# การวัดการขยายตัวเชิงความร้อนด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม

# MEASUREMENT OF THERMAL EXPANSION BASE ON DOUBLE EXPOSE HOLOGRAPHIC METHOD

นางสาวนัทธมน เขียวอ่อน

นายมงคล แหยมทองคำ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

# การวัดการขยายตัวเชิงความร้อนด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม

# MEASUREMENT OF THERMAL EXPANSION BASE ON DOUBLE EXPOSE HOLOGRAPHIC METHOD

นางสาวนัทธมน เขียวอ่อน

นายมงคล แหยมทองคำ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

| | |
|---|---|
| **หัวข้อโครงงานพิเศษ** | การวัดการขยายตัวเชิงความร้อนด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม<br>Measurement Of Thermal Expansion Base On Double Expose Holographic Method |
| **ชื่อนักศึกษา** | นางสาวนัทธมน เขียวอ่อน<br>นายมงคล แหยมทองคำ |
| **ปริญญา** | วิทยาศาสตรบัณฑิต |
| **สาขาวิชา** | ฟิสิกส์ประยุกต์ |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | ดร.กีรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์ |

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

| คณะกรรมการ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| อ.สุรชาติ กมลดิลก | |
| ดร. ประธาน บูรณศิริ | |
| อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง | |
| ดร.กีรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์ | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**หัวข้อโครงงานพิเศษ** การวัดการขยายตัวเชิงความร้อนด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวนัทธมน เขียวอ่อน

นายมงคล แหยมทองคำ

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์

**ปีการศึกษา** พ.ศ. 2555

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.กีรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์

## บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ศึกษาการขยายตัวเชิงความร้อนของวัตถุที่ได้รับความร้อนจากหลอดไฟ โดยใช้วิธีการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรมเป็นการถ่ายภาพ 2 ครั้ง โดยหลังจากการถ่ายภาพวัตถุครั้งที่ 1 เปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุประมาณ 3-5 วินาที จากนั้นทำการถ่ายภาพวัตถุครั้งที่ 2 พิจารณาภาพถ่ายที่เกิดขึ้น ภาพที่ได้จะพบริ้วการแทรกสอดบนวัตถุ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาการขยายตัวเชิงความร้อนของวัตถุจากริ้วการแทรกสอด และหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไปกับพลังงานความร้อนได้

**คำสำคัญ :** ลำแสงวัตถุ , ลำแสงอ้างอิง , การแทรกสอดของแสง , ทางเดินแสง , ดัชนีหักเห , ความต่างเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Title** | Measurement of Thermal Expansion Base on Double Expose Holographic Method |
| **Students** | Miss.Nattamon Khiewon |
| | Mr.Mongkol Yaemthongkham |
| **Degree** | Bachelor of science |
| **Program** | Applied Physics |
| **Academic Year** | 2012 |
| **Advisor** | Dr.Keerayoot Srinuanjan |


## ABSTRACT

This special project studied the thermal expansion of the material that was heated by a light bulb. Using double expose holographic method. After the first shot, Turn on the heat lamp for 3-5 seconds then a second time. From the resulted picture the interference fringe occurred and the thermal expansion of the material of the interference fringe. Can be calculated the relationship between the change in refractive index and heat energy is obtained.


**Keywords :** Object beam , Reference beam , Interference , Optical path length , Refractive index , Phase difference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานพิเศษเรื่อง การวัดการขยายตัวเชิงความร้อนด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณบุคคล ต่างๆ ที่ได้เสียสละเวลาให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือตลอดมา อันได้แก่

1. ดร.กีรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่คอยแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหา ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ
2. อ.สุรชาติ กมลดิลก อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง และ ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบ และให้คำปรึกษาข้อมูลข่าวสาร รวมทั้งคอยตรวจสอบผลการทำงานและผลงาน
3. อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้มาตลอดระยะเวลา 4 ปี
4. บิดามารดา ตลอดจนญาติพี่น้องซึ่งคอยให้สนับสนุนดูแลอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจให้ทุกเรื่องเสมอมา
5. เพื่อนๆทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้อาจยังมีบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความกรุณา มีส่วนร่วมในการให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ตลอดจนกำลังใจในการทำโครงงานพิเศษฉบับนี้

นางสาวนัทธมน เขียวอ่อน

นายมงคล แหยมทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูป | VI |
| สารบัญตาราง | VII |
| **บทที่ 1 บทนำ** | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 1 |
| 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย | 1 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| **บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ** | |
| 2.1 หลักการเกิดภาพโฮโลแกรม | 3 |
| 2.2 การบันทึกภาพโฮโลแกรม | 5 |
| 2.3 การสร้างภาพโฮโลแกรม | 7 |
| 2.4 ตำแหน่งของการเกิดภาพ | 7 |
| 2.5 ภาพโฮโลแกรมแบบซ้อนทับกัน | 8 |
| 2.6 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน | 11 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)


หน้า

**บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย**

3.1 เตรียมห้องสำหรับทำการทดลอง 14

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 15

3.3 วิธีทำการทดลอง 20

3.4 การเตรียมน้ำยาล้างฟิล์มและขั้นตอนการล้างฟิล์ม 26

3.5 วิธีการดูผลการทดลอง 29

3.6 การทำความสะอาดและการบำรุงรักษา 30

**บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย**

4.1 ผลการทดลอง 31

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง 33

**บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ**

5.1 สรุปผลการทดลอง 39

5.2 ข้อเสนอแนะ 40

**เอกสารอ้างอิง** 41

**ภาคผนวก ก** 42

**ภาคผนวก ข** 45


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| **2.1** | แสดงตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ | 13 |
| **4.1** | แสดงตัวแปรและความหมาย | 34 |
| **4.2** | แสดงผลการทดลอง | 37 |
| **5.1** | แสดงผลการทดลอง | 39 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| **2.1** | แสดงหลักการเกิดภาพโฮโลแกรม | 4 |
| **2.2** | แอมพลิจูด และเฟสของการส่งผ่าน ของฟังก์ชันของความหนาแน่นของพลังงาน สำหรับ แอมพลิจูด และเฟสของโฮโลแกรม | 6 |
| **2.3** | แสดงตำแหน่งของจุดภาพ ที่มี reference wave เอียง | 8 |
| **2.4** | แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหและความยาวของเส้นทางแสง เนื่องจากความร้อนที่วัตถุเพิ่มขึ้น (E หมายถึง ตา และ H หมายถึง โฮโลแกรม) | 9 |
| **2.5** | แสดงความเข้มแสงของการรวมคลื่นแสงทั้ง 2 แบบซ้อนทับกัน เป็นฟังก์ชันของการเลื่อนเฟส ($\Delta\Phi$) | 10 |
| **2.6** | แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน | 11 |
| **2.7** | เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Dilatometer) | 12 |
| **4.1** | แสดงการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบไม่ซ้อน | 31 |
| **4.2** | แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อน แก่วัตถุเป็นเวลา 5 วินาที | 31 |
| **4.3** | แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อน แก่วัตถุเป็นเวลา 60 วินาที | 32 |
| **4.4** | แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อน แก่วัตถุเป็นเวลา 90 วินาที | 32 |
| **4.5** | ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อน แก่วัตถุเป็นเวลา 5 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่าง ริ้วแทรกสอด ($\Delta s_1$) | 35 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| **4.5** | ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 5 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_1$) | 35 |
| **4.6** | ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 60 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_2$) | 36 |
| **4.7** | ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 90 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_3$) | 37 |
| **4.8** | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อน (Q) กับ ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป (dn/dt) | 38 |
| **4.9** | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด $\Delta S$ กับ ระยะการขยายตัวของวัตถุ $\Delta L$ | 38 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

วัตถุทุกชนิดจะมีการขยายตัวเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และหดตัวเมื่อเย็นลง ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนขององค์ประกอบของวัตถุนั้นๆ ซึ่งเราจะวัดการขยายตัวของวัตถุที่ได้รับความร้อนด้วยวิธีการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบซ้อนทับ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการถ่ายภาพโฮโลแกรม

1.2.2 ทำการทดลองถ่ายภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม

1.2.3 เพื่อคำนวณการขยายตัวเชิงความร้อนของวัตถุ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

สำหรับขอบเขตงานวิจัยของโครงการนี้ เราสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

1.3.1 เตรียมสถานที่ในการทดลอง ทำห้องทดลองให้ไม่มีแสงสว่างมารบกวนในการทดลอง

1.3.2 ถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบ Double Exposure

## 1.4 วิธีดำเนินงาน

| ช่วงเวลา | ขั้นตอนการดำเนินงาน |
|---|---|
| พฤศจิกายน พ.ศ. 2554 – มกราคม พ.ศ. 2555 | • ศึกษาทฤษฎีของการถ่ายภาพโฮโลแกรม<br>• ศึกษาทฤษฎีของการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ช่วงเวลา | ขั้นตอนการดำเนินงาน |
|---|---|
| กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555 | • เตรียมห้องสำหรับการทดลอง |
| มีนาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2555 | • จัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ<br>• ถ่ายภาพโฮโลแกรม<br>• นำภาพที่ได้มาปรับแต่งเพื่อการวิเคราะห์ |
| กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2555 | • วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายที่ได้จากการทดลอง |

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เรียนรู้วิธีการถ่ายภาพโฮโลแกรม

1.5.2 สามารถตรวจวัดการขยายตัวของวัตถุที่ได้รับความร้อน จากริ้วแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎี

การเกิดภาพโฮโลแกรม แตกต่างจากการเกิดภาพทั่วไป คือ ภาพทั่วไป ภาพของวัตถุถูกบันทึกลงบนฟิล์ม ส่วนภาพโฮโลแกรม ภาพของแสงสะท้อนถูกบันทึกลงบนผิวของวัตถุเอง ในการสร้างภาพสามมิติของวัตถุ ฟิล์มจะบันทึกทั้ง amplitude และ phase ของแสง เพื่อให้สามารถบันทึกภาพได้ จึงต้องขยายขนาดของลำแสงเลเซอร์ก่อน ให้สามารถฉายไปตกกระทบครอบคลุมทั่วทั้งวัตถุและฟิล์มทั้งหมด และแบ่งแสงออกเป็น 2 ลำ คือ Object beam และ Reference beam โดยใช้ Beam splitter แล้ว ทำให้แสงทั้ง 2 ลำ เกิดการแทรกสอดกันบนแผ่นฟิล์ม

เราสามารถดูภาพ Transmission Hologram ได้ จากแสงเลเซอร์ชนิดเดียวกับที่ถ่ายทำโดยใช้เฉพาะ reference beam เหมือนกับในตอนถ่าย

## 2.1 หลักการเกิดภาพโฮโลแกรม

การถ่ายภาพ Hologram ต้องใช้แสง Coherent light ซึ่งประกอบด้วย Coherence light 2 ชนิด คือ

1. Temporal Coherence
2. Spatial Coherence

Temporal Coherence เป็นฟังก์ชันของ Spactral line width (ความกว้างของเส้นสเปกตรัมของแสง ,$\Delta\nu$) สามารถหาคุณสมบัติเฉพาะ (Characterised) ได้จาก Coherence length และ Coherence time

ความสำคัญในการถ่ายภาพโฮโลแกรม คือ ความต่างของเส้นทางแสง (Path difference) ของ Object beam และ Reference beam ไม่ควรต่างกันเกิน 1:10 ของ Coherence length รวมทั้งความยาวของ Coherence length ของแสงที่ใช้ เพื่อความชัดเจนของจุดโฟกัสของการ Reconstructed hologram

สำหรับ Spatial Coherence เมื่อแสงที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดที่จุดและมุมต่างกัน สามารถพิจารณาได้ว่า จะมีโอกาสเกิดการแทรกสอดได้ทุกๆตำแหน่ง ที่แสงมากระทบกันได้ จังหวะพอดี แสง Coherent ในอุดมคติซึ่งมีความยาวไม่สิ้นสุด ไม่สามารถเกิดได้

ความสัมพันธ์ของ Coherence length (L) หาได้จาก

$$L = c / \Delta\nu$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

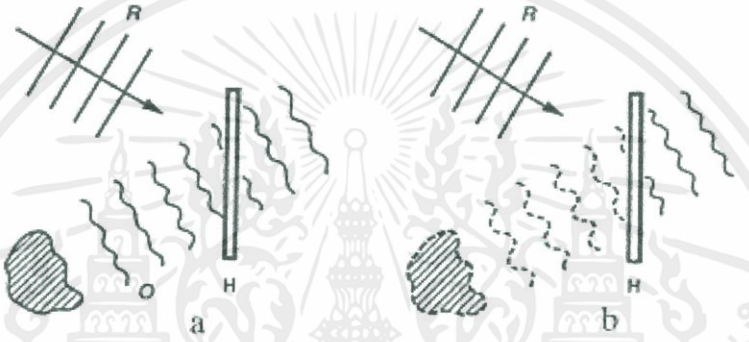
c คือ ความเร็วแสง

$\Delta\nu$ คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัม (Spectral line width)

$\Delta\nu$ คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัม (Spectral line width)

(สามารถใช้ Michelson interferometer หา coherence length ได้)

ในภาพทั่วไป เราบันทึกภาพที่เป็น 3 มิติ เราจะได้ภาพ 2 มิติ ลงบนฟิล์มเท่านั้น ในขณะที่การถ่ายภาพโฮโลแกรม เป็นการสร้างภาพ 3 มิติอย่างแท้จริง สามารถทำได้โดยบันทึกสนามคลื่นทั้ง 3 มิติของแสงที่กระเจิงออกมาจากวัตถุผ่านแสง (ดูรูปที่ 1) โดย Object beam กับ Reference beam ทำให้เกิดรูปแบบของการแทรกสอด ซึ่งบันทึกรายละเอียดของ Optical density (Amplitude hologram) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (Phase hologram) ณ ตำแหน่งต่างๆ บนฟิล์มโฮโลแกรม




