

การสร้างแตรนสควเซอร์ไลน์โพกัสเพือการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุ



นายปรกรณ์ ปรืชาบูรณะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1631-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONSTRUCTION OF A LINE-FOCUS TRANSDUCER
FOR MATERIAL CHARACTERIZATION



Mr. Pakorn Preechaburana

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics

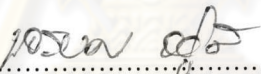
Department of Physics
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2004
ISBN 974-53-1631-4

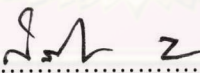
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างทรานสดิวเซอร์ไลน์โพกัสเพื่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุ
โดย นายปกรณ์ ปรีชาบุรณะ
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ต์ รัตนธรรมพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ชนะ ผิวล่อง

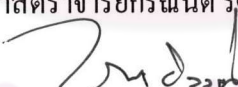
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ต์ รัตนธรรมพันธ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ชนะ ผิวล่อง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ขรรยง)

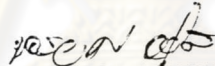

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ตันพงษ์ แก้วคงคา)


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างแทนสควเซอร์ไลน์โฟกัสเพื่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุ
โดย นายปกรณ์ ปรีชาบุรณะ
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ศักดิ์ รัตนธรรมพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ชนะ ผิวล่อง

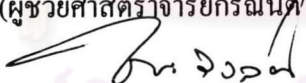
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ศักดิ์ รัตนธรรมพันธ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ชนะ ผิวล่อง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ขจรยง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)

ปกณ์ ปรึชาบูรณะ : การสร้างทรานสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสเพื่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุ. (CONSTRUCTION OF A LINE-FOCUS TRANSDUCER FOR MATERIAL CHARACTERIZATION) อ. ที่ปรึษา: ผศ.กริณันต์ รัตนธรรมพันธ์, อ. ที่ปรึษาร่วม: อ.ชนะ ผิวล่อง จำนวนหน้า 97 หน้า. ISBN 974-53-1631-4.

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างทรานสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสขึ้นเพื่อการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุ สามารถสร้างได้โดยการโค้งฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ลงบนพื้นผิวของฐานรองรับรูปทรงกระบอก ตามด้วยการเทกาวอีพ็อกซีที่ผสมผงทังสเทนเพื่อยึดฟิล์ม PVDF กับกล่องอลูมิเนียม ได้สร้างทรานสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสทั้งหมด 5 ตัว ซึ่ง 3 ตัวแรกมีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหุนรองเท่ากับ 2.69 3.91 และ 7.37 Mrayl และมีความหนา 6 มิลลิเมตรเท่ากัน ส่วนอีก 2 ตัว มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหุนรองเท่ากับ 3.91 Mrayl และมีความหนา 9 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ ทดสอบการทำงานของทรานสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวด้วยวงจรพัลส์เซอร์รีซีฟเวอร์ที่สร้างขึ้น พบว่าความกว้างของพัลส์สะท้อนกลับของทรานสดิวเซอร์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.60 ถึง 0.88 ไมโครวินาที นำทรานสดิวเซอร์ตัวที่มีความกว้างของพัลส์สะท้อนกลับน้อยที่สุดไปใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุโดยวิธีดีโฟกัสซิงเทคนิค (defocusing technique) วัดอัตราเร็วของคลื่นตามยาว อัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง ค่ามอดูลัสเฉือน ค่ามอดูลัสก้อน และค่าความหนาแน่นของวัสดุจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ กระจกโซดาไลม์ อลูมินา อลูมิเนียม เหล็ก และสแตนเลสสตีล จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับค่าในเอกสารอ้างอิงมาตรฐาน

ภาควิชา.....ฟิสิกส์.....
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์.....
ปีการศึกษา.....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ปกณ์ ปรึชาบูรณะ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึษาร่วม.....

