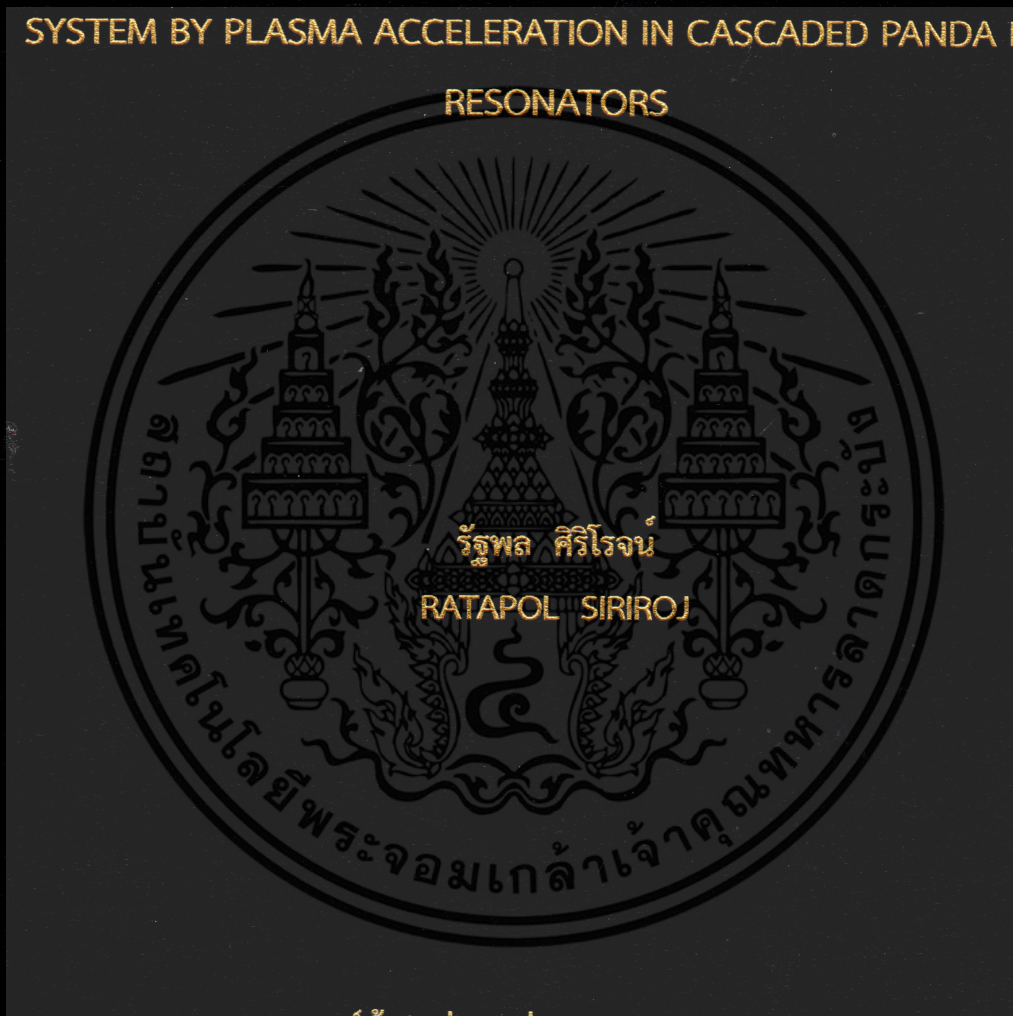


แบบจำลองระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการเร่งพลาสมาภายใน
วงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน

THE SIMULATION OF MICRO-SCALE PARTICLE ACCELERATION
SYSTEM BY PLASMA ACCELERATION IN CASCADED PANDA RING
RESONATORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-030-034

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการเร่งพลาสมาภายใน
วงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน

THE SIMULATION OF MICRO-SCALE PARTICLE ACCELERATION
SYSTEM BY PLASMA ACCELERATION IN CASCADED PANDA RING
RESONATORS



T143990

รัฐพล ศิริโรจน์

RATAPOL SIRIROJ

๒๐๐๒๖๖๒๐๔

b.....
l.....

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน T143990
รับเดือนที่ 10 ต.ค. 2559

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-SC-M-030-034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE SIMULATION OF MICRO-SCALE PARTICLE ACCELERATION
SYSTEM BY PLASMA ACCELERATION IN CASCADED PANDA RING
RESONATORS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-SC-M-030-034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

“แบบจำลองระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการเร่งพลาสมาภายในวงแหวน
สั้นห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน”

“THE SIMULATION OF MICRO-SCALE PARTICLE ACCELERATION SYSTEM BY
PLASMA ACCELERATION IN CASCADED PANDA RING RESONATORS”

ชื่อนักศึกษา

นายรัฐพล ศิริโรจน์

รหัสประจำตัว

54650601

ปริญญา


วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.วิชาญ เดชิตธีระ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.วรการ นียากร ประธานกรรมการ ดร.พิชานันท์ ธีเศรษฐโสภณ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี รศ.วิชาญ เดชิตธีระ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	 คณะวิทยาศาสตร์ พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง JITTEE THEESATHASOPHON รศ.วิชาญ เดชิตธีระ KING JIRATHEE

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 16.00-18.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามณ์วลัยลักษณ์ ชั้น 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณัฐ ธีระบริพัทธ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
วันที่... ๒๒...เดือน... พ.ศ. ๕๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการเร่งพลาสมา
ภายในวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน
นักศึกษา นายรัฐพล ศิริโรจน์
รหัสประจำตัว 54650601
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ. 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. วิชาญ เตชิตธีระ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบการเร่งความเร็วของอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการการเร่งความเร็วด้วยคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma Wakefield Acceleration) โดยใช้วงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่นำมาซ้อนทับกันในแนวตั้งโดยให้วงแหวนใหญ่ในแต่ละชั้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน เมื่อระบบทำงานโดยการป้อนเลเซอร์เข้าสู่ระบบ จะเกิดปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) ทำหน้าที่กักเก็บพลาสมาของก๊าซความดันต่ำภายในวงแหวนกลางระบบ ซึ่งจะทำให้เกิดการเร่งอนุภาคที่ใส่ไปภายในโดยคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเป้าหมายและตัวพลาสมาตลอดตามความยาวของช่องว่างกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีในปัจจุบัน ระบบนี้จะมีขนาดเล็กกว่า และใช้พลังงานน้อยกว่าในการศึกษา นี้ จะมีการเปลี่ยนค่ารัศมีของวงแหวนกลางตั้งแต่ 1.5 ไมโครเมตรจนถึง 5 ไมโครเมตร เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานสนามไฟฟ้าเวคฟิลด์ที่เกิดขึ้นภายในวงแหวน คำนวณแรงสูงสุดที่ได้ในการขับเคลื่อนต่อหน่วย เพื่อนำไปสู่ค่าของรัศมีที่เหมาะสมตามลำดับ

คำสำคัญ: พลาสมา, คลื่นพลาสมาเวคฟิลด์, การเร่งอนุภาค, การเร่งพลาสมา, วงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า, วิสเปอร์ริง แกลเลอรีโหมด

Thesis Title THE SIMULATION OF MICRO-SCALE PARTICLE ACCELERATION SYSTEM BY PLASMA ACCELERATION IN CASCADED PANDA RING RESONATORS

Student Ratapol Siriroj

Student ID 54650601

Degree Master of Science

Program Applied Physics

Year 2016

Thesis Advisor Assoc. Prof. Wicharn Techidheera

ABSTRACT

In this thesis, we proposed micro-scale particles acceleration by plasma wakefield acceleration method using cascaded PANDA rings resonator, PANDA rings resonators of each layers are vertically stacked. System operated by injected laser into each input port PANDA Rings layer, then, whispering gallery modes phenomena inside center ring's holes occurred, filled with low-pressured gas, generated high intensity electric field for create gas plasma inside, plasma accelerated target particles along length of center ring hole by wakefield, produced with interaction between plasma and targeted particles. This proposed system is smaller and use less energy than conventional accelerator system. From this study, there are changing center ring radius from 1.5 microns to 5 microns for comparison of wakefield strength inside center ring hole, maximum force per unit were calculated for suitable radius for system

Keywords: plasma, plasma wakefield, particle acceleration, Plasma acceleration, PANDA Rings resonator, Whispering Gallery Modes

กิตติกรรมประกาศ

ในการที่วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ ต้องขอขอบคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ ที่ช่วยรับฟังปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์และช่วยเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ที่ช่วยเสนอแนะ ให้คำแนะนำทางวิชาการและ จุดประกายความคิดที่จะทำการวิจัยหัวข้อนี้ ขอขอบคุณ ผศ.ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี ที่ช่วยเสนอแนะการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ขอขอบคุณนายประทีป ภัทรากร รุ่นพี่ที่ช่วยเหลือในส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจัดทำโปรแกรมในการทดสอบแบบจำลอง และช่วยขัดเกลาสำนวนในการพิมพ์วิทยานิพนธ์เล่มนี้ รุ่นพี่และรุ่นน้องท่านอื่นๆ ที่ช่วยเหลือในด้านคำแนะนำ รวมถึงครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ช่วยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยมาตลอดมา

นายรัฐพล ศิริโรจน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
สมมติฐานของการวิจัย	2
ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	4
ขั้นตอนการศึกษา	4
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
การค้นพบเครื่องเร่งอนุภาคขั้นพื้นฐาน	6
เครื่องเร่งอนุภาคด้วยคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์	8
คุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา	9
คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของการแตกตัวของก๊าซ	11
การชนกันของอิเล็กตรอน	12
โฟโตไอออไนเซชัน	13
ไอออไนเซชันเนื่องจากความร้อน	14
การชนกันของเมตาสเตเบิล (Metastable) กับ อะตอม	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหลุดของอิเล็กตรอน	15
การสูญเสียไอออน	15
พลังงานไอออไนเซชัน (ionization energy : IE)	16
อิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity : EN)	18
พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ	20
ตัวอย่างระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์	20
การเปรียบเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคด้วย RF (Radio frequency)	21
สมการที่ใช้ในเครื่องเร่งอนุภาค	22
ปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ที่เกิดขึ้นในระบบท่อนำคลื่น	
ชนิดวงแหวน (Whispering Gallery Mode phenomena in Ring Resonator)	22
ระบบของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)	24
การหาค่าผลเฉลยของสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด	
(Equation of Whispering Gallery Mode condition)	31
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบวงแหวนแพนด้า	
(Mathematical Modeling of PANDA ring resonator for WGM conditions)	32
ระบบของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ทับซ้อนกัน	
(Cascaded PANDA Ring Resonator system)	35
การออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคพลาสมาเวคฟิลด์โดยอาศัย วงแหวนสั้นพ้อง	
แบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)	35
ความสัมพันธ์ระบบของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)	
กับเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมา	37
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง	40
วิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา	40
แบบอัลกอริทึมของ Yee (Yee's Algorithm Model)	42
ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดสอบแบบจำลอง	48
ลักษณะผลการทดสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab	
และ Lumerical FDTD Solution	49
ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากบริเวณต่างๆของวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า	50
การพิจารณาสัญญาณสนามไฟฟ้าที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับ	
รัศมีของวงแหวนกลาง	55
การพิจารณาสัญญาณที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับจำนวนชั้นของระบบ	
วงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่ทับซ้อนกัน	62
การพิจารณาสัญญาณที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับเฟสของสัญญาณขาเข้า	
ในแต่ละชั้นของระบบวงแหวนสั่นพ้อง	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	79
ประวัติผู้เขียน	83





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่ 1 แสดงวงแหวนสั่นพ้อง PANDA ของระบบที่ซ้อนทับกันในรูปแบบของเครื่องเร่ง	2
รูปที่ 2 แสดงสัญญาณของระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า ที่ซ้อนกัน	
โดยสัญญาณที่วัดได้นั้นอยู่ตรงกลางวงแหวนของระบบ และแสดงให้เห็นว่า	
สัญญาณนั้นมีการเสริมกันและมีค่ามากขึ้นตามจำนวนวงแหวน	3
รูปที่ 3 แสดงพลังงานไอออนไนเซชันลำดับที่ 1 ของแต่ละธาตุ	17
รูปที่ 4 ตัวอย่างเครื่องผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ	20
รูปที่ 5 ส่วนประกอบของระบบผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์	21
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด	
(Whispering Gallery Mode) ขณะที่คลื่นสัญญาณผ่านในวงแหวนสั่นพ้อง	
แบบแพนด้าที่ใช้เป็นพื้นฐานลำดับแรกในการออกแบบเครื่องเร่งอนุภาค	23
รูปที่ 7 (ก) แสดงวงแหวนของระบบ Single Ring และพัฒนาต่อเป็น	
(ข) ระบบแอดดรอป (Add-Drop Ring Resonator) เพื่อใช้เป็นหน่วยพื้นฐาน	
ของเครื่องเร่งอนุภาคด้วยพลาสมา	25
รูปที่ 8 แสดงวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ที่ถูกพัฒนาจาก	
รูปที่ 4 ให้มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าระบบเดิมทั้งขนาดของสัญญาณขาออกที่ได้	
มีขนาดสูงขึ้น และให้ผลของการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด ได้ชัดเจนกว่า	26
รูปที่ 9 จะแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เข้าตามจุดต่าง ๆ ของระบบวงแหวนสั่นพ้อง	
แบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมการในเงื่อนไข	
การเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด ที่เกิดขึ้นในระบบ	26
รูปที่ 10 แสดงวงแหวนสั่นพ้องในรูปแบบต่าง ๆ ที่นำมาเป็นอุปกรณ์ขั้นพื้นฐาน	
ใช้ทำอุปกรณ์ เครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมา	35

รูปที่ 11 แสดง วงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า (PANDA Ring Resonator) ขณะเกิดสภาวะ วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด	36
รูปที่ 12 แสดง ระบบวงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า (PANDA Ring Resonator of System) ที่มากกว่า 1 ระบบขณะเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด	36
รูปที่ 13 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของการเกิดวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมดบริเวณกึ่งกลางระบบ วงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า (PANDA Ring Resonator) ที่มากกว่า 1 ชั้น	37
รูปที่ 14 แสดงให้ให้ระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนแพนด้าที่มีหลอดบรรจุอากาศ ทำหน้าที่ผลิตพลาสมาให้กับระบบ ขณะที่อากาศเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา	37
รูปที่ 15 แสดงให้ให้ระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้าที่มีหลอดบรรจุ อากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมาให้กับระบบ โดยการออกแบบให้มีถึง 2 ระบบ เพื่อทำการทดสอบ ตรวจวัดพลาสมาที่เกิดขึ้นในระบบ	38
รูปที่ 16 แสดงให้ให้ระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า ที่มีหลอดบรรจุ อากาศทำหน้าที่ ผลิตพลาสมาให้กับระบบ โดยออกแบบให้มีจำนวนวงแหวน ซ้อนทับกัน 4 ชั้น	38
รูปที่ 17 แสดงให้ให้ระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า ที่มีหลอดบรรจุ อากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมา โดยออกแบบให้มีระบบแพนด้าซ้อนกันมากถึง 10 ชั้น	38
รูปที่ 18 แสดงโครงสร้างของเครื่องเร่งอนุภาคภาคพลาสมาแบบเวคฟิลด์ โดยอาศัยวงแหวนแพนสันฟ็องแบบด้า เป็นตัวขับเคลื่อนในการเร่งอนุภาค	39
รูปที่ 19 แสดงการประมาณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงตัวเลข	40
รูปที่ 20 ตัวอย่างแสดงการแบ่งขอบเขตการคำนวณของอัลกอริทึมของ Yee โดยจะแบ่งเป็นลูกบาศก์ด้านเท่า ในแต่ละระนาบลูกบาศก์จะมีการกำกับ หมายเลขประจำระนาบไว้ในทั้ง 3 แกนที่ใช้พิจารณา ซึ่งถ้าพิจารณา ระบบ 2 มิติ จะคิดในระนาบ $k = 0$ เท่านั้น จึงเหลือพิจารณาเพียงแค่ รูปสี่เหลี่ยมจตุรัสเท่านั้น	42

รูปที่ 21 แสดงลักษณะของลูกบาศก์ของ Yee (Yee's Cube หรือ Yee's Cell) และตำแหน่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนลูกบาศก์	44
รูปที่ 22 รูปแสดงลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นบนวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้ารัศมี 2 ไมโครเมตร โดยโปรแกรม Matlab	49
รูปที่ 23 รูปแสดงลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นบนวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้ารัศมี 2 ไมโครเมตร โดยโปรแกรม Lumerical FDTD Solution	49
รูปที่ 24 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นขาเข้า รูปแบบเชิงเวลา	50
รูปที่ 25 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นขาเข้า รูปแบบเชิงความยาวคลื่น	51
รูปที่ 26 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นส่งผ่าน รูปแบบเชิงเวลา	51
รูปที่ 27 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นส่งผ่าน รูปแบบเชิงความยาวคลื่น	52
รูปที่ 28 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นออก รูปแบบเชิงเวลา	52
รูปที่ 29 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นออก รูปแบบเชิงความยาวคลื่น	53
รูปที่ 30 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รูปแบบเชิงเวลา	53
รูปที่ 31 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รูปแบบเชิงความถี่	54
รูปที่ 32 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 1.55 ไมโครเมตร แบบ 2 มิติ	55
รูปที่ 33 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร	56
รูปที่ 34 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร	56
รูปที่ 35 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 4 ไมโครเมตร	57

รูปที่ 36 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 5 ไมโครเมตร	57
รูปที่ 37 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 1.55 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ	58
รูปที่ 38 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ	58
รูปที่ 39 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ	59
รูปที่ 40 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 4 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ	59
รูปที่ 41 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 5 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ	60
รูปที่ 42 ลักษณะรูปแบบการต่อสัญญาณเลเซอร์ขาเข้า เข้ากับระบบวงแหวนสั้นห้อง แบบแพนด้า	62
รูปที่ 43 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร ไม่มีการซ้อนทับ	63
รูปที่ 44 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร ซ้อนทับกัน 2 ชั้น	63
รูปที่ 45 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 3 ชั้น	64
รูปที่ 46 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 4 ชั้น	65
รูปที่ 47 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น	66

รูปที่ 48 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 6 ชั้น	67
รูปที่ 49 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 7 ชั้น	68
รูปที่ 50 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 8 ชั้น	69
รูปที่ 51 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 9 ชั้น	70
รูปที่ 52 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 10 ชั้น	71
รูปที่ 53 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าตรงกัน	73
รูปที่ 54 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าตรงข้ามกัน	74
รูปที่ 55 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าแต่ละชั้น เลื่อนไปชั้นละ 45 องศา	75
รูปที่ 50 แสดงโครงสร้างระบบวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้า ที่นำมาจัดวางรวมกัน เป็นระบบทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งาน	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า อิเล็กโทรเนกาทิวิตี ในธาตุแต่ละชนิดเพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาการแตกตัวของสถานะก๊าซ เพื่อเป็นพลาสมา	18
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง ณ รัศมีค่าต่าง ๆ	60
ตารางที่ 3 แสดงค่าสนามเวกฟิลด์ต่ำสุด และค่าแรงกระทำต่ำสุดภายในช่องกลางวงแหวน ที่ความดันบรรยากาศต่อประจุทดสอบ ณ รัศมีค่าต่าง ๆ	61
ตารางที่ 4 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 2 ชั้น	64
ตารางที่ 5 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 3 ชั้น	64
ตารางที่ 6 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 4 ชั้น	65
ตารางที่ 7 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 5 ชั้น	66
ตารางที่ 8 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 6 ชั้น	67
ตารางที่ 9 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 7 ชั้น	68
ตารางที่ 10 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 8 ชั้น	69
ตารางที่ 11 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 9 ชั้น	70

ตารางที่ 12 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบ วงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 10 ชั้น	71
ตารางที่ 13 แสดงค่าสนามเวกฟิลด์ต่ำสุด และค่าแรงกระทำต่อประจุทดสอบต่ำสุดภายใน ช่องกลางวงแหวน เปรียบเทียบกับจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	72
ตารางที่ 14 แสดงค่าแรงกระทำทั้งหมดภายในช่องกลางวงแหวน เปรียบเทียบกับเฟสเริ่มต้น ของสัญญาณขาเข้า ของระบบวงแหวนสั้นห้องแบบแพนด้ารัศมีวงแหวนกลาง 3 ไมโครเมตร ซ้อนทับกัน 5 ชั้น	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของระบบการเร่งความเร็วของอนุภาคขนาดเล็กโดยใช้หลักการการเร่งความเร็วอนุภาคด้วยพลาสมา (Plasma acceleration) [1]-[3] ซึ่งเป็นการใช้คลื่นพลาสมาในการเร่งความเร็วของอนุภาคที่มีประจุ ที่ต้องการ โดยข้อดีของระบบนี้คือสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงและมีขนาดของเครื่องเร่งอนุภาคเล็กกว่าระบบอื่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงมีแนวความคิดที่จะใช้ระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) [4]-[9] มาใช้ในการสร้างระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็ก เพราะสามารถย่อขนาดของระบบให้เล็กกว่าระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ใช้พลังงานน้อยกว่าเนื่องจากใช้แสงเลเซอร์ในการดำเนินการระบบ เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) [10]-[16] ที่บริเวณใจกลางระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าใช้ในการเพิ่มพลังงานให้อากาศหรือก๊าซภายในแตกตัวเป็นพลาสมา เพื่อพร้อมสำหรับการเร่งอนุภาคที่เข้ามาต่อไป และสามารถเพิ่มกำลังของระบบได้โดยการนำระบบวงแหวนแพนด้า มาซ้อนทับกันในแนวตั้ง เพื่อเสริมความเข้มของพลังงานจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) ซึ่งไม่จำเป็นต้องเพิ่มกำลังของเลเซอร์แต่อย่างใด ในขณะที่ขนาดของระบบไม่ได้ใหญ่โตขึ้นมากนัก เนื่องจากระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้ามีขนาดในระดับไมครอนเท่านั้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ วงแหวนสั้นพ้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ อยู่ในรูปแบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) โดยสามารถหาวัดค่าต่าง ๆ ในระบบได้
2. เพื่อศึกษาหาความรู้ทางวิชาการของเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมาในรูปแบบต่าง ๆ
3. เพื่อศึกษาหาปรากฏการณ์ของระบบภายใต้สภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes)
5. นำข้อมูลที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าในเครื่องเร่งอนุภาคโดยใช้พลาสมาชนิดอื่น ๆ

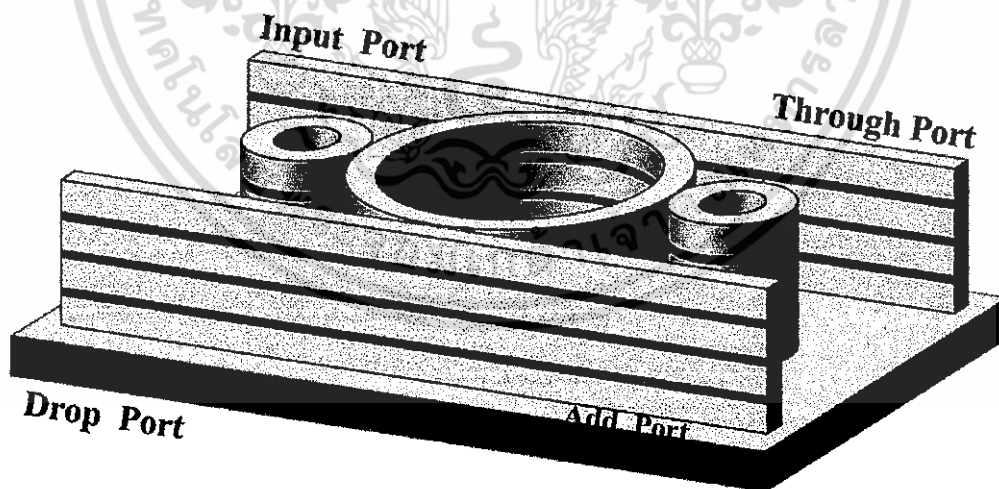
สมมติฐานของการวิจัย

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดได้ในระบบที่สร้างขึ้น เช่นความเข้มของสนามไฟฟ้า, ค่าสนามไฟฟ้า, ค่าสนามแม่เหล็ก และค่ากระแส ที่ทางออกของระบบ และบริเวณจุดกึ่งกลางของวงแหวนระบบแพนด้า จะต้องเป็นค่าที่วัดได้เมื่อระบบถูกเร่งภายใต้เงื่อนไขการเกิดพลาสมาของระบบ
2. ที่สภาวะที่ก๊าซในระบบที่ใช้เกิดการแตกตัวในรูปแบบพลาสมา เมื่อเร่งอนุภาคผ่านเครื่องเร่งอนุภาคที่สร้างขึ้น พลังงานที่ทางออกของระบบจะมีค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใส่ให้กับระบบ (Input source)
3. ที่สภาวะดังกล่าวระบบที่สร้างขึ้นจะต้องอยู่ในสภาวะที่เรียกว่า วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) ระบบจึงจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยทั่วไปวงแหวนสั่นพ้องจะมีรูปแบบต่างๆ หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น วงแหวนสั่นพ้องเดี่ยว (Single Ring Resonator) [17], วงแหวนแบบวงแหวนเดี่ยวที่มี 2 ทางเข้าและสองทางออก (Add Drop Ring Resonator) [17]-[19] และอาจเป็นระบบที่มีวงแหวนมากกว่า 2 วงแหวนขึ้นไป แต่ทั้งนี้ในการออกแบบในงานวิจัยนั้น จะใช้รูปแบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) [4]-[9] เหตุผลที่ใช้ระบบแพนด้า เพราะเป็นระบบที่ใหม่และให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบแบบแอดดรอป (Add-Drop Ring) เมื่อเทียบกับวงแหวนต่อวงแหวนทั้งด้านประสิทธิภาพของการเรงอนุภาค คุณสมบัติของการเป็นตัวพาในรูปแบบตัวจับเชิงแสง (Optical tweezer) [20] สามารถใช้เป็น ส่วนประกอบหนึ่งในอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้ จะคำหนึ่งถึงคุณสมบัติของการเรงของอนุภาค เมื่อให้อนุภาคผ่านระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 2 โดยเมื่อในวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่สร้างขึ้น ในแต่ละหน่วย มาซ้อนกันตามแนวตั้งแสดงในรูปที่ 1 ผลของการซ้อนกันจะเป็นการเสริมกันโดยสัญญาณที่ใส่เข้าไปจะมีหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบของคลื่นแสง หรือ ไมโครเวฟ เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญญาณในรูปแบบของเลเซอร์ เป็นตัวส่งผ่านทางด้านช่องสัญญาณขาเข้า (Input port) ในระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า จะต้องอยู่ในสถานะของเงื่อนไขของความเป็นวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) [10]-[16] โดยที่เงื่อนไขของสถานะดังกล่าวจะอธิบายในบทที่ 2

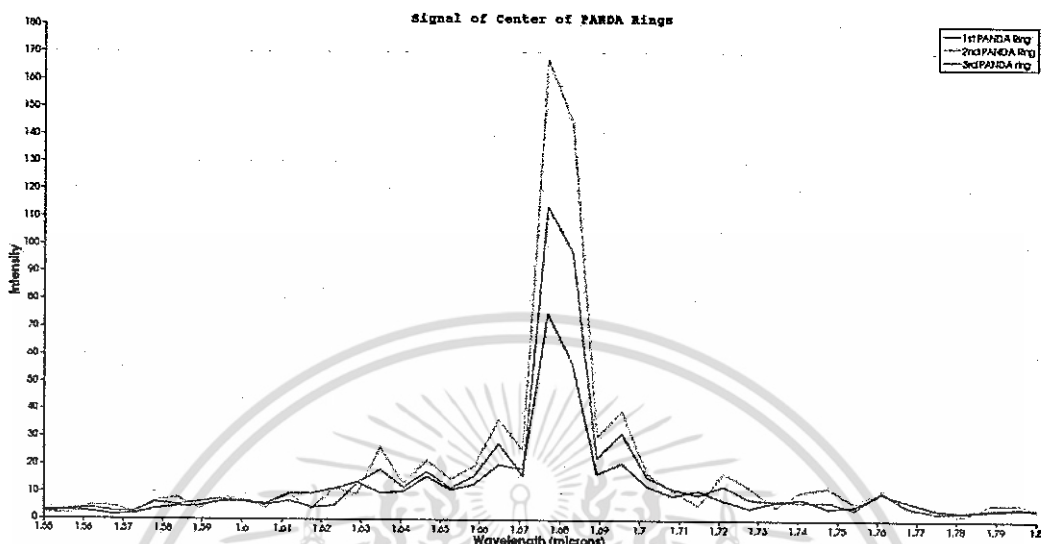
จากเงื่อนไขของสถานะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Modes) ในระบบที่สร้างขึ้นในสถานะสุญญากาศก่อกำเนิดพลาสมาของก๊าซความดันต่ำภายในวงแหวนกลางระบบ ซึ่งจะ ทำให้เกิดการเรง



รูปที่ 1 แสดงวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า ของระบบที่ซ้อนทับกันในรูปแบบของเครื่องเรง

อนุภาคที่ใส่ให้ภายในอีกทอดหนึ่ง และถ้าทำการสร้างระบบมากกว่า หนึ่งระบบ และนำระบบมาซ้อนกันตามแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วผลของการก่อกำเนิดของพลาสมาของก๊าซความ

ต้นตำภายในวงแหวนที่สภาวะวิสเปอริริงแกลเลอรีโหมด จะอยู่ในรูปแบบที่เสริมกัน ทำให้ระบบที่สร้างขึ้นนั้นอยู่ในรูปแบบเครื่องเร่งอนุภาคโดย ที่ข้อดีของระบบที่ออกแบบมานั้นจะใช้พลังงานน้อยกว่าเครื่องเร่งอนุภาคโดยทั่วไป [21],[22]



รูปที่ 2 แสดงสัญญาณของระบบวงแหวนเส้นพ้องแบบแพนด้า ที่ซ้อนกันโดยสัญญาณที่วัดได้นั้นอยู่ตรงกลางวงแหวนของระบบ และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณนั้นมีการเสริมกันและมีค่ามากขึ้นตามจำนวนวงแหวน

จากรูปที่ 2 จะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณในรูปแบบเกาซ์เซียน ที่วัดได้บริเวณตรงกลางของวงแหวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนของระบบ ถ้าระบบเพิ่มสูงขึ้น ขนาดของสัญญาณก็จะมีค่ามากขึ้นโดยผลการทดลองจะแสดงในบทที่ 4 การที่สัญญาณมีค่ามากขึ้นแสดงว่าสัญญาณของระบบมีการเสริมกันทำให้ค่าความเข้มของสัญญาณที่วงแหวนกลางของระบบวงแหวนเส้นพ้องแบบแพนด้า เพิ่มขึ้นตามจำนวนของวงแหวนที่เพิ่มขึ้น ผลจะแสดงให้เห็นได้จริงในบทที่ 4 และจากระบบก็จะแสดงให้เห็นโดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ เช่น สัญญาณที่ใส่เข้าสู่ระบบ ในรูปแบบ พลังงานศักย์ (Potential energy), สนามไฟฟ้า (Electric field), สนามแม่เหล็ก (Magnetic field), ค่าความเข้มของสนามซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าสมบรูณ์ของสนามไฟฟ้ายกกำลังสองของค่าสัญญาณป้อนเข้า ส่วนบริเวณช่องสัญญาณเพิ่มเติม (Add port) ของระบบวงแหวน จะการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรเช่นเดียวกับช่องสัญญาณขาเข้า (Input port) และรวมถึงการเพิ่มและลดลงของขนาดของวงแหวนตรงกลาง และวงแหวนซ้ายขวาของระบบ ก็จะส่งผลถึงสัญญาณผลลัพธ์จับได้ ที่บริเวณ ช่องสัญญาณขาออก (Drop port) และบริเวณ วงแหวนกลางของระบบแพนด้า ด้วย

จากรูปที่ 1 การที่ในวงแหวนของระบบนำมาซ้อนทับกันในแนวตั้งโดยให้วงแหวนใหญ่ในแต่ละชั้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ก็เป็นการทำให้สัญญาณที่ได้มีขนาดสูงขึ้นซึ่งจะแสดงผลให้เห็นว่าเกิดขึ้นได้จริง และรายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 4

ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาถึงแบบของเครื่องเร่งอนุภาคในแบบที่สร้างขึ้น ในระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า โดยใช้หลักการการเร่งความเร็วด้วยคลื่นพลาสมา (Plasma wakefield acceleration) ดังนั้นในการที่จะสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวได้จะต้องเข้าใจหลักการของคุณสมบัติพลาสมาของอนุภาคสัมพันธ์กับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นดังนั้นขอบเขตจะเป็นการวิจัยเพื่อหาผลลัพธ์ที่ได้ของระบบที่สร้างของว่ามีความแตกต่างจากระบบของเครื่องเร่งอนุภาค โดย ทัวไป ทั้งขนาดและพารามิเตอร์ตัวแปรที่มีผลต่อระบบ เช่น สัญญาณนำเข้าไปของระบบ และ สัญญาณผลลัพธ์ ที่ได้จากระบบเปรียบเทียบกับถึงค่าความแตกต่างรวมถึง ความคุ้มทุนต่อการสร้างระบบดังกล่าวเพื่อไปประยุกต์สร้างระบบที่ได้จากงานวิจัยให้เป็นประโยชน์ได้จริง

สำหรับพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma wakefield) นั้นในระบบของเครื่องเร่งอนุภาค ภายใต้สารที่ใช้ในระบบ เมื่อค่าของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงมากพอภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จะทำให้อากาศในระบบมีการแตกตัวในรูปแบบของ พลาสมา ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 2

ขั้นตอนการศึกษา

ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการทำในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจะต้องมีข้อมูลของอุปกรณ์และคู่มือการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ เช่นคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลการทดลอง, โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ MATLAB, Lumerical FDTD Solution, คู่มือศึกษาระบบ Plasma source และระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า

ข้อมูลที่ทำให้การเก็บที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือข้อมูลจากการศึกษาเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบต่าง ๆ ผลดี ผลเสีย ที่เกิดจากอุปกรณ์ค่าใช้จ่ายต่อการสร้างอุปกรณ์ของแต่ละชนิดและแต่ละประเภทเพื่อเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยจะนำมาเปรียบเทียบข้อมูลทั้งหมดเพื่อใช้ในการประมวลวิเคราะห์ผลว่าแบบหรือโมเดลที่สร้างขึ้นมีความเป็นไปได้และจะสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ได้จริง ดังนั้นในงานวิจัยจะต้องเก็บข้อมูลส่วนใหญ่จากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการของภาคเป็นหลัก ส่วนข้อมูลจากห้องปฏิบัติการอื่นจะเป็นเพียงการนำข้อมูลมาใช้ในการเปรียบเทียบเท่านั้น นอกจากข้อมูลจากการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์แล้ว ยังต้องอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการประมวลผลด้วย ดังนั้นข้อมูลที่สร้างขึ้นจะต้องทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการอาศัยงานในการวิจัยเช่นกัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับวงแหวนสั้นพ้อง (Ring Resonator)
2. ศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของของอนุภาคเมื่อผ่านเครื่องเร่งอนุภาคแบบ

พลาสมา

3. ศึกษาปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด กับระบบที่ใช้ในวงแหวนแบบต่าง ๆ และนำผลมาเปรียบเทียบถึงข้อดีข้อเสียที่เกิดขึ้นกับระบบแต่ละชนิด โดยการเปรียบเทียบว่าจะนำระบบแบบใดมาใช้ในการประมวลผล ซึ่งงานวิจัยนี้ จะใช้ในรูปแบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)

4. สามารถนำผลที่ได้จากการประมวลด้วยคอมพิวเตอร์ไปเทียบกับผลของประสิทธิภาพที่วัดได้จากเครื่องเร่งอนุภาคชนิดอื่น ๆ เพื่อยืนยันในงานวิจัยว่าให้ประสิทธิภาพของงานวิจัยที่ใช้มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด และจะต้องแสดงในรูปแบบผลทางวัดในรูปแบบเป็นค่าก็เท่าและค่าความคาดเคลื่อนที่วัดได้ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ซึ่งในรายละเอียดจะอธิบายในบทที่ 4 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิดทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การค้นพบเครื่องเร่งอนุภาคขั้นพื้นฐาน (Discovery of Particle accelerators)

เครื่องเร่งอนุภาคเป็นเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเร่งอนุภาคได้แก่ โปรตรอน อิเล็กตรอน นิวตรอน และอนุภาคไอออนให้มีความเร็วที่สูงขึ้น สำหรับแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องเร่งอนุภาคเริ่มขึ้นตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1911 โดย เออร์เนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) และคณะจากห้องปฏิบัติการวิจัย คาเวนดิช (Cavendish) มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (Cambridge University) จากการทดลองเรื่องการกระเจิงของอนุภาคแอลฟาเมื่อพุ่งชนนิวเคลียสของทอง อนุภาคแอลฟาที่ใช้ยิงมาจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีซึ่งมีแรงไม่มากพอที่จะฝ่าแรงคูลอมบ์ เข้าไปถึงนิวเคลียสของทองได้ จึงจำเป็นต้องสร้างเครื่องมือบางอย่างมาช่วยเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงมากพอที่จะทะลุวงเข้าไปในใจกลางของทองให้ได้

