

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาชุดทดลองการวัดระยะทางอย่างละเอียดโดยหลักการของ
ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์



นายเกรียงไกร

พบหิรัญ โสภณ

นางสาวพรพิมล

ถนอมกิตติ

นางสาวอภิวันท์

รัตนวัลย์

รฟ.
11670
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

62295

- 8 ส.ค. 2549

11619983
.b.....
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2548 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**High resolution distance measurement system by Michelson
interferometer**



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

Academic Year 2005

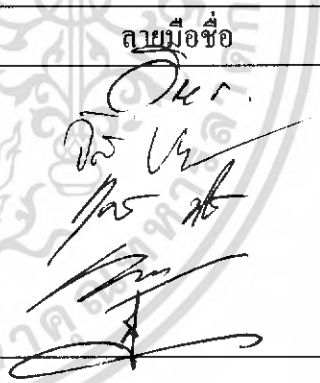
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาชุดทดลองการวัดระยะทางอย่างละเอียด โดยหลักการของ ไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

นักศึกษา นายเกรียงไกร พบหิรัญ โสภณ
นางสาวพรพิมล ถนนมกิตติ
นางสาวอภิวันท์ รัตนวัลย์

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.เบญจพล ต้นอู๋
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.สุรชาติ กมลดิกล

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.วิชาญ	เดชิตธีระ	
กรรมการ	รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
กรรมการ	อ.ศุภยาภรณ์	ทิวาวงศ์	
กรรมการที่ปรึกษา	อ.เบญจพล	ต้นอู๋	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ	กมลดิกล	



.....
(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เดชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาชุดทดลองการวัดระยะทางอย่างละเอียดโดยหลักการของไมเกิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

นักศึกษา นายเกรียงไกร พบหิรัญโสภณ
นางสาวพรพิมล ถนอมกิตติ
นางสาวอภิวันท์ รัตนวัลย์

ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.เบญจพล	ต้นฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ	กมลฉัตร

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาและสร้างชุดทดลองการวัดระยะทางอย่างละเอียดโดยอาศัยหลักการของไมเกิลสันอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ในชุดทดลองจะใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง สามารถปรับระยะทางด้วยไมโครมิเตอร์ และมีวงจรโฟโตดีเทคเตอร์ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่นับจำนวนรีวและส่งข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลยังเครื่องคอมพิวเตอร์จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาสามารถนำไปเป็นชุดต้นแบบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรีวที่เปลี่ยนไปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของกระจก

Special Project Title High resolution distance measurement system by Michelson interferometer

Name Mr. Kriangkrai Pobhiransopon
Miss Pornpimon Thnomkitti
Miss Apiwan Rattanawan

Department Applied Physics

Program Applied Physics

Academic Year 2005

Special Project Advisor Mr. Benchapon Tunhoo

Special Project Co-advisor Mr. Surachat Kamondilok

ABSTRACT

This special project was study and construct distance measurement experimental tool kit which using principle of Michelson interferometer. The tool kit use Helium-neon laser with 632.8 nanometer wave length as light source and OPD distance can be adjust by micrometer. Microcontroller was applied to count interference fringe and transfer data to computer. This tool kit can use as a prototype for study about fringe and OPD distance relation.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบพบปัญหา และอุปสรรคต่างๆมากมายและการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จะไม่สามารถผ่านพ้นไปได้ถ้าหากขาดบุคคลทั้งหลายเหล่านี้ จึงขอขอบคุณ บิดามารดา ผู้ที่ให้กำเนิด ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ และกำลังใจ เมื่อยามประสบกับปัญหาต่างๆ อ.เบญจพล ต้นธุ์ และ อ.สุรชาติ กมลติก ผู้ที่ให้ความรู้ ความเอาใจใส่ อบรมสิ่งต่างๆ รวมทั้งให้โครงการพิเศษขึ้นนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ เพื่อนๆทุกคน ที่ช่วยเหลือสิ่งต่างๆตั้งแต่ที่เข้ามาที่ลาดกระบัง แห่งนี้ และคอยเป็นกำลังใจให้กันและกันตลอดมา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันแห่งการศึกษาตลอดระยะเวลา 4 ปีที่ผ่านมา ทำให้เราได้รับความรู้ ทำให้เราได้เรียนรู้ในสิ่งที่ไม่เคยรู้มาก่อน และได้สอนให้เราเติบโตพร้อมที่จะเป็นคนดีของสังคมต่อไป

นายเกรียงไกร พงษ์วิทย์โสภณ
 น.ส.พรพิมล ถนอมกิตติ
 น.ส. อภิวันท์ รัตนวัลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตในการศึกษา	1
1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 การแทรกสอดของแสง	3
2.2 การแทรกสอดแบบลำแสงสองลำ	3
2.3 อินเตอร์เฟอริเตอร์	8
2.4 อินเตอร์เฟอริเตอร์ชนิดไม่เคลื่อน	9
2.5 การนำอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไม่เคลื่อนไปใช้ประโยชน์	14
2.6 Helium-Neon Lasers	17
2.7 เครื่องรับสัญญาณ	17
2.8 Op-Amp Comparator	18
2.9 บอร์ดประมวลผล	19
2.10 โปรแกรม LabVIEW	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดลอง	20
3.2 วิธีการจัดอุปกรณ์	22
3.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 เครื่องรับสัญญาณ	24
3.3.2 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	25
3.3.3 วงจรประมวลผล	26
3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม การนับรีวการแทรกสอด	29
3.5 โปรแกรม LabVIEW	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 วิธีการใช้โปรแกรม	31
4.2 ผลการทดลอง	35
4.3 กราฟแสดงผลการทดลอง	44
4.4 ผลทาง Lab View	46
4.5 อภิปรายผลการทดลอง	46
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง(บรรณานุกรม)	48
ภาคผนวก	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลอง

หน้า

43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลง irradiance ของภาพการแทรกสอด กับความต่างเฟส δ ซึ่งใน รูป(ข.)เป็นกรณีที่ $I_{\text{mon}}=0$ เมื่อ $I_1=I_2$	8
รูปที่ 2.2 (ก.) แสดงหลักการของอินเตอร์เฟอริเตอร์ชนิดไมเคิลสัน (ข.) แสดงการเกิดการแทรกสอดในเครื่องมือนี้	10
รูปที่ 2.3 แสดงอันดับของวงมืดในอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน	13
รูปที่ 2.4 แสดงรีวิวกการแทรกสอดของแสง	14
รูปที่ 2.5 แสดง IC Op-Amp เบอร์ LM358	18
รูปที่ 3.1 รูปโครงสร้างการทำงานทั้งหมดของการใช้ ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์วัดระยะทาง อย่างละเอียด	20
รูปที่ 3.2 รูปไดอะแกรมการแทรกสอดของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอริเตอร์	21
รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองการแทรกสอดแบบไมเคิลสัน	22
รูปที่ 3.4 การจัดแนวลำแสง	23
รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองภายในกล่องดำ	23
รูปที่ 3.6 แสดงชุดทดลองแบบสำเร็จ	24
รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับสัญญาณ	25
รูปที่ 3.8 หลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	25
รูปที่ 3.9 วงจรบอร์ดประมวลผล	27
รูปที่ 3.10 บอร์ดวงจรประมวลผล 8051 SBC V1.0	28
รูปที่ 4.1 แสดงผลทาง LabVIEW	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบัน การสอบเทียบเครื่องมือวัดระยะทางอย่างละเอียด สามารถใช้เทคนิคของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ซึ่งมีความแม่นยำสูง แต่เครื่องมือนี้จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาสูง ดังนั้นทางผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นว่า เครื่องมือนี้สามารถที่จะสร้างเองโดยใช้วัสดุภายในประเทศได้ ดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นการสร้างชุดทดลองการวัดความยาวอย่างละเอียด โดยใช้หลักการของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ โดยนำผลที่ได้ไปแสดงออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงจำนวนรีวการแทรกสอด และนำไปคำนวณหาเป็นระยะทางที่เคลื่อนที่ไปของกระจก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
- 1.2.2 เพื่อทำการออกแบบชุดทดลองที่สามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างสะดวก
- 1.2.3 สามารถนำเอาความรู้ในเรื่องการแทรกสอดทางแสง และหลักการทำงานของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ไปประยุกต์ใช้ในการวัดความยาวอย่างละเอียดได้

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

สำหรับขอบเขตในการศึกษาโครงการนี้สามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

- 1.3.1 ส่วนทฤษฎี จะเป็นการศึกษาในเรื่องของแสง หลักการแทรกสอดของแสง และสมบัติของแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการทดลอง
- 1.3.2 เทคนิคการวัด ใช้เทคนิคของไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างชุดทดลองการวัดความยาวอย่างละเอียด โดยใช้เทคนิคไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินการ

1.4.1. ศึกษาขอบเขตและข้อมูล	มิถุนายน 2548
1.4.2. ทำการทดลองเก็บข้อมูล	มิถุนายน – ธันวาคม 2548
1.4.3. ตรวจสอบความถูกต้อง	มกราคม – กุมภาพันธ์ 2549
1.4.4. จัดทำเอกสารประกอบ	มิถุนายน 2548 – กุมภาพันธ์ 2549

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1. ได้รับความรู้ในเรื่องการวัดความยาวอย่างละเอียด
- 1.5.2. ได้รับความรู้ในเรื่องการออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.5.3. สามารถใช้ชุดทดลองที่สร้างขึ้นวัดความละเอียดของไมโครมิเตอร์ และสามารถเปรียบเทียบไมโครมิเตอร์ได้อย่างแม่นยำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การแทรกสอดของแสง

การเกิดคลื่นนิ่งและบีตส์นั้น สามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักการซ้อนทับของคลื่น นอกจากนี้ยังมีปรากฏการณ์สำคัญที่เรียกว่าการแทรกสอด (interference) ของแสง ซึ่งอธิบายได้ด้วยการรวมคลื่น ปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์รวมคลื่น 2 คลื่นขึ้นไป แล้วส่งผลให้เกิดการเพิ่มและการลดในแอมพลิจูดของคลื่นรวม การแทรกสอดที่ส่งผลให้เกิดการเพิ่มแอมพลิจูดของคลื่นรวมเรียกว่า การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง (constructive interference) ส่วนการแทรกสอดที่ส่งผลให้เกิดการลดแอมพลิจูดของคลื่นรวม เรียกว่า การแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) ภาพที่เรามองเห็นและแสดงการเพิ่ม-ลดในลักษณะนี้เรียกว่าภาพหรือริ้วการแทรกสอด (interference pattern or fringe) การอธิบายปรากฏการณ์นี้ทำได้โดยคิดว่าแสงเคลื่อนที่ในแบบคลื่น และมีการรวมกันตามหลักการซ้อนทับของคลื่น ปรากฏการณ์แทรกสอดมีอยู่มากรอบตัวเรา และมีการประยุกต์ใช้งานต่างๆอย่างกว้างขวาง

2.2 การแทรกสอดแบบลำแสง 2 ลำ (Two beam interference)

ในขั้นต้น จะพิจารณาการแทรกสอดของลำแสง 2 ลำ ที่แทนด้วยสนามไฟฟ้า E_1 และ E_2 ในการศึกษาการแทรกสอดนั้น คลื่นแสงทั้งสองมักจะออกจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน และเคลื่อนที่ไปในระยะทางที่แตกต่างกัน กล่าวคือแสงทั้ง 2 ลำจะมีความถี่เดียวกัน แต่ทิศทางของค่าคงที่การเคลื่อนที่ k_1 และ k_2 แตกต่างกัน ดังสมการ

$$E_1 = E_{01} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \varepsilon_1) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \varepsilon_2) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

ณ จุด P ซึ่งมีเวกเตอร์บอกตำแหน่ง (position vector) เป็น r ถ้าคลื่นแสงทั้งสองมาพบกันที่ตำแหน่งนี้ เราสามารถหาผลลัพธ์ของการรวมคลื่นได้จากการรวมกันของคลื่นคือ

$$E_p = E_1 + E_2 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดปริมาณคลื่นด้วยตาหรือด้วยเครื่องวัดใดๆ จะเป็นการวัดปริมาณที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน กล่าวคือ วัดเป็นความหนาแน่นของพลังงาน (irradiance) ซึ่งเป็นการวัดกำลังสองของแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ารวม และเพื่อป้องกันการสับสนในสัญลักษณ์ที่ใช้ จะขอใช้สัญลักษณ์ I แทน นับแต่นี้เป็นต้นไป

กล่าวคือ
$$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle \dots\dots\dots(2.4)$$

ดังนั้น ความหนาแน่นพลังงานที่จุด P มีค่า ดังนี้

$$I = \epsilon_0 c \langle E_p^2 \rangle \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\begin{aligned} I &= \epsilon_0 c \langle E_p \cdot E_p \rangle \\ &= \epsilon_0 c \langle (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \rangle \\ &= \epsilon_0 c \langle E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \rangle \dots\dots\dots(2.6) \end{aligned}$$

จากสมการ (2.4) เราสามารถหาได้ว่าความหนาแน่นพลังงานจากคลื่น E_1 มีค่า $I_1 = \epsilon_0 c \langle E_1^2 \rangle$ และความหนาแน่นของพลังงานจากคลื่น E_2 มีค่า $I_2 = \epsilon_0 c \langle E_2^2 \rangle$

ดังนั้นจะได้
$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \dots\dots\dots(2.7)$$

ในที่นี้ I_{12} เป็นเทอมที่ขึ้นกับการกระทำระหว่าง E_1 และ E_2 เรียกว่า เทอมของการแทรกสอด (interference term) ซึ่งเทอมนี้จะไม่มีปรากฏถ้าเป็นกรณีที่ไม่เกิดการแทรกสอด เราอาจกล่าวได้ว่า I_{12} นี้เป็นเทอมที่ทำให้เกิดการเพิ่ม - ลด ความหนาแน่นพลังงานของคลื่นรวมนั่นเอง

เมื่อพิจารณา
$$I_{12} = 2\epsilon_0 c \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \dots\dots\dots(2.8)$$

จะได้ว่า I_{12} มีค่าสูงสุด ถ้า E_1 กับ E_2 ขนานกัน และ จะเป็นศูนย์ ถ้า E_1 กับ E_2 ตั้งฉากกัน คือ ไม่เกิดการแทรกสอด จากการพิจารณาในลักษณะนี้ ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อแสงที่ไม่โพลาไรซ์ 2 ลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มารวมกัน จะทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นได้จากองค์ประกอบของแสงที่มีทิศทางกัน ทั้งนี้เนื่องจากแสงไม่โพลาไรซ์สามารถแยกสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ได้เป็นสองแนวที่มีทิศตั้งฉากซึ่งกันและกัน

สำหรับ $E_1 \cdot E_2$ จากสมการ (2.8) ถ้าแทนค่า E_1 และ E_2 จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$E_1 \cdot E_2 = (E_{01} \cdot E_{02}) \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \varepsilon_1) \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \varepsilon_2) \dots\dots\dots(2.9)$$

ถ้ากำหนดให้

$$\alpha = k_1 \cdot r + \varepsilon_1$$

$$\beta = k_2 \cdot r + \varepsilon_2$$

จะได้

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \dots\dots\dots(2.10)$$

เมื่อกระจายเทอม cosine ทั้งสองออกมา แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 1 คาบจะได้

$$\begin{aligned} \langle E_1 \cdot E_2 \rangle = & E_{01} \cdot E_{02} [\cos \alpha \cos \beta \langle \cos^2 \omega t \rangle + \sin \alpha \sin \beta \langle \sin^2 \omega t \rangle \\ & + (\cos \alpha \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta) \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle] \dots\dots\dots(2.11) \end{aligned}$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} \langle \cos^2 \omega t \rangle = & \frac{1}{2} \\ \langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = & 0 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \langle E_1 \cdot E_2 \rangle = & \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos(\alpha - \beta) \\ = & \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos[(k_1 - k_2) \cdot r + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \dots\dots\dots(2.12) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมในวงเล็บ [] ของสมการ (2.12) ก็คือ ความแตกต่างเฟสของ E_1 กับ E_2 นั่นเอง ถ้ากำหนดให้เทอมนี้มีค่าเป็น δ กล่าวคือ

$$\delta = [(k_1 - k_2) \cdot r + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

จะได้ $I_{12} = \varepsilon_0 c (E_{01} \cdot E_{02}) \cos \delta \quad \dots\dots\dots(2.14)$

สำหรับค่า I_1 และ I_2 นั้น เมื่อดำเนินหาค่าเฉลี่ยของ E_1^2 และ E_2^2 หรือ $\langle E_1^2 \rangle$ และ $\langle E_2^2 \rangle$ จะได้ว่า

$$I_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{01}^2 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

และ $I_2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_{02}^2 \quad \dots\dots\dots(2.16)$

ในกรณีที่ E_{01} และ E_{02} ขนานกัน $E_{01} \cdot E_{02}$ จะเท่ากับ $E_{01} E_{02}$ ดังนั้น จากสมการ (2.14) จะได้ว่า

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

และ $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad \dots\dots\dots(2.18)$

ผลที่ได้นี้เป็นเช่นเดียวกับในกรณีของการรวมคลื่น 2 คลื่น สำหรับกรณีที่คลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกัน (เปรียบเทียบสมการ $E_0^2 = \sum_{i=1}^N E_{0i}^2 + 2 \sum_{j>i}^N E_{0i} E_{0j} \cos(\alpha_j - \alpha_i)$ สำหรับ $N = 2$ กับสมการ (2.17)) ผลจากสมการ (2.18) จะเป็นอย่างไรขึ้นกับค่าของ $\cos \delta$ กล่าวคือถ้า $\cos \delta > 0$ จะทำให้ I มีค่ามากกว่า $I_1 + I_2$ แต่ถ้า $\cos \delta < 0$ จะทำให้ I มีค่าน้อยกว่า $I_1 + I_2$ ซึ่งหมายถึงการเกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้างและแบบหักล้างกันตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความต่างเฟสของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง หรือ δ ในสมการ (2.13) จะพบว่า δ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ ซึ่งเป็นความแตกต่างเฟสอันเนื่องจากเฟสเริ่มต้น และ $(k_1 - k_2) \cdot r$ ซึ่งเป็นความแตกต่างของ constant vector ในส่วนแรกถ้า $(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบหรืออีกนัยหนึ่งคือแหล่งกำเนิดทั้งสองไม่เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (incoherent) กัน จะทำให้ $\langle \cos \delta \rangle$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นถึงแม้จะเกิดการแทรกสอดขึ้น แต่ภาพการแทรกสอดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่ปรากฏให้เราเห็น เนื่องจากไม่สามารถคงอยู่ได้นานพอที่จะมองเห็นได้ นั่นคือเงื่อนไขสำคัญในการที่จะทำให้เรามองเห็นภาพการแทรกสอดคือ แหล่งกำเนิดทั้งสองต้องมีสมบัติของความเป็นอาพันธ์อยู่หรือ $\langle \cos \delta \rangle \neq 0$ ในกรณีคลื่นที่มาแทรกสอดกันเป็นคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นอิสระต่อกัน เช่น หลอดไฟ 2 หลอด จะไม่สามารถมองเห็นภาพการแทรกสอดได้ เนื่องจากแหล่งกำเนิดทั้งสองไม่เป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์กัน สำหรับส่วนของค่า δ นั้น จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของ r ทำให้ $\cos \delta$ มีค่าเปลี่ยนแปลงได้จากค่าสูงสุดไปถึงค่าต่ำสุด และทำให้เกิดภาพการแทรกสอดขึ้น

อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ถ้า $\cos \delta = +1$ จะได้การแทรกสอดแบบเสริมสร้างหรือได้ค่าสูงสุดของความหนาแน่นของพลังงานเป็น

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $\delta = 2m\pi$ โดย m เป็นศูนย์หรือเลขจำนวนเต็มใด ๆ

ในกรณีที่ $\cos \delta = -1$ จะได้การแทรกสอดแบบหักล้างกัน หรือได้ค่าที่ต่ำสุดของความหนาแน่นของพลังงาน

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $\delta = (2m + 1)\pi$

การเปลี่ยนแปลงของ I กับ δ แสดงไว้ในรูปที่ 1 ในกรณีที่ $I_1 = I_2 = I_0$ จะได้การหักล้างเกิดอย่างสมบูรณ์ ทำให้ $I_{\min} = 0$ และ $I_{\max} = 4I_0$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1(ข) ความแตกต่างที่มองเห็นได้ในกรณีของรูป (ก) กับ รูป (ข) ก็คือความคมชัด (fringe contrast หรือ visibility) ซึ่งในรูป (ข) จะมียากกว่าในรูป (ก) การวัดความคมชัดนี้กำหนดเป็น

$$\text{ความคมชัดหรือ visibility หรือ fringe contrast} \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

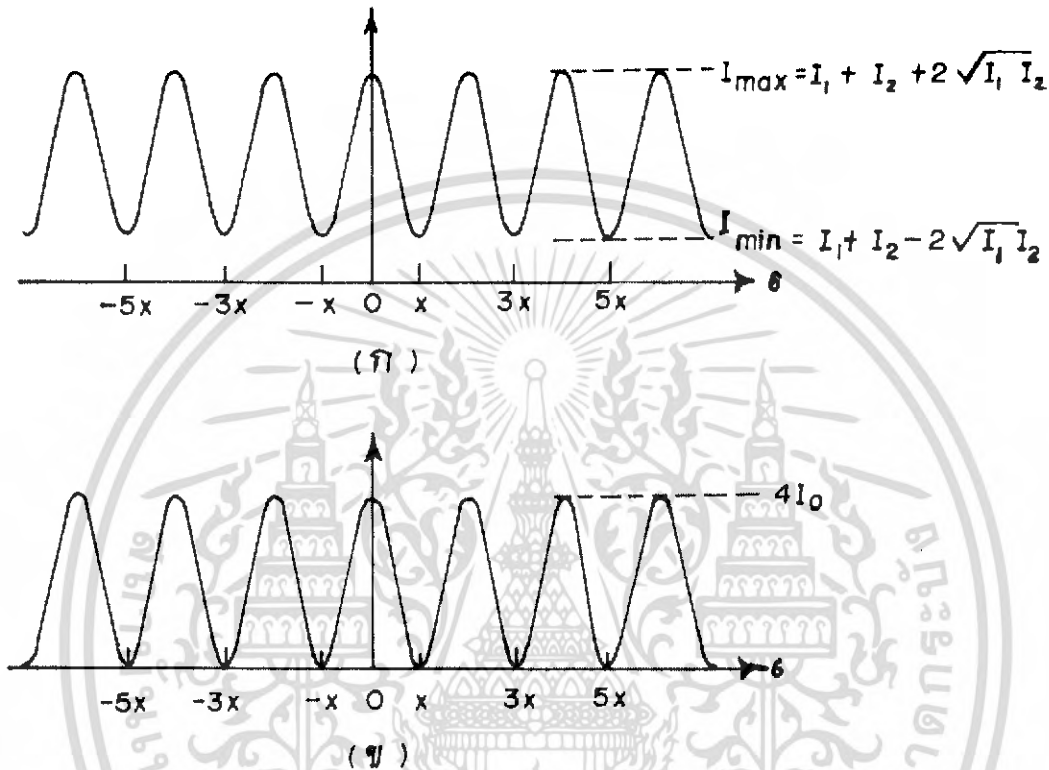
ดังนั้นเพื่อประโยชน์ในเรื่องความคมชัดของภาพการแทรกสอด จึงมักนิยมจัดให้คลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีแอมพลิจูดเท่ากัน

