



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การลดอิมิตแตนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ

Minimization of Apparent Beam Emittance from RF-gun

โดย ผศ.ดร. จิตรลดา ทองใบ และคณะ

มิถุนายน 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การลดมิติแต่นซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ

Minimization of Apparent Beam Emittance from RF-gun

ผู้วิจัย

สังกัด

ดร. จิตรลดา ทองใบ

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ดร. สาคร รีมแจ่ม

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

นายกীরติ กุศลจริยกุล

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากบุคคลและองค์กรต่างๆ มากมาย จึงขอบันทึกไว้ ณ ที่นี้ด้วยความขอบคุณยิ่ง

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย จึงทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. ถิรพัฒน์ วิลัยทอง ผู้อำนวยการศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และ Emeritus Prof. Helmut Wiedemann แห่งมหาวิทยาลัย Stanford ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยเดสซี DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron ประเทศเยอรมันนี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Dr. Frank Stephan, PIZ project leader, ที่ให้การสนับสนุน research fellowship สำหรับนักศึกษาปริญญาเอกและนักวิจัย เข้าร่วมทำการวิจัย ณ สถาบันวิจัยเดสซี ประเทศเยอรมันนีอย่างต่อเนื่อง ภายใต้ข้อตกลงความร่วมมือการวิจัยใน PIZ (Photo Injector Test Facility at DESY in Zeuthen) Collaboration Project

ขอขอบคุณบุคลากรอาคารวิจัยนิวตรอนพลังงานสูงทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือ ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุญาตให้ดำเนินการวิจัย และให้การสนับสนุนทางด้านสถานที่ อุปกรณ์ ในการทำวิจัย พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณบุคลากรโครงการสุริยา คุณ Michael Rhodes, อ.จตุพร สายสุต, ดร.สาคร ริมแจ่ม, คุณปณม วิชัยศิริมงคล, คุณกীরติ ฤกษ์จรรย์กุล และ คุณนพดล แข็งแรง ที่ได้ทำงานอย่างเต็มที่เพื่อผลิตลำอิเล็กตรอนหัวสั้น และเป็นรากฐานที่เข้มแข็งของงานวิจัยชิ้นนี้

บทคัดย่อ

รหัสโครงการวิจัย RSA5280026
ชื่อโครงการวิจัย การลดอิมิตแตนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ
Minimization of Apparent Beam Emittance from RF-gun
ชื่อนักวิจัย ผศ.ดร. จิตรลดา ทองใบ
ระยะเวลาโครงการ 3 ปี

บทคัดย่อ

ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง (high brightness) เป็นส่วนสำคัญมากของการพัฒนาระบบเครื่องเร่งอนุภาคในอนาคต ลำอิเล็กตรอนที่มีความสว่างสูง หมายถึง อิเล็กตรอนพัลส์ที่มีจำนวนอิเล็กตรอนหนาแน่นมากใน เฟส-สเปซ 6 มิติ (6-D phase-space) ซึ่งมักจะเขียนรวมเป็น (x, p_x, y, p_y, E, t) ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟมีศักยภาพที่จะผลิตอิเล็กตรอนความสว่างสูงเนื่องจากการเร่งอย่างรวดเร็วตั้งแต่บริเวณคาโทด แต่ ผลจากการคำนวณด้วยการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ชี้แนะว่า ลำอิเล็กตรอนที่ผลิตจากปืนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun มีเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ที่ไม่ซ้อนทับกัน โดยแสดงลักษณะคล้ายกับการหมุน (rotation) ของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ซึ่งส่งผลให้ภาพฉายของอิมิตแตนซ์ (projected emittance) หรืออิมิตแตนซ์ปรากฏ (apparent emittance) มีค่ามาก ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ เพื่อหาโครงสร้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาวประมาณ 2.6242 เซนติเมตร หรือ $\frac{1}{4}\lambda$ ให้ผลในการลด emittance ได้ดี เมื่อใช้สนามความเข้ม 40 MV/m ใน cavity จะทำให้ projected normalized emittance ลดลงได้ประมาณ 50% แต่มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 MeV เนื่องจาก cavity ที่จะใช้ชดเชยใช้ความถี่เดียวกับปืนอิเล็กตรอน (2856 MHz) ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเพื่อรวมสนามสำหรับการชดเชยนี้ ไว้กับตัวของปืนอิเล็กตรอน และจากการศึกษาพบว่า การหมุนให้ coupling-cell วางอยู่ในแนวเดียวแต่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดท่อนำคลื่น จะได้ลำอิเล็กตรอนที่มีลักษณะสมมาตรขึ้น ซึ่งจะได้ทำการศึกษาลำอิเล็กตรอนในลักษณะนี้ อย่างละเอียดต่อไปในอนาคต

Abstract

Project Code RSA5280026
Project Title Minimization of Apparent Beam Emittance from RF-gun
Investigator Dr. Chitrlada Thongbai
Project Period 3 years

Abstract:

Production of high brightness electron bunches is a key issue for the successful operation of next-generation light sources, future (short wavelength) FELs, linear colliders as well as plasma wake-field laser accelerators. A high brightness electron bunch requires high density in a 6-D phase-space, in other words, having maximum charges in a short bunch with low emittance. Such electron bunches can be produced with rapid acceleration in an RF-gun and an enhancement occurs when the time-sliced are all lined up. Beam dynamics study of the PBP-CMU RF-gun via computer simulation has shown rotation of the slice phase-space ellipses, causing dilution of the beam projected emittance. The phenomenon seems to be macroscopic and is likely to be able to compensate employing an RF cavity. In this study, we investigate time-dependence of the slice phase-space and their responses to the compensation TM₀₁ fields. Successful in emittance reduction of 50% can be obtained using a $\frac{1}{4}\lambda$ long TM₀₁₀ 2856 MHz cavity operating with 40 MV/m field intensity. As the compensation cavity will be operated at the same frequency as the RF-gun, further study should be integrating the compensation fields into the RF-gun. Part of the study also found that rotating the coupling-cell to line up with the wave guide opening results in improvement of the electron beam quality. Detail study of the RF-gun with the rotated coupling-cell will be further investigated.

Keywords: emittance, RF-gun, phase-space

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

รหัสโครงการวิจัย RSA5280026

ชื่อโครงการวิจัย การลดอิมิตแตนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ
Minimization of Apparent Beam Emittance from RF-gun

ชื่อนักวิจัย ผศ.ดร. จิตรลดา ทองใบ

ระยะเวลาโครงการ 3 ปี

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง (high brightness) เป็นส่วนสำคัญมากของการพัฒนาระบบเครื่องเร่งอนุภาคในอนาคต ลำอิเล็กตรอนที่มีความสว่างสูง หมายถึง อิเล็กตรอนพัลส์ที่มีจำนวนอิเล็กตรอนหนาแน่นมากใน เฟส-สเปซ 6 มิติ (6-D phase-space) ซึ่งมักจะเขียนรวมเป็น (x, p_x, y, p_y, E, t) ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟมีศักยภาพที่จะผลิตอิเล็กตรอนความสว่างสูงเนื่องจากการเร่งอย่างรวดเร็วตั้งแต่บริเวณคาโทด

ในการศึกษาฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการผลิตอิเล็กตรอนหัวสั้นในเรณูเพมโตรินาที่ ของ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค (Plasma and Beam Physics (PBP) Research Facility) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผลจากการคำนวณด้วยการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ชี้แนะว่า ลำอิเล็กตรอนที่ผลิตจากปืนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun มีเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ที่ไม่ซ้อนทับกัน โดยแสดงลักษณะคล้ายกับการหมุน (rotation) ของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ซึ่งส่งผลให้ภาพฉายของอิมิตแตนซ์ (projected emittance) หรืออิมิตแตนซ์ปรากฏ (apparent emittance) มีค่ามาก หากสามารถแก้ไขหรือชดเชยผลจากการหมุนของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ใน cavity ที่มีการกระจายของสนามอย่างเหมาะสมที่จะทำให้เฟส-สเปซแบบสไลซ์ จัดเรียงตัวกันตลอดทั้งพัลส์ และส่งผลให้สามารถลดขนาดของอิมิตแตนซ์ปรากฏได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งจะเป็นแนวทางที่เอื้อประโยชน์อย่างมาก ต่อการ ศึกษาและพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการผลิตลำอิเล็กตรอนความสว่างสูง

2.2 เพื่อศึกษาการชดเชยการหมุนของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวิเคราะห์ผลกระทบในการลดอิมิตแตนซ์ปรากฏ

2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่และงานวิจัยที่มีมาตรฐานระดับนานาชาติ ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพและยกมาตรฐานการวิจัยในสาขาฟิสิกส์ของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนในประเทศ

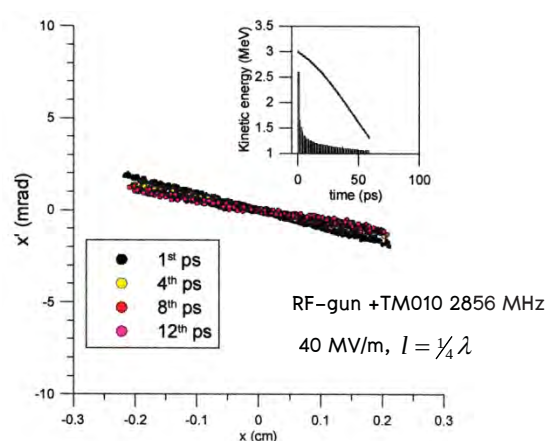
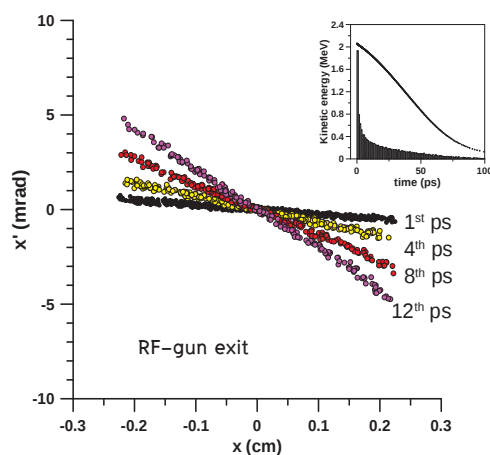
3. ระเบียบวิธีวิจัย

- ศึกษาลักษณะการกระจายของเฟส-สเปซ จากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun โดยอาศัยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรม SUPERFISH เพื่อจำลองสนาม RF ในปืนอิเล็กตรอน และ ใช้โปรแกรม PARMELA สำหรับคำนวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ขณะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในแต่ละบริเวณ
- วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเฟส-สเปซแบบสไลซ์กับเวลา ตลอดหัวพัลส์อิเล็กตรอน เพื่อศึกษาการหมุนของเฟส-สเปซกับเวลา
- หาค่าการชดเชยการหมุนที่เหมาะสมสำหรับเฟส-สเปซ เพื่อให้เฟส-สเปซตลอดหัวพัลส์เรียงในแนวเดียวกัน และ หารูปแบบที่เหมาะสมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการชดเชย
- ศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ผ่านปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun และ ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการชดเชยดังกล่าว พร้อมทั้งวิเคราะห์มิติเด่นซ์ปรากฏ
- อภิปรายผลการศึกษาและสรุปผลการวิจัยตลอดจนข้อเสนอแนะ

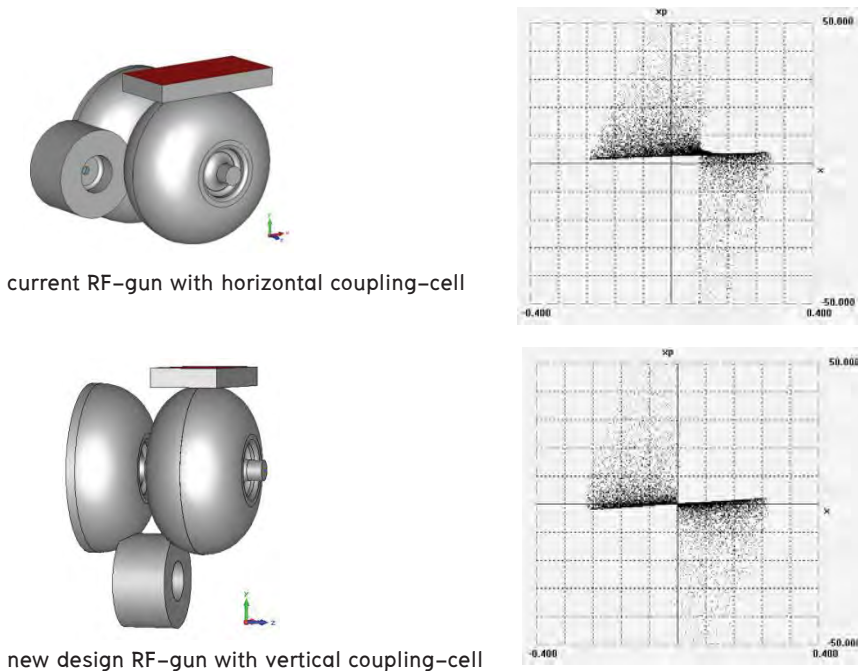
4. ผลการวิจัย

การวิเคราะห์เฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun พบการหมุนของเฟส-สเปซแบบสไลซ์อย่างชัดเจน โดยแต่ละเฟส-สเปซแบบสไลซ์ สามารถแทนได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear) การหมุนลักษณะนี้น่าจะชดเชยได้ด้วยสนามอาร์เอฟ ทั้งนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟส-สเปซแบบสไลซ์กับเวลาสำหรับแต่ละปืนอิเล็กตรอน จะแตกต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ เพื่อหาโครงสร้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม พบว่าสามารถใช้สนามจาก TM010 cavity หรือ TM011 cavity ความถี่ 1428, 2856 และ 5712 MHz เมื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาวประมาณ 2.6242 เซนติเมตร หรือ $\frac{1}{4}\lambda$ ให้ผลในการลด emittance ได้ดี เมื่อใช้สนามความเข้ม 40 MV/m ใน cavity จะทำให้ projected normalized emittance ลดลงได้ประมาณ 50% แต่มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 MeV



เมื่อใช้การคำนวณการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน RF-gun แบบ 3 มิติ พบรายละเอียดที่สำคัญเนื่องจากความไม่สมมาตรของสนามรอบแกน z นั่นคือ พบว่าลำอิเล็กตรอน อนุทางออกของ RF-gun เคลื่อนออกจากศูนย์กลางทั้งในแนวแกน x และ แกน y ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ช่องเปิดท่อนำคลื่นวางอยู่ในแนวแกน y และ coupling-cell วางอยู่ในแนวแกน x ศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหานี้ โดย หมุนให้ coupling-cell วางอยู่ในแนวแกน y โดยวางไว้ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดท่อนำคลื่น จะได้ลำอิเล็กตรอนและเฟส-สเปซ ที่อยู่ใกล้ตรงตำแหน่งพิกัด (0,0) มากขึ้น การกระจายของอิเล็กตรอนมีลักษณะคล้ายผลของ RF-gun ที่มีสนามสมมาตร นั่นคือ พบแนวทางการปรับปรุง RF-gun ที่จะให้ลำอิเล็กตรอนที่มีคุณภาพดีขึ้น



5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้หาแนวทางที่จะชดเชยการหมุนของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ด้วย TM010 cavity เพื่อให้เฟส-สเปซแบบสไลซ์ จัดเรียงในแนวเดียวกันตลอดทั้งพัลส์ และจะส่งผลให้สามารถลดขนาดของอิมิตแตนซ์ปรากฏได้ ผลการศึกษพบว่า สามารถลด projected normalized emittance ลดลงได้ประมาณ 50% ด้วย TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาวประมาณ 2.6242 เซนติเมตร หรือ $\frac{1}{4}\lambda$ เมื่อใช้สนามความเข้ม 40 MV/m แต่มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 MeV เนื่องจาก cavity ที่จะใช้ชดเชยใช้ความถี่เดียวกับปืนอิเล็กตรอน (2856 MHz) ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเพื่อรวมสนามสำหรับการชดเชยนี้ ไว้กับตัวของปืนอิเล็กตรอน และจากการศึกษาพบว่าการหมุนให้ coupling-cell วางอยู่ในแนวเดียวแต่ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดท่อนำคลื่น จะได้ลำอิเล็กตรอนที่มีลักษณะสมมาตรขึ้น ซึ่งจะได้ทำการศึกษาปืนอิเล็กตรอนในลักษณะนี้ อย่างละเอียดต่อไปในอนาคต

สารบัญ

1	บทนำ	1
2	การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย	7
2.1	การกระจายของเฟส-สเปซ	7
2.2	การศึกษาการกระจายของเฟส-สเปซ เมื่อใช้สนามจาก แม่เหล็กโซลีนอยด์	17
2.3	การวิเคราะห์การกระจายของเฟส-สเปซ	19
2.4	แนวทางการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ ด้วยสนามจาก cavity	20
2.5	การศึกษาการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ ด้วยสนามจาก cavity	24
2.6	3D simulation	32
3	สรุปผลการวิจัย	37
4	บรรณานุกรม	39
5	OUTPUT	40
	ภาคผนวก	44