4472315023 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: LINE-FOCUS TRANSDUCER/ MATERIAL CHARACTERIZATION

PAKORN PREECHABURANA : CONSTRUCTION OF A LINE-FOCUS
TRANSDUCER FOR MATERIAL CHARACTERIZATION.THESIS ADVISOR:
ASST.PROF.KIRANANT RATANATHAMMAPAN, THESIS COADVISOR:
CHANA PEWLONG, 97 pp. ISBN 974-53-1631-4.

A line-focus transducer for material characterization is constructed. The transducer construction is readily achieved by conforming commercial polyvinylidene fluoride (PVDF) film to a cylindrical (convex) surface, followed by casting a tungsten-powder-loaded epoxy resin backing material into an attached aluminium case housing. Five transducers with acoustic impedance of 2.69, 3.91 and 7.37 Mrayl and backing material thickness of 6 mm, and other two with acoustic impedance of 3.91 Mrayl and backing material thickness of 9 and 12 mm respectively, are constructed. All transducers are tested by using pulser-receiver circuit, the obtained pulse width in the range of 0.60 to 0.88 microsecond. The one with the shortest pulse width is used to characterize samples material properties, by the defocusing technique. To measure the longitudinal wave speed, Rayleigh wave speed and attenuation coefficient of materials, from which the Young's modulus, shear modulus, bulk modulus and mass density may be deduced. Five samples: soda-lime glass, alumina, aluminium, iron and stainless steel have been measured, and the deduced values are comparable to the values appearing in standard references.

Department.....Physics.....	Student's signature.....
Field of study.....Physics.....	Advisor's signature.....
Academic year...2004.....	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย โดยได้รับคำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎี การวิจัย และ การตรวจทานวิทยานิพนธ์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภิรมณ์ต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ชนะ ผิวล่อง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี อาจารย์ ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง และ อาจารย์ ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา ที่ให้คำแนะนำ และ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการ ตรวจทานวิทยานิพนธ์

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วิจิต ศรีโชติ ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่อง พัลส์เซอร์วิซไฟเวอร์และหัววัดอุณหภูมิจานิก สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ออสติกของกาวอีพ็อกซี

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ Mr. Richard Brown ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับหลักการสร้าง แทรนสดิวเซอร์และ ขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วมอื่นๆ ที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับทุนพัฒนาอาจารย์ สาขาขาดแคลน ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับค่าใช้จ่ายในการ ซื้อพัสดุสำหรับงานวิจัย และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับ ทุนอุดหนุนการวิจัยที่ผู้ศึกษาได้รับ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย พี่น้อง คุณสุภลักษณ์ อัมลอย และ เพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทุกๆด้านมาโดยตลอด จึงขอขอบคุณมา ณ. โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์วัสดุโดยใช้คลื่นเสียง.....	3
2.1 สมบัติความยืดหยุ่นของของแข็ง.....	3
2.1.1 ความเค้น.....	3
2.1.2 ความเครียด.....	7
2.1.3 ค่าคงที่ยืดหยุ่น.....	12
2.2 คลื่นเสียงในของแข็ง.....	14
2.2.1 คลื่นเสียงในเนื้อของของแข็ง.....	14
2.2.2 คลื่นที่เคลื่อนที่บนผิวของของแข็ง.....	19
2.2.3 คลื่นเรย์ลีเคลื่อนที่ตรงรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว.....	23
2.2.4 อิมพีแดนซ์อคูสติก.....	25