นอกจากนี้เราอาจเขียนสมการ (2.18) สำหรับกรณีที่ $I_1 = I_2 = I_0$ ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} I &= 2I_0(1 + \cos \delta) \\ &= 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad \dots\dots\dots(2.21) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้ พลังงานไม่ได้มีค่าคงที่ ณ จุดใดจุดหนึ่ง กล่าวคือ $I \neq 2I_0$ อย่างไรก็ตามใน 1 ช่วงคาบจะได้ค่าเฉลี่ยของ I เป็น $2I_0$ กล่าวคือ ถ้าพิจารณา ณ จุดใดจุดหนึ่งแล้วพลังงานไม่คงที่ แต่ถ้ารวมทั้งหมดพลังงานจะคงที่



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพลังงานของภาพการแทรกสอดกับความต่างเฟส δ ซึ่งในรูป (ข) เป็นกรณีที่ $I_{\min} = 0$ เมื่อ $I_1 = I_2$

2.3 อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Interferometry)

เครื่องมือที่ใช้ประโยชน์จากการแทรกสอดของแสง และภาพจากการแทรกสอดเรียกว่า อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ (Interferometer) เครื่องมือดังกล่าวนี้ได้มากมายหลายแบบตามลักษณะการออกแบบและการนำไปใช้ ประโยชน์ของเครื่องมือนี้ นอกจากทางแสงแล้วยังอาจนำไปใช้ในทางเสียงและคลื่นวิทยุด้วย ในทางแสงเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 ชนิดคือ ชนิดไมเคิลสัน (Michelson interferometer) และชนิดแฟร์บริ-เพอโรต์ (Fabry-Perot interferometer)

ในการที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแสงอาพันธ์ 2 ลำนั้น อินเตอร์เฟอริมิเตอร์จะทำการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่านั้น แต่แต่ละส่วนที่ถูกแยกออกไปจะมีการเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเป็นระยะทางต่างๆกัน จากนั้นก็จะกลับมาพบกัน และแทรกสอดกันทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดภาพการแทรกสอดขึ้น ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ จึงมีการแบ่งชนิดของอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ตามการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิด กล่าวคือ

อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดแยกหน้าคลื่น (Wave front division interferometer) เครื่องมือชนิดนี้ จะมีการแยกหน้าคลื่นของลำแสงจากแหล่งกำเนิด แล้วนำแสงที่แยกออกไปเหล่านั้นมาแทรกสอดกัน ดังเช่นที่เกิดในกรณีของการแทรกสอดจากสลิตคู่ของยัง การแทรกสอดจากกระจกของลอยด์ และจากปริซึมคู่ของเฟรเนล

อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดแยกแอมพลิจูด (Amplitude division interferometer) เครื่องมือชนิดนี้จะใช้ตัวแยกลำแสงทำการแยกแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า(และสนามแม่เหล็ก) ของแหล่งกำเนิด แล้วนำแอมพลิจูดมารวมกันในที่สุด อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดไมเคลสันและชนิดเพอร์รี่-เพอโรต์ ก็จัดเป็นเครื่องมือชนิดนี้ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงชนิดไมเคลสันเท่านั้น

2.4 อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน

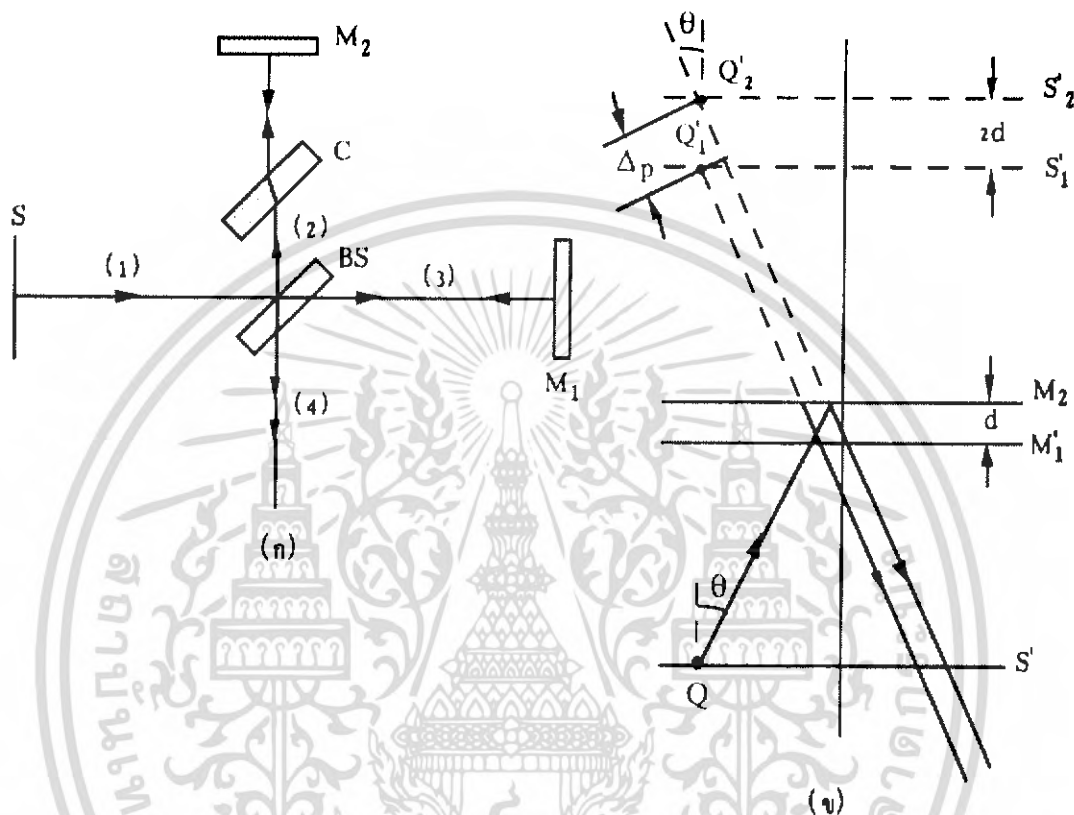
ในปี พ.ศ. 2424 (ค.ศ. 1881) ไมเคลสัน ได้เสนอหลักการของเครื่องมือชนิดนี้ให้เป็นที่รู้จักกัน และเครื่องมือนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาฟิสิกส์ยุคใหม่ กล่าวคือ ผลการทดลองเป็นจุดกำเนิดของสมมติฐานอันหนึ่งของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษได้ ใช้วัดโครงสร้างที่ละเอียดมาก (hyperfine structure) ของเส้นสเปกตรัมได้ และใช้เป็นมาตรฐานในการกำหนดความยาวในรูปแบบของความยาวคลื่นแสงได้ เป็นต้น

หลักการของเครื่องมือชนิดนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2.(ก) S เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบแผ่กระจายให้ลำแสง (1) ออกมา เมื่อลำแสงนี้ไปตกกระทบที่ตัวแยกลำแสง BS (BS ในเครื่องมือนี้จะ เป็นแท่งแก้วที่ฉาบผิวเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนได้ 50%) จะเกิดการแยกลำแสงออกเป็น 2 ลำที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน คือ ลำแสงสะท้อน (2) และลำแสงที่ส่งผ่านไป (3) ลำแสงทั้งสองลำนี้จะไปสะท้อนที่กระจก M_1 และ M_2 กลับมาตามแนวเดิมไปสู่ BS อีกครั้งหนึ่ง ในครั้งนี้ลำแสง (2) จะทะลุผ่านและลำแสง (3) จะสะท้อนที่ BS แล้วออกไปด้วยกันเป็นลำแสง (4) และทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้น

กระจก M_1 และ M_2 สามารถปรับให้ตั้งฉากซึ่งกันและกันได้ โดยใช้สกรูที่ติดอยู่ด้านหลัง นอกจากนี้กระจกบานหนึ่งยังสามารถเลื่อนเข้า-ออกได้ตามแนวของลำแสง การเคลื่อนนี้จะทำให้ OPD (Optical Path Difference) ของลำแสง (2) และ (3) มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ ในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าลำแสง (2) และ (3) มีการเคลื่อนที่ผ่าน BS ไม่เท่ากัน กล่าวคือลำแสง (2) ผ่านเพียง 1 ครั้ง ในขณะที่ลำแสง (3) ผ่านถึง 3 ครั้ง เพื่อแก้ปัญหาที่ OPD จากลำแสงทั้งสองลำที่เคลื่อนที่ใน BS ไม่เท่ากัน จึงได้มีการเพิ่มอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งคือตัวชดเชย (Compensator) C เข้าไปในแนวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำแสง (2) โดยให้ C เป็นแก้วชนิดเดียวกันกับ BS และมีความหนาเท่ากัน วางขนานกันกับ BS ด้วย
 ลำแสง (2) จึงมีการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแก้ว 3 ครั้งเท่ากันกับลำแสง (3)



รูปที่ 2.2 (ก) แสดงหลักการของอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดไม่เคลื่อนที่ (ข) แสดงการเกิดการแทรกสอด
 ในเครื่องมือนี้

ตามรูปที่ 2.2 (ก) อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ชนิดนี้จะมีแนวแกนของแสงถึง 2 แกน ซึ่งแกนทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน เราอาจเขียนแผนภาพแทนให้มีแนวแกนของแสงเพียง 1 แกน โดยหมุนแนวแกน SM_1 ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม 90° รอบจุดตัดของลำแสงกับ BS ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) S' เป็นตำแหน่งใหม่ของแหล่งกำเนิดแสง M'_1 เป็นตำแหน่งใหม่ของกระจก M_1 การเขียนแผนภาพแทนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความสะดวกในการพิจารณา OPD ของลำแสง (2) กับ (3) เพื่อประกอบการศึกษาการเกิดการแทรกสอด ในแผนภาพนี้ M'_1 อยู่ห่างจาก M_2 เป็นระยะ d และ S'_1 กับ S'_2 เป็นภาพเสมือนของ S' ที่เกิดจากกระจก M'_1 และ M_2 ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะ S'_1 ห่างจาก S'_2 จะเป็น $2d$ แสงจากจุด Q บนแหล่งกำเนิดแสง S' จะสะท้อนจากทั้ง M'_1 และ M_2 ลำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนทั้งสองนี้จะเสมือนเป็นลำแสงจากภาพเสมือน Q' (Q'_1 และ Q'_2 นี้เกิดที่ตำแหน่งของ S'_1 และ S'_2 ตามลำดับ) เนื่องจากระยะระหว่าง S'_1 และ S'_2 (หรือระยะระหว่าง Q'_1 และ Q'_2) เป็น $2d$ ดังนั้น OPD ของลำแสงสะท้อนทั้งสองลำนี้จะมีค่าเป็น

$$\Delta p = 2d \cos \theta \tag{2.22}$$

เมื่อ θ เป็นมุมที่ลำแสงตกกระทบบนหน้าผิวกระจก M_1 ในกรณีของแสงที่ตกกระทบบนแนวตั้งฉากกับกระจก M_1 หรือ $\theta=0$ จะได้ $\Delta p = 2d$ ซึ่งผลเช่นนี้เป็นไปตามความคาดหมาย กล่าวคือ ถ้ากระจก M_1 กับ M_2 อยู่ห่างจาก BS เป็นระยะทางที่ต่างกันเท่ากับ d เมื่อมีแสงจาก BS ตกกระทบบน M_1 กับ M_2 ในแนวตั้งฉากกับกระจก แสงที่สะท้อนกลับไปพบกันที่ BS จะเคลื่อนที่ไป-มา โดยมีระยะทางต่างกันเป็น $2d$ (เที่ยวไปต่างกัน d เทียบกลับต่างกัน d ด้วย)

จาก $\Delta p = 2d$ นี้ ถ้าเป็นค่าที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้างแล้ว ($\Delta = m\lambda$ เมื่อ $\Delta = \Delta_p + \Delta_r$) จะพบว่าถ้าเราเลื่อนกระจกบานใดบานหนึ่งไปเป็นระยะ $\lambda/2$ จะยังคงได้ผลเป็นการแทรกสอดแบบเสริมสร้างเช่นเดิม

ตามรูปที่ 2.2 (ข) นี้ อาจพิจารณาได้ว่าเป็นกรณีของการแทรกสอดจากฟิล์มอากาศที่มีผิวทั้งสองขนานกัน (คือฟิล์มอากาศที่อยู่ระหว่าง M'_1 กับ M_2) และมีแสงจากแหล่งกำเนิดแบบแผ่กระจายตกกระทบบน แสงจากแหล่งกำเนิดนี้จะมีค่ามุม θ ได้หลายค่าและทำให้ Δp หรือ Δ เปลี่ยนไปตามค่า θ ดังสมการ (2.15) ตำแหน่งภาพการแทรกสอดจึงขึ้นกับมุม θ และทำให้ภาพการแทรกสอดที่มองเห็นมีลักษณะเป็นวงกลมมืด-สว่างซ้อนกัน ภาพการแทรกสอดลักษณะนี้ เป็นแบบที่มีการเอียงเท่ากัน (ในแต่ละแถบจะมีมุม θ เดียวกัน) สามารถมองเห็นได้โดยมองที่ BS ในแนวของลำแสง (4) โดยใช้เลนส์ตาหรือว่าเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์โฟกัสภาพที่ระยะอนันต์

ในกรณีที่แอมพลิจูดของลำแสง (2) และ (3) เท่ากัน จะได้ว่าความหนาแน่นของพลังงานของวงมืด-สว่าง เป็นไปตามสมการ คือ

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \tag{2.23}$$

โดยที่ความต่างเฟส δ มีค่าดังนี้

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \tag{2.24}$$

ซึ่ง
$$\Delta = \Delta_p + \Delta_r$$

ในกรณีของรูปที่ 2.2 นั้นลำแสง (2) จะมีการสะท้อนแบบภายนอก 2 ครั้ง ในขณะที่ลำแสง (3) มีการสะท้อนแบบภายในเพียงครั้งเดียว ดังนั้นจึงได้ Δ_r เป็น $\lambda/2$ หรือ

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_r = 2d \cos \theta + \frac{\lambda}{2}$$

ในกรณีของวงมืด
$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

 ทำให้ได้
$$2d \cos \theta = m\lambda; m = 0, 1, 2, \dots \text{ (สำหรับวงมืด) } \dots\dots\dots(2.25)$$

สำหรับจุดศูนย์กลางของวงเหล่านี้ จะเกิดขึ้นเมื่อ $\theta=0$ หรือเมื่อแสงตกกระทบในแนวตั้งฉากกับกระจก ในกรณีนี้ที่จุดศูนย์กลางวงเป็นวงมืด อันดับของวงนี้จะมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.25) คือ

$$m = \frac{2d}{\lambda} \dots\dots\dots(2.26)$$

และเนื่องจาก m มีค่าแปรผันกับค่า $\cos \theta$ จะเห็นได้ว่ายิ่ง θ มีค่ามากขึ้นค่า m จะยิ่งลดลง ดังนั้นที่ θ มีค่าเป็น 0 ค่า m จะมีค่ามากที่สุด วงที่ห่างออกไปค่า m จะน้อยลงและค่า m สูงสุดของวงมืดหาได้จาก

$$m_{\max} = \frac{2d}{\lambda} \dots\dots\dots(2.27)$$

การเรียงอันดับที่ของวงเหล่านี้อาจทำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้วงกลางมีอันดับน้อยกว่าวงที่อยู่นอกออกไป โดยกำหนดให้

$$p = m_{\max} - m \dots\dots\dots(2.28)$$

ดังนั้นจะได้
$$p = \frac{2d}{\lambda} - m \dots\dots\dots(2.29)$$

จากสมการ (2.25) จะได้

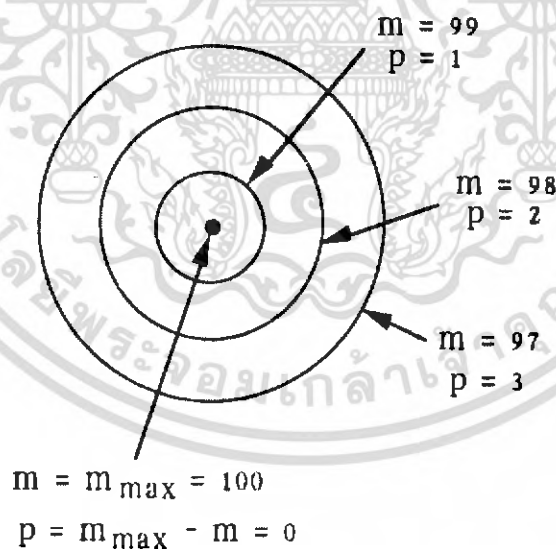
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p\lambda = 2d(1 - \cos \theta), p = 0, 1, 2, \dots \text{ (สำหรับวงมืด) } \dots\dots\dots(2.30)$$

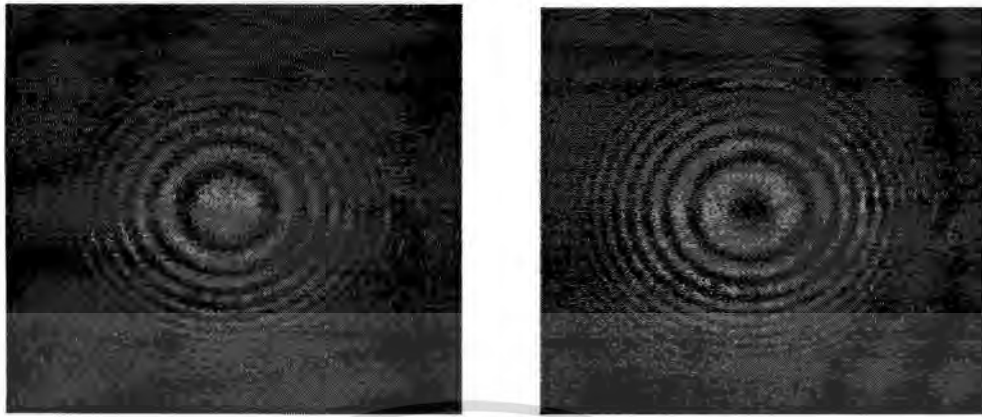
ในกรณีของ p นี้ วงกลางจะมีค่า $p = 0$ การเปรียบเทียบค่า p กับ m เป็นไปดังรูปที่ 2.2 สมการ (2.25) หรือ (2.30) แสดงให้เห็นว่าถ้าเราสังเกตที่จุดใดจุดหนึ่งบนภาพการแทรกสอด (ซึ่งหมายถึง θ มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง) ขณะที่ค่า d เปลี่ยนไป จะพบว่าจุดๆ นั้น จะมีค่า m หรือ p เปลี่ยนไป โดยจะสังเกตได้ว่าวงมืดยังนั้นมีการขยายออกจากจุดศูนย์กลางหรือยุบตัวเข้าหาจุดศูนย์กลาง การขยายออกหรือยุบเข้านี้ขึ้นกับ OPD ว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนค่า d ด้วยวิธีการนี้ เราจะสามารถสังเกตได้ว่า ในขณะที่เลื่อนกระจกบานหนึ่งให้ผ่านตำแหน่งที่ OPD มีค่าเป็นศูนย์ การเคลื่อนที่ของภาพการแทรกสอดจะกลับกัน คือถ้าเดิมมีการขยายออกจากจุดศูนย์กลาง พอผ่านตำแหน่งที่ OPD เป็นศูนย์แล้ว ภาพการแทรกสอดจะเกิดการยุบตัวเข้าสู่จุดศูนย์กลาง

จากสมการ (2.25) ถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ θ เพียงเล็กน้อย จะได้ว่า

$$|\Delta\theta| = \frac{\lambda \Delta m}{2d \sin \theta} \dots\dots\dots(2.31)$$



รูปที่ 2.3 แสดงอันดับของวงมืดในอินเตอร์เฟอริเตอร์แบบไมเคิลสัน



รูปที่ 2.4 แสดงริ้วการแทรกสอดของแสง

จากสมการข้างต้นนี้ จะเห็นว่า สำหรับจำนวนแถบมืดช่วงเล็กๆ Δm ค่าหนึ่ง ถ้าระยะระหว่างกระจก d มีค่าลดลง $\Delta \theta$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือวงต่างๆ จะมีระยะห่างกันมากขึ้น ถ้า OPD มีค่าน้อยลง

ถ้า $d = \lambda/2$ เราสามารถใช้สมการ (2.25) แสดงได้ว่า $m = \cos \theta$ นั่นคือเราจะมองเห็นอย่างมากก็เพียงวงมืดวงเดียวเท่านั้น เมื่อทำการเลื่อนกระจกบานหนึ่งไปเป็นระยะ Δd จะทำให้มีวงมืดจำนวน Δm เคลื่อนที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ซึ่ง

$$\Delta m = \frac{2(\Delta d)}{\lambda} \dots\dots\dots(2.32)$$

จากสมการ (2.32) นี้ แสดงให้เห็นว่า เราสามารถทำการทดลองวัด Δm และ Δd เพื่อนำไปหาค่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ทำการทดลองได้ และวิธีนี้ก็เป็นการใช้ประโยชน์วิธีหนึ่งของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน นอกจากนี้สมการ (2.32) ยังแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ทราบค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ เราสามารถใช้วิธีการนี้ ในการเปรียบเทียบสเกลของไมโครมิเตอร์ที่ใช้ในการเลื่อนตำแหน่งกระจกได้อีกด้วย

