. ราคาแพงกว่าหลอดไส้

ข. ต้องมีอุปกรณ์ประกอบ เช่น บัลลาสต์ และสตาร์ทเตอร์

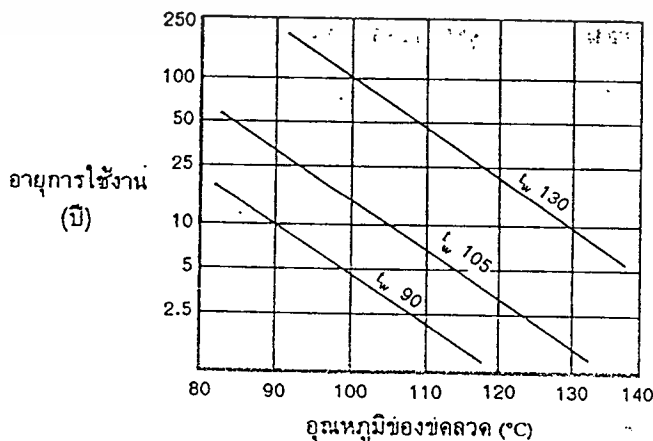
ค. หลอดมีความยาวควบคุมแสงให้ตกลงบนพื้นที่ที่ต้องการลำบาก จึงไม่เหมาะแก่การให้แสงเฉพาะจุด

ง. หลอดยาวทำให้โคมยาวและใหญ่มีราคาแพง

2.4.5 บัลลาสต์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์

บัลลาสต์มีหน้าที่สำคัญ 2 ประเภท คือ สร้างแรงดันสูงเพื่อจุดหลอดและควบคุมกำลังไฟฟ้าขณะที่หลอดทำงานปกติ การเลือกบัลลาสต์ต้องให้เหมาะสมกับชนิดของหลอด เช่น ชนิดฟรีซิด ชนิดอินสแตนแตนต์สตาร์ท และชนิดแรพิดสตาร์ท บริษัทผู้ผลิตบัลลาสต์จำเป็นต้องผลิตให้ได้ตามมาตรฐานต่างๆ เช่น NEMA , IEC หรือมอก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม) นอกจากนี้บางบริษัทอาจออกแบบบัลลาสต์ด้วยวัสดุคุณภาพดี โดยที่ขดลวดสามารถรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 90 , 105 และ 130 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.37

ถ้าเป็นชนิด 130 องศาเซลเซียส อายุการใช้งานของบัลลาสต์จะไม่ต่ำกว่า 10 ปี ฉนวนหุ้มขดลวดที่ใช้เป็นชนิดพิเศษ สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นบัลลาสต์ชนิดที่ขดลวดรับอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสมกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ติดตั้งกับดวงโคมที่ระบายความร้อนยาก เช่น โคมซ่อนเพดาน สำหรับ ตารางที่ 2.11 แสดงค่าพิกัดต่างๆ ของบัลลาสต์หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดฟรีซิด ทั้งบัลลาสต์เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำและบัลลาสต์เพาเวอร์แฟกเตอร์สูง



รูปที่ 2.37 แสดงอุณหภูมิขดลวดบัลลาสต์ที่เพิ่มขึ้นต่ออายุการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับอยู่ใต้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 แสดงค่าพิกัดต่างๆ ของบัลลาสต์หลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิดพรีฮีต

(ก) บัลลาสต์เพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ

ปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์

หลอด	จำนวนหลอด	ขนาดบัลลาสต์ (W)	แรงดันปกติ (V)	เพาเวอร์แฟกเตอร์	กระแส (A)			ต่อคาปาซิเตอร์ขนาน*			กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)
					ขณะเริ่มติด	ขณะใช้งาน	วงจร	คาปาซิเตอร์		กระแส (A)	
								μF	V		
13 W	1	13	220	0.47	0.23	0.17	1	1.0	250	0.10	6.00
18, 20 W	1	20	220	0.35	0.42	0.37	1	4.7	250	0.15	9.00
	2	40	220	0.50	0.58	0.42	2	4.2	250	0.25	10.00
36, 40 W	1	40	220	0.50	0.60	0.43	1	4.2	250	0.25	10.00
58, 65 W	1	65	220	0.50	0.95	0.67	1	6.5	250	0.39	12.50

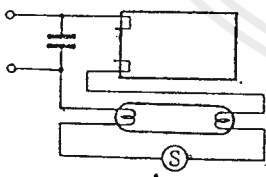
(ข) บัลลาสต์เพาเวอร์แฟกเตอร์สูง ($\cos \phi \geq 0.90$) ด้วยวงจรกำจัดกระแสพริบ