2.2.5 การสะท้อนและการหักเหของเสียงที่รอยต่อระหว่างของเหลว และของแข็ง.....	26
บทที่ 3 การสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	32
3.1 หลักการสร้างแทรนสดิวเซอร์.....	34
3.1.1 เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่ส่งพัลส์คลื่นเสียง.....	35
3.1.2 เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่รับพัลส์คลื่นเสียง.....	39
3.2 ส่วนประกอบของแทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	42
3.2.1 ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	42
3.2.2 วัสดุหนุนรอง.....	46
3.3 ขั้นตอนการสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	50
3.4 ระบบวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	53
3.5 ผลทดลองการทำงานของแทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	55
บทที่ 4 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส.....	60
4.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	63
4.2 ผลการทดลอง.....	64
4.2.1 การหาค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของกระจกโซดาไลม์.....	64
4.2.2 การหาค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของอลูมินา.....	68
4.2.3 การหาค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของอลูมิเนียม.....	72
4.2.4 การหาค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของเหล็ก.....	76
4.2.5 การหาค่ามอดูลัสและความหนาแน่นของสแตนเลสสตีล.....	80
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะการทดลอง.....	87
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะการทดลอง.....	88
5.2.1 ความถูกต้องในการวัด.....	88
5.2.2 ข้อจำกัดของการวัด.....	88

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 แรง $d\vec{F}$ กระทำบนพื้นที่ผิวด้านที่ตั้งฉากกับแกน x ของวัตถุเล็กๆรูปทรงลูกบาศก์.....4

รูปที่ 2.2 ความเค้นแบบต่าง ๆ (ก) ความเค้นดึง (b) ความเค้นกด (ค) ความเค้นเฉือน.....5

รูปที่ 2.3 การเลื่อนตำแหน่งของจุดในเนื้อวัสดุ หลังจากได้รับความเค้น.....8

รูปที่ 2.4 ความเครียดเฉือน $S_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$ ที่เกิดขึ้น โดยเส้นประแสดงรูปร่างเดิมก่อน
ได้รับความเค้นเฉือน.....8

รูปที่ 2.5 ความเค้นกระทำบนรูปทรงสี่เหลี่ยมค้ำหมูขนาดเล็ก ๆ.....14

รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของคลื่น (ก) คลื่นตามยาว(ข) คลื่นตามขวาง.....18

รูปที่ 2.7 ผิวยรอยต่อของของแข็งและอากาศ ที่สามารถเกิดคลื่นเรย์ลี.....19

รูปที่ 2.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางเมื่อคลื่นเรย์ลีเคลื่อนที่ไปในทิศ +x.....22

รูปที่ 2.9 คลื่นเสียงตกกระทบตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างของเหลวและของแข็ง.....26

รูปที่ 2.10 คลื่นเสียงตกกระทบทำมุม θ_i บนรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว.....28

รูปที่ 2.11 คลื่นตกกระทบทำให้เกิดคลื่นเรย์ลี จากนั้นเกิดการสูญเสียพลังงาน ไปเป็น
คลื่นตามยาวเคลื่อนที่กลับไปของเหลว.....31

รูปที่ 3.1 การกระตุ้นให้เกิดคลื่นเรย์ลีที่วัสดุ โดยให้ตัวกำเนิดคลื่น(ตัวที่1)
และ ตัวรับรู้ (ตัวที่2) วางทำมุม θ_R กับแนวตั้ง.....32

รูปที่ 3.2 แทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัสของ Kushibiki และ Chumbashi.....33

รูปที่ 3.3 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์สำหรับส่งและรับพัลส์คลื่น.....35

รูปที่ 3.4 แผนภาพการหาแอมพลิจูดของพัลส์ส่งผ่านและพัลส์สะท้อนกลับ
เมื่อทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่ส่งพัลส์คลื่นเสียง.....36

รูปที่ 3.5 แผนภาพการส่งพัลส์ของทรานสดิวเซอร์ เมื่อ $2Z_b = Z_p = 2Z_w$37

รูปที่ 3.6 แผนภาพการส่งพัลส์ของทรานสดิวเซอร์ เมื่อ $\frac{Z_b}{2} = Z_p = 2Z_w$38

รูปที่ 3.7 แผนภาพการส่งพัลส์ของทรานสดิวเซอร์ เมื่อ $Z_b = Z_p = 2Z_w$38

รูปที่ 3.8 แผนภาพการหาแอมพลิจูดของพัลส์ส่งผ่านและพัลส์สะท้อนกลับ
เมื่อทรานสดิวเซอร์ทำหน้าที่รับพัลส์คลื่นเสียง.....39