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

1 เฟส-สเปซในแนวแกน x และ beam ellipse	3
2 เฟส-สเปซในแนวแกน x และ beam ellipse ของลำอิเล็กตรอน จากปืนอาร์เอฟ	3
3 แผนภาพแสดงแต่ละสไลซ์ (#1, #2, และ #3) ที่จะวิเคราะห์ เฟส-สเปซแบบสไลซ์	3
4 ตัวอย่าง beam ellipse บนแต่ละสไลซ์ ของลำอิเล็กตรอน A และ B	4
5 การหมุน ของเฟส-สเปซตามขวางของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตจากปืน PBP-CMU RF-gun	5
6 เฟส-สเปซ ภายใต้อนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่	5
7 ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ประกอบด้วย 3 cavity ได้แก่ half-cell, full-cell และ side coupling cell	8
8 ผลการคำนวณจาก SUPERFISH แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า	10
9 รูปร่าง (2 มิติ) ของ half-cell และ full-cell พร้อมทั้งเส้นสนามไฟฟ้า	11
10 รูปร่าง (2 มิติ) ของ half-cell และ full-cell และการกระจายของสนามไฟฟ้า	11
11 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาค	13
12 เฟส-สเปซ $y-y'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาค	13
13 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนของ SUNSHINE, SSRL	14
14 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun	15
15 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ ตลอดหัวพัลส์	16
16 เฟส-สเปซ (1ps slices) ของอิเล็กตรอน ที่ 13 ซม. หลังจากทางออกของ RF-gun และที่ 10 ซม. หลังจากแม่เหล็กซินโครตรอน (ยาว 3 ซม.)	18
17 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของแต่ละสไลซ์ และการหาอัตราส่วน x'/x ของแต่ละสไลซ์	19
18 เฟส-สเปซ ภายใต้อนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่	19
19 อัตราส่วน x'/x และ y'/y หรือความชันของ linear fit สำหรับแต่ละเฟส-สเปซแบบสไลซ์	20
20 Bessel functions: $J_0(x)$, $J_1(x)$, $J_2(x)$.	21
21 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของแต่ละสไลซ์ และขนาดของแรง (ประมาณด้วยขนาดของลูกศร) ที่ต้องการ แปรตาม ระยะ x จากศูนย์กลาง	21
22 เปรียบเทียบสนาม reference และ การเบนด้วยสนามแม่เหล็กของ TM_{010} cavity เมื่อใช้ $l = \lambda$ และความถี่เป็น 1428, 2856 และ 5712 MHz	23

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
23 เปรียบเทียบสนาม reference และ การเบนด์ด้วยสนามแม่เหล็กของ TM ₀₁₀ cavity กรณี $l = \lambda, \frac{1}{2}\lambda$ และ $\frac{1}{4}\lambda$ เมื่อใช้ความถี่ 2856 MHz	23
24 การกระจายของ (ก) สนามไฟฟ้า และ (ข) สนามแม่เหล็ก ใน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 cavity	25
25 การกระจายของ (ก) สนามไฟฟ้า และ (ข) สนามแม่เหล็ก ใน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 cavity	25
26 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อออกจากปืนอิเล็กตรอน, เมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 RF cavity และ $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity	26
27 การกระจายตัวในเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนก่อนเข้าสู่ RF cavity	27
28 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 RF cavity	27
29 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity	28
30 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity	28
31 การกระจายของลำอิเล็กตรอนในเฟส-สเปซ เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาว $10.496\text{ cm}(\lambda)$ และ $5.2485\text{ cm}(\frac{1}{2}\lambda)$	29
32 การกระจายของลำอิเล็กตรอนในเฟส-สเปซ เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาว 3.0 cm และ $2.6242\text{ cm}(\frac{1}{4}\lambda)$	30
33 การกระจายตัวของเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนที่ RF-gun exit และภายหลังผ่าน TM010 2856 MHz RF-cavity ที่มีสนาม 30 MV/m และ 40 MV/m	30
34 การกระจายของลำอิเล็กตรอนใน 1^{st} ps, 4^{th} ps, 8^{th} ps และ 12^{th} ps หลังผ่าน TM010 2856 MHz cavity ความยาว $\frac{1}{4}\lambda$ ที่มีสนาม 20 MV/m , 30 MV/m และ 40 MV/m	31
35 โมเดล 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun ในโปรแกรม CST Microwave studio (MWS)	32
36 ภาควัด yz-plane (ก) และ xz-plane (ข) แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า	32
37 ภาควัด yz-plane (ก) และ xz-plane(ข) แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า	33
38 ภาควัดขวางของลำอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้สนาม 3 มิติ โดยจุดศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน ไม่ตรงกับพิกัด $x = 0, y = 0$	33
39 เฟส-สเปซ และ เฟส-สเปซแบบสไลซ์ (12 ps แรก) ของลำอิเล็กตรอน คำนวณ โดยใช้สนาม 3 มิติ โดยจุดศูนย์กลางของเฟส-สเปซ ไม่ตรงกับพิกัด $x = 0, x' = 0$	34

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
40 โมเดล 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น ในโปรแกรม CST Microwave studio (MWS)	34
41 ภาคตัด yz-plane แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ของปืนอิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เอฟ ที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น	35
42 ภาคตัด yz-plane (ก) และ xz-plane (ข) แสดงความเข้มสนามไฟฟ้าของปืนอิเล็กทรอนิกส์ แบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น	35
43 ภาคตัดขวางของลำอิเล็กทรอนิกส์ จากปืนอิเล็กทรอนิกส์แบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น	36
44 เฟส-สเปซ และ เฟส-สเปซ แบบสไลซ์ ของลำอิเล็กทรอนิกส์จากปืนอิเล็กทรอนิกส์ แบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น	36

สารบัญตารางประกอบ

	หน้า
1 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA สำหรับลำอิเล็กตรอน จากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun	14
2 ขนาดของ 2856 MHz RF cavity ที่ใช้ในการศึกษา	24
3 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA	26
5 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน TM010 cavity 40 MV/m ที่มีความยาวต่าง ๆ กัน	29
6 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA: TM010 2856 MHz cavity ความยาว $\frac{1}{4}\lambda$	31

1 บทนำ

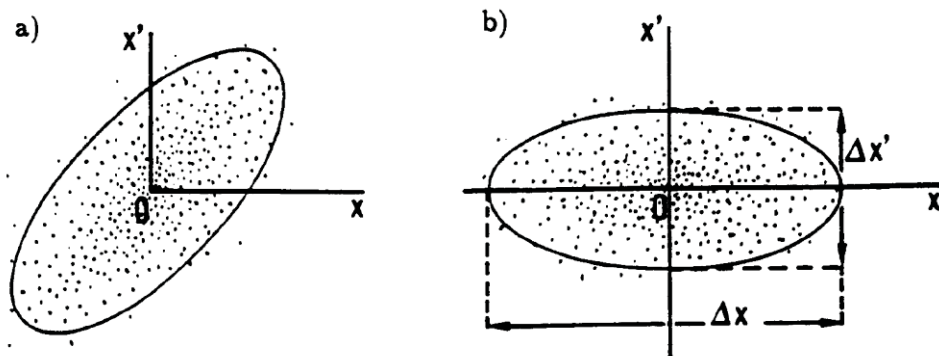
ลำอิเล็กตรอนที่มีความสว่างสูง (high brightness) หมายถึง อิเล็กตรอนพัลส์ที่มีจำนวนอิเล็กตรอนหนาแน่นมากใน เฟส-สเปซ 6 มิติ (6-D phase-space) ที่รวมถึง ตำแหน่งและโมเมนตัมในแนวแกน x y และ z ซึ่งมักจะเขียนรวมเป็น (x, p_x, y, p_y, E, t) การที่จะให้ได้มาซึ่งลำอิเล็กตรอนความสว่างสูงดังกล่าว จะเน้นที่การผลิตลำอิเล็กตรอนให้มีความสว่างสูงตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการที่จะพยายามเพิ่มความสว่างในภายหลัง ดังนั้นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ให้มีความสว่างสูงจะต้องเป็นแหล่งกำเนิดที่ได้ถูกออกแบบ และผ่านการศึกษา มาเป็นอย่างดี โดยฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง เป็นส่วนสำคัญมากของการพัฒนาระบบเครื่องเร่งอนุภาคในอนาคต [1-3] อาทิ เช่น เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับใช้กับ collider แบบเชิงเส้นสำหรับเครื่องเร่งแบบ wake-field laser สำหรับระบบผลิต Free Electron Laser (FEL) ทั้ง FEL ความแบบ resonator และ single-pass (X-ray) FEL รวมไปถึงระบบผลิตรังสีเอ็กซ์เฟมโตวินาทีด้วยกระบวนการ Compton scattering อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเพื่อจะประยุกต์ใช้กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) การศึกษาวิจัยในส่วนนี้จึงอยู่ในขั้นที่เรียกว่าแนวหน้าของแวดวงฟิสิกส์ของเครื่องเร่งและลำอนุภาค และความสามารถในการเพิ่มความสว่าง ไม่ว่าด้วยวิธีใด จะมีส่วนช่วยผลักดันงานวิจัยด้านนี้ทั้งสิ้น

อิเล็กตรอนความสว่างสูงจะเกิดขึ้นได้เมื่อขนาดของลำอิเล็กตรอนใน เฟส-สเปซ ทั้งตามแนวขวาง (x, p_x, y, p_y) และตามแนวยาว (E, t) มีค่าน้อยมาก การบีบอัดหัวของลำอิเล็กตรอน (bunch compression) ให้ได้หัวที่สั้นและการลดการกระจายของพลังงาน (energy spread) ในพัลส์สามารถลดขนาดของเฟส-สเปซ ตามแนวยาว ส่วนขนาดเฟส-สเปซ ตามแนวขวางจะลดลงได้ด้วยการลดขนาดและลดการลู่ออก (divergence) ของลำอิเล็กตรอน โดยทั่วไป มักจะใช้ ค่า อิมิตแตนซ์ (emittance) ซึ่งแทนขนาดใน 6-D เฟส-สเปซ เป็นตัวชี้วัด เช่นเดียวกับเฟส-สเปซ อิมิตแตนซ์แบ่งออกได้เป็น อิมิตแตนซ์ตามขวาง (แบ่งออกได้อีกเป็นอิมิตแตนซ์ตามแนวแกน x และแกน y) กับอิมิตแตนซ์ตามยาว ทั้งนี้พบว่า หากเอ่ยถึงเพียงแค่อิมิตแตนซ์ ส่วนใหญ่มักจะหมายถึงอิมิตแตนซ์ตามขวาง การผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีอิมิตแตนซ์น้อย พร้อมทั้งอนุรักษ์ให้คงค่าน้อยเช่นนั้นตลอดระบบลำเลียงจนถึงจุดที่จะทำการทดลอง เป็นส่วนสำคัญในการผลิตลำอิเล็กตรอนความสว่างสูง (ค่าโดยทั่วไปของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง คือ มีประจุ 1 nC ความยาวพัลส์ < 10 ps และอิมิตแตนซ์ < 7 mm mrad)

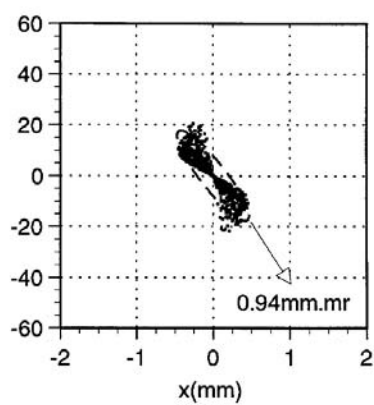
สาเหตุหลักของการทำให้อิเล็กตรอนจำนวนมาก มารวมกันอยู่ในปริมาตรที่เล็ก เป็นไปได้ยาก เนื่องมาจากการผลักทางไฟฟ้าของประจุชนิดเดียวกัน เรียกผลจากกรณีเช่นนี้ว่า space charge effects ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อลำอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ ดังเช่นขณะที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกจากคาโทด ในปัจจุบันได้เป็นที่ประจักษ์แล้วว่า สามารถลดผลของ space charge ลงได้ด้วยการเร่งในทันที

ที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากคาโทด เช่น การติดตั้งคาโทดไว้ในโพรงที่มีสนามอาร์เอฟ (RF cavity) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามอาร์เอฟให้มีพลังงานสูงกว่าที่ space charge จะส่งอิทธิพลภายในเวลาอันรวดเร็ว เนื่องจากเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นจะมีแรงจากสนามแม่เหล็กมาลดทอนแรงผลักจากสนามไฟฟ้า เรียกระบบผลิตอิเล็กตรอนแบบนี้ว่า ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ (RF-gun) ซึ่งสามารถผลิตอิเล็กตรอนพัลส์ด้วยจำนวนอิเล็กตรอนที่หนาแน่นมากใน 6-D เฟส-สเปซ ปืนอิเล็กตรอนดังกล่าว ได้เริ่มพัฒนาขึ้นโดย J. Fraser และ R. Sheffield [4] ซึ่งถือได้ว่าเป็น break-through ที่สำคัญไปสู่การผลิตแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับปืนแบบ DC ที่ใช้การเร่งผ่านคู่คาโทด-อโนดที่ให้อิเล็กตรอนพลังงานประมาณ 100 – 300 keV ข้อเด่นของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟก็คือ สามารถติดตั้งคาโทดไว้ใน RF cavity อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกเร่งในทันทีให้มีพลังงานสูงขึ้นเป็น MeV ภายในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยลดผลของ แรงผลักทางไฟฟ้าเนื่องจาก space charge ที่ทำให้อิมิตแตนซ์เพิ่มขึ้น การพัฒนาที่สำคัญอีกขั้น คือ การออกแบบปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟความสว่างสูง ที่ใช้คาโทดเทอร์มิออนิก (thermionic cathode) และระบบบีบอัดพัลส์ด้วยแม่เหล็กแบบแอลฟา ของ M. Borland [5] และงานวิจัยของ E. Carlson [6] ที่ได้ศึกษาเพื่อออกแบบแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนของ Los Alamos National Laboratory FEL center ด้วย ปืนอิเล็กตรอนอาร์เอฟที่ใช้โฟโตคาโทด (photocathode) และยังได้ริเริ่มใช้วิธีชดเชยผลจาก space charge ด้วยการออกแบบระบบโพกัสที่สร้างจากแม่เหล็กโซลินอยด์ นิยมเรียกว่า emittance compensation scheme ของ Carlson ซึ่งนับได้ว่าเป็นแนวทางต้นแบบของการผลิตอิเล็กตรอนความสว่างสูงด้วยปืนอาร์เอฟแบบใช้โฟโตคาโทด ส่วนการลดขนาดตามแนวยาวสามารถทำได้โดยใช้ระบบบีบอัดพัลส์ด้วยสนามแม่เหล็ก งานวิจัยเพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟสำหรับผลิตลำอิเล็กตรอนที่มีหัวสั้นมาก และมีอิมิตแตนซ์น้อย จึงเป็นแนวทางหลักในการพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง (State-of-the-art สำหรับปืนอิเล็กตรอนอาร์เอฟแบบโฟโตคาโทด ผลิตลำอิเล็กตรอน ประจุ 1 nC อิมิตแตนซ์ 1–5 mm mrad)

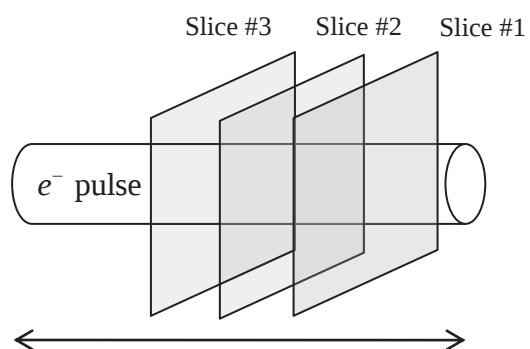
ความหมายของอิมิตแตนซ์ ที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของลำอนุภาค แสดงโดยอาศัย รูปที่ 1 ซึ่งแสดงลักษณะเฟส-สเปซในแนวแกน x [7] โดยทั่วไปอิมิตแตนซ์ ϵ_x มักจะนิยามด้วยพื้นที่ (อาจจะมีการหารด้วยค่า π) ของวงรี ที่ครอบคลุมประมาณ 95% (รูป 1 a) ของจำนวนอนุภาคทั้งหมด เรียกวงรีดังกล่าวว่า phase-space ellipse หรือ beam ellipse ทั้งนี้การระบุเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการนิยามอาจแตกต่างกันไป เช่น 90% หรือ 99% โดยอิมิตแตนซ์สามารถคำนวณได้จากผลคูณของขนาดตามแนวแกนทั้งสองของวงรี (รูป 1 b) ในลักษณะของลำอนุภาคแบบพัลส์ค่าอิมิตแตนซ์มักจะหาจาก beam ellipse ที่ครอบคลุม x, x' ของทุกอนุภาคตลอดหัวพัลส์ เช่น ในรูปที่ 2 แสดง เฟส-สเปซในแนวแกน x และ beam ellipse ของลำอิเล็กตรอน 1 พัลส์ จากปืนอาร์เอฟ [8] อย่างไรก็ตาม ได้มีการวิเคราะห์เฟส-สเปซ หรือ อิมิตแตนซ์ ณ ช่วงสั้น ๆ ของพัลส์อิเล็กตรอน ซึ่งในปัจจุบันเรียกค่า อิมิตแตนซ์ ลักษณะนี้ว่า อิมิตแตนซ์แบบฟาน หรือแบบสไลซ์ (slice emittance) ดังแผนภาพในรูปที่ 3



รูปที่ 1 เฟส-สเปซในแนวแกน x และ beam ellipse [7]

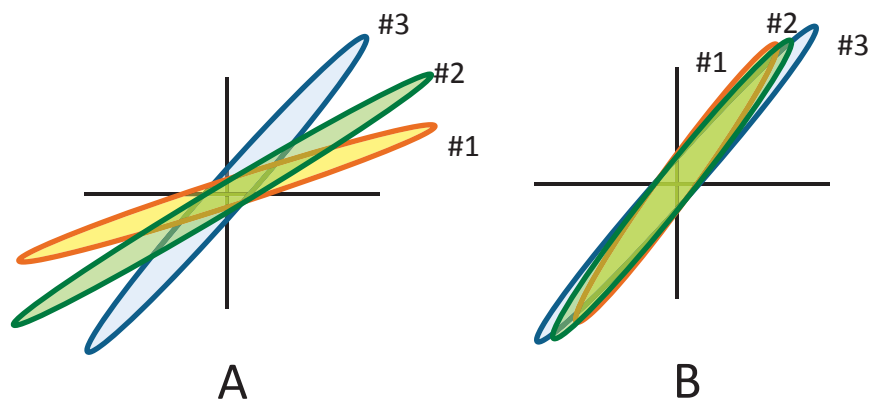


รูปที่ 2 เฟส-สเปซในแนวแกน x และ beam ellipse ของลำอิเล็กตรอน 1 พัลส์ จากปืนอาร์เอฟ [8]