หลอด	จำนวนหลอด	แรงดันปกติ (A)	ขนาดบัลลาสต์และคาปาซิเตอร์	กระแสขณะใช้งาน** (A)	วงจร	กำลังสูญเสียบัลลาสต์ (W)
18, 20 W	2	220	40 W + 3.4 μF 420 V	0.28	3	10.00
	4	220	40 W + 3.4 μF 420 V	0.48	4	16.50
36, 40 W	2	220	40 W + 3.6 μF 420 V	0.48	3	16.50
58, 65 W	2	220	65 W + 5.7 μF 420 V	0.75	3	20.00

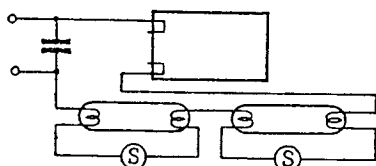
* ปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ ($\cos \phi > 0.85$) โดยต่อคาปาซิเตอร์ขนานกับเมเนคาปาซิเตอร์ชนิดผลาด $\pm 10\%$

** กระแสขณะเริ่มติดจะน้อยกว่ากระแสขณะใช้งาน

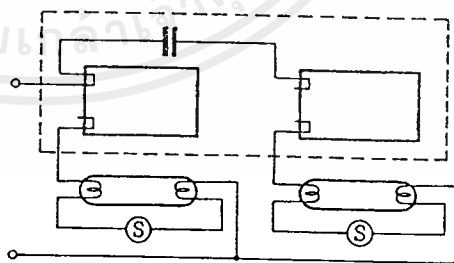
(ค) วงจรการต่อสาย



วงจรที่ 1



วงจรที่ 2



วงจรที่ 3

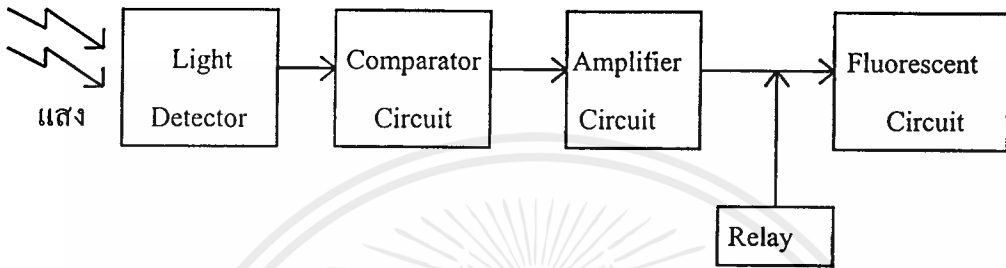
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แนวทางในการออกแบบและการทำงานของวงจร

3.1 บล็อกไดอะแกรมของชุดสวิตช์ทำงานด้วยแสง

บล็อกไดอะแกรมของชุดสวิตช์ทำงานด้วยแสง มีบล็อกไดอะแกรมดังต่อไปนี้



หน้าที่ของแต่ละบล็อกไดอะแกรมจะกล่าวละเอียดในหัวข้อต่อไป แต่พอจะอธิบายก่อนคร่าวๆ ได้ดังต่อไปนี้

- Light Detector Block

บล็อกนี้กล่าวได้ว่าเป็นส่วน input ของวงจร ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับแสง โดยใช้หลักการของการเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เมื่อ Detector (LDR : Light Dependent Resistor) ได้รับความสว่าง ความต้านทานภายในตัวจะลดลง ทำให้มีกระแสไหลผ่านได้มากขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากสภาพความนำของ LDR มีค่าเพิ่มขึ้นตามที่ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดแล้วในบทที่ 2

- Comparator Circuit Block

บล็อกนี้เป็นวงจรเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่แน่นอน โดยพิจารณาจากสัญญาณที่มาจากส่วนตรวจจับแสงเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงค่าหนึ่งที่เราตั้งค่าไว้ เพื่อความสะดวกในการนำสัญญาณไปใช้กับวงจรส่วนต่อไป เพราะมีระดับสัญญาณแน่นอน (ไม่เป็นระดับกราวด์ก็เป็น V_{CC}) อุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่อปแอมป์ เบอร์ 741

- Amplifier Circuit Block

บล็อกนี้เป็นวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ผ่านมาจากส่วนคอมพาราเตอร์เมื่ออปแอมป์ active เพื่อให้ได้สัญญาณขนาดที่พอไปขับส่วนที่เป็นสวิตซ์รีเลย์ให้ active

