

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของก๊าซโดยใช้
มัคซ์-เซนเดอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
REFRACTIVE INDEX MEASUREMENT OF GAS USING
MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER



ภัทรภณ อองอาจนิรัมย์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาหรือลอกเลียนแบบข้อมูลใดๆ จากเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ปีการศึกษา 2559

REFRACTIVE INDEX MEASUREMENT OF GAS USING
MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของก๊าซโดยใช้
มัคซ์-เซนเดอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
Refractive Index Measurement of Gas Using
Mach-Zehnder Interferometer

ชื่อนักศึกษา นายภัทรภณ งามอนิรามย์ รหัสนักศึกษา 56051188
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.สุรชาติ กมลติลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลติลก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในภาควิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำ ตัดทอน แก้ไข และเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของก๊าซโดยใช้ มัคซ์-เซนเดอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์	
ชื่อนักศึกษา	นายภัทรภณ อองอาจนิรามัย	รหัสนักศึกษา 56051188
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลดีลก	

บทคัดย่อ

ชุดทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) เป็นระบบที่ใช้ศึกษาหลักการแทรกสอดของแสงอย่างง่ายที่ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแสงจากแหล่งเดียวกัน นั่นคือเลเซอร์ไดโอด (laser diode) โดยการแบ่งแสงออกเป็นสองลำด้วย Beam splitter จากนั้นลำแสงทั้งสองลำจะแยกเส้นทางเดินของแสงไปกระทบกับกระจกสะท้อนเพื่อให้ลำแสงแต่ละลำนั้นได้เดินทางกับมารวมตัวกันที่ตำแหน่ง Beam splitter อีกตัวหนึ่ง และลำแสงสุดท้ายก็จะเดินทางไปตกลงบนฉากรับแสง ทำให้สามารถเห็นริ้วการแทรกสอดของแสงเป็นวงแหวนแถบมืด-แถบสว่างขึ้น เมื่อทำการนำตัวตรวจจับแสง (photodetector) มาวางแทนที่ฉากรับแสง ก็จะเป็นการตรวจสอบจำนวนริ้วการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งก็จะทำให้ริ้วการแทรกสอดของแสงเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการนับจำนวนริ้วการแทรกสอดของแสงที่เครื่องนับ(Counter)

คำสำคัญ : บีมสปิตเตอร์ บีมมอบีบ ระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์ เลเซอร์ไดโอด
แก๊สฮีเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Refractive Index Measurement of Gas Using Mach-Zehnder Interferometer	
Student	Mr.Patarapon Ongartniramai	student ID 56051188
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Lecturer Surachart Kamoldirok	

Abstract

A Mach-Zehnder Interferometer system was to study the principle of Interference of light from a He-Ne laser. Light is divided into two paths by beam splitter and two paths impact on mirror. After that the light from two paths comeback at another one beam splitter and show results are ring on screen. If make substitute a scene with a photodetector, can will detect the number of interfering strands of light. When changing the path of light the number of interfering is strands of light change at counter machine.

Keywords : Beam splitter, Hand vacuum pump, Mach-Zehnder interferometer
He-Ne laser, Helium gas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์สุรชาติ กมลติลก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำรวมไปถึงการตรวจสอบแก้ไขการดำเนินการจัดโครงการพิเศษ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและเป็นพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอพระคุณอาจารย์ในสาขาพิสิททุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในงานวิจัยครั้งนี้

คุณงามความดีอันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่งและคณาจารย์ผู้ประสพวิชาความรู้ตลอดจนทุกๆท่านที่ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้จบลงด้วยดี

ภัทรภณ องอาจนิรมัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญรูป(ต่อ)	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ที่มาของระบบ	3
2.2 คุณสมบัติของระบบ	4
2.3 ข้อควรระวัง	5
2.4 การแทรกสอดของลำแสง	5
2.5 การรวมกันของคลื่น	7
2.5.1 การรวมแบบเสริมกัน	8
2.5.2 การรวมแบบหักล้างกัน	8
2.6 แก๊สฮีเลียม (Helium)	9
2.7 เลเซอร์ไดโอด	10
2.8 ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 การศึกษาและติดตั้งชุดทดลองหาจำนวนริ้วการแทรกสอดผ่านระบบแทรกสอดของแสงแบบมัทซ์-เซนเดอร์	12
3.1.1 อุปกรณ์ชุดการทดลอง	12
3.1.2 วิธีการจัดเรียงชุดอุปกรณ์การทดลอง มัทซ์-เซนเดอร์อินเตอร์เฟียร์โอมิเตอร์	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.1.2 วิธีการจัดเรียงชุดอุปกรณ์การทดลอง มัทซ์-เซนเดอร์อินเตอร์เฟียร์โอมิเตอร์มีค่า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2 ทดลองหาค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศและแก๊สฮีเลียมจากความสัมพันธ์ ของการเปลี่ยนแปลงของจำนวนรีฟlection แทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ระดับความดันที่ แตกต่างกัน	16
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาและติดตั้งชุดทดลองหาจำนวนรีฟlection แทรกสอดผ่านระบบแทรก สอดของแสงแบบมัลติ-เซนเตอร์	17
4.2 ผลการทดลองหาค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศและแก๊สฮีเลียม	19
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองดัชนีหักเหของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่1)	19
4.2 ผลการทดลองดัชนีหักเหของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่2)	21
4.3 ผลการทดลองดัชนีหักเหของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่3)	23
4.4 ผลการทดลองดัชนีหักเหของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	25
4.5 ผลการทดลองดัชนีหักเหของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่1)	27
4.6 ผลการทดลองดัชนีหักเหของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่2)	29
4.7 ผลการทดลองดัชนีหักเหของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ครั้งที่3)	31
4.8 ผลการทดลองดัชนีหักเหของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบแมทซ์-เซนเตอร์ อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์	4
2.2 แสดงรีวิวกการแทรกสอดของลำแสงแถบมืด-แถบสว่าง	5
2.3 แหล่งกำเนิดคลื่นแบบอาพันธ์ และแสงอาพันธ์	6
2.4 ภาพการแทรกสอดของแสง	6
2.5 การรวมกันของคลื่นแบบเสริมกัน	8
2.6 การรวมกันของคลื่นแบบหักล้างกัน	8
2.7 รูปแบบโมเลกุลของแก๊สฮีเลียม	9
2.8 เลเซอร์ไดโอด	10
2.9 ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์	11
3.1 He-Ne laser	12
3.2 กระจกสะท้อนแสง	13
3.3 เกจวัดลมหน่วย mbar	13
3.4 Beam splitter	13
3.5 เลนส์ขยายลำแสง	14
3.6 sample cell	14
3.7 ฉากรับแสง	14
3.8 Gas ที่เป็นตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง	15
3.9 ปุ่มมือบีบ..	15
4.1 ไดอะแกรมแสดงระบบแทรกสอดของแสงแบบมีคซ์-เซนเตอร์	17
4.2 ระบบแทรกสอดของแสงแบบมีคซ์-เซนเตอร์	18
4.3 รีวิวกการแทรกสอดของแสงที่แสดงให้เห็นจากระบบ	18
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศ ที่เปลี่ยนไป ครั้งที่1	19
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศ ที่เปลี่ยนไป ครั้งที่2	21
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศ ที่เปลี่ยนไป ครั้งที่3	23
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศ ที่เปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ย	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่1	27
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่2	29
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่3	31
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ย	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้การศึกษาและการค้นคว้าหาความรู้ทางด้านแสงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทต่อการศึกษามากขึ้นในทุกๆด้าน ในส่วนของแสงนั้น องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง ในวงจรของการทดลองทางด้านแสงแบบครบวงจร นั่นคือ การทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) ซึ่งได้รับความนิยม เนื่องจากระบบการทดลองนี้สามารถที่จะทำหน้าที่ได้ในหลายๆด้านยกตัวอย่างเช่น การทดลองการรวมสัญญาณแสง การผสมรูปแบบของสัญญาณแสง การรวมแสงที่มีค่าการสูญเสีย (loss) ต่ำ ใช้ในการประยุกต์การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ(WDM) และใช้ในการควบคุมพลังงานของแสง เป็นต้น

การทดลองทางด้านแสงเพื่อที่จะวัดความยาวของริ้วการแทรกสอดของแสงที่เกิดจะแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่แตกต่างกัน สามารถทำได้โดยวิธีการทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) ซึ่งเราสามารถนำการทดลองของตัวระบบนี้มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์หรือพิสูจน์ชนิดของสารที่เป็นตัวกลางที่แสงผ่านได้ และยังสามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของสารตัวกลางที่ความดันต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ทำให้การพิสูจน์ตัวกลางสารมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในงานทดลองที่เกิดขึ้นนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำการสร้างเครื่องมือสำหรับการทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบแมทซ์-เซนเดอร์ที่มีสารที่ใช้ทดลองหลายๆชนิด นำมาหาความแตกต่างของการเกิดริ้วการแทรกสอดและหวังว่าจะสามารถพบเห็นการเปลี่ยนแปลงของริ้วการแทรกสอดได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาหลักการของการทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์
- 2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงริ้วการแทรกสอดของแสงที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของความดันที่แตกต่างกันว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงริ้วการแทรกสอดของแสงอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับรีวิวกการแทรกสอดของแสงที่ผ่านตัวกลางที่เป็นสารที่เป็นคนละชนิดกัน และวิเคราะห์ถึงผลกระทบของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของรีวิวกการแทรกสอดในสารแต่ละชนิดโดยวิธีการทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบแมทซ์-เซนเดอร์

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เสนองานวิจัย

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษารายละเอียดของงานวิจัย ทฤษฎีและข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 4 ติดตั้งระบบการทดลอง

ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดลอง และปรับปรุงการทดลองในส่วนที่ผิดพลาด

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการดำเนินการวิจัย และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ตารางขั้นตอนการวิจัย

เดือน ลำดับ	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ก.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ขั้นที่ 1	←→								
ขั้นที่ 2	←→	←→							
ขั้นที่ 3			←→	←→					
ขั้นที่ 4					←→	←→			
ขั้นที่ 5						←→	←→		
ขั้นที่ 6							←→	←→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ได้เข้าใจถึงหลักการของระบบแทรกสอดของแสงแบบแมทซ์-เซนเดอร์
- 2) มีความเข้าใจในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในรีวิวกการแทรกสอดของแสง
- 3) เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของรีวิวกการแทรกสอดของแสงต่อค่าความดันที่เปลี่ยนไป
- 4) สามารถทดลองและเปรียบเทียบชนิดของสารโดยการสังเกตรีวิวกการแทรกสอดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

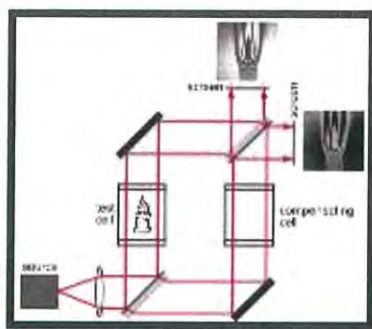
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาทางฟิสิกส์ ระบบมัลติ-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเฟส ระหว่างลำแสง 2 ลำ ที่มาจากการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน โดยระบบนี้นอกจากเหนือจากสิ่งอื่นใดแล้ว จะเป็นระบบที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงเฟส ระหว่างลำแสง 2 ลำที่เกิดจากการใส่ตัวอย่างทดสอบด้านใดด้านหนึ่งของทางเดินของลำแสง หรือเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นทางเดินของลำแสงภายในระบบด้านใดด้านหนึ่ง

2.1 ที่มาของระบบ

ระบบแมทซ์-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือระดับสูงที่มีการทำงานตรงกันข้ามกับ ระบบไมเคิลสัน อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่จะมีเส้นทางการเดินทางของแสงที่มีกำลังอ่อนกว่าครึ่งหนึ่ง ถ้าหากไม่มีการสูญเสียของแสงระหว่างทาง ริ้วของการแทรกสอดของแสงในลำแสงสีขาวจะมีความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตรและ การเดินทางของลำแสงจะควบคู่ไปพร้อมๆกันในสองทิศทาง ในทุกความยาวคลื่น หรืออาจจะบอกได้ว่าจะไม่เกิดริ้วการแทรกสอดของแสงที่ฉากรับ จากรูปภาพประกอบที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีเซลล์เหมือนกันสองเซลล์วางขนานกันอยู่ในแนวทางการเดินทางของลำแสง ด้านหนึ่งของเซลล์จะใส่ตัวอย่างลงไปเพื่อทำการวิเคราะห์ ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นแนวทางการเดินทางของลำแสงอ้างอิง ลำแสงที่วิ่งเข้าสู่เซลล์ทั้งสอง จะถูกแยกออกมาจาก Beam splitters ตัวที่หนึ่ง ลำแสงที่สะท้อนจาก Beam splitters จะวิ่งเข้าสู่เส้นทางเดินที่มีเซลล์ตัวอย่างอยู่ทำให้เกิดการสูญเสียของลำแสงเกิดขึ้น ลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะวิ่งผ่านไปสะท้อนกับกระจกแล้ววิ่งเข้าสู่เซลล์อ้างอิงที่วางอยู่อีกตำแหน่งหนึ่ง หลังจากนั้นลำแสงทั้งสองจะวิ่งเข้าหากันที่ตำแหน่งของ Beam splitters ตัวที่สอง และตกลงบนฉากรับภาพทั้ง 2 ด้าน ฉากรับภาพ ทำให้เห็นภาพพื้นผิวสะท้อนที่มาจากแสงทางของลำแสงทั้งสองข้าง ทำให้มองเห็นริ้วการแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 : ระบบแมทซ์-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ที่มา : (https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder_interferometer)