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงแต่ละสไลซ์ (#1, #2, และ #3) ที่จะวิเคราะห์ เฟส-สเปซแบบสไลซ์

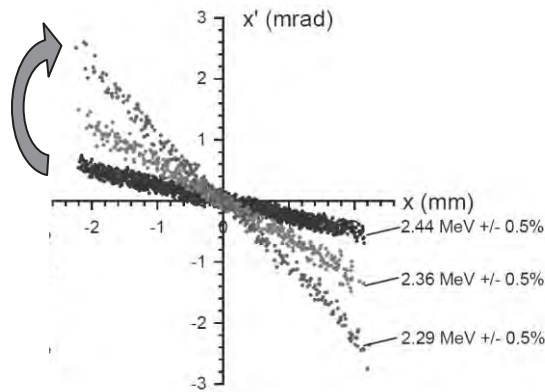
และในรูปที่ 4 แสดงตัวอย่าง beam ellipse สำหรับแต่ละสไลซ์ (#1, #2, และ #3) ซึ่งบ่งถึง อิมีตแตนซ์แบบสไลซ์ (ณ ช่วงใดช่วงหนึ่งของพัลส์) ของลำอิเล็กตรอน A และ B เมื่อวิเคราะห์ภาพฉายของ



รูปที่ 4 ตัวอย่าง beam ellipse บนแต่ละสไลซ์ ของลำอิเล็กตรอน A และ B

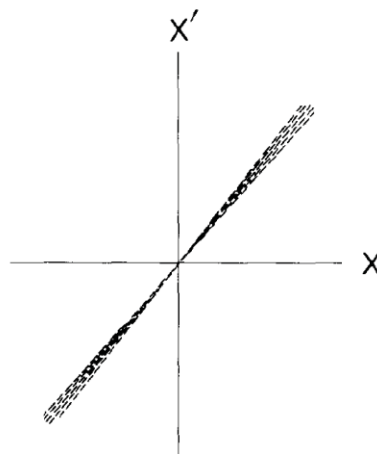
อิมีตแตนซ์ (projected emittance) หรือ อิมีตแตนซ์ปรากฏ (apparent emittance) จากทุกอนุภาคตลอดช่วงพัลส์ จะพบว่า อิมีตแตนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอน A มีค่ามากกว่าของลำอิเล็กตรอน B นั่นคือ ลักษณะการกระจายตัวของเฟส-สเปซแบบสไลซ์ตลอดช่วงพัลส์ของอิเล็กตรอน มีผลอย่างมากต่อ อิมีตแตนซ์ปรากฏ ได้มีงานวิจัยทั้งเชิงทฤษฎีและการทดลอง รวมไปถึงการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง จำนวนมาก เพื่อศึกษาอิมีตแตนซ์ปรากฏ การศึกษาเพื่อหาลักษณะและกระบวนการที่จะทำให้ได้มาซึ่งอิมีตแตนซ์แบบสไลซ์ที่ให้อิมีตแตนซ์ปรากฏน้อยที่สุด รวมไปถึงการคงไว้ให้อิมีตแตนซ์ปรากฏเพิ่มขึ้นตลอดระบบ transport เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง

จากการที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการผลิตอิเล็กตรอนหัวสั้นในเรณูเพมโตวินาที่ [9] พร้อมทั้งนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบ สร้างประกอบ ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ที่ใช้คาโทดแบบเทอร์มิออนิก (thermionic cathode) สำหรับใช้กับระบบบีบอัดพัลส์ในรูปแบบแม่เหล็กบีบแบบแอลฟา (alpha-magnet) ซึ่งปืนอิเล็กตรอนดังกล่าวเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนหัวสั้น ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [10] ข้อมูลส่วนหนึ่งจากการศึกษาวิจัยดังกล่าว ซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ชี้แนะว่า ลำอิเล็กตรอนที่ผลิตจากปืนแบบอาร์เอฟ มีเฟส-สเปซของแต่ละกลุ่มพลังงานที่ไม่ซ้อนทับกัน โดยแสดงลักษณะคล้ายกับการหมุน (rotation) ของเฟส-สเปซตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการหมุนของเฟส-สเปซ ส่งผลให้ภาพฉายของอิมีตแตนซ์ (projected



รูปที่ 5 การหมุน ของเฟส-สเปซ ตามขวาง ของลำอิเล็กตรอนที่ผลิตจากปืนแบบอาร์เอฟ ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [9]

emittance) หรืออิมิตแตนซ์ปรากฏ (apparent emittance) มีค่ามาก สืบเนื่องจาก งานวิจัยของ K.J. Kim [11] ที่ถือว่าเป็นแม่บทของการอธิบายลักษณะของเฟส-สเปซ ภายใต้การเร่งของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ-โพโตคาโทด ได้แสดงไว้ว่าเฟส-สเปซภายใต้สนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่ ส่งผลในลักษณะของการเปลี่ยนความชันของ x, x' ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เฟส-สเปซ ภายใต้สนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่ [11]

ดังนั้น ควรจะสามารถแก้ไขหรือชดเชยผลจากการหมุนของเฟส-สเปซ (ในรูปที่ 5) โดยใช้สนามอาร์เอฟ ใน cavity ที่มีการกระจายของสนามอย่างเหมาะสมที่จะทำให้เฟส-สเปซ จัดเรียงตัวกันตลอดทั้งพัลส์ และส่งผลให้สามารถลดขนาดของอิมิตแตนซ์ปรากฏได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งจะเป็นแนวทางที่เอื้อประโยชน์อย่างมาก ต่อการ ศึกษาและพัฒนาแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง

โครงการวิจัยเรื่อง “การลดอิมิตแดนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ” นี้ มีวัตถุประสงค์คือ

- เพื่อศึกษาฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการผลิตลำอิเล็กตรอนความสว่างสูง
- เพื่อศึกษาการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของของอิมิตแดนซ์แบบสไลซ์ของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ โดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของการชดเชยโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการลดอิมิตแดนซ์ปรากฏของลำอิเล็กตรอนจากปืนแบบอาร์เอฟ
- เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่และงานวิจัยที่มีมาตรฐานระดับนานาชาติ ที่สามารถยกมาตรฐานการศึกษาและการวิจัยที่สอดคล้องกับการพัฒนาหลักสูตรสาขาฟิสิกส์ และฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- เพื่อเพิ่มศักยภาพและยกมาตรฐานการวิจัย (รวมถึงการออกแบบ สร้างประกอบ พัฒนาปรับปรุง) ในสาขา ฟิสิกส์ ของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนในประเทศ
- เพื่อนำผลวิจัยที่ได้ไปเผยแพร่ และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

2 การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

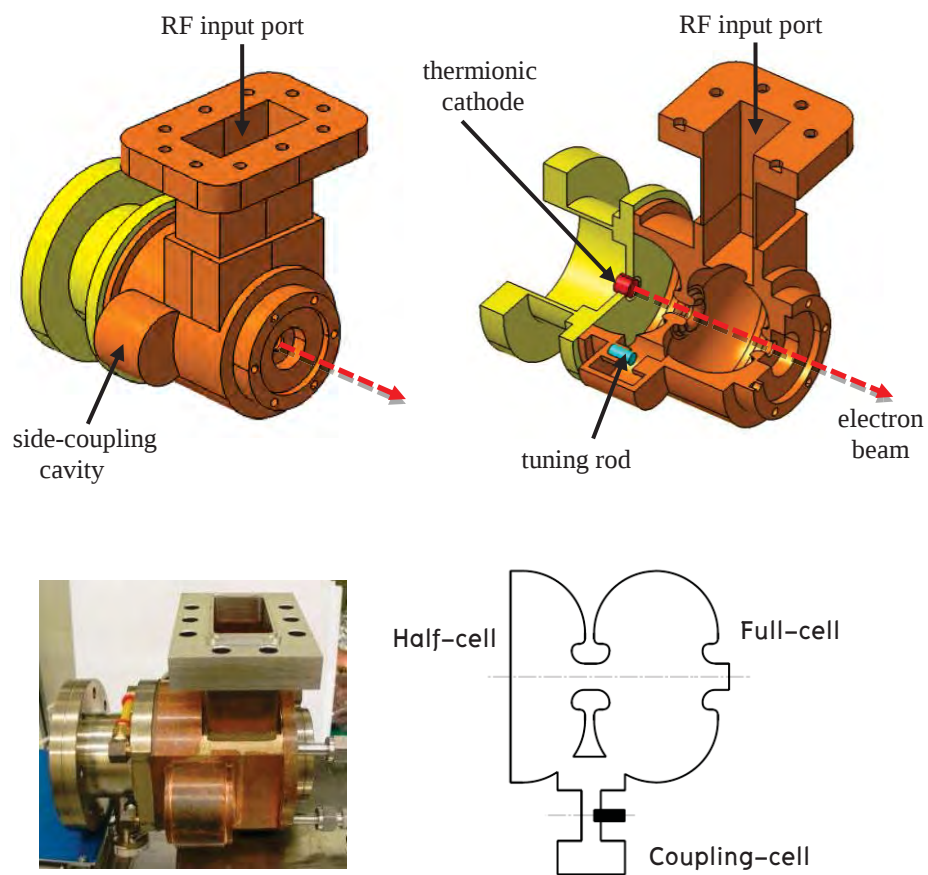
2.1 การกระจายของเฟส-สเปซ

โดยอาศัยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ศึกษาลักษณะการกระจายของเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (PBP-CMU RF-gun) โดยการกระจายของเฟส-สเปซดังกล่าว จะหาได้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอน ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากคาโทด และอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในโครงสร้างของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ เริ่มด้วยการใช้โปรแกรม SUPERFISH [12] ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับหาผลเฉลยของปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อจำลองสนาม RF ในปืนอิเล็กตรอน และ ใช้โปรแกรม PARMELA [13] สำหรับคำนวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละบริเวณ โปรแกรมทั้งสองได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Los Alamos Accelerator Code Group (LAACG), Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA.

ปืนอิเล็กตรอนดังกล่าวเป็นปืนอิเล็กตรอนแบบ $1\frac{1}{2}$ -cell S-band side-coupling ซึ่งประกอบด้วย 3 cavity ได้แก่ half-cell, full-cell และ side coupling cell ดังแสดงในรูปที่ 7 ปืนอิเล็กตรอนนี้ ถูกออกแบบมาให้ใช้งานที่ความถี่ 2856 MHz ซึ่งเป็นความถี่ S-band โดยการส่งคลื่นไมโครเวฟ (RF wave) ระหว่าง full-cell และ half-cell จะทำผ่าน side coupling cell รวมแล้วทำให้ปืนอิเล็กตรอนที่มีทั้งหมด 3 เซลล์ เกิด resonant อยู่ 3 โหมดด้วยกัน โหมดทั้ง 3 นี้สามารถแยกจากกันด้วยความต่างเฟสของ RF ในแต่ละ cell ได้แก่ 0-mode, $\pi/2$ -mode และ π -mode ในการใช้งานจะใช้ใน $\pi/2$ -mode ซึ่งมีเฟสของ RF field ใน half-cell กับ coupling cell ต่างกัน $\pi/2$ และ ใน coupling cell กับ full-cell จะต่างกัน $\pi/2$ ทำให้ ใน half-cell กับ full-cell มีเฟสต่างกัน π

ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน cavity ของปืนอิเล็กตรอนใช้โปรแกรม SUPERFISH ซึ่งให้ผลเป็นการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน 2 มิติ โดยมีสมมาตรเชิงมุม azimuth รอบแกน longitudinal นั่นคือ การคำนวณไม่รวมรายละเอียดของ coupling cell ใช้การสมมุติว่ามีการส่งผ่านสนามได้ โดยคำนวณสนามไฟฟ้าใน half-cell และใน full-cell แยกออกจากกัน

ผลการคำนวณจะได้การกระจายของสนามไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดง รูปร่างของ cavity ของปืนอิเล็กตรอน ที่ลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน คือ half-cell และ full-cell ต่อกัน ส่วนเส้นสนามไฟฟ้าจากการคำนวณด้วย SUPERFISH และการกระจายของสนามไฟฟ้าตามความยาวของ RF- gun cavity แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 7 ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วย 3 cavity ได้แก่ half-cell, full-cell และ side coupling cell

input file ของ โปรแกรม SUPERFISH สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน RF-gun cavity

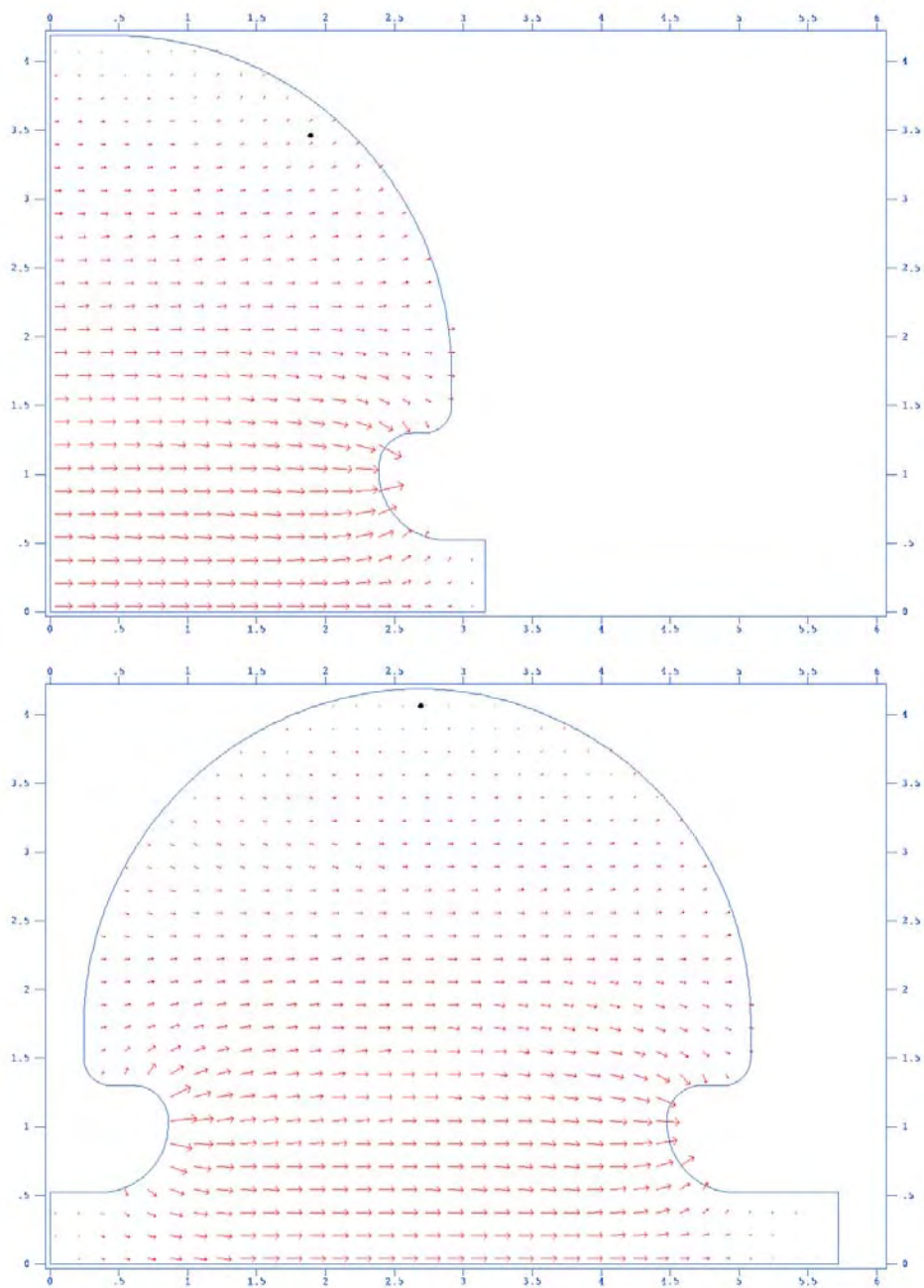
2.856-GHz SURIYA GUN AS BUILT (1 1/2 Cell)

1st 1/2 Cell (Flat Heat Dam)

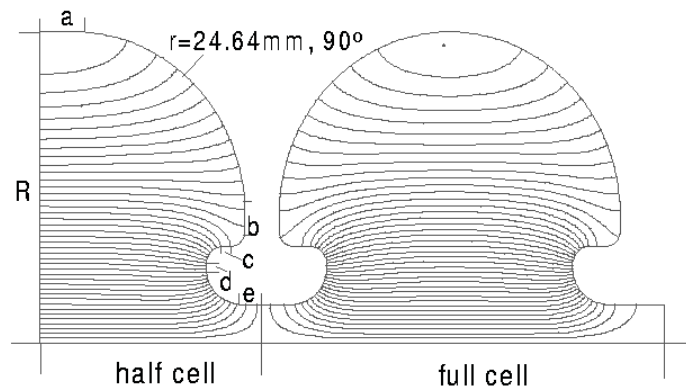
```
$reg kprob=1, dx=0.03, dy=0.03, freq=2856. ,xmin=0.0, ymin=0.0,
xmax=3.1607, ymax=4.19, xdri=1.83057, ydri=3.49395, beta=0.95, nbsrt=0,
nbslf=1, rmass=-1, rhor=2.842D-6, tempr=20.0, alphas=3.93D-3, tempc=27.5 $
$po x=0.0 ,y=0.0 $
$po x=0.0 ,y=4.19 $
$po x=0.4507 ,y=4.19 $
$po nt=2, x0=0.4507,y0=1.726,r=2.464, theta=0.0 $
$po x=2.9147 ,y=1.5 $
$po nt=2, x0=2.7147, y0=1.5, r=0.20, theta=270.0 $
$po x=2.636 ,y=1.3 $
$po nt=2, x0=2.636 ,y0=1.05, r=0.25, theta=180.0 $
$po x=2.386 ,y=1.02 $
$po nt=2, x0=2.886 ,y0=1.02, r=0.5, theta=270.0 $
$po x=3.1607 ,y=0.52 $
$po x=3.1607 ,y=0.00 $
$po x=0.0 ,y=0.0 $
```