2.5 การนำอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน ไปใช้ประโยชน์

ในการวัดความหนาของฟิล์มบาง เราสามารถนำอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสันไปใช้ได้โดยสะดวก นอกจากนี้ยังอาจนำไปดัดแปลงใช้ในการวัดดัชนีหักเหของแก้วต่างๆ ได้อีกด้วยการวัดดัชนีหักเห ทำโดยนำแก้วที่ต้องการวัดดัชนีหักเหบรรจุลงในหลอดที่มีปลายทั้งสองเป็นผิว

ราบ และนำหลอดนี้ไปวางในแนวของลำแสง (3) ของรูปที่ 2.2(ก) ในลักษณะที่ปลายทั้งสองของหลอดตั้งฉากกับแนวของลำแสง จากนั้นให้ทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแถบมืด-สว่าง ขณะที่ทำการสูบแก๊สออกจากหลอดและให้นับจำนวนวงมืด Δm ที่เปลี่ยนไป โดยนับจากขณะที่มีแก๊สเต็มหลอดจนถึงขณะที่แก๊สหมดหลอด

ถ้าให้ความยาวของหลอด มีค่าเป็น L และแก๊สมีค่าดัชนีหักเหเป็น n จะได้ว่า OPD ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสูบแก๊สออกจนหมด จะมีค่าเป็น

$$\Delta d = nL - L = L(n - 1) \dots\dots\dots(2.33)$$

เมื่อใช้ค่า Δd จากสมการ (2.32) จะได้ว่า

$$(n - 1) = \frac{\lambda}{2L} \Delta m \dots\dots\dots(2.34)$$

จากสมการ (2.34) นี้ทำให้สามารถหาค่าดัชนีหักเหของแก๊สได้

อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสันเป็นประโยชน์มากในการวัดความแตกต่างของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมที่อยู่ใกล้กันมาก ดังเช่น ถ้ามีเส้นสเปกตรัมสองเส้น ที่มีค่าความยาวคลื่น λ และ λ' ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำแสงนี้มาศึกษาด้วยเครื่องมือชนิดนี้ จะทำให้ได้ชุดของวงมืด-สว่าง เป็นสองชุด โดยแต่ละชุดจะสอดคล้องกับความยาวคลื่นแต่ละค่าตามสมการ (2.25) ถ้าเราสังเกตวงมืด-สว่างใกล้จุดศูนย์กลาง นั่นคือ $\cos \theta \cong 1$ และให้ d คงที่ จะได้ $m\lambda = m'\lambda'$ ชุดของวงมืดสว่างของแต่ละความยาวคลื่นนี้อาจซ้อนทับกันหรือไม่ก็ได้ ขึ้นกับค่า d ในขณะที่มีการซ้อนทับกันจะมองเห็นภาพการแทรกสอดคมชัด แต่ถ้าชุดของวงมืด-สว่างชุดหนึ่งมีวงมืดไปอยู่ตรงตำแหน่งวงสว่างของอีกชุดหนึ่ง จะมองเห็นภาพการแทรกสอดมีความสว่างค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยตลอด ดังนั้นถ้าเราปรับระยะระหว่างกระจกไปสองตำแหน่ง โดยให้แต่ละตำแหน่งเกิดการซ้อนทับของชุดวงมืด-สว่างทั้งสอง ก็จะสามารถนำผลไปหาค่าความแตกต่างของความยาวคลื่นได้ดังนี้

ในขณะที่ชุดของวงมืด-สว่างทั้งสองซ้อนทับกัน แสดงว่าอันดับที่ของวงของทั้งสองชุดเท่ากันนั่นคือ

$$m = m' + N \dots\dots\dots(2.35)$$

ถ้าให้ d_i เป็น OPD ของกระจกในขณะนั้น จะได้

$$\frac{2d_1}{\lambda} = \frac{2d_1}{\lambda'} + N \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

ต่อไปถ้าปรับระยะ OPD ระหว่างกระจกให้เป็น d_2 และทำให้เกิดการซ้อนทับของชุดวงมืด-สว่างอีกครั้งหนึ่ง ก็จะได้

$$m = m' + (N + 1) \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

หรือ
$$\frac{2d_2}{\lambda} = \frac{2d_2}{\lambda'} + (N + 1) \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

สมการ (2.36) และ (2.38) เขียนใหม่ได้ โดยใช้ $\Delta d = d_2 - d_1$ และ $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ เป็น

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda\lambda'}{2\Delta d} \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

หรือ
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\Delta d} \quad \dots\dots\dots(2.40)$$

เนื่องจาก λ และ λ' มีค่าใกล้เคียงกัน

วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นที่นิยมใช้ในการหาค่าความแตกต่างของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัม สีเหลืองของแสงโซเดียม ซึ่งมีค่าประมาณ 0.6 นาโนเมตร

อย่างไรก็ตาม ในการสังเกตภาพการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดไมเคลสัน อาจไม่เป็นไปตามที่กล่าวมาทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากการวางตัวของกระจก M_1 กับ M_2 ถ้ากระจกทั้งสองบานตั้งฉากกัน (หรือ M_1' กับ M_2 ขนานกันตามรูป 2.2(จ)) เราจะเห็นภาพการแทรกสอดเป็นวงกลมมืด-สว่างสลับกัน แต่ถ้ากระจกทั้งสองบาน วางตัวกันในลักษณะของรูปลิ่มเล็กๆ เราจะเห็นภาพการแทรกสอดของความหนาที่เท่ากันแทน โดยภาพการแทรกสอดนี้ จะขนานกับแนวตัดกันของกระจกทั้งสองบาน แต่ถ้ามุมที่กระจกกระทำกันเป็นรูปลิ่มนี้มีค่ามากเส้นตรงก็จะเปลี่ยนไปเป็นเส้นโค้ง

2.6 Helium-Neon Lasers

เลเซอร์ฮีเลียมนีออน เป็นเลเซอร์ที่เป็นที่รู้จักมากที่สุดในแก๊สเลเซอร์ (gas laser) มีราคาไม่แพง และถูกใช้เป็นมาตรฐานในการศึกษาและทดลองในโรงเรียน วิทยาลัย และพิพิธภัณฑ์ เลเซอร์ฮีเลียมนีออนให้กำลัง (power) ได้ตั้งแต่ไม่ถึงมิลลิวัตต์ จนถึงระดับสิบลวัตต์ โดยให้แสงสีแดง ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งจะพบได้บ่อยในธุรกิจที่เกี่ยวกับเลเซอร์

เลเซอร์ฮีเลียมนีออน เป็นหนึ่งในเลเซอร์ชนิดแรกๆที่ถูกสร้างขึ้นและยังเป็นแก๊สเลเซอร์ชนิดแรกด้วย (Javan et al., 1961) ซึ่งเริ่มแรกนั้นจะได้เป็นเลเซอร์ในรูปของอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 1153nm แต่มีการค้นพบว่าด้วยส่วนผสมของก๊าซแบบเดียวกันจะสามารถให้เลเซอร์สีแดงได้ (White and Rigden, 1962) และยังมีการสร้างแบบอื่นๆตามมาอีก แต่แบบที่สำคัญที่สุดคือ แบบสีแดงที่มีความยาวคลื่น 632.8nm เนื่องจากมันสามารถให้กำลังได้ถึง 50mW ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ ซึ่งทำให้เลเซอร์ชนิดนี้ครองตลาดในธุรกิจเลเซอร์อยู่หลายปี

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการพัฒนาเลเซอร์สารกึ่งตัวนำสีแดงได้ในช่วงปลายทศวรรษ 1980 ซึ่งถึงแม้ว่ามันจะมีราคาสูงกว่าเลเซอร์สารกึ่งตัวนำในช่วงที่ใกล้อินฟราเรด แต่ราคาของมันก็มีการตกลง ซึ่งทำให้มันกลายมาเป็นคู่แข่งของฮีเลียมนีออนเลเซอร์ โดยเลเซอร์สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายอย่างเช่น ขนาดที่เล็กกว่า ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และไม่ต้องใช้การขับเคลื่อนด้วยแรงดันสูง (high drive voltage) เหมือนกับที่ใช้ในแก๊สเลเซอร์ซึ่งทำให้มันเข้ามาแทนที่ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ได้ แต่ไม่ทั้งหมด เนื่องจากแก๊สเลเซอร์นั้นมีความเป็นอาพันธ์สูงและคุณภาพของลำแสงที่ดีกว่า และประกอบกับในขณะนั้น ยังให้ความยาวคลื่นที่สั้นกว่าด้วย อย่างไรก็ตาม เชื่อกันว่าเลเซอร์สารกึ่งตัวนำจะสามารถเข้ามาครอบครองตลาดส่วนใหญ่แทนที่ฮีเลียมนีออนเลเซอร์สีแดงได้

ในขณะนั้น ก็ได้มีการผลิตฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้ ชนิดใหม่ๆขึ้น ซึ่งให้สีเป็น สีเขียว, สีเหลือง, สีส้ม และยังมีชนิดที่ให้ได้หลายแบบ รวมทั้งยังมีชนิดที่ให้เป็นอินฟราเรดด้วย ซึ่งถึงแม้จะมีกำลังส่งขาออกที่ต่ำกว่าชนิดสีแดงปกติ แต่มีความยาวคลื่นที่นำไปใช้กับงานที่เฉพาะเจาะจงได้ ซึ่งถึงแม้เลเซอร์เหล่านี้จะมีอัตราการขายในระดับที่ไม่สูงนัก (1-2%ของฮีเลียมนีออน) แต่ก็ยังเข้ามามีส่วนแบ่งในตลาดธุรกิจเลเซอร์ที่กำลังเติบโตในขณะนั้น โดยเฉพาะในช่วงที่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำเข้ามาแทนที่ตลาดส่วนใหญ่ของฮีเลียมนีออนเลเซอร์

2.7 เครื่องรับสัญญาณ

โฟโตดีเทคเตอร์ คือ สิ่งประดิษฐ์รับแสงที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซึ่งอาศัยแสงจากภายนอกผ่านเลนส์ เพื่อกระตุ้นให้ทำงาน ดังนั้นในการต่อเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ ทั้งนี้ก็เพราะไม่ต้องการให้โฟโตดีเทคเตอร์ทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้ทำงานเฉพาะ เมื่อมีปริมาณแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะ 62295 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

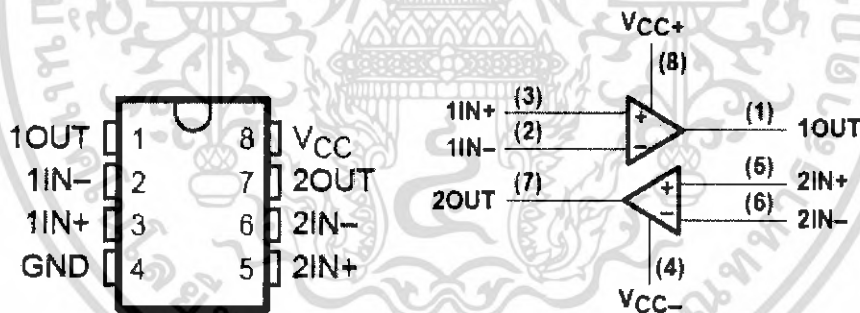
สว่างมากพอตามที่กำหนดเสียก่อน โฟโตดีเทคเตอร์ทำงาน โดยการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เมื่อแสงตกกระทบอิเล็คตรอนที่ขั้วติดอยู่กับอะตอมในขายผลึกจะแตกหลุด เกิดเป็นอิเล็คตรอนอิสระ และโฮลอิสระขึ้น อิเล็คตรอนและโฮลเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้าไปในเขตปลอดพาหะเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้นด้วยปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามความเข้มแสง

ประโยชน์ของโฟโตดีเทคเตอร์

- วัดความเข้มแสง
- ชัตเตอร์แสง
- กำหนดตำแหน่งของเครื่องมือกล
- การวัดระยะทางไกลด้วยแสงอินฟราเรด
- ตรวจจับสัญญาณแสงที่ความถี่สูง

2.8 Op-Amp Comparator

วงจร Op-Amp Comparator ที่เราใช้เป็น IC Op-Amp เบอร์ LM358 โดยภายในได้บรรจุออปแอมป์ (Op-Amp) เอาไว้ทั้งหมด 2 ชุด โดยออปแอมป์ แต่ละตัวแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดง IC Op-Amp เบอร์ LM358

การทำงานของ LM358 เมื่อแรงดันที่ขาลบ (Invert) มีมากกว่าแรงดันที่ขาบวก (Non-Invert) จะทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์ มีแรงดันประมาณ 0 โวลต์ สัญญาณที่เอาต์พุต จะเทียบได้กับลอจิกต่ำ (Low) และ เมื่อแรงดันที่ขาบวก มีมากกว่าแรงดันที่ขาลบจะทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์ มีแรงดันประมาณ 5 โวลต์ (เท่าแหล่งจ่าย) สัญญาณที่เอาต์พุต จะเทียบได้กับลอจิกสูง (High)

2.9 บอร์ดประมวลผล

ทำหน้าที่รับสัญญาณเอาต์พุตจากออปแอมป์(Op-Amp) เข้ามาที่บอร์ด 8051SBC ซึ่งบอร์ด จะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่ได้รับ โดยการเขียนโปรแกรมนับรีจิสเตอร์แทรกสอด และจะนำไป แสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.10 โปรแกรม LabVIEW

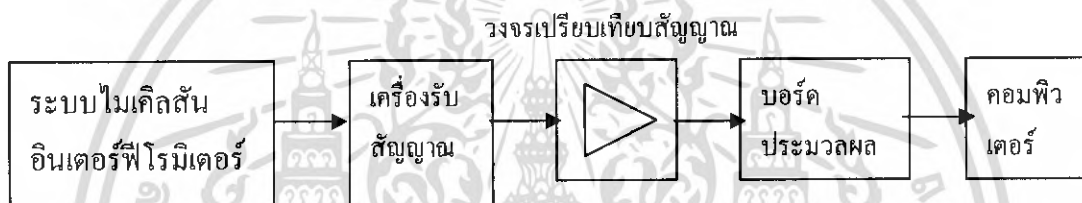
LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Application ชนิดหนึ่งจะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (graphical – based Programming) ซึ่งแตกต่างจากแนวคิด Text based Programming โดย LabVIEW อาศัยหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

- 1) Acquisition เป็นส่วนที่รับข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบ
- 2) หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้ววิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงผล
- 3) Presentation คือการแสดงผลในรูปแบบที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยอาจแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ทำการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงานพิเศษเรียบร้อยแล้ว การทำงานขั้นต่อไป ก็คือ การวางแผนขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งในบทที่ 3 นี้ จะอธิบายถึงรายละเอียดของส่วนต่างๆ ในขั้นตอนการดำเนินงานทั้งในส่วนของการออกแบบชุดทดลองและส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อทำการประมวลผลแล้วแสดงออกหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.1 รูปโครงสร้างการทำงานทั้งหมดของการใช้ไมเคลิสตันอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์วัดระยะทางอย่างละเอียด

ขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มจากต่อชุดอุปกรณ์ไมเคลิสตันอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ แล้วนำเอาที่พุดจากเครื่องรับสัญญาณต่อเข้ากับวงจรอปแอมป์ จากนั้นส่งสัญญาณไปที่บอร์ดประมวลผลเพื่อนำสัญญาณไปประมวลผลแสดงออกทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

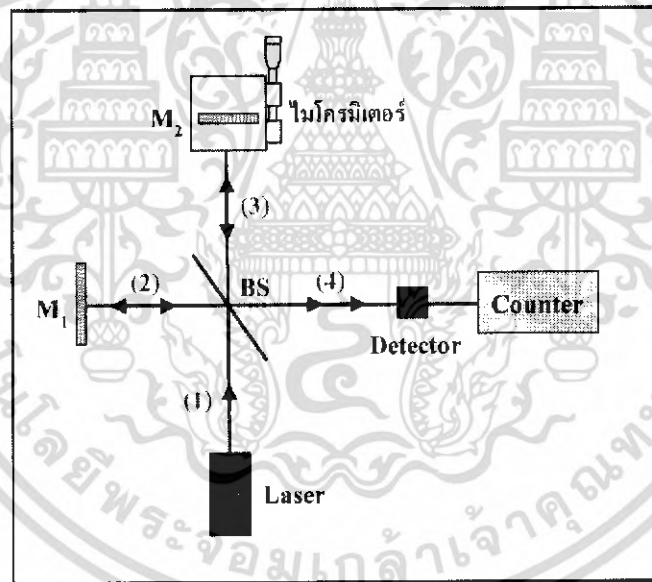
3.1 ขั้นตอนการออกแบบชุดทดลอง

ในการออกแบบชุดทดลองจะมีรายละเอียดของการดำเนินงานต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.) ศึกษาส่วนประกอบต่างๆของชุดการทดลองและทำการออกแบบชุดการทดลอง
- 2.) ทำการจัดชุดอุปกรณ์การทดลอง
- 3.) ทดสอบชุดการทดลอง

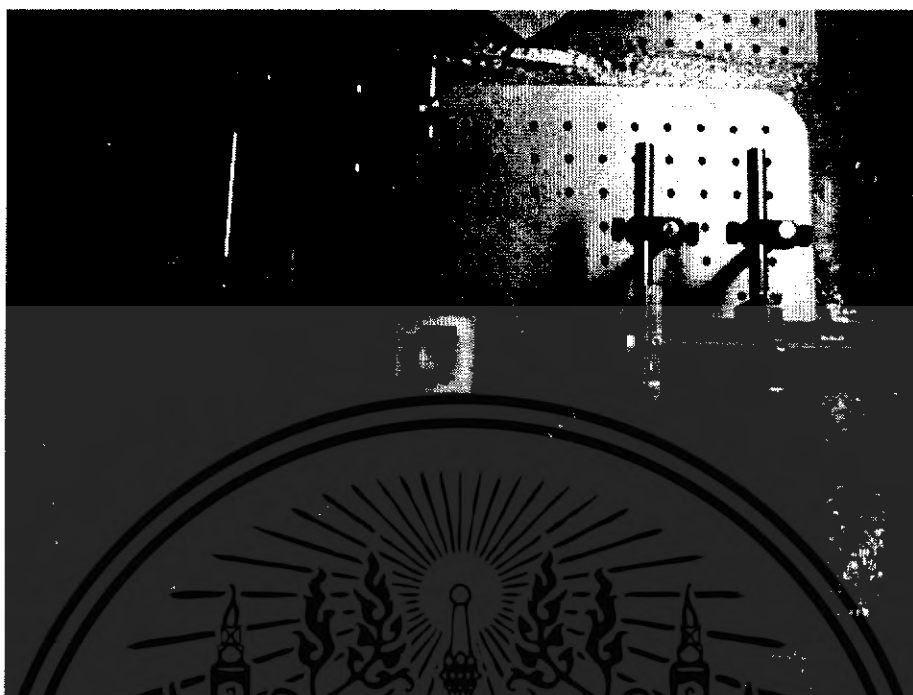
อุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

- Helium-Neon Laser
- Mirror
- Beam Splitter
- Screen
- Micrometer
- Photo Detector
- Clamp
- Photo Board



รูปที่ 3.2 รูปไดอะแกรมการแทรกสอดของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

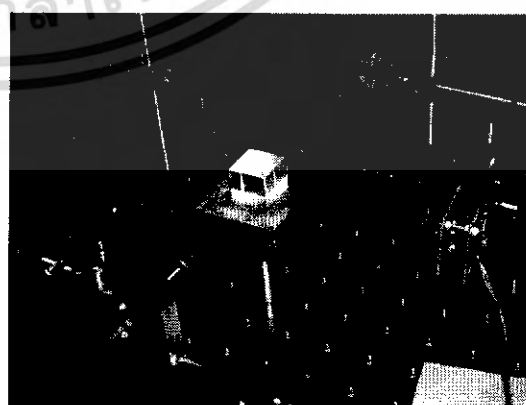
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



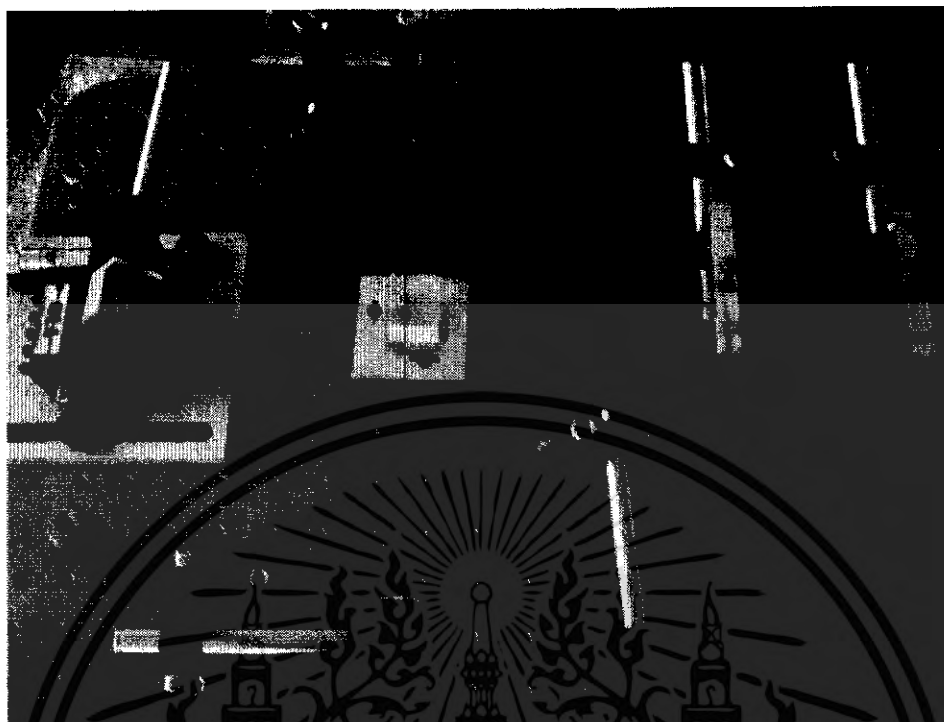
รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองการแทรกสอดแบบไมเคิลสัน