รูปที่ 3.9	แผนภาพการรับพัลส์ของแตรนสคิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = 2Z_b$	41
รูปที่ 3.10	แผนภาพการรับพัลส์ของแตรนสคิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = Z_b / 2$	41
รูปที่ 3.11	แผนภาพการรับพัลส์ของแตรนสคิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = Z_b$	42
รูปที่ 3.12	กระบวนการเตรียมฟิล์ม PVDF ให้มีสมบัติเพียสโซอิเล็กทริก.....	43
รูปที่ 3.13	โครงสร้างการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของฟิล์ม PVDF แบบ (ก) เฟส α และ แบบ (ข) เฟส β	44
รูปที่ 3.14	เซลล์หน่วยของ PVDF แบบ (ก) เฟส α และ แบบ (ข) เฟส β	44
รูปที่ 3.15	การเกิดโพลาริเซชันเมื่อฟิล์ม PVDF ได้รับความเค้น.....	45
รูปที่ 3.16	ขนาดของฟิล์มเปลี่ยนเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าทำให้ความหนาของฟิล์มลดลง.....	46
รูปที่ 3.17	รูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง 5 ตัว ที่ผสมผงทั้งสแตนในสัดส่วนปริมาตร 0%, 5.5%, 11%, 16.5% และ 22% เพื่อหาค่าสัดส่วนปริมาตรของทั้งสแตนที่เหมาะสม.....	48
รูปที่ 3.18	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของ ทั้งสแตน.....	49
รูปที่ 3.19	กราฟความสัมพันธ์ของค่าอัตราเร็วเสียงของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของ ทั้งสแตน.....	49
รูปที่ 3.20	กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของ ทั้งสแตน.....	50
รูปที่ 3.21	ขั้นตอนการสร้างแตรนสคิวเซอร์ไลน์โฟกัส.....	51
รูปที่ 3.22	รูปถ่ายและแผนภาพโครงสร้างของแตรนสคิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่สร้างขึ้น.....	52
รูปที่ 3.23	ระบบวัดอัตราเร็วของคลื่นเรกซ์โดยใช้ไลน์โฟกัสแตรนสคิวเซอร์.....	54
รูปที่ 3.24	แผนผังของวงจรพัลส์เซอรัวรี่ฟเวอร์.....	54
รูปที่ 3.25	พัลส์แรงดันไฟฟ้าขนาด 65 โวลต์ 25 นาโนวินาที ที่ได้จากวงจร พัลส์เซอรัวรี่ฟเวอร์.....	56
รูปที่ 3.26	พัลส์สะท้อนกลับของแตรนสคิวเซอร์ตัวที่ 1 2 และ 3.....	57
รูปที่ 3.27	พัลส์สะท้อนของแตรนสคิวเซอร์ตัวที่ 2 4 และ 5.....	58
รูปที่ 4.1	วิธีตีโฟกัสเชิงเทคนิคเพื่อวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี.....	61