2nd Full Cell

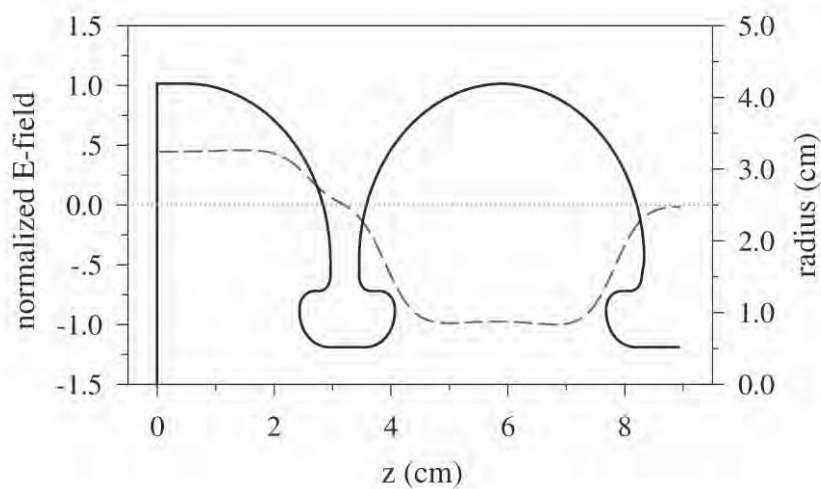
```
$reg kprob=1,dx=0.03,dy=0.03, freq=2856. ,xmin= 0.0 , xmax=5.72048, ymax=4.1894617,
xdri=2.66104,ydri=4.044,beta=0.95, nbsrt=1, nbslf=0, rmass=-1,
rhor=2.842D-6, tempr=20.0, alphas=3.93D-3,tempc=27.5 $
$po x=0.000 ,y=0.00 $
$po x=0.000 ,y=0.52 $
$po x=0.3575 ,y=0.52 $
$po nt=2, x0=0.3575, y0=1.02, r=0.5, theta= 0.0 $
$po x=0.8575 ,y=1.05 $
$po nt=2, x0=0.6075, y0=1.05, r=0.25, theta=90.0 $
$po x=0.446 ,y=1.3 $
$po nt=2, x0=0.446, y0=1.5, r=0.20, theta=180.0 $
$po x=0.246 ,y=1.726 $
$po nt=2, x0=2.71, y0=1.726, r=2.464, theta=88.802375 $
$po x=2.66358 ,y=4.1894617 $
$po nt=2, x0=2.66358, y0=1.7685617, r=2.4209, theta=0.0 $
$po x=5.08448 ,y=1.5 $
$po nt=2, x0=4.88448, y0=1.5, r=0.20, theta=270.0 $
$po x=4.72758,y=1.3 $
$po nt=2, x0=4.72758, y0=1.05, r=0.25, theta=180.0 $
$po x=4.47758 ,y=1.02 $
$po nt=2, x0=4.97758, y0=1.02, r=0.5, theta=270.0 $
$po x=5.32048 ,y=0.52 $
$po x=5.72048 ,y=0.52 $
$po x=5.72048 ,y=0.0 $
$po x=0.00 ,y=0.0 $
```



รูปที่ 8 ผลการคำนวณจาก SUPERFISH แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า
ใน half-cell (ภาพบน) และใน full-cell (ภาพล่าง)



รูปที่ 9 รูปร่าง (2 มิติ) ของ half-cell และ full-cell พร้อมทั้งเส้นสนามไฟฟ้า
จากการคำนวณด้วย SUPERFISH



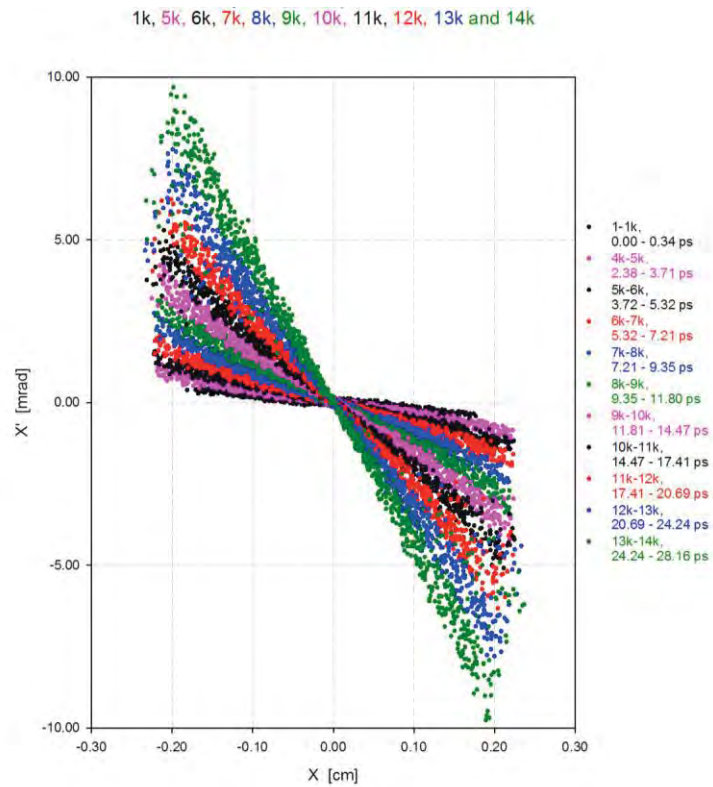
รูปที่ 10 รูปร่าง (2 มิติ) ของ half-cell และ full-cell และการกระจายของสนามไฟฟ้า
ตามความยาวของ RF- gun cavity

นอกจากนี้โปรแกรม SUPERFISH ยังได้สร้าง output สำหรับเรียกใช้งานโดย โปรแกรม PARMELA เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใน RF-gun cavity ผลลัพธ์จาก PARMELA จะได้เฟส-สเปซตามขวางของอิเล็กตรอน (x' vs x และ y' vs y) พร้อมทั้งพลังงานจลน์ของแต่ละอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งทางออกของปืนอิเล็กตรอน ในการคำนวณใช้กระแสคาโทด 2.9 A และ อิเล็กตรอน 50,000 อนุภาคแมคโคร ซึ่งแต่ละอนุภาคแมคโครแทนอิเล็กตรอนเดี่ยวจำนวน 31,700 ตัว

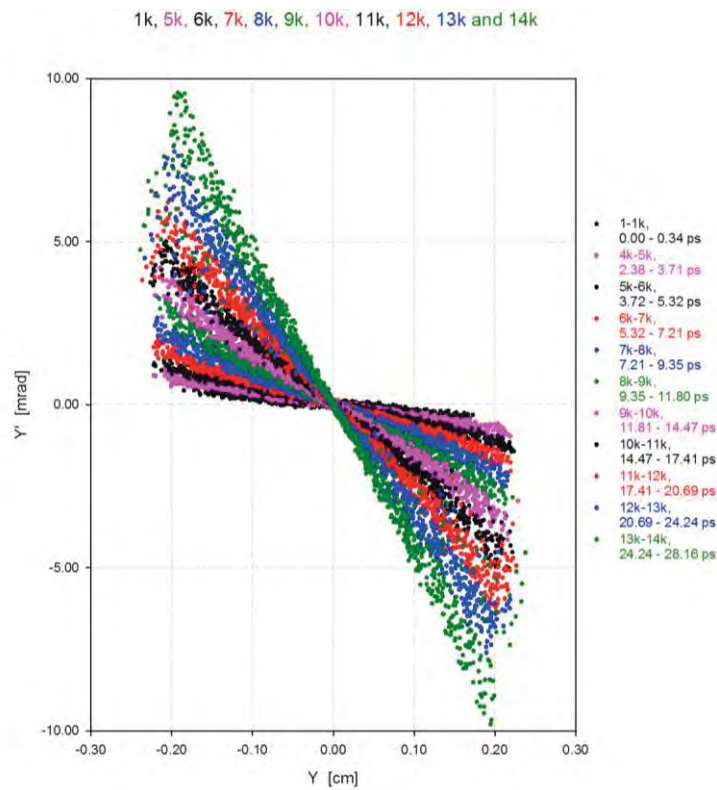
input file ของ โปรแกรม PARMELA

```
run 1 2 2856. -0.004212 1.6457e-7
title SURIYA RF-gun
INPUT 9 50000 6. .3 3600. 180.
CATHODE 0 0.3 1 0 0.10971
DRIFT 0 1 1
CELL 3.1607 1. 1 0. 21.24 1 5 -1
cfield 1
HC-F.t7
CELL 5.67478 1. 1 180. 40 2 10. -1
cfield 2
FC-F.t7
DRIFT 0 1 1
zlimit 3.2
zout
OUTPUT 1
scheff 2.9 1.0 9.02 20 200 0 0 5 1.5 0 0.0
start 180. 0.1 15000 10 1000
end
```

นำผลที่ได้จากโปรแกรม PARMELA มาวิเคราะห์เฟส-สเปซ $x-x'$ โดยพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาค เรียงตามระดับพลังงาน (ดังแสดงในรูปที่ 11) และ การวิเคราะห์ เฟส-สเปซ $y-y'$ แสดงในรูปที่ 12 โดยจะเห็นการหมุนของเฟส-สเปซแบบสไลซ์อย่างชัดเจน ตารางที่ 1 แสดงค่า projected emittance จาก อิเล็กตรอนประมาณ 9025 อนุภาคแมคโคร โดยเทียบเท่าได้กับการใช้ energy slit กรองพลังงาน ในระบบจริง การคำนวณ projected emittance ของลำอิเล็กตรอนใช้สมการ $\varepsilon_x = \sqrt{\langle x_i^2 \rangle \langle x_i'^2 \rangle - \langle x_i x_i' \rangle^2}$ และได้ศึกษาลักษณะการกระจายของเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของหน่วยวิจัย SUNSHINE, Stanford Synchrotron Research Laboratory (SSRL), Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) (แสดงในรูปที่ 13) พบการบิดหมุนของเฟส-สเปซที่แตกต่างไป ทั้งนี้สังเกตเห็นว่าเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun ของศูนย์ฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีค่าการลู่ออก (divergence) ที่น้อยมาก ตามข้อจำกัดสำหรับการออกแบบ และพบว่า การหมุนของเฟส-สเปซมีลักษณะที่ซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากแต่ละเฟส-สเปซไม่พบลักษณะของการบิด ดังเช่นในเฟส-สเปซของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนของ SUNSHINE, SSRL ที่มีลักษณะคล้ายตัวอักษร S คือมีการบิดโค้งตรงส่วนปลาย โดยเมื่อพิจารณาเฟส-สเปซที่ละช่วงเวลาหรือเฟส-สเปซแบบสไลซ์ (แสดงในรูปที่ 14 และ 15) จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของ x' และ x ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun ในแต่ละช่วงเวลานั้นๆ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (linear) ซึ่งจะได้ใช้ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นต้นแบบ สำหรับการพัฒนาระบบการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ



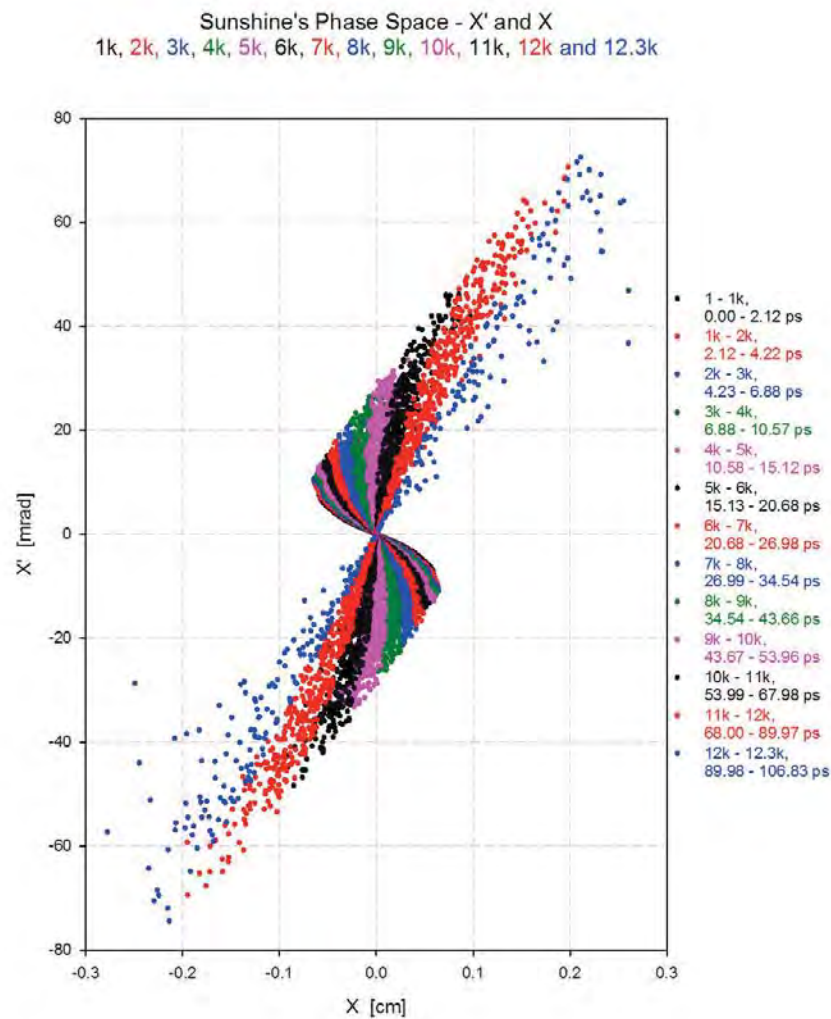
รูปที่ 11 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาคภายในหัวพัลส์



รูปที่ 12 เฟส-สเปซ $y-y'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาคภายในหัวพัลส์

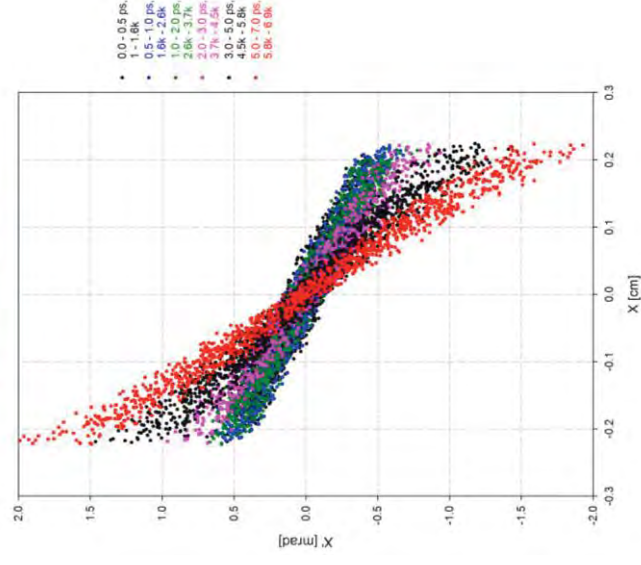
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA
สำหรับลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun

		Projected ε_{rms} (mm.mrad)	Normalized ε_{rms} (mm.mrad)	Maximum kinetic energy (MeV)
Gun exit	(x)	6.406	27.673	2.06
	(y)	6.423	27.749	

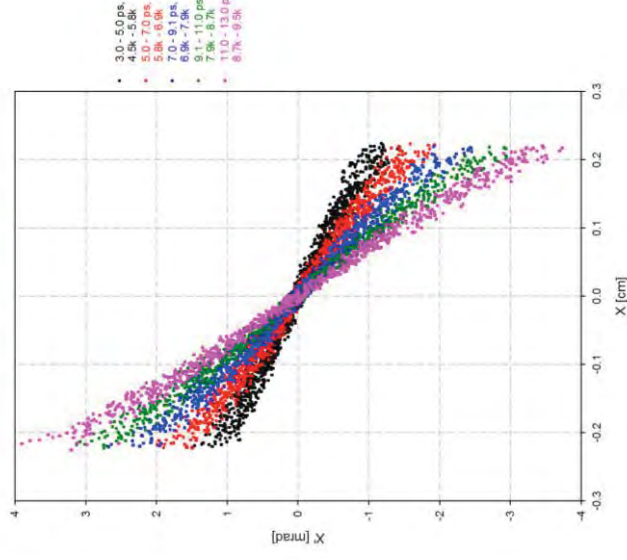


รูปที่ 13 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนของ SUNSHINE, SSRL
เมื่อพิจารณาที่ละกลุ่มของ 1000 อนุภาคภายในหัวพัลส์

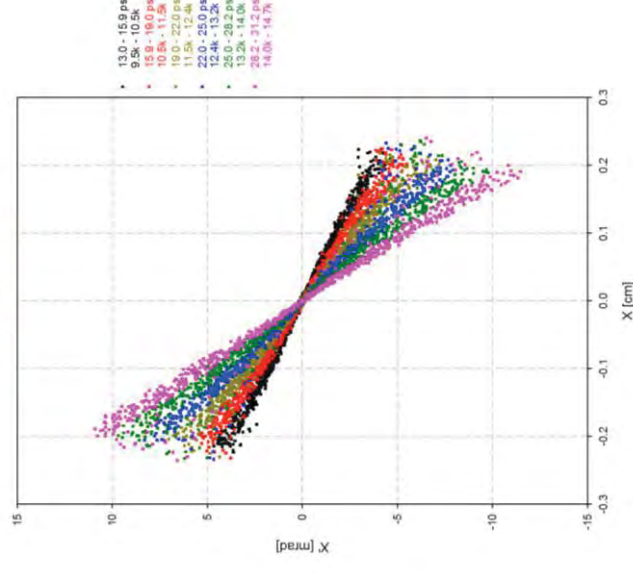
0.0 - 1.0 ps (0.5-ps interval), 1.0 - 3.0 ps (1-ps interval)
and 3.0 - 7.0 ps (2-ps interval)