จากแนวคิดนี้ทำให้ในเวลาต่อมา จอห์น ดักกลาส คอคครอฟต์ (John Douglas Cockcroft) และเออร์เนสต์ โทมัส ซินตัน วอลตัน (Ernest Thomas Sinton Walton) ได้ออกแบบสร้างเครื่องเร่งอนุภาคขนาด 700 กิโลโวลต์ โดยอาศัยหลักการเร่งด้วยสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นเครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกของโลกเรียกว่า "เครื่องเร่งอนุภาคคอคครอฟต์-วอลตัน" (Cockcroft-Walton Accelerator) [23],[24]

ในเวลาใกล้เคียงกัน เออร์เนสต์ โอแลนโด ลอว์เรนซ์ (Ernest Orlando Lawrence) แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่เบิร์กลีย์ ได้ทดลองสร้างเครื่องเร่งอนุภาคที่สามารถเร่งอนุภาคผ่านอนุกรมของท่อตัวนำ ที่เรียกว่า "เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน" (Cyclotron Accelerator) [25] โดย เครื่องเร่งอนุภาคที่ลอว์เรนซ์ สร้างขึ้นในตอนนั้นสามารถเร่งโปรตอนให้มีพลังงานสูงถึง 1.25 MeV

ต่อมาเมื่อมีความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้นในช่วง GeV จึงต้องทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เร็วขึ้น แต่เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จนใกล้ความเร็วแสงมาก ๆ มวลก็เปลี่ยนไปตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ (Relativistic Theory) ดังนั้นความถี่วิทยุ (Radio Frequency) เดิมที่เคยคงที่ จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลง เกิดเป็นเครื่องเร่งอนุภาคชนิดใหม่ที่อาศัยหลักการคล้ายๆ กัน แต่ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เรียกว่า "เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน" (Synchrotron Accelerator) [26] และถือว่าเป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่ได้รับการพัฒนามากสุดในปัจจุบันนี้

แม้ว่าเครื่องเร่งอนุภาคต่าง ๆ ที่สร้างขึ้น จะแตกต่างกันด้วยหลักการทำงานและขนาด แต่มีส่วนประกอบพื้นฐานที่เหมือนกัน 3 ส่วนดังนี้

1. แหล่งกำเนิดไอออน (Ion Source) หรือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source)
2. ห้องเร่งอนุภาคสำหรับเร่งอนุภาคให้มีความเร็วสูงขึ้น (Accelerator Chamber)
3. ระบบลำเลียงลำอนุภาค (Beam Transport System)

ในการแบ่งชนิดของเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ตามชนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการ ขับเร่งอนุภาคประจุได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้คือ

1. เครื่องเร่งศักย์สูงกระแสตรง (High voltage DC) อนุภาคประจุถูกเร่งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นโดยเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ในสนามไฟฟ้าคงที่ ได้แก่เครื่องเร่งอนุภาค คอคคอร์ท-วอลตัน (Cockcroft-Walton accelerator) [23],[24] และ เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดอร์กราฟฟ์ (Van de Graaf accelerator) [27] พลังงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคเหล่านี้ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง KeV-MeV

2. เครื่องเร่งเหนี่ยวนำ (Induction) ใช้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็ก ได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาค เบตาทรอน (Betatron Accelerator) [28],[29] เป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน มีพลังงานอยู่ในช่วงหลายร้อย MeV

3. เครื่องเร่งเรโซแนนซ์ (Resonance) เป็นเครื่องเร่งอนุภาคยุคใหม่ที่นิยมมากในปัจจุบัน ซึ่งใช้องค์ประกอบส่วนสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุ (RF) ที่แปรตามเวลา สนามไฟฟ้าที่ใช้เร่งเป็นผลรวมของคลื่นฮาร์มอนิกที่มีความเร็วเฟสต่างกัน และเคลื่อนไปตามทางเคลื่อนที่เป็นทางตรงหรือวงกลม ถ้าความเร็วของอนุภาคใกล้เคียงกับความเร็วเฟสของฮาร์มอนิกตัวหนึ่งตัวใด อนุภาคจะถูกเร่งในสนามไฟฟ้าของฮาร์มอนิกนั้น และจะเกิดเรโซแนนซ์กับคลื่น ตัวอย่างเครื่องเร่งเรโซแนนซ์ (Resonance Accelerator) ได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอน (Cyclotron Accelerator) [25] และ เครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน (Synchrotron Accelerator) [26] พลังงานที่ได้อยู่ในช่วง 100 keV- 1 GeV

นอกจากนี้อาจแบ่งเครื่องเร่งอนุภาคตามลักษณะเรขาคณิตของทางเคลื่อนของอนุภาค ออกเป็นเครื่องเร่งอนุภาค เชิงเส้น (Linear Accelerator) [30] และเครื่องเร่งอนุภาคเชิงวง (Circular Accelerator) [25],[26]

สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบของความเร็วด้วยคลื่นพลาสมา (Plasma wakefield Acceleration) [1] - [3] โดยใช้วงแหวนลำพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) [4]-[9] ซึ่งจะเป็นออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ระบบเครื่องเร่งอนุภาค (Particles Acceleration System) และระบบของวงแหวนลำพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)

เครื่องเร่งอนุภาคด้วยคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma wakefield acceleration)

เครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma Wakefields Acceleration) [1]–[3] เป็นเทคนิคสำหรับการเร่งอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน (Electron) โพซิตรอน (Positron) และไอออน (Ion) โดยใช้สนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนพลาสมา และพลาสมาคลื่นหรือโครงสร้างอื่น ๆ ไล่ระดับสูง (เช่น การสั่นสะเทือน และ Sheath fields) เครื่องเร่งอนุภาคพลาสมา โครงสร้างถูกสร้างขึ้นให้ใช้เลเซอร์พัลส์ (Laser pulses) สั้นเป็นพิเศษ หรือลำแสงอนุภาค (Particle beams) มีพลังที่ตรงกับพลาสมาพารามิเตอร์ (Plasma parameters) เทคนิคเหล่านี้มีวิธีการสร้างประสิทธิภาพสูงเครื่องเร่งอนุภาคโดยที่เครื่องเร่งอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าปกติ แนวคิดพื้นฐานของเครื่องเร่งพลาสมาและความเป็นไปได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย โทซึกิ ทาจิมะ และ ศ. จอห์น เอ็ม ดอร์สันของ UCLA ในสหรัฐอเมริกา ในปี 1979 [1] เริ่มต้นการออกแบบการทดลองระบบเวคฟิลด์ (Wakefields System) ที่ UCLA และทำการทดลองของอุปกรณ์ทดลอง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องเร่งอนุภาคดังกล่าวสามารถเร่งอนุภาคได้ดีและมีประสิทธิภาพกว่าเครื่องเร่งอนุภาคที่มีในขณะนั้น

สำหรับการทดลองครั้งแรกของเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมาเวคฟิลด์ PWFA ได้ถูกวิจัยที่สถาบัน Argonne National Laboratory ในปี 1988

เครื่องเร่งอนุภาคพลาสมา (Plasma acceleration) แบ่งตามชนิดของ พลาสมาอิเล็กตรอนดังต่อไปนี้

1. Plasma wakefield acceleration (PWFA): เครื่องเร่งอนุภาคพลาสมาแบ่งตามพลาสมาคลื่นอิเล็กตรอนได้จากอิเล็กตรอนกลุ่ม
2. Laser wakefield acceleration (LWFA): คือเครื่องเร่งอนุภาค จาก แสงเลเซอร์เพื่อทำการสร้าง กลุ่มคลื่นพลาสมาอิเล็กตรอน (Electron Plasma Wave)
3. Laser beat-wave acceleration (LBWA): คือเครื่องเร่งอนุภาคคลื่นอิเล็กตรอนพลาสมาสร้างจาก เลเซอร์พัลส์ (Laser Pulses) ที่มีค่าของความถี่ที่แตกต่างกัน
4. Self-modulated laser wakefield acceleration (SMLWFA): คือเครื่องเร่งอนุภาคที่ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าของคลื่นอิเล็กตรอนพลาสมาโดยอาศัยการกระตุ้นโดยหลักการกระเจิงของรามาน (Raman Scattering)

ข้อดีของเครื่องเร่งอนุภาคพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma Wakefields Acceleration) เป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่มีราคาไม่แพงและมีขนาดกะทัดรัดเหมาะสำหรับการใช้งานต่าง ๆ ตั้งแต่ ฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงเพื่อการแพทย์ และอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ การพัฒนาบุคลิกภาพ และแหล่งแสงอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) เพื่อการวินิจฉัยหรือการรักษาด้วยรังสีโปรตอนและสำหรับเครื่องบำบัด โดยทั่วไปใช้เวคฟิลด์ (Wakefields) ที่เกิดจากพลาสมาความหนาแน่นของคลื่นเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม เครื่องเร่งอนุภาคพลาสมา สามารถทำงานใน

ที่แตกต่างกันหลายระบบขึ้นอยู่กับลักษณะของพลาสมาที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ในการทดลองของ เครื่องเร่งอนุภาคแบบเลเซอร์พลาสมา ที่ห้องปฏิบัติการแห่งชาติ Lawrence Berkeley National สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1 GeV ภายในระยะทาง 3.3 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาค SLAC ต้องใช้ระยะทาง 64 เมตร เพื่อให้ได้พลังงานของอิเล็กตรอนที่เท่ากัน ในขณะเดียวกัน ถ้า SLAC ใช้ระบบพลาสมาเวคฟิลด์จะสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากกว่า 40 GeV โดยใช้ระยะทางเพียง 85 ซม. ส่วนที่ Texas Petawatt laser facility at the University of Texas at Austin ได้ทำการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคเป็นลักษณะ mono-energetically สามารถเร่งอิเล็กตรอนมีพลังงาน 2 GeV โดยใช้ระยะทางเพียง 2 ซม. เป็นต้น

จากตัวอย่างข้างต้นเป็นเพียงตัวอย่างที่จะอธิบายให้เห็นว่าเครื่องเร่งอนุภาคแบบคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma wakefield accelerator) สามารถเร่งอนุภาคได้พลังงานสูงมากในขณะที่พลังงานที่ให้กับระบบมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคชนิดอื่น ๆ นอกจากนั้นเครื่องเร่งอนุภาคแบบคลื่นพลาสมา ยังมีขนาดที่เล็กกว่าเครื่องอนุภาคชนิดอื่น นอกจากนั้นต้นทุนยังต่ำอีกด้วย

คุณสมบัติพื้นฐานของ พลาสมา (Plasma field properties)

ในทางฟิสิกส์ และเคมี พลาสมา คือ แก๊สที่มีสภาพเป็นไอออน และมักจะถือเป็นสถานะหนึ่งของสสาร การมีสภาพเป็นไอออนดังกล่าวนี้ หมายความว่า จะมีอิเล็กตรอนอย่างน้อย 1 ตัว ถูกดึงออกจากโมเลกุล ประจุไฟฟ้าอิสระทำให้พลาสมามีสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น สถานะที่ 4 ของสสารนี้มีการเอ่ยถึงครั้งแรก โดยเซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อ ค.ศ. 1879 และในปี ค.ศ. 1928 นั้น เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) คิดคำว่าพลาสมา (Plasma) ขึ้นมาแทนสถานะของสสารนี้เนื่องจากเขานึกถึงพลาสมาของเลือด โดยที่พลาสมาจัดได้ว่าเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้ง ประจุบวกและลบ ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง (Quasi-Neutral) ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้นโดยรวมแล้วมีจำนวนเท่า ๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) โดยที่พฤติกรรมร่วมนี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้น ๆ เท่านั้น แต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่ สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน

พลาสมาสามารถเกิดได้โดย การให้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่ก๊าซที่เป็นกลาง เมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอม และทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซ

แตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด พลาสมามีความแตกต่างจากสถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะก๊าซ โดยมีเงื่อนไข 3 ประการ ในเรื่องดังต่อไปนี้คือ ความยาวคลื่นเดอบาย จำนวนอนุภาค และความถี่พลาสมา ซึ่งทำให้พลาสมามีความจำเพาะเจาะจงที่แตกต่างจากสถานะอื่นออกไป

เมื่อก๊าซได้รับค่าของพลังงานจากคลื่นวิทยุ (Radio wave : RF) หรือ คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เราจะมองเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงออก เนื่องจากพลังงานภายนอกทำให้ระดับชั้นของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เปลี่ยนจากสถานะพื้น (Ground State) ไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) โดยในทางธรรมชาติ อิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะกระตุ้น ได้ประมาณ 10-18 วินาที (Lieberman, 1994) หลังจากนั้นวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valance Electron) จะคืนสู่สถานะพื้นอีกครั้ง และจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้อยู่ในรูปแบบคลื่นแสง (Visible Light) การเปล่งแสงของพลาสมานั้นจะสามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงก๊าซที่มีการแตกตัวเช่นก๊าซอาร์กอน (Ar) จะเปล่งแสงสีม่วง, อากาศ (Air) และไนโตรเจน (N) จะเปล่งแสงสีชมพู ซึ่งจะบ่งชี้ให้เห็นถึงสภาวะกระตุ้นของสถานะก๊าซ

ในองค์ประกอบของพลาสมานั้นประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุบวกและลบของของเหลว โดยทั่วไป สร้างขึ้นโดยความร้อน หรือ ใช้โฟตอนพลังงานสูง (Direct / Tunneling / Multi-photon / Barrier-suppression) เมื่อเจือจางก๊าซ ภายใต้เงื่อนไขปกติ พลาสมาจะเป็นกลางซึ่งมองเห็นด้วยตาเปล่า หรือบริเวณกึ่งกลาง เมื่อมีการรวมกัน ด้วยจำนวนของอิเล็กตรอนและไอออนในภาวะสมดุล อย่างไรก็ตาม ถ้ามีสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากพอ จะส่งผลให้เกิด พลาสมาอิเล็กตรอนซึ่งมีแสงมากและไอออน โดยปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วเบื้องต้น จะแยกความแตกต่างระหว่างของการสร้างประจุไอออน หมุนเวียน ความไม่สมดุลภายในกลุ่มอนุภาค อนุภาคที่ฉีดเข้าไปเช่น พลาสมาจะเร่งโดยการแตกกระจายของอนุภาคที่ฉีด แต่เนื่องจากขนาดของการแยก นี้โดยทั่วไปจะคล้ายกับขนาดของค่าขอบเขตที่กำหนดขึ้นซึ่งถ้าดูจากภายนอกเปรียบเทียบเหมือนไม่เห็นถึงค่าของความแตกต่างที่เกิด ในการเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่เพียงแค่ใช้สนามโดยอนุภาคชนิดต่าง ๆ แต่พลาสมา กลางทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนแปลงเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ปัจจุบันรู้จักในรูปแบบ คลื่นตามขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่คล้ายกับเป็นคลื่นตามยาวด้านพลาสมา ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีการ ออกแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่อย่างเหมาะสม เช่นในกรณีที่เป็นโพรง (Cavities) หรือคลื่นเดินทางใน โครงสร้างเช่นดิสก์โพลด ในท่อนำคลื่น ฯลฯ แต่ข้อจำกัดของวัสดุเดิมที่มีอยู่ และมีความสัมพันธ์กับ ข้อมูลที่พวกเขาได้รับในที่สุดการผ่านไอออนและเพื่อสลายตัวของก๊าซ (ในรูปแบบพลาสมา) พลาสมา วิทยาศาสตร์มีความก้าวหน้าการสร้าง และใช้ประโยชน์สูงสุดเท่าที่เคยผลิตโดยสาขาวิทยาศาสตร์ใน ห้องปฏิบัติการ

สิ่งที่ทำให้ระบบมีประโยชน์ และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คือการนำคลื่นที่มีค่าขนาดของความ เข้มสูงมากผ่านเข้าไปในเครื่องเร่งอนุภาคพลาสมา เป็นในลักษณะที่ คล้ายกับคลื่นเดินทางผ่านเข้าไป ระบบ และ จากแนวคิดในการเร่งปกติ การเร่งบล็อกลูกเฟสอนุภาคในคลื่นนี้มีแต่และพื้นที่ เร่งให้คลื่น

ความเร็วสูงในขณะที่มีการรักษาสถานะของความเป็นกลุ่มของคลื่นอิเล็กตรอน แต่ในพลาสมากลับไม่รักษาความเป็นกลุ่มคลื่น ตัวอย่างเช่น เลเซอร์พัลส์ (Laser pulse) หรือกลุ่มของอิเล็กตรอนพลาสมา (Plasma electron group) โดยอิเล็กตรอนจะถูกขับเคลื่อนออกไปจากศูนย์กลางของเครื่องเร่งโดยการบังคับแบบแพนดอร์โรโมทีฟ (Ponderomotive) หรือขอบเขตไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Boundary) จากเขตข้อมูลที่น่าสนใจเช่น อิเล็กตรอนหรือเลเซอร์ พลาสมาไอออนมักจะมีขนาดใหญ่ และได้มีการกล่าวไว้ว่า กลุ่มของพลาสมา (Plasma Group) จะหยุดนิ่งที่เวลาของการตอบสนองต่อระบบ [31] การขับเคลื่อนของเครื่องเร่งสามารถสร้างขึ้นโดยการส่งโปรตอนหรืออิเล็กตรอนเชิงสัมพัทธ์ภาพพวงเป็นพลาสมาที่เหมาะสมหรือก๊าซ ในบางกรณีก๊าซสามารถประจุของอิเล็กตรอน โดยที่กลุ่มของอิเล็กตรอน หรือเป็นกลุ่มพวง ในการสร้างพลาสมาต้องอาศัยกลุ่มของอิเล็กตรอน ซึ่งแบบเดิมนั้นค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และให้ผลของค่าพลาสมาสูงของพลาสมาอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนพวงแล้วดันออกไปจากศูนย์กลาง การสร้าง ตัวเพื่อช่วยให้เกิดการกระตุ้น

คล้ายกับเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน โดยอาศัยเลเซอร์ก็สามารถใช้เพื่อกระตุ้นและ เป็นคลื่นเดินทางผ่านพลาสมา สนามไฟฟ้าของแสงแยกอิเล็กตรอนและ ในลักษณะเดียวกับที่สนามภายนอกจะทำให้มีประสิทธิภาพสูงตาม ในกรณีที่ให้ค่าสนามความเข้มสูงมาก ประจุพลาสมาอิเล็กตรอนสามารถเอาออกจากก๊าซ ถึงแม้ว่าอนุภาคจะยังไม่มีเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็วก็ตามซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์ในกรณีนี้ว่าเป็น ปรากฏว่า " ฟองสบู่ " (Bubble) ของประจุ ซึ่งโดยปกติสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า การที่ประจุจะเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาที่ใกล้ความเร็วแสง ฟอง ที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนของอิเล็กตรอนนั้นจึงมีประจุบวก ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านเพื่อรักษาความเป็นกลางในสถานะของพลาสมาที่เกิด ในการไล่ระดับความเข้มของความต่างศักย์ที่ตามเครื่องเลเซอร์พัลส์ นั่นคือ " เวคฟิลด์ (Wakefield)" ที่ใช้สำหรับการเร่งอนุภาค อนุภาคที่ถูกฉีดเข้าไปในพลาสมา ใกล้พื้นที่ความหนาแน่นสูงจะได้รับต่อ (หรือจากการเร่งความเร็วที่ยังคงเป็นเวคฟิลด์ ผ่านคอลัมน์ จนในที่สุด จะได้ อนุภาคความเร็วของเวคฟิลด์ (Wakefield) พลังงานที่สูงขึ้นสามารถเข้าถึงได้โดยการฉีดอนุภาคเดินทางไปทั่วพื้นที่ทั้งหมดของเวคฟิลด์ เมื่อเวคฟิลด์มีความเร็วสูงกว่าคลื่นที่เป็นตัวพา โดยเครื่องที่ออกแบบมาเพื่อใช้ประโยชน์จากเทคนิคนี้จะถูกเรียกว่าเป็น Surfatron [32]

คุณสมบัติขั้นพื้นฐานของการแตกตัวของก๊าซ

ตามคุณสมบัติเบื้องต้นของการเกิดพลาสมา ดังนั้นในงานวิจัย จะต้องทราบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของการแตกตัวของสถานะของก๊าซ เพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการแตกตัวของก๊าซ จะต้องทราบคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้น อันได้แก่ ค่าของพลังงาน ไอออนไนเซชัน (Ionization), พลังงานยึดเหนี่ยวภายในโมเลกุลของก๊าซ (Binding Energy) และค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity)

เนื่องจากไอออนคือ อะตอมที่มีประจุบวกหรือลบที่เกิดจากการสูญเสียหรือเพิ่มอิเล็กตรอน แต่ไอออนไนเซชัน (Ionization) นั้นหมายถึง การสร้างไอออนบวกโดยวิธีการเอา

อิเล็กตรอน ออกจากอะตอมที่เป็นกลาง การที่จะเอาอิเล็กตรอน ออกจากอะตอมนั้น จำเป็นต้องใส่พลังงานให้แก่อะตอม เช่นใส่พลังงานกลหรือพลังงานความร้อน การที่เราใส่พลังงานให้อะตอมนั้นก็เป็นการเปลี่ยนระดับของวงโคจรอิเล็กตรอน ภายในอะตอมอะตอมวิธีการไอออนไนเซชัน หรือการกำเนิดไอออนนั้นมีดังนี้

1. การชนกันของอิเล็กตรอน (Ionization by Collision)
2. โฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization)
3. ไอออนไนเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal Ionization)
4. การชนกันของเมตาเสเตเบิล (Metastable) กับอะตอม (Ionization by Interaction of Metastable with Atoms)

การชนกันของอิเล็กตรอน (Ionization by Collision)

การไอออนไนเซชันแบบนี้จะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน หากอิเล็กตรอน มีความเร็วน้อยเกินไป อาจไม่เกิดไอออนไนเซชัน การเกิดไอออนไนเซชันโดยการชนของอิเล็กตรอน นี้ ต้องมีพลังงานกล เท่ากันหรือมากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันของโมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลางดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq wi \quad (2.1)$$

เมื่อ m เป็นมวลของอิเล็กตรอน

v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอน

wi เป็น Stepped Ionization Energy

จากสมการ (1.1) เมื่อพลังงานกลมีค่ามากกว่าพลังงานไอออนไนเซชันในแต่ละชั้นของวงโคจร (Shell Electron) ในชั้นต่าง ๆ จะถูกขับออกมาทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) ดังสมการ



เมื่อ A เป็น อะตอมหรือโมเลกุล ที่เป็นกลาง (Neutral Atom/Molecules)

A^+ เป็น Excited Atom Molecule

KE เป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

การชนแบบนี้มีข้อสังเกตคือ

1. ถ้าอิเล็กตรอน มีความเร็วพอประมาณ แต่พลังงานของมันมีน้อยกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดไอออนไนเซชันเมื่อวิ่งไปชนอะตอม ทำให้อะตอมมีพลังงานสะสมสูงขึ้นอาจจะทำให้เกิดไอออนไนเซชันได้ ถ้าอะตอมถูกชนด้วยอิเล็กตรอน อื่นอีก

2. ถ้าอิเล็กตรอน มีความเร็วมากเกินไปอาจทำให้ขบวนการไอออนในเซชันเลวลงเนื่องจากมันจะผ่านอะตอมไปเลยโดยไม่เกิดการชนกัน

3. ขบวนการไอออนในเซชันนี้เมื่ออิเล็กตรอน วิ่งชนอะตอมทำให้อิเล็กตรอน ตัวใหม่หลุดออกไปและยังวิ่งไปชนอะตอมอื่นอีกจำนวนไอออนที่เกิดจากอิเล็กตรอน หลุดไปจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล

4. ก๊าซแต่ละชนิดจะมีช่วงพลังงานของอิเล็กตรอน ที่ทำให้เกิดการไอออนในเซชันที่ต่างกัน

โฟโตไอออนเซชัน (Photoionization)

ในปี ค.ศ. 1887 Heinrich Hertz ได้ทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพบว่า แรงดัน Spark ระหว่าง Spark gap มีค่าต่ำลง เมื่อมีแสงจาก Spark gap อื่นมากกระทบที่ผิวของ Spark gap และยังพบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต มีผลในลักษณะเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์ที่เราฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ลงบนผิวขั้วแคโทด นี้เราเรียกว่า โฟโตไอออนเซชัน (Photoionization) พลังงานโฟตอน ที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิด ไอออนในเซชันขึ้นได้ดังนี้คือ

$$w_i \rightarrow h\nu \quad (2.3)$$

หรือ
$$h\nu - w_i = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ
$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2.5)$$

เป็นความถี่ของโฟตอน

$h =$ ค่าคงที่ของ Plank $= 6.627 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$c =$ ความเร็วของแสง $= 2.99825 \times 10^8 \text{ m/s}$

$\lambda =$ ความยาวคลื่น

$m =$ มวลของอิเล็กตรอน

$w_i =$ พลังงาน Ionization $= e v_i \quad (2.6)$

หรือ Work function

$v =$ ความเร็วของอิเล็กตรอน

$v_i =$ แรงดันไอออนเซชัน

เมื่ออะตอมได้รับโฟตอน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์สองอย่างคือ

1. กระตุ้นให้อะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น (Higher energy state)

2. การแตกตัวของอิเล็กตรอน (Direct ionization)

กรณีกลับกันอะตอมหรือโมเลกุล รวมตัวกับอิเล็กตรอน หรือกรณีการลดระดับพลังงานจะทำให้เกิดการคายโฟตอน ออกมาเขียนได้ดังสมการ



กรณีนี้ $h\nu < evi$ เมื่อชนกันกับอะตอมทำให้อะตอมมีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A เป็นอะตอมที่ถูกอิเล็กตรอน ที่มีความเร็วหรือมีพลังงานจลน์ KE ชน

A^+ เป็นอะตอมที่มีระดับพลังงานสูงขึ้นเมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอน

อะตอมที่ A^+ จะกลับคืนสู่สภาพภายในเวลา $10^{-10} - 10^{-7}$ วินาที

กรณีนี้ $h\nu > evi$ อะตอม A^+ จะคายพลังงานโฟตอน ซึ่งอาจจะไอออไนซ์อะตอมอื่นซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าโฟตอน พลังงานนี้จะส่งเสริมให้อะตอมปล่อยอิเล็กตรอน ออกมา ดังสมการ



สมการที่ (2.9) เรียกว่า สมการโฟโตไอออไนเซชัน (Photoionization equation)

ไอออไนเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal Ionization)

ถ้าให้ความร้อนกับก๊าซจนมีอุณหภูมิสูงมากพอ อะตอมที่เป็นกลางจะดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไปสะสมไว้ภายใน ทำให้อนุภาคอะตอมเกิดการสั่นและจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในที่สุด การเกิดอิเล็กตรอนอิสระ อาจเกิดจากหลายสาเหตุในเวลาเดียวกันประกอบไปด้วยคือ

3.1 การชนกันของโมเลกุล โดยที่โมเลกุลของก๊าซเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในทุกทิศทาง จึงเกิดการชนกันระหว่างโมเลกุล

3.2 รังสีความร้อน จะทำให้โมเลกุลของก๊าซจัด อิเล็กตรอน วงนอกสุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ

3.3 การชนกันระหว่างอิเล็กตรอน กับโมเลกุล อิสระ ซึ่งจะเกิดขึ้นขณะที่ความร้อนสูงมาก ๆ อิเล็กตรอนอิสระ จะเคลื่อนที่ในทุกทิศทางทำให้เกิดการชนกันขึ้น

สำหรับการเกิดประจุเมื่อเกิดอิเล็กตรอนอิสระ ขณะที่เพิ่มอุณหภูมิสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เมื่อ A เป็นอะตอมที่เป็นกลาง

A^+ เป็นอะตอมที่เกิดไอออไนซ์

e เป็นอิเล็กตรอน ที่หลุดจากอะตอม A

wi เป็นพลังงานไอออไนเซชัน

การชนกันของเมตาสเตเบิล (Metastable) กับ อะตอม

ในการอะตอมที่ถูกกระตุ้น ในสารบางอย่างเช่นก๊าซเฉื่อย อาจนานเป็นวินาที สภาวะของอะตอมที่ถูกกระตุ้นนี้เราเรียกว่าอยู่ในสภาวะเมตาสเตเบิล (Metastable) สามารถแทนด้วยสัญลักษณ์ A^m

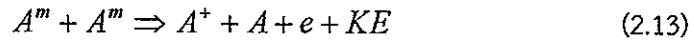
ถ้าพลังงานของ $eV^m > eVi$ ของอะตอม B เมื่อเกิดการชนกัน เขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการ



ถ้าพลังงานของ $eV^m > eVi$ ของอะตอม B และเกิดการชนกัน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



การเกิดไอออนในเซชันจากเมตาสเตเบิล (Metastable) อาจเกิดขึ้นได้หลายทาง เมื่อ $2U^m$ ของเมตาสเตเบิล มีค่ามากกว่า Ui ของอะตอม A



หรือ $A^m + 2A \Rightarrow A_2^+ + A \quad (2.14)$

เมื่อ $A_2^+ \Rightarrow A + A + h\nu \quad (2.15)$

โดยที่โฟตอน ที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาท้ายสุดนี้ มีพลังงานต่ำมากเกินไปที่จะทำให้เกิด ไอออนในเซชันในก๊าซ แต่พลังงานส่วนนี้อาจทำให้อิเล็กตรอน หลุดออกจากข้อแคโทดได้ เมื่อเกิดการชนกันระหว่างโฟตอน กับขั้วลบ ปรากฏการณ์ของเมตาสเตเบิลนี้ ต้องใช้เวลานานภายหลังการกระตุ้นระยะเวลาที่เริ่มเกิดประจุตัวแรกจนกระทั่งเกิดการคายประจุ (Discharge) นี้ เราเรียกว่า เวลาเฉื่อย (Time Lag)

การหลุดของอิเล็กตรอน (Electron detachment)

ภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าสูง อิเล็กตรอนอาจหลุดออกจากอะตอมที่เป็นกลางได้ และอิเล็กตรอนอิสระจะอยู่กันเป็นกลุ่มของอิเล็กตรอน ที่มีความหนาแน่นสูง ทำให้อิเล็กตรอน แต่ ละตัวพยายามที่จะหลุดออกจากกลุ่ม (Detachment) ซึ่งกระบวนการนี้ใช้ในการอธิบาย การคายประจุแบบโคโรนาขั้วลบ (Negative corona discharge) การไอออนในเซชัน ของอากาศบริเวณผิวที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง เช่นบริเวณปลายแหลม อากาศจะแตกตัวเป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนเหล่านี้ จะพยายามผลักดันให้หลุดออกจากกลุ่มทำให้อากาศบริเวณรอบ ๆ ที่เป็นกลาง เข้ามาแทนที่

การสูญเสียไอออน (Ion loss)

ขบวนการสูญเสียไอออนนี้ หมายถึง การรวมตัวของอิเล็กตรอน หรือ ไอออนลบเข้ากับ ไอออนบวก เพื่อให้อะตอมเป็นกลางหรือสูญเสียอิเล็กตรอนไปแทนที่จะเกิดการไอออนในเซชัน ขบวนการนี้จะตรงข้ามกับขบวนการไอออนในเซชัน ขบวนการสูญเสียไอออนนี้มีอยู่ 3 แบบคือ

- การเกาะกันของอิเล็กตรอน กับอะตอม (Electron attachment)
- การรวมตัวกัน (Recombination)
- การแผ่กระจาย (Diffusion)

พลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy : IE)

หมายถึงพลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้เพื่อทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมในสถานะแก๊ส กลายเป็นไอออนในสถานะแก๊ส เช่น การทำให้ไฮโดรเจนอะตอมกลายเป็นไฮโดรเจนไอออนในสถานะแก๊ส เขียนแสดงได้ดังนี้



ไฮโดรเจนมีเพียง 1 อิเล็กตรอน จึงมีค่าพลังงานไอออไนเซชันเพียงค่าเดียว ถ้าเป็นธาตุที่มีหลายอิเล็กตรอนก็จะมรพลังงานไอออไนเซชันหลายค่า พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกจากอะตอมในสถานะแก๊สเรียกว่า “พลังงานไอออไนเซชัน ลำดับที่ 1” เขียนย่อเป็น IE_1 พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวต่อ ๆ ไปหลุดออกจากอะตอมในสถานะแก๊สก็จะเรียกว่า พลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 2, 3, .. ตามลำดับ และเขียนย่อเป็น $\text{IE}_2, \text{IE}_3, \dots$

. ตามลำดับ เช่น ธาตุโบรอนมี 5 อิเล็กตรอน ก็จะมีพลังงานไอออไนเซชัน 5 ค่า ดังนี้



พลังงานไอออไนเซชันกับจำนวนอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน

ค่าพลังงานไอออไนเซชันของธาตุต่าง ๆ ในตารางธาตุใช้เป็นข้อมูลในการจัดกลุ่มอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียส ซึ่งพบความสัมพันธ์คือ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานเดียวกัน (ชั้นเดียวกัน) จะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันใกล้เคียงกัน และอิเล็กตรอนที่อยู่ต่างระดับพลังงานกัน จะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันแตกต่างกันมาก ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ถึงจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานจะมีจำนวนไม่เกิน $2n^2$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ข้อสรุปเกี่ยวกับค่า IE

1. การดึงอิเล็กตรอนให้หลุดจากอะตอม จะดึงได้ในภาวะก๊าซเท่านั้น
2. การดึงอิเล็กตรอนให้หลุดจากอะตอมในระดับพลังงานสูง จะหลุดจากอะตอมได้ง่ายที่สุด เพราะอิเล็กตรอนอยู่ห่างไกลจากนิวเคลียสมาก แรงดึงดูดของนิวเคลียสที่ส่งมาดึงดูดอิเล็กตรอนมีน้อย
3. การดึงอิเล็กตรอนข้ามระดับพลังงาน จะต้องใช้พลังงานสูงเป็นพิเศษ เพราะอิเล็กตรอนอยู่ใกล้นิวเคลียสมากขึ้น

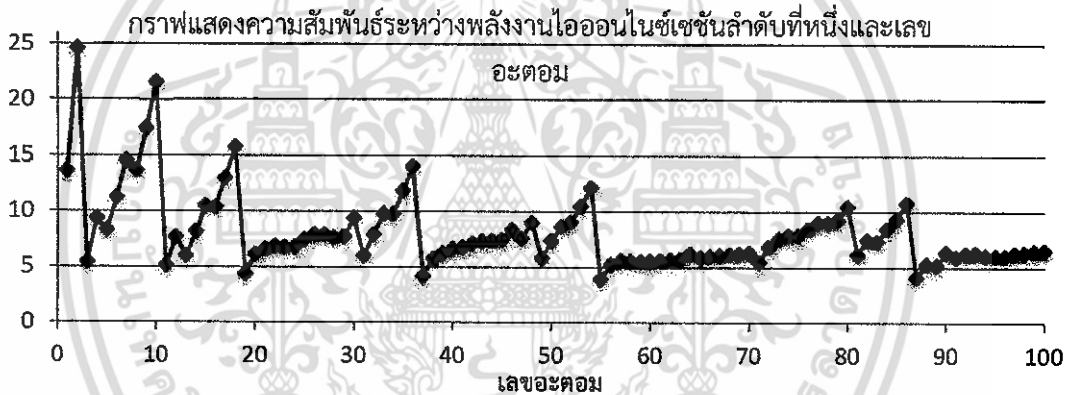
4. ค่า IE สามารถบอกได้ว่าธาตุนั้นอยู่หมู่ใด ดังเช่น

ธาตุ A มีค่า IE ดังนี้	5	9	13	21	72	89	ธาตุนี้อยู่หมู่ที่ 1
ธาตุ B มีค่า IE ดังนี้	740	1,500	7,500	9,900	11,000		ธาตุนี้อยู่หมู่ที่ 8

5. ผลต่างของพลังงาน IE เฉลี่ยของแต่ละระดับพลังงาน ทำให้ทราบว่า ระดับพลังงานวงใน จะอยู่ห่างกันมากส่วนระดับพลังงานวงนอกจะอยู่ชิดกันมาก เช่น ค่า IE ของ Mg เป็น
 0.744 1.457 7.739 10.547 13.636 18.001 21.710 25.663
 31.650 35.469 170.03 187.399

6. ถ้าเปรียบเทียบค่า IE ของธาตุต่างชนิดกัน ให้พิจารณาจาก
 - ❖ ถ้าตั้งอิเล็กตรอนต่างระดับพลังงานกัน อิเล็กตรอนที่อยู่ระดับพลังงานสูง (วงนอก) จะดึงง่ายกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับระดับพลังงานต่ำ (วงใน)
 - ❖ ถ้าตั้งอิเล็กตรอนในระดับพลังงานเดียวกัน ให้พิจารณาจำนวนโปรตอนในนิวเคลียส ถ้ามีโปรตอนในนิวเคลียสมากกว่า พลังงาน IE ก็จะใช้มากกว่าด้วย (ยกเว้นในบางกรณีที่มีการ จัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมที่เสถียร)

