

การพัฒนาชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐาน โดยวิธีวิศวกรรมย้อนรอย

นัฐชยพงศ์ ธีรัชตระกูล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง 52190

อีเมลของผู้ประพันธ์บทความ: natchayapong@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐานสำหรับระดับปริญญาตรีในสาขาฟิสิกส์และวิศวกรรม โดยประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับอุปกรณ์ราคาประหยัดและมีสองชิ้น Gunn diode ชุดทดลองประกอบด้วยวงจรแหล่งจ่ายไฟ วงจรขยายสัญญาณ Gunn oscillator สายอากาศแบบฮอร์น และ diode detector โดยประเมินประสิทธิภาพผ่านการทดลองหาค่าความยาวคลื่นและศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถสร้างสัญญาณไมโครเวฟความถี่เฉลี่ย 9.2 ± 0.3 GHz และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.4 cm โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณร้อยละ 3 นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตามมุมเกรตติงยังสอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ ซึ่งยืนยันความเหมาะสมของชุดทดลองสำหรับการเรียนการสอน

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ, ก้านออสซิลเลเตอร์, ไดโอดดีเทกเตอร์, สายอากาศฮอร์น, โพลาไรเซชัน, วิศวกรรมย้อนรอย

Development of a Basic Microwave Optics Kit Using Reverse Engineering

Natchayapong Teerachtragoon

*Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Lampang Center, Hang Chat District,
Lampang 52190, Thailand*

Corresponding author's e-mail: natchayapong@hotmail.com

Abstract

This research aims to develop a basic microwave optics experimental kit for undergraduate education in physics and engineering. The kit was developed using reverse engineering techniques combined with low-cost and second-hand components, such as a Gunn diode. It includes a DC power supply, a non-inverting amplifier, a Gunn oscillator, a horn antenna, and a diode detector. The system's performance was evaluated through two experiments: wavelength measurement and analysis of the polarization characteristics of electromagnetic waves. The results show that the system produces microwave signals with an average frequency of 9.2 ± 0.3 GHz and wavelengths between 3.0 and 3.4 cm, with an average relative error of approximately 3%. Furthermore, the variation in signal strength with grating angle was consistent with theoretical predictions, confirming the kit's suitability as a cost-effective and practical instructional tool for undergraduate-level microwave optics education.

Keywords: Microwave optics, Gunn oscillator, diode detector, horn antenna, Experiment kit, Reverse engineering

บทนำ

คลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีบทบาทสำคัญในด้านการสื่อสาร วิศวกรรม และการเรียนการสอน โดยเฉพาะในการศึกษาทัศนศาสตร์ไมโครเวฟ ซึ่งสามารถสาธิตพฤติกรรมของคลื่น ได้แก่ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอดได้อย่างชัดเจน (The LNM Institute of Information Technology, 2019 ; OTIKA Science, n.d.; PASCO, n.d.) ความสามารถในการจำลองและทดลองพฤติกรรมของคลื่นดังกล่าวช่วยให้นักศึกษาสามารถเข้าใจแนวคิดทางฟิสิกส์ได้อย่างเป็นรูปธรรมและลึกซึ้งยิ่งขึ้น ปัจจุบัน ชุดทดลองไมโครเวฟย่าน X-band ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือหลักในการเรียนการสอนด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและทัศนศาสตร์ไมโครเวฟ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์เชิงพาณิชย์ที่มีความครบถ้วนมักมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับสถานศึกษาที่มีงบประมาณจำกัด ส่งผลให้การใช้ชุดทดลองในระดับพื้นฐานยังไม่แพร่หลายนัก (Solano et al., 2002) งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการพัฒนาและสร้างชุดทดลองไมโครเวฟย่าน X-band โดยใช้แนวทางวิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับอุปกรณ์ต้นทุนต่ำที่หาได้ง่าย เช่น Gunn diode และวัสดุเหลือใช้ พร้อมออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อให้เหมาะสมกับการเรียนการสอนในระดับมหาวิทยาลัย โดยอาศัยองค์ความรู้จากงานวิจัยก่อนหน้าเกี่ยวกับการปรับปรุงโครงสร้างและประสิทธิภาพของ Gunn diode (Yuan et al., 2024) รวมถึงแนวคิดด้านการปรับจูนความถี่ในช่วงกว้าง (Butts & El-Ghazaly, 2023)

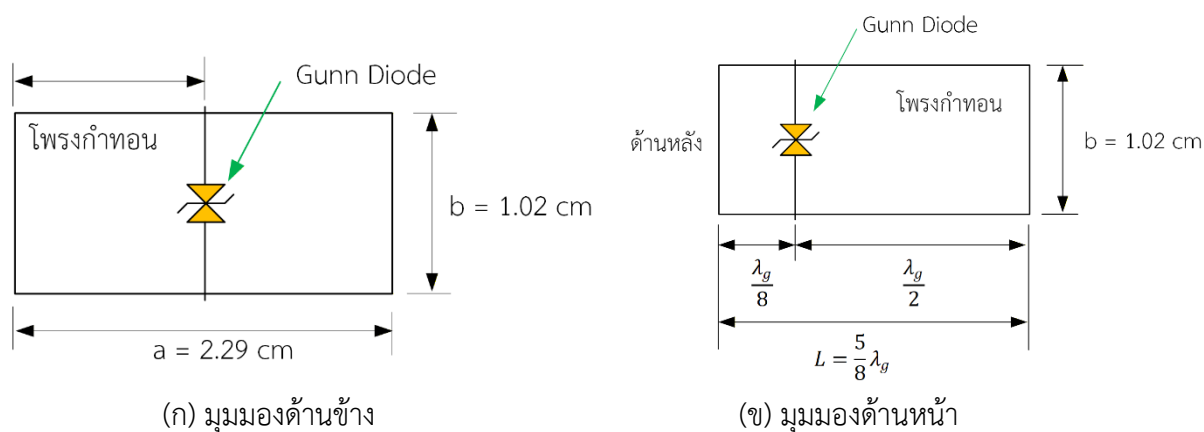
หลักการพื้นฐาน

Gunn diode oscillator

Gunn diode เป็นไดโอดชนิดพิเศษที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด N เพียงประเภทเดียว แม้จะไม่มีรอยต่อแบบ PN เหมือนไดโอดทั่วไป แต่ Gunn diode เป็นอุปกรณ์สองขั้วไฟฟ้า (Transferred Electron Device) ที่แสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ (Negative Differential Resistance) Gunn diode ได้รับการออกแบบและพัฒนาให้สามารถผลิตได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ ทำให้เหมาะสำหรับการสร้างในห้องปฏิบัติการ (Hasan et al., 2022) คุณสมบัติเด่นนี้ทำให้ Gunn diode เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟความถี่สูง ซึ่งมักทำงานในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 GHz และให้กำลังเอาต์พุตระหว่าง 1 mW ถึง 5 W จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการสัญญาณไมโครเวฟพลังงานต่ำ (Hasan et al., 2022)

การออกแบบโพรงกำเนิด

ในการดึงพลังงานไมโครเวฟจาก Gunn diode อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมแล้ว การออกแบบโพรงกำเนิด (Resonant Cavity) ยังมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของสัญญาณที่สร้างขึ้น (Hasan et al., 2022) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โพรงกำเนิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในโหมด TE_{10} โดยมีขนาดความกว้าง $a = 2.29$ cm และความสูง $b = 1.02$ cm ซึ่งสอดคล้องกับท่อนำคลื่นมาตรฐาน WR90 สำหรับย่านความถี่แถบ X (Solano et al., 2002) Gunn diode ติดตั้งบริเวณกึ่งกลางโพรง โดยห่างจากผนังด้านท้ายและด้านหน้าในระยะที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น เมื่อ λ_g คือความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ความยาวรวมของโพรงจะเท่ากับ $\frac{5}{8}\lambda_g$ ตามที่แสดงในภาพที่ 1 (Faye, 1975)