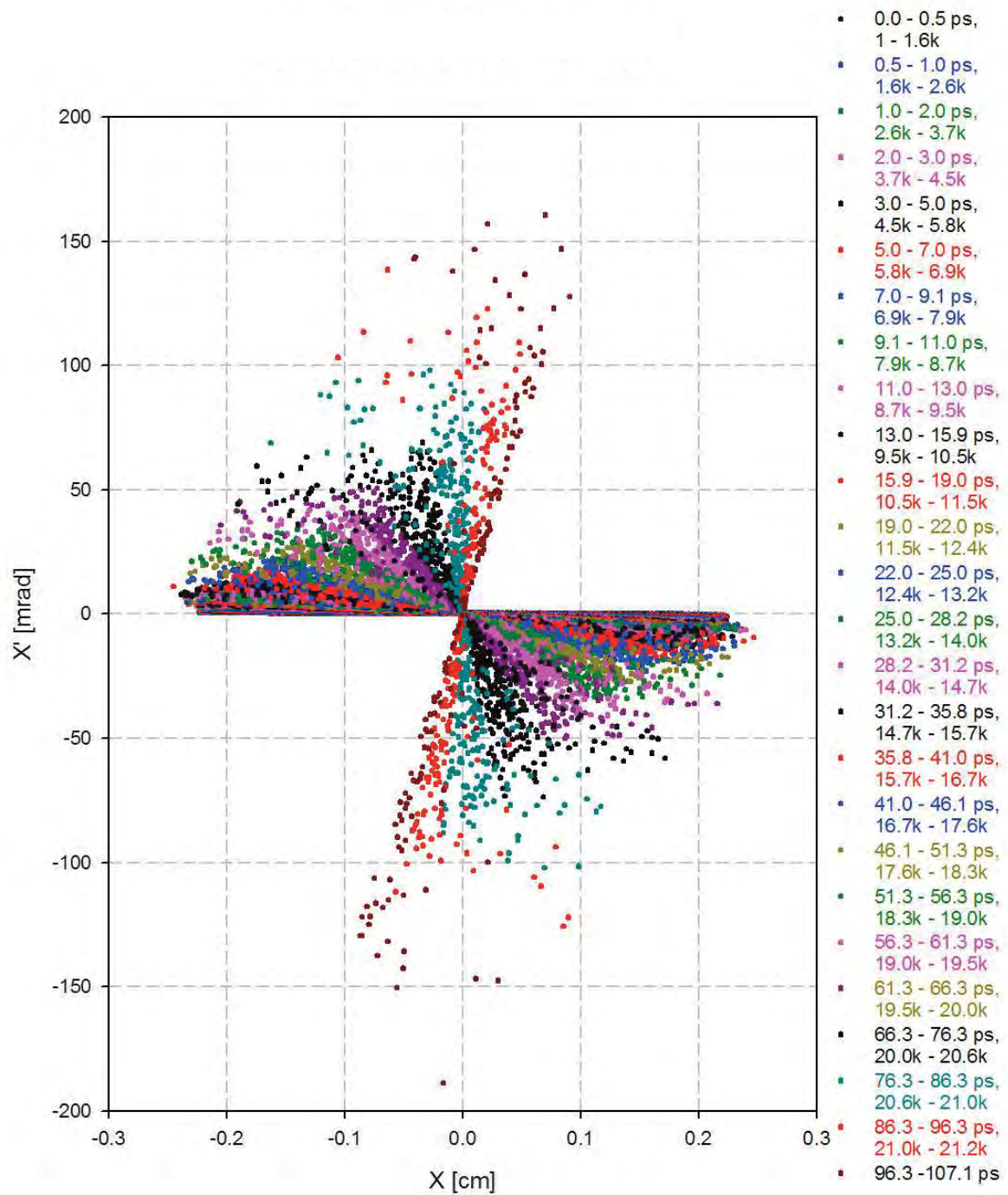
3.0 - 13.0 ps (2-ps interval)



13.0 - 31.2 ps (3-ps interval)



รูปที่ 14 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน PBP-CMU RF-gun เมื่อพิจารณาที่ละช่วงเวลา



รูปที่ 15 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของอิเล็กตรอนเมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ ตลอดหัวพัลส์

2.2 การศึกษาการกระจายของเฟส-สเปซ เมื่อใช้สนามจาก แม่เหล็กโซลินอยด์

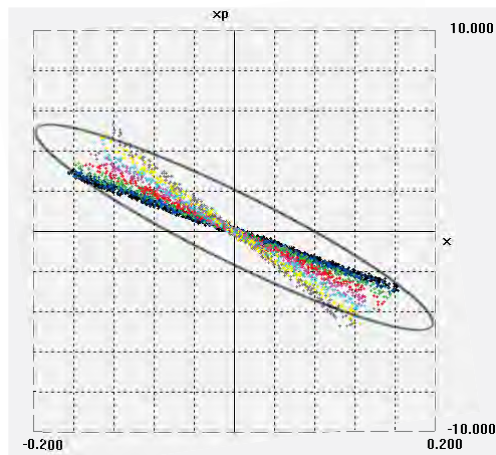
ส่วนใหญ่แล้ว แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนความสว่างสูง นิยมสร้างขึ้นเพื่อใช้งานร่วมกับแม่เหล็กโซลินอยด์ [6] ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่และเฟส-สเปซของอิเล็กตรอน จากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแม่เหล็กโซลินอยด์ โดยการใช้การคำนวณด้วย transformation matrix และใช้แม่เหล็กโซลินอยด์ที่มีความยาวยังผล (effective length) 3 ซม. วางต่อจากทางออกของ PBP-CMU RF-gun

transformation matrix ของแม่เหล็กโซลินอยด์ความยาว L_s [14]

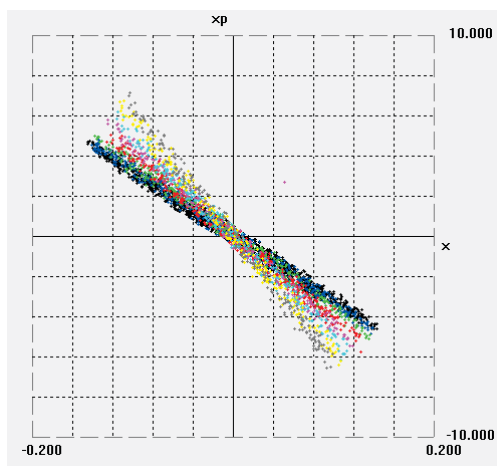
$$\mathcal{M}_{\text{sol}}(0|L) = \begin{pmatrix} \cos^2 \Phi & \frac{1}{S} \sin 2\Phi & \frac{1}{2} \sin 2\Phi & \frac{2}{S} \sin^2 \Phi \\ -\frac{S}{4} \sin 2\Phi & \cos^2 \Phi & -\frac{S}{2} \sin^2 \Phi & \frac{1}{2} \sin 2\Phi \\ -\frac{1}{2} \sin 2\Phi & -\frac{2}{S} \sin^2 \Phi & \cos^2 \Phi & \frac{1}{S} \sin 2\Phi \\ \frac{S}{2} \sin^2 \Phi & -\frac{1}{2} \sin 2\Phi & -\frac{S}{4} \sin 2\Phi & \cos^2 \Phi \end{pmatrix}.$$

$$\text{solenoid strength } S = \frac{eB_s}{p} \quad \text{and} \quad \Phi = \frac{1}{2} SL_s.$$

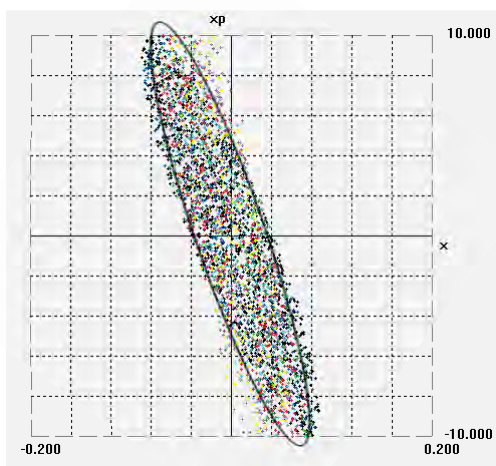
ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 16 โดยแสดงเฟส-สเปซ ของแต่ละ 1 ps slice ของอิเล็กตรอน วงรีในภาพแสดง phase-space ellipse โดยประมาณ ที่ครอบคลุมทุก x และ x' ซึ่งพื้นที่ของวงรีสัมพันธ์กับอิมิตแตนซ์ จะเห็นได้ว่า แม่เหล็กโซลินอยด์ ลดอิมิตแตนซ์ในลักษณะที่กระจายตำแหน่ง $x-x'$ ให้เต็มพื้นที่ว่างของวงรี (รูปที่ 16 (ค)) ผลลัพธ์ก็คือ phase-space ellipse ที่เล็กลง ซึ่งต่างจากการชดเชยผลจากการหมุนของเฟส-สเปซ ตามแนวทางที่ต้องการในโครงการวิจัยนี้



(ก)



(ข)



(ค)

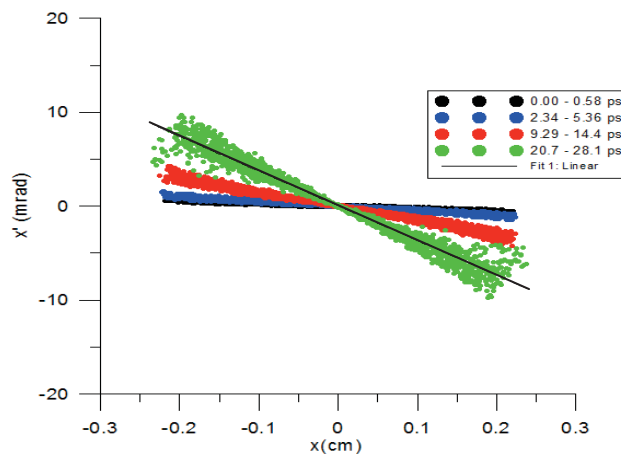
รูปที่ 16 เฟส-สเปซ (1ps slices) ของอิเล็กตรอน (ก) ที่ 13 ซม. หลังจากทางออกของ SURIYA RF-gun

(ข) ที่ 10 ซม. หลังจากแม่เหล็กโซลินอยด์(ยาว 3 ซม.) ความเข้ม 1000Gauss

(ค) ที่ 10 ซม. หลังจากแม่เหล็กโซลินอยด์(ยาว 3 ซม.) ความเข้ม 2000Gauss

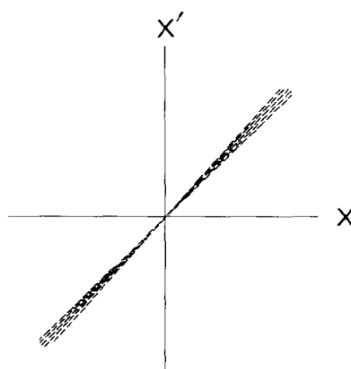
2.3 การวิเคราะห์การกระจายของเฟส-สเปซ

เมื่อพิจารณา เฟส-สเปซ $x-x'$ ของแต่ละ slice พบว่าแต่ละกลุ่มเฟส-สเปซ จะเกาะตัวอยู่บนเส้นตรงเส้นหนึ่ง (ดังตัวอย่างในรูปที่ 17) สอดคล้องกับคำอธิบายของ K.J. Kim [11] ที่แสดงไว้ว่า เฟส-สเปซตามขวางภายใต้สนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่ (ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง z และ เวลา t แต่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งและมุมตามขวาง) เช่น เมื่ออิเล็กตรอนผ่านรอยต่อของ cavity มาสู่บริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก หรือที่ทางออกของ cavity จะได้ว่า $p_x = \beta \gamma x' = (\alpha k \sin \phi) x$, เมื่อ ϕ เป็น เฟสของ RF ณ ทางออกของ cavity ส่งผลให้ได้ เฟส-สเปซ ของ $x-x'$ ได้เป็นกลุ่มของเส้นตรงที่มีความชันต่างกันดังรูปที่ 18 ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของ slope หรืออัตราส่วน x'/x ของเฟส-สเปซสำหรับแต่ละสไลซ์เพื่อหาการหมุนของเฟส-สเปซ โดยรูปที่ 17 แสดงการใช้ linear fit จากข้อมูล (x, x') ของเฟส-สเปซในช่วงเวลาที่ 20.7 – 28.1 ps และอัตราส่วน x'/x และ y'/y หรือความชันของ linear fit สำหรับแต่ละเฟส-สเปซแบบสไลซ์ ตลอดทั้งพัลส์ แสดงดังกราฟในรูปที่ 19 โดยของทั้ง x และ y มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ข้อมูล time response ดังกล่าวจะนำไปใช้สำหรับการศึกษาเพื่อทำการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซต่อไป

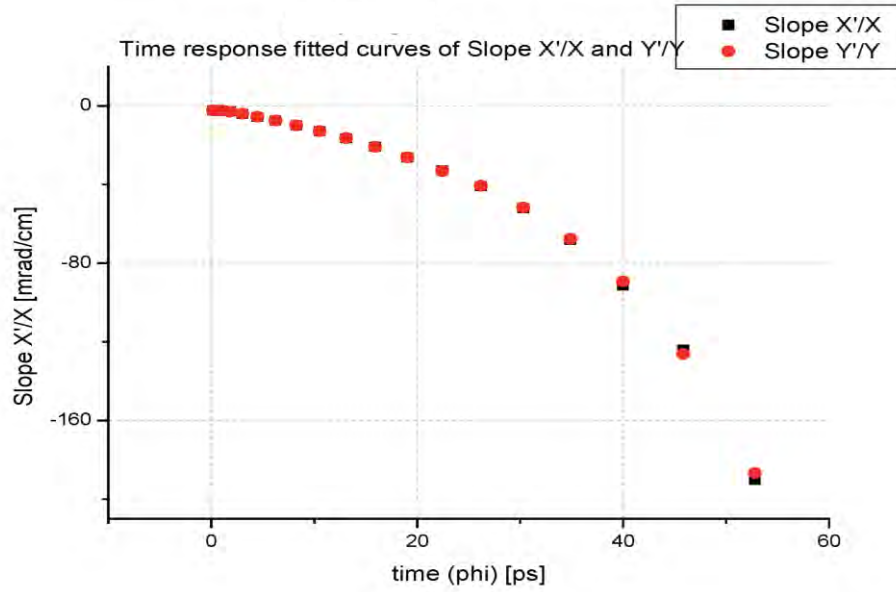


รูปที่ 17 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของแต่ละสไลซ์

และการหาอัตราส่วน x'/x ของแต่ละสไลซ์ โดยใช้ linear fit



รูปที่ 18 เฟส-สเปซ ภายใต้สนามอาร์เอฟที่ไม่คงที่ จากการวิเคราะห์ของ K.J. Kim [11]



รูปที่ 19 อัตราส่วน x'/x และ y'/y หรือความชันของ linear fit สำหรับแต่เฟส-สเปซแบบสไลซ์ ตลอดทั้งพัลส์

2.4 แนวทางการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ ด้วยสนามจาก cavity

เมื่อได้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟส-สเปซตลอดห้วงพัลส์กับเวลา พิจารณาว่าหากมีสนามแม่เหล็ก $B_\phi(r)$ จะสามารถเบนอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่ง r โดยหากการเบนด์กล่าวเหมาะสมทั้งในด้าน ขนาดและเวลา จะทำให้เฟส-สเปซตลอดห้วงพัลส์เรียงในแนวเดียวกันได้ดีขึ้น ซึ่งจะเป็นการลดอิมิตแตนซ์ปรากฏได้

พิจารณาการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TM_{01p} ใน cylindrical cavity รัศมี a [15]

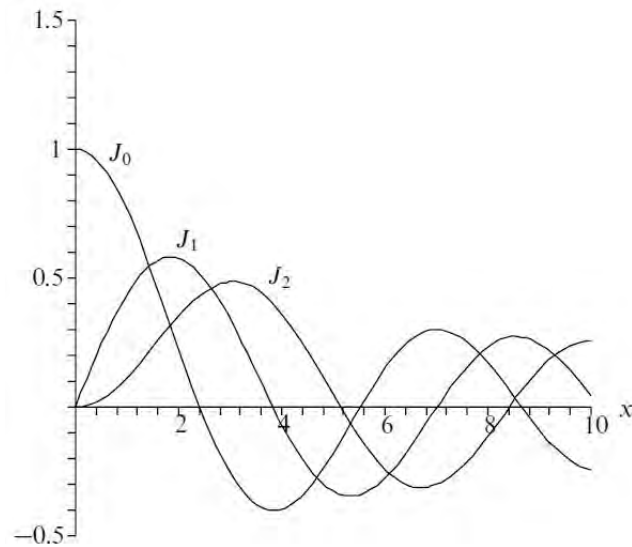
$$E_z = E_o J_o(k_1 r) \cos \frac{p\pi z}{l} e^{i\omega t}, \quad (1)$$

$$E_r = \frac{-p\pi}{l} \frac{a}{x_1} E_o J_o'(k_1 r) \sin \frac{p\pi z}{l} e^{i\omega t}, \quad (2)$$

$$B_\phi = -j\omega \frac{a}{x_1 c^2} E_o J_o'(k_1 r) \cos \frac{p\pi z}{l} e^{i\omega t}. \quad (3)$$