แมทซ์-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ จะนำมาใช้ในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง จำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่ใช้ในการทำงานทางด้านการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยระบบแมทซ์-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ จะรวมอยู่ในแผงวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทำงาน มีแบนด์วิธสูงในด้านไฟฟ้า และจะมีแอมพลิจูดกับเฟสมีค่าสูงในด้านสัญญาณแสง มีความถี่ในช่วงจิกะเฮิร์ต(GHz)

นอกจากนี้ระบบแมทซ์-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ยังสามารถที่จะนำมาใช้เพื่อการทำนายปรากฏการณ์ต่างๆในทาง ควอนตัมแมคคานิกส์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า quantum entanglement

2.2 คุณสมบัติของระบบ

สมการเฟรสเนลสำหรับเรื่องการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นในสถานะ dielectric จะบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของเฟสการสะท้อนของแสง เมื่อคลื่นมีการเดินทางจากตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหที่มีค่าน้อยไปเป็นตำแหน่งที่มีค่าดัชนีหักเหค่ามากขึ้น แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งจากค่าดัชนีหักเหที่มีค่ามากไปเป็นตำแหน่งที่มีค่าดัชนีหักเหค่าน้อย

- มีการเปลี่ยนเฟสไป 180 องศา เมื่อมีการสะท้อนของลำแสงที่ตัวกลางที่เป็นตัวอย่าง(Sample) ที่มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า ลำแสงในตัวกลางที่เคลื่อนที่ในอากาศ
- จะไม่มีการเปลี่ยนเฟส เมื่อมีการสะท้อนของลำแสงของลำแสงที่เคลื่อนที่ในอากาศ ที่จะมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า ลำแสงในตัวกลางที่เป็นตัวอย่าง(Sample)

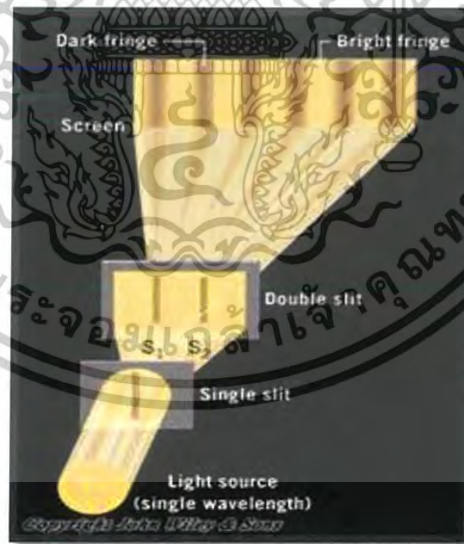
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ข้อควรระวัง

กฎเกณฑ์หรือข้อควรระวังที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟส ถูกนำไปใช้กับตัว Beam splitters ที่สารด้วยสารที่เคลือบด้วย dielectric และต้องปรับเปลี่ยนการใช้งานทันทีหากมีการปนเปื้อนโลหะ หรือเมื่อมีโพลาริเซชันที่แตกต่างกันเกิดขึ้น ในเครื่องมือจริงๆ ความหนาของตัว Beam splitters ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความยาวของเส้นทางเดินของลำแสงที่อาจจะไม่เท่ากัน จะไม่คำนึงถึง ในกรณีที่ ไม่มีการดูดกลืน การอนุรักษ์พลังงานจะเป็นตัวรับประกันว่า เส้นทางทั้งสองเส้นทางในการเดินของ ลำแสงจะต้องแตกต่างกัน โดยการเปลี่ยนเฟสเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น นอกจากนี้ Beam splitters ที่ไม่ใช่ 50/50 (เส้นแยกออกเท่าๆกัน) ที่ถูกนำมาใช้บ่อย จะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพ ของเครื่องมือในการใช้งานในการวัดบางกรณี

2.4 การแทรกสอดของลำแสง

การแทรกสอดของแสง (Interference) เกิดได้ต่อเมื่อคลื่นแสง 2 ขบวนเคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดการรวมตัวกันและแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่างบนฉาก โดยแหล่งกำเนิดแสง จะต้องเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent Source) คือเป็นแหล่งกำเนิดที่ให้คลื่นแสงความถี่ เดียวกัน และความยาวคลื่นเท่ากัน ดังรูปภาพประกอบที่ 2



รูปที่ 2.2 : แสดงริ้วการแทรกสอดของลำแสงแถบมืด-แถบสว่าง

ที่มา : (http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_21.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแถบสว่างบนฉากเกิดจากการแทรกสอดแบบเสริม และแถบมืดเกิดจากการแทรกสอดแบบหักล้างในการศึกษาการแทรกสอดของแสงเราจะเห็นเป็นแถบมืดแถบสว่างได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อแสงที่จะมาแทรกสอดกันต้องมีความถี่เดียวกันความยาวคลื่นเท่ากัน และมีเฟสตรงกันหรือมีความต่างเฟสคงที่ตลอดเวลา แหล่งกำเนิดคลื่นแบบนี้เรียกว่าแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ (coherent source) ดังนั้นในการทดลองเรื่องการแทรกสอดของลำแสงในปัจจุบันเราจึงต้องใช้แสงเลเซอร์

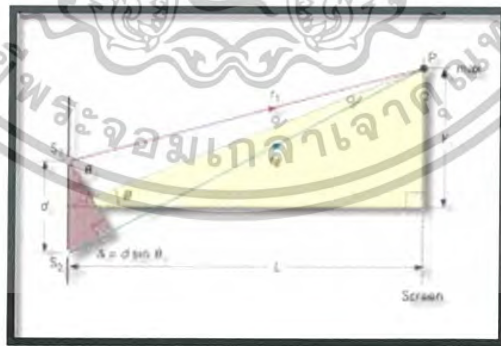


รูปที่ 2.3 : แหล่งกำเนิดคลื่นแบบอาพันธ์ และแสงอาพันธ์
ที่มา : (<http://www.bookayouthworkshop.com/coherent-light>)

สมการการแทรกสอดของแสง

ถ้าให้ ช่องแคบ S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดแสงห่างกันเป็นระยะ d เมื่อแสงเดินทางจากช่องแคบมาถึงฉากด้วยระยะทางที่ต่างกัน เดินทางมาพบกันบนจุดเดียวกันคือจุด P จะได้ผลต่าง S_1P กับ S_2P เป็นดังสมการ

$$S_2P - S_1P = d \sin \theta$$



รูปที่ 2.4 : แสดงภาพการแทรกสอดของแสง

ที่มา : (<http://www.scimath.org>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมุมเป็นมุมน้อยๆ จะสามารถสรุปสมการที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับสลิตคู่ ดังนี้

เมื่อ S_1, S_2 มีเฟสตรงกัน

การแทรกสอดแบบเสริมกัน (แนวกลางเป็นแนวปฏิบัติ A_0)

$$S_2P - S_1P = n\lambda$$

$$d \sin \theta = n\lambda$$

$$d y/L = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน

$$S_2P - S_1P = (n-1/2)\lambda$$

$$d \sin \theta = (n-1/2)\lambda$$

$$d y/L = (n-1/2)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อ S_1, S_2 มีเฟสตรงข้ามกัน

การแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$S_2P - S_1P = (n-1/2)\lambda$$

$$d \sin \theta = (n-1/2)\lambda$$

$$d y/L = (n-1/2)\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (แนวกลางเป็นแนวปฏิบัติ N_0)

$$S_2P - S_1P = n\lambda$$

$$d \sin \theta = n\lambda$$

$$d y/L = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

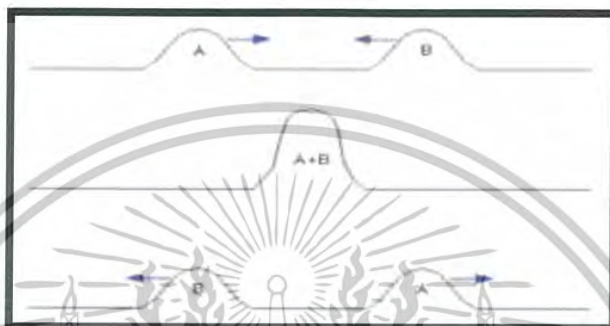
2.5 การรวมกันของคลื่น (Superposition of Wave)

เกิดจากการที่คลื่นตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันในเวลาเดียวกัน เกิดการรวมกันของแอมพลิจูด คือ แอมพลิจูดไปทางเดียวกันจะเสริมกัน แอมพลิจูดไปตรงข้ามกันจะหักล้างกัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ เช่น คลื่นนิ่ง บีตส์ ร้อยรอยของการแทรกสอดและการเลี้ยวเบน จึงทำให้เกิดแถบมืด-แถบสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การรวมแบบเสริมกัน (Constructive Superposition)

เกิดเมื่อคลื่นสองคลื่นที่มีการกระจัดไปทางทิศเดียวกันเคลื่อนที่มาพบกัน เช่น สันคลื่นกับสันคลื่น หรือ ท้องคลื่นกับท้องคลื่น คลื่นทั้งสองจะรวมกันทำให้การกระจัดลัพธ์ ณ ตำแหน่ง และเวลาหนึ่งๆ มีขนาดมากกว่าการกระจัดเดิมของคลื่นแต่ละคลื่น โดยการกระจัดรวม หาได้จากผลบวกของการกระจัดของคลื่นทั้งสอง ณ ตำแหน่งและเวลานั้นๆ เมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านพ้นกันไปแล้ว คลื่นแต่ละคลื่นจะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม และเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิม ดังรูปภาพประกอบที่ 5

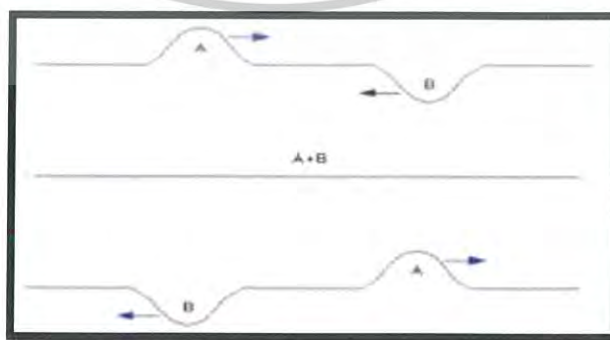


รูปที่ 2.5 :การรวมกันของคลื่นแบบเสริมกัน

ที่มา : (http://kwanruedee11.blogspot.com/2015/08/blog-post_48.html)

2.5.2 การรวมแบบหักล้าง (Destructive Superposition)

เกิดเมื่อคลื่นสองคลื่นที่มีการกระจัดไปทางทิศตรงข้ามกัน เคลื่อนที่มาพบกัน เช่น สันคลื่นกับท้องคลื่นหรือท้องคลื่นกับสันคลื่น คลื่นทั้งสองจะรวมกันทำให้การกระจัดลัพธ์ ณ ตำแหน่ง และเวลาหนึ่งๆ มีขนาดน้อยกว่าการกระจัดเดิมของคลื่นแต่ละคลื่น โดยการกระจัดรวม หาได้จากผลต่างของการกระจัดของคลื่นทั้งสอง ณ ตำแหน่งและเวลานั้นๆ เมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านพ้นกันไปแล้ว คลื่นแต่ละคลื่นจะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม และเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิม ดังรูปภาพที่ 6

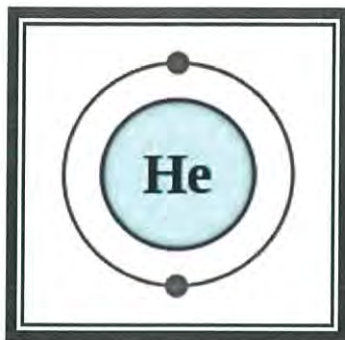


รูปที่ 2.6 :การรวมกันของคลื่นแบบหักล้างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ที่มา : (http://kwanruedee11.blogspot.com/2015/08/blog-post_48.html)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แก๊สฮีเลียม (Helium)



รูปที่ 2.7 :รูปแบบโมเลกุลของแก๊สฮีเลียม

ที่มา : (<https://th.wikipedia.org/wiki>)