ภาพที่ 1 แสดงตำแหน่งของ Gunn diode และขนาดของโพร่งำทอน

ตัวอย่างเช่น ต้องการโพร่งำทอนสำหรับกำเนิดความถี่ 10 GHz จะคำนวณความยาวคลื่นในอากาศได้เป็น

$$\lambda_o = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ cm/s}}{10^{10} \text{ Hz}} = 3 \text{ cm} \quad (1)$$

ความยาวคลื่นตัดขาด (λ_c : Cutoff Wavelength) คือ ความยาวคลื่นสูงสุดในอวกาศอิสระ (Free Space Wavelength) ที่สอดคล้องกับความถี่ตัดขาด (f_c) นั้น หาได้จาก

$$\lambda_c = \frac{2ab}{(n^2 b^2 + m^2 a^2)^{1/2}}$$

ในโหมด TE_{10} นั้น $m = 0$ และ $n = 1$ ดังนั้น

$$\lambda_c = 2a = 2(2.29 \text{ cm}) = 4.58 \text{ cm}$$

ความถี่ตัดขาด หาได้จาก

$$f_c = \frac{C}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^{10} \text{ cm/s}}{4.58 \text{ cm}} = 6.556 \text{ GHz}$$

ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น หาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{[1 - (\frac{\lambda_o}{\lambda_c})^2]^{1/2}} \quad (2)$$

$$= \frac{3 \text{ cm}}{[1 - (\frac{3 \text{ cm}}{4.58 \text{ cm}})^2]^{1/2}} = 3.97 \text{ cm}$$

เพราะฉะนั้น ความยาวของโพรงำทอน คือ

$$L = \frac{5}{8} \lambda_g = \frac{5}{8} (3.97 \text{ cm}) = 2.48 \text{ cm}$$

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ พัฒนาชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐาน สำหรับการศึกษาในระดับปริญญาตรี โดยเน้นการประยุกต์ใช้ อุปกรณ์มือสองราคาประหยัด (เช่น Gunn diode) ร่วมกับเทคนิค วิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ส่วนควบหลักที่จำเป็นของชุดทดลอง ซึ่งรวมถึง Gunn oscillator, diode detector และ horn antenna

ระเบียบวิธีวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่

- 1) ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ SANWA รุ่น PC700 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า
- 2) ดิจิทัลออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ GW INSTRON รุ่น GDS-1072-U สำหรับทดสอบวงจรขยายสัญญาณ

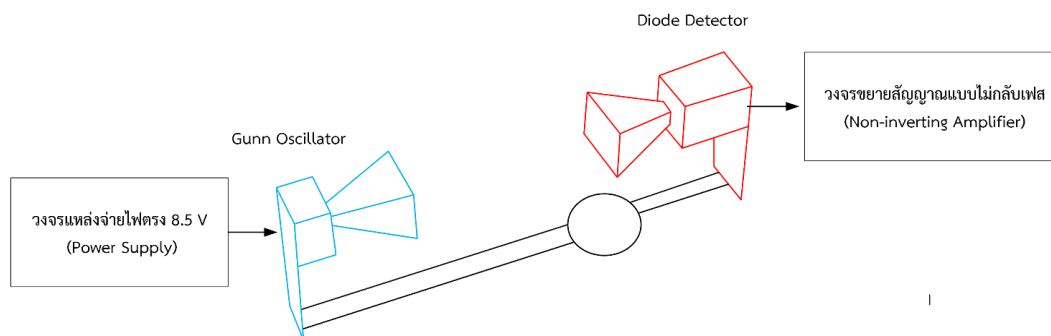
การออกแบบและสร้างชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐานโดยวิธีวิศวกรรมย้อนรอย

ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่

- 1) วงจรแหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)
- 2) วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)
- 3) วงจรกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟด้วยไดโอดกันน์ (Gunn oscillator)
- 4) ตัวรับสัญญาณแบบไดโอด (diode detector)

แผนภาพระบบเครื่องมือแสดงในภาพที่ 2 โดยวงจรแหล่งจ่ายไฟตรง 8.5 V ใช้สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับ Gunn oscillator และวงจรแหล่งจ่ายไฟ $\pm 12 \text{ V}$ ใช้สำหรับจ่ายไฟให้กับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส วงจรทั้งสองติดตั้งรวมอยู่ในกล่องจ่ายแรงดันและขยายสัญญาณ

ในระบบรับสัญญาณ diode detector จะทำหน้าที่แปลงคลื่นไมโครเวฟเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะถูส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสที่มีอัตราขยาย 101 เท่า เพื่อเพิ่มความแรงของสัญญาณก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการประมวลผล

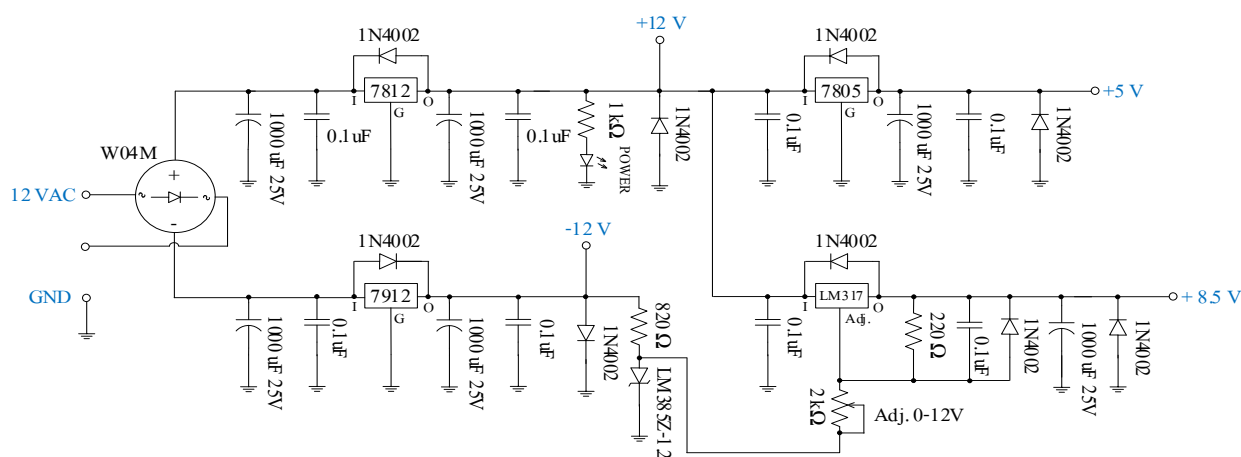


ภาพที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐาน

การออกแบบ

ในการออกแบบประกอบด้วย หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ และส่วนชุดรับและส่งไมโครเวฟ โดยหน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ ได้รวมวงจรแหล่งจ่ายไฟและวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสไว้ในโครงสร้างเดียวเพื่อความสะดวกในการใช้งานภาคสนามหรือในห้องทดลอง เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 12 V วงจรจะแปลงเป็นกระแสตรงบวกและลบผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ (W04M) และควบคุมโดยไอซีเรกูเลเตอร์คงที่: 7812 สำหรับ +12 V, 7912 สำหรับ -12 V และ 7805 สำหรับ +5 V ซึ่งรองรับการต่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ในอนาคต นอกจากนี้ ไอซี LM317 แบบปรับค่าได้ยังใช้ potentiometer ร่วมกับ LM385Z-1.2 (ไดโอดอ้างอิง 1.2 V) เพื่อปรับแรงดันเอาต์พุตได้ตั้งแต่ประมาณ 0 V ถึง 12 V โดยตั้งค่าไว้ที่ 8.5 V สำหรับจ่ายไฟให้ Gunn oscillator ดังภาพที่ 3

วงจรแหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)