- Fluorescent Circuit Block

บล็อกนี้เป็นส่วนของวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่จะทำงานเมื่อมีสัญญาณผ่านมาจากส่วนก่อน (รีเลย์ active)

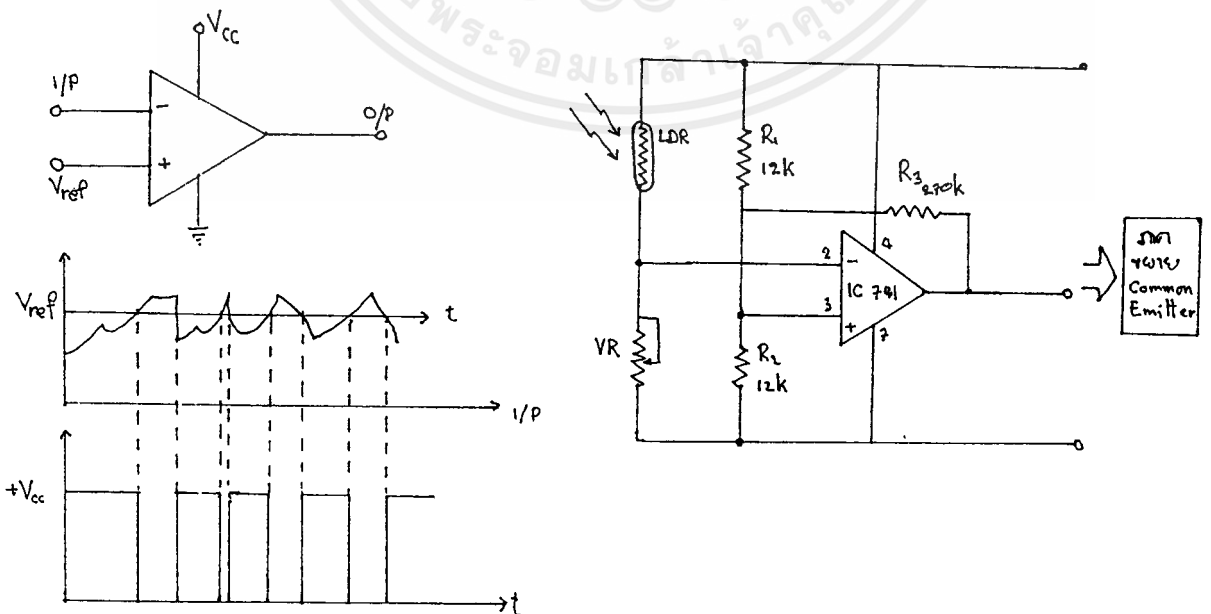
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แนวทางในการออกแบบ

3.2.1 ความต้องการของวงจรสวิทช์ทำงานด้วยแสง

ถ้าเราพิจารณาตามบล็อกไดอะแกรมในหัวข้อแรก เราจะพบว่าสิ่งที่เราต้องการในอันดับแรก ก็คือ สัญญาณที่ตอบสนองต่อแสง ดังนั้นปัญหาของเราจึงอยู่ที่จะนำสัญญาณนั้นมาได้อย่างไร และใช้ได้อย่างไร เราเลือกตัวตรวจจับแสง LDR ชนิด NTC คือเมื่อมีแสงมาตกกระทบแล้วความต้านทานตัวมันจะลดลง (ยังมี LDR อีกชนิดหนึ่งก็คือ ชนิด PTC ซึ่งมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับชนิด NTC) มาใช้ ทั้งนี้ก็เพราะราคาถูกเป็นสำคัญ เหมาะกับวงจรง่ายๆ ไม่ต้องการความละเอียดของสัญญาณมาก อย่างเช่นวงจรนี้ แต่พบว่าสัญญาณที่ผ่าน LDR ออกมานั้นมีค่าไม่ต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ LDR ดังนั้นเพื่อที่จะนำสัญญาณมาใช้ได้ เราเลือกออปแอมป์มาทำหน้าที่ค้อมพาราเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณที่แน่นอน(ไม่เป็นกราวด์ก็เป็น V_{cc}) มีข้อสังเกตว่าเราจะให้ค่าแรงดันเพื่อไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของออปแอมป์ให้มีค่าเท่าใด ในวงจรเราเลือกตัวต้านทานปรับค่าได้มาทำการแบ่งแรงดันที่ขา 2 ของออปแอมป์ เพื่อให้สามารถเลือกแรงดันไปเปรียบเทียบได้ (ทำให้เราสามารถเลือกที่จะให้วงจรตอบสนองต่อแสงที่ความเข้มค่าอื่นได้ หรือช่วงเวลาอื่นได้) สิ่งที่ต้องการต่อไปก็คือ ต้องการกระแส output ที่ออกจากออปแอมป์ที่มีขนาดพอที่จับขั้ววงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Relay) ได้ ดังนั้นสิ่งที่ต้องทำก็คือเลือกวงจรมาทำหน้าที่ขยายกระแสที่ออกมาจากออปแอมป์ กระแสที่ผ่านการขยายแล้วสามารถขับรีเลย์ เมื่อมีการขับรีเลย์สิ่งทีวงจรต้องการต่อไปก็คือการป้องกันทรานซิสเตอร์เสียหายเนื่องจากรีเลย์ ซึ่งก็ทำได้โดยต่อไดโอดคร่อมรีเลย์