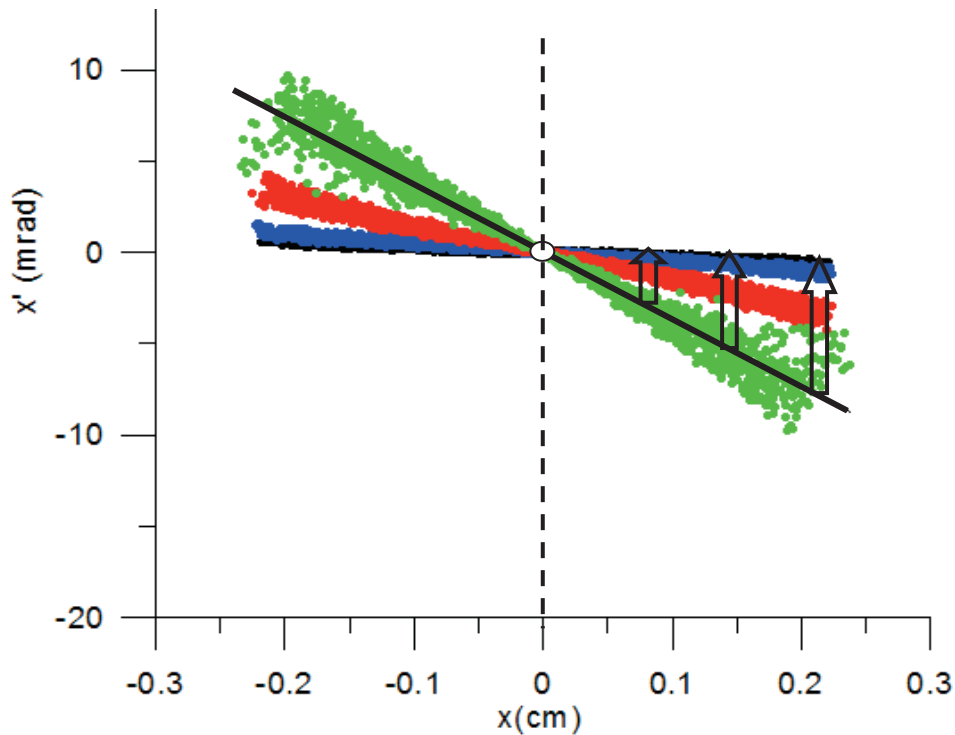
โดยฟังก์ชัน $J_0(x)$ คือ zero order Bessel function of the first kind และกราฟแสดงค่าของฟังก์ชันแสดงในรูปที่ 20 [16] ค่าอนุพันธ์ หาได้จาก

$$\frac{d}{dx}[x^\nu J_\nu(x)] = x^\nu J_{\nu-1}(x). \quad (4) \quad \text{และ} \quad J_{-\nu}(x) = (-1)^\nu J_\nu(x). \quad (5)$$



รูปที่ 20 Bessel functions: $J_0(x)$, $J_1(x)$, $J_2(x)$. [16]

นั่นคือ $J'_0(kr) = -kJ_1(kr)$. ซึ่งจากสมการ (3) แสดงว่าการกระจายของสนามแม่เหล็ก $B_\phi(r)$ ตามแนวรัศมี เป็นไปตามฟังก์ชัน $J_1(x)$ คือมีค่าเป็นศูนย์ที่ $r=0$ และค่าเพิ่มขึ้นตามระยะ r เหมาะสมกับการนำมาใช้เพื่อปิดเฟส-สเปซ โดยให้แรงที่มากกว่าแก่นุภาคที่ไกลจากศูนย์กลาง ($x=0$) ดังแสดงในแผนภาพ รูปที่ 21 สำหรับการปิดชดเชยเฟส-สเปซ กลุ่มอนุภาคที่แสดงด้วยสีเขียว



รูปที่ 21 เฟส-สเปซ $x-x'$ ของแต่ละสไลซ์ และ
ขนาดของแรง (ประมาณด้วยขนาดของลูกศร) ที่ต้องการ แปรตาม ระยะ x จากศูนย์กลาง

ส่วนความเหมาะสมของเวลา พิจารณาแต่ละเฟส-สเปซ แบบสไลซ์ ซึ่งจะมี slope ของ linear fit $x-x'$ (รูปที่ 17 หรือ รูปที่ 21) เท่ากับ x'/x ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า x'/x นั้นเป็นมุมที่เราจะต้องเบนอิเล็กตรอนกลับมา จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$x'/x = \frac{e \left[\int B_\phi dz \right]_{\text{Ref}}}{p}, \quad \left[\int B_\phi dz \right]_{\text{Ref}} = \frac{(x'/x)p}{e} \quad (6)$$

โดยค่า $\left[\int B_\phi dz \right]_{\text{Ref}}$ นี้ควรเท่ากับค่าที่อิเล็กตรอนได้พบใน cavity

สำหรับการใช้สนามจาก cavity ในการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ ค่า $\int B_\phi dz$ นั้น จะหาได้ โดยเริ่มจากการประมาณว่าอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน cavity เป็นเส้นตรงในแกน z ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TM_{01p} ตามสมการ (3) สำหรับโหมด TM_{010} นั้นสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง $r = r_0$ สามารถหาได้จาก

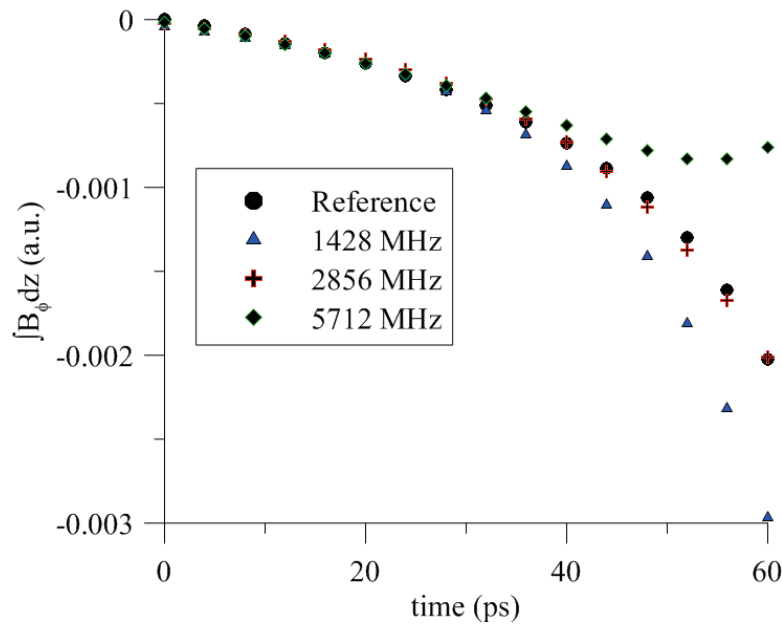
$$B_\phi = C_1 \sin(\omega(t+t_0) + \phi_0) \quad (7)$$

เมื่อ t_0 คือเวลาที่อิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่ cavity

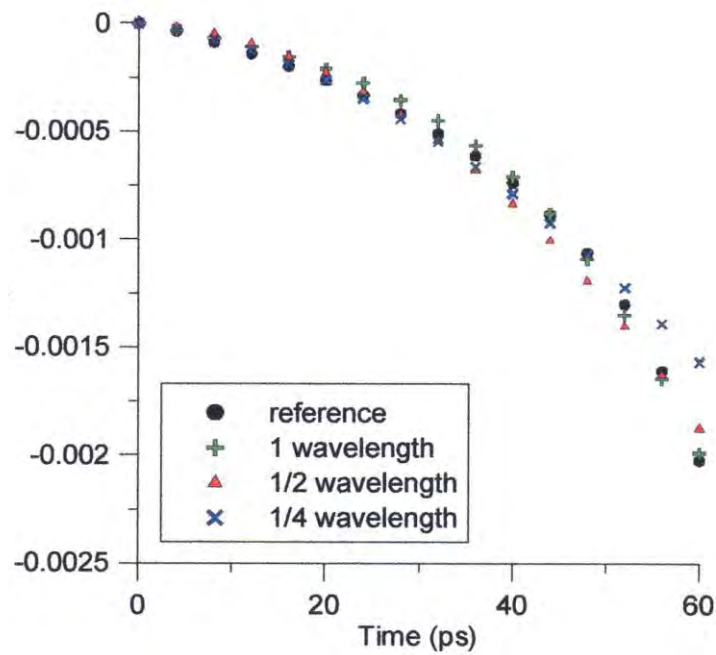
และ ϕ_0 คือเฟสของสนามแม่เหล็กขณะที่อิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่ cavity ส่วนเทอมที่เหลือเป็นค่าคงที่ทำการอินทิเกรตตามแนว z จะได้

$$\int_0^l B_\phi dz = C\beta \left[\cos(\omega(t+t_0) + \phi_0) \right]_{t=0}^{t=\frac{l}{\beta c}} \quad (8)$$

เมื่อกำหนดด้วยสมการที่ (6) จะได้สนามที่เราต้องใช้เบนอิเล็กตรอนกลับมา (reference) และ เมื่อกำหนดด้วยสมการที่ (8) จะได้สนามของ cavity ที่ทำให้อิเล็กตรอนเบนกลับ ทำการเปรียบเทียบผลทั้งสอง สำหรับ TM_{010} cavity ยาว $l = \lambda$ และความถี่สั้นพ้องของ cavity เป็น 1428 MHz, 2856 MHz และ 5712 MHz และแสดงในรูปที่ 22 พบว่าทั้งสามความถี่ให้ผลดี ในช่วง 30 ps แรก โดย cavity ความถี่ 2856 MHz ให้สนามที่สอดคล้องที่สุด และได้ทำการศึกษา cavity ความยาวค่าอื่นเมื่อใช้ cavity ความถี่ 2856 MHz แทนค่า $l = \lambda, \frac{1}{2}\lambda$ และ $\frac{1}{4}\lambda$ หลังจากทำการปรับค่าคงที่ให้เหมาะสมแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 23 ซึ่งจะเห็นว่าความยาวของ cavity ก็ส่งผลต่อการบิดกลับของเฟส-สเปซ



รูปที่ 22 เปรียบเทียบสนามที่เราต้องใช้เบนอิเล็กตรอนกลับมา (reference) และ การเบนอิเล็กตรอน ด้วยสนามแม่เหล็ก ของ TM_{010} cavity เมื่อใช้ $l = \lambda$ และความถี่เป็น 1428, 2856 และ 5712 MHz



รูปที่ 23 เปรียบเทียบสนามที่เราต้องใช้เบนอิเล็กตรอนกลับมา (reference) และ การเบนอิเล็กตรอน ด้วยสนามแม่เหล็ก ของ TM_{010} cavity กรณี $l = \lambda, \frac{1}{2}\lambda$ และ $\frac{1}{4}\lambda$ เมื่อใช้ความถี่ 2856 MHz

2.5 การศึกษาการชดเชยการบิดของเฟส-สเปซ ด้วยสนามจาก cavity

ทำการศึกษาการเคลื่อนที่และเฟส-สเปซ ของอิเล็กตรอน จากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ PBP-CMU RF-gun ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ของ cavity โดยใช้โปรแกรม SUPERFISH คำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน cavity จากนั้นใช้โปรแกรม PARMELA ในการติดตามการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของปืนอิเล็กตรอนอาร์เอฟ แล้วผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ RF cavity ที่มีความถี่สั้นพ้อง 2856 MHz มีความยาวของ RF cavity คือ 5.249 และ 10.497 เซนติเมตร (0.5 เท่า และ 1 เท่าของความยาวคลื่น) และทำงานในโหมด TM010 และ TM011

ตัวอย่าง input file ของ โปรแกรม SUPERFISH สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน TM cavity

2856-MHz TM_010 Cavity

\$reg kprob=1, dx=0.1, dy=0.1, freq=2856.0,

xdri=0.0, ydri=2, beta=0.0, nbsrt=1, nbslf=1, rmass=-1 \$

\$po x=0.0 ,y=0.0\$

\$po x=0.0,y=4.018\$

\$po x=10.497,y=4.018\$

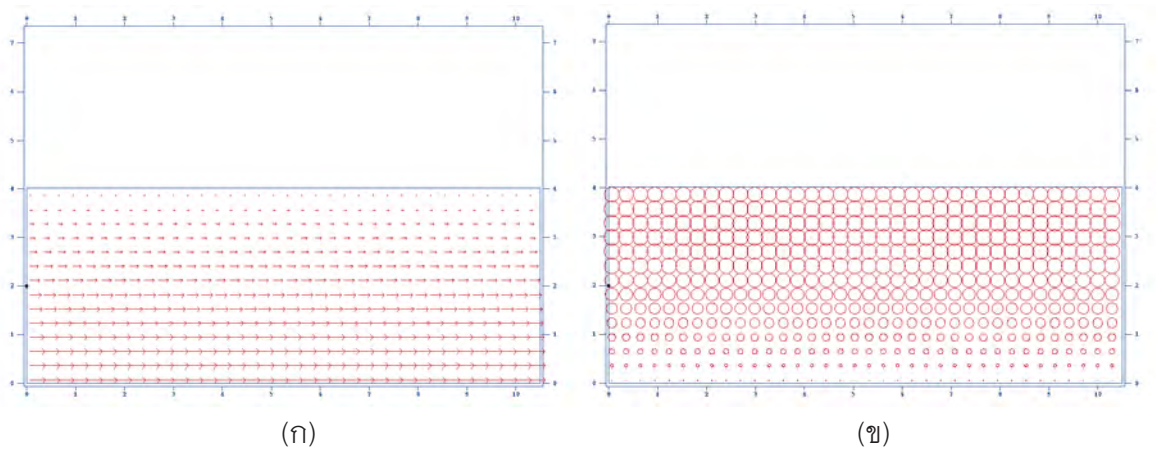
\$po x=10.497,y=0.0\$

\$po x=0.0,y=0.0 \$

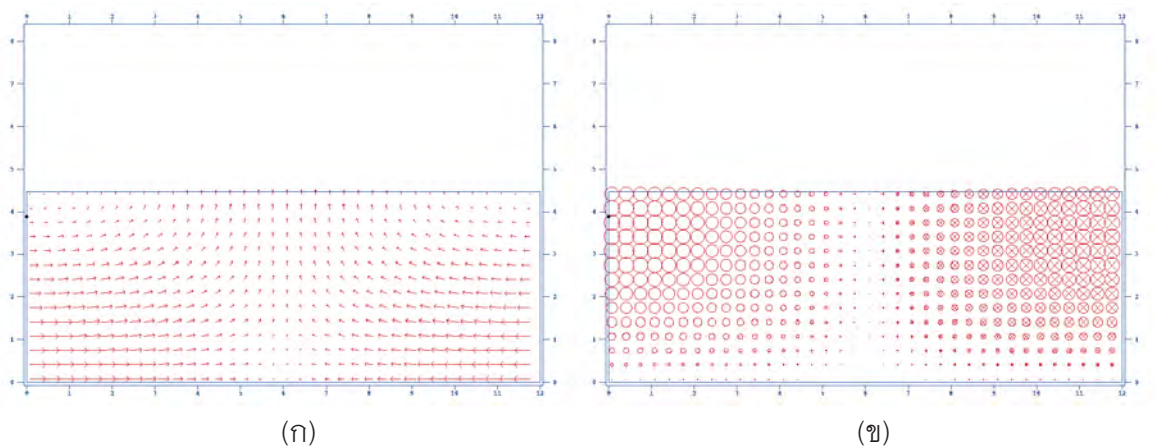
อินพุตที่ใช้ในตัวอย่างเป็น RF-cavity ทรงกระบอกที่มีความยาว 10.10497 เซนติเมตร และมีรัศมี 4.018 เซนติเมตร จากการคำนวณจะพบว่า RF cavity นี้จะสั้นพ้อง ที่ความถี่ 2856 MHz ในโหมด TM010 ค่าความยาวและรัศมีของ 2856 MHz RF cavity ที่ใช้ในการศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 2 และผลการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม SUPERFISH ได้แสดงไว้ในรูปที่ 24 และรูปที่ 25

ตารางที่ 2 ขนาดของ 2856 MHz RF cavity ที่ใช้ในการศึกษา

cavity	cavity length (cm)	cavity radius (cm)
$1-\lambda_{s\text{-band}}\text{-TM010}$	10.497	4.018
$\frac{1}{2}-\lambda_{s\text{-band}}\text{-TM011}$	5.249	1140.00
$1-\lambda_{s\text{-band}}\text{-TM011}$	10.497	4.640



รูปที่ 24 การกระจายของ (ก) สนามไฟฟ้า และ (ข) สนามแม่เหล็ก ใน $1-\lambda_{s\text{-band}}\text{-TM}_{010}$ cavity

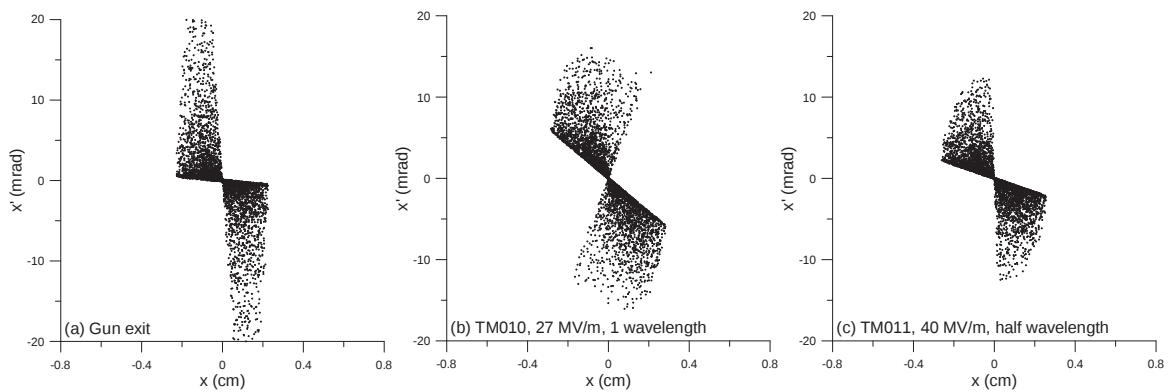


รูปที่ 25 การกระจายของ (ก) สนามไฟฟ้า และ (ข) สนามแม่เหล็ก ใน $1-\lambda_{s\text{-band}}\text{-TM}_{011}$ cavity