3.2 วิธีการจัดอุปกรณ์การทดลอง

ทำการจัดแนวแสง ให้แสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ขยาย เพื่อไปตกลงบนกระจกแยกแสง (Beam splitter) ซึ่งในการทดลองได้ใช้ฮีเลียมนีออนเลเซอร์เนื่องจากเป็นแสงที่ตามองเห็นจากนั้นทำการปรับกระจกทั้งสองบานให้เกิดการสะท้อนกลับแนวเดิมจะเกิดริ้วการแทรกสอดขึ้นบนฉากที่อยู่บนตัวตรวจจับแสง (Detector) โดยบอร์ดประมวลผลจะทำการแสดงค่าทางคอมพิวเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

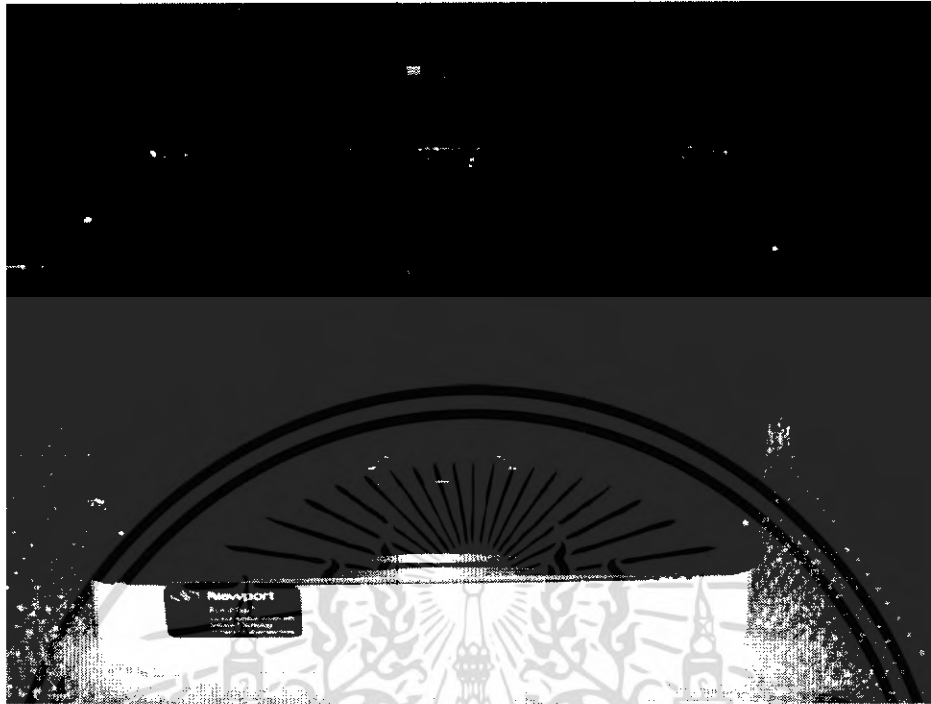


รูปที่ 3.4 การจัดแนวลำแสง



รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองภายในกล้องดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงชุดทดลองแบบสำเร็จ

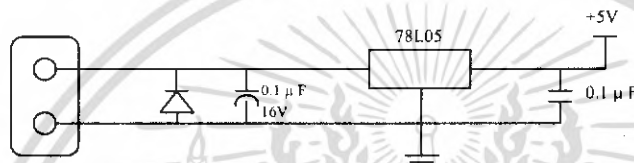
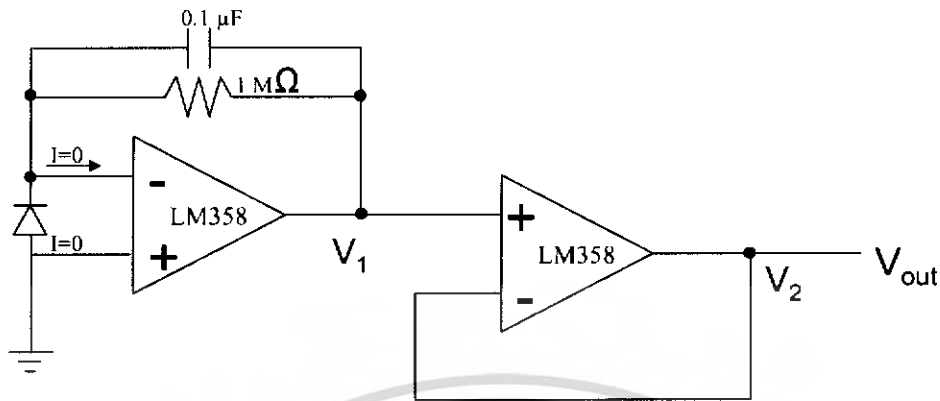
3.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

สำหรับรายละเอียดของวงจรต่างๆ ที่ใช้ในการทำงานของชุดวิเคราะห์ทางอย่างละเอียดประกอบไปด้วย

- 1.) เครื่องรับสัญญาณ (detector)
- 2.) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Op-Amp)
- 3.) วงจรบอร์ดประมวลผล

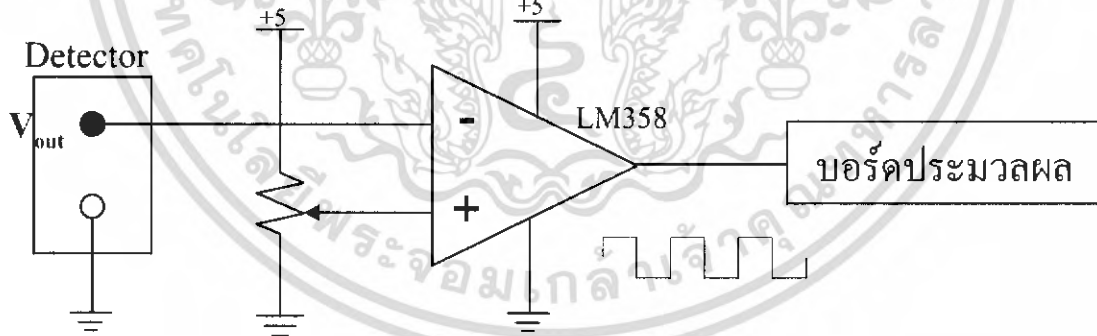
3.3.1 เครื่องรับสัญญาณ

จากโครงงานนี้เราใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยดีเทคเตอร์ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณทางแสงเพื่อส่งสัญญาณต่อไปยังออปแอมป์ (Op-Amp)



รูปที่ 3.7 วงจรตรวจจับสัญญาณ

3.3.2 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

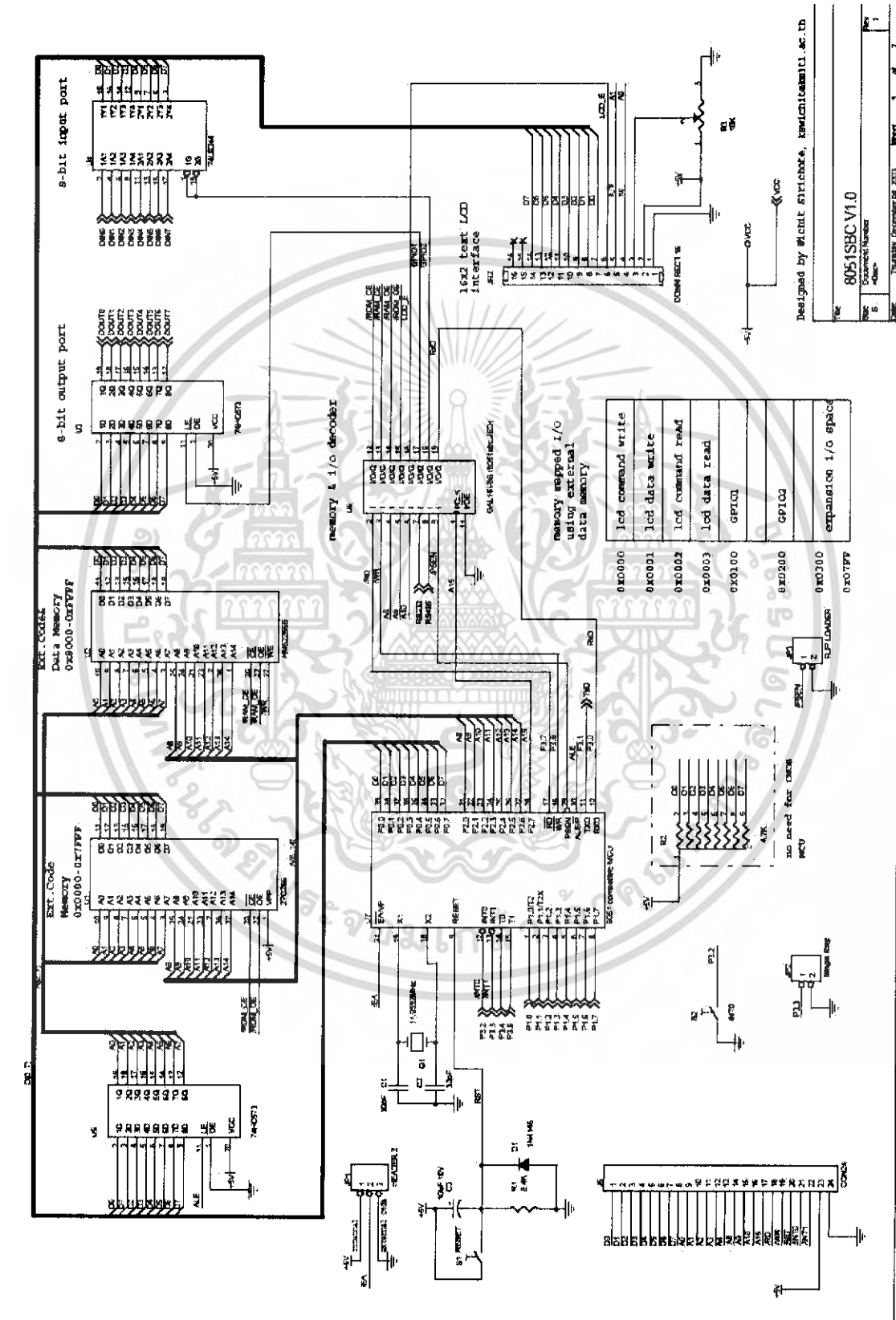


รูปที่ 3.8 หลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

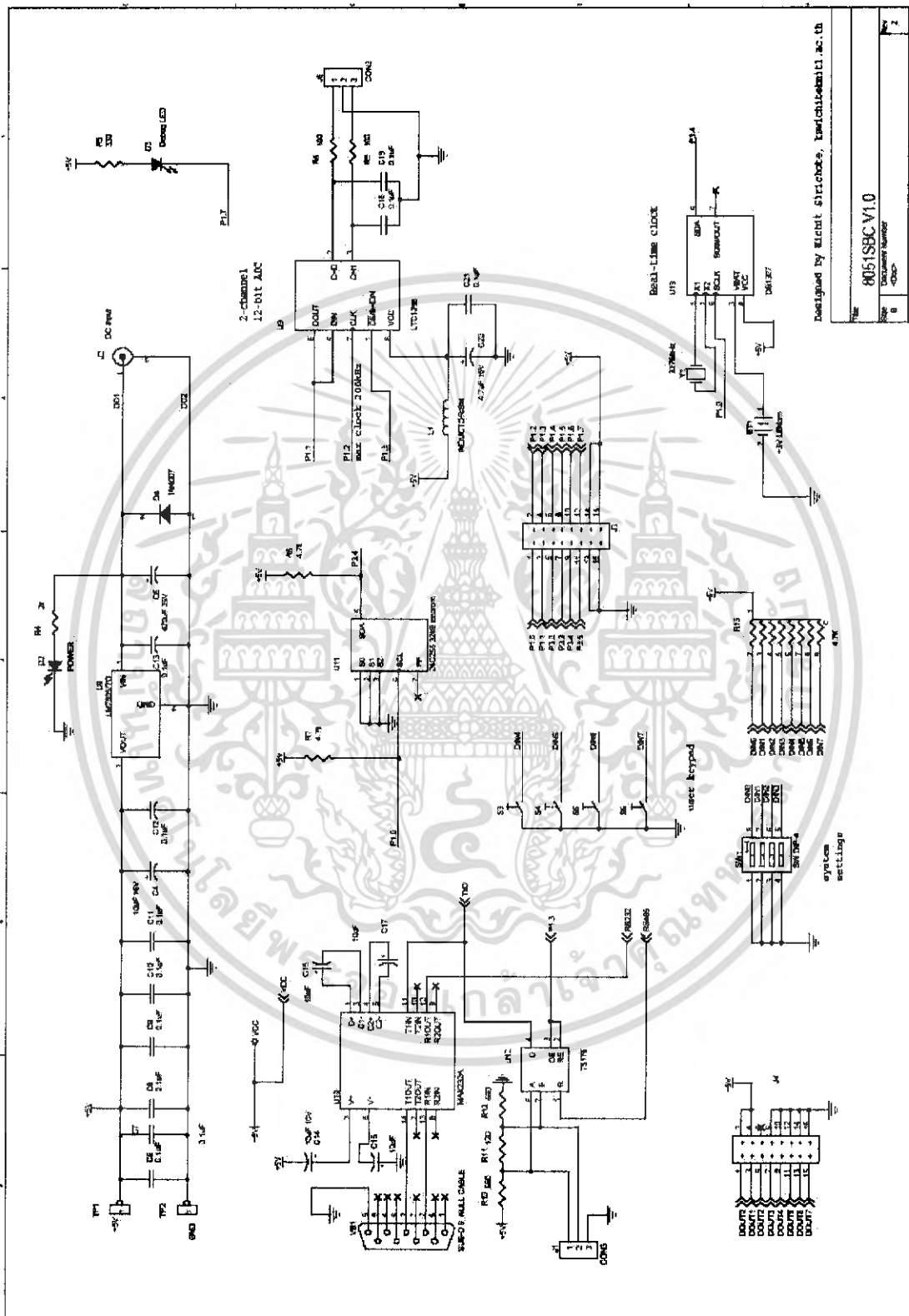
เมื่อแรงดันที่ขาลบ (Invert) มีมากกว่าแรงดันที่ขาบวก (Non-Invert) จะทำให้เอาต์พุตของ ออปแอมป์ มีแรงดันประมาณ 0 โวลต์ สัญญาณที่เอาต์พุต จะเทียบได้กับลอจิกต่ำ (Low) และ เมื่อแรงดันที่ขาบวก มีมากกว่าแรงดันที่ขาลบ จะทำให้เอาต์พุตของออปแอมป์มีแรงดันประมาณ 5 โวลต์ (เท่าแหล่งจ่าย) สัญญาณที่เอาต์พุต จะเทียบได้กับลอจิกสูง (High) โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่า ได้เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ โดยสัญญาณที่ได้เป็นพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 วงจรประมวลผล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรบอร์ดประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

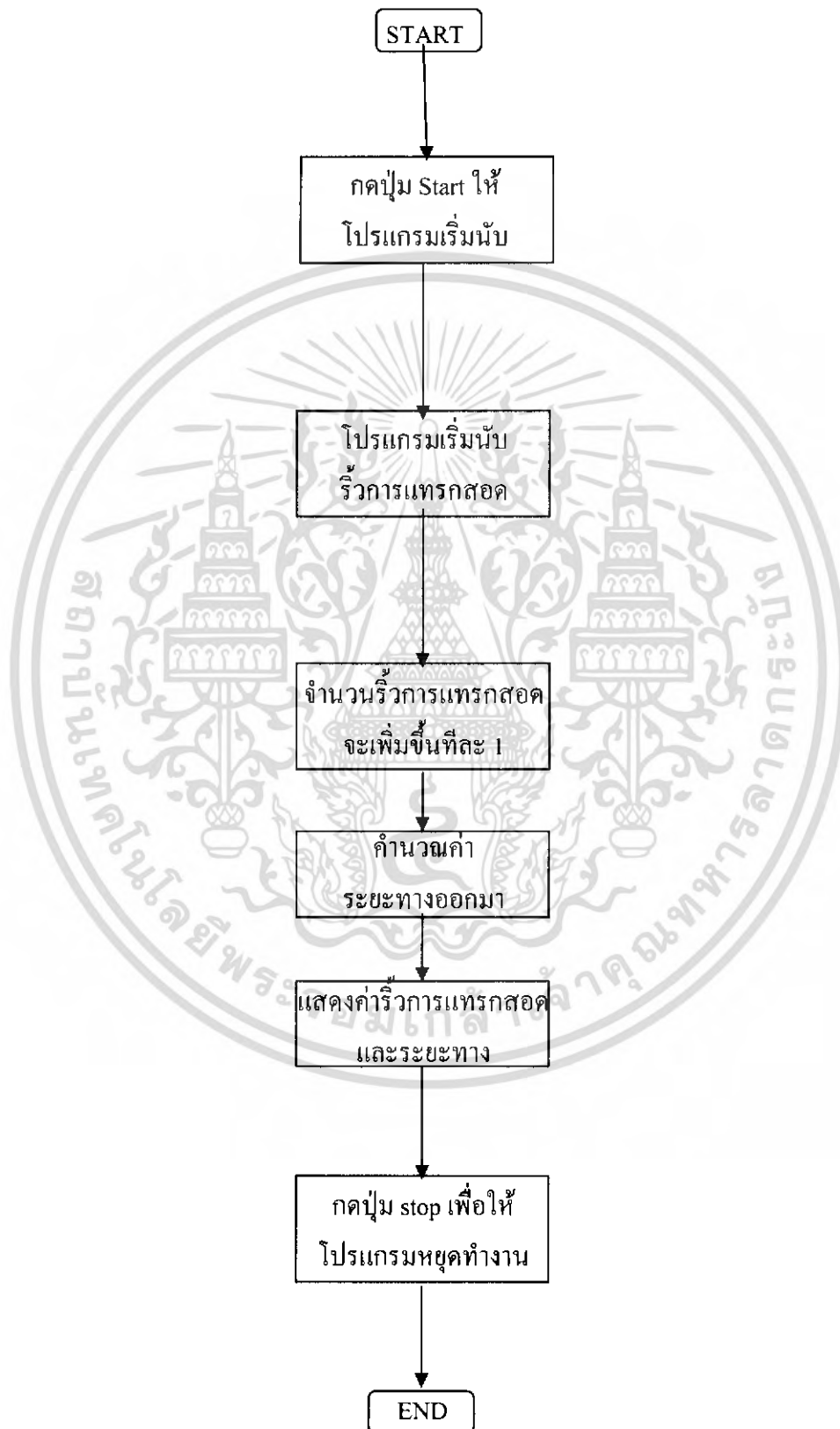
จากโครงการนี้ใช้บอร์ดประมวลผลดังรูปที่ 3.10 ในการประมวลผลสัญญาณเอาท์พุทของ
อปแอมป์ เพื่อทำการนับรีจิสเตอร์แทรกสอดที่เปลี่ยนไป จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมนับรีจิสเตอร์
แทรกสอดแล้วแสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.10 บอร์ดวงจรประมวลผล 8051 SBC V1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการนับรื้อการแทรกสอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 โปรแกรม LabVIEW

นำผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรมส่งค่าผ่านทาง Serial port โดยให้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง d และจำนวนรีว n



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบกล่องชุดการทดลองที่จะใช้เพื่อนับรีวการแทรกสอดแบบไมเคิลสันซึ่งหลังจากทำการจัดชุดการทดลองก็ได้ทำการทดลองและทำการเก็บผลการทดลองในเบื้องต้น

4.1 วิธีกรใช้โปรแกรม

เมื่อทำการจัดแนวแสงเรียบร้อยแล้วจะได้รีวการแทรกสอด จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผล

1. ดับเบิลคลิกที่โปรแกรม Sila Terminal ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการกดปุ่ม reset ที่บอร์ดประมวลผล เพื่ออยู่ในสถานะพร้อม จากนั้นกดปุ่ม “1” เพื่อทำการโหลดไฟล์



3. ทำการ send file โดยกด Browse เพื่อเลือกไฟล์ .HEX

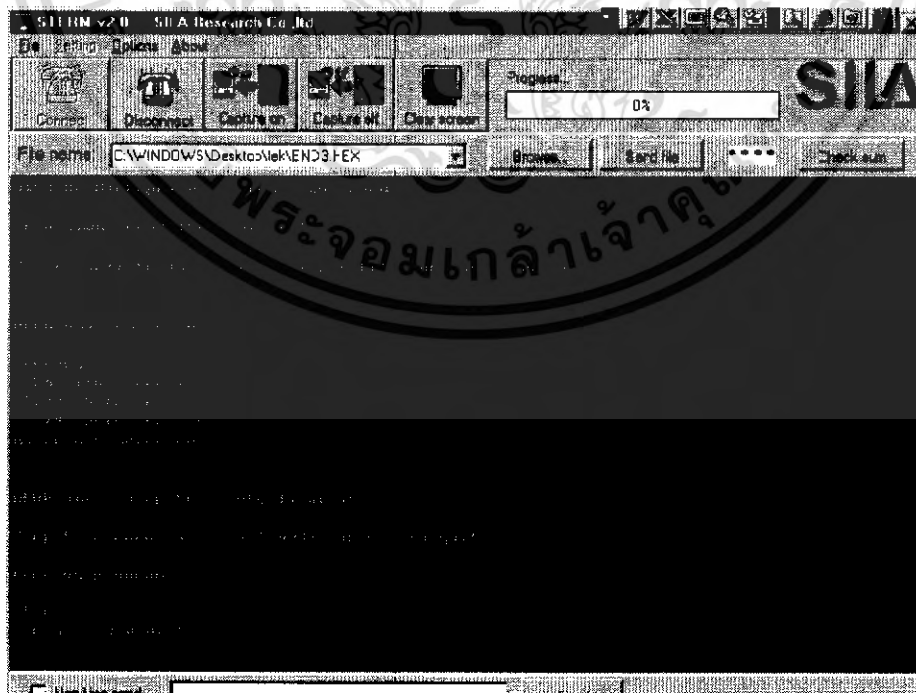


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อทำการ send file เรียบร้อยแล้ว จะขึ้นดังรูป