เป็นธาตุเคมีที่มีสัญลักษณ์ว่า He และมีเลขอะตอมเท่ากับ 2 ฮีเลียมเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นพิษ ฉ่ำเยื่อ มีอะตอมเดี่ยวซึ่งถูกจัดให้อยู่ในหมู่แก๊สมีตระกูลบนตารางธาตุ จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของฮีเลียม มีค่าต่ำสุดกว่าบรรดาธาตุทั้งหมดในตารางธาตุ และมันจะปรากฏในอยู่รูปของแก๊สเท่านั้น ยกเว้นในสภาวะที่เย็นยิ่งยวด

มีการค้นพบฮีเลียม เมื่อปี ค.ศ. 1868 ในบรรยากาศรอบดวงอาทิตย์ โดย โจเซฟ นอร์มัน ล็อกเยอร์ เขาได้ทำการทดลองโดยการส่องดวงอาทิตย์สังเกตเห็นเส้นสีเหลืองในสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับธาตุใด ๆ ที่รู้จักกันบนโลก ล็อกเยอร์ ใช้คำศัพท์ภาษากรีกที่เรียกดวงอาทิตย์ (เฮลิออส : Helios) มาตั้งชื่อธาตุนี้ว่า ฮีเลียม (Helium) นอกจากนี้ เซอร์ วิลเลียม แรมเซย์ ได้ค้นพบฮีเลียมบนโลก (ค.ศ. 1895) โดยเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในแร่ยูเรไนท์ ซึ่งให้เส้นสเปกตรัมตรงกับที่สังเกตจากดวงอาทิตย์

ฮีเลียมที่มีอยู่ในเอกภพ มีมากเป็นอันดับสองรองจากไฮโดรเจน และมีปริมาณหนาแน่นในดาวฤกษ์ ซึ่งถูกสังเคราะห์ได้จากไฮโดรเจนนั่นเอง โดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน แม้ว่าฮีเลียมจะปรากฏในบรรยากาศของโลกเพียงหนึ่งในส่วนใน 186,000 ส่วน (0.0005%) และมีปริมาณน้อยที่ปรากฏในแร่กัมมันตรังสี โลหะจากอุกกาบาต และน้ำพุแร่ แต่ฮีเลียมปริมาณสูงพบได้ในฐานะส่วนประกอบ (มากถึง 7.6%) ในก๊าซธรรมชาติในสหรัฐอเมริกา (โดยเฉพาะในรัฐเท็กซัส, นิวเม็กซิโก, แคนซัส, โอคลาโฮมา, แอริโซนา และยูทาห์) นอกจากนั้นพบใน อัลจีเรีย, แคนาดา, สหพันธรัฐรัสเซีย, โปแลนด์ และ กатар

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก๊าซฮีเลียมมีความหนาแน่นที่ต่ำมาก จึงนำไปใช้บรรจุในบอลลูนและเรือเหาะแทนก๊าซไฮโดรเจนซึ่งติดไฟได้ ภายหลังจากการระเบิดของเรือเหาะอินเดนบวร์กของเยอรมนี และทราบสาเหตุว่ามาจากการระเบิดของก๊าซไฮโดรเจน
- มีการนำก๊าซฮีเลียมไปผสมในอากาศสำหรับนักดำน้ำ เพื่อป้องกันการเกิดโรคเบนด์ (Bends)
- ฮีเลียมเหลว (ซึ่งมีอุณหภูมิ -269 องศาเซลเซียส) นำไปใช้เกี่ยวกับตัวนำยิ่งยวด (Superconductor)

2.7 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอด LD เป็นเลเซอร์ที่มีขนาดกลางที่เกิดขึ้นจากรอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำที่คล้ายกันกับที่พบในไดโอดเปล่งแสงที่มีใช้งานกันอยู่ เลเซอร์ไดโอดจะเกิดขึ้นได้จากการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าไป เลเซอร์ไดโอดควรจะแตกต่างจากเลเซอร์ไดโอดปั๊มออปติคัล (optically pumped laser diodes), ซึ่งจะให้กำลังขับ (ปั๊ม) ด้วยลำแสงซึ่งมักจะกระตุ้นให้เกิดขึ้นได้โดยเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 2.8 :เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดถูกสร้างโดยการเจือสารกระตุ้น (doping) เป็นชั้นบางหลายๆ ที่ตรงบนพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ของผลึก ผลึกจะถูกเจือเพื่อผลิตบริเวณของสารชนิด n และบริเวณของสารชนิด p (n-type region and a p-type region), หนึ่งในผลลัพธ์ข้างต้นก็คือ ทำให้เกิดรอยต่อของสาร p-n หรือไดโอดนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ไดโอดสร้างจากส่วนย่อยของการจัดหมวดหมู่ขนาดใหญ่ของไดโอดสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ p-n การไบแอสกระแสไฟฟ้าไปข้างหน้าข้ามผ่านเลเซอร์ไดโอดจะทำให้ประจุสื่อนำไฟฟ้าสองชนิดคือ - โฮลและอิเล็กตรอน - จะ "ถูกฉีด" จากแต่ละอีกฝั่งที่อยู่ด้านตรงข้ามกันของรอยต่อ p-n เข้ามาในบริเวณเขตการพ้อง โฮลจะถูกฉีดจากบริเวณของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารเจือชนิด P และอิเล็กตรอนจากบริเวณของสารเจือชนิด n (คือ บริเวณของการพ้องปราศจากประจุสื่อนำทางไฟฟ้าใด ๆ ในรูปแบบที่เป็นผลมาจากความแตกต่างทางความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type) และสารชนิด p (p-type) เมื่อใดก็ตามที่พวกมันอยู่ในสถานะของการสัมผัสติดต่อกันทางกายภาพกันอยู่) เนื่องจากเป็นการใช้การฉีดของประจุในการสร้างกำลังแก่เลเซอร์ไดโอดมากที่สุด, ประเภทของเลเซอร์แบบนี้บางครั้งเรียกว่า "เลเซอร์ฉีด" หรือ "เลเซอร์ไดโอดฉีด" (ILD) เป็นเลเซอร์ไดโอดที่เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่พวกมันอาจถูกจัดจำแนกได้ว่าเป็นเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการกำหนดคุณลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งที่มีความแตกต่างจากเลเซอร์สถานะของแข็ง

2.8 ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์

เป็นเลเซอร์ก๊าซชนิดแรก ประกอบด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตราส่วนประมาณ 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน (มักเรียกอีกชื่อว่า pumping source) ที่ใช้จะเป็น electrical discharge คือทำให้มีอิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกับก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์

แสงเลเซอร์ที่ได้จะเป็นสีแดง ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร (หรือ 632.8×10^{-9} เมตร) และมีกำลังประมาณ 0.5 – 50 มิลลิวัตต์ ผู้สร้างสามารถเลือกการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมให้เกิดเป็นเลเซอร์สีเขียว และอินฟราเรด ได้ แต่ไม่นิยม เพราะแสงดังกล่าวเกิดยากกว่าและต้องใช้ต้นทุนสูง



รูปที่ 2.9 :ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์

ที่มา : (http://www.sc.mahidol.ac.th/scpy/Optics/basic_laser3.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการสร้างเครื่องมือสำหรับการทดลองระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เชนเดอร์ที่มีสารที่เป็นแก๊สบางชนิดนำมาใช้ในทดลอง หาความแตกต่างของการเกิดริ้วการแทรกสอดของแสงที่ตำแหน่งฉากรับแสงของเส้นทางเดินของแสงที่ผ่านตัวกลาง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1.การศึกษาและติดตั้งชุดทดลองหาจำนวนริ้วการแทรกสอดผ่านระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เชนเดอร์ 2.ทดลองหาค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศจากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของจำนวนริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่เป็นแก๊สฮีเลียม ที่ระดับความดันที่แตกต่างกัน

3.1 การศึกษาและติดตั้งชุดทดลองหาจำนวนริ้วการแทรกสอดผ่านระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เชนเดอร์

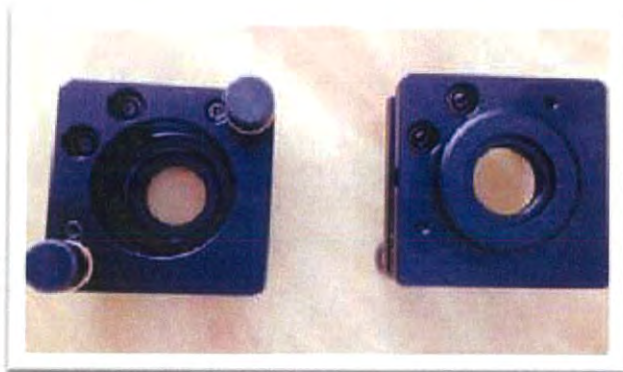
3.1.1 อุปกรณ์ชุดการทดลอง



รูปที่3.1 : He-Ne laser

ที่มา : (<https://thai.alibaba.com/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.2 : กระจกสะท้อนแสง

ที่มา : (<http://www.opticalmarketplace.co.uk>)



รูปที่3.3 : เกจวัดลมหน่วย mbar

ที่มา : (<http://www.nanasupplier.com>)



รูปที่3.4 : Beam splitter

ที่มา : (<https://www.aliexpress.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.5 : เลนส์ขยายลำแสง
ที่มา : (www.sumitool.com)



รูป3.6 : sample cell
ที่มา : (https://rudolphresearch.com/)



รูปที่3.7 : ฉากรับแสง
ที่มา : (http://www.moderncni.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.8 : Gas ที่เป็นตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

ที่มา : (http://www.sn-oxygen.com/images/editor/20170116_0959131.jpg)



รูปที่3.9 : ปั่นมือปั่น

ที่มา : (<https://pantip.com/topic/30752173>)

3.1.2 วิธีการจัดเรียงชุดอุปกรณ์การทดลอง มัคซ์-เซนเตอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

1. จัดชุดอุปกรณ์ตามรูปประกอบที่ 10 โดยไม่ต้องติดตั้ง sample cell และอุปกรณ์ตรวจจับแสง photo detector
2. ปรับระนาบกระจก(mirror) ทั้งสองให้แสงตกกระทบด้วยมุม 45 องศา
3. ติดตั้ง Beam splitter
4. จัดระบบให้เกิดการซ้อนทับกันของลำแสงทั้งสองลำ
5. ทำการปรับมุมของกระจกทั้งสองตัวจนเกิดเป็นริ้วการแทรกสอดของแสง ตกลงบนฉากรับแสง
6. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับแสง photo detector
7. ต่อเอาต์พุตของ photo detector เข้ากับเครื่องนับจำนวนริ้วการแทรกสอด
8. เปิดเครื่องนับแล้วเลือก RECALL 1 จากนั้นกดปุ่ม RUN เพื่อให้เครื่องทำการนับการเปลี่ยนแปลงริ้วการแทรกสอด โดยถ้ากดปุ่ม RUN อีกครั้งจะเป็นการรีเซ็ตเครื่องนับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ทดลองหาค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศและแก๊สฮีเลียมจากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของจำนวนรีวการแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ระดับความดันที่แตกต่างกัน

1. ติดตั้ง sample cell เข้าไปในเส้นทางเดินของลำแสงด้านใดด้านหนึ่ง
2. บรรจุสารตัวอย่างทดสอบ ในที่นี้ใช้เป็นอากาศ ลงใน sample cell
3. ใช้ที่ปั๊มมือบีบ (Hand vacuum pump) ดูดแก๊สออกให้ได้ค่าความดัน -150 mbar
4. กดปุ่ม RUN ที่เครื่องนับ เพื่อให้เครื่องนับรีเซ็ตค่าก่อน
5. ปล่อยอากาศเข้าสู่ sample cell ที่มีความยาว 101.57 mm
6. บันทึกจำนวนครั้งของรีวการแทรกสอดที่เปลี่ยนไป (Δn)
7. ใช้ที่ปั๊มมือบีบ (Hand vacuum pump) ดูดแก๊สออกให้ได้ค่าความดัน -300 mbar , -500 mbar , -700 mbar , -800 mbar ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 4 – 7
9. คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห จาก $\Delta n = \frac{\Delta m \lambda}{Lx}$
10. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) กับค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไป (Δn)
11. นำค่าความชันที่ได้จากกราฟมาคำนวณหาค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศ จาก
$$n_{air} = (\text{slope} \times P_{atm}) + 1$$
12. หาค่าความผิดพลาด โดยค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000277
13. เปลี่ยนสารตัวอย่างทดสอบ เป็นแก๊สฮีเลียม
14. กดปุ่ม RUN ที่เครื่องนับ เพื่อให้เครื่องนับรีเซ็ตค่าก่อน
15. ใช้ที่ปั๊มมือบีบ (Hand vacuum pump) ดูดอากาศออกให้ได้ค่าความดันมากที่สุด
16. บรรจุแก๊สฮีเลียมลงใน sample cell จำนวน 100 mbar สังเกตและบันทึกจำนวนครั้งของรีวการแทรกสอดที่เปลี่ยนไป (Δn)
17. ใช้ที่ปั๊มมือบีบ (Hand vacuum pump) ดูดอากาศออกให้มากที่สุดแล้วบรรจุแก๊สฮีเลียมลงใน sample cell จำนวน 200, 300, 400, 450 mbar ตามลำดับ
18. สังเกตและบันทึกจำนวนครั้งของรีวการแทรกสอดที่เปลี่ยนไป (Δn)
19. ทำการวิเคราะห์ผลตามขั้นตอนที่ 9-11
20. หาค่าความผิดพลาด โดยค่าดัชนีหักเหของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000036