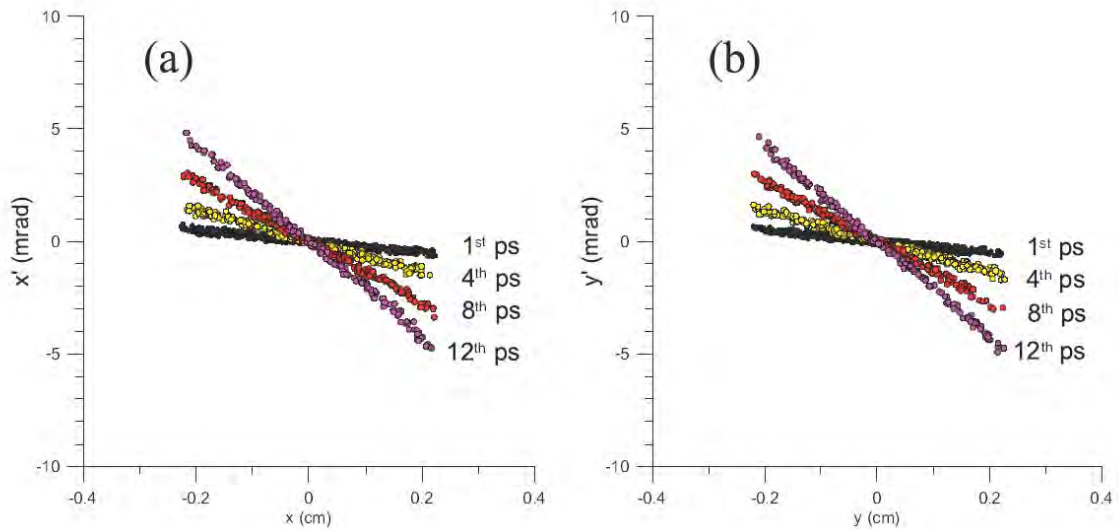
การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ จะถูกนำไปใช้โดยโปรแกรม PARMELA โดยนำ RF cavity ไปวางต่อจาก RF-gun โดยไม่มี drift space รวมทั้งทดลองแปรค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน RF cavity จนได้ apparent emittance มีค่าน้อยที่สุดในการคำนวณแต่ละชุด ซึ่งพบว่าเป็น 27 MV/m สำหรับ RF cavity ยาว 1 ความยาวคลื่น และ 40 MV/m สำหรับ 0.5 ความยาวคลื่น โดยคำนวณ apparent emittance ของลำอิเล็กตรอนได้จากสมการ $\varepsilon_x = \sqrt{\langle x_i^2 \rangle \langle x_i'^2 \rangle - \langle x_i x_i' \rangle^2}$ และคำนวณจากอนุภาคแมคโคร 9025 ตัวแรก ที่ผ่านออกจาก RF-gun (ครอบคลุมเวลา 50 – 60 ps) ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 26 ส่วนรูปที่ 27 ถึงรูปที่ 30 แสดงเฟส-สเปซแบบสไลซ์ สำหรับ 12 ps แรก

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA

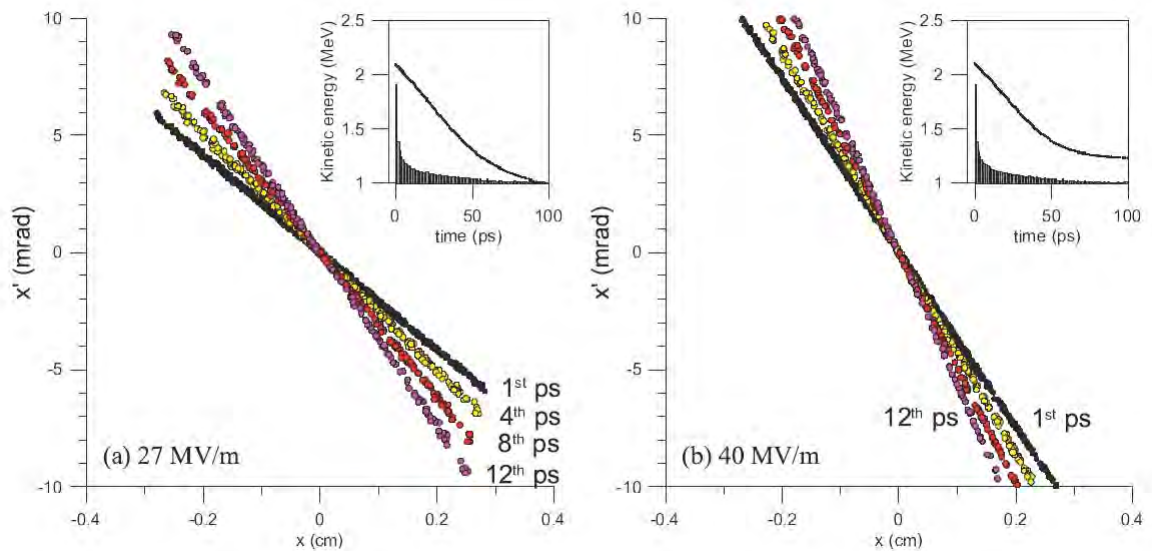
	Projected ε_{rms} (mm.mrad)	Normalized ε_{rms} (mm.mrad)	Maximum kinetic energy (MeV)
Gun exit, $x-x'$	6.406	27.673	2.06
Drift $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$	6.423	27.749	2.06
Drift $1-\lambda_{s\text{-band}}$	6.404	27.667	2.06
$1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 27 MV/m	4.788	21.340	2.09
$1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 40 MV/m	5.507	24.943	2.11
$1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 27 MV/m	5.174	31.571	3.46
$1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 40 MV/m	5.113	35.895	4.15
$1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 27 MV/m	3.292	20.105	2.79
$1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 40 MV/m	2.829	19.687	3.16



รูปที่ 26 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อออกจากปืนอิเล็กตรอน, เมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 RF cavity และ $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity

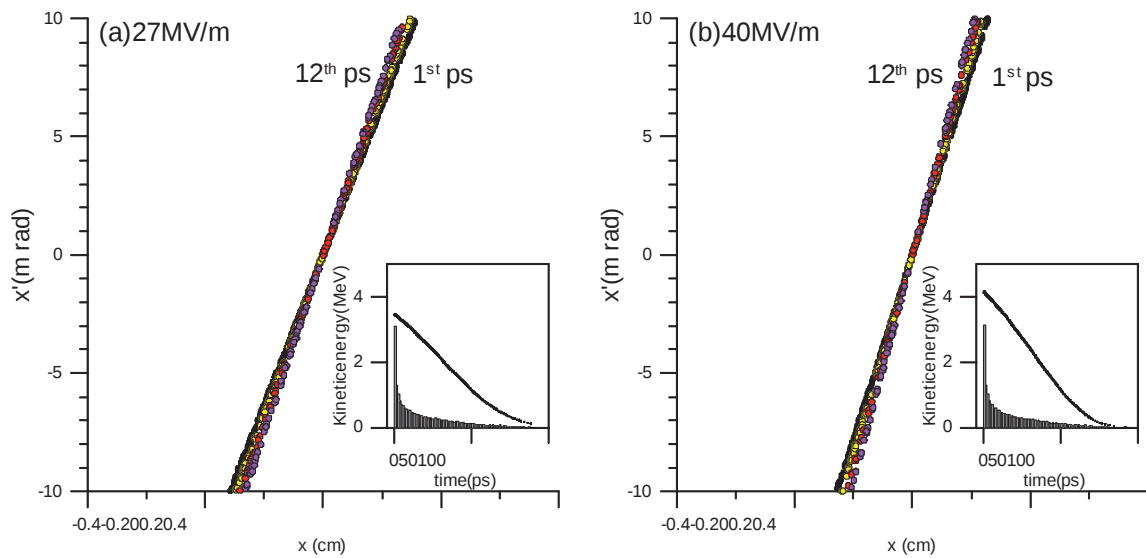


รูปที่ 27 การกระจายตัวในเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนก่อนเข้าสู่ RF cavity

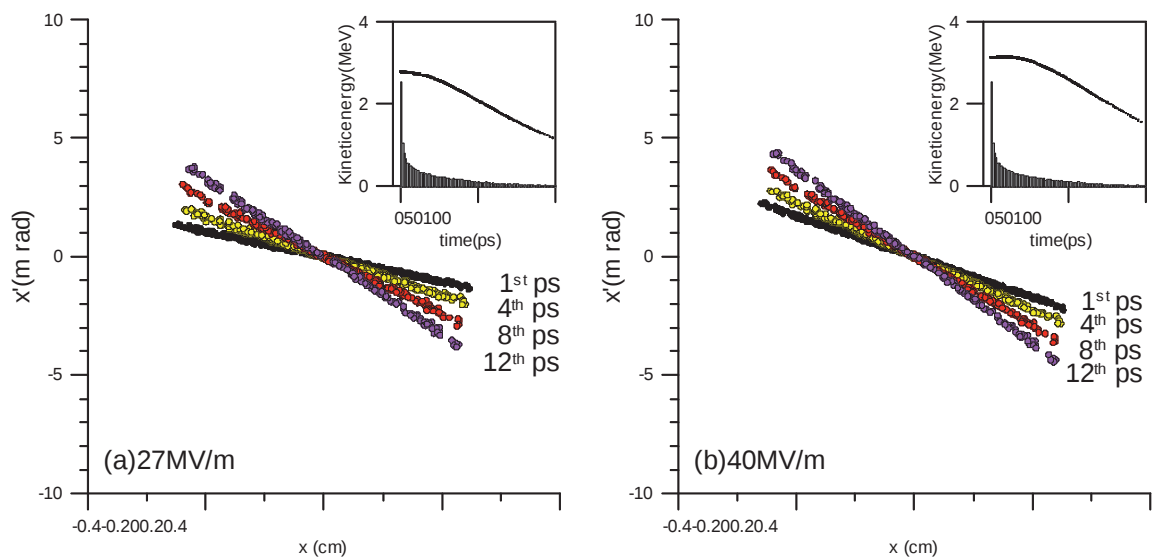


รูปที่ 28 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 RF cavity

จากผลการคำนวณพบว่า $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 cavity ให้ค่า apparent emittance ต่ำที่สุด แต่ cavity ความยาวตามที่กำหนดนั้น จำเป็นจะต้องมี ขนาดใหญ่มากเพื่อให้ มีความถี่สั้นพ้องที่ 2856 MHz ส่วน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM010 cavity นั้นให้ค่า apparent emittance น้อยรองลงมาโดยมีขนาดที่สามารถสร้างได้จริงและพลังงานของลำอิเล็กตรอนไม่เปลี่ยนไปมากนักเทียบกับพลังงานก่อนเข้า cavity สำหรับ $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 cavity นั้นนอกจากจะไม่สามารถลด apparent emittance ได้ดี แล้วยังเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิเล็กตรอนไปมากอีกด้วย



รูปที่ 29 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity

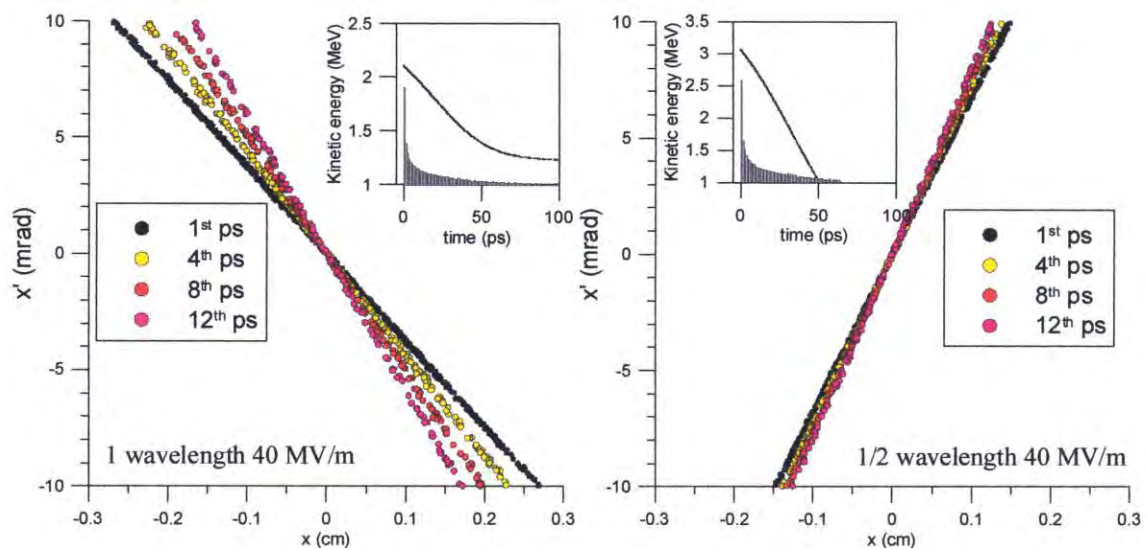


รูปที่ 30 การกระจายตัวในเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนเมื่อผ่าน $1/2-\lambda_{s\text{-band}}$ -TM011 RF cavity

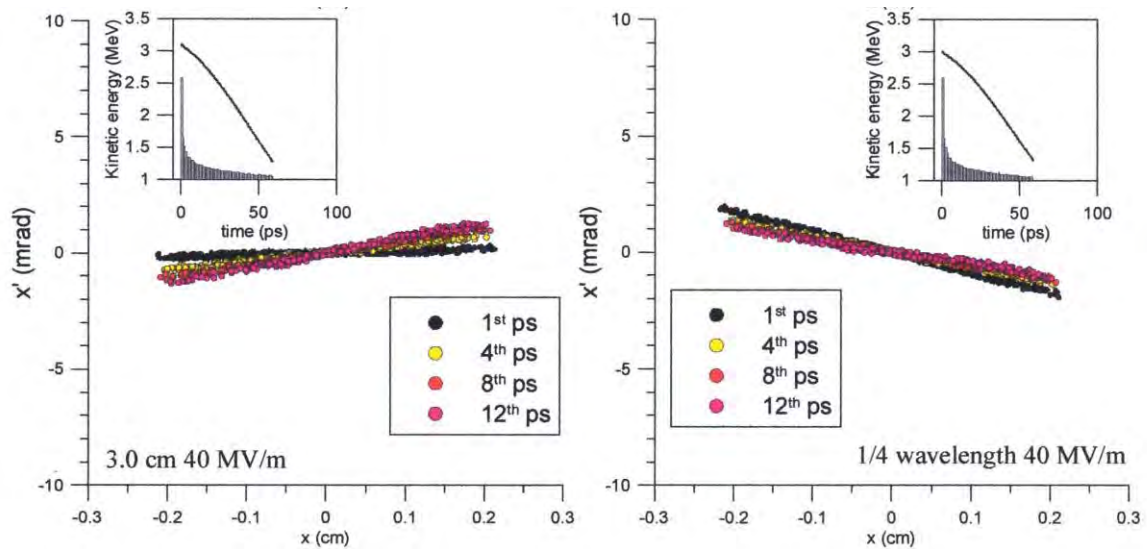
ได้ทดสอบแปรค่าความยาวของ TM010 cavity โดยวาง cavity ต่อจาก RF-gun โดยไม่มี drift space ใช้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน TM010 cavity เท่ากับ 40 MV/m ผลการคำนวณจาก PARMELA แสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 31 สำหรับการแปรค่าความยาวของ TM011 cavity ทำได้ยาก เพราะมีความยุ่งยากในการทำให้ cavity มีความถี่สั่นพ้องตามต้องการ

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA
เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน TM010 cavity 40 MV/m ที่มีความยาวต่าง ๆ กัน

Cavity length (m)	Projected ε_{rms} (mm.mrad)	Normalized ε_{rms} (mm.mrad)	Maximum kinetic energy (MeV)
Gun exit	6.4059	27.6731	2.06
2.4	2.2566	13.6917	2.92
2.5	2.2029	13.5523	2.96
2.6242 ($\frac{1}{4}\lambda$)	2.1461	12.9761	3.00
2.7	2.1167	13.3369	3.02
3.0	2.0367	13.1675	3.10
3.5	2.0203	13.2557	3.19
5.2485 ($\frac{1}{2}\lambda$)	3.0532	16.5409	3.06
10.4969 (1λ)	5.5070	24.9430	2.11

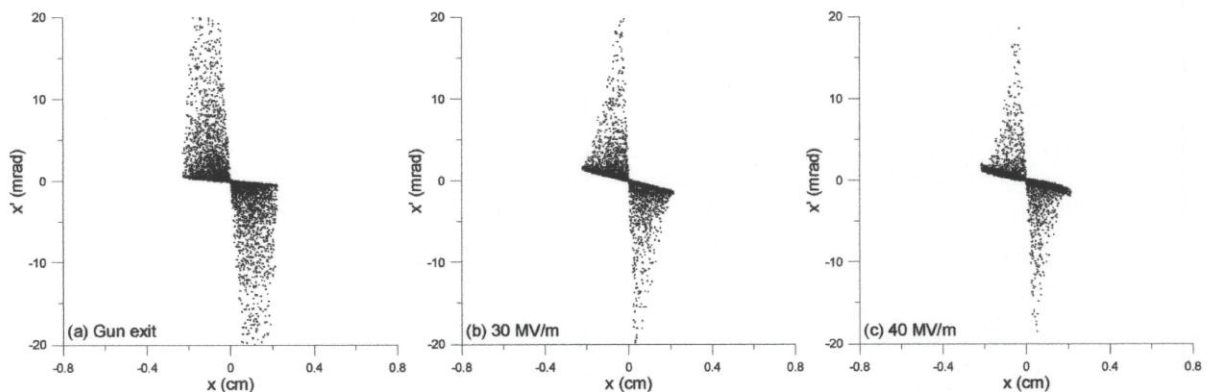


รูปที่ 31 การกระจายของลำอิเล็กตรอนในเฟส-สเปซ เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน
TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาว 10.496 cm (1λ) และ 5.2485 cm ($\frac{1}{2}\lambda$)