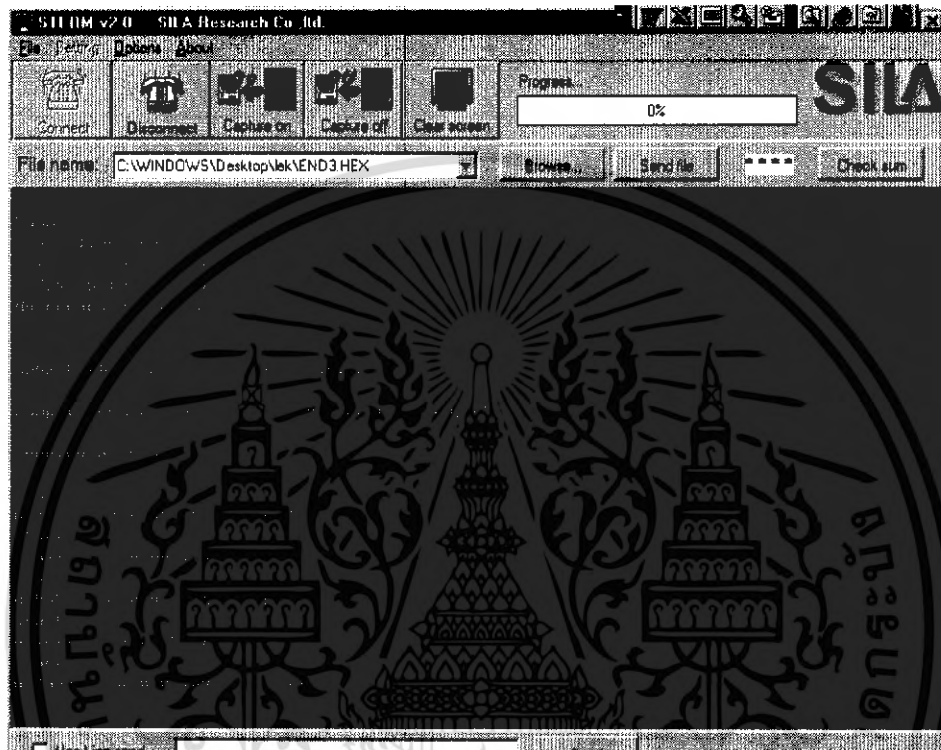


5. ขั้นตอนต่อไปกดปุ่ม “j” เพื่อให้เริ่มทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการกดปุ่ม start ที่ P1.0 จากนั้นกดปุ่ม P1.2 เพื่อให้แสดงผลค่า n และค่า d เมื่อต้องการหยุดทดลองให้กดปุ่ม P1.1 โดยจากตัวโปรแกรมนี้จะทำงานสอดคล้องกับการปรับระยะทางของแสงจากไมโครมิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

จากการอ่านค่า ไมโครมิเตอร์		จากการทดลอง			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
d (mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
0.05	158	0.05031	159	0.05410	171
0.1	316	0.09966	315	0.10120	320
0.15	474	0.14807	468	0.15788	499
0.2	632	0.20123	636	0.20503	648
0.25	790	0.25818	816	0.25312	800
0.3	948	0.31260	988	0.31197	986
0.35	1106	0.35627	1126	0.34013	1075
0.4	1264	0.40025	1265	0.39012	1233
0.45	1422	0.43537	1376	0.43537	1376
0.5	1580	0.48156	1522	0.49074	1551
0.55	1738	0.52870	1671	0.54927	1736
0.6	1896	0.59167	1870	0.60496	1912
0.65	2054	0.63407	2004	0.66412	2099
0.7	2212	0.66286	2095	0.73025	2308
0.75	2370	0.71348	2255	0.74322	2349
0.8	2528	0.76790	2427	0.80334	2539
0.85	2686	0.84858	2652	0.84068	2657
0.9	2844	0.89763	2837	0.90427	2858
0.95	3002	0.96470	3049	0.96344	3045
1	3160	1.03210	3262	1.02546	3241
1.05	3318	1.07228	3389	1.08715	3436
1.1	3476	1.09095	3448	1.10708	3499
1.15	3634	1.14600	3622	1.15201	3641
1.2	3792	1.21656	3845	1.20485	3808
1.25	3950	1.23966	3918	1.26339	3993

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การพิมพ์เพื่อการศึกษานั้น ไม่นานนักจะนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง					
ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
0.06043	191	0.04809	152	0.05157	163
0.09553	302	0.10030	317	0.10473	331
0.16168	511	0.15535	491	0.15250	482
0.20693	654	0.20661	653	0.20313	642
0.25882	818	0.26071	824	0.25755	814
0.30881	976	0.30501	964	0.31387	992
0.36069	1140	0.35279	1115	0.35785	1131
0.40626	1284	0.41100	1299	0.39329	1243
0.44929	1420	0.44233	1398	0.44960	1421
0.50054	1582	0.48821	1543	0.48726	1540
0.55085	1741	0.53598	1694	0.56541	1787
0.60021	1897	0.60274	1905	0.61793	1953
0.64767	2047	0.64704	2045	0.65969	2085
0.69735	2204	0.71728	2267	0.73215	2314
0.73658	2328	0.75873	2398	0.72456	2290
0.82106	2595	0.79037	2498	0.81252	2568
0.87326	2760	0.82707	2614	0.84764	2679
0.92167	2913	0.88845	2808	0.90965	2875
0.94351	2982	0.96692	3056	0.95300	3012
0.98021	3098	1.00837	3187	1.03653	3276
1.06026	3351	1.06817	3376	1.02229	3231
1.10202	3483	1.11404	3521	1.06184	3356
1.11753	3532	1.14379	3615	1.12892	3568
1.19852	3788	1.21941	3854	1.19789	3786
1.24883	3947	1.26117	3986	1.24219	3926

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการอ่านค่าไมโครมิเตอร์		ค่า d เฉลี่ย	ค่าผิดพลาด ของ d(mm)	n เฉลี่ย
d (mm)	n(จำนวนรีว)			
0.05	158	0.05290	5.80144	167.2
0.1	316	0.10028	0.28344	317
0.15	474	0.15510	3.39829	490.2
0.2	632	0.20459	2.29280	646.6
0.25	790	0.25768	3.07066	814.4
0.3	948	0.31045	3.48389	981.2
0.35	1106	0.35354	1.01282	1117.4
0.4	1264	0.40018	0.04594	1264.8
0.45	1422	0.44239	1.69060	1398.2
0.5	1580	0.48966	2.06795	1547.6
0.55	1738	0.54604	0.71969	1725.8
0.6	1896	0.60350	0.58371	1907.4
0.65	2054	0.65052	0.07975	2056
0.7	2212	0.70798	1.13967	2237.6
0.75	2370	0.73531	1.95831	2324
0.8	2528	0.79904	0.12044	2525.4
0.85	2686	0.84745	0.30058	2672.4
0.9	2844	0.90433	0.48158	2858.2
0.95	3002	0.95831	0.87506	3028.8
1	3160	1.01653	1.65326	3212.8
1.05	3318	1.06203	1.14562	3356.6
1.1	3476	1.09519	0.43759	3461.4
1.15	3634	1.13765	1.07407	3595.6
1.2	3792	1.20745	0.62043	3816.2
1.25	3950	1.25105	0.08379	3954

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการอ่านค่าไมโครมิเตอร์		จากการทดลอง			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
d (mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
1.3	4108	1.30547	4126	1.32793	4197
1.35	4266	1.36242	4306	1.38963	4392
1.4	4424	1.50543	4458	1.40355	4436
1.45	4584	1.46114	4618	1.47284	4655
1.5	4740	1.49372	4721	1.49721	4732
1.55	4898	1.54118	4871	1.53612	4855
1.6	5056	1.59276	5034	1.59244	5033
1.65	5214	1.64338	5194	1.64212	5190
1.7	5372	1.70097	5376	1.69844	5368
1.75	5530	1.76614	5582	1.73704	5490
1.8	5688	1.78956	5656	1.77595	5613
1.85	5846	1.8579	5872	1.84683	5837
1.9	6004	1.90504	6021	1.90473	6020
1.95	6162	1.95314	6173	1.97465	6241
2	6320	2.00091	6324	1.99902	6318
2.05	6478	2.04363	6459	2.03477	6431
2.1	6636	2.11735	6692	2.09837	6632
2.15	6794	2.14583	6782	2.1531	6805
2.2	6952	2.18886	6918	2.21955	7015
2.25	7110	2.26005	7143	2.27618	7194
2.3	7268	2.30687	7291	2.29422	7251
2.35	7426	2.34706	7418	2.34009	7396
2.4	7584	2.39546	7571	2.41128	7621
2.45	7742	2.44862	7739	2.47045	7808
2.5	7900	2.54101	8031	2.54512	8044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง					
ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
1.30135	4113	1.31781	4165	1.33869	4231
1.36337	4309	1.35641	4287	1.34375	4247
1.40007	4425	1.42348	4499	1.41589	4475
1.45323	4593	1.47854	4673	1.45987	4614
1.49056	4711	1.50480	4756	1.51302	4782
1.55068	4601	1.52631	4824	1.53011	4836
1.61396	5101	1.60889	5085	1.59624	5045
1.67407	5291	1.63389	5164	1.62471	5135
1.70318	5383	1.64971	5214	1.70508	5389
1.78861	5653	1.76361	5574	1.75159	5536
1.80063	5691	1.79589	5676	1.78608	5645
1.85664	5868	1.86360	5890	1.84967	5846
1.90568	6023	1.92529	6085	1.91011	6037
1.94998	6163	1.96105	6198	1.96643	6215
1.99712	6312	2.00186	6327	2.01389	6365
2.04458	6462	2.05597	6498	2.04774	6472
2.10596	6656	2.11640	6689	2.10090	6640
2.16165	6832	2.16164	6832	2.16607	6846
2.1762	6878	2.21290	6994	2.21891	7013
2.24549	7097	2.26068	7145	2.24581	7098
2.28093	7209	2.30656	7290	2.28979	7237
2.33503	7380	2.35686	7449	2.33946	7394
2.38787	7547	2.39768	7578	2.41476	7632
2.4578	7768	2.45748	7767	2.46919	7804
2.53943	8026	2.51981	7964	2.53879	8024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการอ่านค่าไมโครมิเตอร์		ค่า d เฉลี่ย	ค่าผิดพลาด ของ d(mm)	n เฉลี่ย
d (mm)	n(จำนวนรีว)			
1.3	4108	1.31825	1.40376	4166.4
1.35	4266	1.36312	0.97152	4308.2
1.4	4424	1.42968	2.12034	4458.6
1.45	4584	1.46512	1.04299	4630.6
1.5	4740	1.49986	0.00916	4740.4
1.55	4898	1.53688	0.84640	4797.4
1.6	5056	1.60086	0.05365	5059.6
1.65	5214	1.64363	0.38577	5194.8
1.7	5372	1.69148	0.50142	5346
1.75	5530	1.76140	0.65136	5567
1.8	5688	1.78962	0.57662	5656.2
1.85	5846	1.85493	0.26638	5862.6
1.9	6004	1.91017	0.53527	6037.2
1.95	6162	1.96105	0.56660	6198
2	6320	2.00256	0.12799	6329.2
2.05	6478	2.04534	0.22743	6464.4
2.1	6636	2.10780	0.37120	6661.8
2.15	6794	2.15766	0.35627	6819.4
2.2	6952	2.20328	0.14932	6963.6
2.25	7110	2.25764	0.33960	7135.4
2.3	7268	2.29567	0.18815	7255.6
2.35	7426	2.34370	0.26804	7407.4
2.4	7584	2.40141	0.05878	7589.8
2.45	7742	2.46071	0.43702	7777.2
2.5	7900	2.53683	1.47331	8017.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการอ่านค่าไมโครมิเตอร์		จากการทดลอง			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
d (mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
2.55	8059	2.57391	8135	2.59891	8214
2.6	8217	2.62327	8291	2.62992	8312
2.65	8375	2.66883	8435	2.67706	8461
2.7	8534	2.70712	8556	2.71851	8592
2.75	8692	2.73528	8645	2.75932	8721
2.8	8850	2.80963	8880	2.81026	8882
2.85	9008	2.85836	9034	2.85646	9028
2.9	9166	2.89917	9163	2.89727	9157
2.95	9324	2.96119	9359	2.95961	9354
3	9482	3.00580	9500	3.00295	9491
3.05	9640	3.06338	9682	3.06180	9677
3.1	9798	3.11084	9832	3.09851	9793
3.15	9956	3.16938	10017	3.17697	10041
3.2	10114	3.20450	10128	3.20165	10119
3.25	10272	3.25354	10283	3.25987	10303
3.3	10430	3.31524	10478	3.31967	10492
3.35	10588	3.37346	10662	3.35764	10612
3.4	10746	3.39624	10734	3.41522	10794
3.45	10904	3.47502	10983	3.45762	10928
3.5	11062	3.52565	11143	3.51014	11094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลอง					
ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)	d(mm)	n(จำนวนรีว)
2.57012	8123	2.55525	8076	2.54006	8028
2.62675	8302	2.59986	8217	2.62264	8289
2.66504	8423	2.64574	8362	2.65808	8401
2.71250	8573	2.69415	8515	2.71914	8594
2.75395	8704	2.74224	8667	2.75774	8716
2.81375	8893	2.80457	8864	2.79856	8845
2.87418	9084	2.85424	9021	2.86912	9068
2.90582	9184	2.89348	9145	2.89696	9156
2.96941	9385	2.95138	9328	2.96087	9358
3.01339	9524	3.00548	9499	3.01751	9537
3.06022	9672	3.06338	9682	3.06022	9672
3.10547	9815	3.11717	9852	3.11781	9854
3.16780	10012	3.15862	9983	3.16653	10008
3.20861	10141	3.20545	10131	3.19944	10112
3.24500	10256	3.26651	10324	3.25607	10291
3.31208	10468	3.32062	10495	3.30258	10438
3.36523	10636	3.37694	10673	3.36112	10623
3.40320	10756	3.41807	10803	3.41206	10784
3.46237	10943	3.45983	10935	3.46047	10937
3.53830	11183	3.51172	11099	3.53324	11167

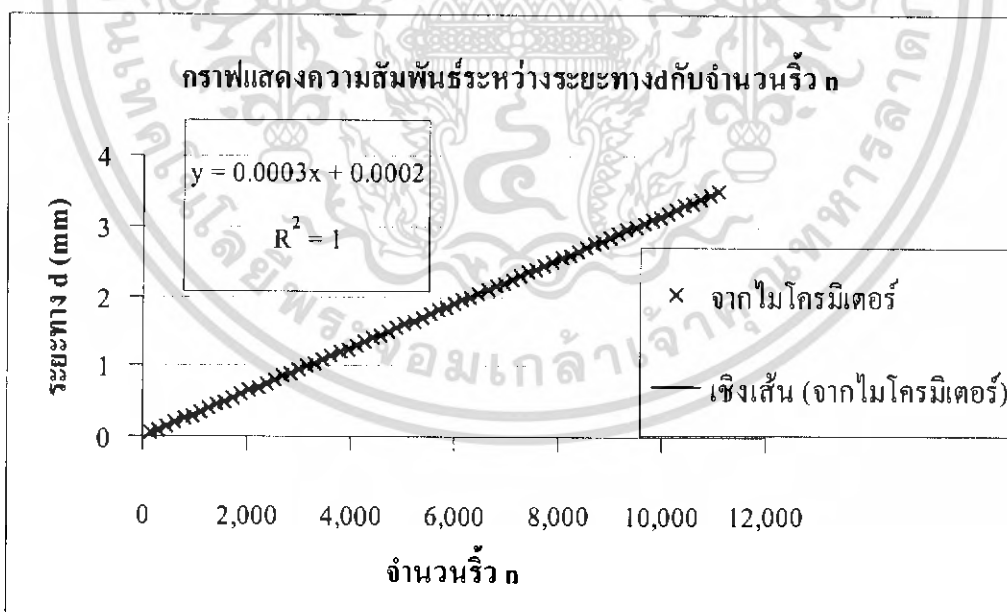
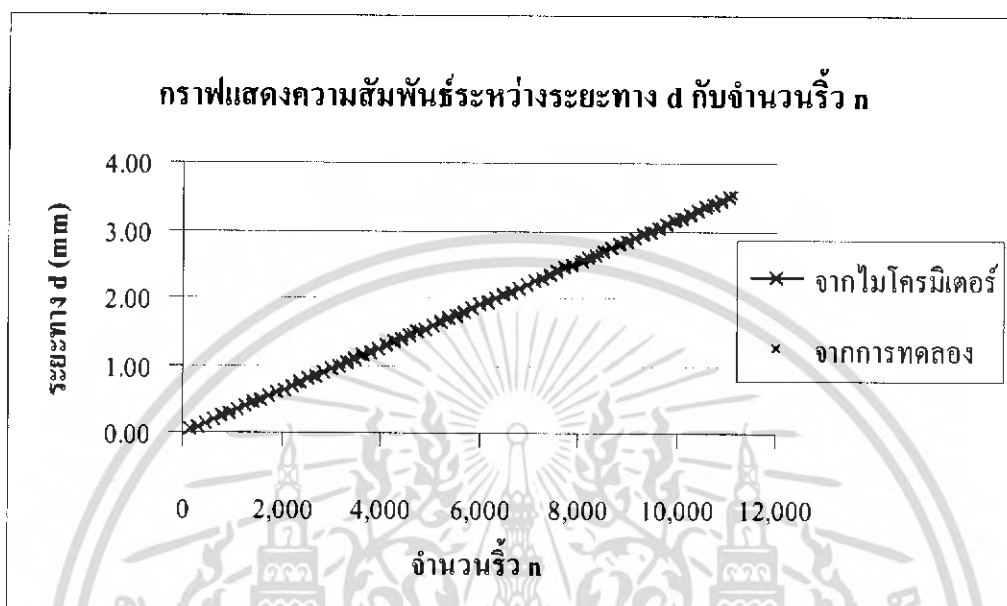
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการอ่านค่าไมโครมิเตอร์		ค่า d เฉลี่ย	ค่าผิดพลาด ของ d(mm)	n เฉลี่ย
d (mm)	n(จำนวนรีว)			
2.55	8059	2.56765	0.69213	8115.2
2.6	8217	2.62049	0.78800	8282.2
2.65	8375	2.66295	0.48864	8416.4
2.7	8534	2.71028	0.38083	8566
2.75	8692	2.74971	0.01070	8690.6
2.8	8850	2.80735	0.26264	8872.8
2.85	9008	2.86247	0.43757	9047
2.9	9166	2.89854	0.05033	9161
2.95	9324	2.96049	0.35564	9356.8
3	9482	3.00903	0.30091	9510.2
3.05	9640	3.06180	0.38698	9677
3.1	9798	3.10996	0.32125	9829.2
3.15	9956	3.16786	0.56699	10012.2
3.2	10114	3.20393	0.12280	10126.2
3.25	10272	3.25620	0.19074	10291.4
3.3	10430	3.31404	0.42536	10474.2
3.35	10588	3.36688	0.50375	10641.2
3.4	10746	3.40896	0.26344	10774.2
3.45	10904	3.46306	0.37859	10945.2
3.5	11062	3.52381	0.68029	11137.2

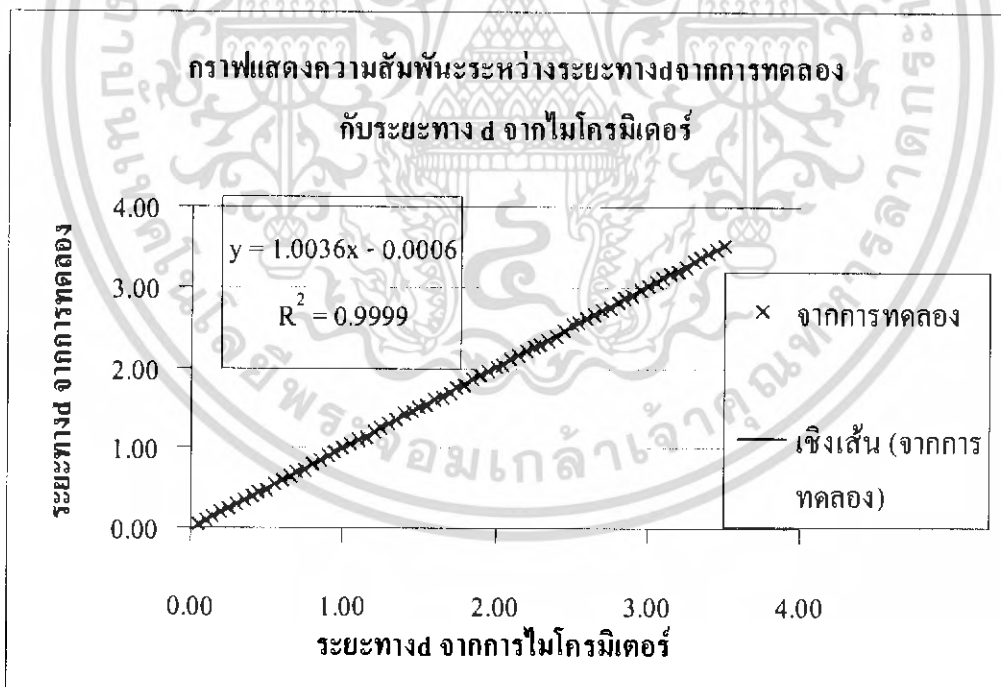
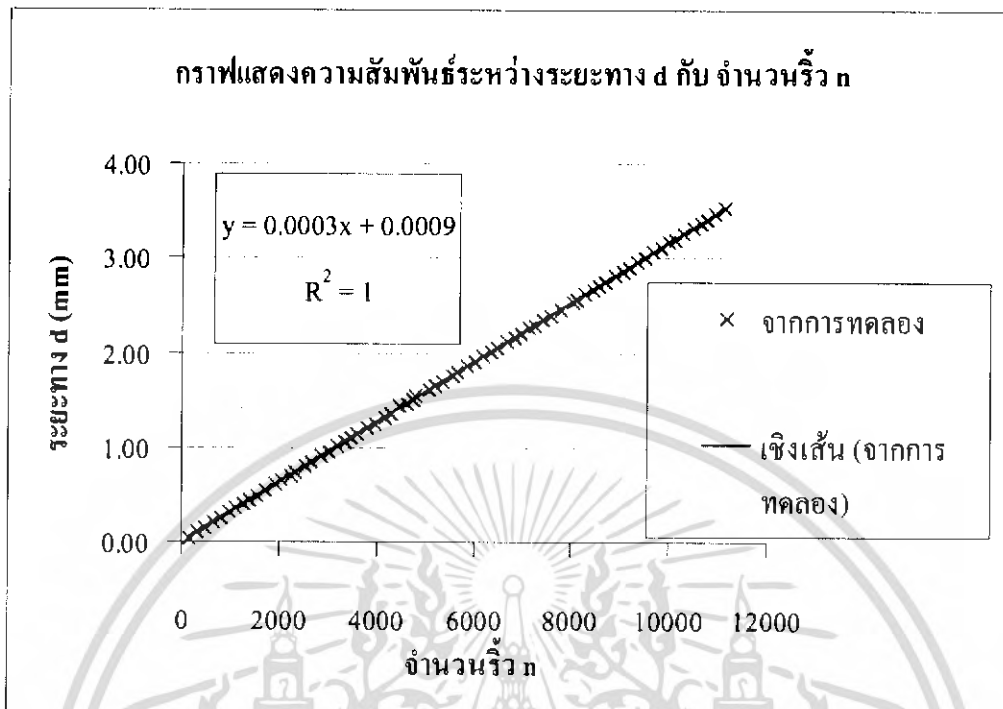
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กราฟแสดงผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$d = \frac{n\lambda}{2}$$