การเปรียบเทียบพลังงานไอออไนเซชันของธาตุจะใช้เฉพาะ IE_1 ซึ่งเมื่อนำค่า IE_1 มาเปรียบเทียบได้ดังกราฟ



รูปที่ 3 แสดงพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 ของแต่ละธาตุ

สรุปแนวโน้มพลังงานไอออไนเซชัน

1. แนวโน้มค่าพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 (IE_1) ตามคาบ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม เนื่องจากธาตุในคาบเดียวกันมีจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสเพิ่มขึ้นและมีขนาดอะตอมเล็กลง แรงดึงดูดระหว่างนิวเคลียสกับเวเลนซ์อิเล็กตรอนจึงเพิ่มมากขึ้น อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมได้ยาก
2. แนวโน้มค่าพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 (IE_1) ตามหมู่ ปัจจัยที่มีผลคือคือขนาดอะตอมซึ่งเป็นผลมาจากระดับพลังงาน ค่า IE_1 จะลดลงเมื่ออะตอมมีขนาดใหญ่ขึ้น เพราะขนาดอะตอมที่ใหญ่ขึ้นจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ห่างนิวเคลียสมากขึ้น อิเล็กตรอนจะได้รับแรงดึงดูดจากนิวเคลียสน้อย อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอมได้ง่าย

อิเล็กโทรเนกาติวิตี (Electronegativity : EN)

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของอะตอมในการที่จะดึงอิเล็กตรอนเข้าหาตัวเองเมื่อเกิดพันธะเคมี (Chemical bond) ทั้งนี้ มีการเสนอวิธีการแสดงค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีหลายวิธี อาทิ เพลลิง สเกล (Pauling scale) ถูกเสนอในปี ค.ศ. 1932 มุลลิเกน สเกล (Mulliken scale) ถูกเสนอในปี ค.ศ. 1934 และ ออลล์เรด-โรโซสเกล (Allred-Rochow scale)

การคำนวณความต่างของอิเล็กโทรเนกาติวิตีของ เพลลิง ระหว่างอะตอม A และอะตอม B สมมุติว่ามีอะตอมสองอะตอมได้แก่ อะตอม A และ อะตอม B จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความแตกต่างของ $EN_A - EN_B$ โดยอาศัยสมการดังนี้

$$EN_A - EN_B = (eV)^{-1/2} \sqrt{E_d(AB) - \left[\frac{E_d(AA) + E_d(BB)}{2} \right]} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) เรียกว่าเป็น พลังงานพันธะ (binding energy) กำหนดสัญลักษณ์เป็น E_d ของพันธะ A-B, A-A และ B-B ในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์, ค่า $(eV)^{-1/2}$ แสดงเพื่อเลี่ยงการพิจารณาหน่วย เช่น ความต่างของอิเล็กโทรเนกาติวิตีโดยเพลลิงระหว่างไฮโดรเจนและโบรมีน เท่ากับ 0.73 (พลังงานพันธะ: H-Br, 3.79 eV; H-H, 4.52 eV; Br-Br 2.00 eV)

แนวโน้ม อิเล็กโทรเนกาติวิตี

ธาตุเคมี แต่ละตัวจะมีคุณลักษณะที่มีค่า อิเล็กโทรเนกาติวิตี ระหว่าง 0 ถึง 4 โดย เพลลิง สเกล ธาตุที่มีอิเล็กโทรเนกาติวิตี มากที่สุด คือ ฟลูออรีน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.98 และธาตุที่มี อิเล็กโทรเนกาติวิตีน้อยที่สุด แพรนเซียม เท่ากับ 0.7 โดยทั่วไประดับชั้นของ อิเล็กโทรเนกาติวิตี จะลดลงตามหมู่ของธาตุในตารางธาตุ และเพิ่มขึ้นตามคาบในตารางธาตุ ดังตารางธาตุ ดังแสดงข้างล่างนี้

รัศมีอะตอมลดลง พลังงานไอออไนเซชันเพิ่มขึ้น อิเล็กโทรเนกาติวิตีเพิ่มขึ้น

ชื่อธาตุ และหมู่	ค่าของอิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN)	ชื่อธาตุ และ หมู่	ค่าของอิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN)
H หมู่ 1	2.20	B หมู่ 3	2.04
Li หมู่ 1	0.98	C หมู่ 4	2.55
Be หมู่ 2	1.57	N หมู่ 5	3.04
Na หมู่ 1	0.93	O หมู่ 6	3.44
Mg หมู่ 2	1.31	F หมู่ 7	3.98
K หมู่ 1	0.82	Al หมู่ 3	1.61
Ca หมู่ 2	1.00	Si หมู่ 4	1.90
S หมู่ 6	2.57	P หมู่ 5	2.19
Cl หมู่ 7	3.16	Fe หมู่ 6B	1.83

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า อิเล็กโทรเนกาติวิตีในธาตุแต่ละชนิดเพื่อเป็นแนวทาง

ในการพิจารณาการแตกตัวของสถานะก๊าซ เพื่อเป็นพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 1 จะเห็นได้ว่าค่า EN (Electronegativity) ของธาตุแต่ละชนิดถ้าเรียงขนาดจากมากไปน้อยยกตัวอย่างเช่น $F > O > Cl > N > Br$ ดังนั้นจึงแสดงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันของแต่ละธาตุอย่างชัดเจน

โดยทั่วไป พลาสมา (Plasma) จัดเป็นสถานะที่สี่ของสารเกิดจากแก๊ส ในสภาวะที่บางเบา และถูกกระตุ้นจากภายนอกให้แตกตัว เป็นไอออน และอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่อง โดยที่บางส่วนนี้สามารถที่จะกลับมารวมตัวกันกลับเป็นอะตอมเดิมอีก ครึ่งพร้อมกับคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมา หรืออิเล็กตรอนบางส่วนจะชนเข้ากับอิเล็กตรอนของอะตอมอื่น ๆ ที่เหลือ ทำให้อะตอมเหล่านั้นถูกกระตุ้นหรือแตกตัวเป็นปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องกันไป เมื่อนำสิ่งเร้าจากภายนอกนี้ ออกไป พลาสมาจะกลับมามีอยู่ในสภาวะก๊าซเช่นเดิม ยกตัวอย่างของพลาสมาในธรรมชาติ เช่น ในดวงอาทิตย์หรือ ฟิวส์ เป็นต้น พลาสมาที่มนุษย์สร้างขึ้นและพบเห็นในชีวิตประจำวัน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ที่บรรจุไอปรอทความดันต่ำ แล้วถูกกระตุ้นด้วยความต่างศักย์สูงที่เหมาะสมทำให้เป็นพลาสมาซึ่งบางส่วนเข้าชน กับสารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ด้านในของหลอดเกิดการเรืองแสงขึ้นมา

พลาสมาเป็นสถานะของสสารประกอบไปด้วยไอออน อิเล็กตรอน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อะตอมปล่อยออกมา ขณะที่ลดตัวลงสู่สถานะพื้น เช่น รังสีเอ็กซ์ , รังสีเหนือม่วง ,แสงที่ตาเรามองเห็น สภาวะพลาสมาจะเกิด ได้เมื่อแก๊สที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรด ถูกกระตุ้น ด้วยความต่างศักย์สูงกว่าศักย์แตกตัว (Breakdown Voltage) ศักย์แตกตัว ขึ้นโดยตรงกับชนิดของก๊าซ และ ผลคูณระหว่างความดันและ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตามกฎของพาสเซน (Paschen's law) สภาวะพลาสมาจะดำรงอยู่ได้ จะต้องอาศัยการกระตุ้นที่ต่อเนื่อง โดยทั่วไปมักผลิตพลาสมาใน สภาวะสุญญากาศที่ยอมให้เกิดการภาวะแตกตัวที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่มาก ทำให้สามารถใช้พลาสมา ปรับปรุงวัสดุที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่พลาสมาสามารถจะผลิตได้ที่ความดันบรรยากาศเช่นเดียวกับดังตัวอย่างที่ได้กล่าว เช่น ฟิวส์ เป็นต้น

พลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure plasma)

การผลิตพลาสมาในปัจจุบันยังถูกจำกัดอยู่ภายใต้สถานะสุญญากาศเป็นหลัก ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านระบบ สุญญากาศและการบำรุงรักษาที่สูงมาก การผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ จึงข้ามข้อจำกัดเรื่องสถานะ สุญญากาศออกไป และคาดว่าจะมีส่วนสำคัญที่ช่วยทวีบทบาทของพลาสมาในระดับอุตสาหกรรมได้มากขึ้น

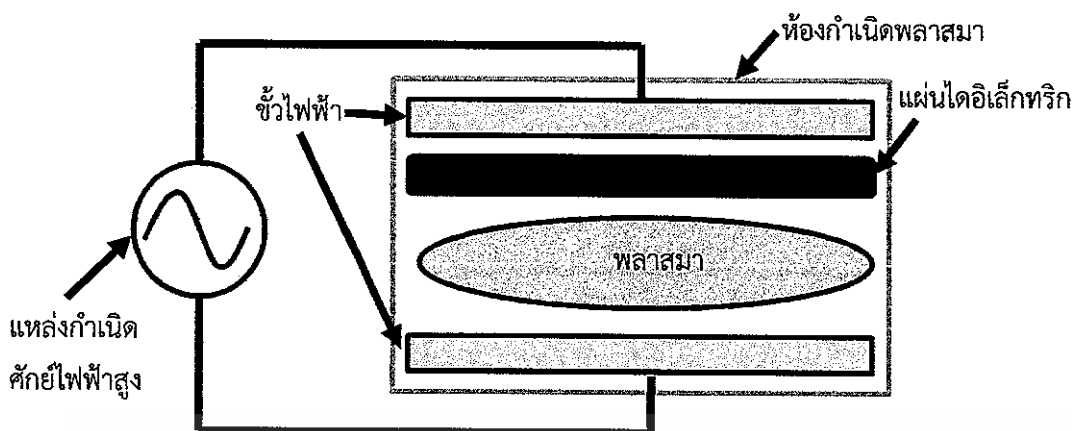


รูปที่ 4 ตัวอย่างเครื่องผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ

ตัวอย่างระบบผลิตพลาสมาที่ความดันบรรยากาศแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์

การสร้างพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์นั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนใหญ่ๆนั้นคือ

1. เครื่อง กำเนิดไฟฟ้าศักย์สูงความถี่ปานกลาง
2. ห้องกำเนิดพลาสมา มีข้อได้เปรียบกว่าระบบผลิตพลาสมาทั่วไป นั่นคือ สามารถจุดพลาสมาในความดันบรรยากาศได้และไม่ต้องการปั๊มสุญญากาศซึ่งมีราคาแพง จากข้อได้เปรียบที่กล่าว มานั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี โดยหลักการเบื้องต้นของพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ที่ความดันบรรยากาศ คือใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าจุดพลาสมาโดยขั้วไฟฟ้าจะถูกคั่นหรือปิดคลุม โดยวัสดุไดอิเล็กทริก เพื่อป้องกันการอาร์คของพลาสมาซึ่งจะทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกถูกทำลาย ส่วนประกอบ สำคัญของระบบผลิตพลาสมานั้นถูกแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของระบบผลิตพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์

ดังนั้นจากความรู้พื้นฐานของการแตกตัวของก๊าซ ประกอบกับการเกิดพลาสมาในสภาวะที่เกิดจากก๊าซที่ได้ออกมาในหัวข้อก่อนๆ จะทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความรู้ที่ได้เบื้องต้นมาประยุกต์ทำอุปกรณ์ในการผลิตพลาสมาเพื่อให้เข้ากั้งงานวิจัยที่ได้ และอุปกรณ์จะต้องมีประสิทธิภาพสูงกว่า รวมถึงค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงวงแหวนคลื่นพ้องที่ใช้ในระบบในรูปแบบต่าง ๆ และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบวงแหวนในแบบต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น จึงขออธิบายลักษณะของวงแหวนคลื่นพ้อง ในรูปแบบต่าง ๆ ดังกล่าวต่อไป

การเปรียบเทียบกับเครื่องเร่งอนุภาคด้วย RF (Radio frequency)

ประโยชน์ของการเร่งพลาสมา (Plasma acceleration) คือให้ค่าสนามความเร่งมากกว่า เครื่องเร่งอนุภาคแบบความถี่วิทยุ (RF acceleration) ในเครื่องเร่งอนุภาคแบบ RF ค่าของสนามที่ได้มีขีดจำกัด โดยกำหนดเกณฑ์สำหรับการแบ่งไดอิเล็กทริกของตัวหลอด นี้ จำกัด จำนวนของการเร่งความเร็วเหนือพื้นที่ใด ๆ ที่ต้องเร่งยาวมากถึงพลังสูง ในทางตรงกันข้าม , สนามสูงสุดในพลาสมาจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติเชิงกลและความไม่แน่นอนในเชิงอนุภาค แต่โดยทั่วไปจะมีค่าของสนามความเข้มที่มีมากกว่าเครื่อง RF ดังนั้นเครื่องเร่งอนุภาคพลาสมาจึงเป็นเครื่องเร่งอนุภาคขนาดเล็กสามารถสร้างพลาสมา และเร่งพลังงานของอนุภาคได้มาก โดยสามารถเร่งได้ถึง 10 GeV/m

สมการที่ใช้ในเครื่องเร่งอนุภาค

เมื่อทำการเร่งอนุภาคผ่านเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมา ผลของการเปลี่ยนแปลงความเร่ง (Acceleration gradient) ภายใต้เงื่อนไข พลาสมาเชิงเส้น (linear plasma) สามารถอธิบายได้โดย

$$E = c \cdot \sqrt{\frac{m_e \cdot \rho}{\epsilon_0}} \quad (2.17)$$

โดยกำหนดให้ E คือค่า สนามไฟฟ้า (Electric field), c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ (Speed of light in vacuum), m คือมวลของอิเล็กตรอน (Mass of electron), ρ คือ ความหนาแน่นของพลาสมา หน่วยเป็นจำนวนอนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร และ ϵ_0 ค่า Permittivity of free space มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

จากคุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมา ที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อก่อน และการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma wakefield acceleration)

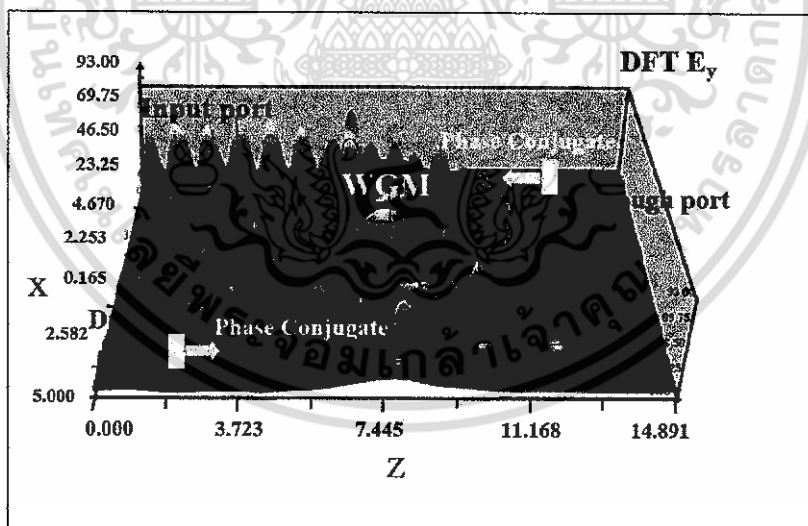
เนื่องจากพลาสมาของระบบ เกิดจากการแตกตัวของสถานะก๊าซเมื่อใส่สนามไฟฟ้าจนก๊าซเกิดการแตกตัว เนื่องจากระบบที่ใช้ในงานวิจัย จะอยู่ในรูปของหลอดที่บรรจุอยู่ในระบบวงแหวนแพนด้า โดยภายในหลอดจะบรรจุอากาศที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปอากาศที่บรรจุ จะประกอบด้วย ก๊าซ ไนโตรเจน (Nitrogen) 70 ส่วน ก๊าซ ออกซิเจน (Oxygen) ในอัตราส่วน 20 ส่วน อาร์กอน (Argon) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นต้น

ปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด ที่เกิดขึ้นในระบบท่อนำคลื่นชนิดวงแหวน (Whispering Gallery Mode phenomena in Ring Resonator)

ปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Mode) ถูกค้นพบครั้งแรก โดย Lord Rayleigh นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ในปี 1878 ที่ มหาวิหาร St. Paul [10] ในอังกฤษ ก่อนหน้านั้นได้เข้าใจผิดว่าคลื่นเสียงที่มีการสะท้อนในโบสถ์จะได้ยินทั้งโดม แต่ในขณะนั้นเขาได้พิสูจน์ให้เห็นว่า เสียงที่ได้จากการสะท้อนภายในโดมของโบสถ์ จะมีการรวมตัวของคลื่นเสียงและจะได้ยินเฉพาะบริเวณตอนกลางของโบสถ์ ในปี 1910 Lord Rayleigh ได้มีการพัฒนาทฤษฎี ที่ St. Paul และได้ แสดงให้เห็นว่าคลื่นเสียงที่เกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด นั้นเกิดจากการแทรกสอดในวงแหวนของโดมทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของโบสถ์ นอกจากนั้นการเกิดวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด เขายังแสดงให้เห็นการเกิดโหมดของคลื่นเสียงในสภาวะต่าง ๆ อีกด้วย นอกเหนือจากนั้น ยังแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ ระบบที่เป็นผิวตรง หรือหมายความว่ารัศมีของระบบ

เป็นอนันต์แล้ว ระบบดังกล่าวคลื่นเสียงที่ผ่านจะไม่สามารถเกิดสภาวะ กำพอน (Resonance) ดังนั้น ระบบที่จำลองก็ไม่สามารถเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมดได้ [11]

นอกจากคลื่นเสียงที่เกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ได้ ไม่ว่าจะเป็นคลื่นแสง หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะสามารถเกิดปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ได้เช่นเดียวกัน และจะเกิดกับท่อนำคลื่น ในรูปแบบ ที่สามารถหาค่ารัศมีได้ เช่นในวงกลม และรูปแบบต่าง ๆ กัน แสดงให้เห็นได้ว่าการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรี โหมด สามารถเกิดได้กับระบบที่เป็นวงแหวนสั้นพ้อง ในรูปแบบต่าง ๆ ตามสภาวะและเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ดังนั้นจากสภาวะดังกล่าว จะหาว่าระบบที่เหมาะสมต้องมีสภาวะที่ทำให้เกิดวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด มากสุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดขนาดของสัญญาณวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมดสูง แบบของท่อนำคลื่นจึงรูปแบบต่าง ๆ เช่น รูปวงแหวนเดี่ยว (Single ring resonator), รูปแบบวงแหวนแอดดรอป (Add-drop ring resonator) หรือ รูปแบบของวงแหวนแพนด้า (PANDA ring resonator) ซึ่งรูปแบบหลังจะเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพราะมีโอกาสการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ที่สูงกว่าแบบอื่น ๆ รวมถึงขนาดที่เกิดยังมีขนาดที่สูงกว่าวงแหวนชนิดอื่นด้วยจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นเห็นการซิมูเลชัน สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่าน โปรแกรมจำลองด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเชิงเวลา (Finite Different Time domain) (FDTD) จากภาพจะเห็นชัดว่าค่าผลรวมของสัญญาณที่บริเวณใจกลางระบบจะมีค่าสูงมาก และจะขึ้นกับหลายๆ เงื่อนไข ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการหาค่าผลเฉลยของสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ต่อไป

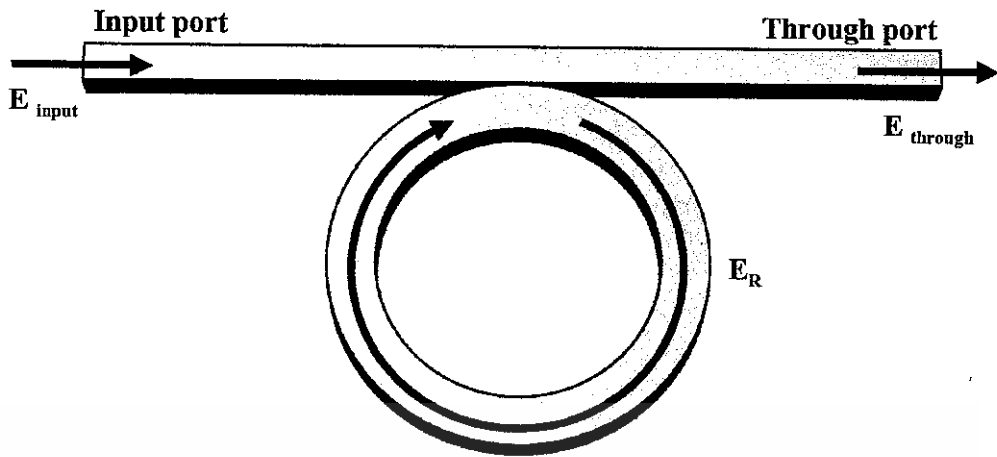


รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Mode) ขณะที่มีคลื่นสัญญาณผ่านในวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า ที่ใช้เป็นพื้นฐานลำดับแรกในการออกแบบเครื่องเร่งอนุภาค

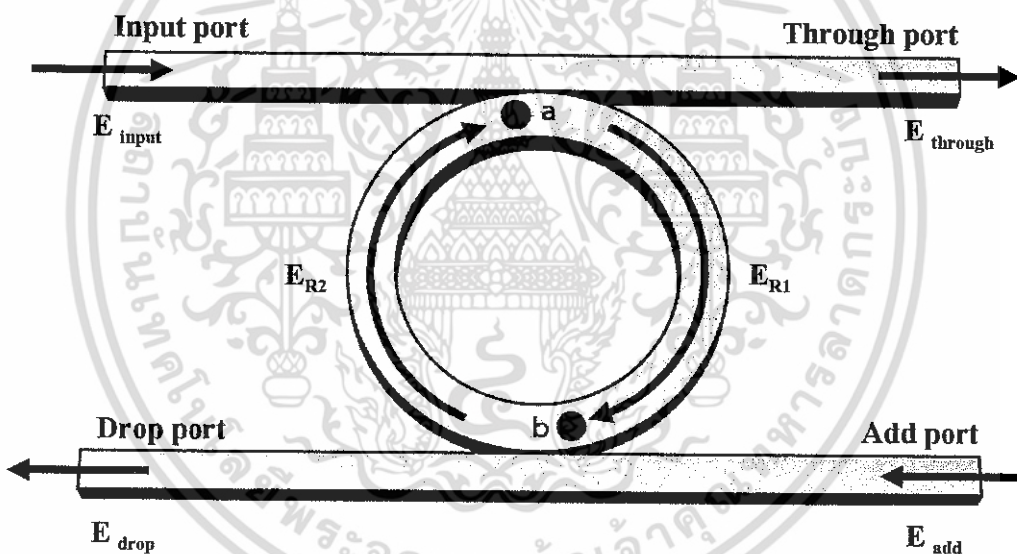
ระบบของวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)

ระบบแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) [4]-[9], [12], [14] เป็นระบบที่ถูกพัฒนาจากระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบเดี่ยว (Single Ring) เป็นแบบที่มีช่องสัญญาณขาเข้าและช่องสัญญาณขาออก 1 อย่างละ 1 ช่องทาง แสดงใน รูป 7(ก) ต่อมาได้มีการพัฒนางวงแหวนให้มีช่องสัญญาณขาเข้ามากกว่าหนึ่งช่อง ในรูปแบบวงแหวนแอดดรอป (Add-drop Ring) แสดงในรูปที่ 7(ข) เพื่อสามารถที่จะเร่งอนุภาคให้อยู่ในวงแหวนได้นานกว่าทำให้ความเร็วที่ทางออกมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสัญญาณด้านเข้าด้วยทางเข้าออกด้านเสมือนสวิตช์ของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สามารถเร่งอนุภาคได้เร็วขึ้น ถ้ามองในเชิงอนุภาค นอกจากนั้นยังสามารถศึกษาปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด โดยพิจารณาว่าอนุภาครวมกันที่จุดกึ่งกลางของวงแหวนทำให้สัญญาณที่ได้มีขนาดสูงมาก ๆ เปรียบเหมือนสัญญาณการตลย (Impulse response) ถ้ามองในเชิงคลื่น แต่ในงานวิจัยนี้จะมองในเชิงของอนุภาค ก็จะเสมือนว่าอนุภาคมีค่าพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นพลังงานยอมสัมพันธ์เป็นไปตามสมการระหว่างค่าความเร็วกับพลังงาน ดังนั้น ถ้าพลังงานสูง ค่าของความเร็วก็สูงมากด้วย ที่สภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด ที่บริเวณกึ่งกลางของระบบ ก็จะเสมือนเป็นที่ทำให้อนุภาคมีค่าความเร็วสูงขึ้น ก็เปรียบเสมือน เครื่องเร่งอนุภาค และในการวิจัยถ่านวงแหวนมาซ้อนกัน เพื่อทำการเสริมค่าความเข้มของสัญญาณให้สูงขึ้น ถ้ามองในเชิงของอนุภาค ก็เป็นการเร่งอนุภาคให้มีค่าความเร็วที่สูงขึ้นมากขึ้น

เมื่อพิจารณาระบบที่เป็นวงแหวนสั่นพ้องแบบแอดดรอป (Add-Drop Ring Resonator) จะให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่า แต่จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาระบบให้มีค่าผลของประสิทธิภาพที่ดีกว่า ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาฟิสิกส์ ได้มีการพัฒนางวงแหวนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวงแหวนสั่นพ้องแบบแอดดรอป โดยเพิ่มวงแหวนสั่นพ้องขนาดเล็ก ขนาบวงแหวนกลางทางซ้ายและขวาของระบบ และแสดงในรูปที่ 8 นอกจากจะมีวงแหวนซ้ายขวา ยังมี 2 ช่องสัญญาณขาเข้าและ 2 ช่องสัญญาณขาออก เพื่อทำการควบคุมสัญญาณภายในระบบด้วยซึ่งค่าความสัมพันธ์ของสัญญาณจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



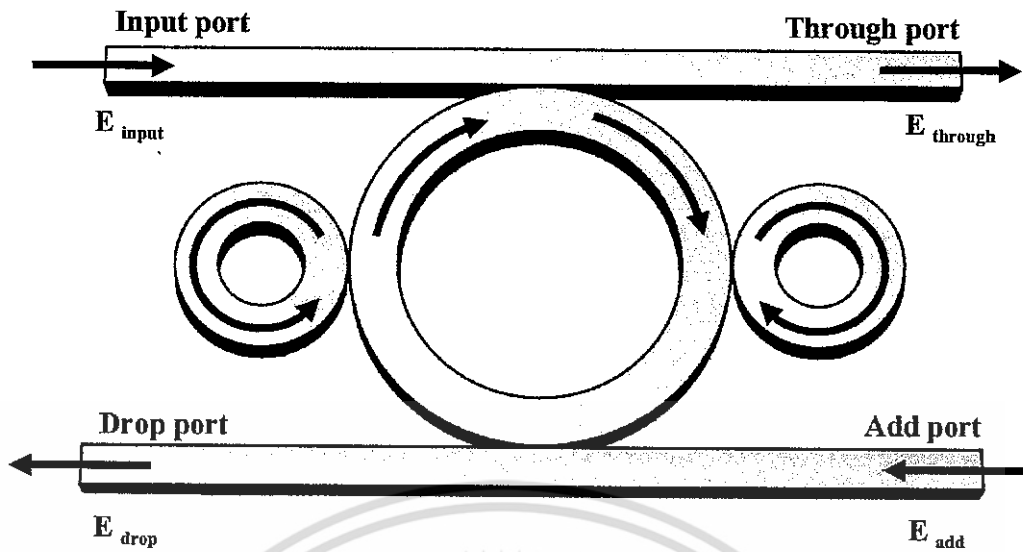
(ก)



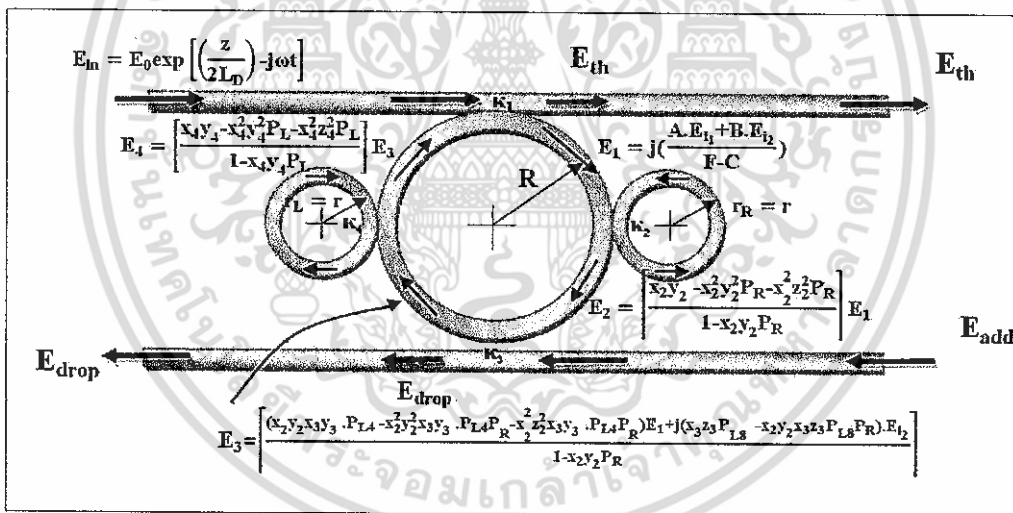
(ข)

รูปที่ 7 (ก) แสดงวงแหวนของระบบวงแหวนเดี่ยว (Single Ring) และพัฒนาต่อเป็น (ข) ระบบแอดดรอป (Add-Drop Ring Resonator) เพื่อใช้เป็นหน่วยพื้นฐานของเครื่องเร่องนุภาคด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 แสดงวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ที่ถูกพัฒนาจากรูปที่ 4 ให้มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าระบบเดิมทั้งขนาดของสัญญาณขาออกที่ได้ มีขนาดสูงขึ้น และให้ผลของการเกิดสถานะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด ได้ชัดเจนกว่า



รูปที่ 9 จะแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เข้าตามจุดต่าง ๆ ของระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมการในเงื่อนไขการเกิดสถานะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด ที่เกิดขึ้นในระบบ

จากรูปที่ 7(ข) ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างช่องสัญญาณขาเข้า และช่องสัญญาณขาออก ของระบบวงแหวนสี่พอร์ตแบบแอดดรอป (Add-Drop Ring Resonator) ที่จุดต่าง ๆ ในระบบสามารถอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้

ที่จุด a และ b ในรูปที่ 7 (ข) สนามไฟฟ้า (Electric field) แสดงดังสมการที่ (2.18) และ (2.19)

$$E_a = \frac{jx_1(z_1E_i + y_1x_2z_2E_{add}e^{\frac{\alpha L}{22}jk_n\frac{L}{2}})}{1-x_1y_1x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_nL}} \quad (2.18)$$

$$E_b = \frac{jx_1x_2y_2z_1E_i e^{\frac{\alpha L}{22}-jk_n\frac{L}{2}} + jx_2z_2E_{add}}{1-x_1y_1x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_nL}} \quad (2.19)$$

ที่บริเวณช่องสัญญาณส่งผ่าน (Through port) ค่าสนามไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2.20)

$$E_{th} = \frac{[x_1y_1 - x_1^2z_1^2x_2y_2e^{\frac{\alpha L}{22}-jk_n\frac{L}{2}} - x_1^2y_1^2x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_nL}]E_i - x_1x_2z_1z_2e^{\frac{\alpha L}{22}-jk_n\frac{L}{2}}E_{add}}{1-x_1y_1x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_nL}} \quad (2.20)$$

โดยที่ค่าของความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) ที่บริเวณช่องสัญญาณส่งผ่าน แสดงดังสมการที่ (2.21)

$$I_t = E_t \cdot E_t^* = \frac{A - B - C + D}{F} \quad (2.21)$$

โดยกำหนดค่าคงที่แสดงดังสมการต่อไปนี้ได้แก่

$$A = \left[\begin{array}{l} x_1^2y_1^2 - x_1^3z_1^2x_2y_1y_2e^{\frac{\alpha L}{22}-jk_n\frac{L}{2}} - x_1^3y_1^3x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_nL} - x_1^3y_1z_1^2x_2y_2e^{\frac{\alpha L}{22}+jk_n\frac{L}{2}} + x_1^4z_1^4x_2y_2e^{\frac{\alpha L}{2}} \\ + x_1^4y_1^2x_2^2z_1^2y_2^2e^{\frac{3\alpha L}{4}-jk_n\frac{L}{2}} - x_1^3y_1^3x_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L+jk_nL} + x_1^4x_2^2y_2^2z_1^2e^{\frac{3\alpha L}{4}+jk_n\frac{L}{2}} + x_1^4y_1^4x_2y_2e^{-\alpha L} \end{array} \right] E_i^2$$

$$B = [x_1^2x_2z_1z_2y_1e^{\frac{\alpha L}{22}-jk_n\frac{L}{2}} - x_1^3z_1^3x_2^2z_2y_2e^{\frac{\alpha L}{2}} - x_1^3x_2^2y_1^2y_2z_1z_2e^{\frac{3\alpha L}{4}+jk_n\frac{L}{2}}] E_i E_{add}$$

$$C = \left[x_1^2x_2y_1z_1z_2e^{\frac{\alpha L}{22}+jk_n\frac{L}{2}} - x_1^3z_1^3x_2^2z_2y_2e^{\frac{\alpha}{2}L-jk_n\frac{L}{2}} - x_1^3x_2^2y_1^2y_2z_1z_2e^{\frac{3\alpha L}{4}-jk_n\frac{L}{2}} \right] E_{add} E_i$$

$$D = x_1^2x_2^2z_1^2z_2^2e^{\frac{\alpha}{2}L} E_{add}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = 1 - x_1 y_1 x_2 y_2 e^{\frac{\alpha L + jk_n L}{2}} - x_1 y_1 x_2 y_2 e^{\frac{\alpha L - jk_n L}{2}} + x_1^2 y_1^2 x_2^2 y_2^2 e^{-\alpha L}$$

และค่าของความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) ที่บริเวณ Drop port แสดงดังสมการที่ (2.22)

$$E_{\text{Drop}} = \frac{-x_1 x_2 z_1 z_2 E_{i_1} + \left[x_2 y_2 - x_1 x_2^2 y_1 z_2^2 e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} - x_2^2 y_2^2 x_1 y_1 e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} \right] E_{\text{add}}}{1 - x_1 y_1 x_2 y_2 e^{\frac{\alpha L - jk_n L}{2}}}$$

(2.22)

$$I_{\text{drop}} = E_{\text{drop}} \cdot E_{\text{drop}}^* = \frac{G}{F} \quad (2.23)$$

โดยกำหนดค่าคงที่แสดงดังสมการต่อไปนี้ได้แก่

$$G = [x_1^2 x_2^2 z_1^2 z_2^2 E_{i_1}^2 + x_1^2 x_2^3 y_1 z_2^3 E_{i_1} E_{\text{add}} e^{\frac{\alpha L + jk_n L}{2}} - x_1 x_2^2 y_1 z_2^2 E_{i_1} E_{\text{add}} + x_1^2 x_2^3 y_1^2 z_2^2 E_{i_1} E_{\text{add}} e^{\frac{\alpha L + jk_n L}{2}} \\ + x_1^2 x_2^3 y_1 z_2^3 E_{i_1} E_{\text{add}} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} + x_1^2 x_2^4 y_1^2 z_2^4 E_{i_1}^2 e^{-\frac{\alpha L}{2}} - x_1 x_2^2 y_1 z_2^2 E_{i_1}^2 e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n \frac{L}{2}} \\ + x_1^2 x_2^4 y_1^2 z_2^2 E_{i_1}^2 e^{\frac{3\alpha L + jk_n L}{4}} - x_1 x_2^2 y_1 z_2^2 E_{i_1} E_{\text{add}} - x_1 x_2^3 y_1 z_2^2 E_{i_1} E_{\text{add}} e^{\frac{\alpha L}{2} + jk_n \frac{L}{2}} + x_2^2 y_2^2 E_{\text{add}}^2 \\ - x_2^3 y_2^3 x_1 y_1 E_{\text{add}}^2 e^{\frac{\alpha L + jk_n L}{2}} + x_1 x_2^3 y_2^2 z_2^2 E_{i_1} E_{\text{add}} e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + x_1^2 x_2^4 y_1^2 z_2^2 E_{i_1}^2 e^{\frac{3\alpha L - jk_n L}{4}} \\ - x_2^3 y_2^3 x_1 y_1 E_{\text{add}}^2 e^{\frac{\alpha L}{2} - jk_n L} + x_1^2 x_2^4 y_1^2 z_2^4 E_{i_1}^2 e^{-\alpha L}]$$

$$F = 1 - x_1 y_1 x_2 y_2 e^{\frac{\alpha L + jk_n L}{2}} - x_1 y_1 x_2 y_2 e^{\frac{\alpha L - jk_n L}{2}} + x_1^2 y_1^2 x_2^2 y_2^2 e^{-\alpha L}$$

$$x_1 = \sqrt{1 - \gamma_1} \quad , \quad y_1 = \sqrt{1 - \kappa_1} \quad , \quad z_1 = \sqrt{\kappa_1}$$

$$x_2 = \sqrt{1 - \gamma_2} \quad , \quad y_2 = \sqrt{1 - \kappa_2} \quad , \quad z_2 = \sqrt{\kappa_2}$$