3.2.2 ส่วนวงจรเปรียบเทียบแรงดันและขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนเปรียบเทียบแรงดันของวงจร

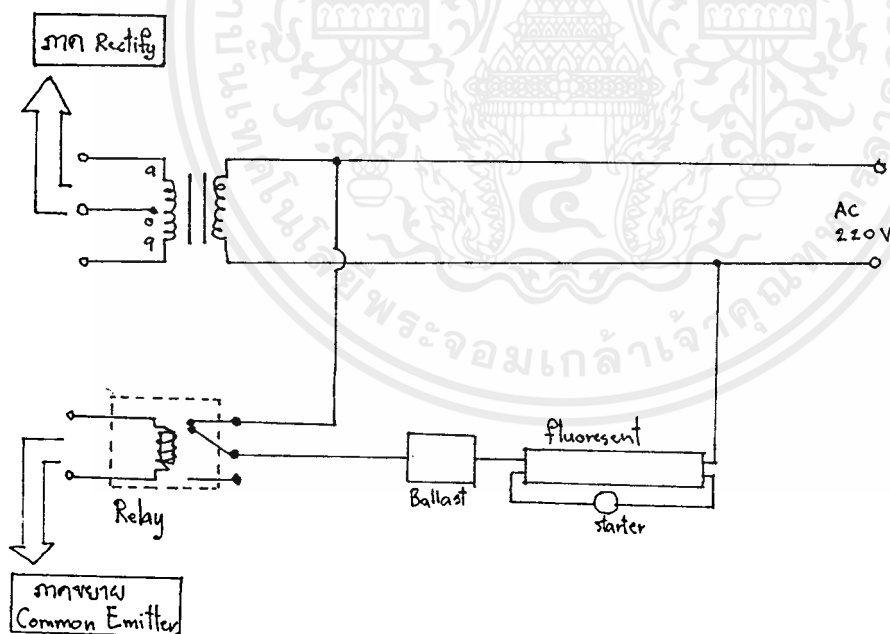
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออปแอมป์เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันหรือทำหน้าที่เป็นคอมพาราเตอร์ แสงที่ตกกระทบ LDR จะให้แรงดันออกมาเปรียบเทียบกับแรงกันอ้างอิง เราจะได้การเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตที่แน่นอนไปต่อกับวงจรอื่น

การใช้ออปแอมป์เป็นตัวเปรียบเทียบแรงดันทำได้ง่ายและสะดวกมาก เพราะอาศัยคุณสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งของออปแอมป์ คือ มีอัตราขยายทางลูปเปิดสูงมาก ถ้าไม่มีการป้อนกลับใดๆเลย ก็จะทำให้แรงดันทางเอาต์พุตเกิดการอึดตัวไปทางใดทางหนึ่ง ไม่มีค่าเป็น ระดับกราวด์ การมีแรงดันเปรียบเทียบ จะทำให้ออปแอมป์ทำงานเมื่อแรงดันที่อีกขาหนึ่งสูงหรือต่ำกว่าแรงดันขาเปรียบเทียบนั้น

เราจะเห็นว่าแรงดันที่ได้ทางเอาต์พุตมี 2 ระดับเท่านั้น ไม่อยู่ที่ระดับกราวด์ก็อยู่ที่ V_{cc} จึงใช้ในการควบคุมอุปกรณ์อย่างรีเลย์ได้สะดวก กระแสที่ออกจากวงจรเปรียบเทียบ จะไปผ่านวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด npn เพื่อให้มีขนาดพอที่จะขับรีเลย์ให้ทำงานต่อไป