รูปที่ 2.1 หลักการเกิดภาพโฮโลแกรม : การแทรกสอดของ object wave (O) กับ coherent reference wave (R) a.การบันทึกภาพ b.การสร้างภาพ

เมื่อนำฟิล์มที่ล้างแล้วมาส่องดูด้วยแสงเลเซอร์ในทิศทางเดิม แสงจากวัตถุดั่งเดิมจะสะท้อนให้เกิดภาพหลังฟิล์มโฮโลแกรม (จะสังเกตเห็นภาพวัตถุในตำแหน่งเดิม) ภาพที่เห็น ณ ตำแหน่งเดิมของวัตถุ เป็นภาพจริงบนอีกด้านหนึ่งของฟิล์มโฮโลแกรม

สำหรับการพิจารณาเชิงปริมาณของภาพโฮโลแกรม แหล่งกำเนิดจะอยู่ในรูปของ Complex function

$$E(x,y,z,t) = E_0(x,y,z)e^{i\varphi(x.y.z.t)} \qquad (1)$$

ส่วนจริงของ complex function คือ electrical field vector ของคลื่นแสง

$$I = \langle E \bullet E^{*} \rangle \qquad (2)$$

โดย * = Complex – Conjugated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ค่าที่แน่นอน คำนวณโดยการใช้คณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลที่แน่นอน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการศึกษาโฮโลแกรม โดยเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

1) ค่า Time – dependence ,$e^{i\omega t}$ เท่ากันทุกๆคลื่น (เมื่อ $\omega = 2\pi f$ , f = ความถี่ของแสง) ดังนั้น ในการคำนวณ หาความเข้มแสงส่วนนี้สามารถตัดออกได้ เพราะค่าเวลาเฉลี่ยเท่ากัน จาก T = 1/f

2) พิจารณา Hologram เป็นแบบ plane hologram (ความหนาของแผ่นฟิล์ม มีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นแสงมากๆ) ดังนั้นภาพโฮโลแกรม วางตัวในระนาบ z = 0

ซึ่งทั้ง 2 ข้อ ทำให้การพิจารณาคำนวณหาค่า Volume hologram มีความง่ายขึ้น เนื่องจากความหนาของแผ่นฟิล์ม มีค่าน้อยกว่า ความยาวคลื่นแสงมาก

## 2.2 การบันทึกภาพโฮโลแกรม (Recording a hologram)

คลื่นวัตถุ (Object wave) กับคลื่นอ้างอิง (Reference wave) รวมตัวกันบนแผ่น Hologram plane (z= 0) และมีผลต่อตำแหน่งของการเกิดรูปแบบการแทรกสอด มีความเข้มแสง (I) เป็น

$$O = O_0(x,y)\, e^{i\psi(x,y)} \tag{3}$$

$$R = R_0(x,y)\, e^{i\psi(x,y)} \tag{4}$$

การรวมตัวของสมการข้างบน

$$E = O + R$$

$$I = (1/T)\int_0^T E \cdot E^* \, dt$$

$$= (1/T)\int_0^T (O + R) \cdot (O + R)^* \, dt \tag{5}$$

เมื่อ T = เวลาในการ expose

เนื่องจากไม่มีส่วนของเวลามาเกี่ยวข้อง ดังกล่าวมาข้างต้น จะได้

$$I = (O + R)(O + R)^*$$

$$= O \cdot O^* + R \cdot R^* + O \cdot R^* + R \cdot O^*$$

$$= I_O + I_R + O_O \cdot R_O \cdot e^{i(\psi-\varphi)} + O_O \cdot R_O \cdot e^{-i(\psi-\varphi)} \tag{6}$$

ภาพโฮโลแกรมที่ล้างแล้ว มีตำแหน่งเชิงต้น ขึ้นอยู่กับ amplitude ของการส่งผ่าน

$$\tau(x,y) = E_a / E_e$$

$$= T(x,y)\, e^{i\varphi(x,y)} \tag{7}$$

เมื่อ $E_a$ คือ Amplitude ของแสงที่แปล่งออกมา

$E_e$ คือ Amplitude ของแสงตกกระทบ

$\tau$ คือ Complex transmission

T คือ ค่าสมบูรณ์ของการส่งผ่าน

$\varphi$ คือ เฟสของการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการส่งผ่านขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลังงาน (W) ,ความเข้มแสง (I) ,และเวลาในการฉายแสง $t_B$ (รูป 2)

เวลาในการฉาย และอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานของ object beam และ reference beam ต้องเลือกช่วงค่าการส่งผ่านที่อยู่ในขอบเขตเชิงเส้นของฟังก์ชัน (รูป 2) คือ ระหว่าง $W_1$ และ $W_2$ ในแอมพลิจูดการส่งผ่าน หรือ ระหว่าง $W_3$ และ $W_4$ ในเฟสการส่งผ่าน

รูปที่ 2.2 แอมพลิจูด และเฟสของการส่งผ่าน ของฟังก์ชันของความหนาแน่นของพลังงาน W สำหรับ แอมพลิจูด และเฟสของโฮโลแกรม

จากเหตุผลดังกล่าว เราตั้งสมมติฐานของการส่งผ่านของภาพโฮโลแกรม ดังนี้

1. เลือกความเข้มแสงของ reference wave ($I_R$) และเวลาในการฉายแสง ($t_B$) ให้เกิดการส่งผ่านภายในบริเวณที่เป็นเส้นตรงของกราฟคุณสมบัติเฉพาะ

2. $I_O << I_R$ เป็นจริง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของความเข้ม จะเหลืออยู่ในบริเวณที่เป็นเส้นตรงของกราฟ

ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นดังกล่าว เราสามารถพิจารณาได้ว่า ค่าของ amplitude transmission คือ $\tau$ ($\varphi$ = const.)

$$\tau(x,y) = a + b \cdot I(x,y) \qquad ; a,b = \text{const.} \qquad (8)$$

ภายใต้เงื่อนไข $\varphi << \pi/2$ สามารถกระจายสมการในรูป exponential ได้เป็นรูปเส้นตรง คือ

$$\tau = (1 + i\alpha) + i\beta\, I(x,y) \qquad ; \alpha,\beta = \text{const.} \qquad (9)$$

ค่าคงที่ a,b และ $\alpha,\beta$ เป็นฟังก์ชันของคุณลักษณะของฟิล์ม และน้ำยาล้างฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3 การสร้างภาพโฮโลแกรม (Reconstruction of a hologram)**

สำหรับการสร้างภาพโฮโลแกรม จะต้องฉายแสงเข้าไปในทิศทางเดิมของ reference beam ที่ใช้ในการบันทึกภาพ ด้วย degree of transmission T(x,y) :

$$E_a(x,y) = \tau(x,y) \cdot E_c$$
$$= T(x,y) \cdot R$$
$$= a \cdot R - b \cdot I \cdot R$$
$$= a \cdot R - b \cdot R\,(RR^* + OO^* + R^*O + RO^*)$$
$$= (a - bI_R) \cdot R - bI_oR - bI_RO - bR^2O^* \qquad (10)$$

ความหมายของแต่ละเทอม คือ

1. เทอมที่ 1 และเทอมที่ 2 แทน ลำดับของการแทรกสอดลำดับที่ศูนย์ของ reference wave โดย $a-bI_R$ คือ constant factor และ $bI_o$ คือ modulation (ทำให้เกิดจุดบนรูปแบบของการแทรกสอด) ซึ่งเป็นผลให้ ลำดับของการแทรกสอดมีขนาดมากขึ้นด้วย

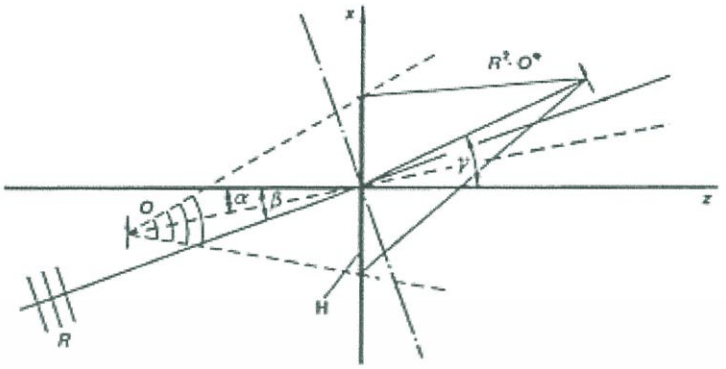
2. เทอมที่ 3 บอกถึง Original object beam เป็นผลให้ผู้สังเกตเห็นภาพวัตถุในตำแหน่งเดิม เทอมนี้เกิดขึ้นระหว่างที่มีการฉายแสง (expose)

3. เทอมที่ 4 ใช้ในการสร้างภาพจริง ซึ่งก็คือ Conjugated image เมื่อ $O^*$ มีเฟสเป็นลบ ($-\psi$) เมื่อเทียบกับ object wave (O) ซึ่งภาพนี้เป็นภาพ Pseudoscopic (ไม่แท้) คือ ปกติเราสามารถมองเห็นวัตถุจากทางเดินแสงจากด้านหลังมาด้านหน้า แต่ Pseudoscopic image จะปรากฏในทิศทางตรงกันข้าม กับวัตถุ

**2.4 ตำแหน่งของการเกิดภาพ (The position of the images)**

ตำแหน่งของภาพจริงที่ศึกษามีรายละเอียดมากกว่าที่ยกตัวอย่าง ให้ reference wave เป็น plane wave ซึ่งตกกระทบลงบนฟิล์ม ที่มุม $\beta$ จะเกิดภาพ ณ บริเวณเป็นมุม $\alpha$ ระหว่างที่ถ่ายภาพนั้น ถ้ามุม $\alpha$ และ $\beta$ มีค่าน้อยๆ ($\alpha, \beta << 90°$) จะทำให้ภาพที่เห็นเสมือนกับภาพจริงที่สะท้อนจากกระจกเงา (มี symmetric) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระนาบการสะท้อนจะต้องฉากกับมุมของการตกกระทบของ reference wave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.3 แสดง ตำแหน่งของจุดภาพ ที่มี reference wave เอียง

พิจารณาความสัมพันธ์ของ reference wave ในระนาบของ Hologram (z = 0)

$$R = R_0 \cdot e^{ikx \sin\beta} \tag{11}$$

Object wave ในระนาบของ Hologram

$$O = O_0 \cdot e^{ikx \sin\beta} = 0 \tag{12}$$

เมื่อ $O_0$ = Object wave ที่มุม $\alpha = 0$

ในการ Reconstruction ได้ผลของ conjugated image เป็น

$$R^2 \cdot O^* = R_0^{\,2} \cdot O_0^* \cdot e^{ikx\,(2\sin\beta - \sin\alpha)} \tag{13}$$

ดังนั้นที่มุม $\gamma$ จะได้

$$\sin\gamma = 2\sin\beta - \sin\alpha \tag{14}$$

จะไม่เกิดภาพเมื่อเงื่อนไขข้างต้นสำหรับมุม $\alpha$ และ $\beta$ ไม่ได้รับการตอบสนอง

$$2\sin\beta - \sin\alpha > 1 \tag{15}$$

สำหรับมุม $\alpha = 0°$ ในกรณีที่มุมของ reference beam $\beta > 30°$

**2.5 ภาพโฮโลแกรมแบบซ้อนทับกัน (double-exposure hologram)**

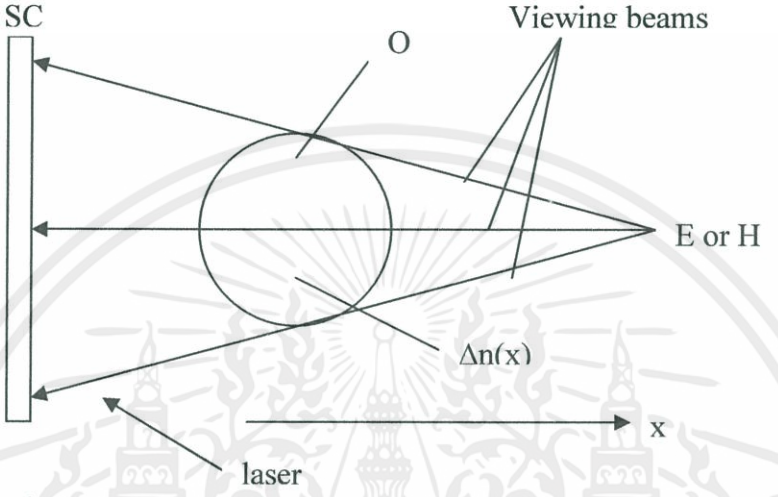
การถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบซ้อนทับกัน เป็นวิธีการอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในวัตถุ หรืออธิบายความคงสภาพเดิม ต่อการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหอีกด้วย

สังเกตการเปลี่ยนแปลงในวัตถุโดยการบันทึกภาพโฮโลแกรมของวัตถุ ขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงและขณะที่เปลี่ยนแปลงแล้ว ลงบนแผ่นฟิล์มโฮโลแกรมแผ่นเดียวกัน แล้วสังเกตภาพโฮโลแกรมที่ได้จากการรวมคลื่นแบบซ้อนทับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของวัตถุที่ขยายออกจะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดบนแผ่นฟิล์มโฮโลแกรมโดยระยะห่างของแต่ละริ้ว และจำนานริ้วที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับส่วนที่ไม่มีการขยายตัวของพื้นผิวก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบฉายครั้งเดียว

เมื่อให้ความร้อนแก่หลอดไฟระหว่างที่ถ่ายโฮโลแกรม ดัชนีหักเหและทางเดินแสง ของแสงจากหลอดไฟและบริเวณรอบๆ จะเปลี่ยนไป (รูปที่ 2.4)