รูปที่ 4.2	รูปถ่ายอุปกรณ์เลื่อนแทรนสดิวเซอร์ไลน์ไฟกัส วงจรควบคุมมอเตอร์ และวงจรพัลเซอร์รีซีฟเวอร์.....	61
รูปที่ 4.3	พัลส์สะท้อนกลับจากกระจกโซคาไลม์ที่ระยะ z ตั้งแต่ 0 ถึง 6 มม.....	66
รูปที่ 4.4	กราฟระหว่างค่า z และเวลาที่คลื่นเรย์ลีใช้เดินทางบนผิวกระจกโซคาไลม์ (วัดเวลาจากจุดยอดของพัลส์ของคลื่นเรย์ลีในรูปที่4.3).....	66
รูปที่ 4.5	แอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีที่เดินทางบนผิวกระจกโซคาไลม์ที่ระยะ z ต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.6	กราฟระหว่างค่า \ln ของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีในรูปที่ 4.5.....	67
รูปที่ 4.7	พัลส์สะท้อนกลับจากอลูมินาที่ระยะ z ตั้งแต่ 0 ถึง 15 มม.....	70
รูปที่ 4.8	กราฟระหว่างค่า z และเวลาที่คลื่นเรย์ลีใช้เดินทางบนผิวอลูมินา (วัดเวลาจากจุดยอดของพัลส์ของคลื่นเรย์ลีในรูปที่4.7).....	70
รูปที่ 4.9	แอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีที่เดินทางบนผิวอลูมินาที่ระยะ z ต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.10	กราฟระหว่างค่า \ln ของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีในรูปที่ 4.9.....	71
รูปที่ 4.11	พัลส์สะท้อนกลับจากอลูมิเนียมที่ระยะ z ตั้งแต่ 0 ถึง 5.8 มม.....	74
รูปที่ 4.12	กราฟระหว่างค่า z และเวลาที่คลื่นเรย์ลีใช้เดินทางบนผิวอลูมิเนียม (วัดเวลาจากจุดยอดของพัลส์ของคลื่นเรย์ลีในรูปที่4.11).....	74
รูปที่ 4.13	แอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีที่เดินทางบนผิวอลูมิเนียมที่ระยะ z ต่างๆ.....	75
รูปที่ 4.14	กราฟระหว่างค่า \ln ของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีในรูปที่ 4.13.....	75
รูปที่ 4.15	พัลส์สะท้อนกลับจากเหล็กที่ระยะ z ตั้งแต่ 0 ถึง 5.5 มม.....	78
รูปที่ 4.16	กราฟระหว่างค่า z และเวลาที่คลื่นเรย์ลีใช้เดินทางบนผิวเหล็ก (วัดเวลาจากจุดยอดของพัลส์ของคลื่นเรย์ลีในรูปที่4.15).....	78
รูปที่ 4.17	แอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีที่เดินทางบนผิวเหล็กที่ระยะ z ต่างๆ.....	79
รูปที่ 4.18	กราฟระหว่างค่า \ln ของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีในรูปที่ 4.17.....	79
รูปที่ 4.19	พัลส์สะท้อนกลับจากสเตนเลสสตีลที่ระยะ z ตั้งแต่ 0 ถึง 5 มม.....	82
รูปที่ 4.20	กราฟระหว่างค่า z และเวลาที่คลื่นเรย์ลีใช้เดินทางบนผิวสเตนเลสสตีล (วัดเวลาจากจุดยอดของพัลส์ของคลื่นเรย์ลีในรูปที่4.18).....	82
รูปที่ 4.21	แอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีที่เดินทางบนผิวสเตนเลสสตีลที่ระยะ z ต่างๆ.....	83
รูปที่ 4.22	กราฟระหว่างค่า \ln ของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลีในรูปที่ 4.21.....	83
รูปที่ 4.23	พัลส์สะท้อนกลับจากผิวด้านล่างของ (ก) อลูมิเนียม (ข) เหล็ก (ค) สเตนเลสสตีล....	84