3.2.3 ส่วนวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์แลรีเลย์

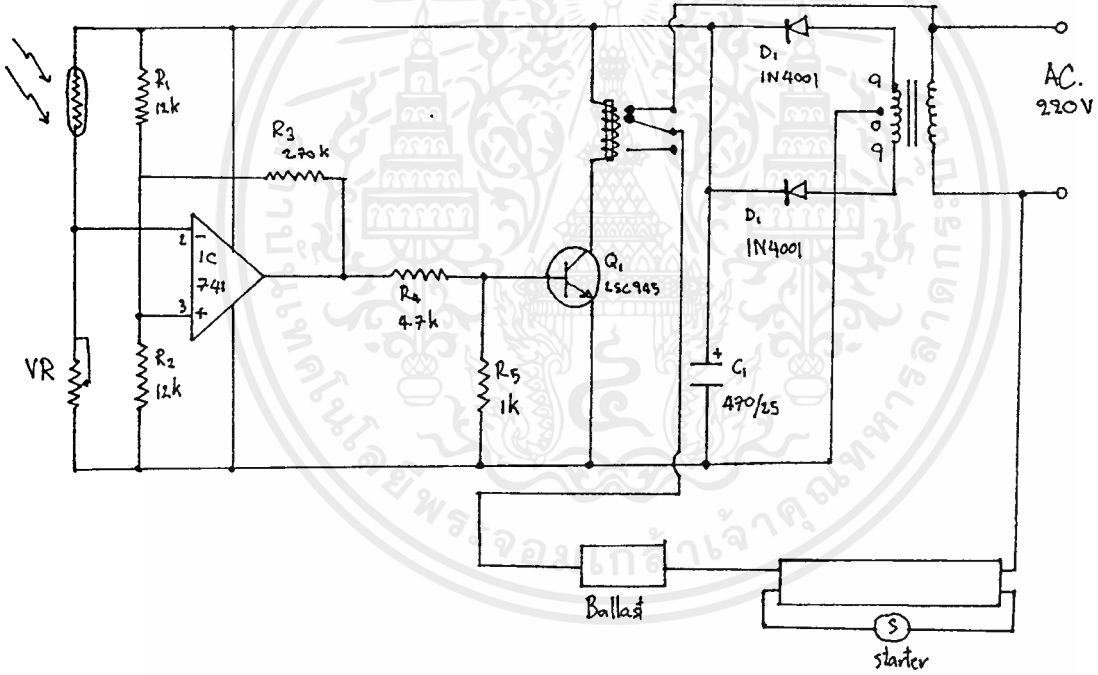


รูปที่ 3.2 วงจรแสดงการเชื่อมต่อกับชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีเลย์เป็นสวิตช์ไฟฟ้ากล จะไม่ทำงานจนกว่าทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะ active มีข้อดีคือเป็นสวิตช์อย่างง่าย ที่สำคัญคือราคาถูกและเหมาะสมจะใช้กับสัญญาณที่มีระดับแน่นอน ซึ่งได้ออกมาจากส่วนคอมพิวเตอร์ เนื่องจากวงจรชุดนี้เป็นวงจรที่ไม่ต้องการความละเอียดของสัญญาณมากนัก จึงสามารถใช้รีเลย์ได้เป็นอย่างดี โดยไม่ต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องของ contact ของรีเลย์ และผลกระทบต่อบัลลาสต์ ส่วนวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ก็จะเป็นชุดที่ใช้กันทั่วไปตามบ้าน (ติดตายตัวอยู่) ซึ่งเป็นไปตามจุดประสงค์ของการออกแบบ คือสร้างชุดสวิตช์ทำงานด้วยแสงเป็นลักษณะ option เพิ่มเข้าไปในชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ตามบ้านเรือนโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายใดๆ

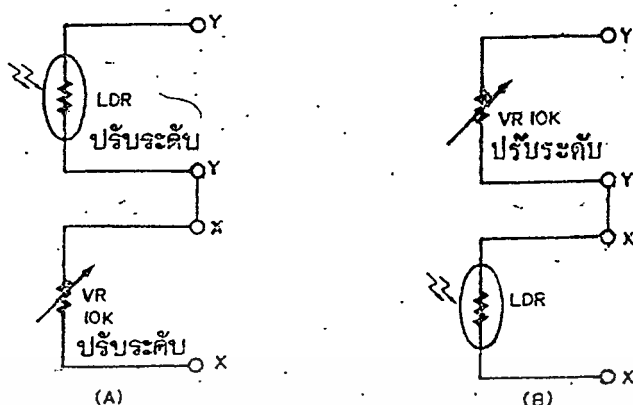
3.3 การทำงานของวงจร



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรสมมุติของชุดสวิตช์ทำงานด้วยแสง