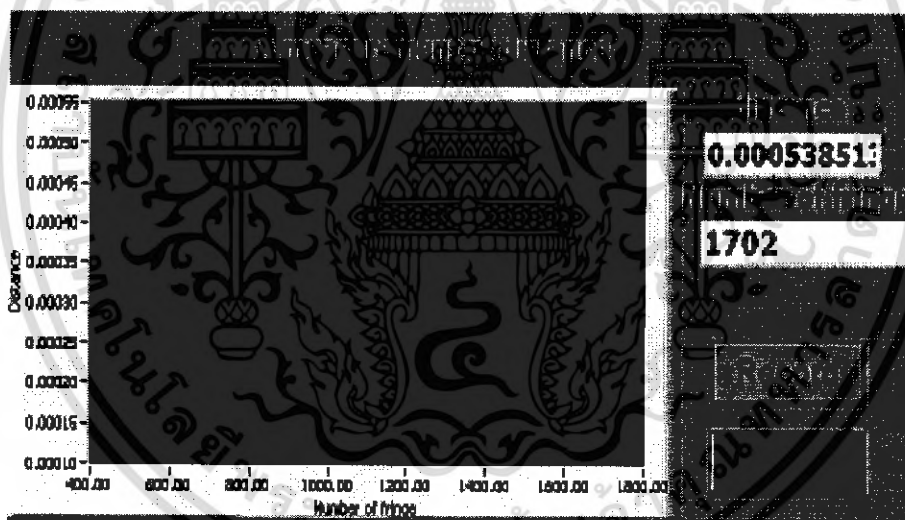
d = ระยะทางที่กระจกเลื่อนไป

n = จำนวนรีฟlection แทรกสอด

λ = ความยาวคลื่น (632.8 nm)

4.4 ผลทาง Lab View

นำผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรมส่งค่าผ่านทาง Serial port โดยให้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง d และจำนวนรีฟlection n



รูปที่ 4.1 แสดงผลทาง LabVIEW

4.5 อภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองสิ่งที่วัดได้นั้นคือจำนวนรีฟlection แทรกสอดและนำรีฟlection จากการแทรกสอดไปคำนวณหาระยะทางที่กระจกเลื่อนไปเพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจริงที่ได้จากการปรับไมโครมิเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้นสอดคล้องกับค่าจริง โดยเทียบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งมีค่าประมาณ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากโครงการงานการศึกษาการวัดระยะทางอย่างละเอียด โดยใช้หลักการของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ซึ่งใช้ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่มีความยาวคลื่น 632.8 nm เป็นแสงในช่วงที่ตามองเห็น

ในการศึกษาครั้งนี้โดยใช้ลำแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์ขยาย จากนั้นแสงจะถูกแยกโดยกระจกแยกแสง(Beam Splitter) ทำให้เกิดการแยกลำแสงออกเป็นสองลำแสง ซึ่งแต่ละลำแสงจะมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน เกิดการสะท้อนที่กระจกทั้งสอง โดยลำแสงหนึ่งจะเกิดการทะลุผ่าน และอีกลำแสงหนึ่งจะเกิดการหักเหที่กระจกแยกแสง แล้วลำแสงทั้งสองจะไปแทรกสอดกันบนฉากที่อยู่บนตัวตรวจจับแสง และแสดงออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

ตัวตรวจจับแสงจะเชื่อมต่อกับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Op-Amp) ที่ต่อเข้ากับบอร์ดประมวลผล เพื่อทำหน้าที่แสดงผลการทดลองออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

ในโครงการงานพิเศษนี้ได้เป็นศึกษาหลักการทำงานของไมเคิลสันอินเตอร์ฟีโรมิเตอร์ ที่ได้กล่าวถึง ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนริ้วการแทรกสอด (n) และระยะทางของแสงที่เปลี่ยนไป (d) ซึ่งจากผลการทดลองจำนวนริ้วการแทรกสอดมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากสูตรการคำนวณและค่าระยะทางของแสงที่เปลี่ยนไปจากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งทราบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัจจัยที่มีผลต่อโครงการงานพิเศษนี้คือการถูกรบกวนทางกายภาพต่างๆ เช่น ลม เสียง แสง รบกวนจากภายนอก การสั่นสะเทือนของวัตถุต่างๆ อันเนื่องมาจาก รถไฟ การเดิน เครื่องบิน ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาของการสั่นสะเทือนนั้น ได้ทำโดยการรองด้วยแผ่นพลาสติกกันสะเทือนมารองใต้ฐานบอร์ด ซึ่งมีราคาถูกและหาง่าย เพื่อทำหน้าที่เสมือนโช๊ค การสร้างกล่องครอบชิ้นงานซึ่งมีลักษณะเป็นสี่ดำเพื่อแก้ปัญหาการถูกรบกวนจากแสงภายนอก และยังได้เป็นการป้องกันลมที่จะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไป

เอกสารอ้างอิง

สุวรรณ กุสัราภย. 2537. ทัศนศาสตร์กายภาพ. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เจริญ เพชรมณี. 2547. เรียนลัด LabVIEW. ครั้งที่1.กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น.

<http://pdf.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/67456/INTERSIL/ICM7226B.html>

http://en.wikipedia.org/wiki/Helium-neon_laser

<http://chaokhun.kmitl.ac.th/~kswichit/8051sbc/8051sbc.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

สุวรรณ คูสำราญ. 2537. **ทัศนศาสตร์กายภาพ**. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เจริญ เพชรมณี. 2547. **เรียนลัด LabVIEW**. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ:ซีเอ็ดยูเคชั่น.

<http://pdf.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/67456/INTERSIL/ICM7226B.html>

http://en.wikipedia.org/wiki/Helium-neon_laser

<http://chaokhun.kmitl.ac.th/~kswichit/8051sbc/8051sbc.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include <stdio.h>
#include <reg52.h>
```