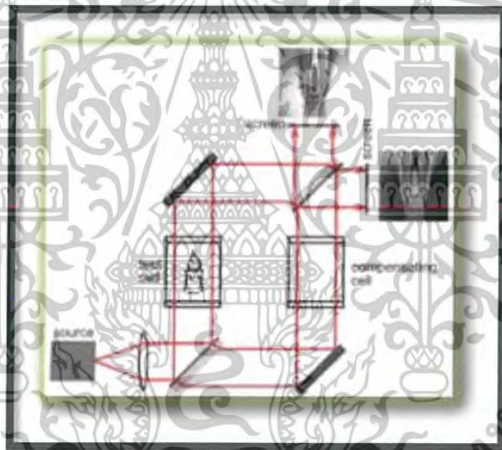
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาและติดตั้งชุดทดลองหาจำนวนริ้วการแทรกสอดผ่านระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์

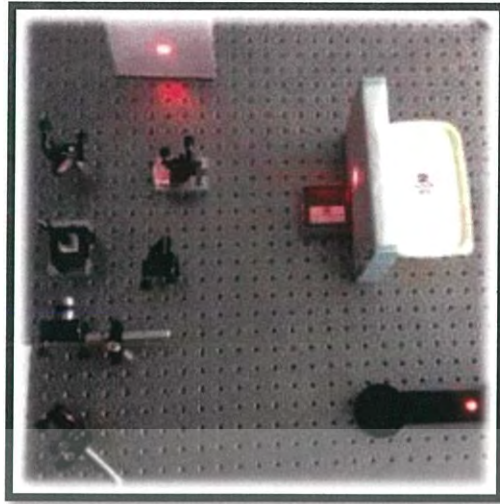
รูปแบบการติดตั้งระบบการแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์ คือการทำให้แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดของแสงเกิดการขยายของลำแสงผ่านเลนส์ แล้วตกกระทบกับตัว Beam splitter จากนั้นแสงที่แยกออกจาก Beam splitter ในแต่ละเส้นทางจะเดินทางไปสะท้อนกับกระจกที่ทำมุม 45 องศา แล้วเดินทางไปยังตัว Beam splitter อีกตัวหนึ่งแล้วเกิดการรวมกันระหว่างลำแสงทั้งสองลำ ทำให้สามารถมองเห็นลำแสงจากทั้งสองเส้นทางเกิดการแทรกสอดกัน และแสดงผลออกมาเป็นรูปแบบของริ้วการแทรกสอดของแสง



รูปที่ 4.1 : โดอะแกรมแสดงระบบแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เซนเดอร์

ที่มา : (https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder_interferometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.2 : ระบบแทรกสอดของแสงแบบมีคซ์-เซนเดอร์



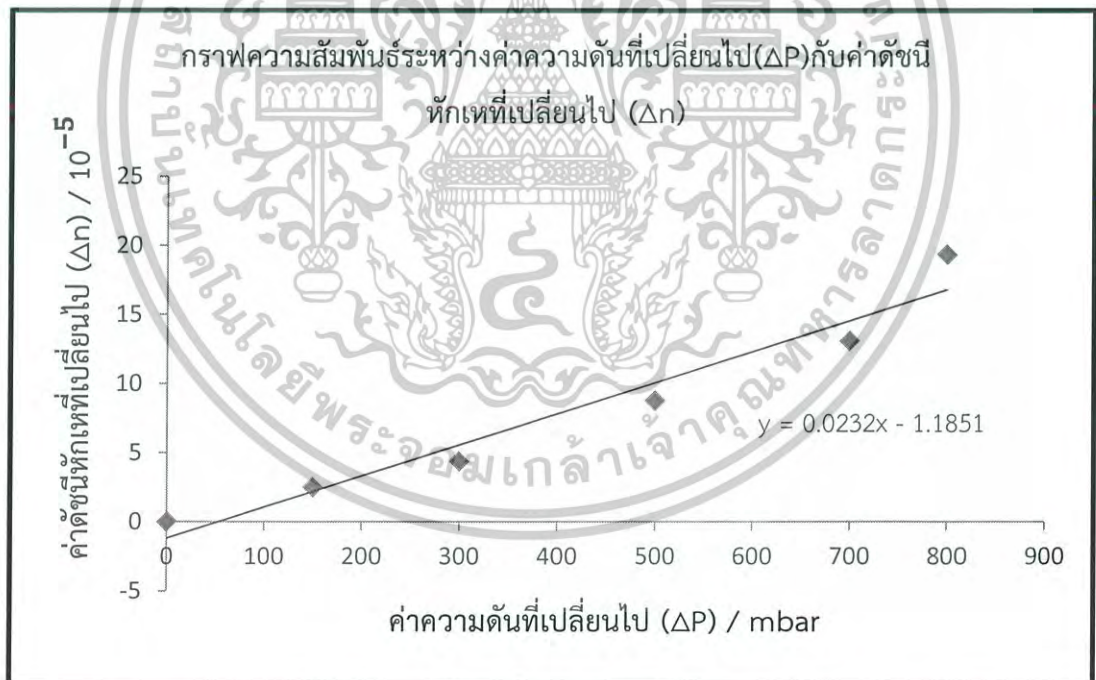
รูปที่4.3 : รั้วการแทรกสอดของแสงที่แสดงให้เห็นจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตารางผลการทดลองหาค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศและแก๊สฮีเลียม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 1

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
150	4	2.4924
300	7	4.3611
500	14	8.7222
700	21	13.083
800	31	19.313



รูปที่ 4.4 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times \text{Patm}) + 1 \\ &= (0.0232 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000235 \end{aligned}$$

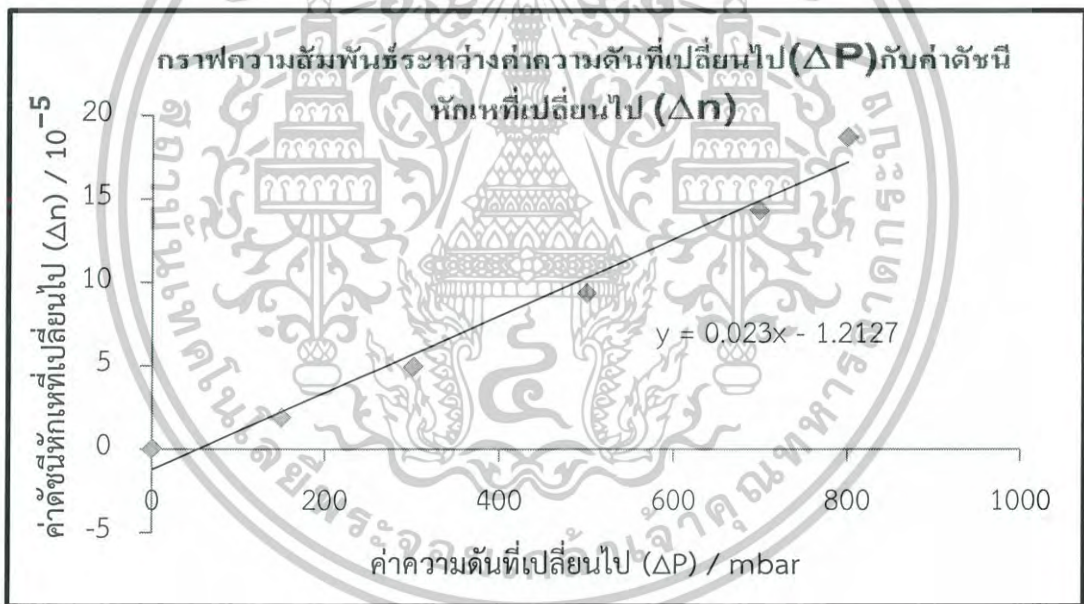
ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000277

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[(1.000235 - 1.000277) / 1.000277] \times 100\%}{1} \\ &= 0.0042\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 2

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
150	3	1.8690
300	8	4.9841
500	15	9.3452
700	23	14.329
800	30	18.690



รูปที่ 4.5 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0230 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000233 \end{aligned}$$

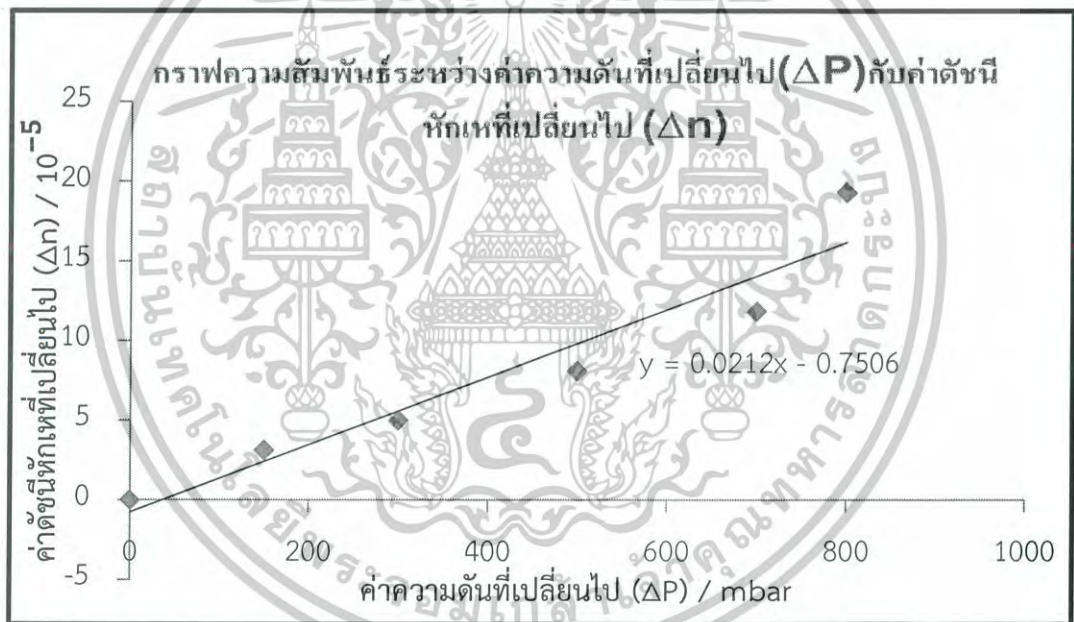
ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000277

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[1.000233 - 1.000277] / 1.000277 \times 100\%}{1} \\ &= 0.0044 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 3

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป (Δn) / 10^{-5}
150	5	3.1150
300	8	4.9841
500	13	8.0992
700	19	11.837
800	31	19.313



รูปที่ 4.6 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* * คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0212 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000214 \end{aligned}$$

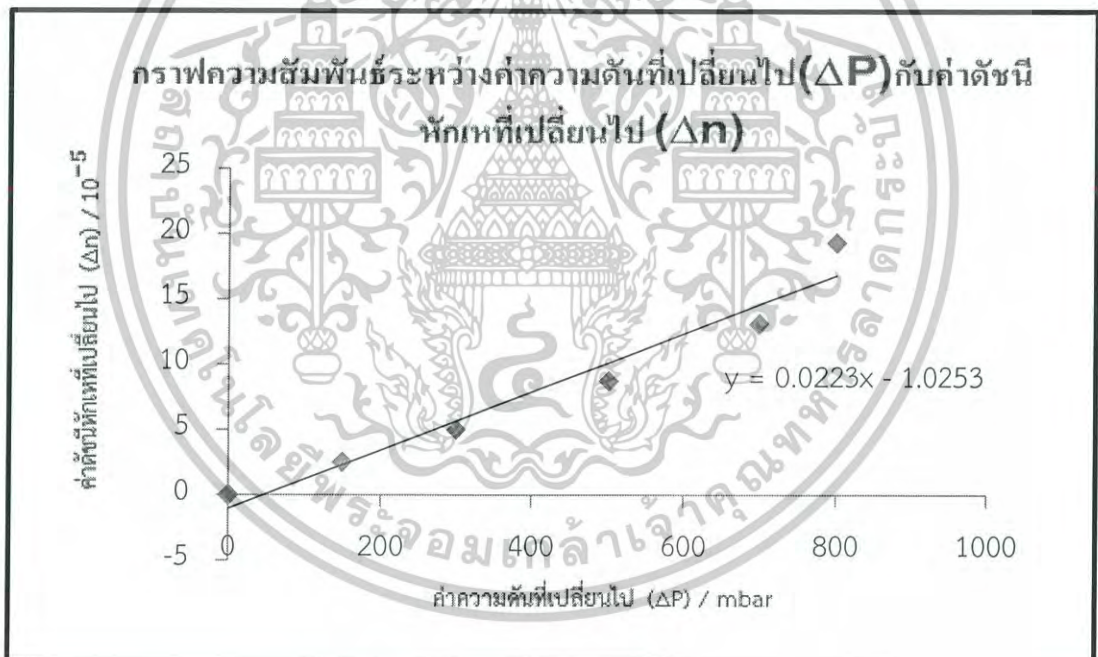
ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000277