เมื่อพิจารณาระบบที่มีวงแหวนหุ้ชายและหุ้ขวาทั้งสองข้าง ระบบจะอยู่ในรูปของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า จากรูปที่ 9 จะสามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าแต่ละจุดดังรูป 4 ดังต่อไปนี้ [4],[6],[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดที่ 1, 2, 3, และ 4 ในรูปที่ 8 ค่าของสนามไฟฟ้า (Electric fields) แสดงดังต่อไปนี้

$$E_1 = j \left(\frac{A.E_{i_1} + B.E_{i_2}}{F-C} \right) \quad (2.24)$$

$$E_2 = \left[\frac{x_2 y_2 - x_2^2 y_2^2 P_1 - x_2^2 z_2^2 P_1}{1 - x_2 y_2 P_1} \right] E_1 \quad (2.25)$$

$$E_3 = \left[\frac{(x_2 y_2 x_3 y_3 \cdot PL_4 - x_2^2 y_2^2 x_3 y_3 \cdot PL_4 P_1 - x_2^2 z_2^2 x_3 y_3 \cdot PL_4 P_1) E_1 + j(x_3 z_3 PL_8 - x_2 y_2 x_3 z_3 PL_8 P_1) \cdot E_{i_2}}{1 - x_2 y_2 P_1} \right] \quad (2.26)$$

$$E_4 = \left[\frac{x_4 y_4 - x_4^2 y_4^2 P_2 - x_4^2 z_4^2 P_2}{1 - x_4 y_4 P_2} \right] E_3 \quad (2.27)$$

ที่บริเวณช่องสัญญาณส่งผ่าน (Thought port) ค่าของสนามไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (2.28)

$$E_{th} = \left[\frac{G.F^2 - G.F.C - A.H.J}{F^2.J - C.F.J} \right] E_{i_1} + \left[\frac{(F.I - B.H - C.I)}{F.(F-C)} \right] E_{i_2} \quad (2.28)$$

ที่บริเวณช่องสัญญาณขาออก (Drop port) ค่าของสนามไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (2.29)

$$E_{drop} = \frac{K \left(F - C - \frac{B.L}{K} \right) E_{i_2} - L.A.E_{i_1}}{M(F-C)} \quad (2.29)$$

โดยกำหนดค่าคงที่แสดงดังสมการต่อไปนี้ได้แก่

$$A = (x_1 z_1 PL_8 - x_1 z_1 x_2 y_2 P_1 PL_8 - x_1 z_1 x_4 y_4 P_2 PL_8 + x_1 z_1 x_2 y_2 x_4 y_4 P_1 P_2 PL_8)$$

$$B = (x_1 y_1 x_3 z_3 x_4 y_4 PL_4 PL_8 - x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 z_3 x_4 y_4 P_1 PL_4 PL_8 - x_1 y_1 x_3 z_3 x_4 y_4^2 P_2 PL_4 PL_8 + x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 z_3 x_4^2 P_1 P_2 PL_8 PL_4 - x_1 y_1 x_3 z_3 x_4^2 P_2 PL_4 PL_8 + x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 z_3 x_4^2 P_1 P_2 PL_4 PL_8)$$

$$C = \left[\begin{array}{l} x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 y_3 x_4 y_4 (PL_4)^2 - x_1 y_1 x_2^2 y_2^2 x_3 y_3 x_4 y_4 P_1 (PL_4)^2 - x_1 y_1 x_2^2 z_2^2 x_3 y_3 x_4 y_4 P_1 (PL_4)^2 \\ - x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 y_3 x_4^2 P_2 (PL_4)^2 + x_1 y_1 x_2^2 y_2^2 x_3 y_3 x_4^2 P_1 P_2 (PL_4)^2 + x_1 y_1 x_2^2 z_2^2 x_3 y_3 x_4^2 P_1 P_2 (PL_4)^2 \\ - x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 y_3 x_4^2 P_2 (PL_4)^2 + x_1 y_1 x_2^2 y_2^2 x_3 y_3 x_4^2 P_1 P_2 (PL_4)^2 + x_1 y_1 x_2^2 z_2^2 x_3 y_3 x_4^2 P_1 P_2 (PL_4)^2 \end{array} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = 1 - x_2 y_2 P_1 - x_4 y_4 P_2 + x_2 y_2 x_4 y_4 P_1 P_2$$

$$G = x_1 y_1 - x_1 x_4 y_1 y_4 P_2$$

$$H = j \left[\begin{array}{l} x_1 x_2 x_3 x_4 y_2 y_3 y_4 z_1 \cdot PL_4 PL_8 - x_4^2 y_4^2 x_1 x_2 x_3 y_2 y_3 z_1 \cdot P_2 PL_4 PL_8 \\ - x_4^2 z_4^2 x_1 x_2 x_3 y_2 y_3 z_1 \cdot P_2 PL_4 PL_8 - x_2^2 y_2^2 x_1 x_3 x_4 y_3 y_4 z_1 \cdot P_1 PL_4 PL_8 \\ + x_2^2 x_4^2 y_2^2 y_4^2 x_1 x_3 y_3 z_1 \cdot P_1 P_2 PL_4 PL_8 + x_2^2 x_4^2 y_2^2 z_4^2 x_1 x_3 y_3 z_1 \cdot P_1 P_2 \cdot PL_4 PL_8 \\ - x_2^2 z_2^2 x_1 x_4 x_3 y_3 y_4 z_1 \cdot P_1 PL_4 PL_8 + x_2^2 x_4^2 z_2^2 y_4^2 x_1 x_3 y_3 z_1 \cdot P_1 P_2 PL_4 PL_8 \\ + x_2^2 x_4^2 z_2^2 z_4^2 x_1 x_3 y_3 z_1 \cdot P_1 P_2 PL_4 PL_8 \end{array} \right]$$

$$I = - \left[\begin{array}{l} x_1 x_3 x_4 y_4 z_1 z_3 PL_8^2 - x_4^2 y_4^2 x_1 x_3 z_1 z_3 P_2 PL_8^2 - x_4^2 z_4^2 x_1 x_3 z_1 z_3 P_2 PL_8^2 \\ - x_1 x_2 x_3 x_4 z_1 z_3 y_2 y_4 P_1 PL_8^2 + x_4^2 y_4^2 x_1 x_2 x_3 y_2 z_1 z_3 P_1 P_2 PL_8^2 \\ + x_4^2 z_4^2 x_1 x_2 x_3 y_2 z_1 z_3 P_1 P_2 PL_8^2 \end{array} \right]$$

$$J = 1 - x_4 y_4 P_2$$

$$K = x_3 y_3 (1 - x_2 y_2 P_1)$$

$$L = x_2 x_3 y_2 z_3 PL_8 - x_2^2 y_2^2 x_3 z_3 P_1 PL_8 - x_2^2 z_2^2 x_3 z_3 P_1 PL_8$$

$$M = (1 - x_2 y_2 P_1)$$

$$x_1 = \sqrt{1 - \gamma_1} \quad , \quad y_1 = \sqrt{1 - \kappa_1} \quad , \quad z_1 = \sqrt{\kappa_1}$$

$$x_2 = \sqrt{1 - \gamma_2} \quad , \quad y_2 = \sqrt{1 - \kappa_2} \quad , \quad z_2 = \sqrt{\kappa_2}$$

$$x_3 = \sqrt{1 - \gamma_3} \quad , \quad y_3 = \sqrt{1 - \kappa_3} \quad , \quad z_3 = \sqrt{\kappa_3}$$

$$x_4 = \sqrt{1 - \gamma_4} \quad , \quad y_4 = \sqrt{1 - \kappa_4} \quad , \quad z_4 = \sqrt{\kappa_4}$$

$$P_1 = e^{-\frac{\alpha}{2} L_R - j \kappa_n L_R} \quad , \quad P_2 = e^{-\frac{\alpha}{2} L_L - j \kappa_n L_L} \quad ; \quad L_R = 2\pi R_R \quad , \quad L_L = 2\pi R_L$$

$$PL_2 = e^{-\frac{\alpha}{2} L_D - j \kappa_n L_D} \quad , \quad PL_4 = e^{-\frac{\alpha L_D}{2} - j \kappa_n \frac{L_D}{2}} \quad , \quad PL_8 = e^{-\frac{\alpha L_D}{2} - j \kappa_n \frac{L_D}{4}}$$

โดยที่ $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ คือ intensity coupling coefficient $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ คือ fractional coupler intensity loss และ α คือ attenuation constant ของวงแหวนสี่พ้องแบบแพนด้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า ในขณะที่เกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด บริเวณใจกลางของวงแหวนวงกลางของระบบ จะมีการรวมสัญญาณ ดังนั้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น และเมื่อมีการนำวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า มาซ้อนกันในแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 1 ผลแสดงว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนวงแหวนที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลจะแสดงให้เห็นในบทที่ 4 เมื่อวงแหวนของระบบมีค่ามากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า เป็นระบบวงแหวนแบบแพนด้า (PANDA Ring system)

การหาค่าผลเฉลยของสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Equation of Whispering Gallery Mode condition)

จากผลของสนามไฟฟ้าที่สามารถคำนวณหาได้แต่ละจุดบนระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า (PANDA ring resonator) [13] จะสามารถนำค่าของสนามไฟฟ้าไปใช้ในการหาค่าสูงสุด (Maximum of Electric field intensity) บริเวณต่อกลางของระบบวงแหวนได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E_1(\rho, \phi)}{\partial \rho} = 0 \quad \text{at} \quad \rho < a \quad (2.30)$$

เมื่อ E_1 เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่จุดที่ 1 แสดงในรูปที่ 8, ρ คือรัศมีของวงแหวนแพนด้าในรูปแบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate) (ρ, ϕ, z) และ คือมุมของระบบวงแหวนมีค่าเป็น $0 \leq \phi \leq 2\pi$ เมื่อทำการแก้สมการที่ (2.30) จะสามารถหาค่ารากของสมการในรูปแบบตัวแปร (ρ, ϕ) ในค่าดังกล่าวแทนในฟังก์ชัน $E_1(\rho, \phi, z)$ เมื่อ z เป็นค่าคงที่ จะได้ค่า สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ $E_{\max}(\rho, \phi, z)$ ที่เกิดในระบบวงแหวนแพนด้า แต่เนื่องจากการแก้สมการหาค่าสนามไฟฟ้า E_1 ของระบบวงแหวนแพนด้า นั้น จะมีรูปแบบทางกายภาพของระบบใกล้เคียงกับระบบทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลาง หมายความว่าอยู่ในรูปแบบทรงกระบอกที่ทวง ดังนั้นสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วิ่งผ่านระบบที่มีท่อนำคลื่นตรงและวงผาดทรงกระบอกทวงจะสามารถเขียนในรูปแบบของสมการ Helmholtz's wave equations [36] แสดงดังต่อไปนี้

$$\nabla^2 \bar{E}(\rho, \phi, z) + k^2 \bar{E}(\rho, \phi, z) = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial^2 E(\rho, \phi, z)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E(\rho, \phi, z)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E(\rho, \phi, z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E(\rho, \phi, z)}{\partial z^2} + k^2 E(\rho, \phi, z) = 0 \quad (2.32)$$

สมการที่ (2.32) แสดงให้เห็นว่าสมการอยู่ในรูปแบบระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate) และวิธีแก้สมการที่ (2.32) ในทางคณิตศาสตร์ จะอยู่ในรูปแบบ การแยกตัวประกอบ (Separation variables) แสดงในสมการที่ (2.33)

$$E(\rho, \phi, z) = R(\rho)\Phi(\phi)Z(z) \quad (2.33)$$

ในกรณีที่ $\rho < a$ $R_i(\rho) = C_m J(k_i \rho)$

C_m, k_i ค่าคงที่ ส่วน $J(k_i \rho)$ เรียกว่า Bessel's Function ของฟังก์ชัน $k_i \rho$

และ $i = 1, 2, 3, \dots$

สำหรับผลเฉลยของฟังก์ชัน $\Phi(\phi)$ อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\Phi(\phi) = A_m \cos(m\phi) \quad ; m = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2.34)$$

และค่าความหนาของพื้นผิวทรงกระบอกคือฟังก์ชัน Z แสดงดังต่อไปนี้

$$Z(z) = \sinh(kz) \quad (2.35)$$

เมื่อนำฟังก์ชันจากสมการที่ (2.33), (2.34) และ (2.35) แทนค่าในสมการที่ (2.33) ก็จะสามารถค่าผลเฉลยของค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ในระบบวงแหวนแบนด้านของระบบได้ซึ่งผลเฉลยจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบวงแหวนแบนด้าน (Mathematical Modeling of PANDA ring resonator for WGM conditions)

จากหัวข้อก่อน เมื่อเราทราบผลเฉลยของฟังก์ชันสนามไฟฟ้าที่อยู่ในระบบวงแหวนแบนด้าน [13] เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.33) แต่เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าในระบบวงแหวนแบนด้าน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.24)-(2.29) ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่ผ่านไปในด้านของสัญญาณขาเข้า (input port) ของระบบ ในการทดลองมักจะอยู่ในรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian pulse) หรือ โซลิตอน (soliton pulse) ผลที่ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้มักจะต้องเขียนให้อยู่ในรูปแบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$E_1(\rho, \phi) = \frac{4\pi \operatorname{sech}(k_{mn}L) J_m(k_{mn}\rho) \cos^2(m\phi)}{\pi a^2 J_{m+1}^2(k_{mn}a)} \left[\frac{x_1 \sqrt{k_1}}{\sqrt{1 - 2x_1 y_1 e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(k_n L) + e^{-\alpha L} x_1^2 y_1^2}} \right] \\ \times \left[\frac{w A_0 \sqrt{k_0 n_0}}{B^{\frac{1}{4}}} \int_0^a J_m(k_{mn}\rho) \left[\rho - \left(\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{1}{4} \frac{C}{B} \right) \rho^3 \right] d\rho \right] \quad (2.36)$$

กำหนดค่าคงที่ ดังต่อไปนี้ $A = k_{mn}^2 k_0^2 w^2 n_0^2 \rho^2$, $B = w^4 k_0^2 n_0^2$, $C = \phi^2$ แทนค่าลงใน (2.36)

และทำการประมาณค่าพจน์การอินทิกรัลฟังก์ชันเบสเซิล (Zakharov, 2009) ให้อยู่ในรูปของอนุกรมเทลเลอร์ได้ดังนี้

$$\int_0^a J_m(k_{mn}\rho) \left[\rho - \left(\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{C}{4B} \right) \rho^3 \right] d\rho \cong \frac{2\rho^2}{k_{0n}^2} J_0(k_{0n}\rho) \left[\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{C}{4B} \right] \\ + J_1(k_{0n}\rho) \left[\frac{\rho}{k_{0n}} - \frac{\rho^3}{k_{0n}} \left(\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{C}{4B} \right) + \frac{4\rho}{k_{0n}^3} \left(\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{C}{4B} \right) \right] \quad (2.37)$$

สามารถจัดรูปสมการ (2.37) ใหม่ให้อยู่ในรูปสมการกำลังสามเพื่อความสะดวกในการแก้ปัญหาได้ดังนี้

$$1 - \left[\frac{A}{2B} + \frac{1}{4} \frac{C}{B} + \frac{3k_{0n}^2}{4} \right] z + \left[\frac{3Ak_{0n}^2}{8B} + \frac{3k_{0n}^2 C}{16B} + \frac{2k_{0n}^4}{32} \right] z^2 - \left[\frac{Ak_{0n}^2}{16B} + \frac{k_{0n}^4 C}{32B} \right] z^3 = 0 \quad (2.38)$$

โดย $z = \rho^2$ จากนั้นทำการหาคำตอบของสมการ (2.38) โดยใช้ผลเฉลยของสมการกำลังสาม

$az^3 + bz^2 + cz + d = 0$ จาก (2.38) โดยเทียบสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$a = \left[-\frac{Ak_{0n}^2}{16B} - \frac{k_{0n}^4 C}{32B} \right], \quad b = \left[\frac{3Ak_{0n}^2}{8B} + \frac{3k_{0n}^2 C}{16B} + \frac{3k_{0n}^4}{32} \right], \quad c = \left[-\frac{A}{2B} - \frac{1}{4} \frac{C}{B} - \frac{3k_{0n}^2}{4} \right], \quad d = 1$$

ดังนั้นผลเฉลยของสมการกำลังสามคือ

$$\rho = \sqrt{z} = \sqrt[3]{q + \left(q^2 + \sqrt{(r-p^2)^3} \right)} + \sqrt[3]{q - \left(q^2 + \sqrt{(r-p^2)^3} \right)} + p \quad (2.39)$$

$$\text{โดย } p = -\frac{b}{3a}, \quad q = p^3 + \frac{(bc-3ad)}{6a^2}, \quad r = \frac{c}{3a}$$

สมการที่ (2.39) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Cardano ในปี 1545 (Schechter, 2005) จากนั้นกำหนดค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการ (2.36) ดังนี้

$$L = \frac{\pi a}{2}, \quad x_1 = \sqrt{1-\gamma_1}, \quad y_1 = \sqrt{1-\kappa_1}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff}$$

โดย L คือเส้นรอบวงของวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า, n_0 คือค่าดัชนีหักเหเชิงเส้นของสาร, n_{eff} คือ

ค่าดัชนีหักเหเชิงผลของสารหาได้จาก $n_{eff} = n_0 + n_2 I = n_0 + \left(\frac{n_2}{A_{eff}} \right) P$ โดย n_2 คือค่าดัชนีหักเห

แบบไม่เชิงเส้นของสาร ส่วน I และ P คือความเข้มและกำลังของแสงที่ใส่ในระบบตามลำดับ, A_0 คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดของแสงที่ใส่เข้าไปในระบบ, λ_0 คือความยาวคลื่นกลางของคลื่นแสงที่ใส่เข้าไปในระบบ

เพราะฉะนั้นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดหรือเรียกว่าขณะเกิดสภาวะเงื่อนไขวิสเปอร์ริงแกลเลอรี โหมด (Whispering Gallery Mode condition) สามารถหาได้ดังนี้

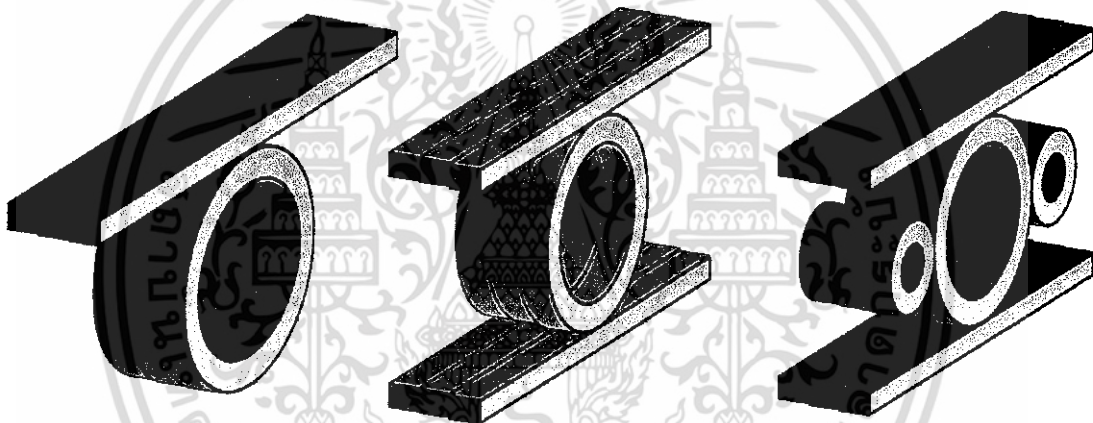
$$E_{\max}(\rho, \phi) = \frac{4 \cos \operatorname{ech} \left(k_{0n} \frac{\pi a}{2} \right)}{a^2 J_1^2(k_{0n} a)} \left[\frac{x_1 \sqrt{\kappa_1}}{\sqrt{1 - 2x_1 y_1 e^{-\frac{\alpha L}{2}} \cos(k_n L) + e^{-\alpha L} x_1^2 y_1^2}} \right] \times \frac{(w A_0) \sqrt{k_0 n_0}}{B^{\frac{1}{4}}} J_0(k_{0n} \rho) \int_0^a J_0(k_{0n} \rho) \left[\rho - \left(\frac{A}{2(B+C\rho^2)} + \frac{1}{4} \frac{C}{B} \right) \rho^3 \right] d\rho \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบของวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่ทับซ้อนกัน (Cascaded PANDA Ring Resonator system)

เป็นระบบที่นำเอาวงแหวนสั่นพ้องแพนด้า มาซ้อนกันในแนวตั้ง[14] หรือเรียกอีกแบบหนึ่งคือการต่อแบบขนาน เพื่อวัตถุประสงค์ ในเชิงการเพิ่มหรือลดค่าสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการเสริมกันและหักล้างกัน ตามการออกแบบระบบ ซึ่งขึ้นกับงานวิจัยแต่ละชนิด

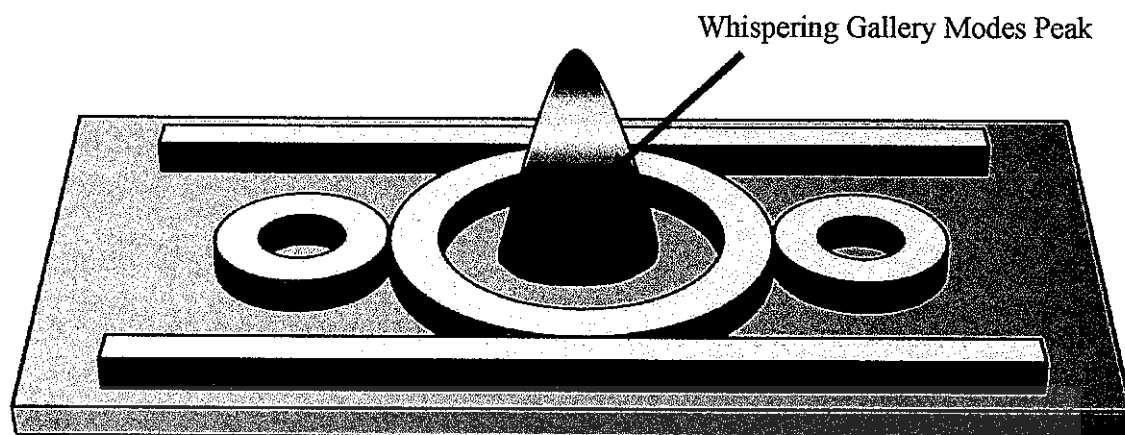
ดังนั้นจากงานวิจัยนี้ ต้องการให้เกิดการเสริมกันใช้เชิงสนามไฟฟ้าทุก ๆ จุด บนวงแหวน แต่สิ่งที่สำคัญมากกว่าคือ ขณะเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Mode) ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของระบบ ให้มีขนาดของความเข้มสัญญาณสูงสุด ถ้าเปรียบกับสัญญาณทางไฟฟ้าจะอยู่ในรูป สัญญาณการตล (Impulse response) ที่จุดดังกล่าวจะทำให้อากาศเกิดการแตกตัวที่จุดที่มีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวภายในอะตอมของธาตุหลักๆ ภายในหลอดคือ อากาศที่อุณหภูมิต้อง



รูปที่ 10 แสดงวงแหวนสั่นพ้องในรูปแบบต่าง ๆ ที่นำมาเป็นอุปกรณ์ชิ้นพื้นฐาน
ใช้ทำอุปกรณ์ เครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมา

การออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคพลาสมาเวคฟิลด์โดยอาศัย วงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator)

จากระบบของวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า ขณะเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด สามารถหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณตรงกลาง (Center of PANDA Ring) ที่แสดงว่าในรูป 11 และ 12 ได้ดังนี้

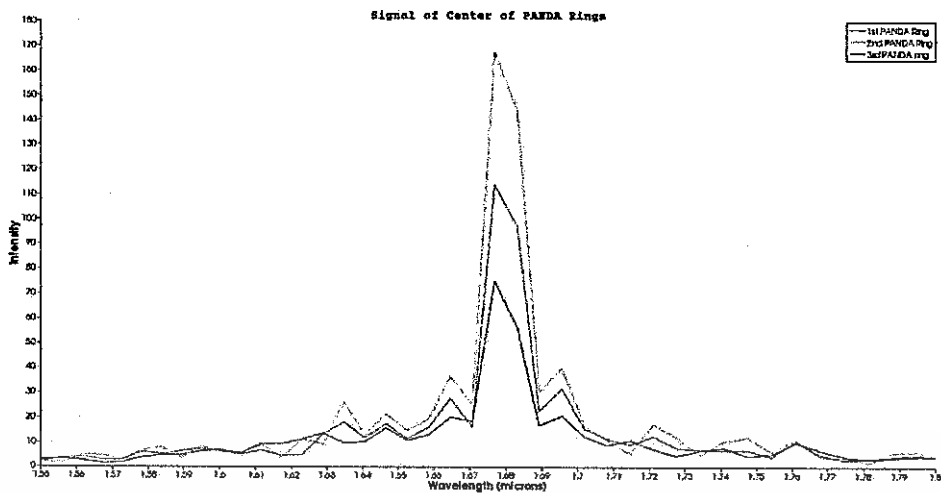


รูปที่ 11 แสดง วงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ขณะเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด



รูปที่ 12 แสดง ระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator of System) ที่มากกว่า 1 ระบบขณะเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

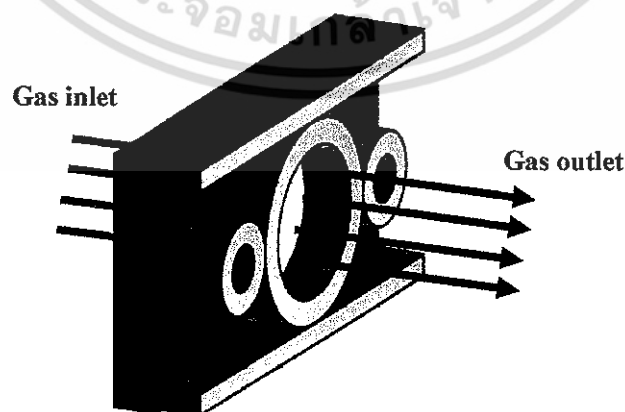


รูปที่ 13 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของการเกิดสภาวะวิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด บริเวณกึ่งกลางระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) ที่มากกว่า 1 ชั้น

จากรูปที่ 12 จะเห็นว่าค่าของความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้นตามจำนวนวงแหวนของวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า จะนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปเป็นหน่วยพื้นฐานในการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบก๊าซ โดยอาศัยพลาสมา ในการเร่งอนุภาค ดังนั้นจะต้องทราบคุณสมบัติพื้นฐานของพลาสมาของระบบก่อน จึงจะสามารถนำไปสร้างอุปกรณ์ได้

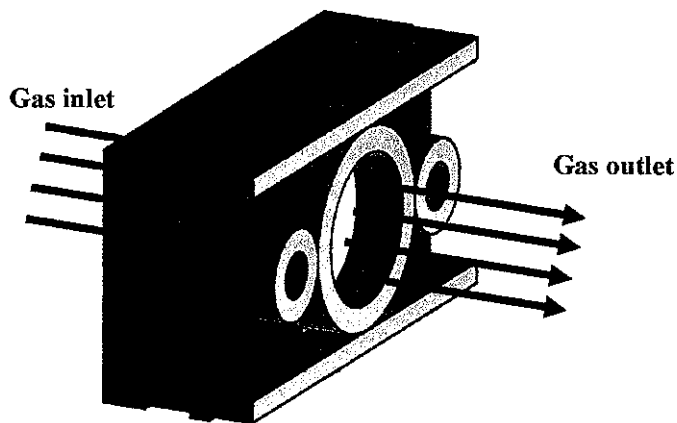
ความสัมพันธ์ระบบของวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า (PANDA Ring Resonator) กับเครื่องเร่งอนุภาคแบบพลาสมา

ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงเครื่องเร่งอนุภาคแบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า ผ่านระบบที่จำลองเสมือนเป็นหลอดที่บรรจุอากาศ ที่บริเวณต่อกลางของระบบ จะแสดงในรูป 13

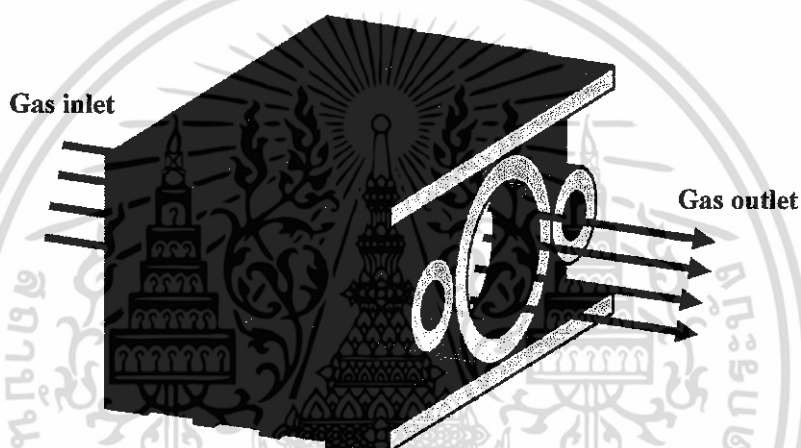


รูปที่ 14 แสดงให้เห็นระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่มีหลอดบรรจุอากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมาให้กับระบบ ขณะที่อากาศเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 แสดงให้เห็นระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนสันห้องแบบแพนด้าที่มีหลอดบรรจุอากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมาให้กับระบบ โดยการออกแบบให้มีถึง 2 ระบบ เพื่อทำการทดสอบตรวจวัดพลาสมาที่เกิดขึ้นในระบบ

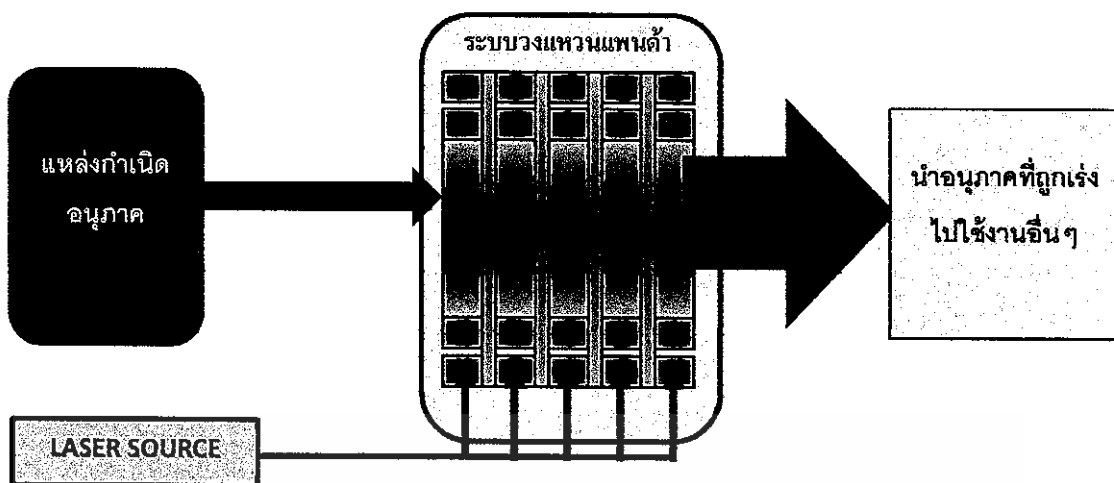


รูปที่ 16 แสดงให้เห็นระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนสันห้องแบบแพนด้าที่มีหลอดบรรจุอากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมาให้กับระบบ โดยออกแบบให้มีจำนวนวงแหวน ซ้อนทับกัน 4 ชั้น



รูปที่ 17 แสดงให้เห็นระบบที่สร้างขึ้นภายในวงแหวนสันห้องแบบแพนด้าที่มีหลอดบรรจุอากาศทำหน้าที่ผลิตพลาสมา โดยออกแบบให้มีระบบแพนด้าซ้อนกันมากถึง 10 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 แสดงโครงสร้างของเครื่องเร่งอนุภาคภาคพลาสมาแบบเวคฟิลด์ โดยอาศัยวงแหวนเส้นห้องแบบแพนด้า เป็นตัวขับเคลื่อนในการเร่งอนุภาค

จากรูปที่ 11 - 18 เป็นการออกแบบระบบเพื่อทำการเร่งอนุภาคผ่านระบบวงแหวนเส้นห้อง โดยที่ระบบที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการของสภาวะวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด (Whispering Gallery Mode) ทำให้คลื่นรวมกันที่จุดเดียว คือจุดกึ่งกลาง เปรียบเสมือน แสงรวมกันที่จุดโฟกัสเมื่อผ่านเลนส์นูน ผลของค่าพลังงาน และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นประกอบกับในรูป 5 เป็นการซ้อนกันของวงแหวนมากกว่า 1 ชั้น และอินพุตที่ให้กับระบบอยู่ในทิศทางเดียวกัน ผลจะทำให้ค่าความเข้มเสริมกันมากขึ้นและผลในเชิงตัวเลขกับกราฟ จะแสดงในบทที่ 4

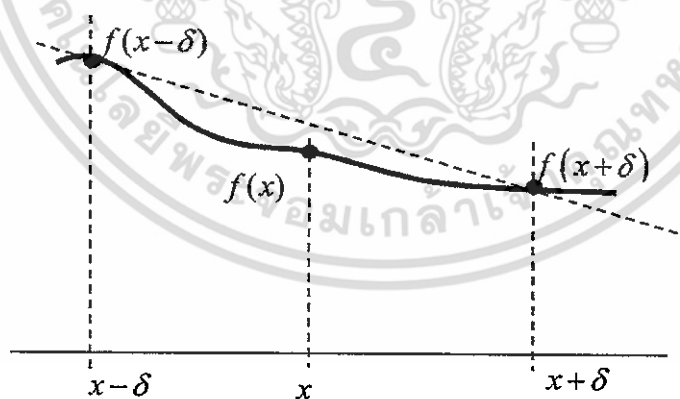
ซึ่งผลของการทดลองจะแสดงให้เห็นในบทที่ 4 โดยที่บทที่ 3 จะได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับรูปที่ 5 ทั้งในเชิงตัวเลข และระบบระเบียบขั้นตอนในการทดลองที่ละเอียดขึ้น ว่าผลเป็นจริงตามทฤษฎีที่กล่าวมาเบื้องต้น ระบบที่ทำการออกแบบ เป็นระบบที่อยู่ในรูปแบบของเครื่องเร่งอนุภาคชนิดหนึ่ง ผลแสดงในรูปแบบสัญญาณขาออก และจะแสดงในบทที่ 4 และผลการวัดอยู่ในรูปแบบของ คลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ที่กระทำต่อประจุทดสอบอิเล็กตรอน ผลจะแสดงให้เห็นในบทที่ 4 ดังนั้นระบบที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูปแบบ การเร่งความเร็วด้วยคลื่นพลาสมาเวคฟิลด์ (Plasma Wakefield Acceleration)

แบบจำลองเชิงตัวเลขของระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบเพนต้า

วิธีคำนวณเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain :FDTD)

วิธีการคำนวณแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงตัวเลข เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกนำเสนอขึ้นโดย Kane S. Yee [32] ในปี 1966 ซึ่งเป็นการแก้สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ โดยใช้การประมาณค่าแบบกึ่งกลางของอนุพันธ์ในปริภูมิของตำแหน่งและเวลา โดยเฉพาะสมการกฎของฟาราเดย์ และกฎของแอมแปร์ที่เป็นสมการเคิร์ล วิธีนี้สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ในแง่ของหลักการ และการใช้งาน การแก้ปัญหาฟิสิกส์เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสามารถใช้แก้ปัญหาได้หลากหลายรูปแบบ แต่เนื่องจากการเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข ความแม่นยำของคำตอบจึงขึ้นอยู่กับรูปแบบการนำมาใช้งานด้วย และถึงแม้ว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงตัวเลขจะสามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่ยากแก่การแก้ปัญหาวัยวิธีวิเคราะห์ แต่ก็ต้องพลังในการคำนวณที่มากขึ้น ซึ่งหมายถึงต้องใช้หน่วยประมวลผลและหน่วยความจำที่มากขึ้น ทำให้ต้องเสียงบประมาณในการจัดหาทรัพยากรเพิ่มขึ้น

หลักการของวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลานี้ เป็นการประมาณค่าสมการอนุพันธ์โดยอาศัยผลต่างของคำตอบสมการในช่วงขอบเขตเวลาน้อย ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 19 แสดงการประมาณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 17 ในการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน $f(x)$ ที่ตำแหน่งใดๆ นั้น จะใช้การหาผลต่างของการแทนค่าของฟังก์ชัน $f(x)$ ในบริเวณใกล้เคียงคือ $x+\delta$ และ $x-\delta$ และให้ δ มีค่าน้อยมากๆ ดังนั้น จะสามารถประมาณค่าอนุพันธ์ที่ตำแหน่ง x ได้ เริ่มจากการกระจายฟังก์ชันแบบเทย์เลอร์รอบตำแหน่ง x เป็นระยะห่าง δ ได้ดังนี้

$$f(x+\delta) = f(x) + \delta f'(x) + \frac{1}{2!} \delta^2 f''(x) + \frac{1}{3!} \delta^3 f'''(x) + \dots \quad (3.1)$$

$$f(x-\delta) = f(x) - \delta f'(x) + \frac{1}{2!} \delta^2 f''(x) - \frac{1}{3!} \delta^3 f'''(x) + \dots \quad (3.2)$$