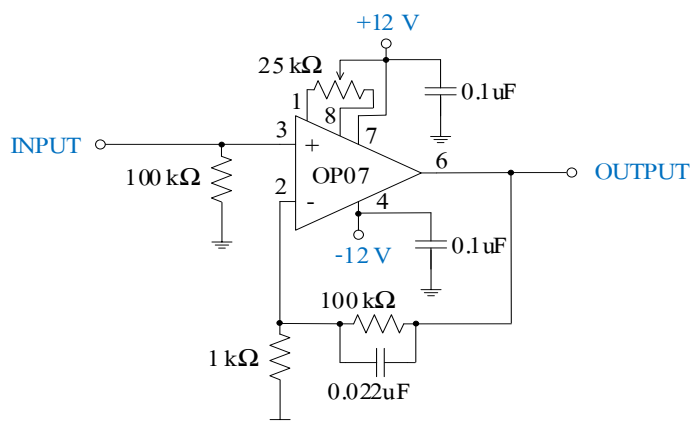


ภาพที่ 3 แสดงวงจรจ่ายไฟ

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

ใช้ออปแอมป์รุ่น OP07 ที่มีอัตราขยายสัญญาณ (Gain) เท่ากับ 101 เท่า ดังภาพที่ 4 โดยสามารถคำนวณอัตราขยายได้จาก

$$GAIN = 1 + \frac{R_f}{R_g} = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 101 \quad (3)$$



ภาพที่ 4 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

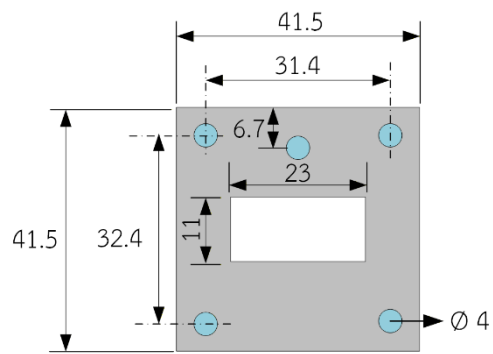
การออกแบบชุดรับและส่งไมโครเวฟ

ชุดรับและส่งไมโครเวฟในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสามส่วนหลักที่พัฒนาขึ้นเองคือสายอากาศแบบฮอร์น (horn antenna), Gunn oscillator (ตัวส่ง) และ diode detector (ตัวรับ) โดยใช้วัสดุต้นทุนต่ำ เช่น แผ่นทองแดงหนา 3 mm และแผงวงจรพิมพ์ (PCB) แบบสองหน้า ประกอบด้วย

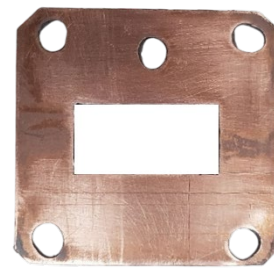
1. การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์น (horn antenna)
2. การออกแบบตัวส่งสัญญาณไมโครเวฟ (Gunn oscillator)
3. การออกแบบตัวรับสัญญาณ (diode detector)

การออกแบบสายอากาศแบบฮอร์น (horn antenna)

ในการประกอบส่วนของสายอากาศแบบฮอร์น ผู้วิจัยได้ใช้ แผ่นประกบด้านหน้า ซึ่งทำจากแผ่นทองแดงหนา และแผงวงจรพิมพ์ โดยแผ่นนี้มีขนาด 41.5×41.5 mm และมีช่องว่างตรงกลางขนาด 11×23 mm เพื่อใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อกับท่อนำคลื่น แผ่นประกบนี้มีลักษณะเดียวกันสำหรับใช้กับทั้ง Gunn oscillator และ diode detector ดังแสดงในภาพที่ 5 ลักษณะและขนาดของสายอากาศแบบฮอร์นที่ออกแบบถูกแสดงในภาพที่ 6 ขณะที่ ภาพที่ 7 แสดงถึงสายอากาศฮอร์นที่สร้างจากแผ่น PCB และทำสำเร็จสมบูรณ์แล้ว

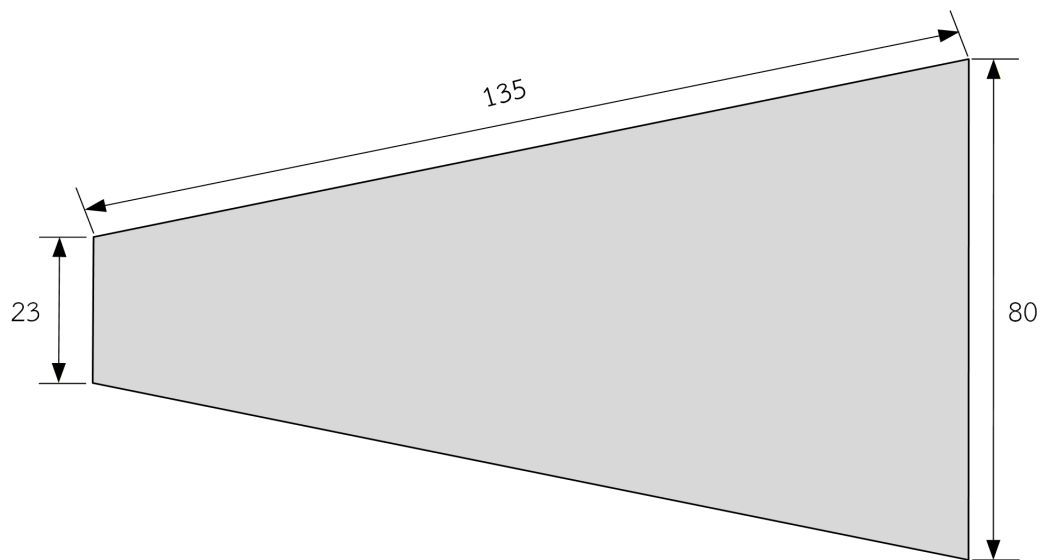


(ก) ขนาดแผ่นประกบด้านหน้า

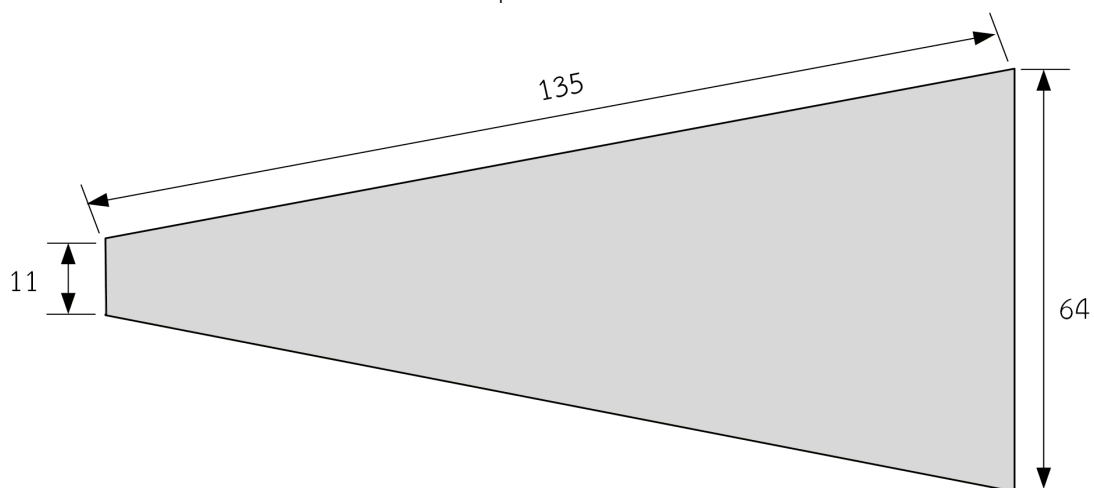


(ข) ลักษณะแผ่นประกบด้านหน้า

ภาพที่ 5 แสดงแผ่นประกบ (หน่วย : mm)