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[1.000214 - 1.000277] / 1.000277 \times 100\%}{1} \\ &= 0.0063 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสค่าเฉลี่ย

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไป (Δn) / 10^{-5}
150	4	2.4924
300	8	4.9841
500	14	8.7222
700	21	13.083
800	31	19.313



รูปที่ 4.7 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในอากาศที่เปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0212 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000225 \end{aligned}$$

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000277

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[1.000225 - 1.000277] / 1.000277 \times 100\%}{1} \\ &= 0.0052 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงในก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 1

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
100	4	2.4924
200	12	7.4762
300	22	13.7064
400	28	17.4445
450	32	19.9365



รูปที่ 4.8 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0464 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000470 \end{aligned}$$

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000036

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[1.000470 - 1.000036] / 1.000036}{1} \times 100\% \\ &= 0.0434 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงในก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 2

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
100	3	1.8690
200	10	6.2301
300	23	14.329
400	29	18.067
450	33	20.559



รูปที่ 4.9 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห

$$\text{จาก } \Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$$

โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร

L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0490 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000496 \end{aligned}$$

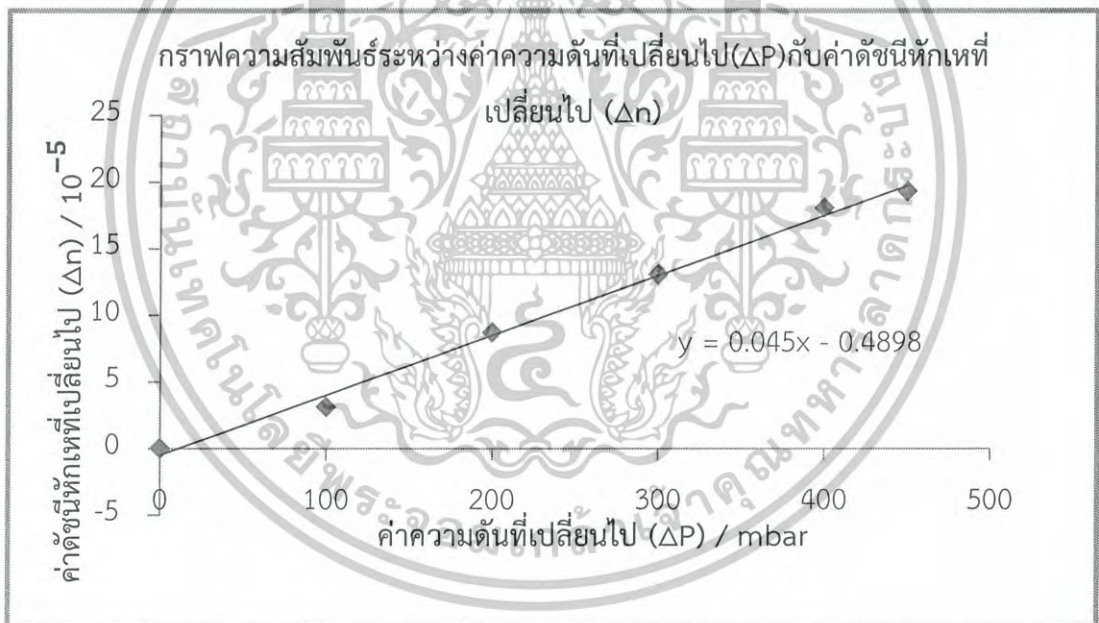
ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000036

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[1.000496 - 1.000036] / 1.000036}{1} \times 100\% \\ &= 0.0459 \% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงในก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 3

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
100	5	3.1151
200	14	8.7222
300	21	13.083
400	29	18.067
450	31	19.313



รูปที่ 4.10 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

** คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห จาก $\Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$
 โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร
 L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0450 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000455 \end{aligned}$$

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000036

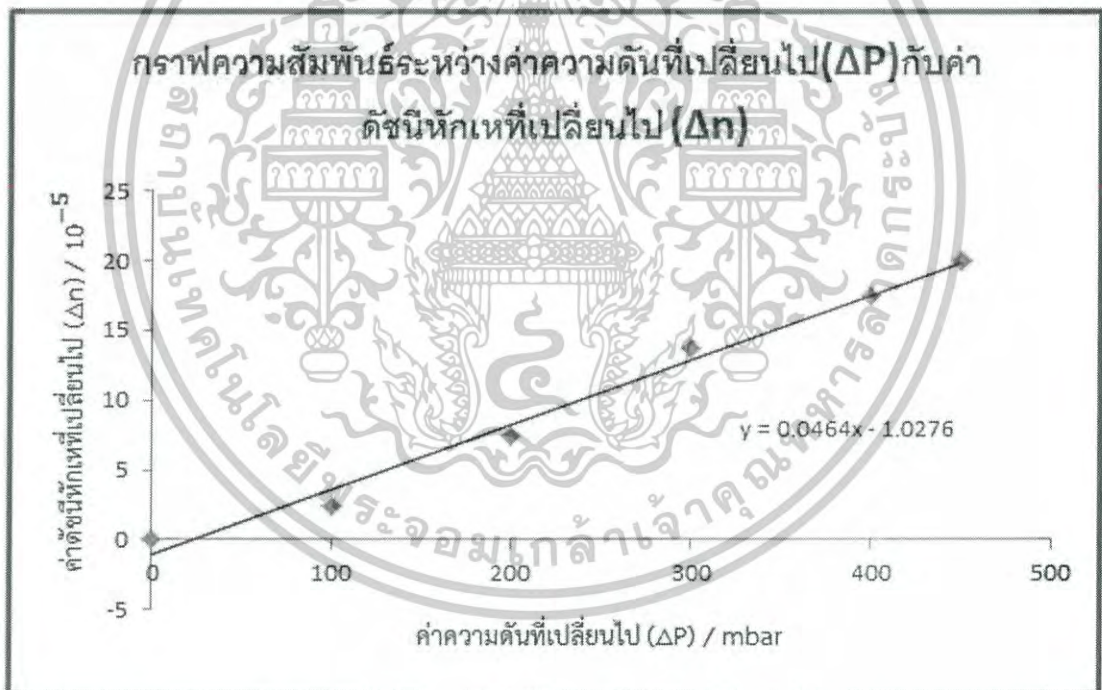
$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{1} \\ &= \frac{[(1.000455 - 1.000036) / 1.000036] \times 100\%}{1} \\ &= 0.0418 \% \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองดัชนีหักเหแสงในก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสค่าเฉลี่ย

ค่าความดันที่เปลี่ยนไป (ΔP) / mbar	จำนวนริ้วการแทรกสอดที่ เกิดขึ้น (Δm)	ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลง ไป (Δn) / 10^{-5}
100	4	2.4924
200	12	7.4762
300	22	13.7064
400	28	17.4445
450	32	19.9365



รูปที่ 4.11 : กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันที่เปลี่ยนไปกับค่าดัชนีหักเหของแสงในก๊าซฮีเลียมที่เปลี่ยนไป ค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* * คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห จาก $\Delta n = (\Delta m \lambda) / L_x$
 โดยที่ λ มีค่าเป็น 632.8 นาโนเมตร
 L_x มีค่าเป็น 101.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า: } n_{air} &= (\text{slope} \times P_{atm}) + 1 \\ &= (0.0464 \times 10^{-2} \times 1.013) + 1 \\ &= 1.000470 \end{aligned}$$

ค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้ เทียบกับ ค่าดัชนีหักเหก๊าซฮีเลียมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 1.000036

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \frac{[(\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่ามาตรฐาน}) / \text{ค่ามาตรฐาน}] \times 100\%}{=} \\ &= \frac{[(1.000464 - 1.000036) / 1.000036] \times 100\%}{=} \\ &= 0.0434 \% \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองจะพบว่าการติดตั้งระบบการแทรกสอดของแสงแบบมัคซ์-เชนเดอร์นั้นเป็นการรวมกันของคลื่นแสงสองลำที่เกิดการแยกออกมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแหล่งเดียวกันแล้วปรับเปลี่ยนเส้นทางเดินของลำแสงโดย Beam splitter จากนั้นลำแสงจะเดินทางไปกระทบกับแผ่นกระจกสะท้อน 100% ที่วางทำมุม 45 องศา เมื่อแสงเดินทางกลับมารวมกันที่ตำแหน่งของ Beam splitter ตัวที่ 2 แสงจะเกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกัน และตกกระทบลงบนฉากรับแสง จะแสดงให้เห็นออกมาในรูปแบบของริ้วการแทรกสอดของแสง การวางตำแหน่งของ Beam splitter นั้นมีผลต่อการเกิดริ้วการแทรกสอดของแสง วิธีการวางตำแหน่งของ Beam splitter คือต้องวางให้เสมือนว่าตัว Beam splitter เกือบตั้งฉากกับทิศทางเดินของแสงถึงจะทำให้ปรากฏริ้วการแทรกสอดของแสงได้

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

- 5.2.1 การเคลื่อนของตัว Beam splitter ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของริ้วการแทรกสอดอยู่บ่อยครั้ง
- 5.2.2 ระดับความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของจำนวนริ้วการแทรกสอดของแสง
- 5.2.3 ผลกระทบที่เกิดจากความเข้มของแสงในบางที่อาจทำให้ริ้วการแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งในส่วนนี้ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ตลอดเวลาของการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

Bender the Bot(นามแฝง). (2016). Mach-Zehnder interferometer. Retrieved from.
https://en.wikipedia.org/wiki/Mach%E2%80%93Zehnder_interferometer

David M. Harrison. (2005). Mach-Zehnder Interferometer. Retrieved from.
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/MachZehnder>

MO Memoir(นามแฝง). (2555). ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น.
 สืบค้นจาก. <http://tamagozilla.blogspot.com/2012/09/absorbance-mo-memoir-saturday-22.html>

physics03(นามแฝง). (2554). การซ้อนทับของคลื่น (Superposition of wave). สืบค้นจาก.
<http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin>

sss27889(นามแฝง). (2010). การซ้อนทับของคลื่น(Superposition of waves). สืบค้นจาก.
<http://thaigoodview.com/node/76457>

อรพรรณ ไวแพน. (2558). สมบัติของคลื่น. สืบค้นจาก.
<https://orapanwaipan.wordpress.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Switching behavior of a nonlinear Mach–Zehnder interferometer: Saturating nonlinearity

Arpita Srivastava, S. Medhekar*

Department of Applied Physics, Birla Institute of Technology, Mesra, Ranchi 835215, India

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 June 2010

Received in revised form

10 March 2011

Accepted 10 March 2011

Available online 29 March 2011

Keywords:

All-optical switching

Saturating nonlinearity

Mach–Zehnder Interferometer

ABSTRACT

This paper uses the Beam Propagation Method to investigate numerically the switching behavior of a Nonlinear Mach–Zehnder Interferometer (NMZI). A saturating-type nonlinearity has been considered for the present investigations. It is shown that the input versus output characteristics change drastically when a Kerr type nonlinear medium is replaced by a saturating type nonlinear medium. In contrast to an NMZI with Kerr nonlinearity, where only quantitative behavior changes with NMZI length, quantitative as well as qualitative behaviors change in the case of a saturating nonlinearity. We propose an all-optical stabilizer and MZI with stable “ON” and “OFF” states on the basis of our investigation.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

One of the most important components in integrated optical circuits is the Mach–Zehnder Interferometer (MZI). MZI has been extensively utilized in multiplexing and modulation [1], as a low-loss combiner [2], in WDM applications [3] and as an optical power limiter [4]. Nonlinear Mach–Zehnder Interferometers (NMZI), in which one or both arms are made-up of nonlinear materials, have been thoroughly studied for all-optical versions of optical devices [5–12].

A detailed analysis on the effect of changing geometrical (length) and physical (refractive index, nonlinear coefficient, etc.) parameters of an NMZI on its *I–O* characteristic [13] and performance as an optical switch [14] have been reported. In both these works, Kerr type nonlinearity was considered.

In this paper, considering saturable nonlinearity and using the Beam Propagation Method (BPM), we have thoroughly investigated the *I–O* characteristic of an NMZI and have compared it with the *I–O* characteristic of an NMZI with Kerr nonlinearity. It is shown that the nature of *I–O* characteristic changes drastically when Kerr type nonlinear medium is replaced by a saturating type nonlinear medium. In case of NMZI with Kerr nonlinearity, only quantitative behavior changes with NMZI length [13], whereas, it is shown in the present investigation that quantitative as well as qualitative behavior changes in case of saturating nonlinearity. At the end, we have proposed all-optical stabilizer

and MZI with stable “ON” and “OFF” states on the basis of our investigation.

2. Theory and numerical investigation

The considered NMZI consists of two 3 dB directional couplers at the input (DC1) and output sides (DC2) as shown in the Fig. 1. One arm (NLA) of the NMZI is made-up of a saturable nonlinear material, the other arm (LA) of a linear material. P_1 is the input port and P_{o1} is the output port of the NMZI.