นำสมการ (3.1) ลบออกด้วยสมการที่ (3.2) จะได้

$$f(x+\delta) - f(x-\delta) = 2\delta f'(x) + \frac{2}{3!} \delta^3 f'''(x) + \dots \quad (3.3)$$

จัดรูปสมการ (3.3) ด้วยการหารด้วย 2δ ตลอดทั้งสมการ

$$\frac{f(x+\delta) - f(x-\delta)}{2\delta} = f'(x) + \delta^2 f'''(x) + \dots \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) สังเกตได้ว่าทางขวามือของสมการมีลำดับ 2 ประเภทมารวมกันคือ พจน์ที่ไม่มี δ^2

คุณอยู่ได้แก่ $f'(x)$ และพจน์ที่มี δ^2 คุณอยู่ได้แก่ $\delta^2 f'''(x)$ และลำดับที่สูงขึ้นไป เนื่องจาก δ ที่กำหนดมีค่าน้อยมาก ๆ ทำให้พจน์ที่มีค่า δ^2 มีค่าน้อยมากตามไปด้วย ทำให้สามารถจัดรูปแบบของสมการได้ดังนี้

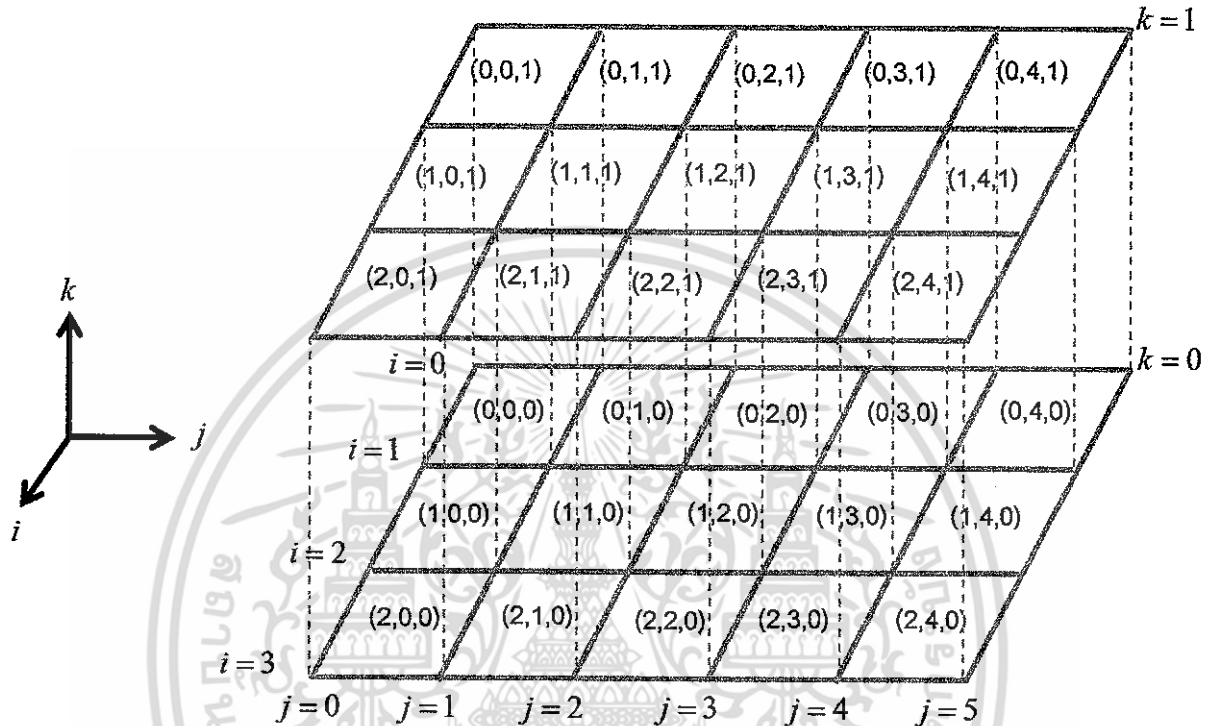
$$\frac{f(x+\delta) - f(x-\delta)}{2\delta} = f'(x) + O(\delta^2) \quad (3.5)$$

$$\frac{f(x+\delta) - f(x-\delta)}{2\delta} \cong f'(x) \quad (3.6)$$

สามารถใช้การประมาณค่าวิธีนี้ หาคำตอบของสมการแมกซ์เวลล์ ด้วยแบบอัลกอริทึมของ Yee ในหัวข้อต่อไป

แบบอัลกอริทึมของ Yee (Yee's Algorithm Model)

แบบอัลกอริทึมนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Kane Yee ในปี 1966 [33] เพื่อใช้ในการหาคำตอบสมการแมกซ์เวลล์ โดยจะทำการแบ่งบริเวณที่ใช้ในการศึกษาตามระบบพิกัดฉาก ในกรณีของปัญหา 2 มิติ จะแบ่งเป็นตาราง และกรณีของ 3 มิติ จะแบ่งเป็นลูกบาศก์ใน ดังรูป



รูปที่ 20 ตัวอย่างแสดงการแบ่งขอบเขตการคำนวณของอัลกอริทึมของ Yee โดยจะแบ่งเป็นลูกบาศก์ด้านเท่า ในแต่ละระนาบลูกบาศก์จะมีการกำกับหมายเลขประจำระนาบไว้ในทั้ง 3 แกนที่ใช้พิจารณา ซึ่งถ้าพิจารณาระบบ 2 มิติ จะคิดในระนาบ $k = 0$ เท่านั้น จึงเหลือพิจารณาเพียงแครูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น

จากรูปที่ 18 มีการแบ่งบริเวณที่ศึกษาออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ขนาดเท่าๆ กันเพื่อใช้ในการคำนวณในลำดับต่อไป ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. แทนค่าตัวอนุพันธ์ทุกตัวในสมการแมกซ์เวลล์ (สมการของแอมแปร์และสมการของฟาราเดย์) ด้วยการประมาณค่าแบบผลต่างสี่เหลี่ยมที่นำเสนอก่อนหน้านี้ ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีความเกี่ยวพันกันทั้งปริภูมิและเวลาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จากสมการฟาราเดย์} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = - \left(\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \sigma_m \vec{H} \right) \quad (3.7)$$

โดย μ = magnetic permeability , σ_m = magnetic conductivity ดังนั้น ในแต่ละส่วนจะแยกได้ว่า

$$\sigma_m H_x + \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.8)$$

$$\sigma_m H_y + \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.9)$$

$$\sigma_m H_z + \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.10)$$

$$\text{และจากสมการของแอมแปร์} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \right) \quad (3.11)$$

โดย ϵ = permittivity , σ = conductivity ทำให้ในแต่ละส่วนจะได้ว่า

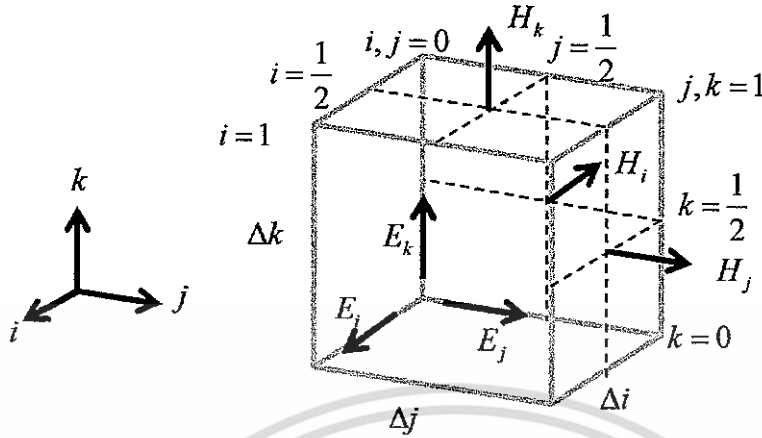
$$\sigma E_x + \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.12)$$

$$\sigma E_y + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.13)$$

$$\sigma E_z + \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำส่วนประกอบไปแสดงบนลูกบาศก์ของ Yee (Yee's Cube) จะเป็นไปตามรูปข้างล่าง



รูปที่ 21 แสดงลักษณะของลูกบาศก์ของ Yee (Yee's Cube หรือ Yee's Cell) และตำแหน่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนลูกบาศก์

จากรูปสามารถสังเกตเห็นได้ว่าตำแหน่งของสนามไฟฟ้าจะอยู่บริเวณขอบของลูกบาศก์ ส่วนสนามแม่เหล็กจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของหน้าระนาบลูกบาศก์ ทำให้ เมื่อทำการแทนอนุพันธ์ด้วยผลต่างสี่บเนื่องในแต่ละส่วนตามลูกบาศก์ของ Yee จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{2} + \mu \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \\ &= \frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{2} + \mu \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \\ &= \frac{E_z^n(i+1, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} & \sigma_m \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{2} + \mu \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta t} \\ &= \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta y} \frac{E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & \sigma \frac{E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{2} + \varepsilon \frac{E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta t} \\ &= \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} & \sigma \frac{E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{2} + \varepsilon \frac{E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta t} \\ &= \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta z} \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} & \sigma \frac{E_z^{n+1}(i, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{2} + \varepsilon \frac{E_z^{n+1}(i, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \\ &= \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \end{aligned} \quad (3.20)$$

2. ทำการแก้สมการที่แทนค่าผลต่างสี่เบื้องเพื่อให้ได้สมการที่ใช้ในการแทนค่าทวนซ้ำ เพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กในลำดับถัดไป ด้วยค่าสนามที่ผ่านมา ซึ่งจากสมการ (3.15) – (3.20) นำมาจัดให้อยู่ในรูปสมการทวนซ้ำ นำมาแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) &= \frac{1 - \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu(1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu})} \left(\frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) &= \frac{1 - \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu(1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu})} \left(\frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) = \frac{1 - \frac{\sigma_n \Delta t}{2\mu}}{1 + \frac{\sigma_n \Delta t}{2\mu}} H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) + \frac{\Delta t}{\mu(1 + \frac{\sigma_n \Delta t}{2\mu})} \left(\frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \right) \quad (3.23)$$

$$E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon})} \left(\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} \right) \quad (3.24)$$

$$E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}, k) = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon})} \left(\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \right) \quad (3.25)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+\frac{1}{2}) = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon})} \left(\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \right) \quad (3.26)$$

3. ทำการหาค่าของสนามแม่เหล็กในช่วงเวลาถัดไป 1 ลำดับ

4. ทำการหาค่าของสนามไฟฟ้าในช่วงเวลาถัดไป 1 ลำดับ

5. นำค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้ในข้อที่ 3 และ 4 มาทำการแก้สมการในขั้นที่ 2 วนซ้ำไปจนครบช่วงเวลาที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการทดสอบแบบจำลองของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่มีการซ้อนกันด้วยโปรแกรม Matlab และ Lumerical FDTD Solution เพื่อตรวจสอบลักษณะสัญญาณ จากทั้งสองโปรแกรม ให้ความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดเป็นโหมดพื้นฐานของการสั้นพ้อง ซึ่งจะให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด โดยจะมีค่าตัวแปรที่สนใจในการปรับเปลี่ยนได้แก่

1. รัศมีของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า ซึ่งจะมีการเปลี่ยนค่ารัศมีวงแหวนกลาง เป็น 1.5, 2, 3, 4 และ 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนวงแหวนซ้ายและขวา กำหนดให้มีค่ารัศมีเป็นครึ่งหนึ่งของวงแหวนกลาง
2. จำนวนชั้นของการซ้อนกันของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า จะพิจารณาจำนวนชั้นตั้งแต่ ไม่ซ้อนทับกัน, ซ้อนทับ 2 ชั้น, 3 ชั้น, 4 ชั้น, 5 ชั้น, 6 ชั้น, 7 ชั้น, 8 ชั้น, 9 ชั้น และ 10 ชั้น ตามลำดับ กำหนดให้รัศมีของวงแหวนกลางเป็น 3 ไมโครเมตร
3. รูปแบบการปล่อยแสงของแหล่งกำเนิด โดยจะพิจารณาแยกเป็น กรณีเฟสเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดตรงกันหมด, เฟสขั้นถัดไปตรงข้ามกับชั้นก่อนหน้า และเฟสของแหล่งกำเนิดเลื่อนไปชั้นละ 45 องศา โดยทดสอบกับระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า ที่ซ้อนทับกัน 5 ชั้น รัศมีวงแหวนกลางเป็น 3 ไมโครเมตร

ตัวแปรที่นำมาทำการศึกษาคือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากบริเวณช่องของวงแหวนกลางของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า คำนวณหาค่าสนามเวคฟิลด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ และนำไปคำนวณหาแรงกระทำที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคประจุอิเล็กตรอนทดสอบ ในแต่ละสถานการณ์ข้างต้น

บทที่ 4

ผลการทดสอบแบบจำลอง

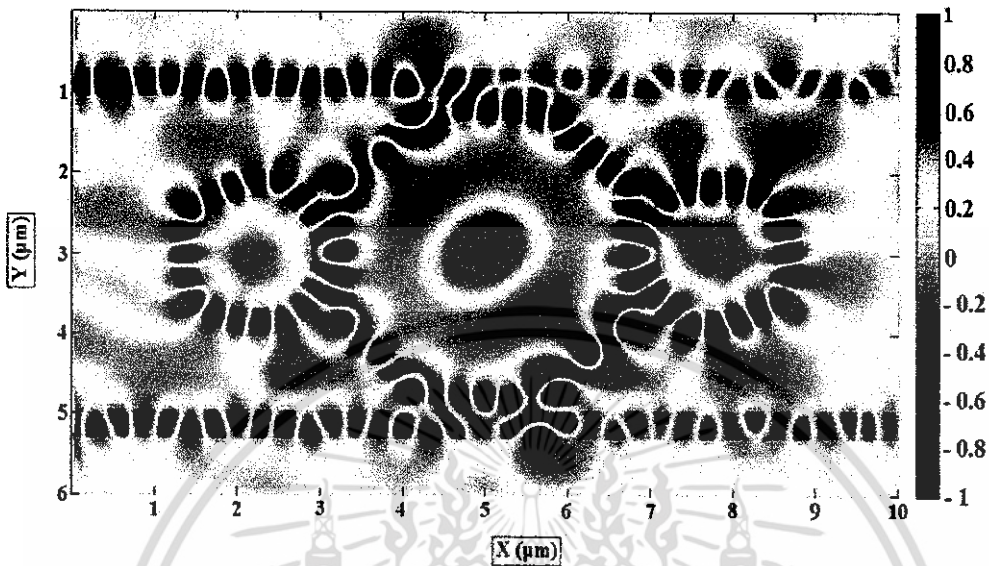
จากผลงานวิจัยก่อนหน้า ได้แสดงว่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงแหวนวงกลางของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า มีค่าเป็น 70.8 เพอร์เซ็นต์ ของสนามไฟฟ้าจากแสงเลเซอร์ที่ป้อนให้ทางช่องอินพุต และเมื่อเทียบในแง่ของความเข้มของแสงแล้วจะได้เป็น 50.12 % ของความเข้มเดิมจากด้านอินพุต ในการทำให้เกิดพลาสมาภายในวงแหวนสั้นพ้องจะต้องมีค่าสนามไฟฟ้าที่มากกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ของตัวกลางนั้น ในที่นี้คือ อากาศ ซึ่งมีค่าประมาณ 3×10^6 โวลต์ต่อเมตร หรือ 3 โวลต์ต่อไมโครเมตร ทำให้โมเลกุลอากาศที่ได้รับสนามไฟฟ้าเริ่มแตกตัวเป็นไอออน โดยปริมาณไอออนที่เกิดขึ้นคิดเป็น 1% ของ โมเลกุลอากาศทั้งหมดที่สังเกต คุณสมบัติของพลาสมาจะเริ่มแสดงขึ้น และเกิดการสร้างเวคฟิลด์เพื่อขับเคลื่อนอนุภาคต่อตามลำดับ

ในการทดสอบแบบจำลองนี้จะพิจารณาการสร้างพลาสมาในความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีความหนาแน่นของโมเลกุลอากาศ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของไนโตรเจนและออกซิเจนเป็นหลัก การทำให้โมเลกุลอากาศแตกตัวนั้นสามารถใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเลเซอร์มาเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าโดยการส่งผ่านเลนส์ขนาดเล็กจนถึงปริมาณความเข้มที่เพียงพอในการทำให้โมเลกุลอากาศแตกตัวประมาณ 10^{10} W/m² [34] - [36]

แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้จะเป็นเลเซอร์ไฟเบอร์ ขนาดกำลัง 1 วัตต์ ความยาวคลื่นกลางเป็น 1.55 ไมโครเมตร เมื่อทำการใส่เข้าสู่ตัวกลางท่อนำคลื่นที่ทำจากแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งสามารถนำคลื่นย่านนี้ได้ดี มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำ มีขนาดความกว้าง 0.3 ไมโครเมตร และสูง 1 ไมโครเมตร ทำให้มีการเพิ่มความเข้มของส่วนสนามไฟฟ้าคลื่น จนได้ค่าสนามไฟฟ้าเป็น 2.93×10^7 โวลต์ต่อเมตร ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดพลาสมาขนาดเล็กภายในช่องว่างกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า จากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหนด

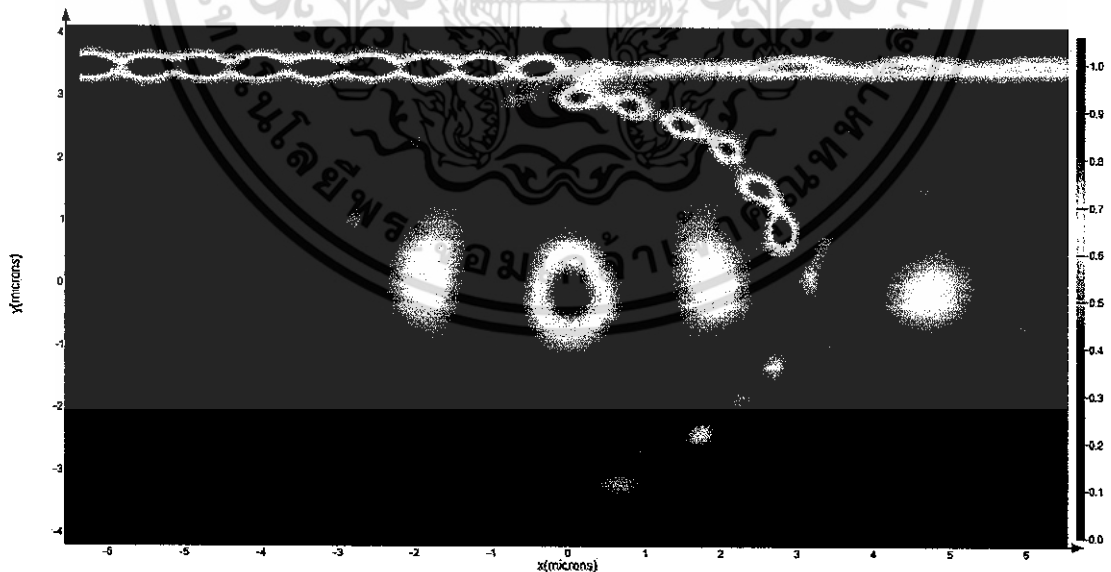
ลักษณะผลการทดสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab และ Lumerical FDTD Solution

ภาพการคำนวณจากโปรแกรม Matlab



รูปที่ 22 รูปแสดงลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นบนวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนดาร์ตมี 2 ไมโครเมตร โดยโปรแกรม Matlab

ภาพจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Lumerical FDTD Solutions



รูปที่ 23 รูปแสดงลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นบนวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนดาร์ตมี 2 ไมโครเมตร โดยโปรแกรม Lumerical FDTD Solution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

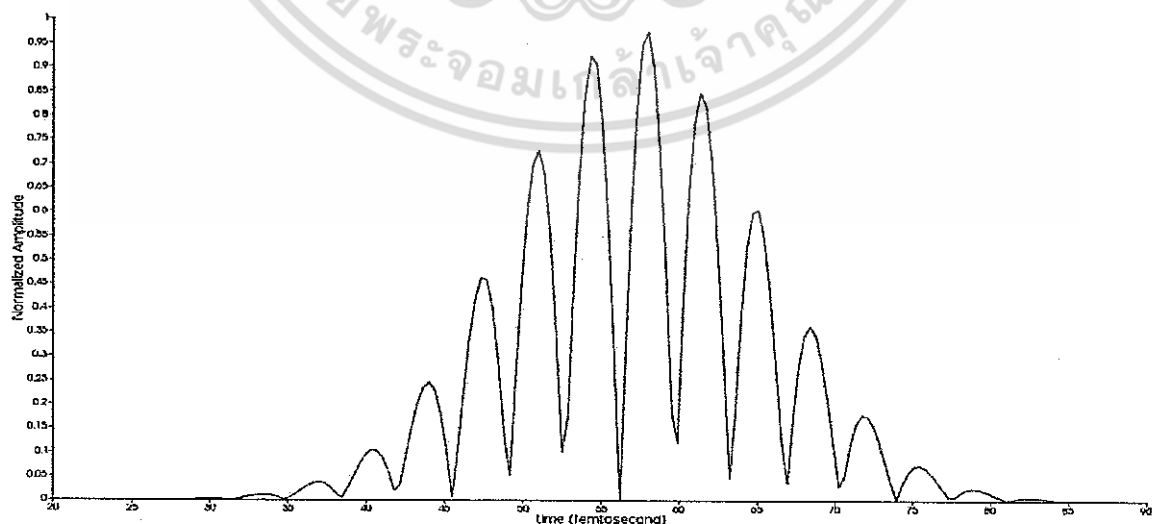
จากรูปที่ 22 และ 23 เป็นการแสดงลักษณะสัญญาณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าทั้งวง โดยโปรแกรมคำนวณเชิงพาณิชย์ 2 โปรแกรม ได้แก่ Matlab และ Lumerical FDTD Solution ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ บริเวณใจกลางวงแหวนกลางและวงแหวนเล็กทางขวาของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า มีสัญญาณสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่ส่วนที่แตกต่างกันคือค่าที่แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่ใจกลางวงแหวนได้มีค่าประมาณ 76.89 % ของสัญญาณขาเข้าในส่วนของโปรแกรม Matlab และ 47.5% ของสัญญาณขาเข้าในส่วนของ Lumerical FDTD Solution ซึ่งเกิดค่าที่ได้จากโปรแกรม Matlab เป็นค่าสนามไฟฟ้าจริงที่เกิดขึ้น ณ เวลาที่ตรวจสอบ ต่างจาก Lumerical FDTD Solution ที่การแสดงผลมาจากการนำค่าสนามไฟฟ้าจริงที่ได้ช่วงเวลาที่ทดสอบ มาทำการแปลงแบบฟูเรียร์ ให้ผลของค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ ขึ้นความยาวคลื่นที่ใส่ให้กับระบบ

ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากบริเวณต่างๆของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า

ในที่นี้จะมีการเปรียบเทียบความแรงและลักษณะของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณช่องกลางภายในวงแหวนวงกลาง 1 ชั้น โดยเทียบกับสนามไฟฟ้าในขาต่างๆ ของวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า ได้แก่ ขาที่คลื่นเข้าระบบ (Input Port) ขาที่คลื่นไหลผ่าน (Through Port) ขาที่คลื่นออกจากระบบ (Drop Port) และส่วนบริเวณใจกลางของวงแหวนกลางของระบบวงแหวนสั้นพ้อง โดยสัญญาณขาเข้าที่พิจารณาที่มีลักษณะรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian Pulse) และสัญญาณที่ได้ทั้งหมดจะทำการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบสัญญาณ

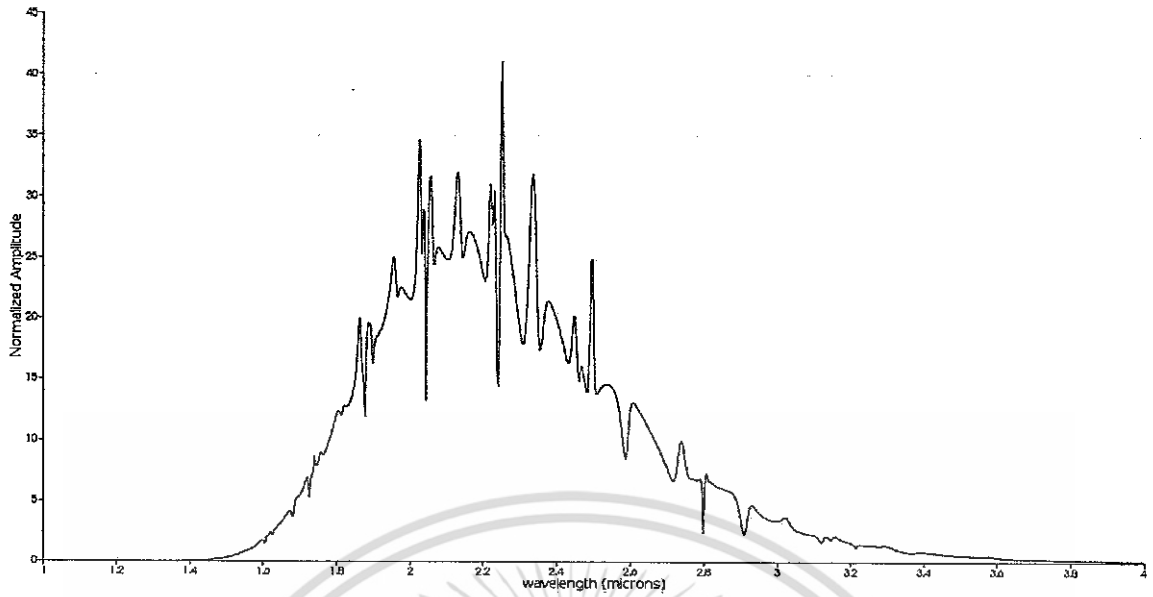
ผลของรูปสัญญาณสนามไฟฟ้าที่ได้ในบริเวณส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังนี้

✦ สัญญาณขาเข้า (Input Port) ทั้งรูปแบบเชิงเวลา และรูปแบบเชิงความยาวคลื่น



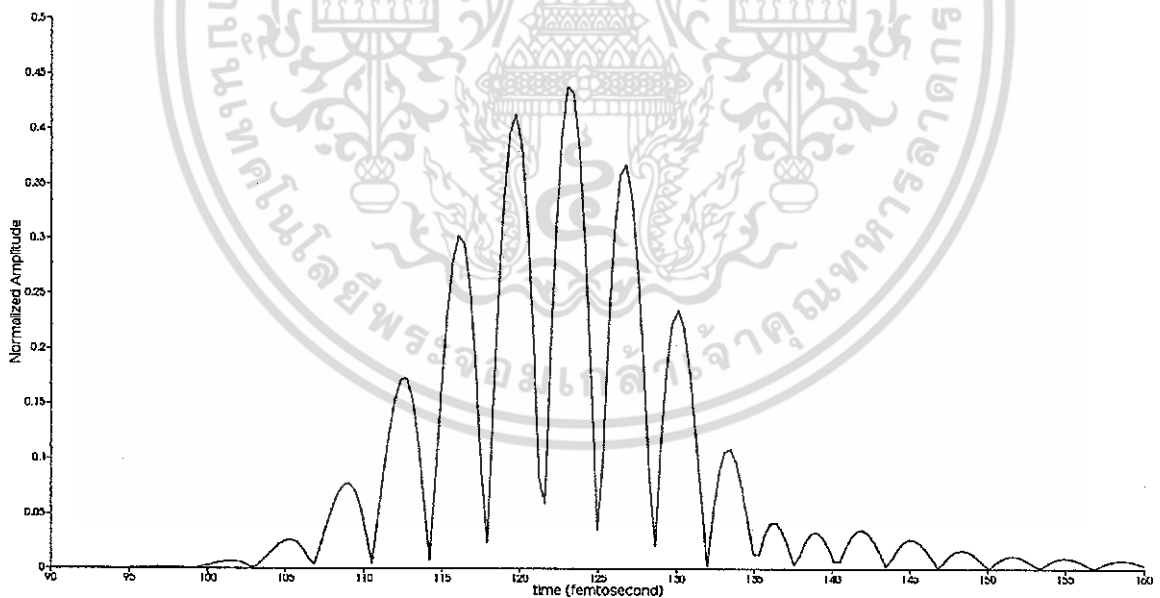
รูปที่ 24 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นขาเข้า รูปแบบเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



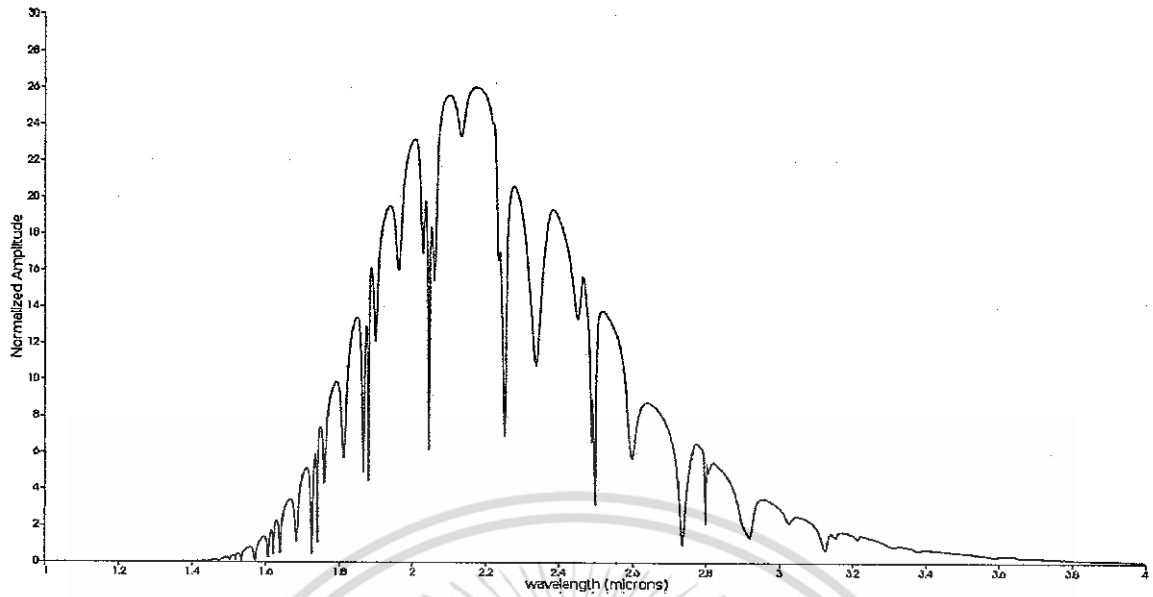
รูปที่ 25 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นขาเข้า รูปแบบเชิงความยาวคลื่น

ท่อนำคลื่นส่งผ่าน (Through Port) ทั้งรูปแบบเชิงเวลา และรูปแบบเชิงความยาวคลื่น



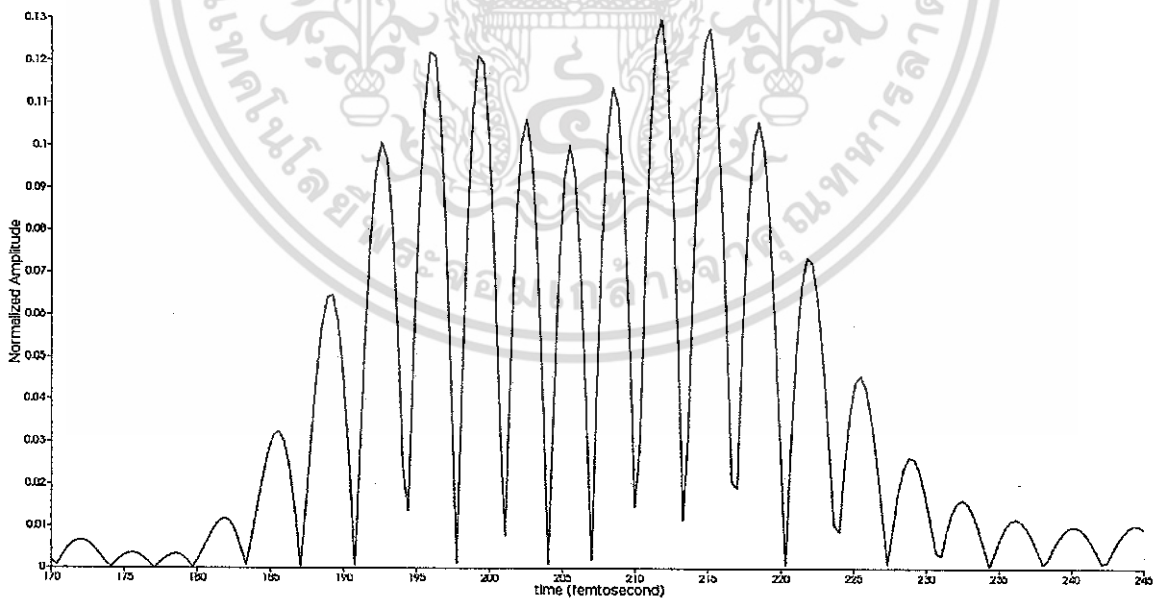
รูปที่ 26 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นส่งผ่าน รูปแบบเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



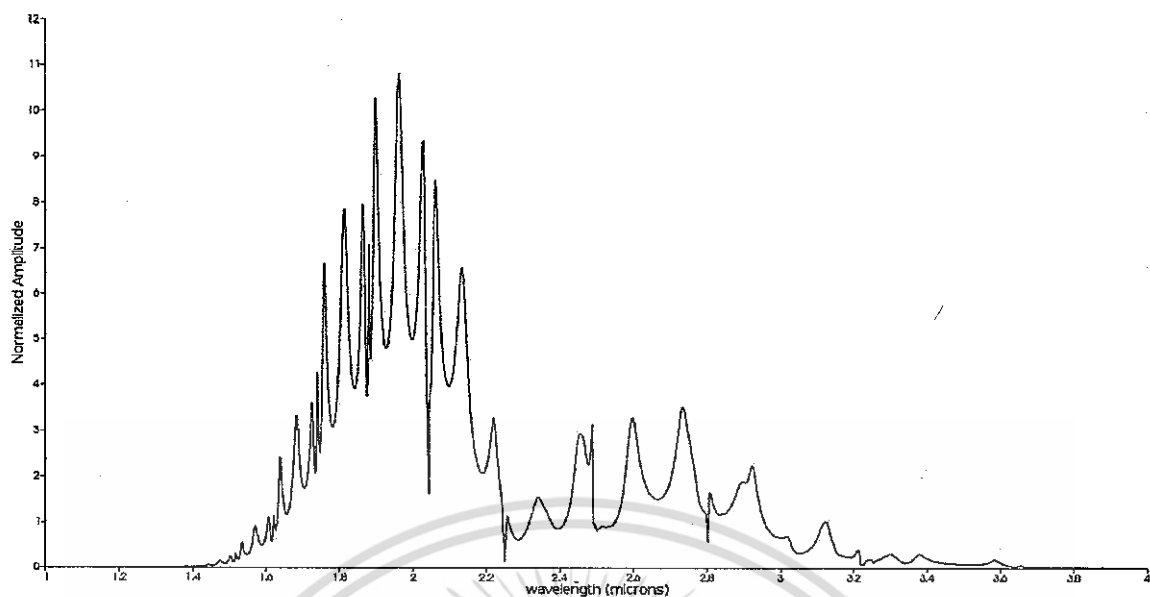
รูปที่ 27 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นส่งผ่าน รูปแบบเชิงความยาวคลื่น

✱ ท่อนำคลื่นขาดรูป (Drop Port) ทั้งรูปแบบเชิงเวลา และรูปแบบเชิงความยาวคลื่น



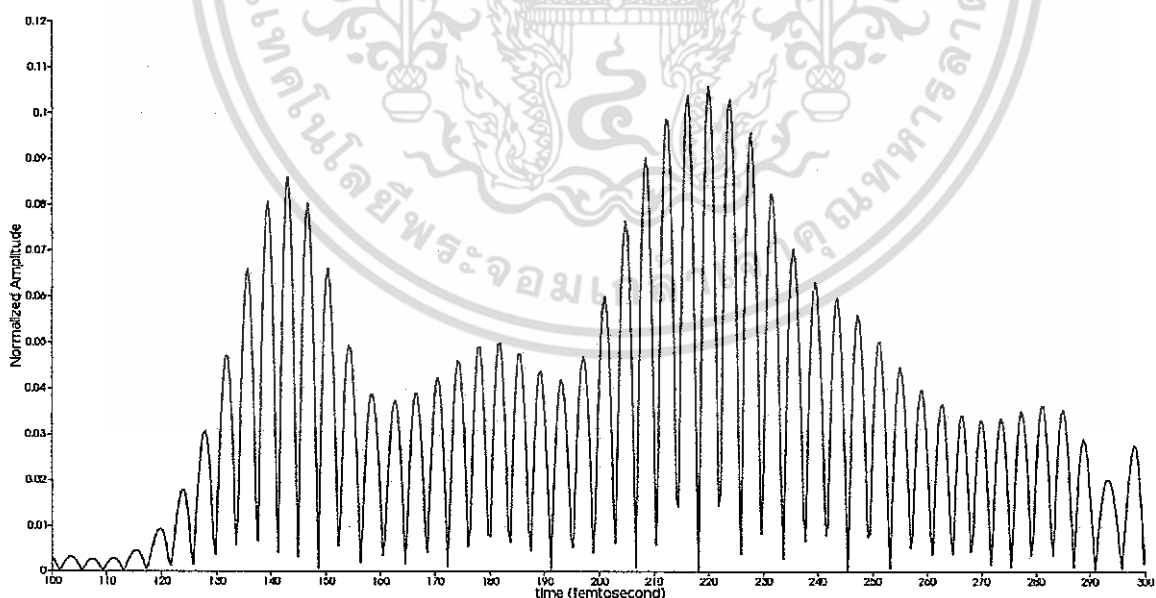
รูปที่ 28 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นออก รูปแบบเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