ตามวงจรในรูปที่ 3.3 IC₁ ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดัน โดยที่ R₁ และ R₂ จะทำหน้าที่กำหนดแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 โดยแรงดันที่ขา 3 จะมีค่าเป็น $(V_{CC} \times R_2) / (R_1 + R_2)$ เมื่อ R₁=R₂ จึงได้แรงดันที่จุดนี้เป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟเลี้ยง V_{CC} และ LDR จะประกอบกันเป็นตัวสำหรับตรวจจับแรงดันที่ขา 2 จึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแสงที่ตกกระทบบน LDR ถ้าหากเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

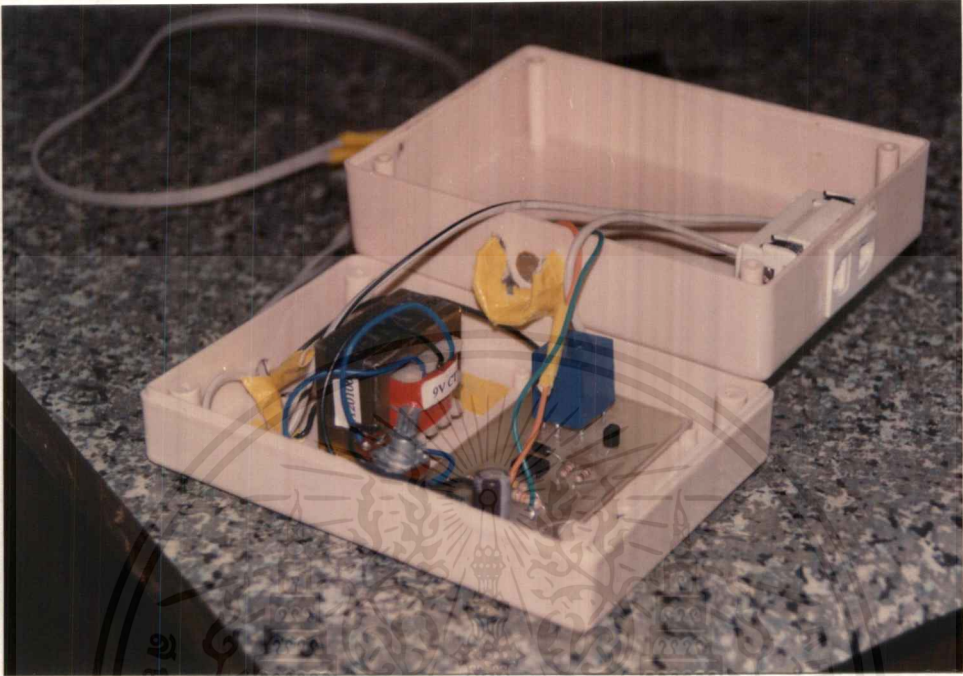


รูปที่ 3.4 แสดงส่วนตรวจจับทางแสง

วงจรเปรียบเทียบทำงานแล้วให้เอาท์พุตเป็นระดับต่ำรีเลย์จะไม่ทำงาน และถ้าหากวงจรเปรียบเทียบทำงานแล้วให้เอาท์พุตเป็นระดับสูง ทำให้กระแสไหลผ่าน R_4 และ R_5 แรงดันตกคร่อม R_5 จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 2SC 945 ทำงาน ทำให้รีเลย์ทำงาน สำหรับไดโอด D_3 จะทำหน้าที่ป้องกันต่อทรานซิสเตอร์ เนื่องจากผลของรีเลย์

สำหรับการต่อตัวตรวจจับทางอินพุต คือขา 2 สามารถต่อได้เป็น 2 แบบ คือรูปที่ 3.4 (A) และ รูปที่ 3.4 (B) การต่อแบบรูปที่ 3.4 (A) จะทำให้รีเลย์ทำงานเมื่อ LDR ไม่ได้รับแสงเพียงพอ หรือจะทำงานเมื่อมืดนั่นเอง ถ้าหากว่าต่อดังรูป B แล้วจะทำมิให้ผลในทางกลับกัน