When an input beam is launched onto the input port P_1 , it is split into two equal parts by the 3-dB couplers. One part propagates through the NLA (nonlinear arm) and its counterpart through the LA (linear arm). The part propagating through the NLA experiences self-phase modulation (SPM). If the effective optical path lengths of both LA arm and NLA are same, the split parts of the beam recombine with “in-phase” condition at (and reach at) P_{o2} and if their difference is equal to half of wavelength, they recombine with “in-phase” condition at P_{o1} .

We consider a laser (coherent) beam injected into the NMZI, the beam, in the paraxial approximation, could be described by the equation [11,15]

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -i \frac{1}{2kn_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - ik[n(x,z) - n_0]E \quad (1)$$

Here, E is transverse field envelop $[= \sqrt{I} \exp(x^2/2x_0^2)]$ of the beams, I the axial intensity, x the transverse coordinate, x_0 the width of input beam, $k = 2\pi/\lambda$ the free space propagation constant, n_0 the refractive index of substrate and $n(x,z)$ is refractive index of

* Corresponding author.
E-mail address: sarangmedekar@rediffmail.com (S. Medhekar).

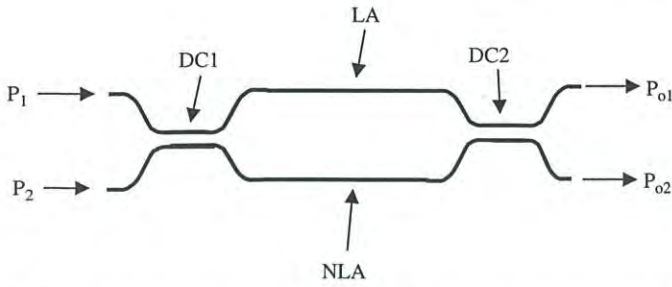


Fig. 1. Considered Nonlinear Mach-Zehnder Interferometer (NMZI) is consisting of two 3 dB directional couplers at input (DC1) and output sides (DC2) as shown. One arm (NLA) of the NMZI is made-up of a saturable nonlinear material, the other arm (LA) of a linear material. P_1 is the input port and P_{o1} is the output port of the NMZI.

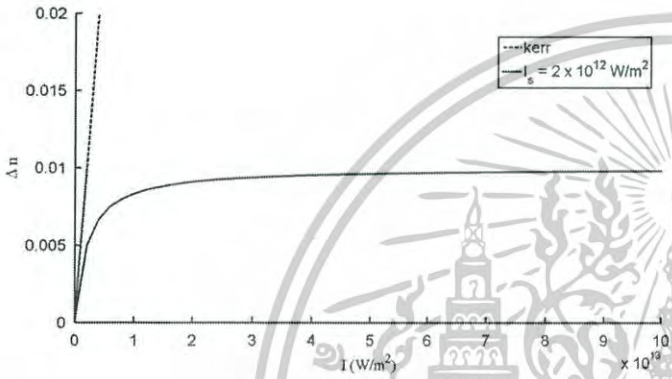


Fig. 2. With $I_s = 2 \times 10^{12} \text{ w/m}^2$, intensity dependent part of refractive index (Δn) varies with input power ($I \approx E^2$) as shown by solid curve. Dashed line shows the same for Kerr nonlinearity.

fabricated structure. $n(x,z)$ is expressed as [11]

$$n(x,z) = \begin{cases} n_L(x,z) & \text{(for LA)} \\ n_{NL}(x,z) + \Delta n(x,z) & \text{(for NLA)} \end{cases} \quad (2)$$

where $n_L(x,z)$ is the refractive index of the linear arm, $n_{NL}(x,z)$ is the constant part of the refractive index of the nonlinear arm and $\Delta n(x,z)$ is its intensity dependent refractive index change which is expressed as [16]

$$\Delta n(x,z) \approx \frac{n_2(|E|^2)}{1 + |E|^2/I_s^2} \quad (3)$$

where I_s is a saturating intensity and n_2 is nonlinearity coefficient of nonlinear arm.

The chosen parameters of MZI are refractive index of substrate $n_0 = 1.5$, change in refractive index of LA and NLA's $\Delta n_L = \Delta n_{NL} = [n_L(x, z) - n_0] = 0.3\%$, core width $2a = 8 \mu\text{m}$, separation of two waveguides is $25 \mu\text{m}$, and the chosen length (L) of both the LA and NLA is $800 \mu\text{m}$. The nonlinear coefficient n_2 of the NLA material is considered to be equal to $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ and $I_s = 2 \times 10^{12} \text{ w/m}^2$ [17]. The wavelength of input beam is $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. In the present paper, I - O characteristics of the considered NMZI have been obtained by solving Eq. (1) using the Split Step Fourier Method or Beam propagation Method (BPM) [15,18].

With the mentioned value of I_s , the intensity dependent part of refractive index (Δn) varies with input power ($I \approx |E|^2$), as shown by solid curve in Fig. 2. The same for Kerr nonlinearity is shown by dashed line for comparison.

The mentioned NMZI remains in the "OFF" state (at P_{o1}) when the input power is very small ($I \approx 10 \text{ W/m}^2$) as seen in Fig. 3. The figure has been obtained by solving Eq. (1).

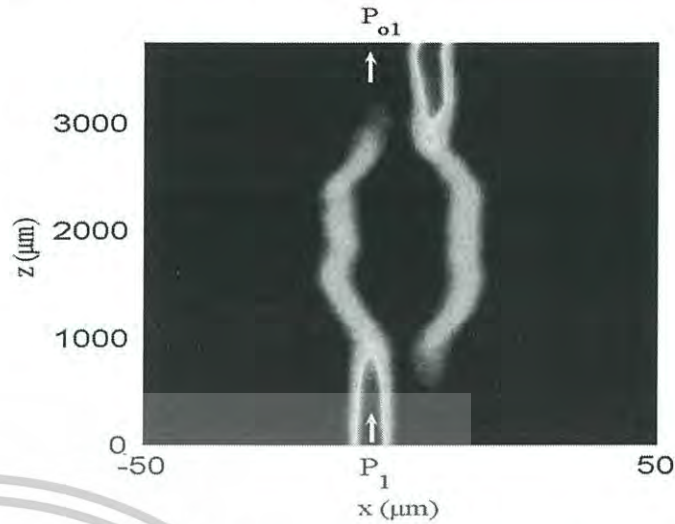


Fig. 3. With the parameters mentioned in the text, the NMZI remains in "OFF" state (at P_{o1}) when the input power is very small ($I \approx 10 \text{ w/m}^2$).

To examine the effect of input intensity (I) on the transmission coefficient ($T = I_o/I$) of the NMZI, the Gaussian beam has been considered at the input and input versus transmission coefficient (I - T) characteristic is determined by varying I in the range 0 - 10^{12} W/m^2 .

It is worth to be mentioned here that I_o could be estimated by knowing the beam's axial electric field at the output of the NMZI [by solving Eq. (1)] and by assuming that a Gaussian mode with the same axial electric field would couple if any single moded waveguide is connected at the output of the NMZI [11–14].

The solid curve of the Fig. 4a shows variation of the transmission coefficient T of the mentioned NMZI with respect to the input power I and Fig. 4b shows variation of the output power I_o of the NMZI with the input power I . The dashed curves in these figures are for NMZIs with Kerr type nonlinearity and have been plotted here for comparison. It may be mentioned here that for a given NMZI and wavelength, the axial intensity is proportional to the power of the beam and therefore one may crudely use the term "power" in place the "axial intensity".

One can see appreciable difference in the I - O characteristics of NMZIs with Kerr and saturable nonlinearity and the difference is more at higher intensities. Next we see the effect of NMZI length on its I - O characteristic. Fig. 5a shows variation of the transmission coefficient T of the NMZI with the input power I for different NMZI lengths $L = 800, 500, 200$ and $160 \mu\text{m}$. One can see here a remarkable departure from the same characteristic of a Kerr type NMZI. In a Kerr type NMZI the sole effect of increasing length is that T changes more rapidly with I [13]; the nature of the characteristic remains the same. However, one can see in Fig. 5a that the characteristic changes quantitatively as well as qualitatively in case of NMZI with saturable nonlinearity.

I - O characteristic corresponding to Fig. 5a is shown in Fig. 5b. One can note the dramatic change in the characteristic with NMZI length.

2.1. All-optical stabilizer

We are particularly interested in the I - O characteristic of Fig. 5b shown by solid curve, which is for an NMZI length $L = 160 \mu\text{m}$ and therefore we focus our investigation on it. To further examine it, we redraw the same in a wider range as shown by solid curve in Fig. 6. The dashed curve is for an NMZI of slightly smaller ($L = 150 \mu\text{m}$) length and dotted for NMZI of slightly larger

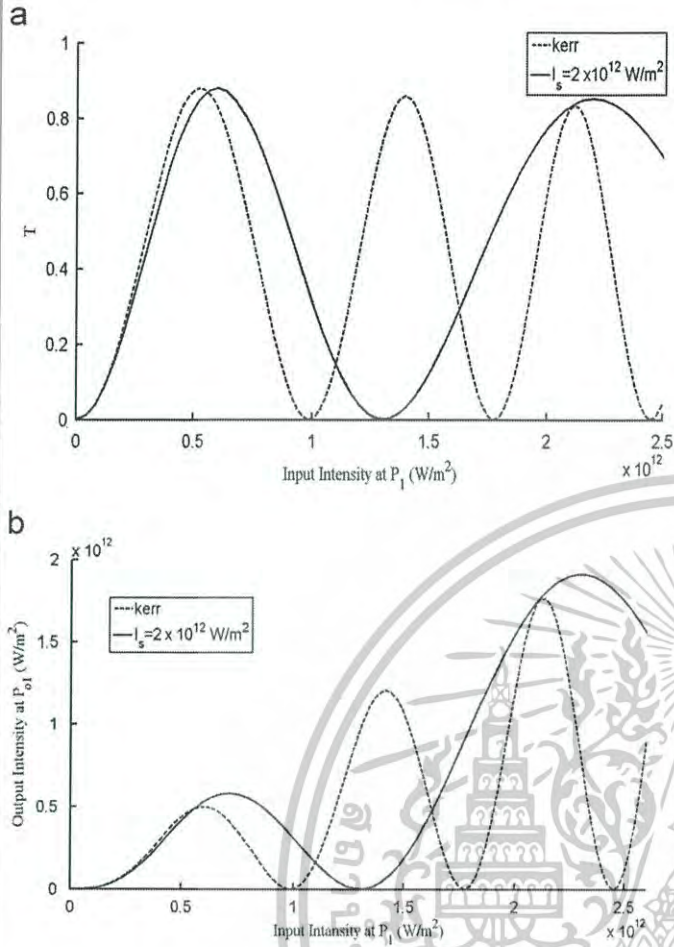


Fig. 4. (a) Solid curve of the figure shows variation of the transmission coefficient T of the NMZI with respect to the input power I . Dashed curve in the figure is for NMZI with Kerr type nonlinearity and has been plotted here for comparison. (b) Variation of the output power I_o of the NMZI with the input power I .

($L = 170 \mu\text{m}$) length. Dashed-dotted curve is for NMZI of $L = 160$ with Kerr type nonlinearity.

It can be seen in the solid curve that the output of the NMZI is almost independent of the input and fairly stable in a wide range of input. We propose an all-optical stabilizer made-up of an NMZI with saturating nonlinearity on the basis of this characteristic.

2.2. Stable "ON" and "OFF" states

Though all conventional MZIs (by conventional we mean refractive index does not saturate and almost linearly changes with the cause) are marvelous devices for integrated optics, the major problem with those are that their ON and OFF states are quite unstable against power fluctuations and a small variation in the input may lead to undesirable performance. The solid curve of Fig. 6 promises quite stable ON and OFF states.