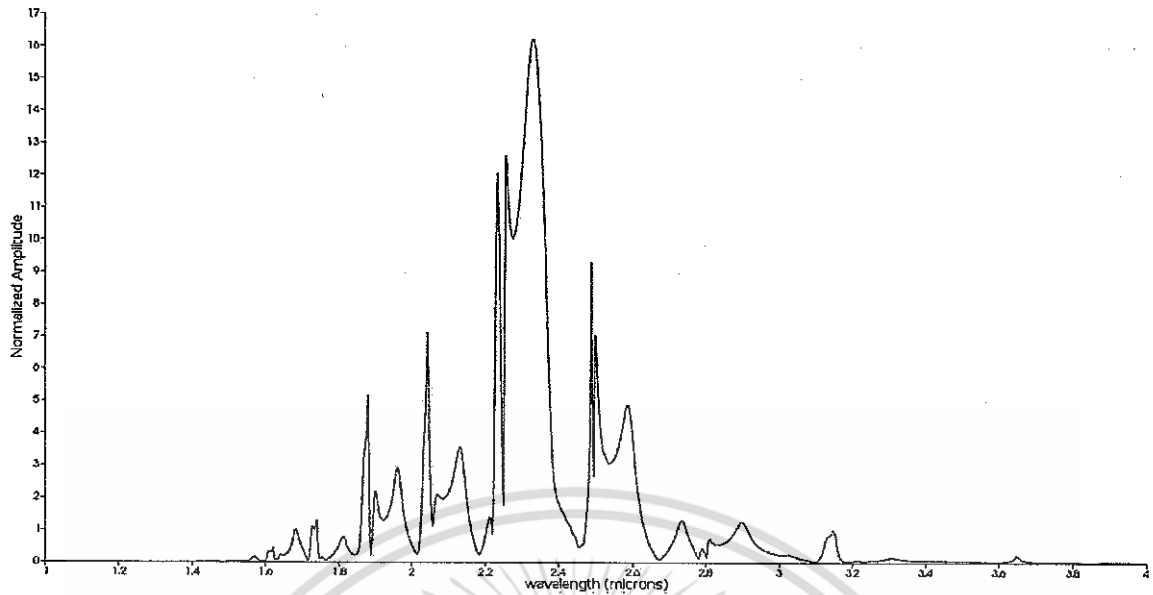
รูปที่ 29 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณท่อนำคลื่นออก รูปแบบเชิงความยาวคลื่น

📌 ใจกลางของวงแหวนสั้นพองแพนด้า ทั้งรูปแบบเชิงเวลา และรูปแบบเชิงความยาวคลื่น



รูปที่ 30 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพองแพนด้า รูปแบบเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสันฟ้องแบบแพนด้า รูปแบบเชิงความถี่

จากรูปที่ 22 -29 เมื่อพิจารณารูปแบบเชิงเวลาของสัญญาณในแต่ละบริเวณ จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปสัญญาณจากท่อนำคลื่นขาเข้า ท่อนำคลื่นส่งผ่าน จะมีความคล้ายคลึงกัน ต่างกันตรงแอมพลิจูดของคลื่น และเวลาที่คลื่นวิ่งผ่านในแต่ละจุดสังเกตการณ์เท่านั้น บริเวณท่อนำคลื่นออกจะมีลักษณะของการรวมคลื่น 2 ลูก เกิดขึ้นจากคลื่นเดิมที่เข้ามาจากท่อนำคลื่นเข้า รวมกับคลื่นที่มาจาก การแบ่งคลื่นของวงแหวนเล็กด้านข้างของวงแหวนใหญ่ ส่วนบริเวณใจกลางวงแหวนสันฟ้องนั้น จะเป็นผลรวมของลูกคลื่นหลายๆ ลูก ที่มาจากการรั่วไหลออกมาจากวงแหวนใหญ่จากผลการเกี่ยวพัน (Coupling) ของวงแหวนเล็กด้านข้าง

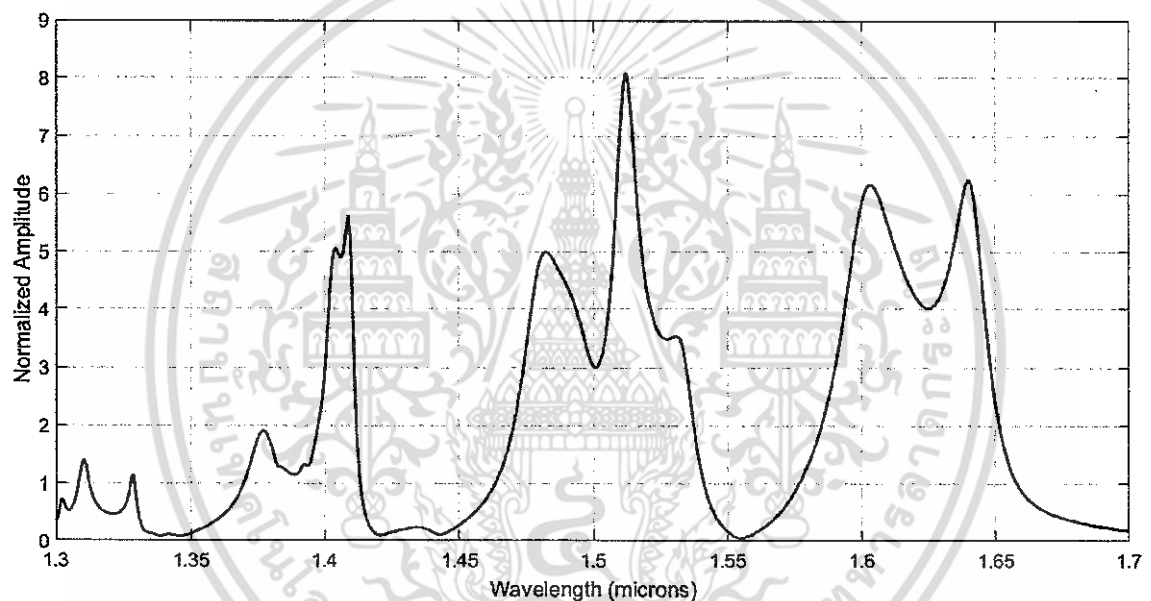
แต่เมื่อพิจารณาในรูปแบบสัญญาณเชิงความถี่ที่มาจาก การแปลงแบบฟูเรียร์แล้วนั้น ในแต่ละช่องสัญญาณที่วัดได้นั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละช่องทาง ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณที่วัดได้จากท่อนำคลื่นนำเข้าและท่อนำคลื่นส่งผ่าน จะมีเฟสของคลื่นกลับกัน 180 องศา แต่จะสัญญาณของท่อนำคลื่นขาเข้าจะมีเฟสตรงกันกับคลื่นจากท่อนำคลื่นขาออก ส่วนรูปร่างโดยรวมของคลื่น สัญญาณจากช่องนำเข้าจะคล้ายคลึงกับสัญญาณจากช่องส่งผ่าน แต่จะแตกต่างจากสัญญาณในช่องคลื่นขาออก โดยมีลักษณะเป็นคลื่น 2 ชุดมารวมกัน และบริเวณใจกลางวงแหวนสันฟ้อง จะมียอดคลื่นหลายยอดเกิดขึ้น เนื่องมาจากเกิดการสันฟ้อง (Resonance) ที่หลายช่วง ภายในช่วงความยาวคลื่นที่ใส่เข้าไป

การพิจารณาสัญญาณสนามไฟฟ้าที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับรัศมีของวงแหวนกลาง

ในส่วนนี้จะทำการพิจารณาในส่วนของสนามไฟฟ้าจากใจกลางของระบบวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบแพนด้าเพียง 1 ชั้น และทำการเปลี่ยนค่ารัศมีวงแหวนกลางตั้งแต่ 1.55 ไมโครเมตร จนถึง 5 ไมโครเมตร จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ความยาวคลื่นกลางที่ 1.55 ไมโครเมตร โดยแสดงผลอยู่ในรูปเชิงความยาวคลื่น หลังจากทำการแปลงแบบฟูเรียร์แล้ว และทำการทดสอบในกรณีใช้การซิมูเลชัน FDTD แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณ ผลที่ได้ มีดังนี้

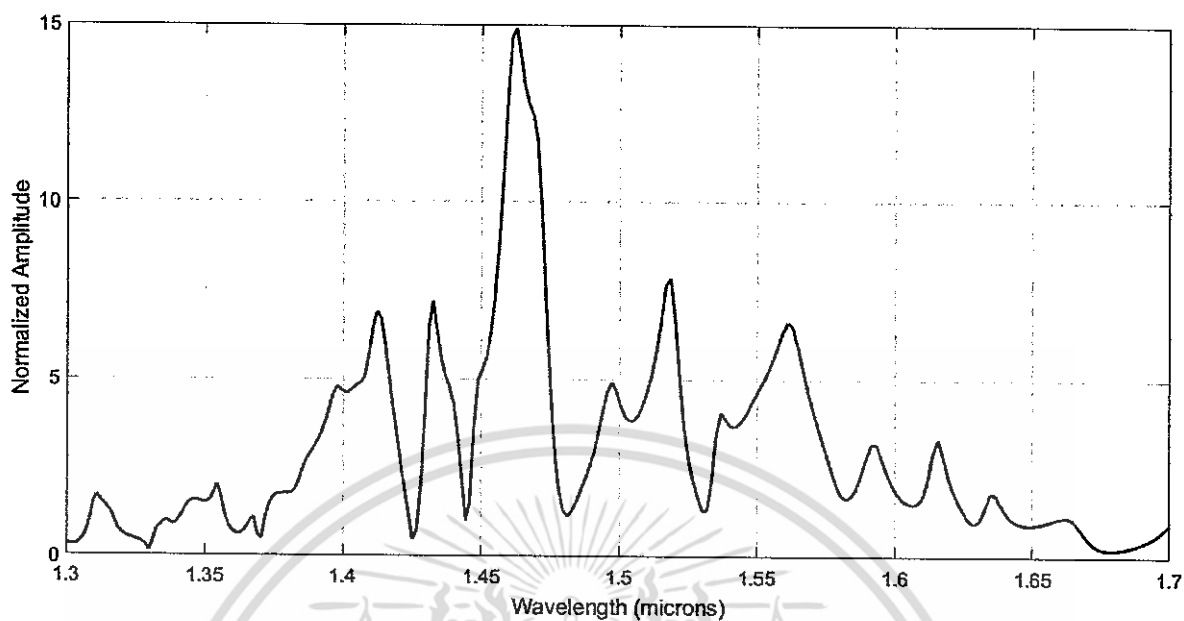
FDTD แบบ 2 มิติ

รัศมีวงแหวนกลาง 1.55 ไมโครเมตร



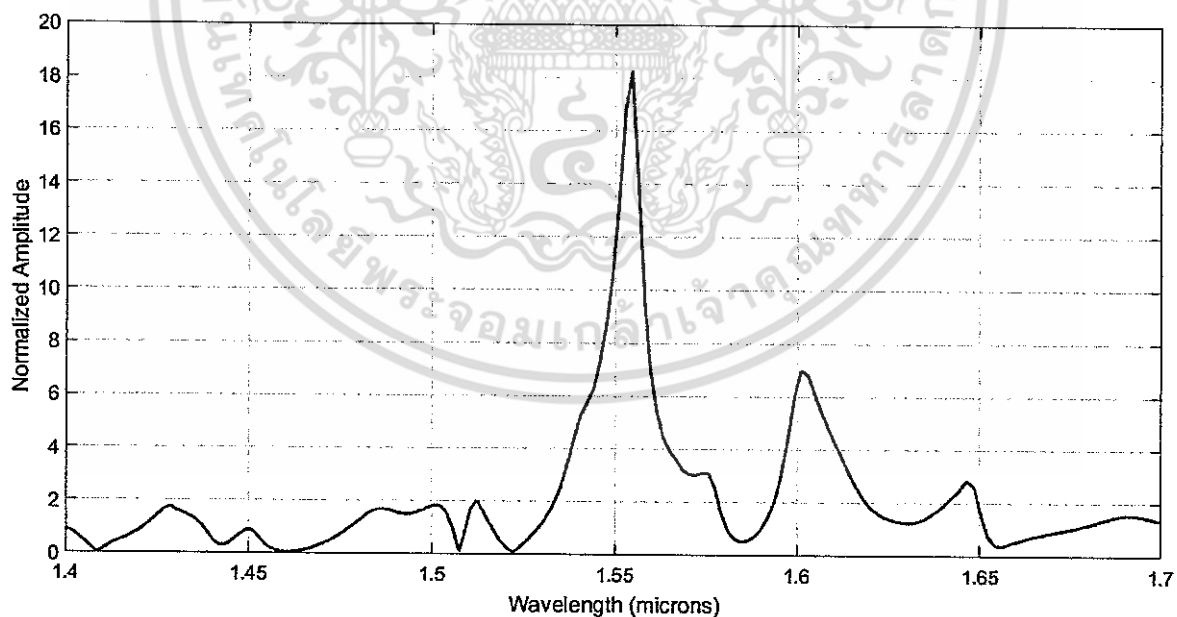
รูปที่ 32 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบแพนด้า รัศมี 1.55 ไมโครเมตร แบบ 2 มิติ

รัศมีวงแหวนกลาง 2 ไมโครเมตร



รูปที่ 33 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสันฟองแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร

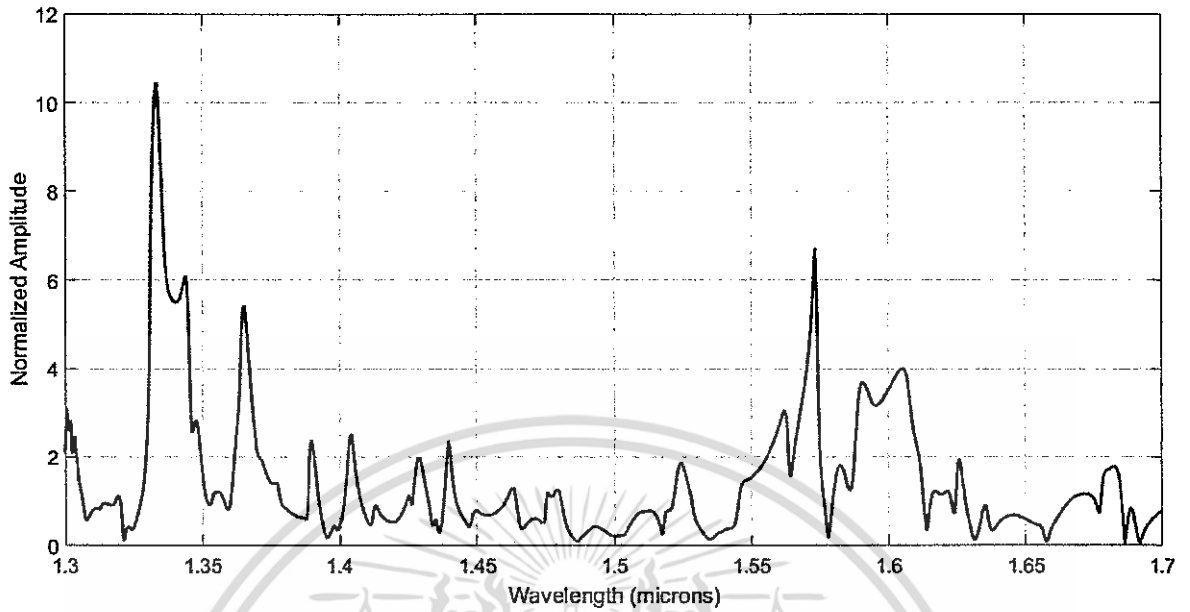
รัศมีวงแหวนกลาง 3 ไมโครเมตร



รูปที่ 34 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสันฟองแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร

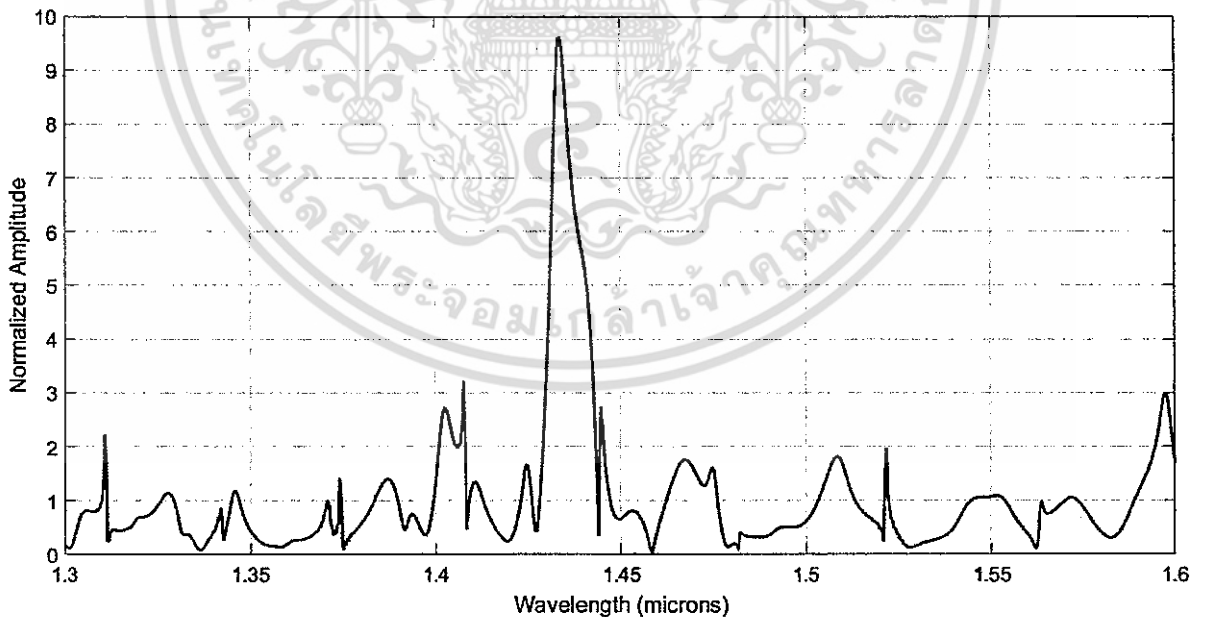
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมีวงแหวนกลาง 4 ไมโครเมตร



รูปที่ 35 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนเส้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 4 ไมโครเมตร

รัศมีวงแหวนกลาง 5 ไมโครเมตร

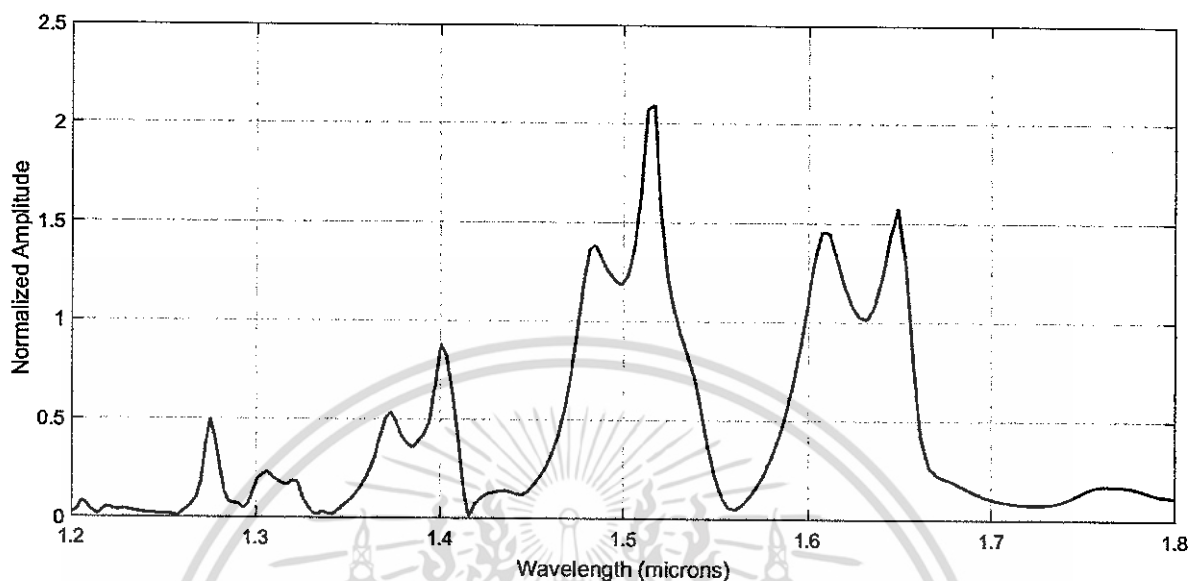


รูปที่ 36 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนเส้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

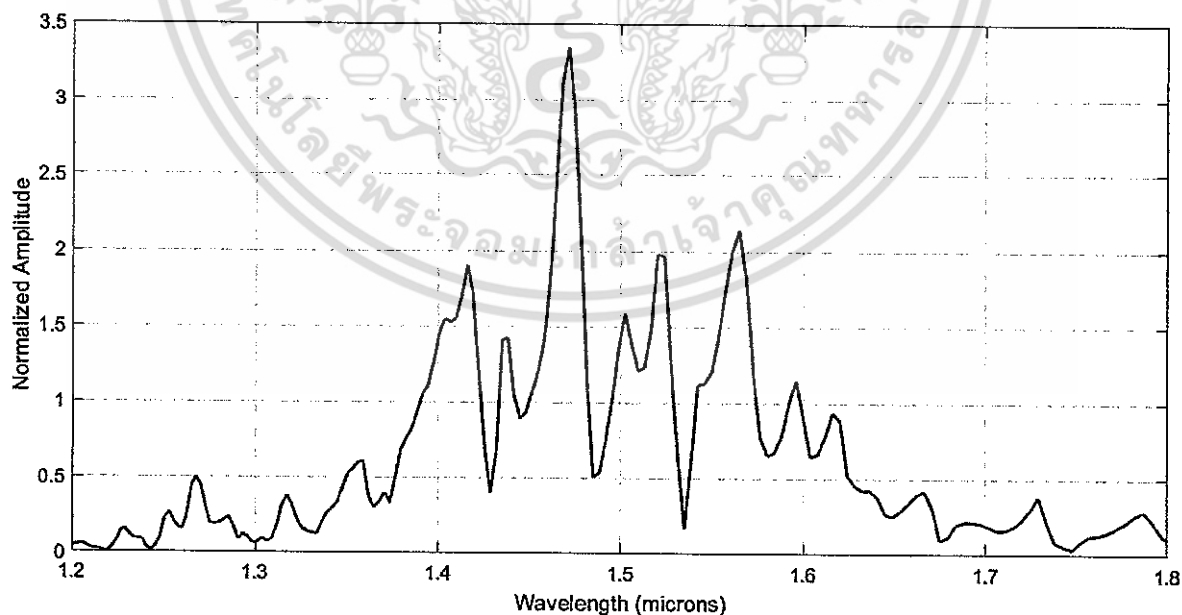
FDTD แบบ 3 มิติ

รัศมี 1.55 ไมโครเมตร



รูปที่ 37 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 1.55 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ

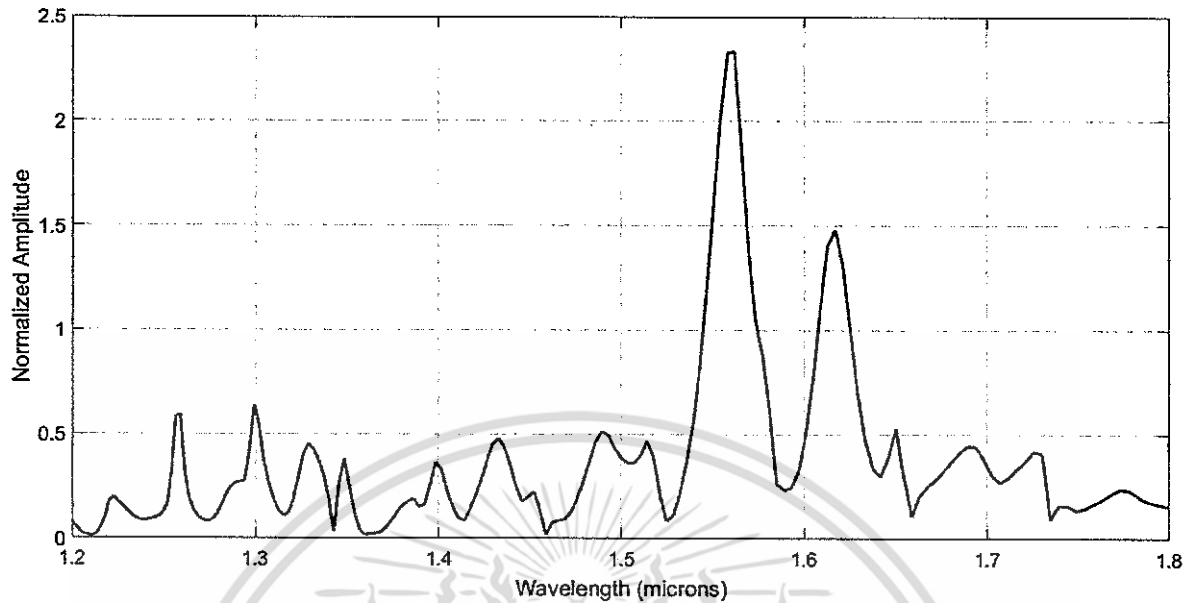
รัศมี 2 ไมโครเมตร



รูปที่ 38 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ

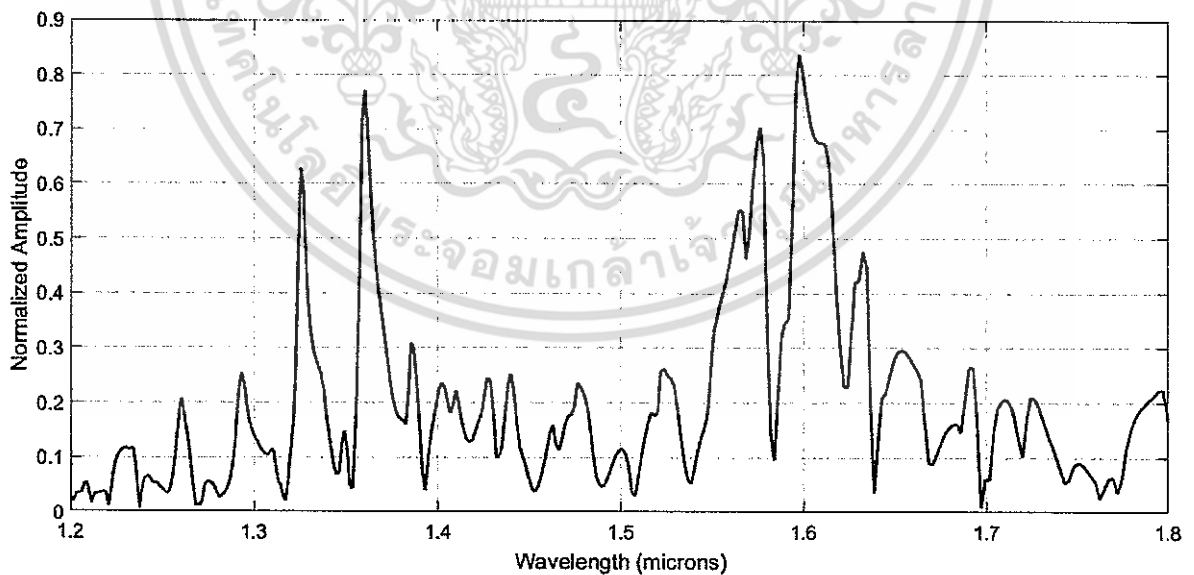
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมี 3 ไมโครเมตร



รูปที่ 39 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ

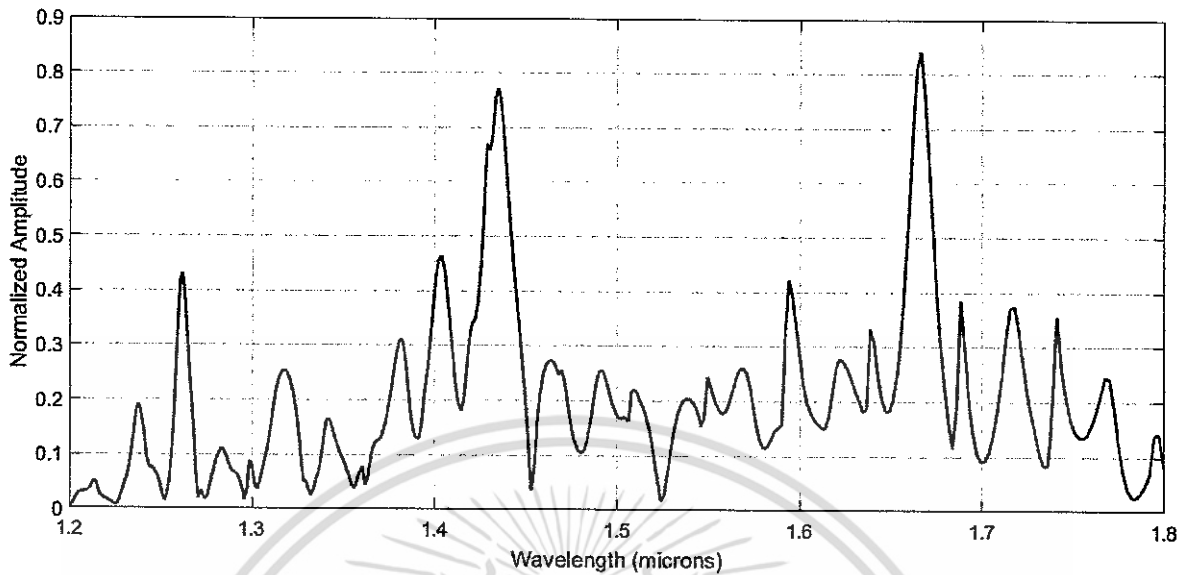
รัศมี 4 ไมโครเมตร



รูปที่ 40 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 4 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รัศมี 5 ไมโครเมตร



รูปที่ 41 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสัมพันธ์แบบแพนด้า รัศมี 5 ไมโครเมตร ด้วยวิธี FDTD แบบ 3 มิติ

รัศมีวงแหวนกลาง (ไมโครเมตร)	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากการคำนวณ (a.u.)	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง 2 มิติ (a.u.)	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติ (a.u.)
1.55	5.90	6.53	2.09
2	13.64	14.70	3.34
3	19.36	18.27	2.33
4	11.23	10.38	0.84
5	9.48	9.62	0.84

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และค่าที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง ณ รัศมีค่าต่าง ๆ

รัศมีวงแหวนกลาง (ไมโครเมตร)	สนามไฟฟ้าเวคฟิลด์ต่ำสุดเมื่อ เกิดพลาสมา (โวลต์ต่อเมตร)	แรงกระทำต่ำสุดภายในวงแหวน (นิวตัน)	
		FDTD 2 มิติ	FDTD 3 มิติ
1.55	4.73×10^{10}	7.65×10^{-9}	7.59×10^{-9}
2	4.73×10^{10}	7.65×10^{-9}	7.60×10^{-9}
3	4.74×10^{10}	7.67×10^{-9}	7.60×10^{-9}
4	4.73×10^{10}	7.64×10^{-9}	7.59×10^{-9}
5	4.73×10^{10}	7.63×10^{-9}	7.59×10^{-9}

ตารางที่ 3 แสดงค่าสนามเวคฟิลด์ต่ำสุด และค่าแรงกระทำต่ำสุดภายในช่องกลางวงแหวน ที่ความดันบรรยากาศ ต่อประจุทดสอบ ณ รัศมีค่าต่าง ๆ

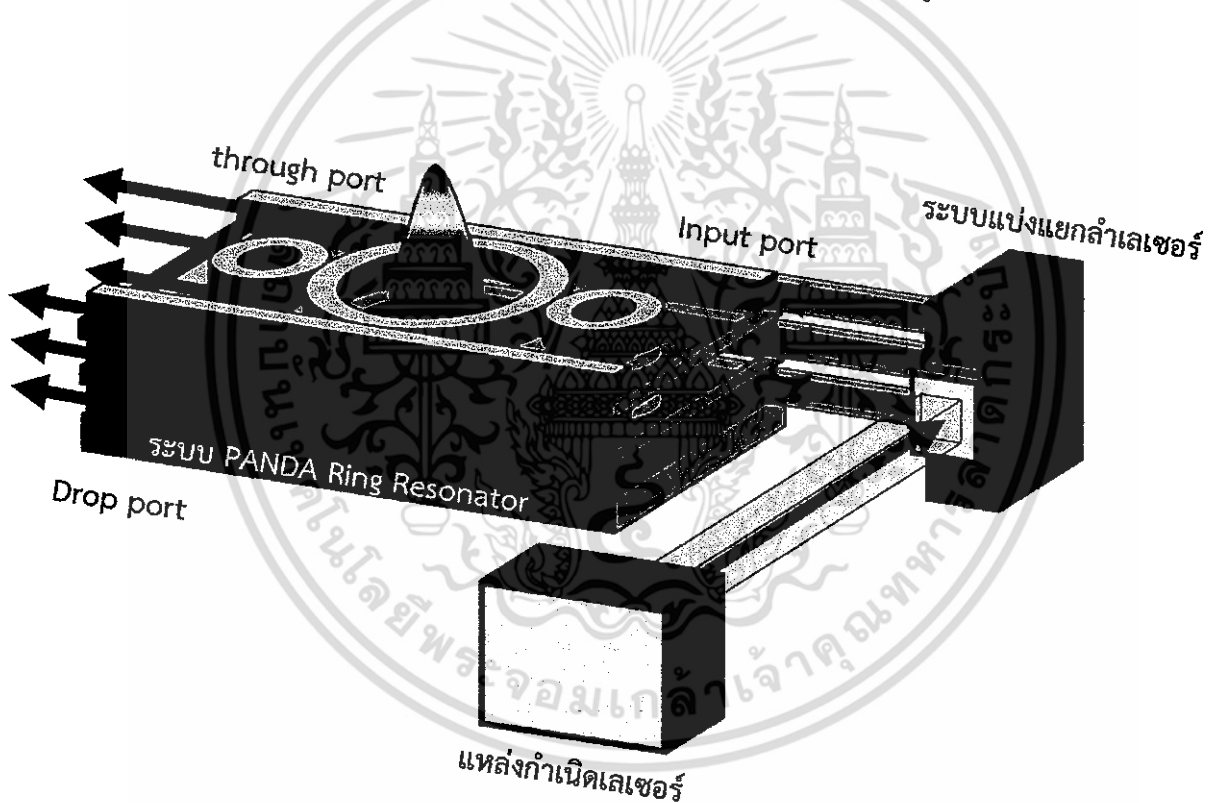
จากตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางของวงแหวนในแต่ละค่ารัศมี เมื่อเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าแบบจำลองที่นำเสนอมีความเชื่อถือได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสนามไฟฟ้ากับค่ารัศมีแล้ว จะพบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงรัศมีน้อยกว่า 3 ไมโครเมตร และมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อมีรัศมีมากกว่า 3 ไมโครเมตร ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นจากรัศมีที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวภายในใจกลางวงแหวนสันฟองแบบแพนด้า ของสนามไฟฟ้ามากขึ้น จึงทำให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่จุดศูนย์กลางลดลง

และในส่วนของผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองรูปแบบ FDTD 3 มิติ จะเห็นได้ว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากรูปแบบ FDTD 2 มิติ เนื่องจากรูปแบบ 3 มิติ มีผลกระทบจากความหนาของท่อนำคลื่นภายในระบบวงแหวนสันฟองแบบแพนด้า ต่างจากรูปแบบ 2 มิติ ที่ถือว่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งมีค่าคงที่ ไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ โดยมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองอยู่ที่รัศมี 2 ไมโครเมตร ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบรูปแบบ 2 มิติ ข้างต้น แต่แนวโน้มการเพิ่มและลดของสนามไฟฟ้า ยังเป็นเช่นเดียวกับการรูปแบบ 2 มิติ