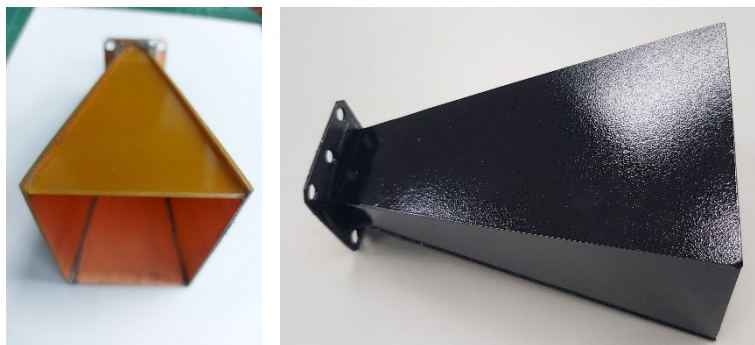


(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง

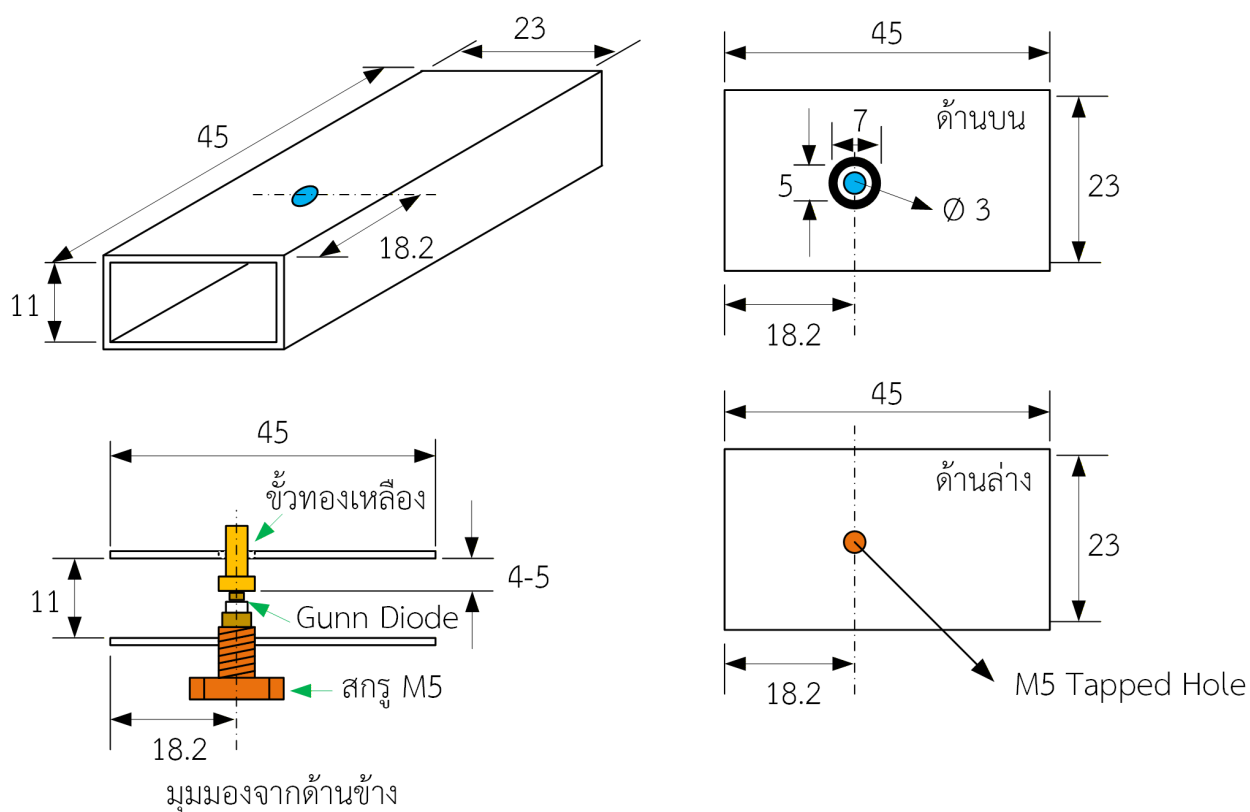
ภาพที่ 6 แสดงขนาดของสายอากาศแบบฮอร์น (หน่วย : mm)



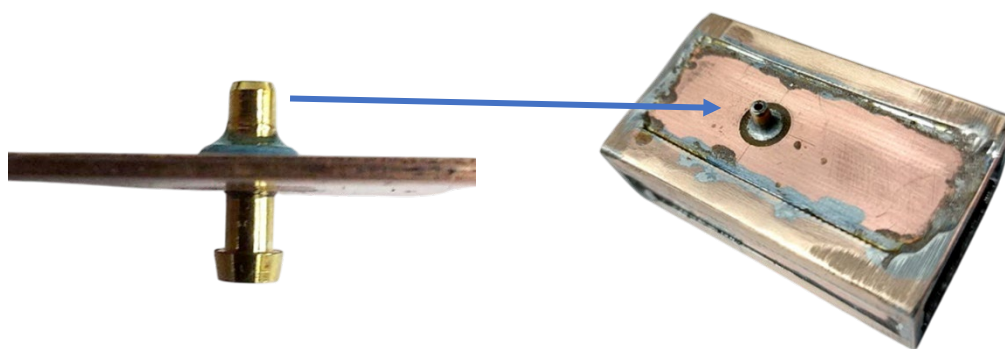
ภาพที่ 7 แสดงสายอากาศแบบฮอร์นที่ทำด้วยแผ่น PCB

การออกแบบตัวส่งสัญญาณไมโครเวฟ (Gunn oscillator)

วงจร Gunn oscillator สร้างขึ้นจากโพรงกำเนิดรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม โดยใช้แผ่นทองแดงหนา 3 mm ร่วมกับแผ่น PCB ซึ่งสามารถเห็นการออกแบบในภาพที่ 8 มีการติดตั้ง ขั้วทองเหลืองขนาด 3 mm เพื่อเป็นขั้วต่อสำหรับเชื่อมต่อกับ Gunn diode ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 แสดงการออกแบบ Gunn oscillator (หน่วย : mm)

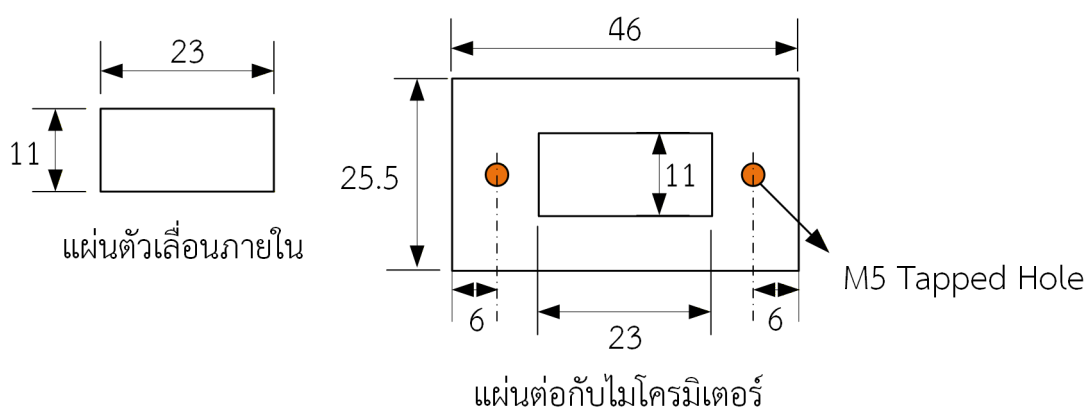


ภาพที่ 9 แสดงติดตั้งหัวทองเหลือง ขนาด 3 mm

กลไกการปรับความถี่

ระบบนี้มีความสามารถในการปรับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่สร้างขึ้น โดยการเลื่อนตำแหน่งของ แผ่นตัวเลื่อน ภายในโพรงกำเนิดเพื่อเปลี่ยนความยาวเชิงกลของโพรง