Though this paper is not intended to investigate the dynamic behavior of the switching mechanism, it would be informative to mention that the switching time of a device is determined by the response time of the nonlinear material used in the device; switching speed is inversely proportional to the response time. The response time is determined by the mechanisms that contribute most strongly to the nonlinearity. For example, materials with nonlinearity arising due to bound electrons have response time of the order of 10^{-15} s and that due to optically created free carriers, Raman-active optical phonons, electrostriction and thermal excitation have response time of the order of 10^{-12} ,

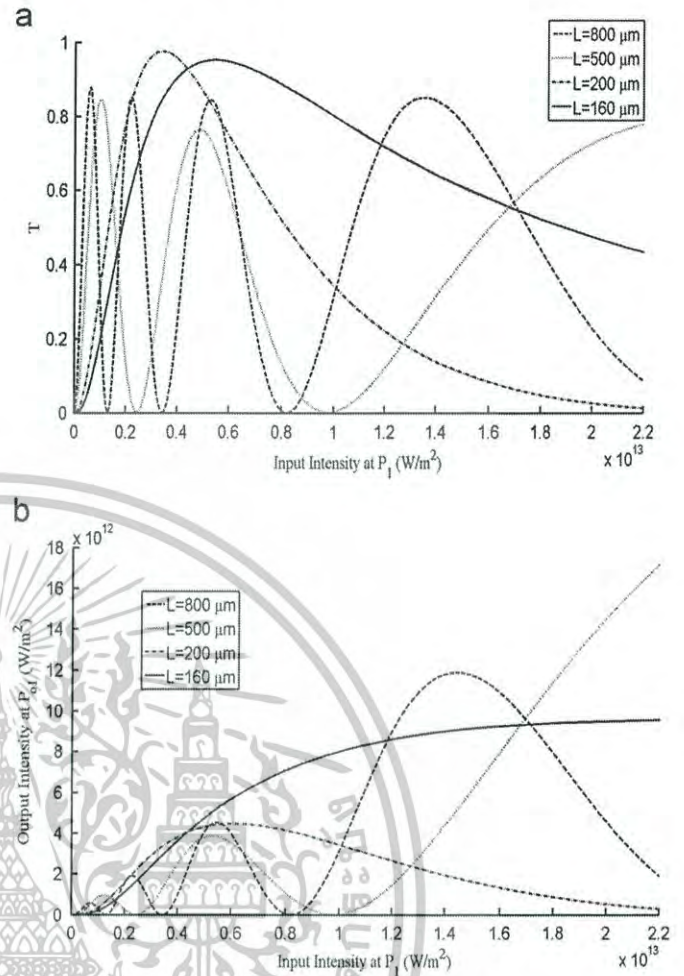


Fig. 5. (a) Variation of the transmission coefficient T of the NMZI with the input power I for different NMZI lengths $L = 800, 500, 200$ and $160 \mu\text{m}$. One can see in figure that the characteristic changes quantitatively as well as qualitatively in case of NMZI with saturable nonlinearity. (b) I - O characteristic corresponding to (a) is shown in the figure. One can note the dramatic change in the characteristic with NMZI length.

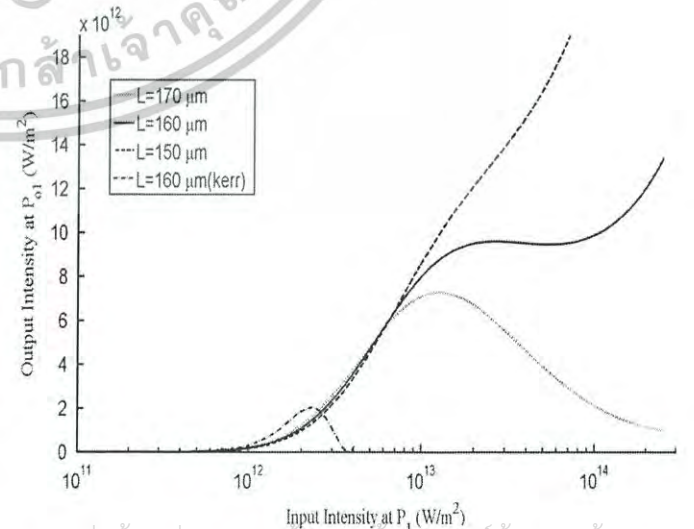


Fig. 6. To examine solid curve of Fig. 5b, which is for NMZI length $L = 160 \mu\text{m}$, the figure has been redrawn in a wider range as shown by solid curve here. Dashed curve is for NMZI of slightly smaller length $L = 150 \mu\text{m}$ and dotted for NMZI of slightly larger length $L = 170 \mu\text{m}$.

10^{-12} , 10^{-9} and 10^{-9} s, respectively [19]. Kerr materials like silica glass are extremely fast as the origin of their nonlinearity is bound electrons. The time response of some saturable nonlinear media, like cubic quintic media (for example, polydiacetene paratoluene sulfonate) is very fast, the linear loss is low, and multi-photon absorption is negligible making these ideal for ultra fast switching devices [20].

3. Conclusion

In conclusion, using the Beam Propagation Method, we have thoroughly investigated the I - O characteristics of an NMZI with saturable nonlinearity and have compared it with the I - O characteristics of an NMZI with Kerr nonlinearity. The nature of I - O characteristic changes drastically when Kerr type nonlinear medium is replaced by a saturating type nonlinear medium. In case of NMZI with Kerr nonlinearity only quantitative behavior changes with NMZI length, whereas, quantitative as well as qualitative behavior changes in case of saturating nonlinearity. We have also proposed all-optical stabilizer and MZI with stable “ON” and “OFF” states on the basis of our investigation.

Acknowledgments

AS acknowledges funding from the Women Scientist Scheme A (WOS-A) of the Department of Science and Technology, DST, Govt. of India, through research project [No. SR/WOS-A/PS-19/2008], SM acknowledges funding from the Department of Science and Technology, DST, Govt. of India, through research project [SR/S2/LOP-27/2007].

References

- [1] Hansen PB, Gnauck AH. A dual-drive Ti:LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator used as an optoelectronic logic gate for 10-Gb/s simultaneous multiplexing and modulation. *IEEE Photonics Technology Letters* 1992;4(6):592.
- [2] Van der Tol JJGM, De Waardt H, Liu YA. Mach-Zehnder-interferometer-based low-loss combiner. *IEEE Photonics Technology Letters* 2001;13(11):1197–9.
- [3] Yoshimoto N, Shibata Y, Oku S, Kondo S, Noguchi Y. High-input-power saturation properties of a polarization-insensitive semiconductor Mach-Zehnder interferometer gate switch for WDM applications. *IEEE Photonics Technology Letters* 1998;10(4):531–3.
- [4] Pleros N, Kanellos GT, Bintjas C, Hatziefremidis A, Avramopoulos H. Optical power limiter using a saturated SOA-based interferometric switch. *IEEE Photonics Technology Letters* 2004;16(10):2350–2.
- [5] Kim JH, Byun YT, Jhon YM, Lee S, Woo DH, Kim SH. All-optical half adder using semiconductor optical amplifier based devices. *Optics Communications* 2003;218:345–9.
- [6] Houbavlis T, Zoiros KE, Kanellos G, Tsekrekos C. Performance analysis of ultrafast all-optical Boolean XOR gate using semiconductor optical amplifier-based Mach-Zehnder interferometer. *Optics Communications* 2004;232:179–99.
- [7] Wang Q, Zhu G, Chen H, Jaques J, Leuthold J, Piccirilli AB, Dutta NK. Study of all-optical XOR using Mach-Zehnder interferometer and differential scheme. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 2004;40(6):703–10.
- [8] Kim JY, Kang JM, Kim TY, Han SK. All-optical multiple logic gates with XOR, NOR, OR, and NAND functions using parallel SOA-MZI structures: theory and experiment. *IEEE Journal of Lightwave Technology* 2006;24(9):3392–9.
- [9] Yabu T, Geshiro M, Kitamura T, Nishida K, Sawa S. All-optical logic gates containing a two-mode nonlinear waveguide. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 2002;38(1):37–46.
- [10] Wescott M, Chen G, Zhang Y, Bagley B, Deck R. All-optical combiner-splitter and gating devices based on straight waveguides. *Applied Optics* 2007;46(16):3177.
- [11] Medhekar S, Paltani PP. Novel all-optical switch using nonlinear Mach-Zehnder interferometer. *Fiber and Integrated Optics* 2009;28(3):229.
- [12] Medhekar S, Paltani PP. All optical passive transistor using counter propagating beam in a nonlinear Mach-Zehnder interferometer. *Fiber and Integrated Optics* 2009;28(4):268–74.
- [13] Srivastava A, Paltani PP, Medhekar S. Switching behaviour of a nonlinear Mach-Zehnder interferometer. *Pramana* 2010;74:575–90.
- [14] Srivastava A, Medhekar S. Switching of one beam by another in a Kerr type nonlinear Mach-Zehnder interferometer. *Optics and Laser Technology* 2011;43:29–35. doi:10.1016/j.optlastec.2010.04.021.
- [15] Okamoto K. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press; 2002. p. 274.
- [16] Adib B, Heidari A, Tayyari SF. An analytic approach to soliton of the saturable non-linear Schrodinger equation determination and consideration of stability of solitary solution of cubic-quintic non-linear Schrodinger equation (QNLS). *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 2009;14:2034–45.
- [17] Bradley Piero J, De Angelis Costantino. Soliton Dynamics and surface waves at the interface between Saturable nonlinear Dielectrics. *Optics Communications* 1996;130:205–18.
- [18] Agrawal GP. *Nonlinear Fiber Optics*. Third edition. Academic Press; 2001. p. 262.
- [19] Chase LL, Van Stryland EW. *Handbook of Laser Science and Technology*. Boca Raton: CRC Press; 1995. p. 269.
- [20] Dimitrevski K, Reimhult E, Svensson E, Ohgren A, Anderson D, Berntson A, Lisak M, Quiroga-Teixeiro ML. Analysis of stable self-trapping of laser beams in cubic-quintic nonlinear media. *Physics Letters A* 1998;248:369–76.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Overview

Related topics

Interference, wavelength, refractive index, speed of light, phase, virtual light source.

Principle

Light is brought to interference by two mirrors and two beam splitters in the Mach-Zehnder arrangement. By changing the pressure in a measuring cell located in the beam path, one can deduce the refractive index of air.

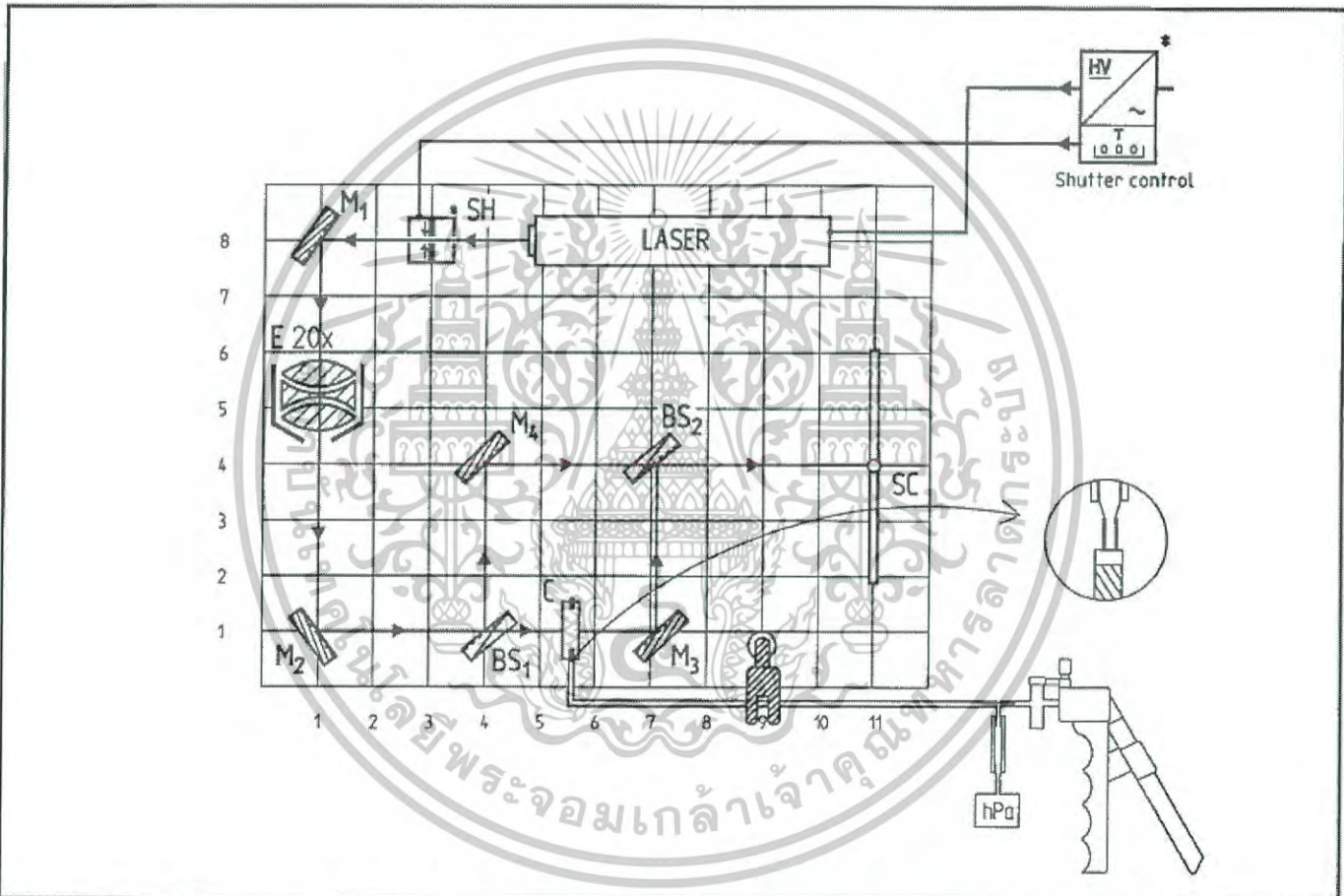


Fig. 1. Experimental set-up for the determination of the refractive index of air with the Mach-Zehnder interferometer.