รูปที่ 2.4 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหและความยาวของเส้นทางแสง เนื่องจากความร้อนที่วัตถุเพิ่มขึ้น (E หมายถึง ตา และ H หมายถึง โฮโลแกรม)

ความต่างเฟส (ความแตกต่างของทางเดินแสง) ระหว่างคลื่นแสงทั้ง 2 ทำให้เกิดภาพโฮโลแกรม คือ

$$\Delta\Phi = 2\pi/\lambda \int \Delta n(x)\, dx \qquad (16)$$

เมื่ออินทริเกตตลอดทางเดินแสง โดย $\Delta n(x)$ คือการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห ณ ตำแหน่ง x ระหว่างการฉายแสงทั้ง 2 ครั้ง จะได้คลื่นแสง 2 ลำ ดังนี้

$$E_1 = Ae^{i\Phi} \qquad (17)$$

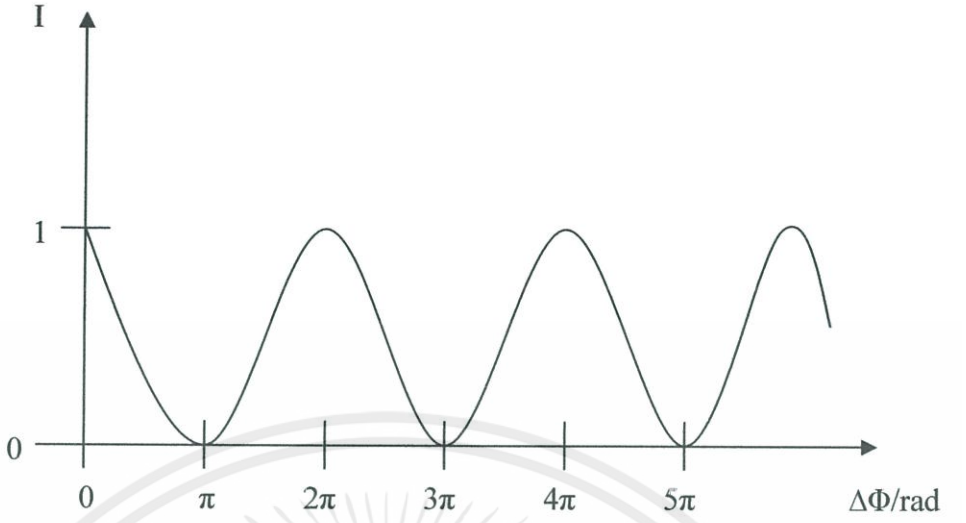
และ

$$E_2 = Ae^{i(\Phi+\Delta\Phi)} \qquad (18)$$

เมื่อพิจารณาความเข้มแสงในทิศทางของผู้สังเกต จะได้

$$\begin{aligned} I &= (E_1+E_2)\,(E_1+E_2)^* \\ &= 2|A|^2\,(1+\cos\Delta\Phi) \\ &= 4|A|^2\cos^2(\Delta\Phi/2) \end{aligned} \qquad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.5 แสดงความเข้มแสงของการรวมคลื่นแสงทั้ง 2 แบบซ้อนทับกัน เป็นฟังก์ชันของการเลื่อนเฟส $(\Delta\Phi)$

เมื่อเราสังเกตภาพโฮโลแกรม เราจะเห็นริ้วการแทรกสอดทั้งหมดบนหลอดไฟและบริเวณเหนือหลอดไฟขึ้นไป เนื่องจากบริเวณหลอดไฟมีอุณหภูมิสูงขึ้น และดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนไป ถ้าป้องกันความร้อนจากหลอดไฟที่ส่งมายังวัตถุ ด้านหลังไม่ดี ก็จะทำให้ริ้วเกิดการแทรกสอดบนวัตถุด้วย เนื่องจากโลหะมีการขยายตัวนั่นเอง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญมากที่เราจะต้องป้องกันการรบกวน เนื่องจากความร้อนไม่ให้เกิดกับแผ่นฟิล์มโฮโลแกรม และแผ่นแก้วที่ประกอบฟิล์มไว้

จากสมการที่ 20 ไม่เพียงแต่อธิบายได้เฉพาะความเข้มของการสั่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหของแสงเท่านั้น แต่ยังอธิบายได้อีกว่าการเคลื่อนที่ของพื้นผิวของวัตถุ จะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดขึ้น

ความแตกต่างของความเข้มแสง และความต่างเฟส เป็นฟังก์ชันของทิศทางของการฉายแสงและทิศทางของผู้สังเกตจากระยะทางและมุม จะได้สมการดังนี้

$$\Delta\Phi = 2\pi/\lambda\ (a+b)$$

$$= 2\pi/\lambda \cdot d(\cos\alpha + \cos\beta) \qquad (20)$$

จากสมการข้างต้นเป็นเสมือนความต่างเฟสระหว่างการฉายแสงครั้งที่ 1 กับการฉายแสงครั้งที่ 2 จากนั้นเมื่อแก้สมการจะได้ผลของสมการ 21 เป็น

$$I = 4I_1 \cos^2 (\pi d/\lambda\ (\cos\alpha + \cos\beta)) \qquad (21)$$

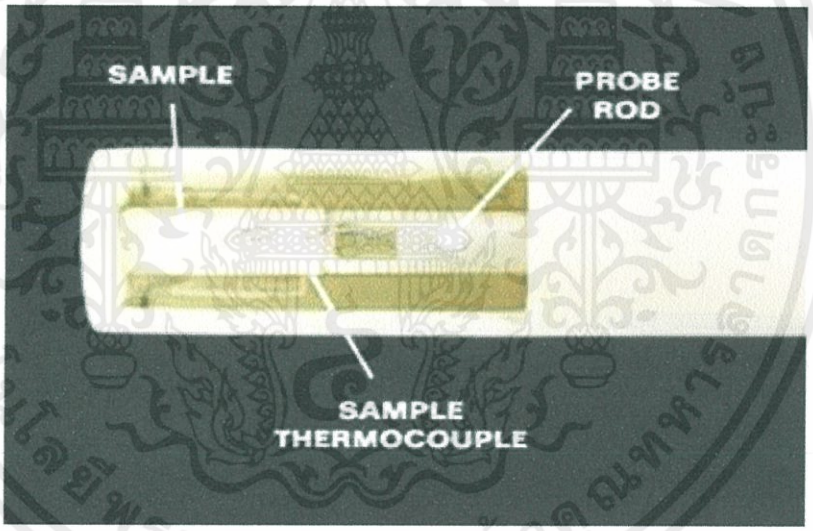
เมื่อ $I_1$ = ความเข้มแสงของการฉายแสงครั้งที่ 1

ถ้าวัตถุทั้งก้อนเคลื่อนที่ สามารถหาค่า d ได้โดยตรงจากระยะห่างของริ้วการแทรกสอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน**

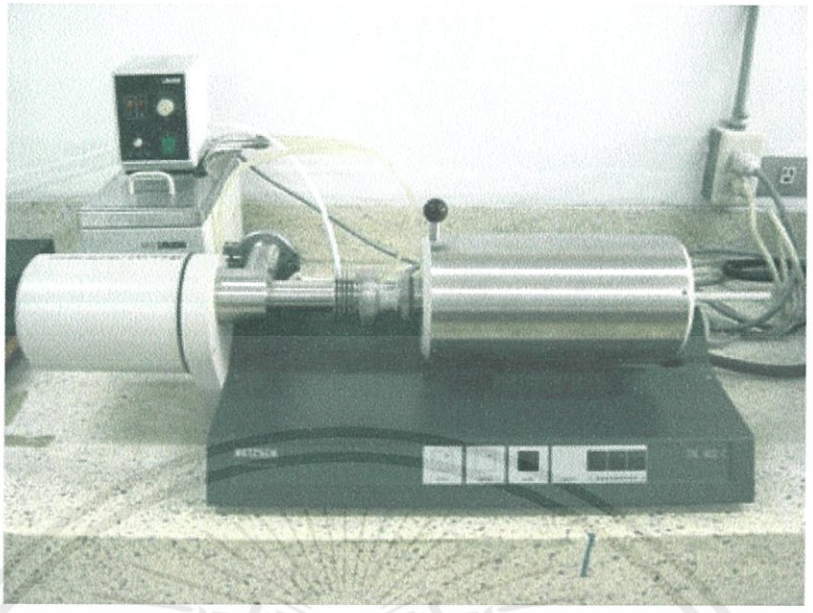
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient- COE) คือ ค่าของความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 °C เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเริ่มต้น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้น เป็นคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้นๆซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โครงสร้างผลึก อุณหภูมิของจุดหลอมตัว (melting point) ความหนาแน่นของชิ้นงาน อุณหภูมิในการเผา การวัดค่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นสามารถหาได้หลายวิธี เช่น ใช้การคำนวณจาก % ออกไซด์ที่มีอยู่ในสูตร การใช้วงแหวนสำหรับการทดสอบ (Fit ring ) สำหรับการตรวจวัดค่าที่ ถูกต้องแม่นยำที่สุดจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าเครื่อง Dilatometer โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ มาตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนดแล้วใส่เข้าไปในช่องสำหรับใส่ชิ้นตัวอย่างแล้วเปิดเครื่องเพื่อให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้กำหนดไว้ ในขณะที่ชิ้นงานจะมีการขยายตัว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเครื่องก็จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนให้ตามช่วงของ อุณหภูมิที่ต้องการตรวจสอบค่า โดยสามารถวัดได้ทั้งชิ้นงานดิบและชิ้นงานที่ผ่านการเผามาแล้ว




รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

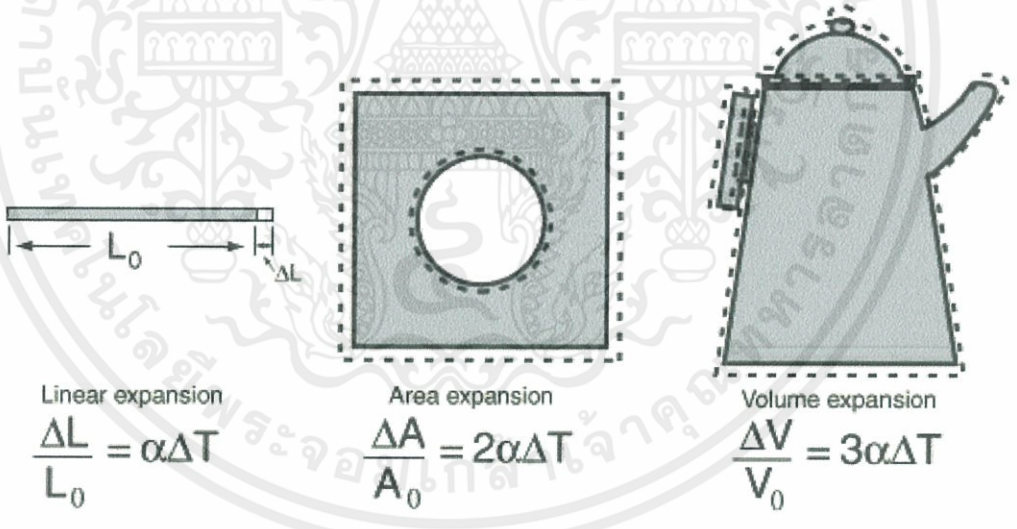
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการ Run เครื่อง Dilatometer เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนนั้นโดยปกติจะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1000 °C และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนจะอยู่ในช่วง 20-500 °C เพราะ เป็นช่วงที่ไม่เกินอุณหภูมิของ Quartz inversion ซึ่งอาจจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนของชิ้นงานแตกต่างกันไปได้

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆ... ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Dilatometer)

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยทั่วไปจะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้




$\propto$ คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

$\Delta T$ = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

Lo = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง

L = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

| สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อนเชิงเส้น $\alpha$ | | | |
|---|---|---|---|
| วัสดุ | $\alpha$ ($\times 10^{-6}$/C) | วัสดุ | $\alpha$ ($\times 10^{-6}$/C) |
| ปรอท | 60 | ทอง | 14 |
| BCB | 42 | เหล็ก | 12 |
| ตะกั่ว | 29 | แพลทินัม | 9 |
| อะลูมิเนียม | 23 | แก้ว | 8.5 |
| ทองเหลือง | 19 | ทังสเตน | 4.5 |
| สแตนเลส | 17.3 | ซิลิกอน | 3 |
| ทองแดง | 17 | เพชร | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

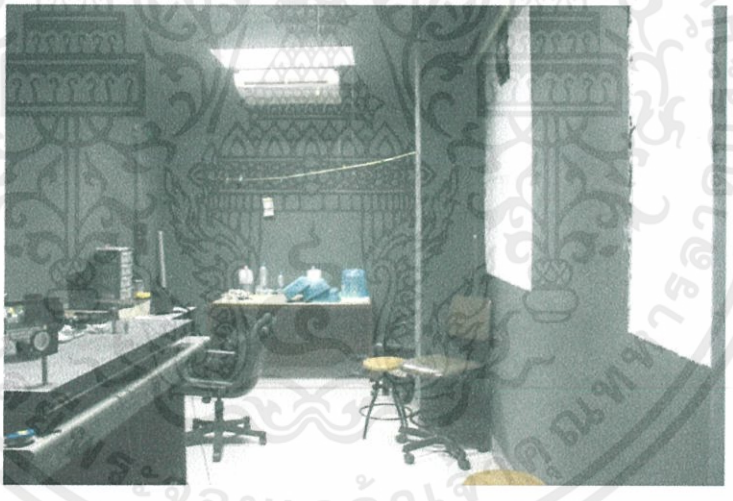
# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาหลักการถ่ายภาพโฮโลแกรม ซึ่งทำการทดลองถ่ายภาพโฮโลแกรมด้วยวิธีถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม และเพื่อศึกษาการวัดค่าการขยายตัวเชิงความร้อนของวัตถุ จากริ้วแทรกสอด