แผ่นตัวเลื่อน (ผลิตจากแผ่นทองแดงหนา 3 mm) ถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย ไมโครมิเตอร์ ที่มีความละเอียด 0.01 mm เพื่อให้สามารถปรับระยะได้อย่างแม่นยำ รายละเอียดการออกแบบแผ่นตัวเลื่อนแสดงใน ภาพที่ 10 และการติดตั้งแผ่นตัวเลื่อนเข้ากับกลไกปรับความถี่และไมโครมิเตอร์แสดงใน ภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12 ตามลำดับ โดยภาพที่ 14 แสดง Gunn oscillator ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์และเชื่อมต่อกับสายอากาศฮอร์นแล้ว



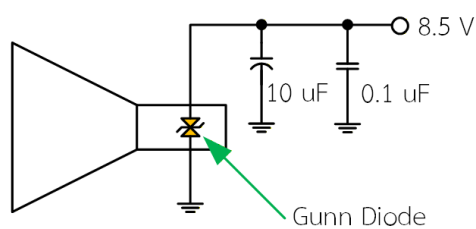
ภาพที่ 10 แสดงการออกแบบแผ่นตัวเลื่อนและแผ่นเชื่อมต่อกับไมโครมิเตอร์ (หน่วย : mm)



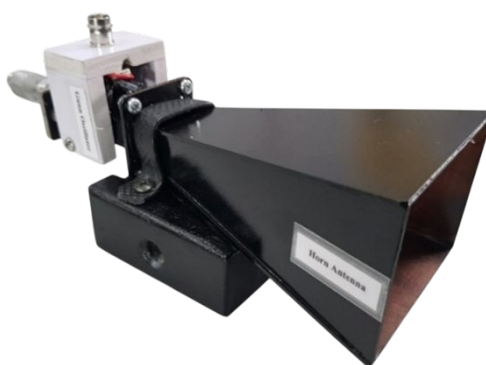
ภาพที่ 11 แสดงแผ่นตัวเลื่อนพร้อมกลไกปรับความถี่



ภาพที่ 12 แสดงการติดตั้งแผ่นตัวเลื่อนเข้ากับไมโครมิเตอร์



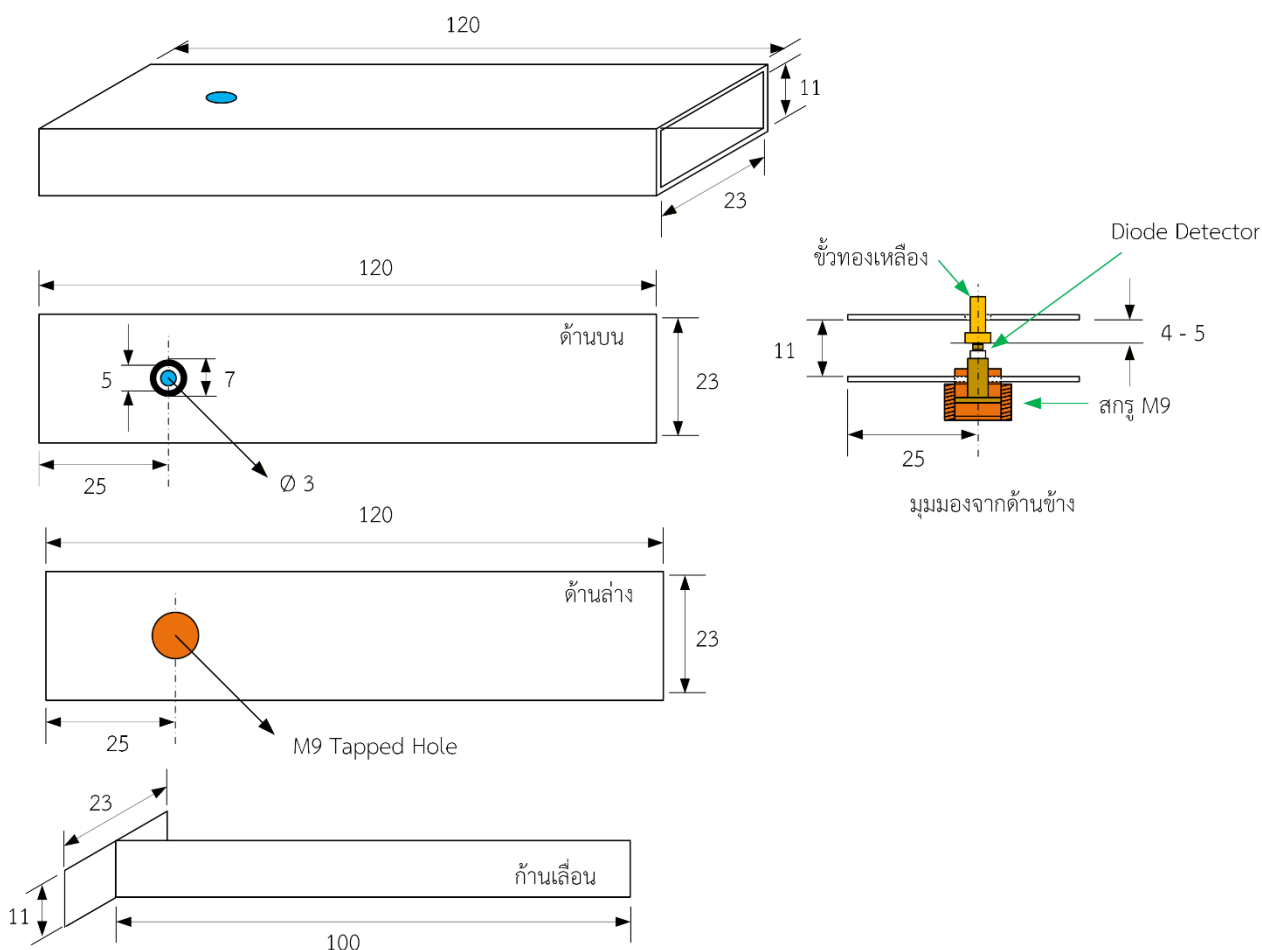
ภาพที่ 13 แสดงวงจร Gunn oscillator



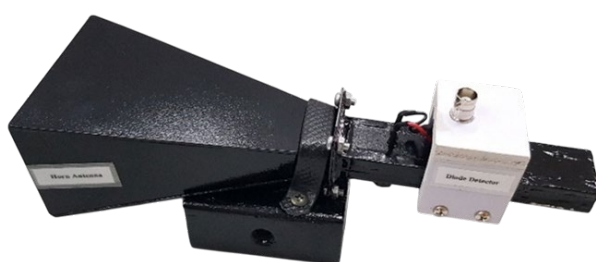
ภาพที่ 14 แสดง Gunn oscillator ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ตัวรับสัญญาณแบบไดโอด (diode detector)

ตัวรับสัญญาณ (diode detector) ถูกสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุและรูปแบบเดียวกับ Gunn oscillator มีการออกแบบและขนาดตามที่แสดงในภาพที่ 15 และ ภาพที่ 16 แสดงถึง diode detector ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยทำหน้าที่แปลงคลื่นไมโครเวฟที่ได้รับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงก่อนส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณ



ภาพที่ 15 แสดงการออกแบบ diode detector (หน่วย : mm)



ภาพที่ 16 แสดง diode detector ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ชุดทดลองโดยรวม

ภาพที่ 17 แสดงให้เห็น ชุดทดลองที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐานที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว โดยมีการจัดวางองค์ประกอบทั้งหมด เช่น หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ, ตัวส่ง (Gunn oscillator) และตัวรับ (diode detector) ที่ติดตั้งบนรางเลื่อน รวมถึงแผ่นเกรตติงและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 17 แสดงชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐาน โดยวิธีวิศวกรรมย้อนรอย ที่สร้างขึ้น

การทดสอบประสิทธิภาพชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐาน

ในการประเมินประสิทธิภาพของชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐานที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเรียนการสอน ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง 2 รูปแบบ ดังนี้

- การทดลองเพื่อหาความยาวคลื่น (ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1)
- การศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 22)