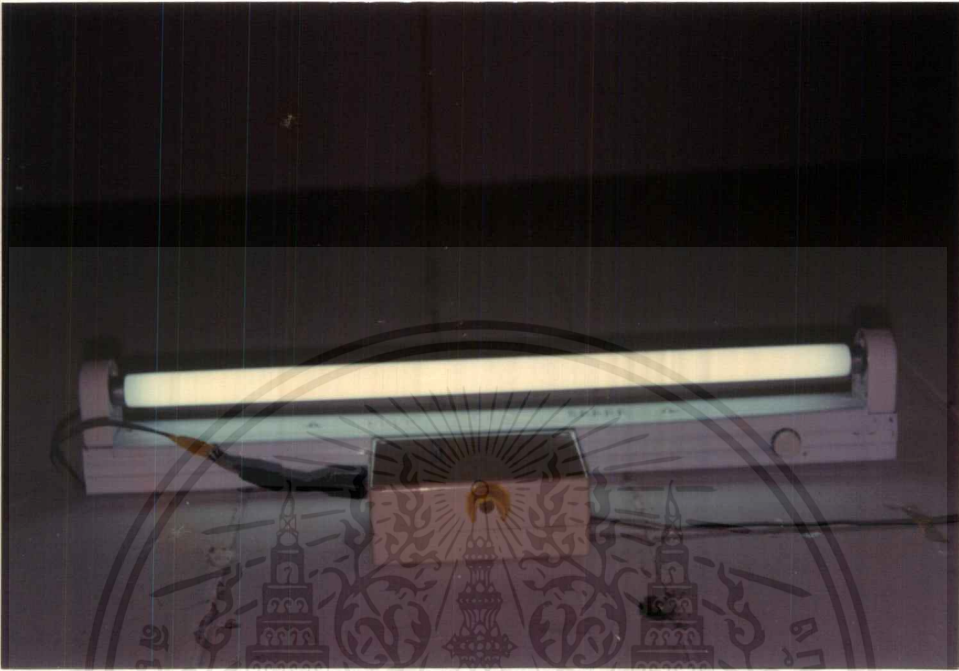
สำหรับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรนั้น อาจจะใช้แบตเตอรี่ 9 โวลต์ หรืออาจใช้กับไฟบ้าน 220 โวลต์ก็ได้เช่นกัน และวงจรในรูปที่ 3.3 เป็นแบบที่ใช้ไฟเลี้ยงเป็นไฟบ้าน 220 โวลต์ D_1 , D_2 , C_1 และ T_1 ทำหน้าที่ในภาคจ่ายไฟ โดย T_1 ทำหน้าที่แปลงไฟจาก 220 โวลต์ลงมาเป็น 9 โวลต์ D_1 , D_2 เป็นไดโอดเรกติไฟร์ C_1 ทำหน้าที่กรองไฟให้เรียบขึ้น



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรส่วนต่างๆของชุดสวิตซ์ทำงานด้วยแสง



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.6 แสดงกล่องชุดทำงานด้วยแสงพร้อมต่อพ่วงวงจรหลอดฟลูออโรเรสเซ็นต์ ยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

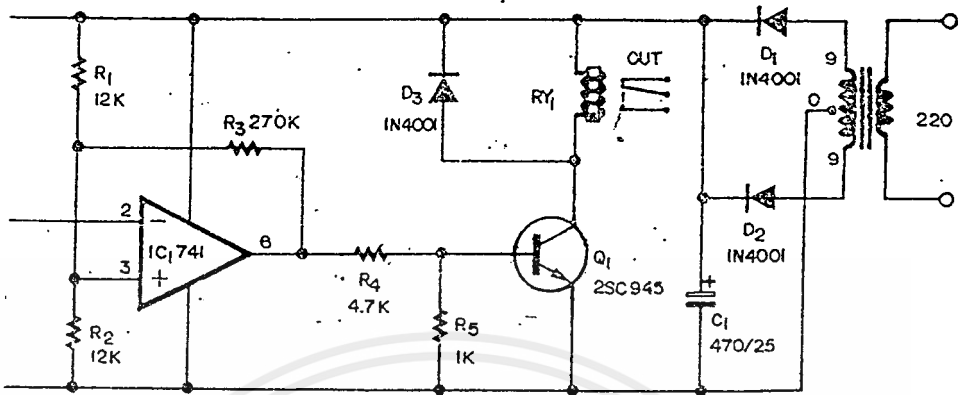


รูปที่ 3.7 แสดงวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์สถานะถูกทำให้เอกทึฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 วงจรแสดงชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง

พิจารณาแรงดันอ้างอิงที่ขา 3 ของออปแอมป์ ซึ่งจะนำไปตามสมการ $V_{ref} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2}$