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าสนามเวคฟิลด์ต่ำสุดที่คำนวณได้จากค่ารัศมีต่าง ๆ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องมาจากค่าสนามเวคฟิลด์นั้นจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นพลาสมา เป็นหลัก ซึ่งเปลี่ยนแปลงตาม จำนวนโมเลกุลของอากาศที่แตกตัวเป็นไอออนภายในบริเวณการเร่ง จะมากหรือน้อยอยู่ที่ปริมาตรของบริเวณการเร่งอีกทอดหนึ่งตามลำดับ และในส่วน of ค่าแรงกระทำกับประจุทดสอบจะเห็นว่า มีความแตกต่างกันตามค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการเกิดปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอร์โหมด โดยที่รัศมี 3 ไมโครเมตรนั้นจะให้ค่าแรงกระทำสูงที่สุด

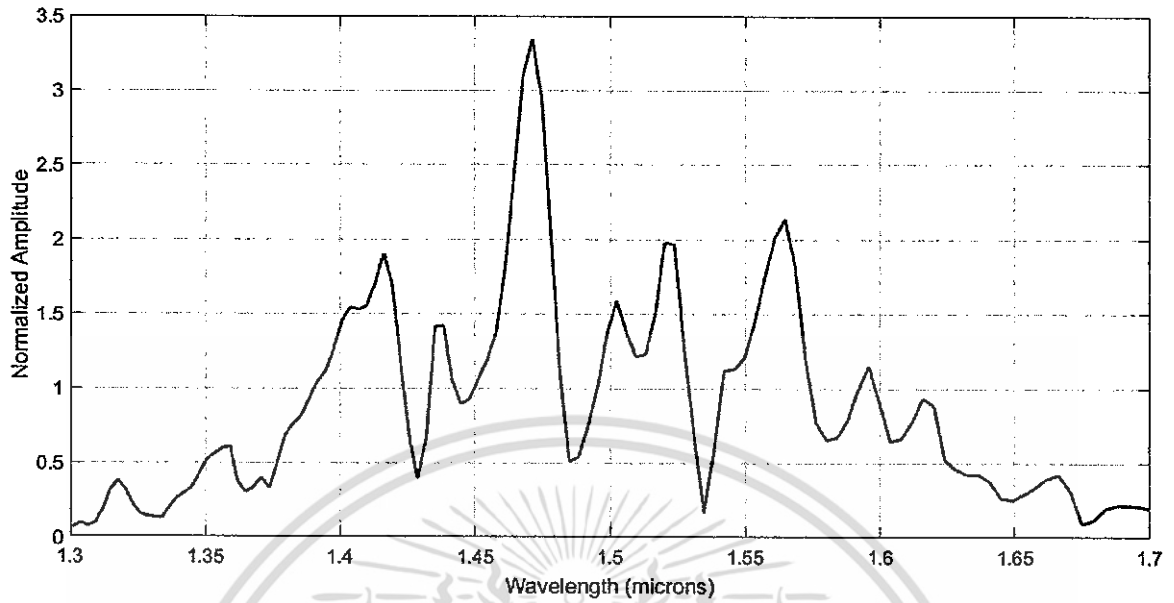
การพิจารณาสัญญาณที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับจำนวนชั้นของระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ทับซ้อนกัน

ในกรณีการทดสอบนี้ จะทำการเปรียบเทียบค่าของสนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมด บริเวณใจกลางของช่องว่างของระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า โดยจะเปรียบเทียบกับจำนวนชั้นของระบบที่ซ้อนกันโดยให้ช่องว่างวงแหวนกลางอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน จะมีการทดสอบกับระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่มีรัศมีวงแหวนกลางเป็น 2 ไมโครเมตรซึ่งให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากหัวข้อที่แล้วในแบบ 3 มิติ ในรูปแบบซ้อนทับกัน 1 ชั้นหรือ ไม่ซ้อนทับกัน, 2 ชั้น, 3 ชั้น, 4 ชั้น, 5 ชั้น จนถึง 10 ชั้นตามลำดับ โดยมีการเว้นระยะระหว่างชั้นเป็น 0.5 ไมโครเมตร โดยมีการเชื่อมต่อเลเซอร์เข้าเข้าไปสู่ช่องสัญญาณในแต่ละชั้นของระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า โดยการแบ่งเลเซอร์เข้าออกตามจำนวนชั้นของระบบด้วยตัวแบ่งสัญญาณ แล้วต่อเข้ากับช่องสัญญาณตามรูปที่ 42 ดังนี้



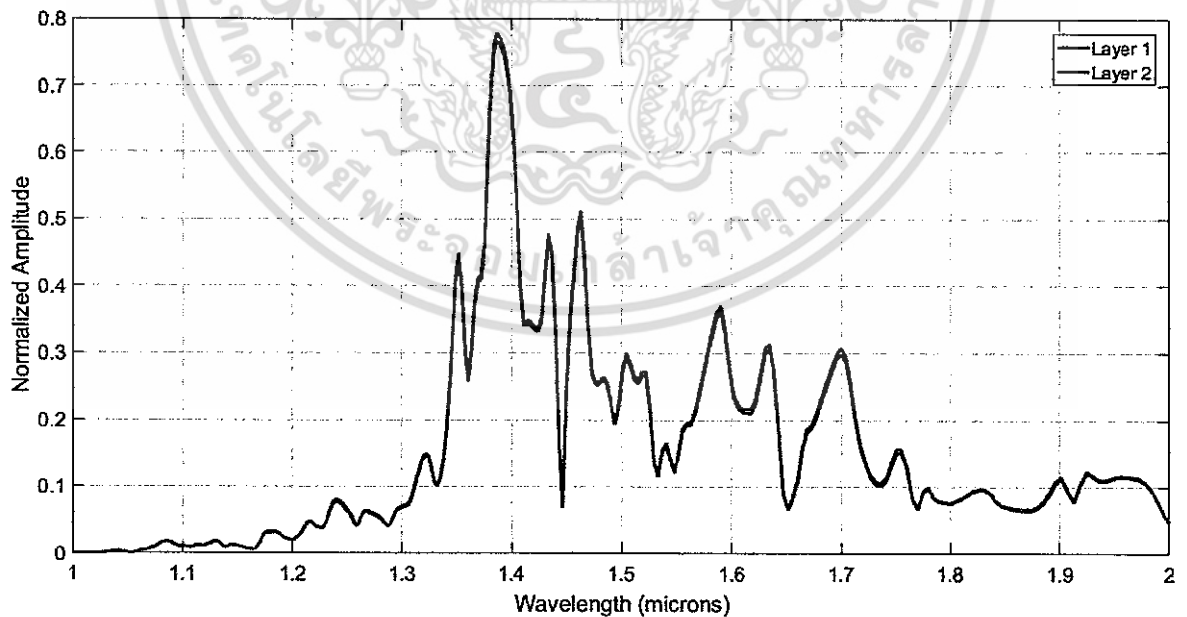
รูปที่ 42 ลักษณะรูปแบบการต่อสัญญาณเลเซอร์เข้า เข้ากับระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า

กรณีไม่ซ้อนทับกัน



รูปที่ 43 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร แบบไม่มีการซ้อนทับ

กรณีซ้อนทับ 2 ชั้น



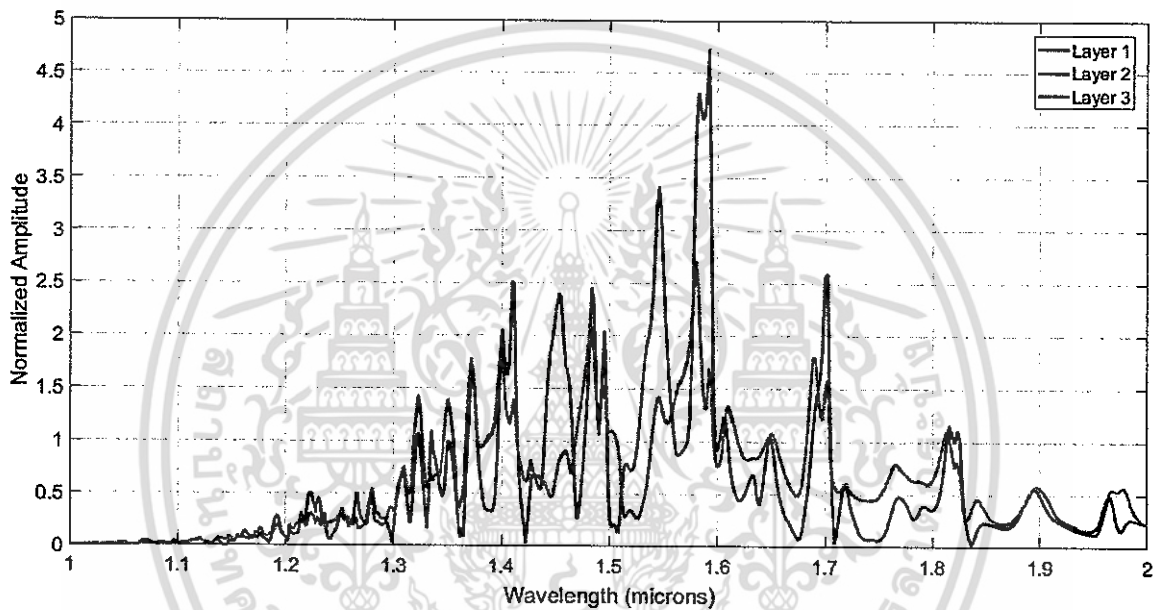
รูปที่ 44 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร ซ้อนทับกัน 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	0.7673
2	0.7787

ตารางที่ 4 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสี่ชั้นพ้องแบบ แพนด้าที่ซ้อนกัน 2 ชั้น

กรณีซ้อนทับกัน 3 ชั้น



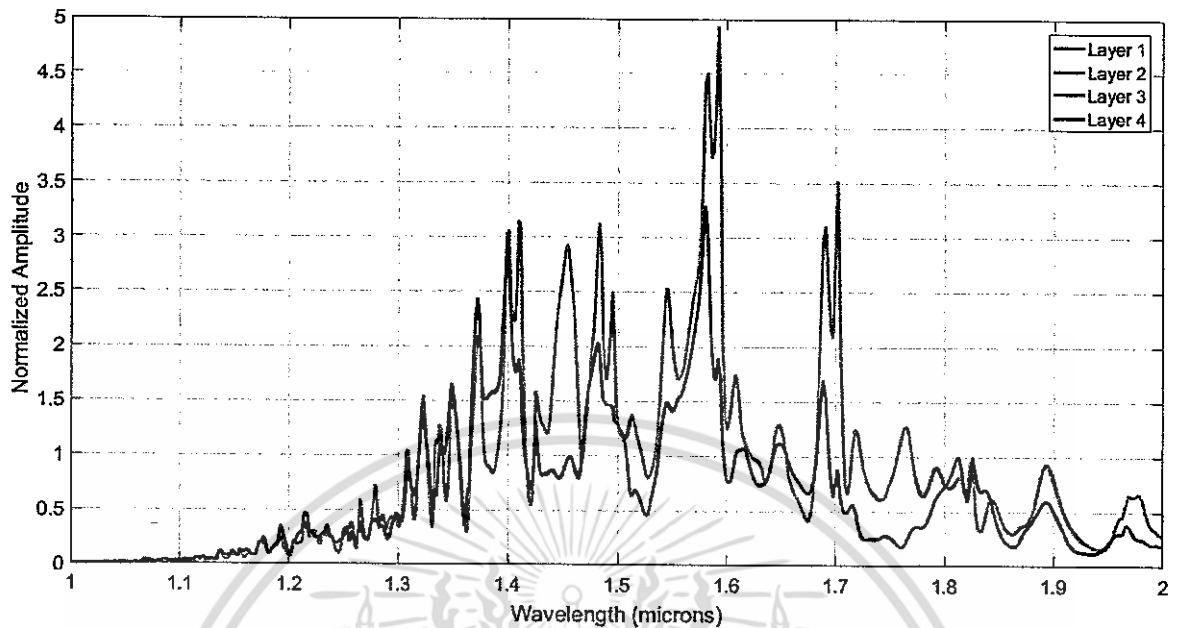
รูปที่ 45 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสี่ชั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 3 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	2.714
2	4.732
3	2.714

ตารางที่ 5 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสี่ชั้นพ้องแบบ แพนด้าที่ซ้อนกัน 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 4 ชั้น



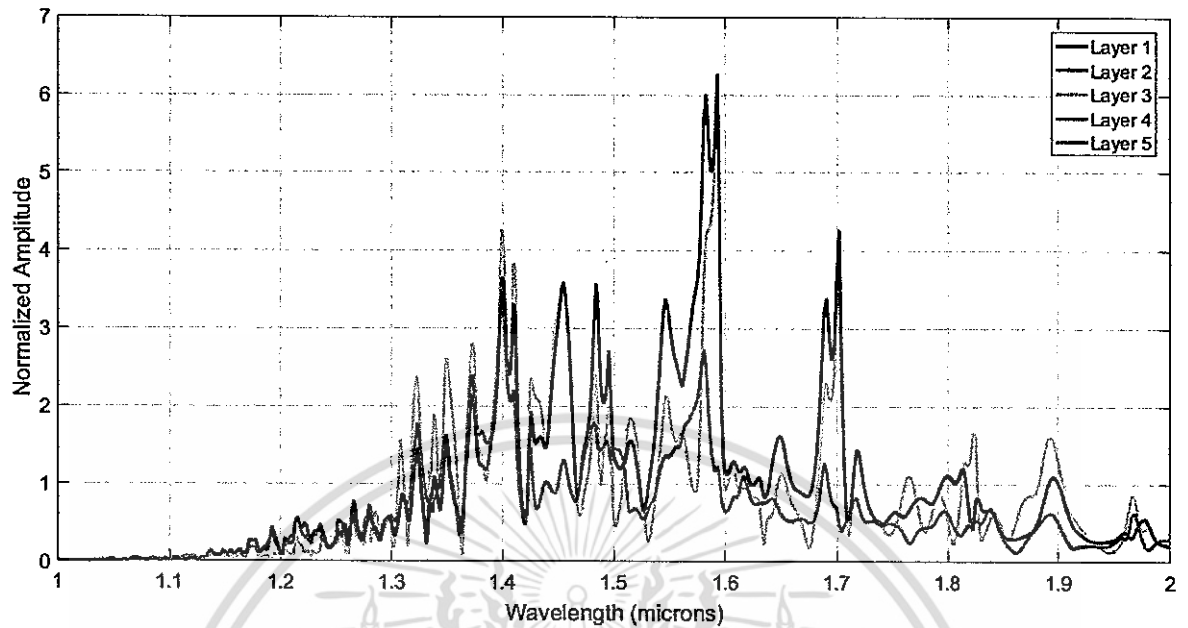
รูปที่ 46 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสี่ชั้นซ้อนแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 4 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.29
2	4.94
3	4.93
4	3.29

ตารางที่ 6 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสี่ชั้นซ้อนแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 4 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 5 ชั้น



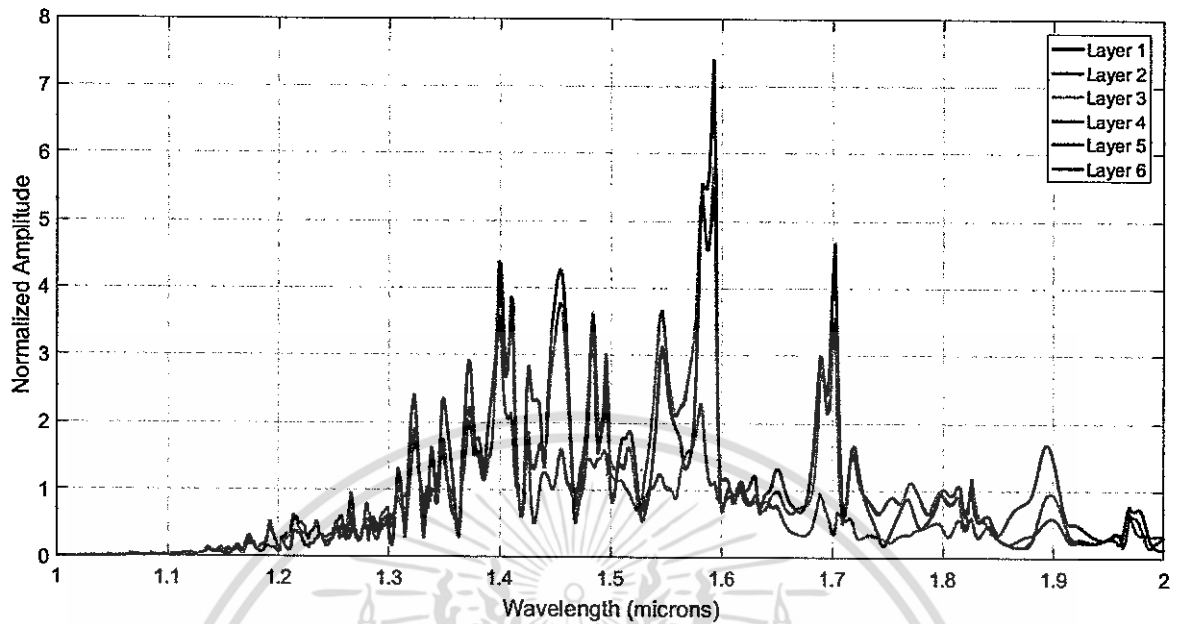
รูปที่ 47 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.52
2	6.27
3	5.97
4	6.27
5	3.53

ตารางที่ 7 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 6 ชั้น



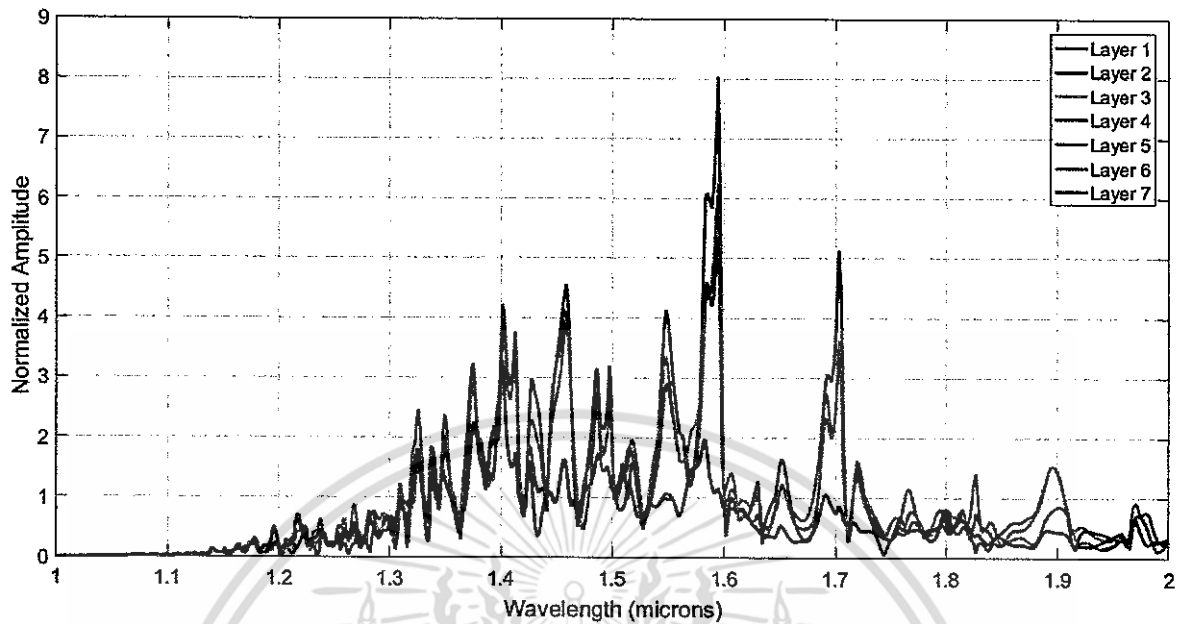
รูปที่ 48 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 6 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.60
2	5.80
3	7.41
4	7.41
5	5.82
6	3.60

ตารางที่ 8 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 6 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 7 ชั้น



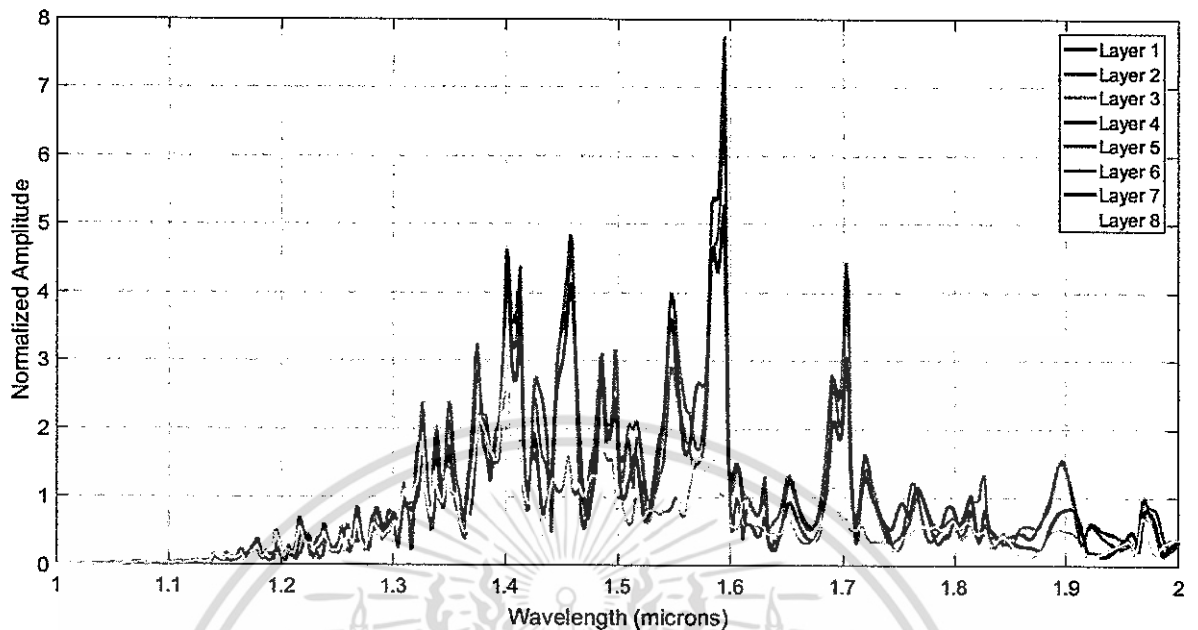
รูปที่ 49 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 7 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.26
2	5.31
3	6.30
4	8.03
5	8.31
6	5.36
7	3.28

ตารางที่ 9 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 7 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 8 ชั้น



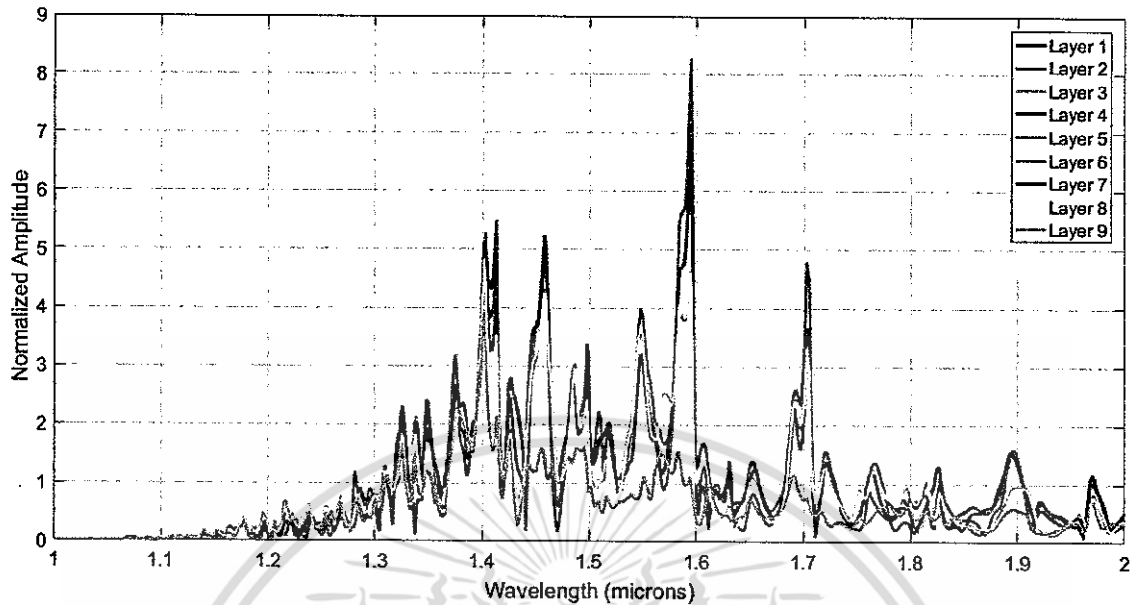
รูปที่ 50 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 8 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.43
2	5.29
3	6.72
4	7.72
5	7.74
6	6.74
7	5.30
8	3.47

ตารางที่ 10 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 8 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 9 ชั้น



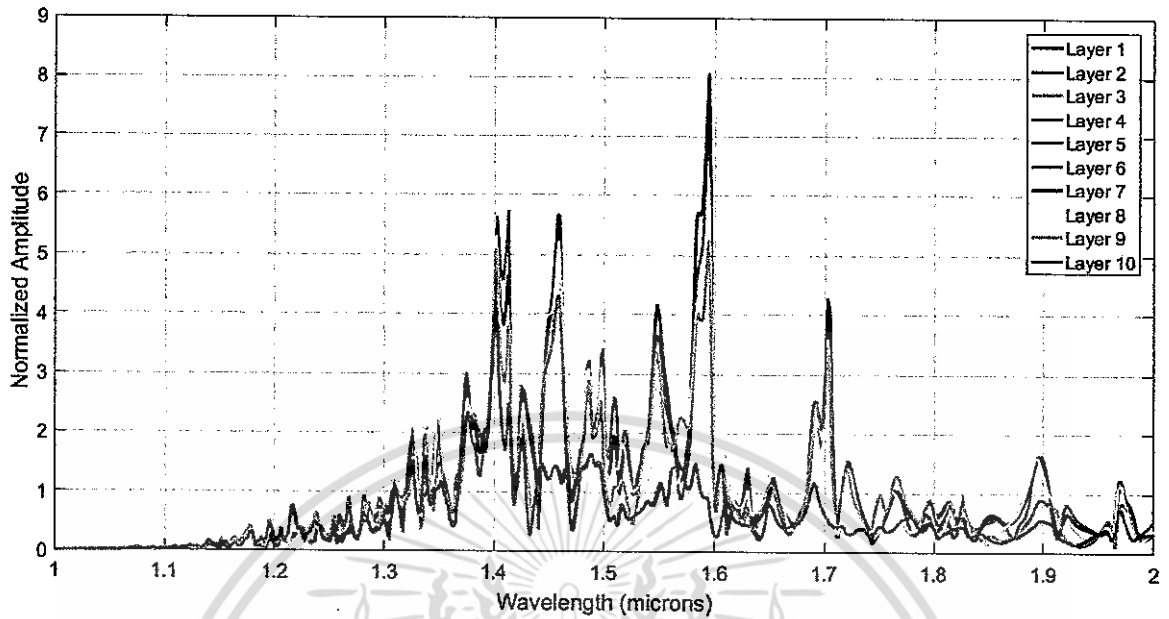
รูปที่ 51 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนซ้อนแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 9 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	3.88
2	4.84
3	6.57
4	8.25
5	7.15
6	8.29
7	6.56
8	4.84
9	3.93

ตารางที่ 11 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนซ้อนแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน 9 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีซ้อนทับ 10 ชั้น



รูปที่ 52 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้า รัศมี 2 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 10 ชั้น

จำนวนชั้นที่ซ้อนทับ	ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจากแบบจำลอง (a.u.)
1	4.16
2	5.26
3	6.35
4	8.08
5	7.72
6	7.73
7	8.08
8	6.34
9	5.27
10	4.22

ตารางที่ 12 แสดงค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางในแต่ละชั้น ของระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแพนด้าที่ซ้อนกัน 10 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนชั้นที่ ซ้อนทับกัน	สนามไฟฟ้าเวคฟิลด์ต่ำสุดเมื่อเกิดพลาสมา (โวลต์ต่อเมตร)	แรงกระทำต่อประจุทดสอบต่ำสุดภายในวง แหวน (นิวตัน)
1	4.73×10^{10}	7.60×10^{-9}
2	4.73×10^{10}	7.59×10^{-9}
3	4.73×10^{10}	7.63×10^{-9}
4	4.73×10^{10}	7.66×10^{-9}
5	4.73×10^{10}	7.70×10^{-9}
6	4.73×10^{10}	7.74×10^{-9}
7	4.73×10^{10}	7.77×10^{-9}
8	4.73×10^{10}	7.80×10^{-9}
9	4.73×10^{10}	7.84×10^{-9}
10	4.73×10^{10}	7.88×10^{-9}

ตารางที่ 13 แสดงค่าสนามเวคฟิลด์ต่ำสุด และค่าแรงกระทำต่อประจุทดสอบต่ำสุดภายในช่องกลางวงแหวน เปรียบเทียบกับจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกัน

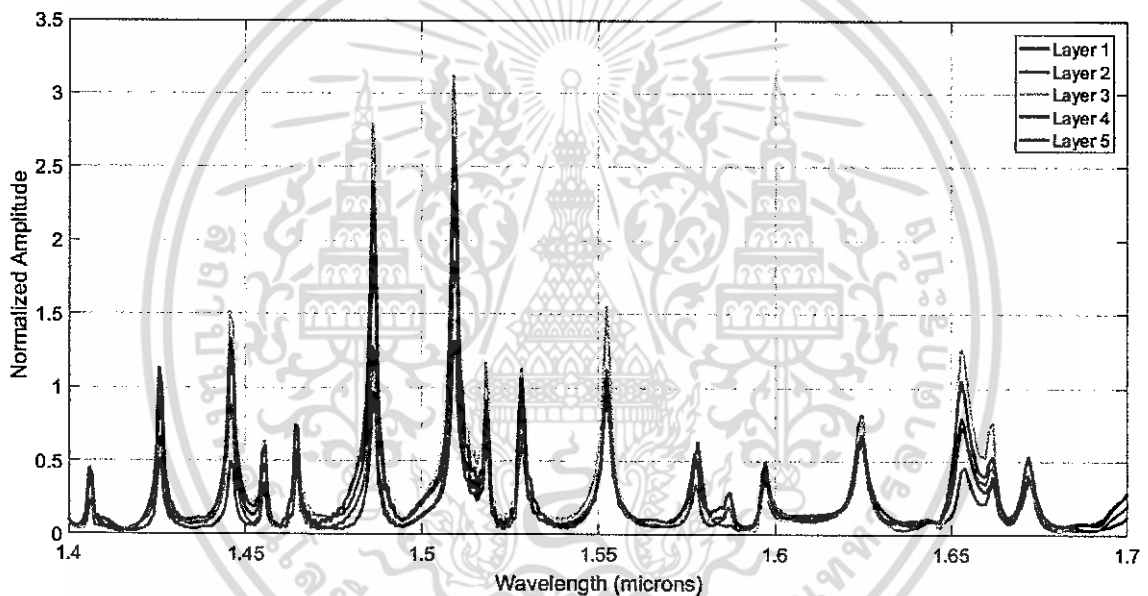
จากรูปที่ 43 -52 และจากตารางที่ 4 -13 จะสามารถสังเกตได้ว่าจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันมีผลกับค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณใจกลางระบบวงแหวนสั้นพ้อง โดยเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีข้อสังเกตว่าสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นสูงสุดบริเวณชั้นที่อยู่กึ่งกลางของระบบ เนื่องจากมีการเสริมความเข้มของสนามไฟฟ้าจากชั้นบนและชั้นล่างของระบบ

จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่าสนามเวคฟิลด์ที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนชั้น แต่จะมีผลกับแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับประจุทดสอบ เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหมดที่มีการเพิ่มขึ้นจากการทับซ้อนกันในแต่ละชั้นของระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้า โดยยังมีจำนวนชั้นในการซ้อนมากขึ้นค่าแรงกระทำที่ได้ก็จะมากขึ้น

การพิจารณาสัญญาณที่ใจกลางวงแหวนเมื่อเทียบกับเฟสของสัญญาณขาเข้าในแต่ละชั้นของระบบวงแหวนสั้นพ้อง

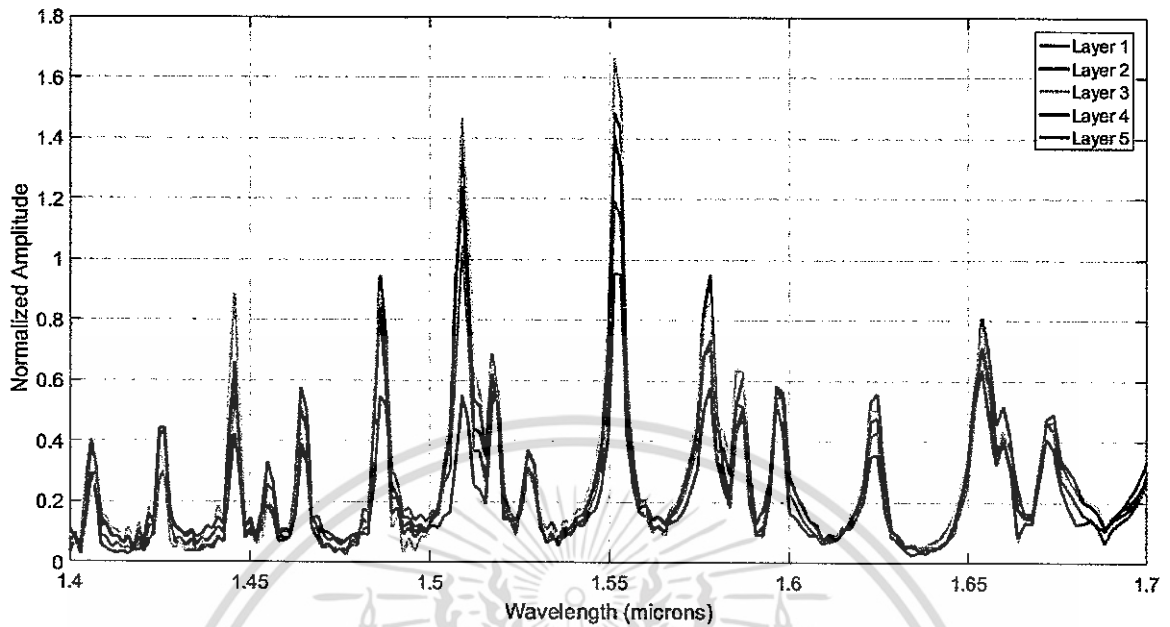
ในส่วนนี้จะทำการพิจารณาลักษณะสัญญาณสนามไฟฟ้าที่ใจกลางของวงแหวนสั้นพ้องแบนด์ เมื่อพิจารณาลักษณะของเฟสเริ่มต้นของสัญญาณขาเข้า เป็นการจำลองระบบที่เลเซอร์ขาเข้าไม่ได้มีเฟสเดียวกันทุกช่องสัญญาณ อันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของการสร้างระบบ โดยจะพิจารณาในกรณีที่เฟสตรงกัน เฟสตรงข้ามกัน และเฟสเลื่อนไปขึ้นละ 45 องศา บนระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแบนด์ที่ซ้อนทับกัน 5 ชั้น รัศมีวงแหวนกลาง 3 ไมโครเมตร โดยจะได้ผลการทดสอบแบบจำลองดังนี้

กรณีเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าในแต่ละชั้นตรงกัน



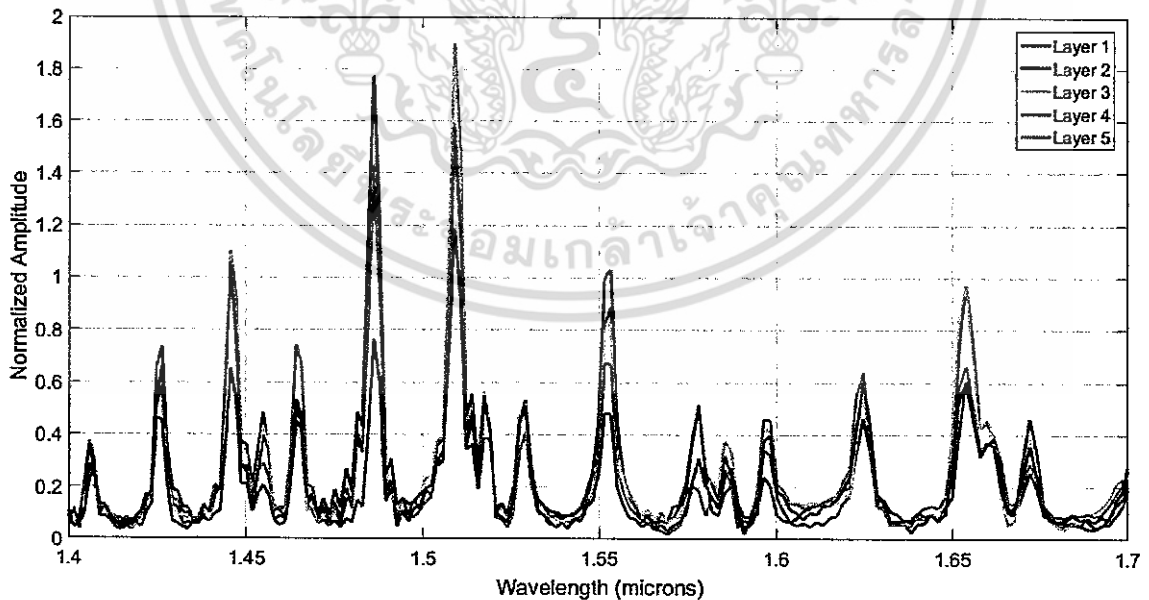
รูปที่ 53 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั้นพ้องแบบแบนด์ รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าตรงกัน

กรณีเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าในแต่ละชั้นตรงข้ามกัน



รูปที่ 54 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าตรงข้ามกัน

กรณีเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าในแต่ละชั้นเลื่อนไปชั้นละ 45 องศา



รูปที่ 55 ลักษณะรูปสัญญาณของคลื่นที่บริเวณใจกลางวงแหวนสั่นพ้องแบบแพนด้า รัศมี 3 ไมโครเมตร มีการซ้อนทับ 5 ชั้น โดยเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าแต่ละชั้นเลื่อนไปชั้นละ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเฟสเริ่มต้นของคลื่นขาเข้าในแต่ละชั้น	แรงกระทำทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในวงแหวน (นิวตัน)
ตรงกัน	7.63×10^{-9}
ตรงกันข้ามกัน	7.61×10^{-9}
เลื่อน 45 องศา	7.62×10^{-9}

ตารางที่ 14 แสดงค่าแรงกระทำทั้งหมดภายในช่องกลางวงแหวน เปรียบเทียบกับเฟสเริ่มต้นของสัญญาณขาเข้า ของระบบวงแหวนสี่ห้องแบบแผนคาร์คิมิงแหวนกลาง 3 ไมโครเมตร ซ้อนทับกัน 5 ชั้น

จากรูปที่ 20-22 แสดงถึงลักษณะสัญญาณสนามไฟฟ้าบริเวณใจกลางวงแหวนสี่ห้อง เมื่อเฟสเริ่มต้นมีลักษณะต่าง ๆ กัน โดยพิจารณา 3 กรณีคือ เฟสตรงกัน เฟสตรงข้ามกัน และเฟสเลื่อนไป 45 องศา ในแต่ละชั้น โดยจะเห็นว่ากรณีเฟสตรงข้ามกันในแต่ละชั้น จะมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจาก เกิดการหักล้างสนามไฟฟ้ากันระหว่างชั้นของระบบ ต่างจากกรณีเฟสตรงกันที่จะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้าระหว่างชั้น จึงทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่ากรณี เฟสตรงข้ามประมาณ 2 เท่า และมีค่าสูงสุดบริเวณชั้นที่อยู่ตอนกลางของระบบ ส่วนกรณีเฟสเลื่อนกันชั้นละ 45 องศา จะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้าเช่นกัน แต่จุดที่สนามไฟฟ้าสูงสุด จะเลื่อนไปอยู่ที่ลำดับชั้นตอนบนแทนกึ่งกลางของระบบแทน

และจากตารางที่ 10 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เฟสตรงกันจะให้ค่าแรงกระทำต่อประจุทดสอบที่สูงที่สุด รองลงมาคือเฟสเลื่อนไป 45 องศา และเฟสตรงข้ามให้ค่าแรงกระทำต่ำสุด เนื่องจากกรณีเฟสตรงกันจะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้าอย่างเต็มที่ ทำให้มีแรงสูงสุด ตรงกันข้ามกับกรณีเฟสตรงข้าม ที่มีการหักล้างกันของสนามไฟฟ้า ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำกับประจุทดสอบมีค่าน้อยกว่า ส่วนกรณีเฟสเลื่อนไป 45 องศา ถึงแม้ว่าจะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้า แต่มีค่าการเสริมน้อยกว่าเฟสตรงกัน

วิเคราะห์ผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดสอบแบบจำลอง

จากเนื้อหาในบทที่ผ่านมา ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการใช้ชุดระบบวงแหวนสั้นพ้องแบบแพนด้าที่ซ้อนทับกัน เป็นส่วนประกอบหลักในการเร่งอนุภาคโดยใช้หลักการเร่งพลาสมาโดยการป้อนเลเซอร์แบบลูกคลื่นสั้นๆ เป็นต้นกำเนิดพลังงาน และใช้ปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมดเพื่อขยายขนาดความเข้มของเลเซอร์ให้สูงขึ้น เพื่อให้ทำให้อากาศที่ความดันบรรยากาศภายในเริ่มแตกตัวเป็นไอออน และแสดงคุณสมบัติของพลาสมา เมื่อนำอนุภาคประจุป้อนเข้าสู่พลาสมา จะทำให้พลาสมาเกิดการเปลี่ยนแปลง สร้างสนามเวคฟิลด์เพื่อขับเคลื่อนอนุภาคไปด้วยความเร่ง ตามลำดับ

ผลการทดสอบแบบจำลองโดยใช้แหล่งกำเนิดเป็นเลเซอร์ไฟเบอร์ที่กำลัง 1 วัตต์ ความยาวคลื่นกลาง 1.55 ไมโครเมตร เมื่อทำการยิงเข้าไปในท่อนำคลื่นที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.3×1 ไมโครเมตรพบว่า ค่าสนามไฟฟ้าที่ถูกบีบอัดให้อยู่ในท่อนำคลื่นนี้มีขนาด 2.97×10^7 โวลต์ต่อเมตร ซึ่งมากกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ของอากาศทำให้อากาศแตกตัวเป็นพลาสมาได้ เมื่อมีอนุภาคประจุทดสอบวิ่งเข้าสู่ระบบวงแหวนแพนด้าที่เกิดพลาสมาบริเวณรูวงแหวนกลาง จะเกิดอันตรกิริยากับพลาสมาเกิดสนามเวคฟิลด์ล้อมรอบอนุภาคประจุนั้นไว้ จากนั้นเกิดแรงขับเคลื่อนอนุภาคนั้นออกไปในทิศทางเดิมของการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความเร่งกับอนุภาคประจุทดสอบ

การเปรียบเทียบค่าแรงกระทำที่ทำกับประจุทดสอบเมื่อเทียบกับรัศมีของวงแหวนกลวงนั้น ค่ารัศมีที่ให้แรงกระทำสูงสุดคือ 3 ไมโครเมตร โดยแนวโน้มของแรงกระทำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่ารัศมีน้อยกว่า 3 ไมโครเมตรและค่าแรงกระทำจะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อมีค่ารัศมีมากกว่า 3 ไมโครเมตร ซึ่งสาเหตุมาจากการที่รัศมีเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นของพลาสมามีค่าลดลง ทำให้ค่าสนามเวคฟิลด์ที่ได้มีค่าลดลงด้วย เนื่องจากค่าสนามเวคฟิลด์จะขึ้นกับความหนาแน่นของพลาสมาเท่านั้น และค่าสนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมด มีค่าสูงสุดที่ค่ารัศมี 3 ไมโครเมตรเช่นกัน

เมื่อทำการทดสอบระบบด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลารูปแบบ 3 มิติค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดที่รัศมี 2 ไมโครเมตร และแนวโน้มของแรงกระทำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่ารัศมีน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร และลดลงเมื่อรัศมีมากกว่า 2 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับรูปแบบ 2 มิติ

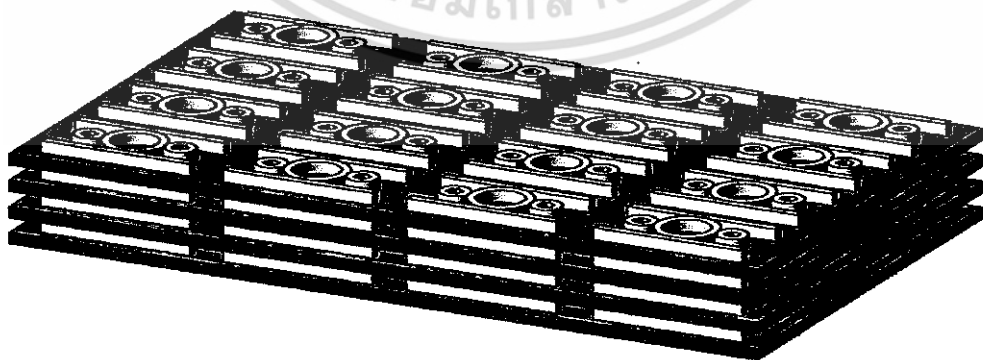
และการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำที่ทำกับประจุทดสอบโดยเทียบกับจำนวนชั้นที่นำระบบมาทับซ้อนกัน จะพบว่าจะมีแรงกระทำรวมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนชั้นที่มากขึ้น เพราะมีแรงกระทำที่มาจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริงเกลเลอรีโหมดมีมากขึ้นตามจำนวนชั้น

ในส่วนการเปรียบเทียบลักษณะของเฟสแหล่งกำเนิด โดยมีการเปรียบเทียบลักษณะเฟสแบบตรงกัน ตรงกันข้ามกัน และเลื่อนขึ้นชั้นละ 45 องศา ผลการทดสอบพบว่า ลักษณะเฟสของเลเซอร์แหล่งกำเนิดที่ตรงกันทั้งหมดจะให้ค่าแรงกระทำที่มากที่สุดเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์วิสเปอร์ริง แกลเลอรีโหนดมีค่าสูงสุดเนื่องมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นอย่างเต็มที่ และรูปแบบเฟสที่ตรงกันข้ามกันจะมีค่าต่ำสุด โดยมีค่าสูงสุดเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของรูปแบบเฟสตรงกันเท่านั้น เพราะมีการหักล้างกันเองของสนามไฟฟ้าจาก วิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหนดทำให้ค่าที่ได้ลดลง และ รูปแบบเฟสที่เลื่อนไปชั้นละ 45 องศา แรงกระทำที่ได้มีค่ามากกว่ารูปแบบเฟสตรงกันข้าม แต่มีค่าน้อยกว่ารูปแบบเฟสตรงกัน เพราะถึงจะมีการเสริมกันของสนามไฟฟ้าวิสเปอร์ริงแกลเลอรีโหนดคล้ายกับรูปแบบเฟสตรงกัน แต่การเสริมกันเกิดขึ้นได้มีค่าไม่มากเท่ากับรูปแบบเฟสตรงกัน และมีการหักล้างกันบางส่วนของสนามไฟฟ้าด้วย

แรงกระทำต่ำสุดที่ได้จากระบบวงแหวนสี่ฟองแบบแพนด้านี้จะอยู่ที่ย่านนาโนนิวตัน และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ย่านไมโครนิวตันต่อระบบวงแหวนแพนด้า 1 หน่วย ซึ่งมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการเร่งอนุภาคแบบอื่นๆ แต่จากคุณสมบัติการเพิ่มแรงกระทำด้วยการเพิ่มจำนวนชั้นที่ซ้อนทับกันและตัวระบบที่มีขนาดที่เล็กมากในระดับไมโครเมตร จึงสามารถซ้อนทับกันได้ โดยถ้าซ้อนทับกัน 10000 ชั้น จะมีขนาดของระบบเพียงแค่ 1.5 เซนติเมตรเท่านั้น แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ในย่านของมิลลินิวตัน ซึ่งมีค่าที่สูงเทียบเท่ากับระบบการเร่งอนุภาคขนาดเล็กรูปแบบอื่นๆ ดังนั้นระบบการเร่งอนุภาคที่น่าเสนอนี้ มีความเป็นไปได้ในการสร้างขึ้นเพื่อใช้งานจริงได้

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายลักษณะโดยการต่อยอดของระบบวงแหวนสี่ฟองแบบแพนด้าในทั้งแนวนอนและแนวตั้งเพื่อเพิ่มความเร่งรวมของทั้งระบบตามดังรูปที่ 44 เช่น การใช้เป็นระบบขับเคลื่อนขนาดเล็ก จะมีการใช้เชื้อเพลิงเป็นโมเลกุลของก๊าซเฉื่อย ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งาน ในปัจจุบันมีการใช้ก๊าซนีออน (Ne), อาร์กอน (Ar) และซีนอน (Xe) เป็นต้น



รูปที่ 56 แสดงโครงสร้างระบบวงแหวนสี่ฟองแบบแพนด้าที่นำมาจัดวางรวมกันเป็นระบบทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะปลอดภัยในการใช้งาน โดยปล่อยก๊าซผ่านรูช่องกลางวงแหวนสันพ้องแบบแพนด้า ในแต่ละหน่วย แรงขับเคลื่อนที่ได้จะมาจากการรวมแรงขับเคลื่อนทั้งหมดทุกหน่วยในระบบ

จากคุณสมบัติในการเร่งอนุภาคที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ในการปลูกวัสดุลงบนฟิล์มบาง โดยใช้เป็นตัวส่งผ่านอนุภาคที่เราต้องการไปยัง บริเวณที่ต้องการบนฟิล์มบางได้อย่างแม่นยำ เพราะระบบมีขนาดเล็ก สามารถควบคุมปริมาณ และทิศทางการปลูกวัสดุได้ดี ซึ่งจะเป็นส่วนที่จะทำการวิจัยในลำดับต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson , Laser Electron Accelerator , *Phys. Rev. Lett.* , vol. 43 , pp. 267–270 , 1979
- [2] Blumenfeld et al. , Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator. *Nature* , vol. 445 , pp. 741–744 , 2007.
- [3] C. Joshi, W. B. Mori, T. Katsouleas, J. M. Dawson, J. M. Kindel, D. W. Forslund. , Ultrahigh gradient particle acceleration by intense laser-driven plasma density waves. , *Nature* , vol. 311, pp. 525–529 , 1984
- [4] AMIRI I. S. , AFROOZEH A. , BAHADORAN M. , Simulation and analysis of multisoliton generation using a PANDA ring resonator system. , *Chinese Physics Letters* , vol. 28. ,2011
- [5] Amiri, I. S., Ranjbar, M., Nikoukar, A., Shahidinejad, A., Ali, J., & Yupapin, P. P. , Multi optical Soliton generated by PANDA ring resonator for secure network communication. In *Computer and Communication Engineering (ICCCCE), International Conference on IEEE* , pp. 760-764 , 2012
- [6] Uomwech, K., Sarapat, K., & Yupapin, P. P. , Dynamic modulated Gaussian pulse propagation within the double PANDA ring resonator system. , *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, pp. 1818-1821 , 2010
- [7] Thammawongsa, N. , Moongfangklang, N. , Mitatha, S. , & Yupapin, P. P. , Novel nano-antenna system design using photonic spin in a PANDA ring resonator. , *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 31, pp. 75-87, 2012
- [8] Sirawattananon, C., Bahadoran, M., Ali, J., Mitatha, S., & Yupapin, P. P. , Analytical Vernier effects of a PANDA ring resonator for microforce sensing application. , *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 11, pp. 707-712. , 2012
- [9] AMIRI I. S. , NIKOUKAR A. , ALI J. , GHz frequency band soliton generation using integrated ring resonator for WIMAX optical communication. , *Optical and Quantum Electronics*, vol.46 , pp. 1165-1177 , 2014

- [10] Lord Rayleigh, *Theory of Sound*, vol. II, 1st edition, (London, MacMillan), 1878
- [11] Lord Rayleigh, *Philos. Mag.* 27, 100, 1914
- [12] R Siriroj, N Thammawongsa, PP Yupapin, Micro Energy Source Using WGMs of Wave in Small Scale Optical Device, *Energy Procedia*, Volume 34, pp. 1-8, 2013
- [13] C. Tanaram · P. Phatharacorn · S. Chiangga · P. P. Yupapin , Analytical and simulation results of micro-ring resonator system using two eyes imaging model , *International Journal of Scientific World*, vol. 3 , pp. 227-238 , 2015
- [14] R. Siriroj, K. Srinuanjan, P.P. Yupapin, Micro Plasma Source Design Using WGMs a PANDA Ring , *Advanced Materials Research*, Vol. 979, pp. 3-6, 2014
- [15] McCall, S. L., et al. , Whispering-gallery mode microdisk lasers. , *Applied physics letters* , vol. 60 , pp. 289-291 , 1992
- [16] MATSKO, Andrey B.; ILCHENKO, Vladimir S. Optical resonators with whispering gallery modes I: basics., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 2006, vol. 12 , pp. 3-14
- [17] J. Heebner, R. Grover, and T. Ibrahim, *Optical Microresonators: Theory, Fabrication and Applications*, 1st edition., *Springer Series in Optical Sciences*, 2008
- [18] A generalized approach for modeling and analysis of ring-resonator performance as optical filter, Sanjoy Mandal, Kamal Dasgupta, T.K. Basak, S.K. Ghosh, *Optics Communications* Volume 264, Issue 1, 1 August 2006, pp. 97–104
- [19] Critically coupled ring resonators for add-drop filtering, Christopher J Kaalund, *Optics Communications*, Volume 237, Issues 4–6, 15 July 2004, pp. 357–362
- [20] Ashkin A., Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Phys. Rev. Lett.* , vol. 24 (4), pp. 156–159, 1970.
- [21] Humphries, Stanley, *Principles of Charged Particle Acceleration*. *Wiley-Interscience.* , 1986.
- [22] Chao, A. , W. Mess, K. H. Tigner, M. et al., *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* 2nd ed. , *World Scientific*, 2013

- [23] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, Experiments with High Velocity Positive Ions.(I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 136, pp. 619–630, 1932
- [24] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, *Experiments with High Velocity Positive Ions. II. The Disintegration of Elements by High Velocity Protons*, *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 137, pp. 229–242, 1932
- [25] Lawrence, E. O. Method and apparatus for the acceleration of ions US patent 1948384 issued 1934-02-20
- [26] Veksler, V. I. . A new method of accelerating relativistic particles, *Comptes Rendus (Doklady) de l'Academie Sciences de l'URSS*, vol. 43 , pp. 329–331 ,1944
- [27] R. J. Van de Graaff, K. T. Compton, and L. C. Van Atta, *Phys. Rev.* , vol. 43, page 149 , 1933
- [28] D. W. Kerst , The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction , *Phys. Rev.* , vol. 60 , page 47 , 1941
- [29] D. W. Kerst and R. Serber , Electronic Orbits in the Induction Accelerator , *Phys. Rev.* , vol. 60 , page 53 , 1941
- [30] Ising, Gustav , Prinzip Einer Methode Zur Herstellung Von Kanalstrahlen Hoher Voltzahl , *Arkiv för Matematik , Astronomi och Fysik* , vol. 18 , 1928
- [31] M Moisan, Z Zakrzewski and R Pantel , The theory and characteristics of an efficient surface wave launcher (surfatron) producing long plasma columns , *J. Phys. D: Appl. Phys.* , vol. 12 , page 219
- [32] K. S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302–307, 1966
- [33] John B. Schneider, Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method, www.eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd, 2010.
- [34] Jianming Dai, Xu Xie, and X.-C. Zhang , Detection of Broadband Terahertz Waves with a Laser-Induced Plasma in Gases , *Phys. Rev. Lett.* , vol. 97, 2006

[35] Xu Xie, Jianming Dai, and X.-C. Zhang , Coherent Control of THz Wave Generation in Ambient Air , *Phys. Rev. Lett.* , vol. 96, 2006

[36] Fabrizio Buccheri and Xi-Cheng Zhang , Terahertz emission from laser-induced microplasma in ambient air , *Optica*, vol. 2 , pp. 366-369 , 2015



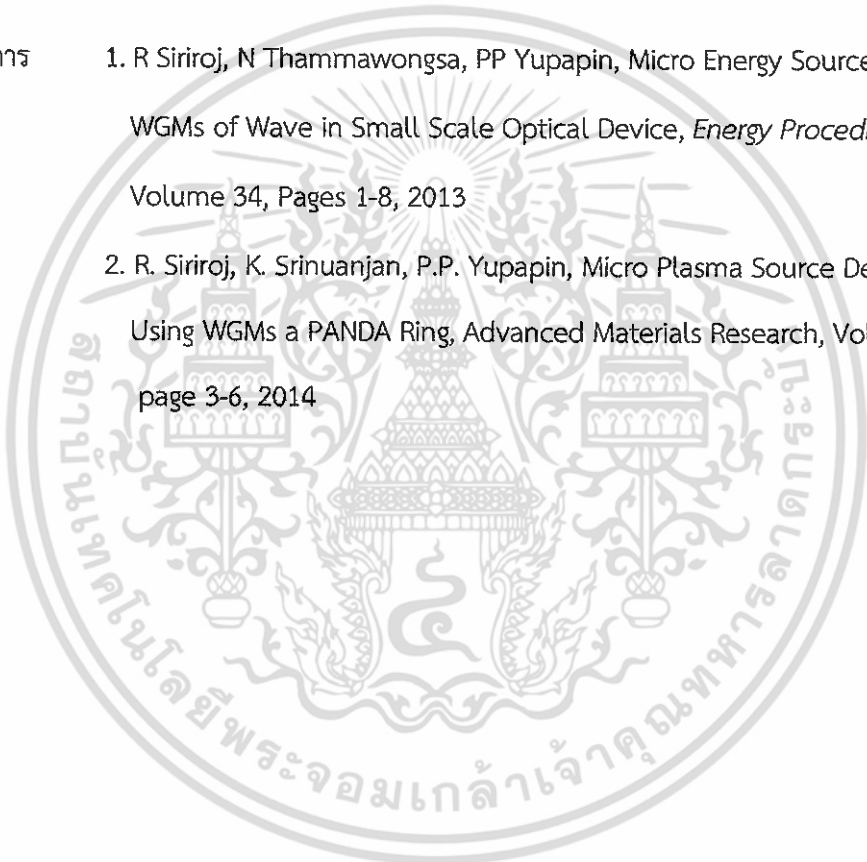
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายรัฐพล ศิริโรจน์
วัน เดือน ปีเกิด 17 มีนาคม พศ. 2525
ที่อยู่ปัจจุบัน 21/316 ซ.นวมินทร์ 42 ถ.นวมินทร์ คลองกุ่ม บึงกุ่ม กรุงเทพฯ 10240
ประวัติการศึกษา (พศ. 2546) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ เกรดเฉลี่ย 2.45
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ

1. R Siriroj, N Thammawongsa, PP Yupapin, Micro Energy Source Using WGMs of Wave in Small Scale Optical Device, *Energy Procedia*, Volume 34, Pages 1-8, 2013
2. R. Siriroj, K. Srinuanjan, P.P. Yupapin, Micro Plasma Source Design Using WGMs a PANDA Ring, *Advanced Materials Research*, Vol. 979, page 3-6, 2014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceeding

5th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2013

December 18 - 20, 2013
Pavilion Rim Kwai Resort, Kanchanaburi



Organized by: **Suan Sunandha Rajabhat University**



Micro Plasma Source Design using WGMs a PANDA Ring

R. Siriroj^{1,a}, K. Srinuanjan^{2,b}, P. P. Yupapin^{3,c}

^{1,2,3} Advanced Studies Center, Department of Physics, Faculty of Science,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) Bangkok, Thailand
^atronforce@hotmail.com, ^bkskeeray@kmitl.ac.th, ^ckypreech@kmitl.ac.th

Keywords: Plasma source, Micro-optics, Microring resonator, Panda ring, Vehicle power source

Abstract. Plasma is a one of state of matter that is produced by applying energy into gas or fluid like, where the ionized electrons from gas or fluid atoms to be free electrons. In this paper, the use of micro plasma source generation by using a PANDA ring resonator is introduced, in which the whispering gallery modes (WGMs) are formed within the center ring and can be used to create the high power of electromagnetic wave for gas plasma production. In application, the micro plasma source can be fabricated in small scale material process or others suitable operation. In this case, the plasma source can be decreased to be micro-scale device, where in fact, the common plasma source system size is large because the high energy source to produce high power plasma is required. Finally, the detail of using such small scale plasma source is discussed. The theoretical details of whispering gallery mode and quantum tunneling effects are also reviewed and discussed.

Introduction

Plasma energy has become the interesting alternative energy for various applications. However, the effective plasma source for energy is still in the early state, therefore the searching for the better plasma sources in both efficiency and size remains. Plasma state is occurred in the gas or fluid with low pressure situation, where they are absorbed energy by the high-energy free electrons or electromagnetic waves. Electrons in gas or fluid atoms can be excited from ground state to excited state when the electron energy in the excited state are ionized to be free electrons, where the others neighbor atoms can be excited by free electrons. The conventional micro-plasma sources such as mDCP, mCCP, mICP and split-ring resonator, etc. [1-7] were operated by using the electric current to convert the high voltage electric current input from power supply to be the strong electric field or high power electromagnetic wave, in which the radio-wave is converted to be the microwave wavelength, where the gas molecules can be ionized to be the plasma state. However, such systems have the disadvantage that the system is much larger than the proposed system and high energy consumption.

Recently, Yupapin and his colleagues has reported the very interesting device known as a PANDA ring resonator [8] where there are some works with various application revealed [9-11]. This paper introduces the micro-plasma system by using a PANDA ring resonator. PANDA ring resonator is composed by a linear optical add-drop ring filter coupling with two nonlinear micro or nano rings on both sides as shown in Fig. 1. In operation, it begins with inject electromagnetic wave at specific wavelength into input port of PANDA ring, the relationship between light source wavelength and ring radius(R) is given by

$$n_{eff} 2\pi R = m\lambda \quad (\text{Eq. 1})$$

where n_{eff} is the effective refractive index, R is radius of center add-drop ring, m is resonance wave number and λ is wavelength of input electromagnetic wave. It causes the resonant phenomena in the PANDA ring and generates the whispering gallery modes (WGMs) [11] in

a center hole of add-drop ring. WGMs waves excited electrons in gas molecules and ionized them for become plasma states. The energy transfer rate of WGM wave in PANDA ring can be calculated by [12]

$$\bar{P} = \frac{1}{\mu_0} \int_0^A (\vec{E} \times \vec{B}) dA \quad (\text{Eq. 2})$$

where \bar{P} is power in PANDA ring hole (W), \vec{E} is the electric field, \vec{B} is the magnetic induction, μ_0 is vacuum magnetic permeability and A is effective area of PANDA ring.

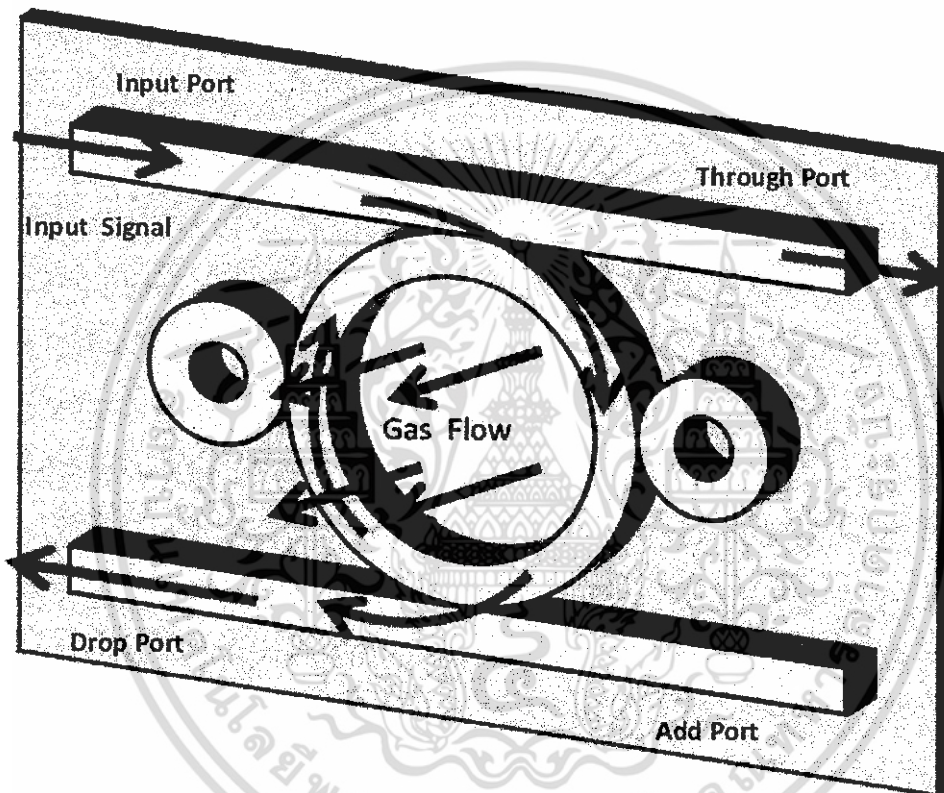


Fig. 1. The visual concept of using PANDA ring resonator as plasma source

In Fig. 1, the common laser source, for instance, a commercial semiconductor laser which can be embedded fabrication incorporating the PANDA ring circuit. The WGMs can be generated by controlling the device parameters, especially, ring radii. After the resonant conditions, the gas particles are fed into the center ring(cylinder), where the trapped gas particle(electrons) are accelerated by switching WGMs, in which the increasing in particle accelerator is obtained by using the cascaded PANDA rings.

Simulation and Result

In this paper, the simulation results are obtained by using the finite difference time domain (FDTD) method, which is claimed as the simulation experimental results because all parameters are within the realistic device parameter ranges. The simulation model is obtained by using the MATLAB program. The PANDA ring resonator is made from InGaAsP/InP , where in this case the PANDA ring radii are: the add/drop ring radius is $2.0 \mu\text{m}$, the left and right ring radii are is $1.0 \mu\text{m}$, the thickness of waveguide is $1.0 \mu\text{m}$, and laser source input

power is 1.0 W, with wavelength 1.68 μm . Results obtained are as shown in Figs. 2 and 3, which they are the normalized intensity of signal in PANDA rings input signal incoming from input port, which the results are in the steady state in 942.8 fs, with WGMs peak at the center of Add/Drop rings is 70.8% of input amplitude. The energy transfer rate of WGM wave is accounted for 50.12% of input power. The energy per unit volume of WGM wave from PANDA ring can be pumped up by the cascaded PANDA ring, where the increasing in the output intensity and the electric and magnetic field strengths of the input electromagnetic waves can be obtained. The increasing in photon energy is obtained by decreasing the input wavelength laser source, where finally, the ionized gas molecule is changed to be plasma source, which is schematically shown in Fig. 4.

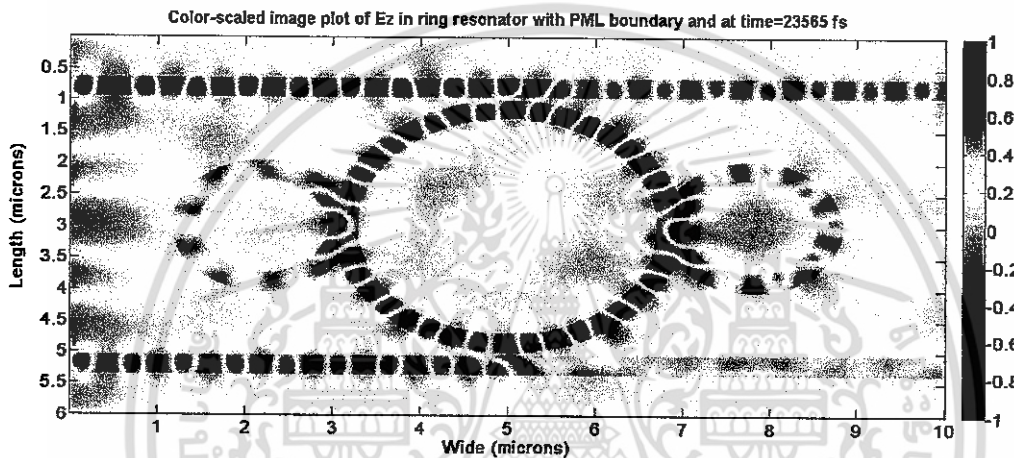


Fig. 2. Result of the WGM generated by a PANDA ring resonator, where red: Going out WGMs, blue: coming in WGMs, where there are some leaky modes around

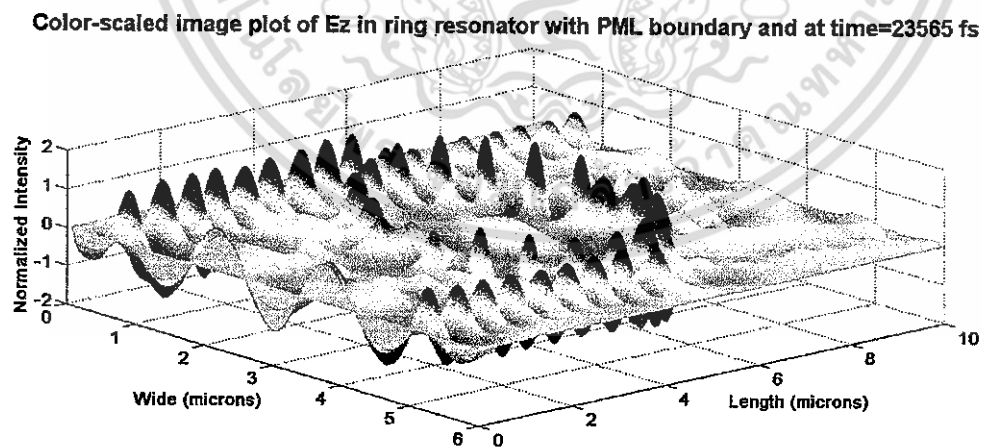


Fig. 3. WGMs generated by a cascaded PANDA ring resonator at steady state

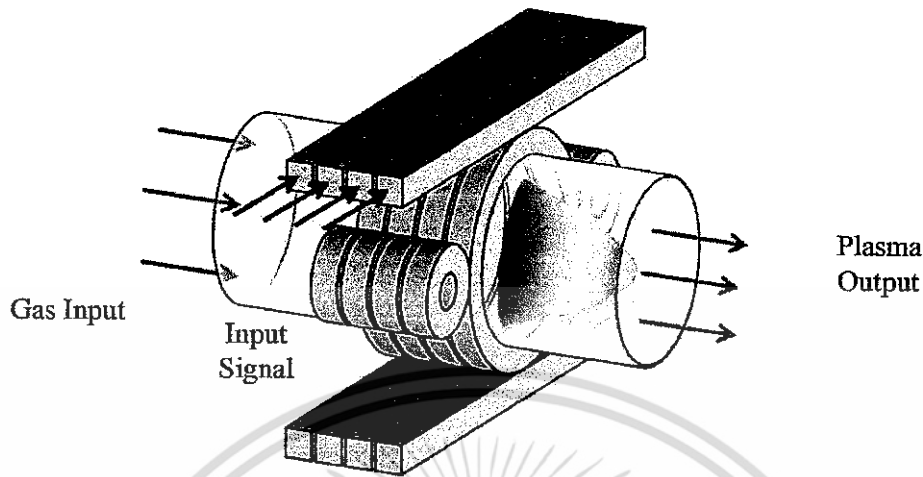


Fig. 4. Schematic diagram of a micro-plasma source, which is constructed by a cascade PANDA ring resonator

Summary

We have proposed and demonstrated that the micro-plasma source can be obtained by light propagating within a small optical device known as a PANDA ring resonator. The high power plasma source can also be obtained by using the cascaded PANDA ring resonators. After laser beam is input into the first PANDA ring, the continuing accelerated laser beams can be employed by the cascaded PANDA rings, where finally, the required plasma source power can be obtained. In applications, such a proposed system can be constructed to be a large area system by using the small scale fabrication technology, in which large energy power source can be realized, where the use of power source for small scale plasma source, beam accelerator, display media, sensors and vehicle power source, which can benefit the energy consumption demands, where the use of new type solar cells can also give the another advantage.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok 10520, Thailand for giving the research facilities.

References

- [1] T. Takahashi, Y. Takao, Y. Ichida, K. Eriguchi, K. Ono, Microwave-excited microplasma thruster with helium and hydrogen propellants, *Physics of Plasma*, 18, 063505 (2011).
- [2] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmason, P. Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B*, 61: 2 – 30(2006).
- [3] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen, Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochimica Acta Part B*, 57 : 609–658(2002).
- [4] J. Hopwood, F. Iza, S. Coy and D.B. Fenner, A Microfabricated atmospheric-pressure microplasma source operating in air, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38:1698–1703(2005).
- [5] F. Iza and J.A. Hopwood, Low-power microwave plasma source based on a microstrip split-ring resonator, *Plasma Science, IEEE Transaction on*, 31: 782 - 787 (2003).
- [6] D. Luo, Y. Duan, Microplasmas for analytical applications of lab-on-a-chip, *Trends in analytical chemistry*, 39, 254-266 (2012)

- [7] C. Chaichumporn, P. Ngamsirijit, N. Boonklin, K. Eaiprasetsak and M. Fuangfoong, Design and construction of 2.45 GHz microwave plasma source at atmospheric pressure, *Procedia Engineering*, 8 : 94–100(2011)
- [8] K. Uomwech, K. Sarapat and P.P. Yupapin, Dynamic modulated Gaussian pulse propagation within the double PANDA ring resonator, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 52: 1818-1821(2010).
- [9] S. Songmuang, S. Punthawanunt, S. Mitathab and P.P. Yupapin, Photon switching using nonlinear PANDA ring resonator, *Procedia Engineering*, 8:459–466(2011).
- [10] S. Songmuanga, S. Punthawanunt, S. Mitatha and P.P. Yupapin, Multi light sources enhancement using double PANDA ring resonators, *Procedia Engineering*, 8: 451–458(2011)
- [11] P.P. Yupapin, Nonlinear coupling effects of waves in a PANDA ring, *Science Discovery*, 1: 1-5(2013).
- [12] P. Zhao, C. Liao, W. Lin, and J. Feng, Effects of microwave frequency on electron energy distribution function and air breakdown using the fluid model, *Progress In Electromagnetics Research M*, 26: 279-287(2012).