```
int q;
unsigned long num;
float lam,d;
```

```
main()
{
    P1=0xff;
    num=0;
    q=0;
    d=0;
    lam=0.0000006328;
    while(q==0)
    {
        if(!(P1&0x01))
        {
            q=1;
            printf("start\n");
        }
        while(q==1)
        {
            if(!(P1&0x04))
            //if(P1&0x04)
            {
                num++;
                d=(num*lam)/2;
                printf("\n=%ld d=%0.9f",num,d);
            }
            if(!(P1&0x02))
            {
                printf(" end\n");
                P1=0xff;
                num=0;
                q=0;
                d=0;
            }
        }
    }
}
```

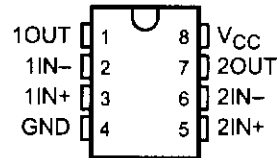
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM158, LM158A, LM258, LM258A LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

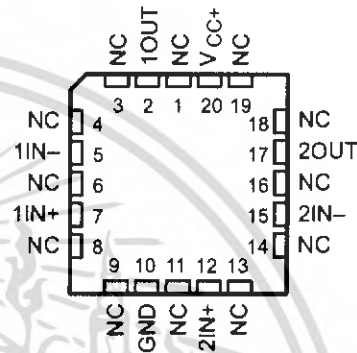
SLOS068C - JUNE 1976 - REVISED JULY 1998

- **Wide Range of Supply Voltages:**
 - Single Supply . . . 3 V to 30 V (LM2904 and LM2904Q . . . 3 V to 26 V) or
 - Dual Supplies
- **Low Supply-Current Drain Independent of Supply Voltage . . . 0.7 mA Typ**
- **Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground, Allowing Direct Sensing Near Ground**
- **Low Input Bias and Offset Parameters:**
 - Input Offset Voltage . . . 3 mV Typ
A Versions . . . 2 mV Typ
 - Input Offset Current . . . 2 nA Typ
 - Input Bias Current . . . 20 nA Typ
A Versions . . . 15 nA Typ
- **Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage . . . ± 32 V (LM2904 and LM2904Q . . . ± 26 V)**
- **Open-Loop Differential Voltage Amplification . . . 100 V/mV Typ**
- **Internal Frequency Compensation**

D, JG, P, OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



LM158, LM158A . . . FK PACKAGE
(TOP VIEW)



NC - No internal connection

description

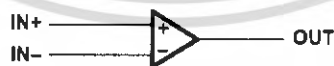
These devices consist of two independent, high-gain, frequency-compensated operational amplifiers designed to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies also is possible if the difference between the two supplies is 3 V to 30 V (3 V to 26 V for the LM2904 and LM2904Q), and V_{CC} is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply-current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems. For example, these devices can be operated directly from the standard 5-V supply used in digital systems and easily provides the required interface electronics without additional ± 5 -V supplies.

The LM2904Q is manufactured to demanding automotive requirements.

The LM158 and LM158A are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C . The LM258 and LM258A are characterized for operation from -25°C to 85°C , the LM358 and LM358A from 0°C to 70°C , and the LM2904 and LM2904Q from -40°C to 125°C .

logic diagram (each amplifier)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated
On products compliant to MIL-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS068C – JUNE 1976 – REVISED JULY 1998

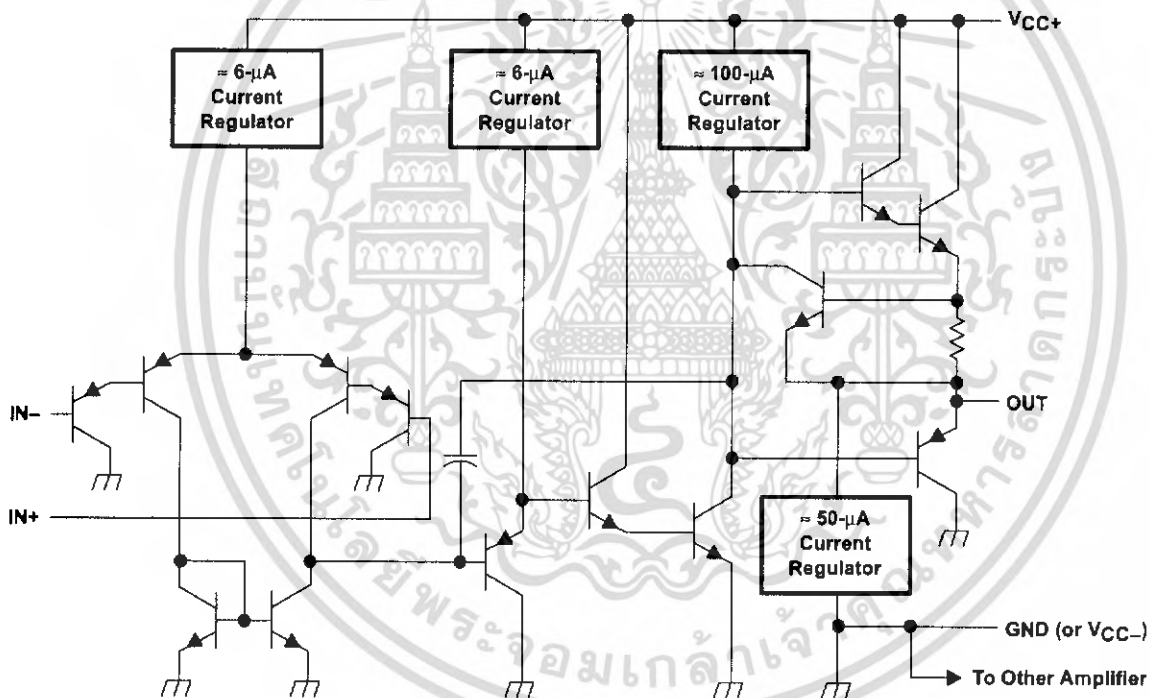
AVAILABLE OPTIONS

T _A	V _{IO(max)} AT 25°C	PACKAGED DEVICES					CHIP FORM (Y)
		SMALL OUTLINE (D)†	CHIP CARRIER (FK)	CERAMIC DIP (JG)	PLASTIC DIP (P)	TSSOP (PW)‡	
0°C to 70°C	7 mV	LM358D	—	—	LM358P	LM358PW	LM358Y
	3 mV	—	—	—	LM358AP	—	—
-25°C to 85°C	5 mV	LM258D	—	—	LM258P	—	—
	3 mV	—	—	—	LM258AP	—	—
-40°C to 125°C	7 mV	LM2904D	—	—	LM2904P	LM2904PW	—
		LM2904QD	—	—	LM2904QP	—	—
-55°C to 125°C	5 mV	LM158D	LM158FK	LM158JG	LM158P	—	—
	2 mV	—	LM158AFK	LM158AJG	—	—	—

† The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., LM358DR).

‡ The PW package is only available left-end taped and reeled.

schematic (each amplifier)



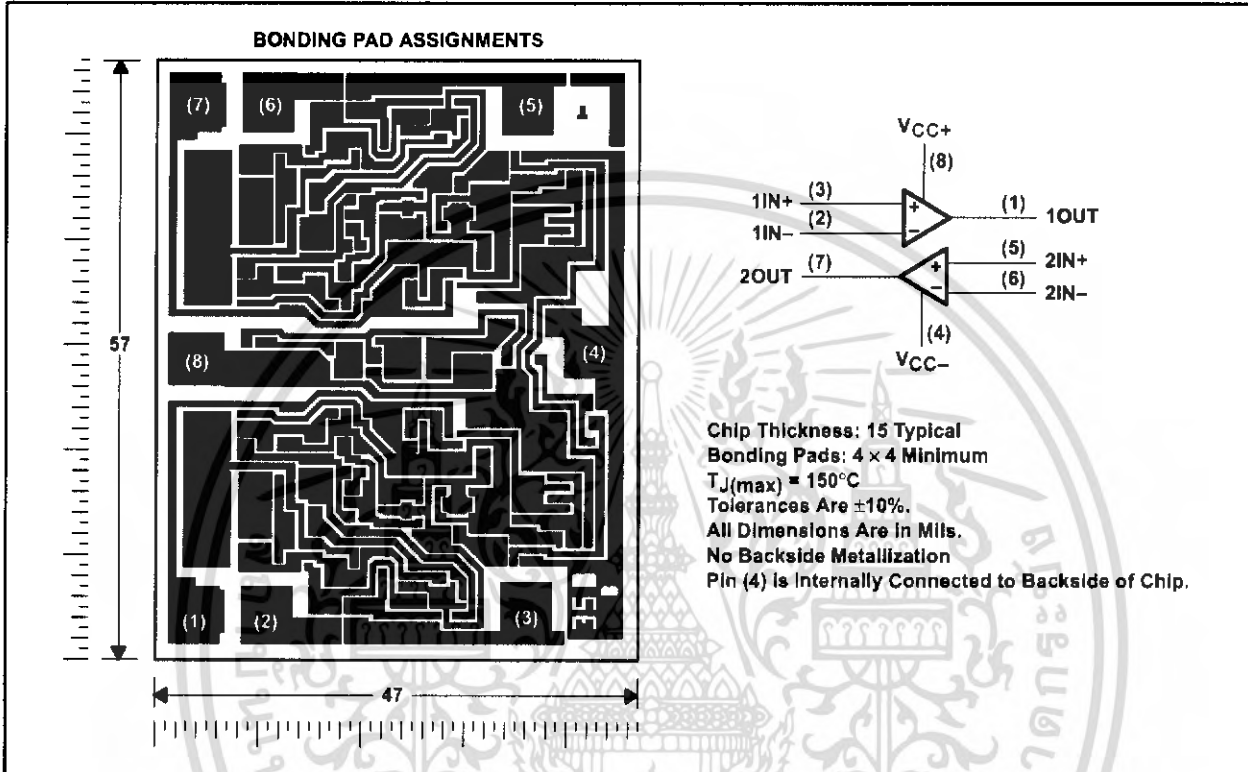
COMPONENT COUNT	
Epi-FET	1
Diodes	2
Resistors	7
Transistors	51
Capacitors	2



**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**
SLOS068C – JUNE 1976 – REVISED JULY 1998

LM358Y chip information

These chips, when properly assembled, display characteristics similar to the LM358. Thermal compression or ultrasonic bonding can be used on the doped-aluminum bonding pads. Chips can be mounted with conductive epoxy or a gold-silicon preform.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS068C – JUNE 1978 – REVISED JULY 1998

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		LM158, LM158A LM258, LM258A LM358, LM358A	LM2904 LM2904Q	UNIT
Supply voltage, V_{CC} (see Note 1)		32	26	V
Differential input voltage, V_{ID} (see Note 2)		± 32	± 26	V
Input voltage, V_I (either input)		-0.3 to 32	-0.3 to 26	V
Duration of output short circuit (one amplifier) to ground at (or below) 25°C free-air temperature ($V_{CC} \leq 15$ V) (see Note 3)		Unlimited	Unlimited	
Continuous total power dissipation		See Dissipation Rating Table		
Operating free-air temperature range, T_A	LM158, LM158A	-55 to 125		°C
	LM258, LM258A	-25 to 85		
	LM358, LM358A	0 to 70		
	LM2904, LM2904Q		-40 to 125	
Storage temperature range, T_{stg}		-65 to 150	-65 to 150	°C
Case temperature for 60 seconds	FK package	260		°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds	JG package	300	300	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	D, P, or PW package	260	260	°C

- NOTES: 1. All voltage values, except differential voltages and V_{CC} specified for measurement of I_{OS} , are with respect to the network ground terminal.
2. Differential voltages are at $IN+$ with respect to $IN-$.
3. Short circuits from outputs to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR ABOVE $T_A = 25^\circ\text{C}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 85^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	725 mW	5.8 mW/°C	464 mW	377 mW	145 mW
FK	1375 mW	11.0 mW/°C	880 mW	715 mW	275 mW
JG	1050 mW	8.4 mW/°C	672 mW	546 mW	210 mW
P	1000 mW	8.0 mW/°C	640 mW	520 mW	200 mW
PW	525 mW	4.2 mW/°C	336 mW	273 mW	-



LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS
 SLOS068C – JUNE 1976 – REVISED JULY 1998

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} = 5\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	T_A ‡	LM158 LM258			LM358			UNIT
			MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$, $V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$, $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	3	5	3	7	mV		
		Full range	7			9			
α_{VIO} Average temperature coefficient of input offset voltage		Full range	7			7	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$		
I_{IO} Input offset current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	2	30	2	50	nA		
		Full range	100			150			
α_{IIO} Average temperature coefficient of input offset current		Full range	10			10	$\text{pA}/^\circ\text{C}$		
I_{IB} Input bias current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	-20	-150	-20	-250	nA		
		Full range	-300			-500			
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$	25°C	0 to $V_{CC}-1.5$		0 to $V_{CC}-1.5$		V		
		Full range	0 to $V_{CC}-2$		0 to $V_{CC}-2$				
V_{OH} High-level output voltage	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = \text{MAX}$	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C		$V_{CC}-1.5$		V		
		$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	25°C		$V_{CC}-1.5$				
		$R_L = 2\text{ k}\Omega$	Full range		26				
		$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	Full range		27 28				
V_{OL} Low-level output voltage	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	Full range	5 20		5 20		mV		
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_O = 1\text{ V to } 11\text{ V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	50	100	25	100	V/mV		
		Full range	25			15			
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$, $V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$	25°C	70	80	65	80	dB		
k_{SVR} Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{DD}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$	25°C	65	100	65	100	dB		
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$f = 1\text{ kHz to } 20\text{ kHz}$	25°C	120			120	dB		
I_O Output current	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{ID} = 1\text{ V}$, $V_O = 0$ $V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{ID} = -1\text{ V}$, $V_O = 15\text{ V}$ $V_{ID} = -1\text{ V}$, $V_O = 200\text{ mV}$	25°C	-20	-30	-20	-30	mA		
		Full range	-10			-10			
		25°C	10	20	10	20			
		Full range	5			5			
I_{OS} Short-circuit output current	V_{CC} at 5 V, GND at -5 V, $V_O = 0$	25°C	± 40	± 60	± 40	± 60	mA		
I_{CC} Supply current (two amplifiers)	$V_O = 2.5\text{ V}$, No load	Full range	0.7 1.2		0.7 1.2		mA		
	$V_{CC} = \text{MAX}$, $V_O = 0.5\text{ V}$, No load	Full range	1 2		1 2				

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified. MAX V_{CC} for testing purposes is 26 V for LM 2904 and 30 V for others.

‡ Full range is -55°C to 125°C for LM158, -25°C to 85°C for LM258, 0°C to 70°C for LM358, and -40°C to 125°C for LM2904 and LM2904Q.

§ All typical values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265 มอนูญาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 5

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q**

SLOS068C – JUNE 1978 – REVISED JULY 1998

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} = 5\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITION [†]	T_A [‡]	LM2904 LM2904Q		UNIT	
			MIN	TYP [§] MAX		
V_{IO} Input offset voltage	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$, $V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$, $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	3	7	mV	
		Full range	10			
α_{VIO} Average temperature coefficient of input offset voltage		Full range	7		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
I_{IO} Input offset current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	2	50	nA	
		Full range	300			
α_{IIO} Average temperature coefficient of input offset current		Full range	10		$\text{pA}/^\circ\text{C}$	
I_{IB} Input bias current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	-20	-250	nA	
		Full range	-500			
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$	25°C	0 to $V_{CC}-1.5$		V	
		Full range	0 to $V_{CC}-2$			
V_{OH} High-level output voltage	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C			V	
	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	25°C	$V_{CC}-1.5$			
	$V_{CC} = \text{MAX}$	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	Full range	26		
		$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	Full range	23		24
V_{OL} Low-level output voltage	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	Full range	5	20	mV	
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_O = 1\text{ V to }11\text{ V}$, $R_L = \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	25	100	V/mV	
		Full range	15			
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$, $V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$	25°C	50	80	dB	
kSVR Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{DD}/\Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$	25°C	65	100	dB	
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$f = 1\text{ kHz to }20\text{ kHz}$	25°C	120		dB	
I_O Output current	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{ID} = 1\text{ V}$, $V_O = 0$	25°C	-20	-30	mA	
		Full range	-10			
	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{ID} = -1\text{ V}$, $V_O = 15\text{ V}$	25°C	10	20		
		Full range	5			
$V_{ID} = -1\text{ V}$, $V_O = 200\text{ mV}$	25°C	30		μA		
I_{OS} Short-circuit output current	V_{CC} at 5 V, GND at -5 V, $V_O = 0$	25°C	± 40	± 60	mA	
I_{CC} Supply current (two amplifiers)	$V_O = 2.5\text{ V}$, No load	Full range	0.7	1.2	mA	
	$V_{CC} = \text{MAX}$, $V_O = 0.5\text{ V}$, No load	Full range	1	2		

[†] All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified. MAX V_{CC} for testing purposes is 26 V for LM 2904 and 30 V for others.

[‡] Full range is -55°C to 125°C for LM158, -25°C to 85°C for LM258, 0°C to 70°C for LM358, and -40°C to 125°C for LM2904 and LM2904Q.

[§] All typical values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.



**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066C – JUNE 1976 – REVISED JULY 1998

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} = 5\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	T_A ‡	LM158A			LM258A			UNIT
			MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_{CC} = 5\text{ V to }30\text{ V}$, $V_{IC} = V_{ICR}(\text{min})$, $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C			2		2	3	mV
		Full range			4		4		
α_{VIO} Average temperature coefficient of input offset voltage		Full range		7	15*		7	15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_{IO} Input offset current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C		2	10		2	15	nA
		Full range			30		30		
α_{IIO} Average temperature coefficient of input offset current		Full range		10	200		10	200	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
I_{IB} Input bias current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C		-15	-50		-15	-80	nA
		Full range			-100		-100		
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 30\text{ V}$	25°C		0 to $V_{CC}-1.5$		0 to $V_{CC}-1.5$		V	
		Full range		0 to $V_{CC}-2$		0 to $V_{CC}-2$			
V_{OH} High-level output voltage	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$	25°C		$V_{CC}-1.5$		$V_{CC}-1.5$		V	
		Full range	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	26		26			
			$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	27	28	27	28		
V_{OL} Low-level output voltage	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	Full range		5	20		5	20	mV
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_O = 1\text{ V to }11\text{ V}$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C		50	100		50	100	V/mV
		Full range		25			25		
CMRR Common-mode rejection ratio		25°C		70	80		70	80	dB
k_{SVR} Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{DD}/\Delta V_{IO}$)		25°C		65	100		65	100	dB
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$f = 1\text{ kHz to }20\text{ kHz}$	25°C		120			120		dB

*On products compliant to MIL-PRF-38535, this parameter is not production tested.

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified.

‡ Full range is -55°C to 125°C for LM158A, -25°C to 85°C for LM258A, and 0°C to 70°C for LM358A.

§ All typical values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265 มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS068C – JUNE 1978 – REVISED JULY 1998

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC} = 5\text{ V}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	T_A ‡	LM358A		UNIT
			MIN	TYP§	
V_{IO} Input offset voltage	$V_{CC} = 5\text{ V to }30\text{ V}$, $V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$, $V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	2	3	mV
		Full range		5	
α_{VIO} Average temperature coefficient of input offset voltage		Full range	7	20	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
I_{IO} Input offset current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	2	30	nA
		Full range		75	
α_{IIO} Average temperature coefficient of input offset current		Full range	10	300	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
I_{IB} Input bias current	$V_O = 1.4\text{ V}$	25°C	-15	-100	nA
		Full range		-200	
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 30\text{ V}$	25°C	0 to $V_{CC}-1.5$		V
		Full range	0 to $V_{CC}-2$		
V_{OH} High-level output voltage	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$	25°C	$V_{CC}-1.5$		V
		Full range	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	26	
			$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	27	
V_{OL} Low-level output voltage	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$	Full range	5	20	mV
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_O = 1\text{ V to }11\text{ V}$, $R_L = \geq 2\text{ k}\Omega$	25°C	25	100	V/mV
		Full range	15		
CMRR Common-mode rejection ratio		25°C	65	80	dB
k_{SVR} Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{DD}/\Delta V_{IO}$)		25°C	65	100	dB
V_{O1}/V_{O2} Crosstalk attenuation	$f = 1\text{ kHz to }20\text{ kHz}$	25°C	120		dB

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified.

‡ Full range is -55°C to 125°C for LM158A, -25°C to 85°C for LM258A, and 0°C to 70°C for LM358A.

§ All typical values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$.



LM158, LM158A, LM258, LM258A
LM358, LM358A, LM358Y, LM2904, LM2904Q
DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS
SLOS068C – JUNE 1976 – REVISED JULY 1998

electrical characteristics $V_{CC} = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITION†	LM358Y			UNIT	
		MIN	TYP	MAX		
V_{IO} Input offset voltage	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX, } V_{IC} = V_{ICR}(\text{min}), V_O = 1.4\text{ V}$		3	7	mV	
I_{IO} Input offset current			2	50	nA	
I_{IB} Input bias current			-20	-250	nA	
V_{ICR} Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$	0 to $V_{CC}-1.5$			V	
V_{OH+} High-level output voltage	$R_L \geq 10\text{ k}\Omega$	$V_{CC}-1.5$			V	
AVD Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V, } V_O = 1\text{ V to } 11\text{ V, } R_L = \geq 2\text{ k}\Omega$	15	100		V/mV	
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR}(\text{min})$	65	80		dB	
kSVR Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC} \pm \Delta V_{IO}$)		65	100		dB	
I_O Output current	$V_{CC} = 15\text{ V}$	$V_{ID} = 1\text{ V, } V_O = 0$	-20	-30	-60	mA
		$V_{ID} = -1\text{ V, } V_O = 15\text{ V}$	10	20		
		$V_{ID} = 1\text{ V, } V_O = 200\text{ mV}$	12	30		
I_{OS} Short-circuit output current	V_{CC} at 5 V, GND at -5 V, $V_O = 0$		± 40	± 60		mA
I_{CC} Supply current (four amplifiers)	$V_O = 2.5\text{ V, No load}$		0.7	1.2		mA
	$V_{CC} = \text{MAX, } V_O = 0.5\text{ V, No load}$		1	2		

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified. MAX V_{CC} for testing purposes is 30 V.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

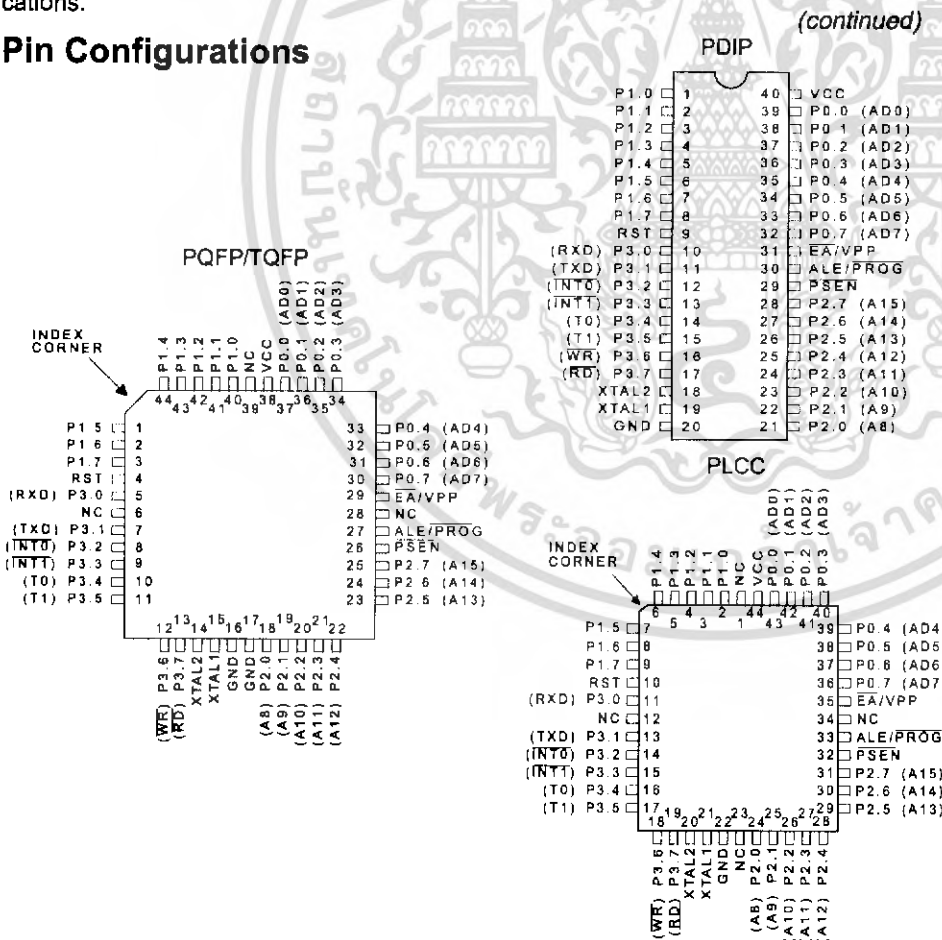
Features

- Compatible with MCS-51™ Products
- 4K Bytes of In-System Reprogrammable Flash Memory
 - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Three-Level Program Memory Lock
- 128 x 8-Bit Internal RAM
- 32 Programmable I/O Lines
- Two 16-Bit Timer/Counters
- Six Interrupt Sources
- Programmable Serial Channel
- Low Power Idle and Power Down Modes

Description

The AT89C51 is a low-power, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 4K bytes of Flash Programmable and Erasable Read Only Memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry standard MCS-51™ instruction set and pinout. The on-chip Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system or by a conventional nonvolatile memory programmer. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C51 is a powerful microcomputer which provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

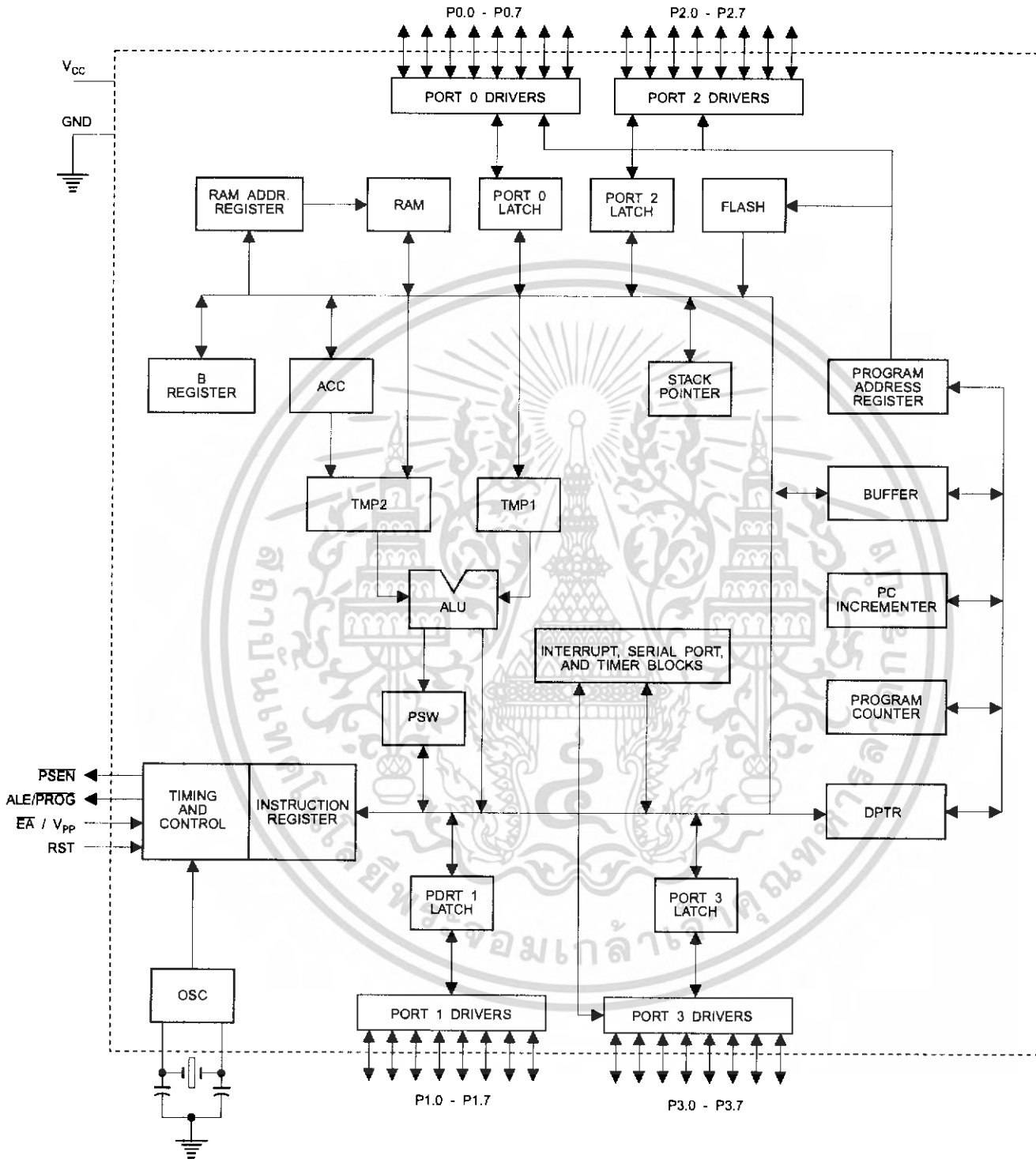