## 3.1 เตรียมห้องสำหรับทำการทดลอง

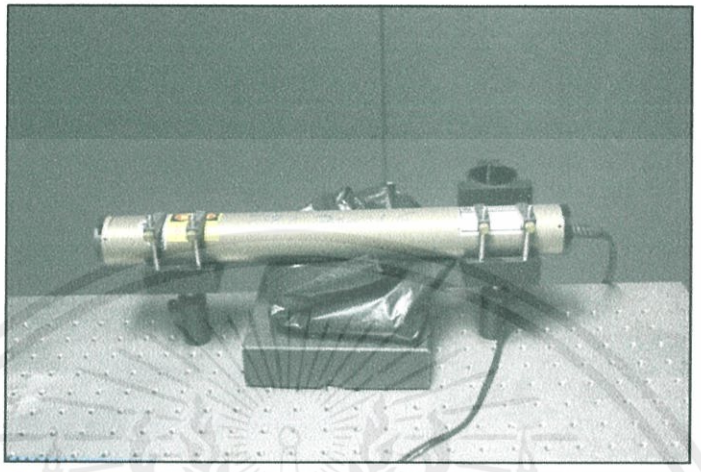
ห้องที่ใช้ในการทดลอง จะต้องไม่มีแสงจากภายนอกมารบกวน เนื่องจากฟิล์มโฮโลแกรมมีความไวต่อแสงสูงมาก เมื่อถูกแสงขาวจากภายนอก จะทำให้ฟิล์มเสียไม่สามารถถ่ายภาพโฮโลแกรมได้ มีเพียงแสงจากหลอดเซฟไลท์ที่เป็นแสงสีเขียว ไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มโฮโลแกรม จึงเปิดไว้เพื่อทำหน้าที่ให้แสงสว่างภายในห้องทดลอง



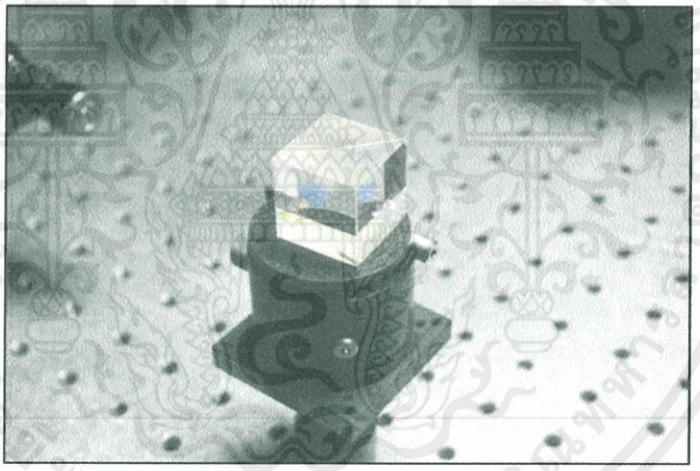
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ มีการนำไปใช้

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

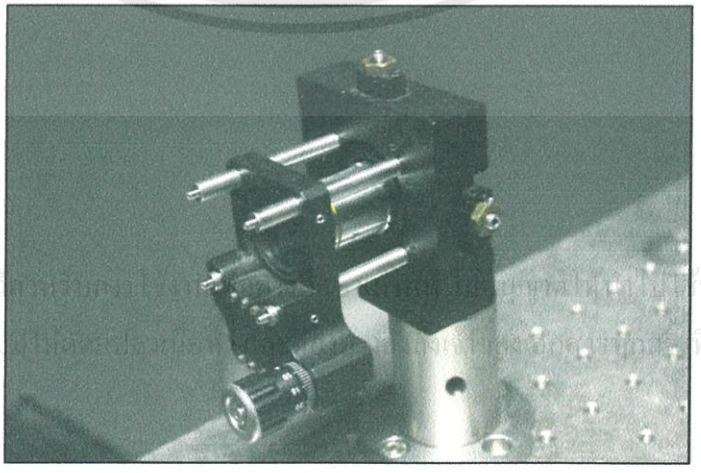
1. He-Ne Laser 5 mW



2. Beam Splitter ( 50 : 50)

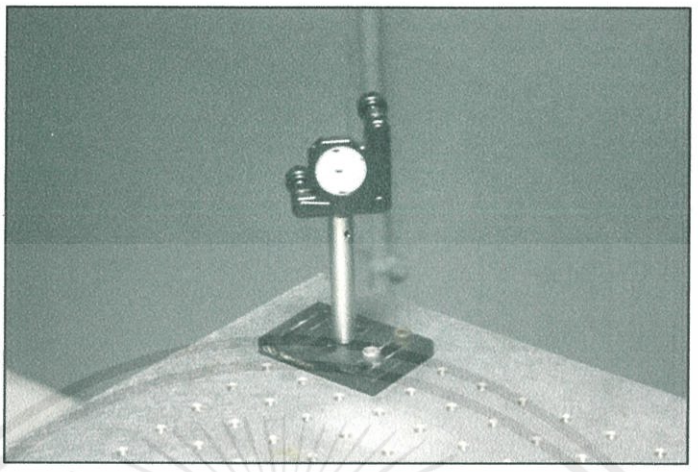


3. Beam Expansion

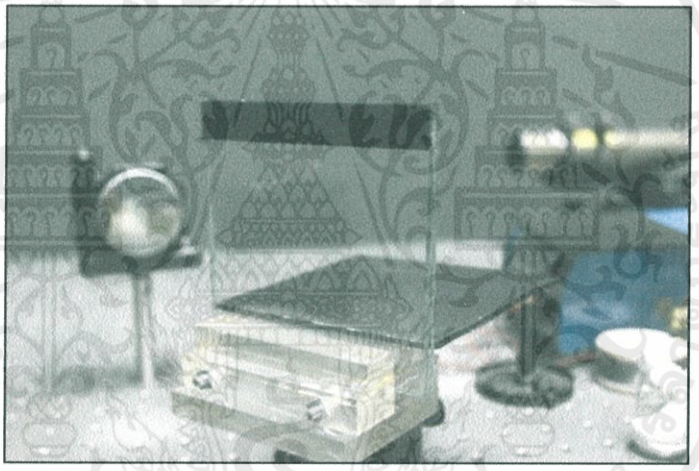


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กระจกสะท้อน 100% 3 บาน



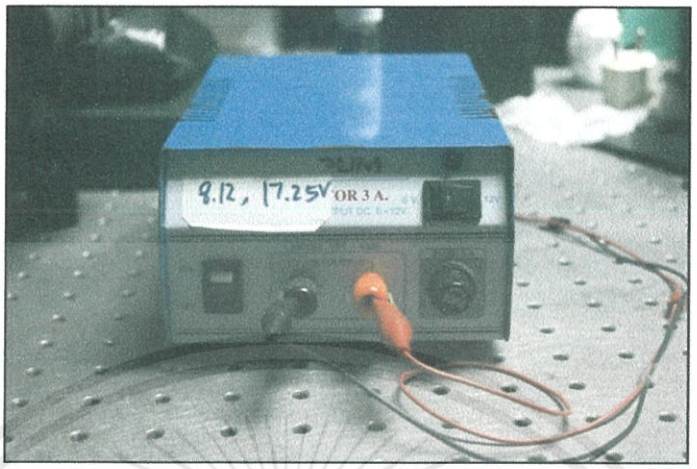
5. กระจกจับฟิล์ม



6. วัตถุที่เป็นอะลูมิเนียม

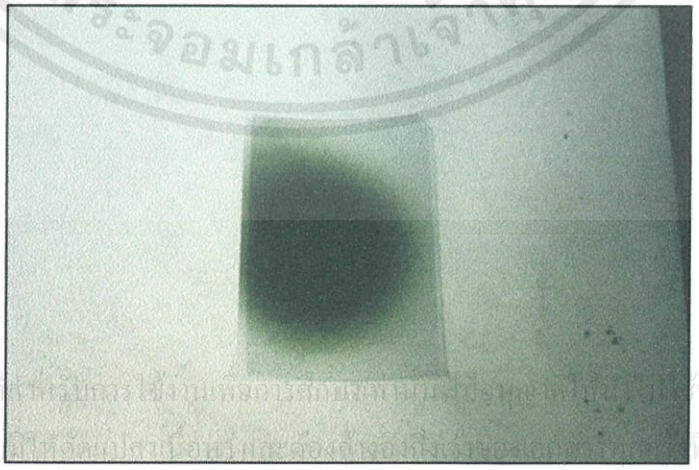
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Power Supply 12 V



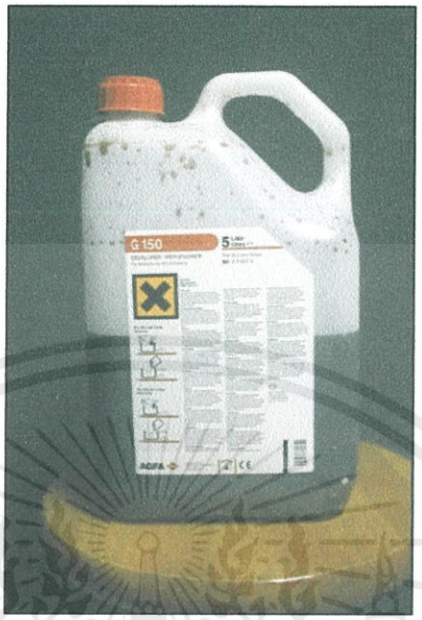

8. หลอดไฟ 12 V

9. ฟิล์มโฮโลแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. น้ำยา Developer

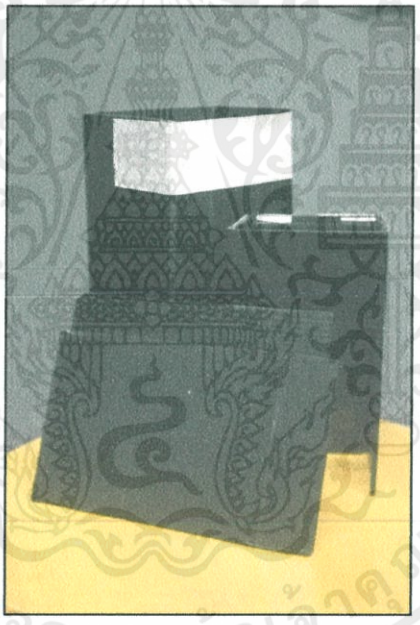



11. น้ำยา Fixing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

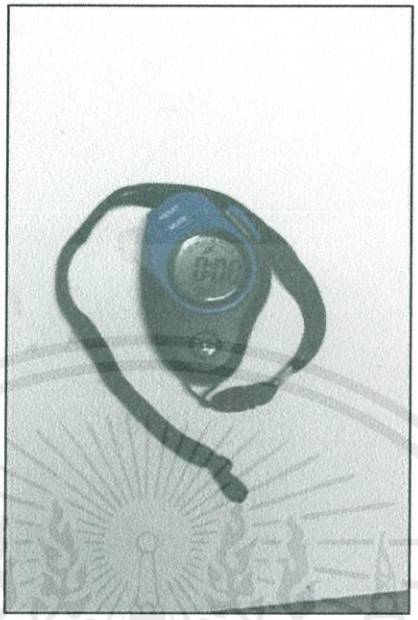
12. อ่างสำหรับใช้ในการล้างฟิล์ม 4 ใบ

13. ฟิวเจอร์บอร์ด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. นาฬิกาจับเวลา



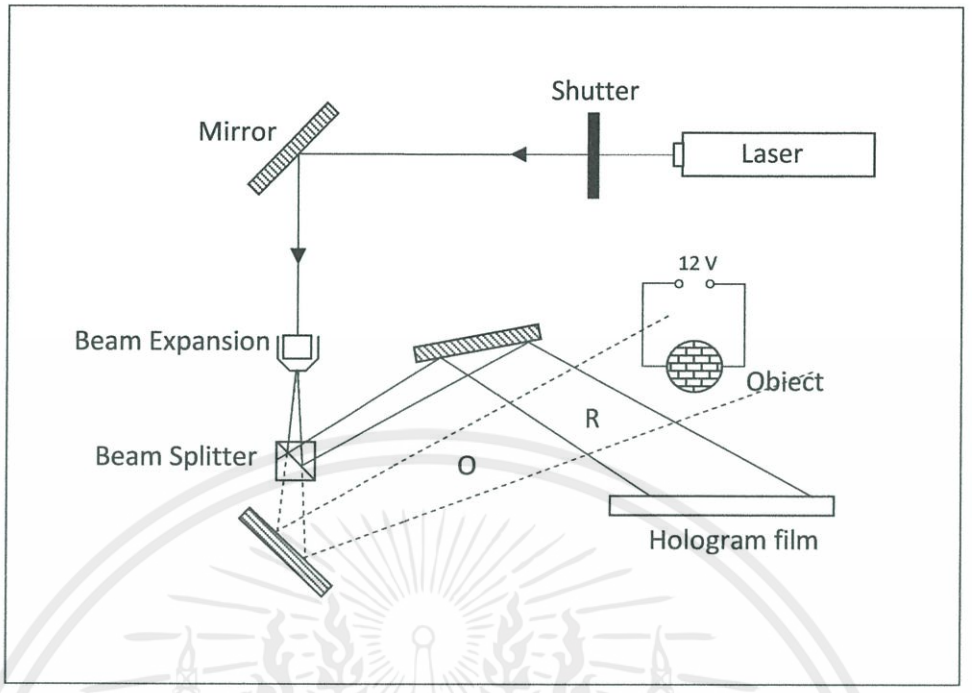
15. กระดาษเช็ดเลนส์

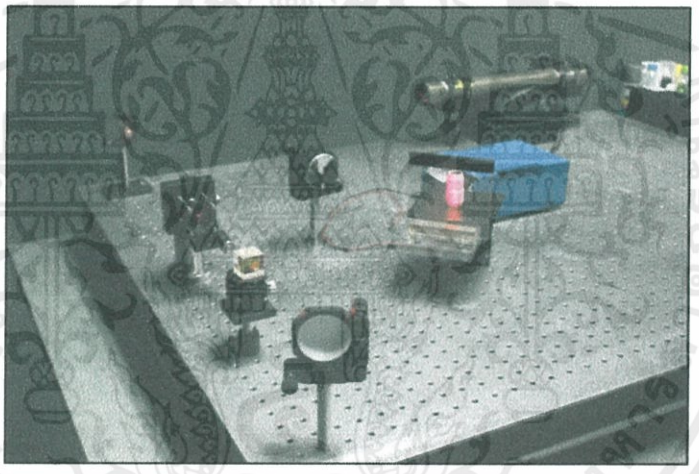
### 3.3 วิธีทำการทดลอง

**ในการทำการทดลองนี้ จะทำในห้องมืด ไม่มีแสงรบกวนจากภายนอกมีเพียงแสงสว่างจากหลอดเซฟไลท์เท่านั้น**

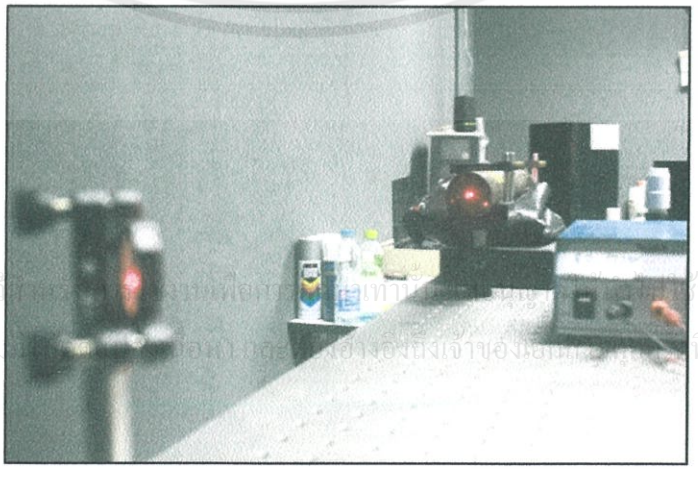
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