การทดลองเพื่อหาความยาวคลื่น

การทดลองเพื่อหาความยาวคลื่น (λ) ของคลื่นไมโครเวฟที่สร้างจากชุดทดลองนี้ ใช้วิธีการวัดระยะห่างระหว่างจุดที่มีการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) หรือการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) โดยใช้หลักการของ คลื่นนิ่ง (Standing Wave)

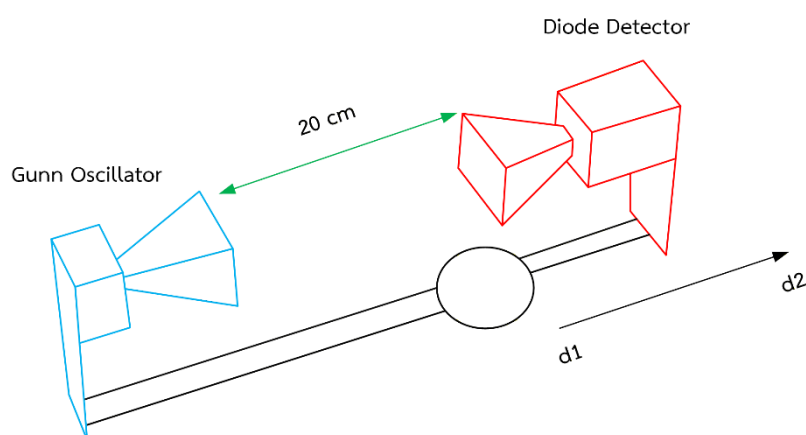
กระบวนการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

- หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ	จำนวน 1 ชุด
- ดิจิทัลมัลติมิเตอร์	จำนวน 1 เครื่อง
- Gunn oscillator	จำนวน 1 ชุด
- diode detector	จำนวน 1 ชุด
- รางเลื่อน	จำนวน 2 ราง
- ชุดประกอบรางเลื่อน	จำนวน 1 ชุด

การทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองหาความยาวคลื่นตาม ภาพที่ 18 และ ภาพที่ 19



ภาพที่ 18 แสดงลักษณะการทดลองเพื่อหาความยาวคลื่น



ภาพที่ 19 แสดงการจัดเครื่องมือการทดลองเพื่อหาความยาวคลื่น

2. หลังจากจ่ายไฟให้กับตัวส่งแล้ว ผู้ทดลองเลื่อนตัวรับในช่วงระยะ 1 ถึง 2 mm ต่อครั้ง เพื่อหา ตำแหน่งที่อ่านค่าแรงดันต่ำสุด และกำหนดตำแหน่งดังกล่าวเป็น d_1 จากนั้นเลื่อนหาอีกตำแหน่งที่ให้ค่าแรงดันต่ำสุดที่ติดกัน แล้วกำหนดเป็นตำแหน่ง d_2 พร้อมบันทึกค่าแรงดันลงในผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การออกแบบและคุณลักษณะเฉพาะของตะแกรงเกรตติง (Polarizer Grating)

ในการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เกรตติงทำหน้าที่เป็นแผ่นโพลาไรเซอร์ (Polarizer) ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างเกรตติงขึ้นเองโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) เพื่อให้มีความแม่นยำสูงและต้นทุนต่ำ คุณลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของเกรตติงมีรายละเอียดดังนี้

โครงสร้างและขนาดภายนอก: เกรตติงมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกขนาด 22 cm โดยมีส่วนที่เป็นพื้นที่ใช้งานของเกรตติงจริงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 cm

องค์ประกอบของซีโลหะ: ซีโลหะถูกลากเป็นเส้นตรงใน แนวตั้ง (เมื่อพิจารณาที่ $\theta = 0^\circ$) โดยมีคุณลักษณะดังนี้:

- ความกว้างของซีโลหะ (Width of Metal Trace): 1 mm
- ช่องว่างระหว่างซีโลหะ (Spacing between Slats): 1 mm
- ระยะห่างรวม (Grating Period, a): 1 mm + 1 mm = 2 mm (0.2 cm)

ส่วนประกอบอำนวยความสะดวก: มีการเขียนเส้นองศาไว้จนวนรอบแผ่นเพื่อใช้อ้างอิงมุมในการวัด มีแผ่นยึดเพื่อให้สะดวกในการหมุนปรับและมีการเพิ่มเติม ชุดประกอบเกรตติง ซึ่งสร้างจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อให้สามารถหมุนปรับมุมได้อย่างแม่นยำและมั่นคง

ระเบียบวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดลองนี้ทำการวัดความเข้มของสัญญาณ (I) ที่ตรวจจับได้จาก diode detector เมื่อทำการหมุนตะแกรงเกรตติงรอบแกนการแพร่กระจายของคลื่น (z-axis) กฎของมาลัส (Malus' Law) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงปริมาณ

ความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การยืนยันคุณสมบัติโพลาไรเซอร์: ชุดทดลองนี้สร้างคลื่นไมโครเวฟที่มีความยาวคลื่น $\lambda \approx 3.26$ cm ในขณะที่ระยะห่างรวมของซีโลหะ (a) คือ 0.2 cm ความสัมพันธ์ที่ $\lambda \gg a$ นี้ ทำให้ตะแกรงเกรตติงทำหน้าที่เป็นโพลาไรเซอร์ที่สมบูรณ์สำหรับคลื่นไมโครเวฟย่าน X-band โดยคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางขนานกับซีโลหะจะถูกส่งผ่านไปได้ดี และคลื่นที่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับซีโลหะจะถูกสะท้อนหรือหน่วงไว้

การประยุกต์ใช้กฎของมาลัส: ความเข้มของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้จาก diode detector (I) เมื่อเทียบกับมุมการหมุนของเกรตติง (θ) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการ:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

โดยที่ I_0 คือความเข้มสูงสุดของคลื่น (เมื่อ $\theta = 0^\circ$ หรือ 180°) การที่ผลการทดลอง (ภาพที่ 22) สอดคล้องกับฟังก์ชัน $\cos^2 \theta$ จะยืนยันอย่างชัดเจนว่าคลื่นที่ส่งออกมาจาก Gunn oscillator เป็นคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น และ

ยืนยันความสามารถของชุดทดลองในการสาธิตหลักการทางทัศนศาสตร์ไมโครเวฟได้อย่างถูกต้องโดยอาศัยคุณลักษณะทางกายภาพที่แม่นยำของเกรตติงที่ออกแบบขึ้นเอง

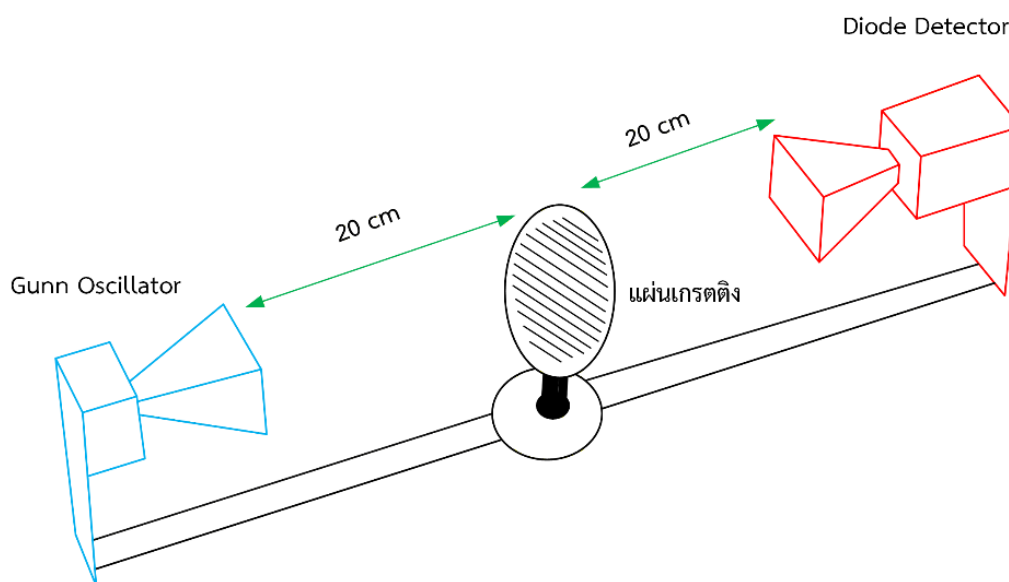
กระบวนการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