Objectives

- Construction of a Mach-Zehnder interferometer using individual optical components.
- Measurement of the refractive index n of air by lowering the air pressure in a measuring cell.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equipment

1	Base plate with rubber feet	08700-00
1	HeNe Laser, 5 mW	08701-00
1	Power supply and switch for 5-mW laser	08702-93
10	Magnetic base	08710-00
4	Surface mirror, 30 x 30 mm	08711-01
4	Adjusting support, 35 x 35 mm	08711-00
1	Transverse manipulator, horiz.	08713-00
2	Adjusting device, xy	08714-00
1	Adapter ring	08714-01
1	Pinhole diaphragm, 30 μ m	08743-00
1	Objective, 20x	62174-02
2	Plate holder	08719-00
2	Beam splitter, 50:50	08741-00
1	Screen, white, 150 x 150 mm	09826-00
1	Cell holder with stem	08706-00
1	Glass cell, $d = 21.5$ mm	08625-00
1	Hand vacuum pump	08745-00
1	Manometer, digital	03106-00
1	Universal clamp with joint	37716-00
1	Connecting piece, T-shaped, $d_i = 8-9$ mm	47519-03
1	Reducing adapter 8/4 mm	47517-01
1	Vacuum hose, $d_i = 6$ mm, 6 x 5, 1 m	39286-00
1	Silicone tubing, $d_i = 3$ mm, 1 m	39292-00

Setup and procedure

- Perform the experimental setup according to Fig. 1. In the following, the pairs of numbers in brackets [...] refer to the co-ordinates on the optical base plate. The recommended setup height (beam path height) is 130 mm. These co-ordinates are only intended to be a rough guideline for making adjustments.
- To begin with, adjust the beam path only with the mirrors M_1 [1,8] and M_2 [1,1] at beam path height and align the beam along the 1st y co-ordinate of the optical base plate.
- The beam - initially without the beam splitter BS_1 - strikes the adjustable mirror M_3 [7,1], which reflects the beam to the beam splitter BS_2 [7,4] along the 7th x co-ordinate on the optical base plate. The beam splitter BS_2 (its metallized side facing mirror M_3) in turn reflects a partial beam to screen SC [11,4] along the 4th y co-ordinate on the optical base plate.
- Now, place the beam splitter BS_1 [4,1] in the beam path (its metallized side facing mirror M_2) in such a manner that a partial beam still strikes mirror M_3 without hindrance. The other partial beam is reflected by beam splitter BS_1 onto mirror M_4 [4,4] (along the 4th x co-ordinate on the optical base plate). This beam is now reflected by the mirror along the 4th y co-ordinate on the optical base plate, where it also strikes beam splitter BS_2 . Here, a beam fraction strikes screen SC [11,4] without changing directions.
- Two spots of light appear on screen SC . Bring them to coincidence with the fine adjustment of mirrors M_3 and M_4 such that a slight flickering of the light spots occurs.
- Place the expansion system $E20x$ [1,5] (for information on its use, see below) in the laser beam's path. The latter is thus expanded and appears as an illuminated area on the screen. At

this time interference fringes can probably already be seen; if not, minor readjustment of mirrors M_3 and M_4 makes them visible.

- After completing these adjustments, place the cell **C** [5.5, 1] upright with its front surfaces perpendicular to the direction of light propagation between mirror M_3 and beam splitter **BS**₁.
- Attach the hand pump via a hose, which is itself fixed to a magnetic base with a universal clamp, to an opening of the cell. In accordance with Fig. 1, connect a digital manometer via a piece of tubing with it. Seal the second opening in the cell with a stopper.
- Reduce the pressure in the cell with the hand pump. As soon as a change from maximum to maximum (or minimum to minimum) occurs at a previously determined arbitrary point on the screen, record the pressure and the corresponding number of maxima (or minima) which have been passed through.
- Note: Since the light beam passes through the cell only once, the possible number of intensity changes is half as large as for the Michelson interferometer with the same pressure change. This reduces the measuring accuracy.
- On using the beam expansion system:
Position the **E20x** expansion system without its objective and pinhole diaphragm, but equipped with its adjustable diaphragms, in the beam path. Now, align it in such a manner that the beam passes through the system (i.e., its apertured diaphragms) without hindrance. Now replace these diaphragms with the objective and the pinhole diaphragm. Move the pinhole diaphragm toward the focal point of the objective: to begin with, a maximum amount of diffuse light should strike it; later ensure that the expanded beam does. While moving the objective and pinhole diaphragm toward each other, successively adjust them laterally in order to ultimately provided an expanded beam without refraction phenomena. Additional information is available in the appendix A1 of this manual.

Theory and Evaluation

About the Mach-Zehnder interferometer: If two waves having the same frequency ω but different amplitudes and different phases are coincident at one location, they superimpose to

$$Y = \alpha_1 \cdot \sin(\omega \tau - \alpha_1) + \alpha_2 \cdot \sin(\omega \tau - \alpha_2).$$

The resulting wave can be described by the following:

$$Y = A \cdot \sin(\omega \tau - \alpha)$$

with the amplitude

$$A^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \cos \delta \quad (1)$$

and the phase difference

$$\delta = \alpha_1 - \alpha_2 .$$

In a Mach-Zehnder interferometer, light is split by a semitransparent (half-silvered) glass plate into two partial beams (amplitude splitting). These beams then follow two different paths - in contrast to the Michelson interferometer - and are brought together at an additional beam splitter (see Fig. 2). Since only extensive light spots can exhibit interference phenomena, the light beam is expanded between the laser and the glass plate by an expansion system **E20x**.

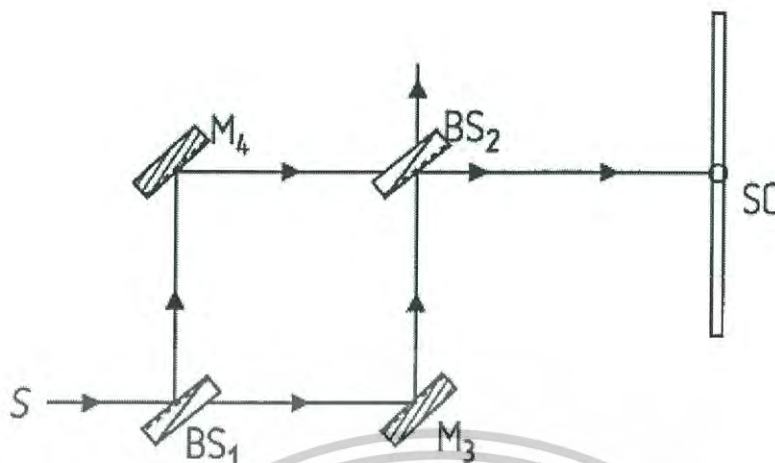


Fig. 2: Mach-Zehnder arrangement for interference. S represents the light source; SC , the detector (or the screen).

one replaces the real mirror M_4 by a virtual image M_4' , which is formed by reflection at the beam splitter. The true light source S appears as the virtual light sources S_1 and S_2 . Due to the different light paths, and using the designations in Fig. 3, the phase difference is given by:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot d \cdot \cos\theta \quad (2)$$

is the wavelength of the laser light used.

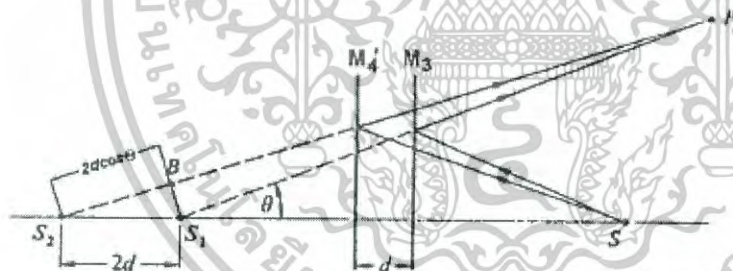


Fig. 3: Formation of interference patterns with parallel mirrors.

According to (1), the intensity distribution for $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ is:

$$I \sim A^2 = 4 \cdot \alpha^2 \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

Maxima thus occur when δ is equal to a multiple of 2π , hence with (2)

$$2 \cdot d \cdot \cos\theta = m \cdot \lambda; \quad m = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Therefore, there exist circular fringes for a selected, fixed value of m , and d , since θ remains constant (see Fig. 4). In most cases the slightly careless adjustment of the interferometer results in the mirror surfaces of M_3 and M_4 being inclined toward each other; this gives rise to the formation of so-called Fizeau fringes (see Fig. 4).

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

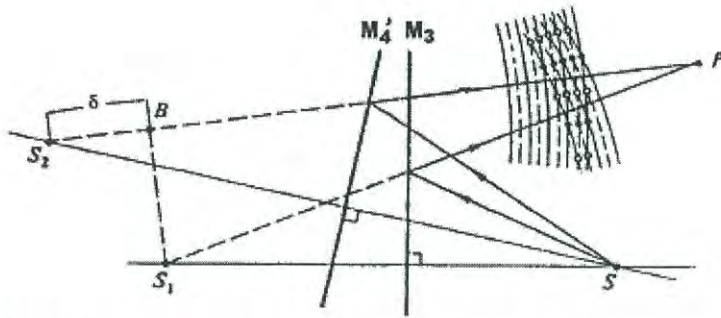


Fig. 4: Formation of interference patterns with mirrors that are tilted toward each other - Fizeau fringes.

However, the correlation between the optical path length change and the phase difference in a change from one maximum intensity of interference fringes to the next one at fixed observation point is retained. This means that a change of maximum to maximum occurs when the phase difference changes by 2π (or by λ).

On the determination of the refractive index of air:

To measure the refraction n of air, an air-filled cell with plane-parallel boundaries is used (see Fig. 5).

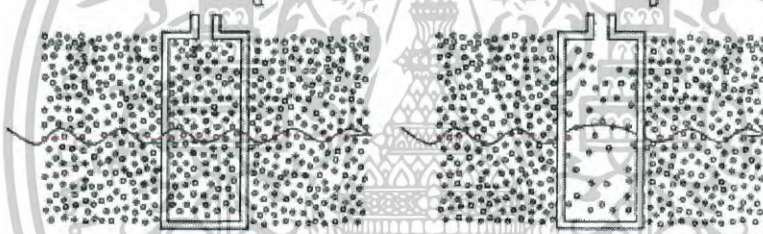


Fig. 5: Schematic representation of the cell with normal pressure (a) and nearly absolute vacuum (b).

The refractive index n of a gas is a linear function of the pressure P . For pressure $P = 0$ an absolute vacuum exists so that $n = 1$.

$$n(p) = n(p=0) + \frac{\Delta n}{\Delta P} \cdot P \quad (5)$$

From the measured data, the difference quotient $\Delta n / \Delta P$ is first determined:

$$\frac{\Delta n}{\Delta P} = \frac{n(P + \Delta P) - n(P)}{\Delta P} \quad (6)$$

The following is true for the optical path length d :

$$d = n(P) \cdot s \quad (7)$$

where $s = 2 \cdot l$ is the geometric length of the evacuated cell and $n(P)$ is the refractive index of the gas present in the chamber. The fact that the path is traversed only once is to be taken into consideration. As a consequence of this, the optical path length is altered by Δd each time the pressure in the cell varies by ΔP :

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta d = n(P + \Delta P) \cdot s - n(P) \cdot s \quad (8)$$

On the screen one sees the change in the interference pattern with change in pressure (change from maximal to minimal intensity at a specific location).

Proceeding from ambient pressure P_0 , one observes the recurrence of the initial position of the interference pattern N times (i.e., the occurrence of an intensity minimum at the observation location) until a specific pressure P has been reached. A change from minimum to minimum corresponds to a change in the optical path length by the wavelength λ .

Between the pressures P and $P + \Delta P$ the optical wavelength thus changes by

$$\Delta d = (N(P + \Delta P) - N(P)) \cdot \lambda \quad (9)$$

From (8) and (9) and under consideration of the fact that the cell is traversed by light only once (in contrast to the case in the Michelson interferometer!), it follows that:

$$n(P + \Delta P) - n(P) = (N(P + \Delta P) - N(P)) \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (10)$$

and with (6) and $\Delta N = N(P + \Delta P) - N(P)$ the following results:

$$\frac{\Delta n}{\Delta P} = \frac{\Delta N}{\Delta P} \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (11)$$

Sample measurement:

For a pressure reduction of approximately -800 hPa, 3 to 3.5 intensity changes from maximum to maximum were measured.

With a light wavelength of $\lambda = 632.8$ nm and a geometric internal cell length of $s = 10$ mm, the refractive index can be determined according to equations (11) and (5).

$$n(P) = 1 + \frac{\Delta n}{\Delta P} \cdot P = 1 + \frac{\Delta N}{\Delta P} \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot P = 1 + \frac{3.25}{800} \cdot \frac{632.8 \cdot 10^{-9}}{0.01} \cdot 1013 = 1.00026$$

This provides a refractive index of $n = 1.00026(2)$. The corresponding literature value* for normal pressure ($P = 1013$ hPa), a temperature of 22 °C and for a light wavelength of $\lambda = 632$ nm is $n = 1.000269$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Literature: Taschenbuch für Chemiker und Physiker; Ed. Dr. Jean D'Ans, Springer Verlag 1949