ดังนั้น แรงดันอ้างอิงที่ขา 3 มีค่าเท่ากับ 4.5 โวลต์

แรงดันที่ขา 2 ของออปแอมป์ สามารถเปลี่ยนค่าได้เพราะ เราได้ใช้เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อแบ่งแรงดัน ทั้งนี้เพื่อให้มีการทรiggerรี่ในช่วงเวลาต่างกัน ค่าความต้านทานปรับค่าได้, ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้นี้, ค่าความต้านทานของ LDR, แรงดันที่ตกคร่อม LDR, ช่วงเวลาที่รีเลย์ต่อวงจรทำหลอดไฟให้ติด และช่วงเวลาที่รีเลย์ตัดวงจรทำหลอดไฟให้ดับ บันทึกได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองชุดสวิทช์ทำงานด้วยแสง

ความต้านทานปรับค่าได้ VR (kΩ)	สถานะของหลอดฟลูออเรสเซนต์	ความต้านของ LDR : R _{LDR} (kΩ)	แรงดันตกคร่อมความต้านทาน VR : V _{Rvr} (kΩ)	ช่วงเวลา (นาฬิกา)
1	OFF (ดับ)	0.61	4.87	6.52-18.25
	ON (ติด)	0.87	4.61	18.25-6.50
5	OFF (ดับ)	4.7	5.01	6.37-18.32
	ON (ติด)	5.22	4.81	18.32-6.30
10	OFF (ดับ)	9.65	4.93	6.35-18.29
	ON (ติด)	10.03	4.86	18.29-6.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการดำเนินงานของชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสง พบว่ามีปัญหาเล็กน้อยที่ว่าเมื่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานแล้วแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปทำให้ LDR ทำงานในทางกลับกัน คือทำให้รีเลย์ตัดวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้หลอดไฟดับลง แต่เพราะว่าเป็นเวลาใกล้ค่ำคือไม่มีแสงสว่างพอ LDR ก็จะทำงานในทางกลับกันอีกครั้ง คือทำให้รีเลย์ต่อวงจรหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้หลอดไฟติดขึ้น เป็นเช่นนี้ ปัญหานี้แก้ไขไม่ยาก ทำได้โดยติดตั้งชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงให้ห่างจากหลอดไฟพอสมควร หรือมีฉากเล็กๆ กันแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไม่ให้ไปตกกระทบ LDR ที่ชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงมากเกินไป จากการคำนวณพบว่า ถ้าใช้ชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงนี้ 1 ชุด ควบคุมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 W 2 หลอด ที่มีการสูญเสียเฉลี่ยวันละ 1 ชม. ทั้งสองหลอดเท่ากัน (หมายความว่า เปิดทิ้งไว้เฉลี่ยวันละ 1 ชม. ทั้งที่เป็นเวลาเช้าแล้ว) พบว่าในระยะเวลาเพียง 2 ปี เราก็จะคุ้มทุนกับราคาชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงนี้ (200-250 บาท) และในความเป็นจริงชุดทำงานด้วยแสงนี้มีอายุการใช้งานเป็น 10 ปี ดังนั้นจะเห็นว่าเราจะสามารถประหยัดพลังงานและเงินได้เป็นจำนวนไม่น้อย

5.2 แนวทางการพัฒนา

จากผลการดำเนินงานของชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงในโครงการพิเศษนี้ พบแนวทางในการพัฒนาชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสง มีด้วยกัน ข้อ มีดังต่อไปนี้

1. พัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ต่อพ่วง ที่ใช้ควบคุมหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้พร้อมกันทีละหลายหลอด โดยใช้ชุดสวิทซ์ทำงานด้วยแสงเพียงตัวเดียว ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความสะดวกสูงสุดในการติดตั้งใช้งาน
2. ในขณะรีเลย์ทำการต่อวงจร ให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ค่อยๆสว่างขึ้น ส่วนขณะรีเลย์ทำการตัดวงจร ให้หลอดฟลูออเรสเซนต์ค่อยๆดับลง ทั้งนี้เพื่อยืดอายุการใช้งานของหลอดไฟ

บรรณานุกรม

รัชชัย สุมิตร; “รีเลย์ป้องกันระบบพลังงานไฟฟ้า”, โครงการสนับสนุนนิคมอุตสาหกรรม; สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2528.

ยี่น ภู่วรรณ; “ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หจก.นำอักษรการพิมพ์, 2538.

ดร.คูสิต เครื่องาม; “โซลิตสเตทฟิสิกส์”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หจก.เอส-เอน การพิมพ์, 2535.

เรื่องศักดิ์ อารมณ์สุวรรณ; “การออกแบบและระบบ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐภูมิ ตีรภิตติ เกิดวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเซนต์คาเบรียล แล้วศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2540

นายเจษฎา จักรวาพนรสิงห์ เกิดวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนแกลงวิทยสดาวรณม์ จ.ระยอง และศึกษาต่อระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ จ.นครปฐม แล้วศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้