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	การลดตัวห้อยจาก 2 ตัวเหลือ 1 ตัว สำหรับเทนเซอร์ความเค้นที่มีสมบัติ สมมาตร.....6	6
ตารางที่ 3.1	สมบัติของเทนเซอร์สควเซอร์ทั้ง 5 ตัว.....52	52
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลของพัลส์สะท้อนกลับที่ได้จากเทนเซอร์สควเซอร์ทั้ง 5 ตัว.....59	59
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าความหนาของวัสดุ 5 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ.....63	63
ตารางที่ 4.2	ค่าอัตราเร็วของคลื่นตามยาว(V_L) อัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี(V_R) อัตราเร็วของคลื่นตามขวาง(V_T)และสัมประสิทธิ์การสูญเสีย(α_R) ของวัสดุ 5 ชนิด พร้อมทั้งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับค่าอ้างอิงจาก ตารางที่ 4.3 ไว้ในเครื่องหมายวงเล็บ.....85	85
ตารางที่ 4.3	ค่ามอดุลัสของยัง(E) ค่ามอดุลัสเฉือน(G) ค่ามอดุลัสก้อน(K) และค่าความหนาแน่น (ρ)ของวัสดุทั้ง 5 ชนิด พร้อมทั้งแสดง ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับค่าอ้างอิงจากตารางที่ 4.3 ไว้ในเครื่องหมายวงเล็บ.....85	85
ตารางที่ 4.4	ค่าอัตราเร็วของคลื่นตามยาว (V_L) อัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี (V_R) อัตราเร็วของคลื่นตามขวาง(V_T) ค่ามอดุลัสของยัง(E) ค่ามอดุลัสเฉือน(G) ค่ามอดุลัสก้อน(K) และค่าความหนาแน่น(ρ) ของวัสดุทั้ง 5 ชนิด ที่มาจาก [12].....86	86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
A_0	แอมพลิจูดเริ่มต้นของคลื่น
A	ค่าคงที่ใดๆ
B	ค่าคงที่ใดๆ
C	ค่าคงที่ใดๆ
C_{II}	ค่าคงที่ความแข็ง
dA	ขนาดของพื้นที่เล็กๆ
dF	ขนาดของแรงน้อยๆ ที่กระทำกับวัตถุ
E	ค่ามอดูลัสของยัง
$F(z)$	ฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่า z
$G(z)$	ฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่า z
G	ค่ามอดูลัสเฉือน
$H(z)$	ฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่า z
i	ตัวห้อยใช้แทนทิศทางของความเค้น
j	ตัวห้อยใช้แทนทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวที่ ความเค้นกระทำ
k	เลขคลื่นของคลื่นเรย์ลี
k_l	เลขคลื่นของคลื่นในของเหลว
k_L	เลขคลื่นของคลื่นตามยาวในของแข็ง
k_T	เลขคลื่นของคลื่นตามขวางในของแข็ง
K	ค่ามอดูลัสก่อน
M	มวลของวัตถุ
P	ความดัน
\vec{r}	เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุด
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น
u	ระยะกระจัดของวัตถุเมื่อได้รับความเค้น
S_{ij}	ค่าความเครียด
T	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่น

สัญลักษณ์

T_{ij}	ค่าความเค้น
V	สัดส่วนปริมาตรของวัสดุ
V_L	อัตราเร็วของคลื่นตามยาว
V_R	อัตราเร็วของคลื่นเลก์เรย์
V_T	อัตราเร็วของคลื่นตามขวาง
Z_b	ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหุนรอน
Z_p	ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
Z_w	ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของน้ำ

อักษรกรีก

α	ขนาดของมุมที่เปลี่ยนไป เมื่อวัสดุนั้นได้รับความเค้นเฉือน
α_R	สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของคลื่นเรก์เลย์
θ_c	มุมวิกฤติ
θ_i	มุมที่คลื่นตกกระทบทำมุมกับเส้นตั้งฉาก
θ_R	มุมเรก์เลย์
δ_{ij}	Kronecker delta
ρ	ความหนาแน่นของวัสดุ
λ	ค่าคงที่ของลามเอด์วที่ 1
μ	ค่าคงที่ของลามเอด์วที่ 2
ν	อัตราส่วนของปัวส์ซอง
ϕ	ศักย์ของคลื่นตามยาว
ϕ_i	ศักย์สเกลาร์ของการกระจัดของอนุภาคในของเหลว
ω	ความถี่เชิงมุม
ψ	ศักย์ของคลื่นตามขวาง
Δ	ปริมาตรที่เปลี่ยนไปของวัสดุ