1. จัดอุปกรณ์ดังรูป ต้องระวังไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือน ที่ฐานวางอุปกรณ์ เพื่อรักษาความเสถียรของวัตถุไว้



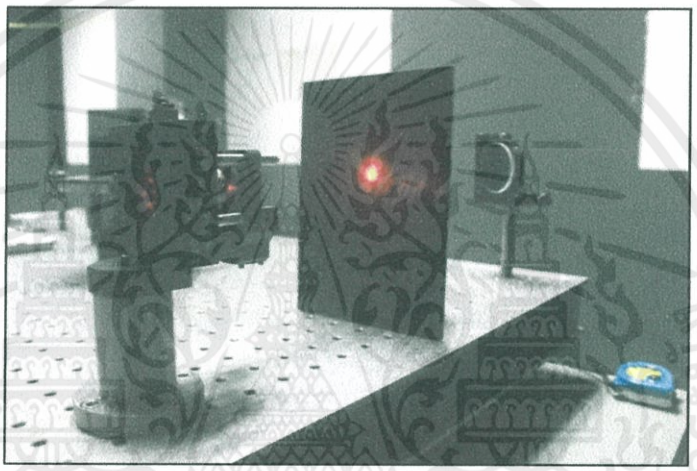



2. เปิดเลเซอร์ทิ้งไว้ก่อนทำการทดลองประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่เสถียรของความยาวคลื่น

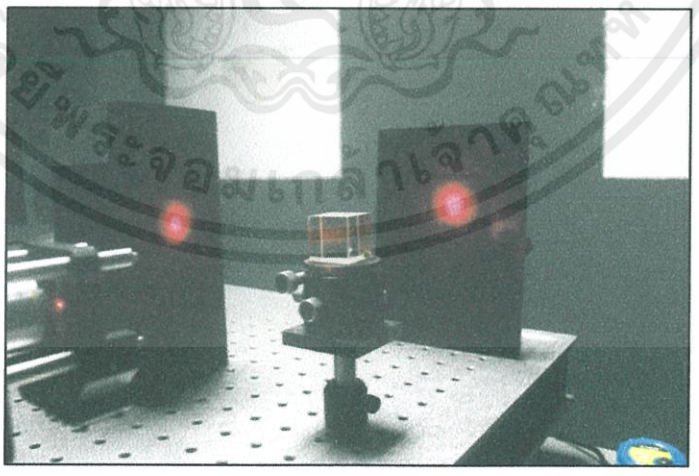


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นใส่ระบบขยายลำแสง E25 x โดยไม่ต้องใส่เลนส์และแผ่นรูเข็ม (Pinhole Diaphragm) แต่ใส่แผ่นพลาสติกเจาะรูตรงกลาง (Adjusting Diaphragm) เข้าไปแทนแล้วจัดให้อยู่ในแนวเดียวกับลำแสง สามารถส่องผ่านรูทั้งสองของแผ่นพลาสติกออกมาได้ แล้วเปลี่ยนเอาแผ่นพลาสติกเจาะรูออก เอาเลนส์วัตถุและแผ่นรูเข็มเข้าไปใส่แทน จากนั้นค่อยหมุนสกรูด้านหลังระบบขยายลำแสง เพื่อให้รูเข็มเลื่อนเข้ามาอยู่ที่จุดโฟกัสของเลนส์ โดยให้แสงเลเซอร์ตกกระทบแล้วเลี้ยวเบนผ่านรูเข็มมากที่สุดแล้วค่อยๆ หมุนแผ่นรูเข็มเข้าใกล้เลนส์มากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ลำแสงมีขนาดใหญ่ตามต้องการ

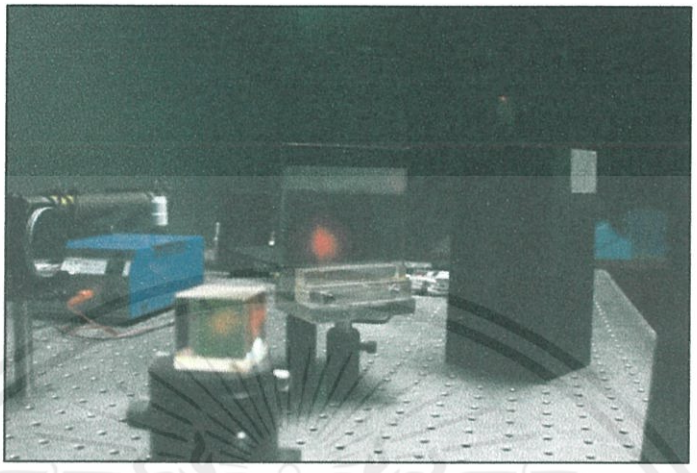


4. จัดลำแสงให้เกิดลำแสง 2 ลำ คือ ลำแสงอ้างอิง และ ลำแสงวัตถุ ซึ่งมีทางเดินแสงต่างกันโดยใช้กระจกแบ่งแสง (Beam Splitter)

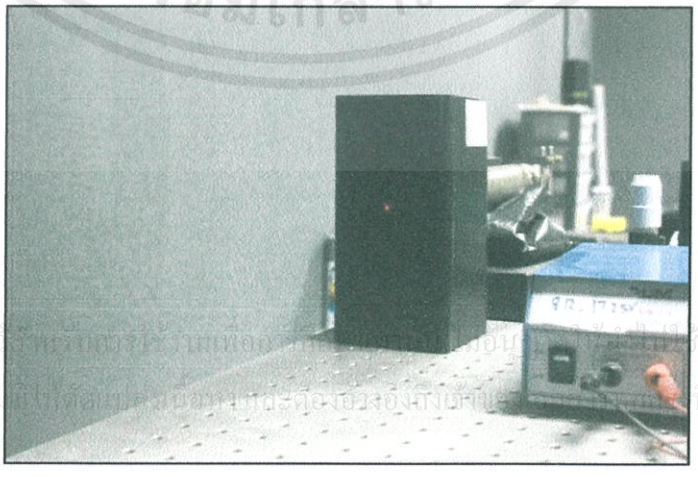


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จัดลำแสงให้ลำแสงอ้างอิง (R) ฉายลงบนแผ่นฟิล์มโฮโลแกรมเท่านั้น และให้แสงอีกลำหนึ่ง (O) ฉายลงบนวัตถุ

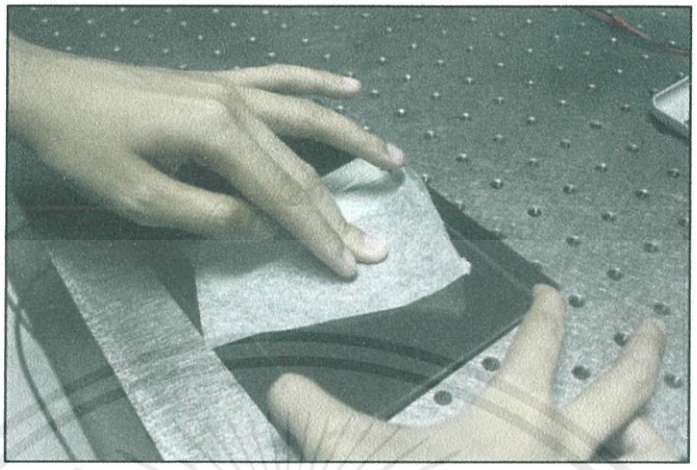


6. ก่อนที่จะเตรียมฟิล์ม หาวัตถุสีดำมาปิดแสงเลเซอร์ทำเปรียบเสมือนเป็นชัตเตอร์

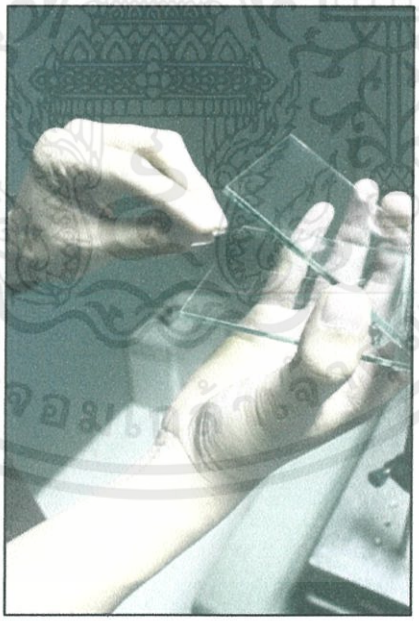


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำความสะอาดกระจกใส 2 แผ่น ด้วยกระดาษเช็ดเลนส์

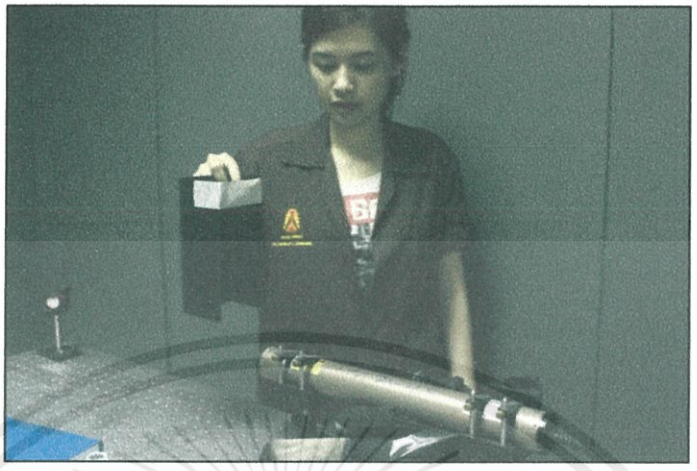


8. ใช้กระจกใส 2 แผ่นประกบฟิล์มไว้แล้วยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดของแสงระหว่างแผ่นแก้วที่ไม่ต้องการ ก่อนที่จะฉายแสงไปที่ฟิล์มให้รอประมาณ 1 ถึง 2 นาที เพื่อให้ความดันและอุณหภูมิระหว่างแผ่นฟิล์มกับ กระจกทั้งสองเข้าสู่สมดุล



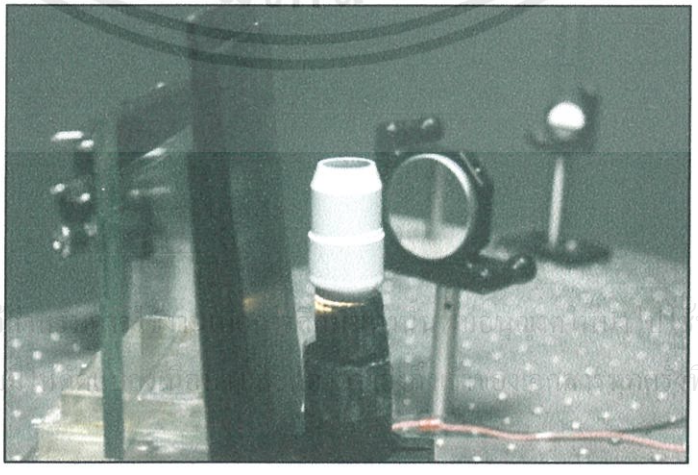
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เปิดชัตเตอร์ ใช้เวลาฉายแสงประมาณ 3-5 วินาที จากนั้นปิดชัตเตอร์



10. หลังจากฉายแสงลงบนฟิล์มโฮโลแกรมครั้งแรก หาวัตถุสีดำมาคลุมแผ่นฟิล์มเพื่อป้องกันไม่ให้แสงจากหลอดไฟไปกระทบฟิล์ม