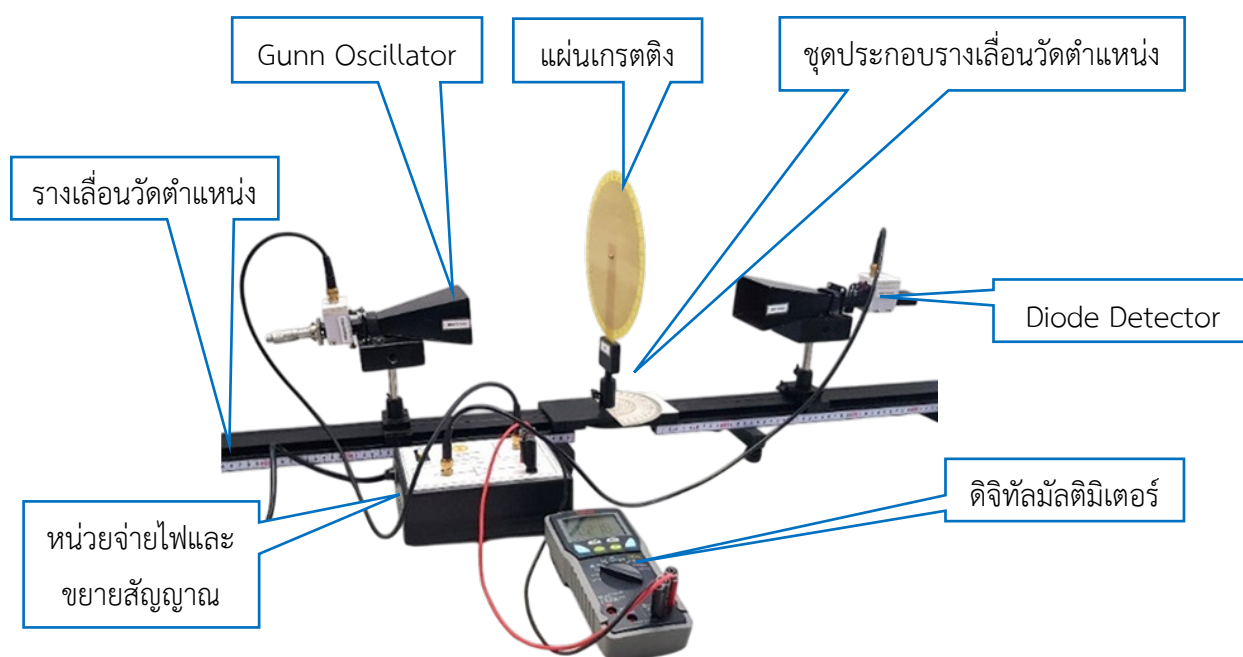
- หน่วยจ่ายไฟและขยายสัญญาณ	จำนวน 1 ชุด
- ดิจิทัลมัลติมิเตอร์	จำนวน 1 เครื่อง
- Gunn oscillator	จำนวน 1 ชุด
- diode detector	จำนวน 1 ชุด
- รางเลื่อนวัดตำแหน่ง	จำนวน 1 ราง
- ชุดประกอบรางเลื่อนวัดตำแหน่ง	จำนวน 1 ชุด
- แผ่นเกรตติง	จำนวน 1 แผ่น

การทดลอง

1. จัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดลองสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวางเกรตติงไว้กึ่งกลางระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ ห่างจากทั้งสองอย่างละ 20 cm ดังแสดงในภาพที่ 20 และ ภาพที่ 21



ภาพที่ 20 แสดงลักษณะการทดลองการศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 21 แสดงการจัดเครื่องมือการทดลองการศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. ต่อวงจรชุดทดลองให้พร้อมสำหรับการทดสอบ
3. ปรับมุมของแผ่นเกรตติงไปที่ตำแหน่ง 0 องศา
4. จ่ายไฟให้กับ Gunn oscillator ด้วยแรงดัน 8.5 V จากนั้นบันทึกค่าแรงดันที่อ่านได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์

ลงในผลการทดลอง

5. หมุนแผ่นเกรตติงครั้งละ 5 องศา จนถึง 180 องศา พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันที่วัดได้ในแต่ละมุม ลงในผลการทดลอง
6. นำข้อมูลจากตารางมาสร้างกราฟ โดยใช้ค่าแรงดันเป็นแกนตั้ง (แกน Y) และค่ามุมเกรตติงเป็นแกนนอน (แกน X)

ผลการวิจัย

ผลการทดลองหาความยาวคลื่น

ผลการทดลองหาความยาวคลื่นของคลื่นไมโครเวฟที่สร้างจากชุดทดลองแสดงในตารางที่ 1 พบว่าความยาวคลื่นที่วัดได้อยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.4 cm คิดเป็นความถี่ในช่วง 8.8 ถึง 10.0 GHz โดยมีค่าเฉลี่ยความถี่เท่ากับ 9.2 ± 0.3 GHz และค่าเฉลี่ยความยาวคลื่นเท่ากับ 3.26 ± 0.15 cm ทั้งนี้ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3 แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองสามารถสร้างสัญญาณไมโครเวฟได้อย่างมีความถูกต้องและมีความเสถียรในระดับที่เหมาะสมสำหรับการเรียนการสอน

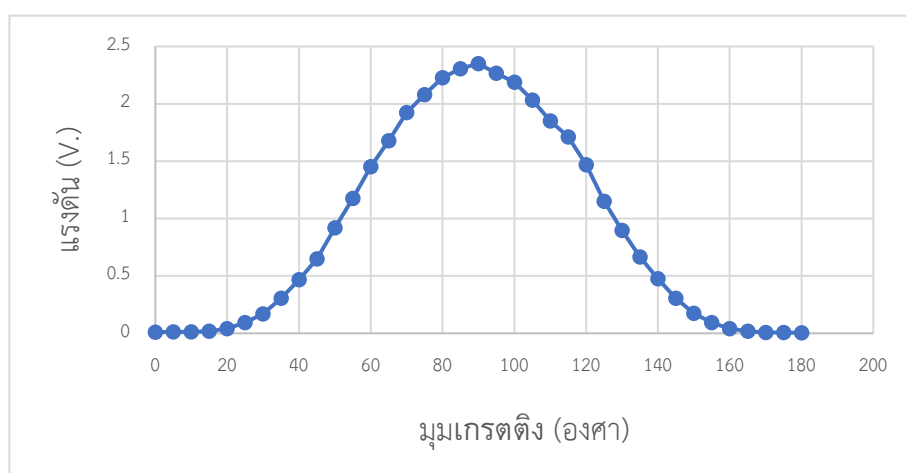
ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองการหาความยาวคลื่น

ตำแหน่งใหม่ d2 (cm)	ตำแหน่งเดิม d1 (cm)	$\Delta d = d2 - d1$ (cm)	$\lambda = 2\Delta d$ (cm)	ความถี่ (GHz)	ความไม่แน่นอน ($\delta\lambda$) (cm)	ความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์ (%)
70.4	68.8	1.6	3.2	9.4	± 0.1	3.1
72.1	70.4	1.7	3.4	8.8	± 0.1	2.9
73.6	72.1	1.5	3.0	10.0	± 0.1	3.3
75.3	73.6	1.7	3.4	8.8	± 0.1	2.9
76.9	75.3	1.6	3.2	9.4	± 0.1	3.1
78.5	76.9	1.6	3.2	9.4	± 0.1	3.1
80.2	78.5	1.7	3.4	8.8	± 0.1	2.9