Pin Configurations



0265F-A-12/97



Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The AT89C51 provides the following standard features: 4K bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 32 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C51 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The Power Down Mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

Pin Description

V_{CC}
Supply voltage.

GND
Ground.

Port 0
Port 0 is an 8-bit open drain bidirectional I/O port. As an output port each pin can sink eight TTL inputs. When 1s are written to port 0 pins, the pins can be used as high-impedance inputs.

Port 0 may also be configured to be the multiplexed low-order address/data bus during accesses to external program and data memory. In this mode P0 has internal pullups.

Port 0 also receives the code bytes during Flash programming, and outputs the code bytes during program verification. External pullups are required during program verification.

Port 1
Port 1 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 1 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 1 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 1 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 1 also receives the low-order address bytes during Flash programming and verification.

Port 2
Port 2 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 2 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 2 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 2 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 2 emits the high-order address byte during fetches from external program memory and during accesses to external data memory that use 16-bit addresses (MOVX @ DPTR). In this application it uses strong internal pullups

when emitting 1s. During accesses to external data memory that use 8-bit addresses (MOVX @ RI), Port 2 emits the contents of the P2 Special Function Register.

Port 2 also receives the high-order address bits and some control signals during Flash programming and verification.

Port 3
Port 3 is an 8-bit bidirectional I/O port with internal pullups. The Port 3 output buffers can sink/source four TTL inputs. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C51 as listed below:

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	INT0 (external interrupt 0)
P3.3	INT1 (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)
P3.6	WR (external data memory write strobe)
P3.7	RD (external data memory read strobe)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

RST
Reset input. A high on this pin for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

ALE/PROG
Address Latch Enable output pulse for latching the low byte of the address during accesses to external memory. This pin is also the program pulse input (PROG) during Flash programming.

In normal operation ALE is emitted at a constant rate of 1/6 the oscillator frequency, and may be used for external timing or clocking purposes. Note, however, that one ALE pulse is skipped during each access to external Data Memory.

If desired, ALE operation can be disabled by setting bit 0 of SFR location 8EH. With the bit set, ALE is active only during a MOVX or MOVC instruction. Otherwise, the pin is weakly pulled high. Setting the ALE-disable bit has no effect if the microcontroller is in external execution mode.

PSEN
Program Store Enable is the read strobe to external program memory.



When the AT89C51 is executing code from external program memory, PSEN is activated twice each machine cycle, except that two PSEN activations are skipped during each access to external data memory.

\overline{EA}/V_{PP}

External Access Enable. \overline{EA} must be strapped to GND in order to enable the device to fetch code from external program memory locations starting at 0000H up to FFFFH. Note, however, that if lock bit 1 is programmed, \overline{EA} will be internally latched on reset.

\overline{EA} should be strapped to V_{CC} for internal program executions.

This pin also receives the 12-volt programming enable voltage (V_{PP}) during Flash programming, for parts that require 12-volt V_{PP} .

XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

Oscillator Characteristics

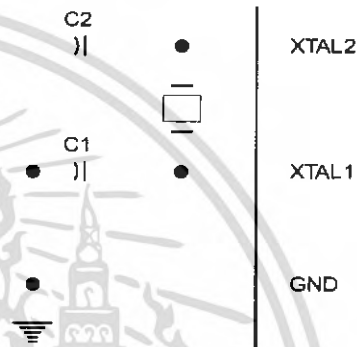
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Idle Mode

In Idle mode, the CPU puts itself to sleep while all the on-chip peripherals remain active. The mode is invoked by software. The content of the on-chip RAM and all the special functions registers remain unchanged during this mode. The idle mode can be terminated by any enabled interrupt or by a hardware reset.

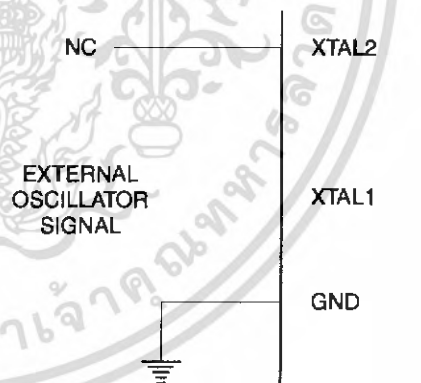
It should be noted that when idle is terminated by a hardware reset, the device normally resumes program execution, from where it left off, up to two machine cycles before the internal reset algorithm takes control. On-chip hardware inhibits access to internal RAM in this event, but access to the port pins is not inhibited. To eliminate the possibility of an unexpected write to a port pin when Idle is terminated by reset, the instruction following the one that invokes Idle should not be one that writes to a port pin or to external memory.

Figure 1. Oscillator Connections



Note: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration



Status of External Pins During Idle and Power Down Modes

Mode	Program Memory	ALE	PSEN	PORT0	PORT1	PORT2	PORT3
Idle	Internal	1	1	Data	Data	Data	Data
Idle	External	1	1	Float	Data	Address	Data
Power Down	Internal	0	0	Data	Data	Data	Data
Power Down	External	0	0	Float	Data	Data	Data

Power Down Mode

In the power down mode the oscillator is stopped, and the instruction that invokes power down is the last instruction executed. The on-chip RAM and Special Function Registers retain their values until the power down mode is terminated. The only exit from power down is a hardware reset. Reset redefines the SFRs but does not change the on-chip RAM. The reset should not be activated before V_{CC} is restored to its normal operating level and must be held active long enough to allow the oscillator to restart and stabilize.

Lock Bit Protection Modes

	Program Lock Bits			Protection Type
	LB1	LB2	LB3	
1	U	U	U	No program lock features.
2	P	U	U	MOV _C instructions executed from external program memory are disabled from fetching code bytes from internal memory, \overline{EA} is sampled and latched on reset, and further programming of the Flash is disabled.
3	P	P	U	Same as mode 2, also verify is disabled.
4	P	P	P	Same as mode 3, also external execution is disabled.

Programming the Flash

The AT89C51 is normally shipped with the on-chip Flash memory array in the erased state (that is, contents = FFH) and ready to be programmed. The programming interface accepts either a high-voltage (12-volt) or a low-voltage (V_{CC}) program enable signal. The low voltage programming mode provides a convenient way to program the AT89C51 inside the user's system, while the high-voltage programming mode is compatible with conventional third party Flash or EPROM programmers.

The AT89C51 is shipped with either the high-voltage or low-voltage programming mode enabled. The respective top-side marking and device signature codes are listed in the following table.

	$V_{PP} = 12V$	$V_{PP} = 5V$
Top-Side Mark	AT89C51 xxxx yyww	AT89C51 xxxx-5 yyww
Signature	(030H)=1EH (031H)=51H (032H)=FFH	(030H)=1EH (031H)=51H (032H)=05H

The AT89C51 code memory array is programmed byte-by-byte in either programming mode. *To program any non-blank byte in the on-chip Flash Memory, the entire memory must be erased using the Chip Erase Mode.*

Program Memory Lock Bits

On the chip are three lock bits which can be left unprogrammed (U) or can be programmed (P) to obtain the additional features listed in the table below:

When lock bit 1 is programmed, the logic level at the \overline{EA} pin is sampled and latched during reset. If the device is powered up without a reset, the latch initializes to a random value, and holds that value until reset is activated. It is necessary that the latched value of \overline{EA} be in agreement with the current logic level at that pin in order for the device to function properly.

Programming Algorithm: Before programming the AT89C51, the address, data and control signals should be set up according to the Flash programming mode table and Figures 3 and 4. To program the AT89C51, take the following steps.

1. Input the desired memory location on the address lines.
2. Input the appropriate data byte on the data lines.
3. Activate the correct combination of control signals.
4. Raise \overline{EA}/V_{PP} to 12V for the high-voltage programming mode.
5. Pulse ALE/ \overline{PROG} once to program a byte in the Flash array or the lock bits. The byte-write cycle is self-timed and typically takes no more than 1.5 ms. Repeat steps 1 through 5, changing the address and data for the entire array or until the end of the object file is reached.

Data Polling: The AT89C51 features Data Polling to indicate the end of a write cycle. During a write cycle, an attempted read of the last byte written will result in the complement of the written datum on PO.7. Once the write cycle has been completed, true data are valid on all outputs, and the next cycle may begin. Data Polling may begin any time after a write cycle has been initiated.

Ready/Busy: The progress of byte programming can also be monitored by the RDY/BSY output signal. P3.4 is pulled low after ALE goes high during programming to indicate BUSY. P3.4 is pulled high again when programming is done to indicate READY.





Program Verify: If lock bits LB1 and LB2 have not been programmed, the programmed code data can be read back via the address and data lines for verification. The lock bits cannot be verified directly. Verification of the lock bits is achieved by observing that their features are enabled.

Chip Erase: The entire Flash array is erased electrically by using the proper combination of control signals and by holding ALE/PROG low for 10 ms. The code array is written with all "1"s. The chip erase operation must be executed before the code memory can be re-programmed.

Reading the Signature Bytes: The signature bytes are read by the same procedure as a normal verification of locations 030H,

031H, and 032H, except that P3.6 and P3.7 must be pulled to a logic low. The values returned are as follows.

(030H) = 1EH indicates manufactured by Atmel

(031H) = 51H indicates 89C51

(032H) = FFH indicates 12V programming

(032H) = 05H indicates 5V programming

Programming Interface

Every code byte in the Flash array can be written and the entire array can be erased by using the appropriate combination of control signals. The write operation cycle is self-timed and once initiated, will automatically time itself to completion.

All major programming vendors offer worldwide support for the Atmel microcontroller series. Please contact your local programming vendor for the appropriate software revision.

Flash Programming Modes

Mode	RST	PSEN	ALE/PROG	EAV _{pp}	P2.6	P2.7	P3.6	P3.7
Write Code Data	H	L		H/12V	L	H	H	H
Read Code Data	H	L	H	H	L	L	H	H
Write Lock	H	L		H/12V	H	H	H	H
				H/12V	H	H	L	L
				H/12V	H	L	H	L
Chip Erase	H	L	(1)	H/12V	H	L	L	L
Read Signature Byte	H	L	H	H	L	L	L	L

Note: 1. Chip Erase requires a 10-ms PROG pulse.

Figure 3. Programming the Flash

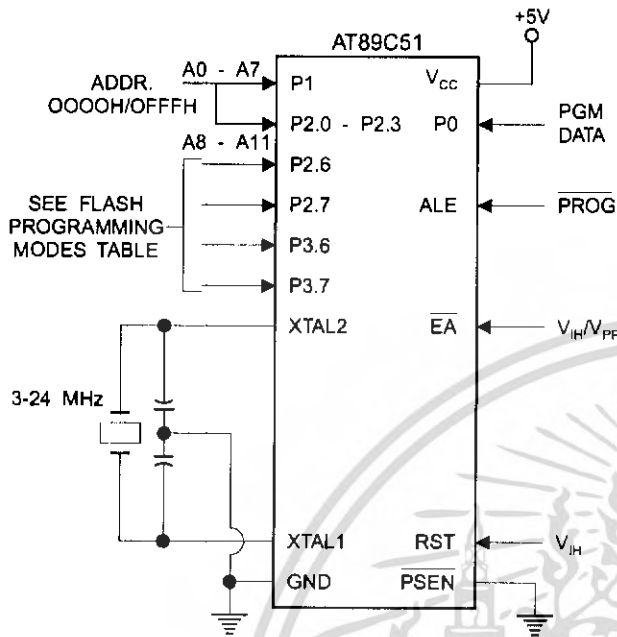
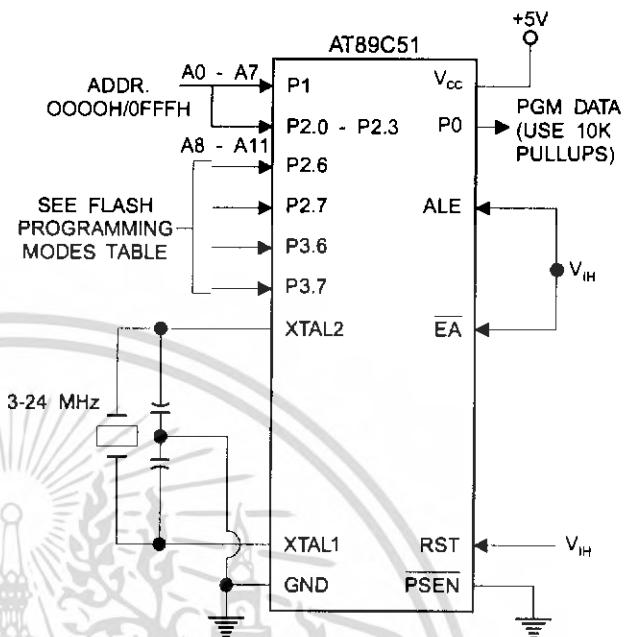


Figure 4. Verifying the Flash



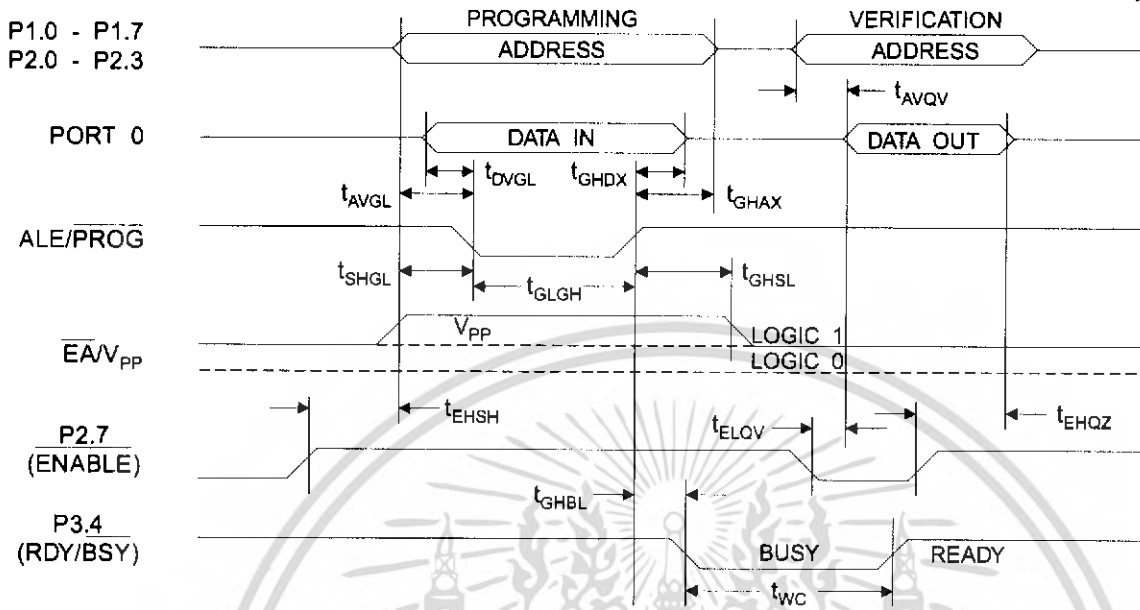
Flash Programming and Verification Characteristics

$T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C , $V_{CC} = 5.0 \pm 10\%$

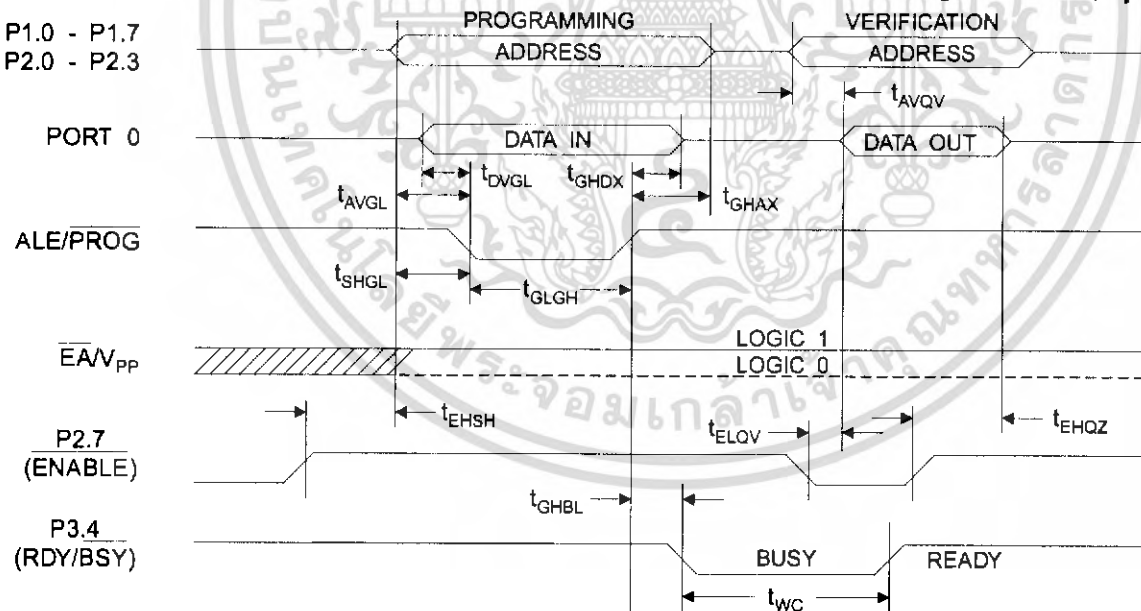
Symbol	Parameter	Min	Max	Units
$V_{PP}^{(1)}$	Programming Enable Voltage	11.5	12.5	V
$I_{PP}^{(1)}$	Programming Enable Current		1.0	mA
$1/t_{CLCL}$	Oscillator Frequency	3	24	MHz
t_{AVGL}	Address Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	$48t_{CLCL}$		
t_{GHAX}	Address Hold After $\overline{\text{PROG}}$	$48t_{CLCL}$		
t_{DVGL}	Data Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	$48t_{CLCL}$		
t_{GHDX}	Data Hold After $\overline{\text{PROG}}$	$48t_{CLCL}$		
t_{EHS}	P2.7 (ENABLE) High to V_{PP}	$48t_{CLCL}$		
t_{SHGL}	V_{PP} Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	10		μs
$t_{GHSL}^{(1)}$	V_{PP} Hold After $\overline{\text{PROG}}$	10		μs
t_{GLGH}	$\overline{\text{PROG}}$ Width	1	110	μs
t_{AVQV}	Address to Data Valid		$48t_{CLCL}$	
t_{ELQV}	ENABLE Low to Data Valid		$48t_{CLCL}$	
t_{EHQZ}	Data Float After ENABLE	0	$48t_{CLCL}$	
t_{GHBL}	$\overline{\text{PROG}}$ High to $\overline{\text{BUSY}}$ Low		1.0	μs
t_{WC}	Byte Write Cycle Time		2.0	ms

Note: 1. Only used in 12-volt programming mode.

Flash Programming and Verification Waveforms - High Voltage Mode ($V_{pp} = 12V$)



Flash Programming and Verification Waveforms - Low Voltage Mode ($V_{pp} = 5V$)



Absolute Maximum Ratings*

Operating Temperature.....	-55°C to +125°C
Storage Temperature.....	-65°C to +150°C
Voltage on Any Pin with Respect to Ground.....	-1.0V to +7.0V
Maximum Operating Voltage.....	6.6V
DC Output Current.....	15.0 mA

*NOTICE: Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

DC Characteristics

T_A = -40°C to 85°C, V_{CC} = 5.0V ± 20% (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Max	Units
V _{IL}	Input Low Voltage	(Except $\bar{E}A$)	-0.5	0.2 V _{CC} - 0.1	V
V _{IL1}	Input Low Voltage (EA)		-0.5	0.2 V _{CC} - 0.3	V
V _{IH}	Input High Voltage	(Except XTAL1, RST)	0.2 V _{CC} + 0.9	V _{CC} + 0.5	V
V _{IH1}	Input High Voltage	(XTAL1, RST)	0.7 V _{CC}	V _{CC} + 0.5	V
V _{OL}	Output Low Voltage ⁽¹⁾ (Ports 1,2,3)	I _{OL} = 1.6 mA		0.45	V
V _{OL1}	Output Low Voltage ⁽¹⁾ (Port 0, ALE, $\bar{P}SEN$)	I _{OL} = 3.2 mA		0.45	V
V _{OH}	Output High Voltage (Ports 1,2,3, ALE, $\bar{P}SEN$)	I _{OH} = -60 μA, V _{CC} = 5V ± 10%	2.4		V
		I _{OH} = -25 μA	0.75 V _{CC}		V
		I _{OH} = -10 μA	0.9 V _{CC}		V
V _{OH1}	Output High Voltage (Port 0 in External Bus Mode)	I _{OH} = -800 μA, V _{CC} = 5V ± 10%	2.4		V
		I _{OH} = -300 μA	0.75 V _{CC}		V
		I _{OH} = -80 μA	0.9 V _{CC}		V
I _{IL}	Logical 0 Input Current (Ports 1,2,3)	V _{IN} = 0.45V		-50	μA
I _{TL}	Logical 1 to 0 Transition Current (Ports 1,2,3)	V _{IN} = 2V, V _{CC} = 5V ± 10%		-650	μA
I _{LI}	Input Leakage Current (Port 0, $\bar{E}A$)	0.45 < V _{IN} < V _{CC}		±10	μA
RRST	Reset Pulldown Resistor		50	300	KΩ
C _{IO}	Pin Capacitance	Test Freq. = 1 MHz, T _A = 25°C		10	pF
I _{CC}	Power Supply Current	Active Mode, 12 MHz		20	mA
		Idle Mode, 12 MHz		5	mA
	Power Down Mode ⁽²⁾	V _{CC} = 6V		100	μA
		V _{CC} = 3V		40	μA

Notes: 1. Under steady state (non-transient) conditions, I_{OL} must be externally limited as follows:

Maximum I_{OL} per port pin: 10 mA

Maximum I_{OL} per 8-bit port: Port 0: 26 mA

Ports 1, 2, 3: 15 mA

Maximum total I_{OL} for all output pins: 71 mA

If I_{OL} exceeds the test condition, V_{OL} may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to sink current greater than the listed test conditions.

2. Minimum V_{CC} for Power Down is 2V.





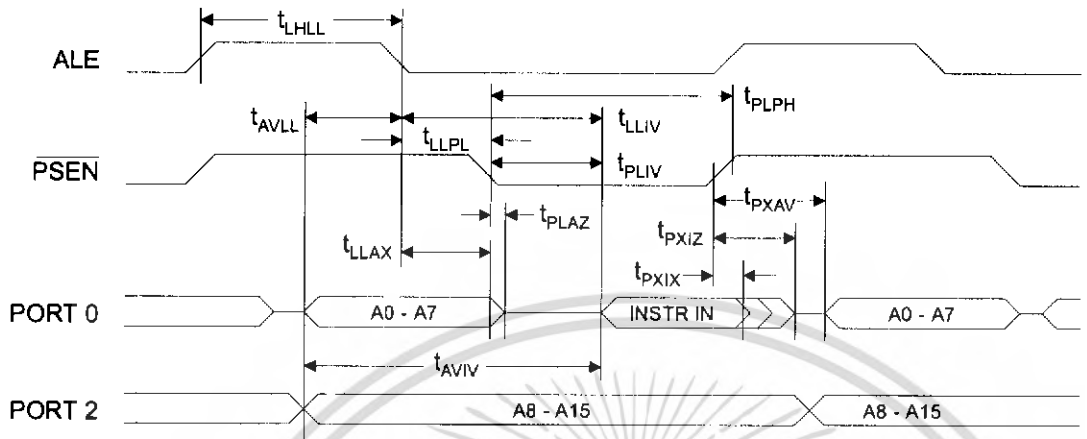
AC Characteristics

(Under Operating Conditions; Load Capacitance for Port 0, ALE/ $\overline{\text{PROG}}$, and $\overline{\text{PSEN}}$ = 100 pF; Load Capacitance for all other outputs = 80 pF)

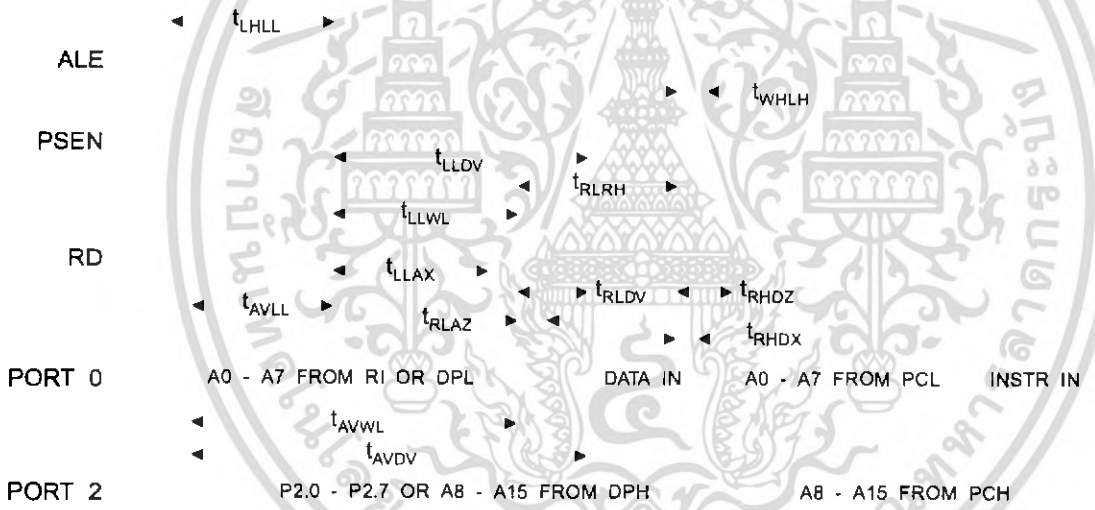
External Program and Data Memory Characteristics

Symbol	Parameter	12 MHz Oscillator		16 to 24 MHz Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
$1/t_{\text{CLCL}}$	Oscillator Frequency			0	24	MHz
t_{LHLL}	ALE Pulse Width	127		$2t_{\text{CLCL}}-40$		ns
t_{AVLL}	Address Valid to ALE Low	43		$t_{\text{CLCL}}-13$		ns
t_{LLAX}	Address Hold After ALE Low	48		$t_{\text{CLCL}}-20$		ns
t_{LLIV}	ALE Low to Valid Instruction In		233		$4t_{\text{CLCL}}-65$	ns
t_{LLPL}	ALE Low to $\overline{\text{PSEN}}$ Low	43		$t_{\text{CLCL}}-13$		ns
t_{PLPH}	$\overline{\text{PSEN}}$ Pulse Width	205		$3t_{\text{CLCL}}-20$		ns
t_{PLIV}	$\overline{\text{PSEN}}$ Low to Valid Instruction In		145		$3t_{\text{CLCL}}-45$	ns
t_{PXIX}	Input Instruction Hold After $\overline{\text{PSEN}}$	0		0		ns
t_{PXIZ}	Input Instruction Float After $\overline{\text{PSEN}}$		59		$t_{\text{CLCL}}-10$	ns
t_{PXAV}	$\overline{\text{PSEN}}$ to Address Valid	75		$t_{\text{CLCL}}-8$		ns
t_{AVIV}	Address to Valid Instruction In		312		$5t_{\text{CLCL}}-55$	ns
t_{PLAZ}	$\overline{\text{PSEN}}$ Low to Address Float		10		10	ns
t_{RLRH}	$\overline{\text{RD}}$ Pulse Width	400		$6t_{\text{CLCL}}-100$		ns
t_{WLWH}	$\overline{\text{WR}}$ Pulse Width	400		$6t_{\text{CLCL}}-100$		ns
t_{RLDV}	$\overline{\text{RD}}$ Low to Valid Data In		252		$5t_{\text{CLCL}}-90$	ns
t_{RHDX}	Data Hold After $\overline{\text{RD}}$	0		0		ns
t_{RHDZ}	Data Float After $\overline{\text{RD}}$		97		$2t_{\text{CLCL}}-28$	ns
t_{LLDV}	ALE Low to Valid Data In		517		$8t_{\text{CLCL}}-150$	ns
t_{AVDV}	Address to Valid Data In		585		$9t_{\text{CLCL}}-165$	ns
t_{LLWL}	ALE Low to $\overline{\text{RD}}$ or $\overline{\text{WR}}$ Low	200	300	$3t_{\text{CLCL}}-50$	$3t_{\text{CLCL}}+50$	ns
t_{AVWL}	Address to $\overline{\text{RD}}$ or $\overline{\text{WR}}$ Low	203		$4t_{\text{CLCL}}-75$		ns
t_{QVWX}	Data Valid to $\overline{\text{WR}}$ Transition	23		$t_{\text{CLCL}}-20$		ns
t_{QVWH}	Data Valid to $\overline{\text{WR}}$ High	433		$7t_{\text{CLCL}}-120$		ns
t_{WHQX}	Data Hold After $\overline{\text{WR}}$	33		$t_{\text{CLCL}}-20$		ns
t_{RLAZ}	$\overline{\text{RD}}$ Low to Address Float		0		0	ns
t_{WHLH}	$\overline{\text{RD}}$ or $\overline{\text{WR}}$ High to ALE High	43	123	$t_{\text{CLCL}}-20$	$t_{\text{CLCL}}+25$	ns

External Program Memory Read Cycle



External Data Memory Read Cycle



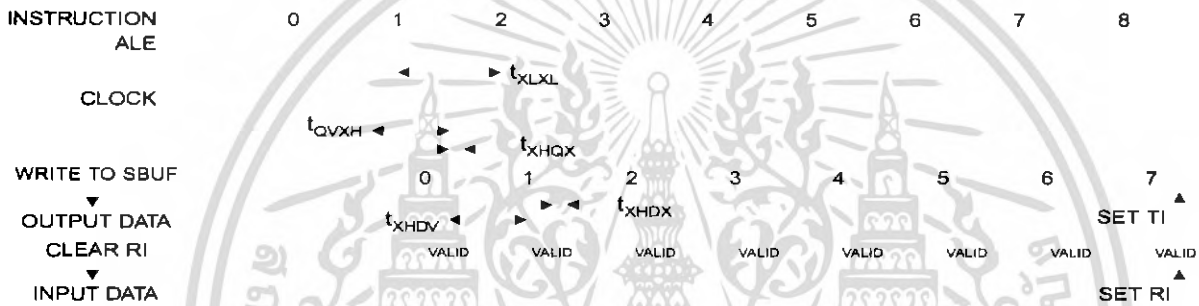
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Serial Port Timing: Shift Register Mode Test Conditions

($V_{CC} = 5.0\text{ V} \pm 20\%$; Load Capacitance = 80 pF)

Symbol	Parameter	12 MHz Osc		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
t_{XLXL}	Serial Port Clock Cycle Time	1.0		$12t_{CLCL}$		μs
t_{QVXH}	Output Data Setup to Clock Rising Edge	700		$10t_{CLCL}-133$		ns
t_{XHQX}	Output Data Hold After Clock Rising Edge	50		$2t_{CLCL}-117$		ns
t_{XHDX}	Input Data Hold After Clock Rising Edge	0		0		ns
t_{XHDV}	Clock Rising Edge to Input Data Valid		700		$10t_{CLCL}-133$	ns

Shift Register Mode Timing Waveforms



AC Testing Input/Output Waveforms⁽¹⁾ Float Waveforms⁽¹⁾



Note: 1. AC Inputs during testing are driven at $V_{CC} - 0.5V$ for a logic 1 and $0.45V$ for a logic 0. Timing measurements are made at V_{IH} min. for a logic 1 and V_{IL} max. for a logic 0.

Note: 1. For timing purposes, a port pin is no longer floating when a 100 mV change from load voltage occurs. A port pin begins to float when 100 mV change from the loaded V_{OH}/V_{OL} level occurs.