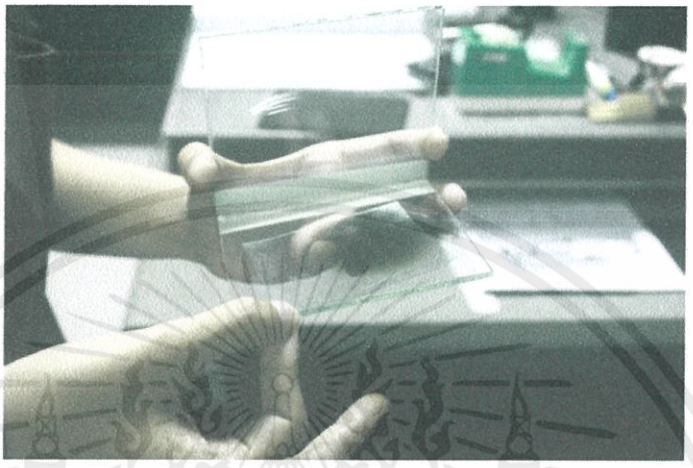
11. เปิดสวิทซ์ให้แก่หลอดไฟ ประมาณ 5 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ [illegible] ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม [illegible] ที่มีการนำไปใช้

12. จากนั้นนำวัตถุที่นำมาคลุมแผ่นฟิล์มออก แล้วเปิดชัตเตอร์ฉายแสงลงบนฟิล์มโฮโลแกรมอีกครั้ง ด้วยเวลาการฉายแสงเท่าเดิม

13. นำฟิล์มโฮโลแกรมออกจากแผ่นกระจกอย่างระมัดระวัง เพื่อนำฟิล์มมาล้าง



14. ล้างฟิล์ม

15. รอฟิล์มแห้ง และนำวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 3.4 การเตรียมน้ำยาล้างฟิล์มและขั้นตอนการล้างฟิล์ม

**การเตรียมน้ำยาล้างฟิล์ม**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่างที่ 1 ผสมน้ำยา Developer กับน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:5

อ่างที่ 2 น้ำกลั่น

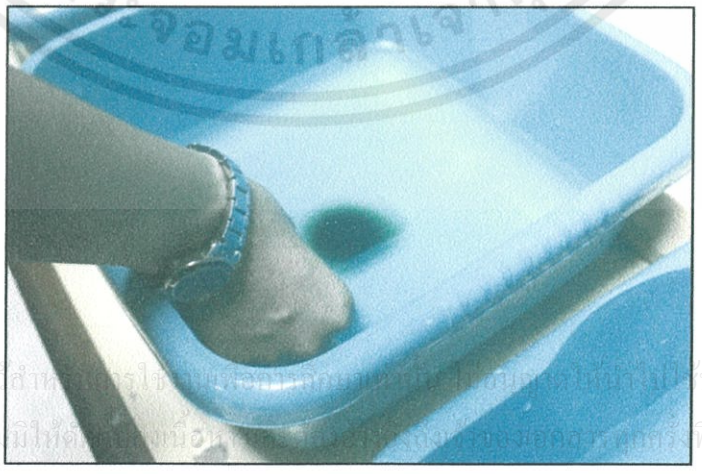
อ่างที่ 3 ผสมน้ำยา Fixing กับน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:5

อ่างที่ 4 น้ำกลั่นใส่น้ำยาล้างจาน 1 หยด

**ขั้นตอนการล้างฟิล์ม**

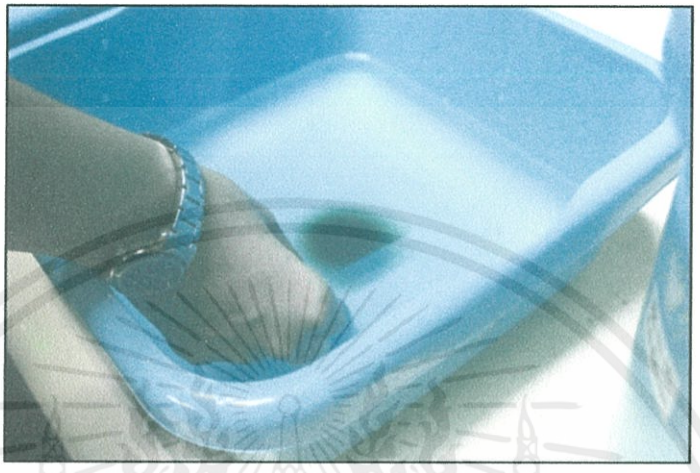
1. นำฟิล์มมาแกว่งเบาๆในอ่างที่ 1 จนน้ำยาทำปฏิกิริยากับฟิล์ม (สังเกต ฟิล์มเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีดำ) จับเวลาในการแกว่ง

2. จากนั้นนำฟิล์มมาแกว่งเบาๆในอ่างที่ 2 ใช้เวลาเท่ากับอ่างที่ 1 เพื่อล้างน้ำยา Developer ที่เหลืออยู่ที่ผิวของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานที่มีการนำไปใช้

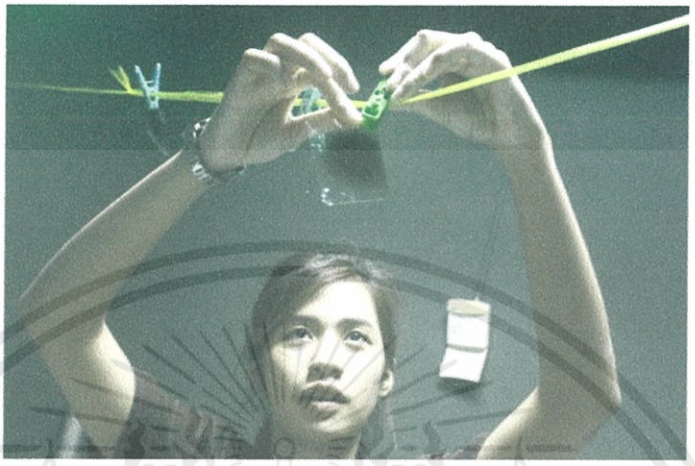
3. นำฟิล์มมาจุ่มในอ่างที่ 3 อ่างนี้น้ำยา Fixing จะทำปฏิกิริยากับฟิล์มเพื่อหยุดความไวต่อแสงของฟิล์ม ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที



4. จุ่มอ่างที่ 4 น้ำกลั่นใส่น้ำยาล้างจาน 1 หยด น้ำยาล้างจานจะทำหน้าที่เหมือนเป็นน้ำยาเคลือบฟิล์มให้สามารถมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น

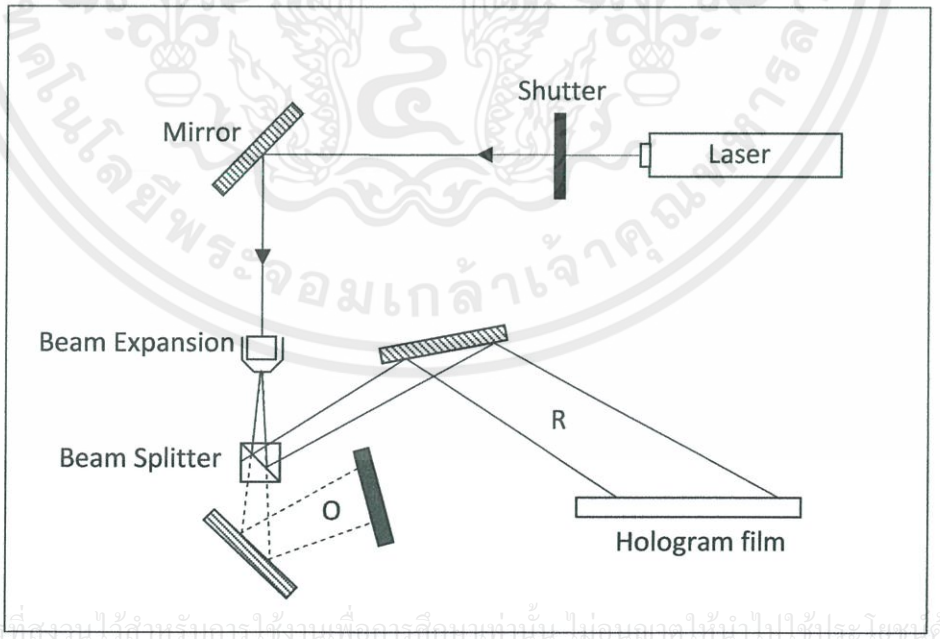
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำฟิล์มมาตากไว้ให้แห้ง

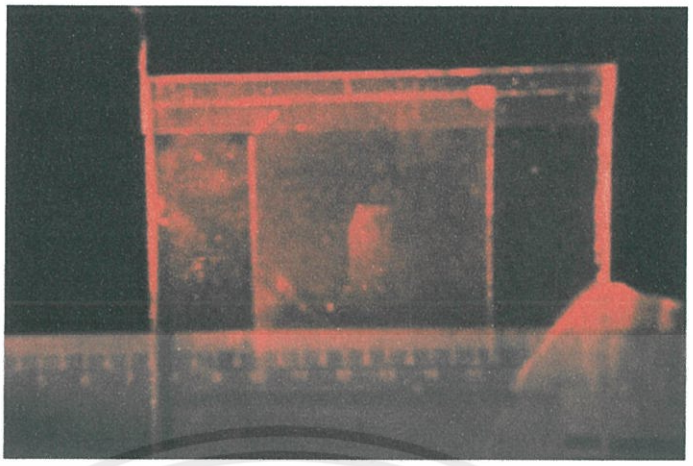


### 3.5 วิธีการดูผลการทดลอง

จัดอุปกรณ์ดังรูป (เหมือนตอนทำการทดลอง) แต่นำฟิวเจอร์บอร์ดมากั้นลำแสงที่ส่องไปหาวัตถุ จากนั้นนำฟิล์มใส่แผ่นกระจกใสแล้วนำไปยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด เพื่อดูผลการทดลอง




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ข้อควรระวัง**

เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการความเสถียรสูง จึงต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ต้องการ เพราะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุเนื่องจากการสั่นหรือสาเหตุอื่นๆ ระหว่างที่จะทำการฉายแสงครั้งที่ 2 จะทำให้ภาพโฮโลแกรมที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่เราต้องการ

## 3.6 การทำความสะอาดและการบำรุงรักษา

- การมีจุดน้ำมันหรือฝุ่นผงติดบนอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ (กระจกและอื่นๆ) ควรทำความสะอาดอุปกรณ์ โดยใช้กระดาษเช็ดเลนส์ หรือผ้าสำลีสำหรับเช็ดเลนส์ วางบนผิวหน้าอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์

- อย่าแตะผิวหน้าของกระจกด้วยมือเปล่าเป็นอันเด็ดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและอภิปรายผล

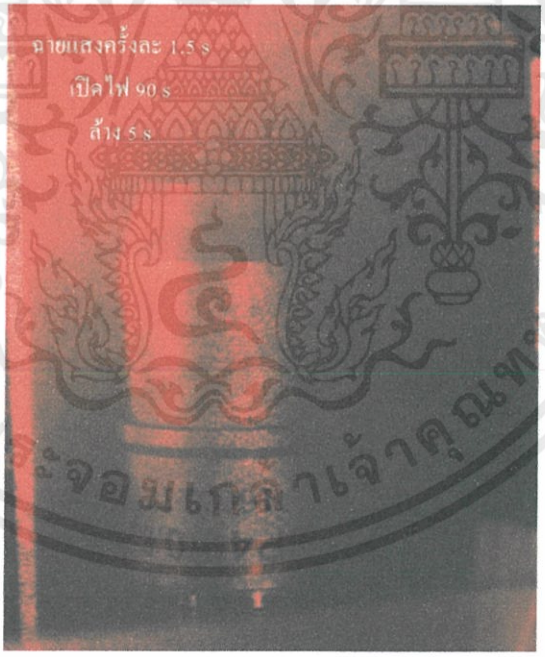
## 4.1 ผลการทดลอง

รูป 4.1 แสดงการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบไม่ซ้อน

รูป 4.2 แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.3 แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 60 วินาที




รูป 4.4 แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 90 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากถ่ายภาพโฮโลแกรมครั้งที่ 1 เปิดสวิตซ์ป้อนความต่างศักย์ 12 V ให้แก่หลอดไฟที่มีความต้านทาน 1.6 $\Omega$ เป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังสมการกำลังไฟฟ้า

$$P = IV = V^2/R \tag{4.1}$$

เมื่อป้อนความต่างศักย์ให้แก่หลอดไฟเป็นเวลา t วินาที ทำให้หลอดไฟเกิดความร้อน และแผ่ความร้อนให้แก่วัตถุ ตามสมมูลทางไฟฟ้าและความร้อน จะได้

$$P = W/t = Q/t \tag{4.2}$$

และจากสมการความจุความร้อนจำเพาะ

$$Q = mc\Delta T \tag{4.3}$$

จากสมการ (4.1) , (4.2) และ (4.3) จะได้

$$V^2/R = mc\Delta T/t \tag{4.4}$$

<u>หมายเหตุ</u> ไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้สิ่งแวดล้อม เพราะ ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับแก่หลอดไฟ และความต้านทานของหลอดไฟคงที่

แทนค่าในสมการ (4.4) จะได้ค่า $\Delta T$ จากนั้นวัดระยะห่างของริ้วแทรกสอด($\Delta S$)ที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายโฮโลแกรม นำมาแทนในสมการ Ideal Interferometry of hologram [1]

$$\Delta S \cdot \lambda = 1 (dn/dt)\ \Delta T \tag{4.5}$$

และสมการสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้น

$$\Delta L/l = \alpha\ \Delta T \tag{4.6}$$

จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Q กับ dn/dt และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta S$ กับ $\Delta L$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรและความหมาย

| ตัวแปร | ความหมาย | ตัวแปร | ความหมาย |
|---|---|---|---|
| I | กระแสไฟฟ้า | c | ค่าความจุความร้อนจำเพาะ |
| V | ความต่างศักย์ | $\Delta T$ | อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป |
| R | ความต้านทาน | $\Delta S$ | ระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด |
| P | กำลังไฟฟ้า หรือ กำลังงาน | $\lambda$ | ความยาวคลื่น |
| W | พลังงานไฟฟ้า | $L_0$ | ความกว้างของวัตถุ |
| T | เวลา | dn/dt | ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเวลา 1s |
| Q | พลังงานความร้อน | $\alpha$ | ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน |
| M | มวลของวัตถุ | $\Delta L$ | ระยะการขยายตัวของวัตถุ |

**ข้อมูลจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง**

ความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่หลอดไฟ (V) = 12 V

ค่าความต้านทานของหลอดไฟ (R) = 1.6 $\Omega$

มวลของวัตถุ (m) = 0.0616275 kg.

ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม (c) = 0.896 kJ/kg.C $^\circ$

= 896 J/kg.C $^\circ$

เวลาที่เปิดหลอดไฟ (t) = 5 ,60 ,90 s

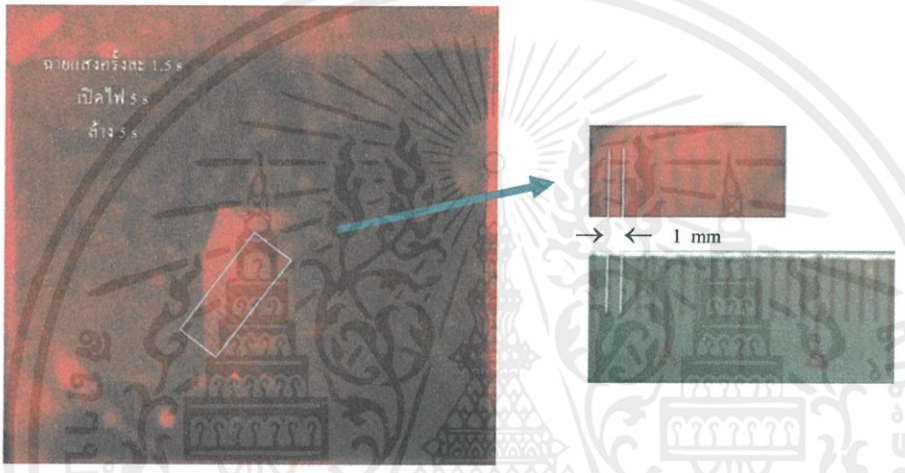
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของวัตถุ ($L_0$) = $2.5 \times 10^{-2}$ m

ความยาวคลื่นของเลเซอร์ ($\lambda$) = $632.8 \times 10^{-9}$ m

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ของอะลูมิเนียม ($\alpha$) = $23 \times 10^{-6}$ $C^{-1}$




รูป 4.5 ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 5 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_1$)

$t_1$ = 5 s

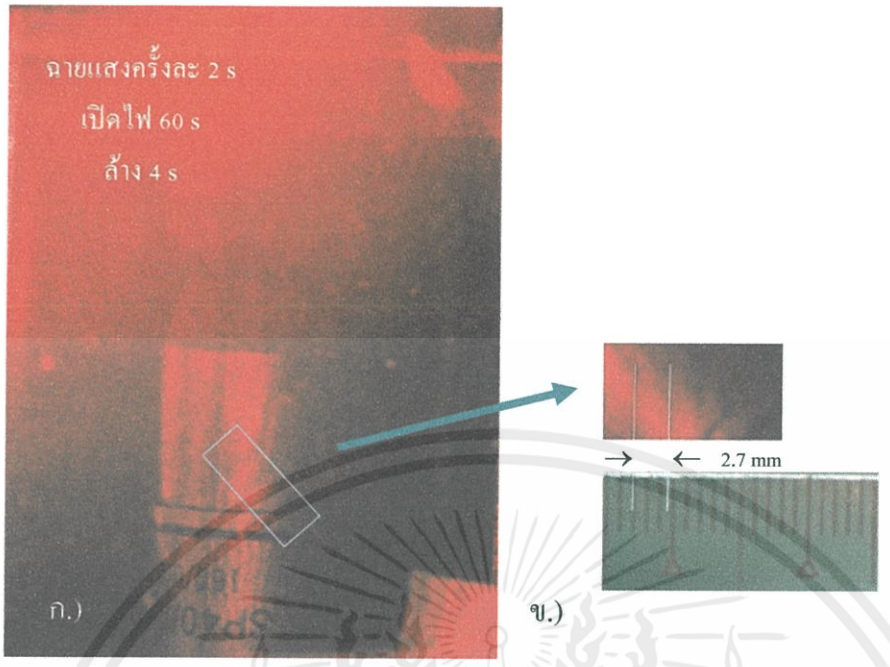
$Q_1$ = 0.4499 kJ

$\Delta T_1$ = 8.149 $c^{\circ}$

$\Delta S_1$ = 1 mm

$\Delta L_1$ = $4.686 \times 10^{-6}$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 4.6 ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 60 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_2$)

$t_2$ = 60 s

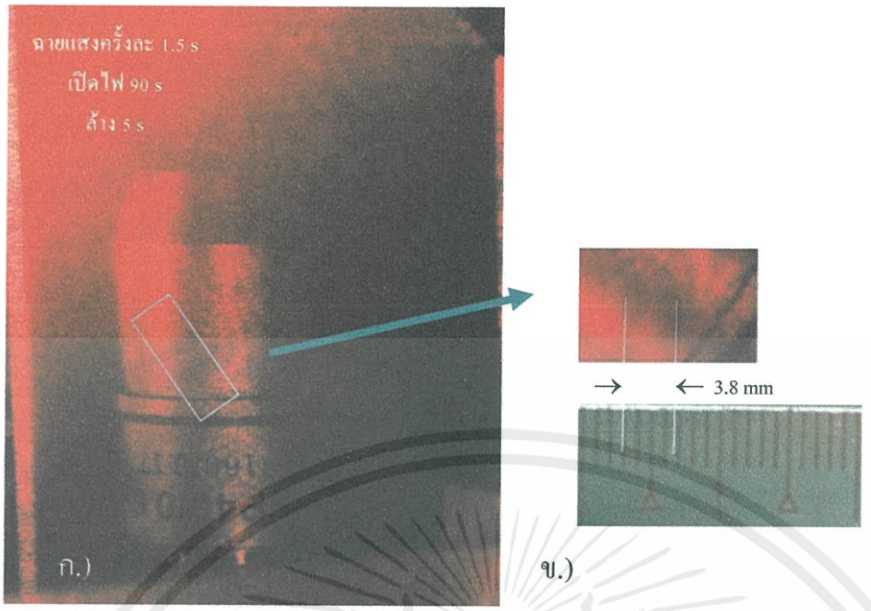
$Q_2$ = 5.3998 kJ

$\Delta T_2$ = 97.79 $c^{\circ}$

$\Delta S_2$ = 2.7 mm

$\Delta L_2$ = $56.229 \times 10^{-6}$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 4.7 ก.) แสดงการถ่ายภาพซ้อนโฮโลแกรม โดยเปิดหลอดไฟให้ความร้อนแก่วัตถุเป็นเวลา 90 วินาที และ ข.) แสดงการวัดหาระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta s_3$)

$t_3 = 90$ s

$Q_3 = 8.0999$ kJ

$\Delta T_3 = 146.69\ c^{\circ}$

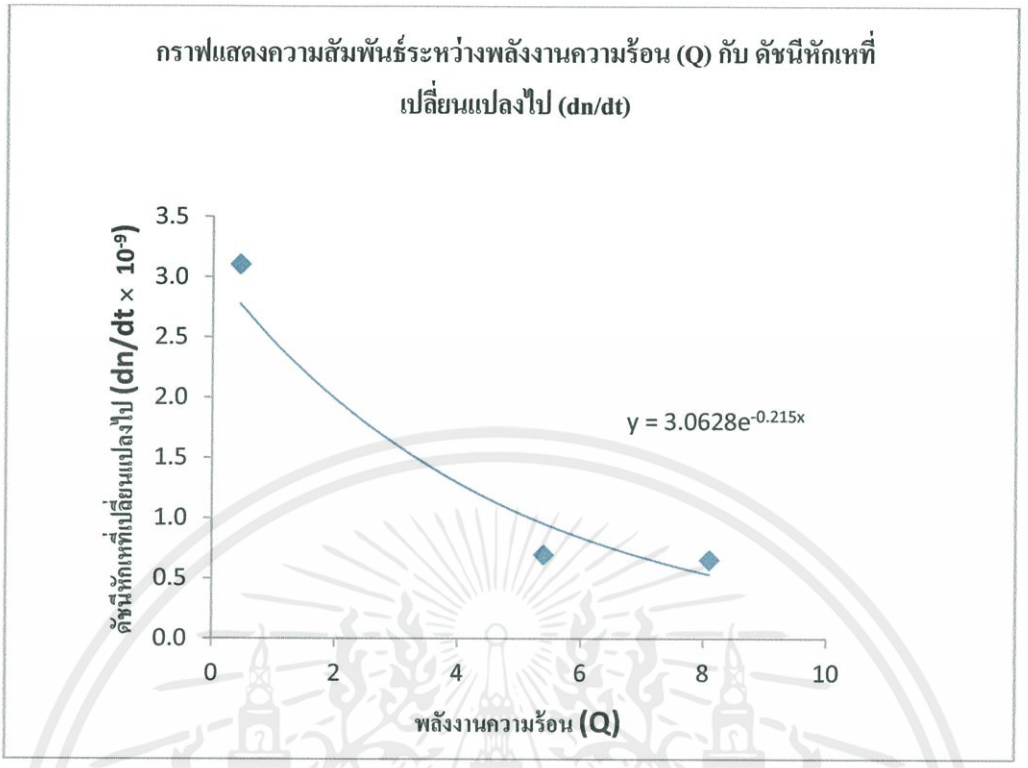
$\Delta S_3 = 3.8$ mm

$\Delta L_3 = 84.346 \times 10^{-6}$ m

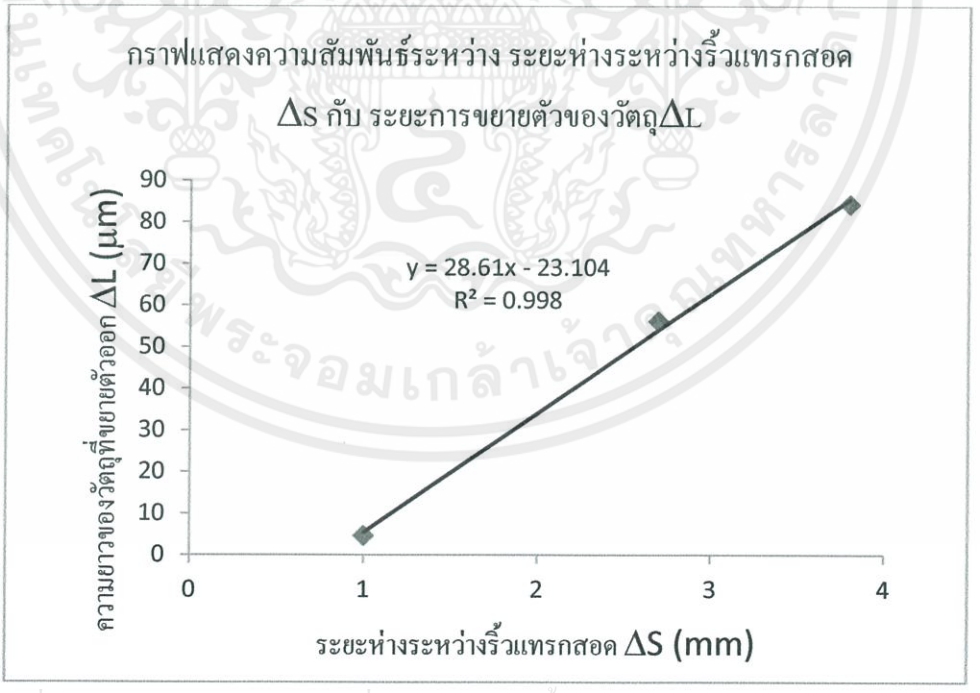
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลอง

| V (Volt) | t (s) | $\Delta T$ ($c^{\circ}$) | Q (kJ) | $\Delta s$ (m) | dn/dt ($\times 10^{-9}$) | $\Delta L$ ($\times 10^{-6}$ m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 V | 5 | 8.149 | 0.45 | 0.0010 | 3.1061 | 4.686 |
| | 60 | 97.79 | 5.40 | 0.0027 | 0.6988 | 56.229 |
| | 90 | 146.69 | 8.10 | 0.0038 | 0.6557 | 84.346 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูป 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อน (Q) กับ ดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป (dn/dt)




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ΔS (mm) กับ ระยะการขยายตัวของวัตถุ ΔL (μm)

# บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบ Double Exposure โดยวัดหาค่าของดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป จากริ้วแทรกสอดที่เกิดขึ้น และระยะการขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลอง

| V (Volt) | t (s) | $\Delta T$ ($c^{\circ}$) | Q (kJ) | $\Delta s$ (m) | dn/dt ($\times 10^{-9}$) | $\Delta L$ ($\times 10^{-6}$ m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 V | 5 | 8.149 | 0.45 | 0.0010 | 3.1061 | 4.686 |
| | 60 | 97.79 | 5.40 | 0.0027 | 0.6988 | 56.229 |
| | 90 | 146.69 | 8.10 | 0.0038 | 0.6557 | 84.346 |