ค่าเฉลี่ยความถี่: 9.2 ± 0.3 GHzค่าเฉลี่ยความยาวคลื่น: 3.26 ± 0.15 cm

ผลการทดลองการศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลการทดลองการศึกษาสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 22 พบว่าความเข้มของสัญญาณที่ตรวจวัดได้เปลี่ยนแปลงตามมุมของแผ่นเกรตติงอย่างเป็นระบบ โดยมีค่าสูงสุดเมื่อแนวโพลาไรเซชันของคลื่นสอดคล้องกับแนวการส่งผ่านของเกรตติง และมีค่าลดลงเมื่อหมุนแผ่นเกรตติงออกจากแนวดังกล่าว ผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับกฎของมาลัส (Malus' Law) ซึ่งยืนยันว่าชุดทดลองสามารถสาธิตสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นไมโครเวฟได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 22 แสดงกราฟผลการทดลองสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อภิปรายผล

จากการออกแบบและสร้าง Gunn oscillator โดยใช้วิศวกรรมย้อนรอยร่วมกับอุปกรณ์ราคาประหยัด พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างสัญญาณไมโครเวฟย่าน X-band ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความถี่เฉลี่ยประมาณ 9.2 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากทฤษฎี ผลการทดลองหาความยาวคลื่นได้ค่าในช่วง 3.0 ถึง 3.4 cm และมีค่า

ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการทดลองระดับอุดมศึกษา

ในการทดลองศึกษาคุณสมบัติการโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้มีการเปลี่ยนแปลงตามมุมของแผ่นเกรตติงอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่สอดคล้องกับแนวคิดทางฟิสิกส์ของการวางแนวโพลาไรซ์ ทั้งนี้ ชี้ให้เห็นถึงความถูกต้องของแบบจำลองและความสามารถของชุดทดลองในการถ่ายทอดองค์ความรู้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้พบข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการพิจารณาเพื่อการพัฒนาในอนาคต ประการแรก ข้อจำกัดด้านความละเอียดของไมโครมิเตอร์ที่ใช้ในการปรับจูนโพรงกำหนดส่งผลต่อความแม่นยำของความถี่ ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงขึ้น หรือระบบควบคุมด้วยสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ประการที่สอง กำลังส่งที่จำกัดของ Gunn diode อาจไม่เพียงพอต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนสูง สามารถแก้ไขได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีกำลังสูงขึ้นหรือออกแบบวงจรขยายสัญญาณเพิ่มเติม ประการสุดท้าย ปัจจัยภายนอก อาทิ การสะท้อนของคลื่นจากสิ่งแวดล้อม อาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด ดังนั้นการปรับปรุงระบบควบคุมการวัดและสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม รวมถึงการจัดการการจัดวางอุปกรณ์และสายสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลองในอนาคต

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาชุดทดลองทัศนศาสตร์ไมโครเวฟพื้นฐานสำหรับห้องปฏิบัติการระดับปริญญาตรี โดยใช้แนวคิดวิศวกรรมย้อนรอย ร่วมกับการประยุกต์ใช้วัสดุและอุปกรณ์มือสองที่มีต้นทุนต่ำ ผลการทดลองยืนยันว่าชุดทดลองที่สร้างขึ้นมีความเสถียรและประสิทธิภาพสูง โดยสามารถ สร้างคลื่นไมโครเวฟย่าน X-band ที่ความถี่เฉลี่ย 9.2 ± 0.3 GHz ได้อย่างแม่นยำ

จากการทดสอบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ชุดทดลองให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดลองหาความยาวคลื่น ซึ่งวัดได้อยู่ในช่วง 3.0 ถึง 3.4 cm และการทดลองสมบัติ โพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ให้ผลลัพธ์ตรงตามแนวคิดทางทฤษฎี การค้นพบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของระบบและศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็น สื่อการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดต้นทุน ทำให้ชุดทดลองนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน และเป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาการศึกษาในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟในอนาคต

ข้อเสนอแนะการวิจัย

เพื่อยกระดับความสามารถของชุดทดลองและเพิ่มความแม่นยำของผลการวัด อาจพิจารณาข้อเสนอแนะในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้:

ด้านการออกแบบและอุปกรณ์

- ลดการสูญเสียพลังงาน โดยเฉพาะการลดอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio, SWR) ในสายอากาศหรือท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลังงาน ควรออกแบบให้ระบบมีการจับคู่อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

- ปรับปรุงกำลังส่งของ Gunn diode โดยใช้อุปกรณ์ที่มีกำลังสูงขึ้น หรือออกแบบวงจรขยายสัญญาณเพิ่มเติม
- ใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงกว่า เช่น ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียด 0.001 mm หรือระบบควบคุมด้วยสแตปเปอร์มอเตอร์

ด้านการทดลอง

- พัฒนาระบบเก็บข้อมูลอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (เช่น Arduino) ร่วมกับการอ่านและบันทึกค่าแรงดันอัตโนมัติ
- ขยายการทดลองเพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุต่างชนิด เช่น แก้ว พลาสติก หรือโลหะ
- ทดลองการปรับความถี่แบบละเอียด เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในย่านที่แคบยิ่งขึ้น

ด้านความปลอดภัยและการใช้งาน

- ออกแบบระบบป้องกันแรงดันเกินของ Gunn diode และเสริมฟังก์ชันเตือนความผิดปกติในการเชื่อมต่อวงจร
- ปรับปรุงความสะดวกในการจัดวางอุปกรณ์และสายสัญญาณ เพื่อลดปัญหาการรบกวนสัญญาณ
- เพิ่มความระมัดระวังในการใช้งาน รวมถึงหลีกเลี่ยงการสัมผัสสายอากาศโดยตรงขณะมีสัญญาณ และหลีกเลี่ยงการวางอุปกรณ์รับในแนวคลื่นในระยะประชิด นอกจากนี้ ควรกำหนดและปฏิบัติตามข้อกำหนดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Voltage Rating) ของอุปกรณ์แต่ละส่วนอย่างเคร่งครัด เนื่องจากสัญญาณที่มีความเข้มข้นสูงหรือแรงดันเกินค่ากำหนด อาจทำให้ตัวรับสัญญาณเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้การวัดคลาดเคลื่อน ไม่เป็นเชิงเส้น หรือเกิดความเสียหายถาวรได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง เป็นอย่างสูงสำหรับการให้การสนับสนุนทั้งในด้านสถานที่ปฏิบัติงาน ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์บูรณาการ ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ ChatGPT และ Gemini สำหรับความช่วยเหลือในการตรวจสอบไวยากรณ์และการเรียบเรียงประโยคในบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- Butts, L., & El-Ghazaly, S. (2023). The wideband tunability of double Gunn diodes. *AIP Advances*, 13(3), 035322.
- Faye, G. L. (1975). *An electronically and mechanically tunable X-band Gunn oscillator* [Master's thesis, California State University]. ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Hasan, M., Nishiyama, E., & Toyoda, I. (2022). Multi-layer approach of polarization agile oscillating-type active integrated array antennas for RF transmitter front-end. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 15(4), 600–608.
- OTIKA Science. (n.d.). *Microwave optics kit* [Instructional document].
https://spegroup.ru/upload/wikifiles/instrukciya_11743-99.pdf
- PASCO. (n.d.). *Instruction manual: Microwave optics system WA-9314C, microwave accessory package WA-9315, complete microwave optics system WA-9316A* [Instruction manual].
<https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/light-and-optics/advanced-optics/microwave-optics-basic-system>
- Solano, M. A., Ipiña, J. S., Zamanillo, J. M., & Pérez-Vega, C. (2002). X-band Gunn diode oscillator for a multiple-frequency continuous-wave radar for educational purposes. *IEEE Transactions on Education*, 45(4), 316–322.
- The LNM Institute of Information Technology. (2019). *Lab manual: Microwave lab* (Version 1). The LNM Institute of Information Technology.
- Yuan, R., Wu, J., & Wang, L. (2024). Research on the Gunn oscillation effect of GaN HEMT with field plate structure in the terahertz frequency band. *Electronics*, 13(12), 2235.