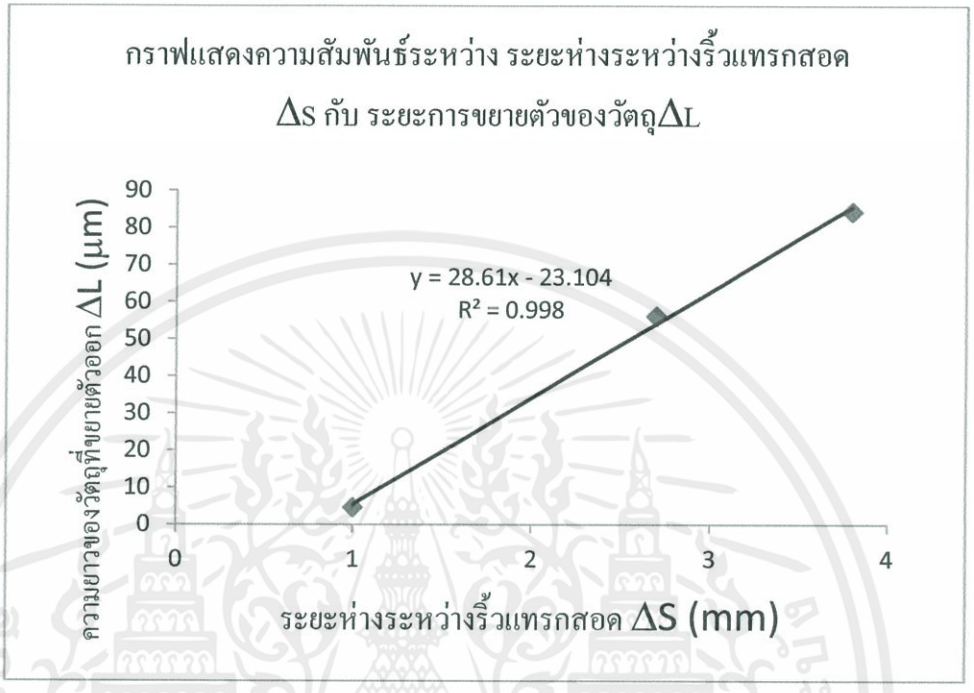
ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่วัตถุที่แตกต่างกัน ทำให้พลังงานความร้อนมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด และค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด และแปรผกผันกับค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป

ถ้าทราบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน ($\alpha$) ของวัตถุ เมื่อวัดระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta S$) จากการถ่ายภาพโฮโลแกรมแบบซ้อนทับ จะทำให้ทราบวัตถุมีการขยายตัวออกไปเท่าใด ($\Delta L$) พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นระหว่าง $\Delta S$ กับ $\Delta L$ สังเกตได้จาก $R^2 \cong 0.998 \approx 1$ ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างริ้วแทรกสอด ($\Delta S$) กับ ระยะการขยายตัวของวัตถุ ($\Delta L$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพิ่มเวลาในการเปิดหลอดไฟเป็น 10 s , 20 s และ 40 s




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง

1. Sathish Manickam and Vijay Dhir,2011,"Holographic Interferometric study of heat transfer to a sliding vapor bubble", Los Angeles, pp. 925-940.
2. Ralph Behrends, "Handbook LASER PHYSICS", PHYWE Series of publication,Germany
3. คชินท์ สายอินทวงศ์. **สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญที่หลายคนมองข้าม**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.unc.ac.th/lib/weblib/reference.html. (วันที่ค้นข้อมูล : 10 ตุลาคม 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก

## ประวัติของการเกิดภาพโฮโลแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติของการเกิดภาพโฮโลแกรม

ฮอโลแกรมนี้ถูกค้นพบโดยเดนนิส กาบอร์ (Dennis Gabor, 1900-1979) วิศวกรไฟฟ้าชาวฮังการี ในวันอีสเตอร์ ปี ค.ศ. 1947 โดยกาบอได้ค้นพบหลักการของฮอโลกราฟีโดยบังเอิญ ในระหว่างที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่บริษัท British Thomson-Houston ที่เมือง Rugby ประเทศอังกฤษ จากการค้นพบนี้ กาบอร์ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ. 1971 เทคนิคที่คิดค้นเดิมยังใช้อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่เป็นที่รู้จักกันในชื่อภาพสามมิติอิเล็กตรอน แต่ภาพสามมิติเป็นเทคนิคแสงซึ่งไม่ได้มีการพัฒนาอย่างจริงจัง จนกระทั่งมีการพัฒนาของเลเซอร์ในปี 1960

โฮโลแกรมแสงที่ใช้ได้จริงชิ้นแรกนั้นบันทึกอยู่ในรูปของวัตถุ 3D ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี 1962 โดย Yuri Denisyuk ในสหภาพโซเวียต และโดย Emmett Leith และ Juris Upatnieks ที่ University of Michigan ประเทศ USA ความก้าวหน้าในเทคนิคการประมวลผลโฟโตเคมีคัลเป็นการผลิต เพื่อแสดงภาพโฮโลแกรมที่มีคุณภาพสูง ซึ่งทำได้สำเร็จโดย Nicholas J. Phillips

ฮอโลแกรมแบ่งได้เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภท คือ **white-light hologram** ซึ่งภาพฮอโลแกรมที่บันทึกนั้น สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องสว่าง ด้วยแสงสว่างจากธรรมชาติ และอีกประเภทหนึ่งคือ ภาพฮอโลแกรม ที่ต้องถูกส่องสว่างด้วยแสงเลเซอร์ หรือแสงที่มีสภาพหน้าคลื่นสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ถึงจะมองเห็นภาพ 3 มิติได้

นอกจากนี้ ยังอาจแบ่งฮอโลแกรมออกได้เป็น transmission hologram, reflection hologram, image-plane hologram, และอื่นๆ อีกหลายประเภท

ที่โฮโลแกรมหลายชนิดนั้นสามารถทำได้ การส่งผ่านของโฮโลแกรมเช่นการผลิตโดย Leith และ Upatnieks ซึ่งถูกทำให้มองเห็นได้โดยส่องแสงเลเซอร์ผ่านวัตถุ และมองภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากโฮโลแกรมด้านตรงข้ามของแหล่งที่มา การปรับแต่งภายหลังการ หรือ"การส่งผ่านแถบสี" โฮโลแกรมช่วยให้แสงสว่างโดยแสงสีขาวมากกว่าโดยเลเซอร์ แถบสีโฮโลแกรมเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบันบนบัตรเครดิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านความปลอดภัยและในการบรรจุสินค้า รุ่นนี้ของการส่งผ่านแถบสีโฮโลแกรมเกิดขึ้นโดยทั่วไป เป็นรูปแบบผิวในฟิล์มพลาสติกและวัตถุรวมเคลือบอะลูมิเนียมสะท้อนแสงที่ให้แสงสว่างจาก "ด้านหลัง" เพื่อสร้างภาพของวัตถุ

ชนิดอื่น ๆ ของโฮโลแกรม เช่น การสะท้อนหรือ Denisyuk โฮโลแกรม คือสามารถทำสำเนาภาพหลากสี ใช้แหล่งไฟแสงสว่างสีขาวด้านเดียวกันของโฮโลแกรมเหมือนเป็นผู้มองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งในความก้าวหน้าล่าสุดซึ่งมีศักยภาพมากที่สุดในประวัติศาสตร์ระยะสั้น ๆ ของโฮโลกราฟี ได้รับการผลิตของเลเซอร์แบบ solid-state ที่มีต้นทุนต่ำ เช่นที่พบในการบันทึก DVD เป็นล้าน และใช้ในการใช้งานทั่วไปอื่น ๆ ซึ่งบางครั้งยังมีประโยชน์สำหรับภาพสามมิติ นั่นคือ ถูกและกะทัดรัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข

## การวินิจฉัยข้อผิดพลาด (Fault diagnosis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวินิจฉัยข้อผิดพลาด (Fault diagnosis)

### 1. ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะที่สังเกต

| ความผิดพลาด | สาเหตุ | การแก้ไข |
|---|---|---|
| ไม่เกิดภาพ | ฉายแสงลงบนฟิล์มโฮโลแกรม หรือสังเกตภาพไม่ถูกตำแหน่ง | ตรวจสอบว่าฉายแสงอ้างอิงถูกทิศทางหรือไม่ |
| | วัตถุที่ถ่ายภาพเคลื่อนที่ระหว่างเกิดภาพ | ระวังไม่ให้วัตถุเคลื่อนที่ หรือเลือกเวลาการฉายให้สั้นลง (ถ้าเป็นไปได้) |
| ไม่เกิดการสร้างภาพใหม่หรือเกิดเพียงแถบการทดลองเท่านั้น | แผ่นฟิล์มโฮโลแกรมเลื่อนขณะที่ทำการฉายแสง | วางตำแหน่งของวัตถุให้ถูกต้อง และระวังไม่ให้ฟิล์มขยับระหว่างการทดลอง |
| เกิดริ้วมืดที่ภาพ | วัตถุเคลื่อนที่ระหว่างการถ่ายในช่วงของความยาวคลื่น | ระวังไม่ให้วัตถุเคลื่อนที่ และเสริมความแน่นหนาให้กับส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ พ่นสีขาวบนวัตถุเพื่อลดเวลาการฉายแสงลง |
| บางส่วนของภาพมืด หรือคลุมเครือ | บางส่วนของวัตถุหลวม | ยึดวัตถุให้แน่น |
| | แสงที่ฉายลงวัตถุไม่ฉายลงบนวัตถุทั้งหมด | ปรับจุดกึ่งกลางของลำแสง และปรับการขยายแสงใหม่ |
| เกิดภาพชัดเกินไปที่บางส่วนของฟิล์ม | ลำแสงอ้างอิงไม่อยู่ตรงจุดกึ่งกลาง หรือฉายแสงบนแผ่นฟิล์มไม่ทั่วถึง | ปรับลำแสงอ้างอิงให้ฉายไปที่จุดกึ่งกลาง และครอบคลุมแผ่นฟิล์มทั้งหมด |
| เกิดภาพอย่างหยาบๆ ไม่คมชัด หรือเป็นภาพผี | ขณะที่ล้างฟิล์มขยับฟิล์มแรงเกินไป | ลดเวลาการฉายแสง หรือเวลาการล้างฟิล์มลง |
| ภาพที่ได้หลุดลุ่ย | วัตถุอยู่ห่างจากแผ่นฟิล์มมากเกินไป | เลื่อนวัตถุให้เข้าใกล้แผ่นฟิล์ม |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ความผิดพลาด | สาเหตุ | การแก้ไข |
|---|---|---|
| ผิวของแผ่นฟิล์มเป็นมัวๆ ไม่ใส | ขณะที่ล้างฟิล์มขยับฟิล์มแรงเกินไป | ลดเวลาการฉายแสง หรือเวลาการล้างฟิล์มลง |
| | ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาล้างฟิล์มผิดขั้นตอน หรือใช้น้ำยาล้างฟิล์มที่หมดอายุแล้ว | ทำตามขั้นตอนการล้างฟิล์มอย่างถูกต้อง (ถ้าจำเป็นผสมน้ำยาเคมีใหม่) |
| เกิดจุดสีขนาดต่างๆบนฟิล์ม | หยดน้ำบนแผ่นฟิล์มทำให้แสงเลี้ยวเบน เกิดเป็นสีต่างๆ เมื่อเทียบกับผู้สังเกต | ล้างฟิล์มด้วยน้ำเปล่าใหม่แล้วทำให้แห้ง |
| มีจุดบริเวณกว้างบนแผ่นฟิล์ม | ฉายแสงด้วยแสงที่กระจายออก หรือสะท้อนออกมาจากแหล่งอื่น | ควบคุมและกำจัดแสงที่กระเจิงจากแหล่งกำเนิดแสงอื่น , ป้องกันไม่ให้วัตถุโดนลำแสงอ้างอิง และป้องกันไม่ให้ฟิล์มโดนแสงวัตถุ |

**2.ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการล้างฟิล์ม**

| ความผิดพลาด | สาเหตุ | การแก้ไข |
|---|---|---|
| ฟิล์มถ่ายภาพโฮโลแกรมเปลี่ยนเป็นสำคำช้า ระหว่างล้างฟิล์ม | ฉายแสงไม่เพียงพอ | เพิ่มเวลาการฉายแสง |
| | เลเซอร์หรืออุปกรณ์อื่นขยับเลื่อนตำแหน่งไป | ยึดอุปกรณ์ต่างๆ ให้แน่น |
| | น้ำยาล้างฟิล์มเก่าไป หรือผสมน้ำยาเคมีผิดสูตร | ผสมน้ำยาล้างฟิล์มใหม่ |
| | น้ำยาล้างฟิล์มเย็นเกินไป | เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำยาล้างฟิล์ม ($20^{\circ}$ C) |
| เกิดปฏิกิริยาเคมีจากการล้างฟิล์มไม่ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม | ลำแสงอ้างอิงไม่ตกกระทบลงบนจุดกึ่งกลางของแผ่นฟิล์ม | ปรับลำแสงอ้างอิงใหม่ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ความผิดพลาด | สาเหตุ | การแก้ไข |
|---|---|---|
| เกิดปฏิกิริยาเคมีจากการล้างฟิล์มไม่ทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม (ต่อ) | ไม่ขยับแผ่นฟิล์มให้มากพอระหว่างที่ล้างฟิล์ม | ควรขยับแผ่นฟิล์มระหว่างที่ล้างฟิล์ม เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทั่วทั้งแผ่น |
| | แสงสะท้อนจากบางส่วนของวัตถุมีมากกว่าอีกส่วนหนึ่ง | พ่นสีด้านที่วัตถุสะท้อนมากไป |
| แผ่นฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีดำเร็วและดำมาก ระหว่างล้างฟิล์ม | ใช้เวลาฉายแสงมากเกินไป | ลดเวลาการฉายแสง |
| | ใช้แผ่นฟิล์มที่ฉายแสงไปแล้ว มาฉายแสงอีก | ตรวจสอบว่าใช่แผ่นฟิล์มใหม่ในการทดลอง |
| | แสงเซฟไลท์ในห้องมืดส่างเกินไป | ให้ล้างฟิล์มขณะที่เปิดไฟเซฟไลท์ และปิดไฟเซฟไลท์ในการตรวจสอบ |
| | อุณหภูมิของน้ำยาล้างฟิล์มสูงเกินไป | ลดอุณหภูมิให้น้ำยาล้างฟิล์ม ($20^{\circ}C$) |
| | ผสมน้ำยาเคมีผิดสูตร | ผสมน้ำยาเคมีใหม่ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้