รูปที่ 32 การกระจายของลำอิเล็กตรอนในเฟส-สเปซ เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งผ่าน TM010 2856 MHz cavity ที่มีความยาว 3.0 cm และ 2.6242 cm ($\frac{1}{4}\lambda$)

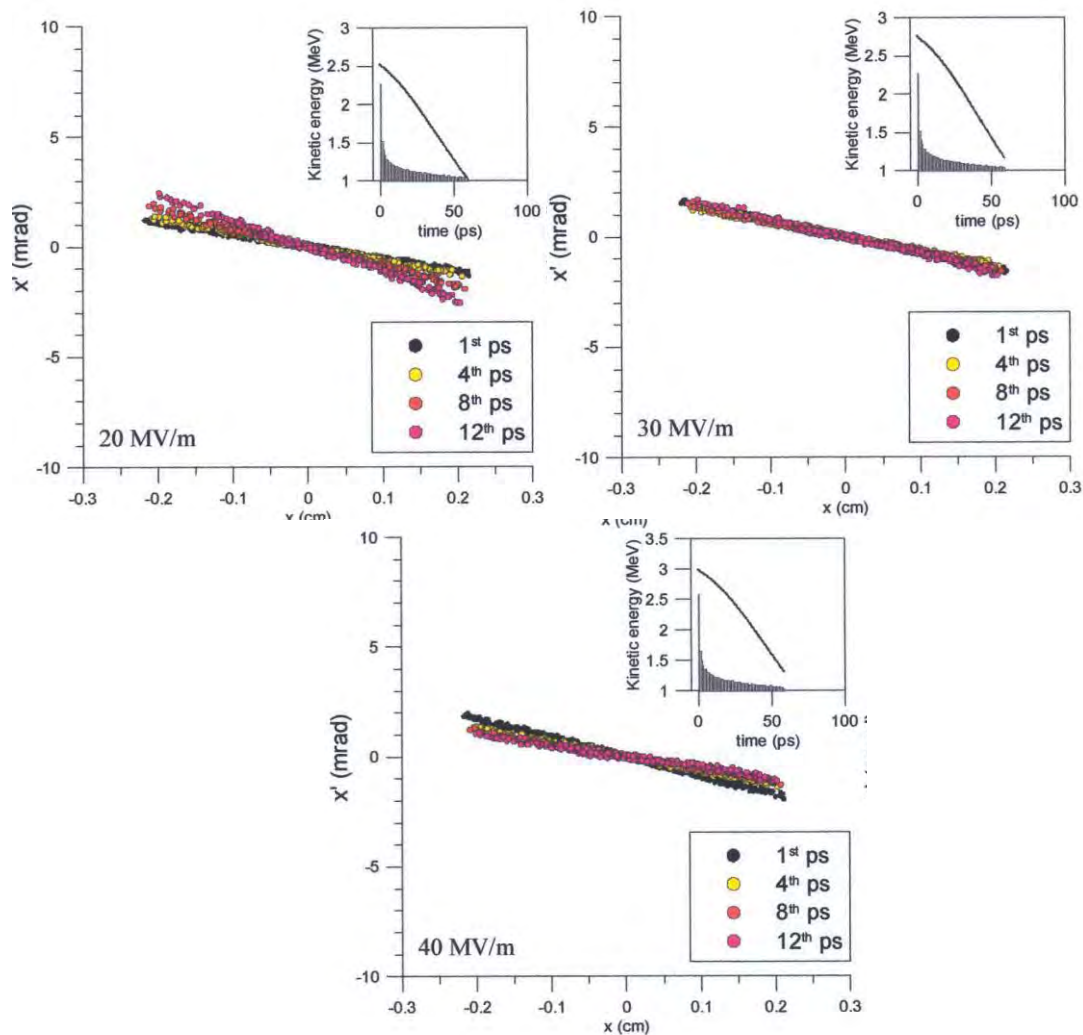
จากผลการศึกษาพบว่า cavity ที่มีความยาวน้อยกว่า 1λ สามารถลด normalized emittance ลงได้มาก ซึ่งพบว่า cavity ที่มีความยาวประมาณ 2.6242 เซนติเมตร หรือ $\frac{1}{4}\lambda$ ให้ผลในการลด emittance มากที่สุด แต่มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 MeV เมื่อพิจารณา cavity ที่มีความยาว $\frac{1}{4}\lambda$ แล้วให้สนามไฟฟ้าความเข้มค่าต่างๆ (ผลการคำนวณจาก PARMELA แสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 33) พบว่าสามารถลด normalized projected emittance ลงได้ หากใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงขึ้น แต่จะส่งผลให้พลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ การกระจายตัวในเฟส-สเปซแบบสไลซ์ของลำอิเล็กตรอน สำหรับ 12 ps แรก ที่ละช่วงเวลา 1 ps (รูปที่ 34) พบว่าเมื่อใช้สนามความเข้ม 30 MV/m ใน cavity เฟส-สเปซแบบสไลซ์ในส่วนหัวของลำอิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวกันได้ดีมาก



รูปที่ 33 การกระจายตัวของเฟส-สเปซของลำอิเล็กตรอนที่ RF-gun exit และภายหลังผ่าน TM010 RF-cavity ความถี่ 2856 MHz ความยาว 2.6242 cm ที่มี field amplitude 30 MV/m และ 40 MV/m

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณจากโปรแกรม PARMELA: TM010 2856 MHz cavity ความยาว $\frac{1}{4}\lambda$

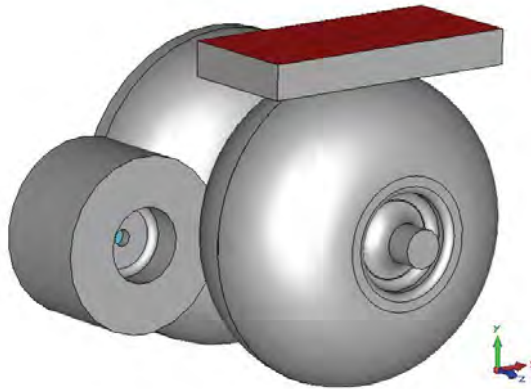
Field Amplitude (MV/m)	Projected ε_{rms} (mm.mrad)	Normalized ε_{rms} (mm.mrad)	Maximum kinetic energy (MeV)
Gun exit	6.4059	27.6731	2.06
20	3.80600	19.72044	2.53
25	3.31664	17.90141	2.65
30	2.87879	16.16009	2.76
35	2.48913	14.51148	2.88
40	2.14610	12.97613	3.00
45	1.85011	11.58690	3.12



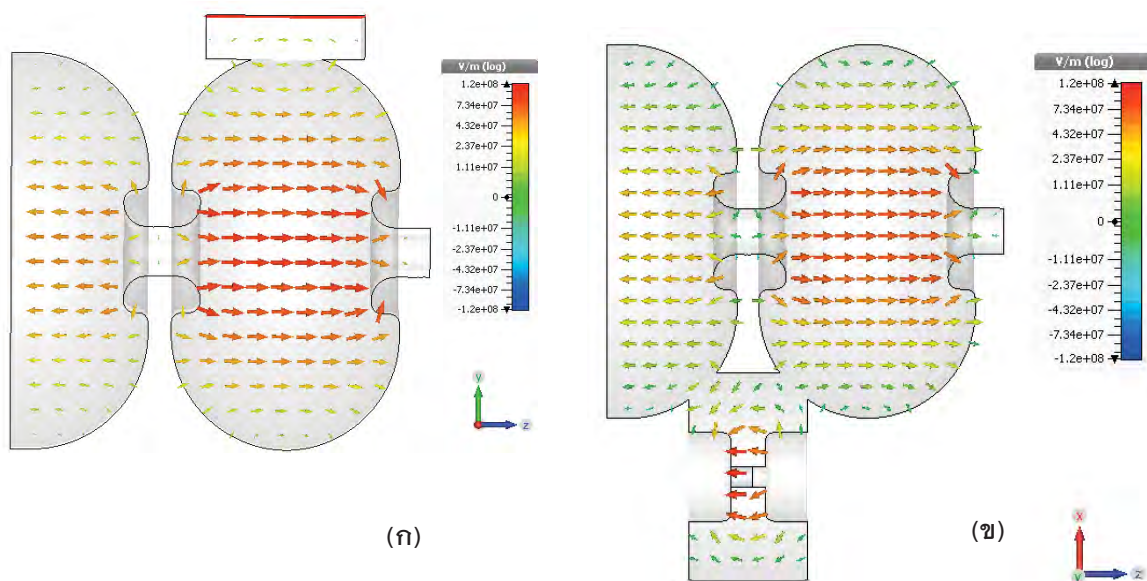
รูปที่ 34 การกระจายของลำอิเล็กตรอนใน 1st ps, 4th ps, 8th ps และ 12th ps ภายหลังผ่าน TM010 2856 MHz cavity ความยาว $\frac{1}{4}\lambda$ ที่มี field amplitude 20 MV/m, 30 MV/m และ 40 MV/m

2.6 3D simulation

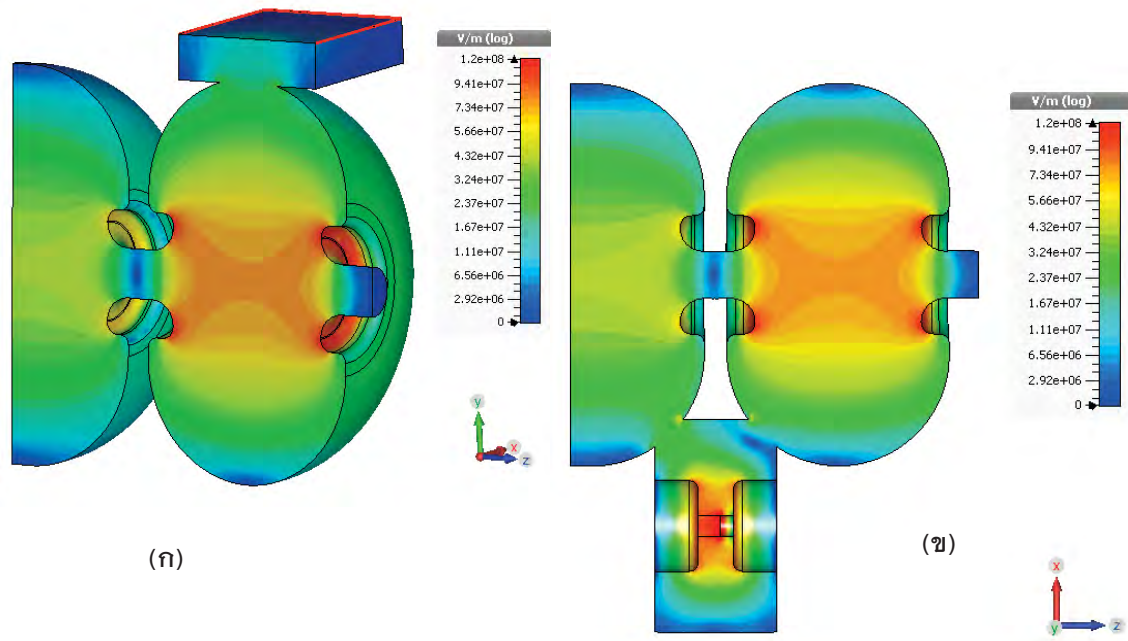
ในการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน cavity ของปืนอิเล็กตรอน ใช้โปรแกรม SUPERFISH ซึ่งให้ผลเป็นการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน 2 มิติ ตามสมมาตรเชิงมุม azimuth รอบแกน longitudinal นั่นคือ การคำนวณไม่ได้รวมรายละเอียดของ coupling cell เพื่อตรวจสอบว่าการประมาณดังกล่าวยอมรับได้ และไม่มีผลต่อการศึกษาเฟส-สเปซ จะใช้การคำนวณการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio [17] เริ่มจากการสร้าง model 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 35) ซึ่งจะแสดงส่วนของบริเวณสุญญากาศภายใน cavity แล้วใช้การคำนวณด้วย eigenmode solver เพื่อคำนวณการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในปืนอิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 36 และรูปที่ 37) พร้อมทั้ง พารามิเตอร์ทางอาร์เอฟอื่นๆ



รูปที่ 35 โมเดล 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและ
ลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในโปรแกรม CST Microwave studio (MWS)

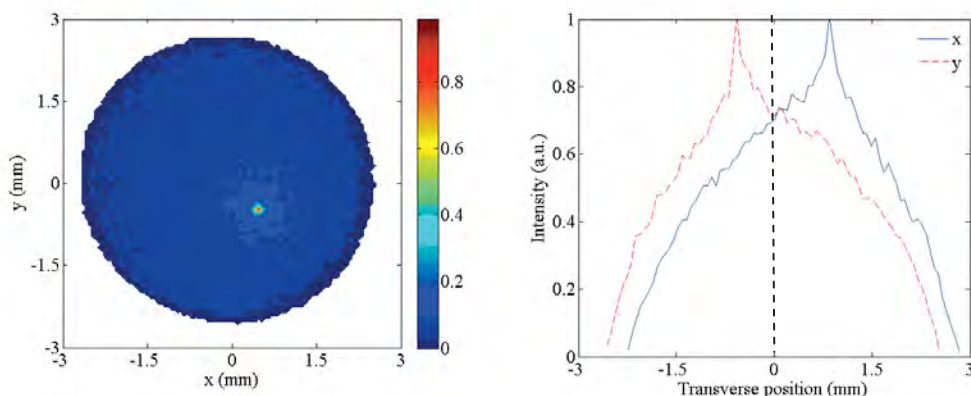


รูปที่ 36 ภาคตัด yz-plane (ก) และ xz-plane (ข) แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

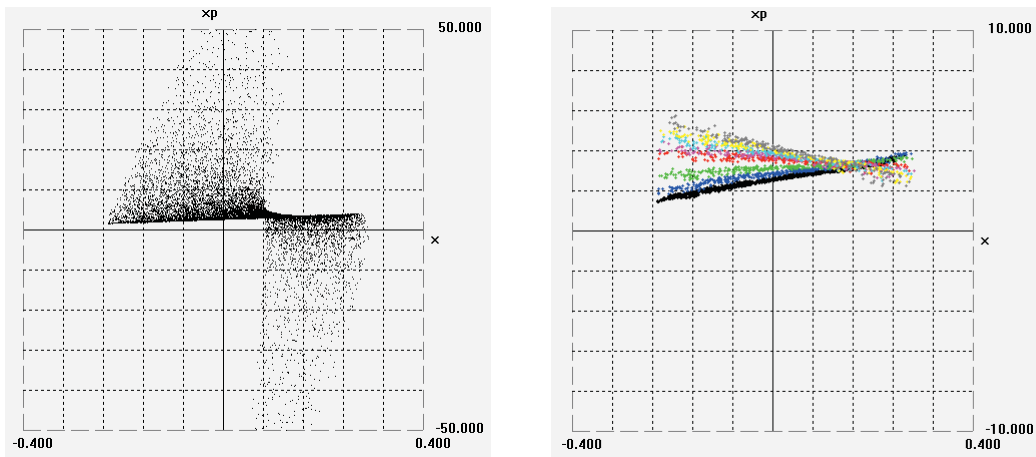


รูปที่ 37 ภาคตัด yz-plane (ก) และ xz-plane(ข) แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า

แม้ว่าจากรูปจะเห็นความไม่สมมาตรของสนามเพียงเล็กน้อย เนื่องจากช่องเปิดที่ต่อกับท่อนำคลื่นที่ผนังของ full-cell และช่องเปิดที่เชื่อมต่อกับ coupling cell แต่เมื่อใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ 3 มิติที่คำนวณได้ดังกล่าว สำหรับโปรแกรม PAREMELA พบว่ามีผลอย่างมีนัยยะต่อการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน โดย ณ ตำแหน่งทางออกของ RF-gun พบว่าลำอิเล็กตรอนไม่ได้อยู่ตรงกลาง (พิกัด $x=0, y=0$) แต่มีการเคลื่อนออกจากศูนย์กลางทั้งในแนวแกน x และ แกน y ดังแสดงในรูปที่ 38 ผลดังกล่าวส่งผลถึงเฟส-สเปซ ดังแสดงในรูปที่ 39 ซึ่งผลเช่นนี้เป็นปัญหาต่อการชดเชยด้วยการบิดเฟส-สเปซกลับ ตามที่นำเสนอในการวิจัย และยังบ่งชี้ว่า ลำอิเล็กตรอนมีคุณสมบัติไม่ดีเท่าที่คาดไว้แต่เดิม

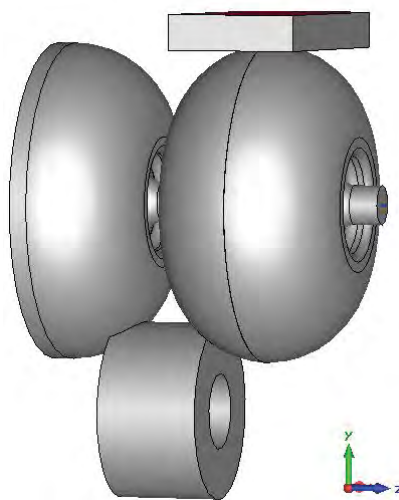


รูปที่ 38 ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอน คำนวณโดยใช้สนาม 3 มิติ โดยจุดศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน ไม่ตรงกับพิกัด $x=0, y=0$

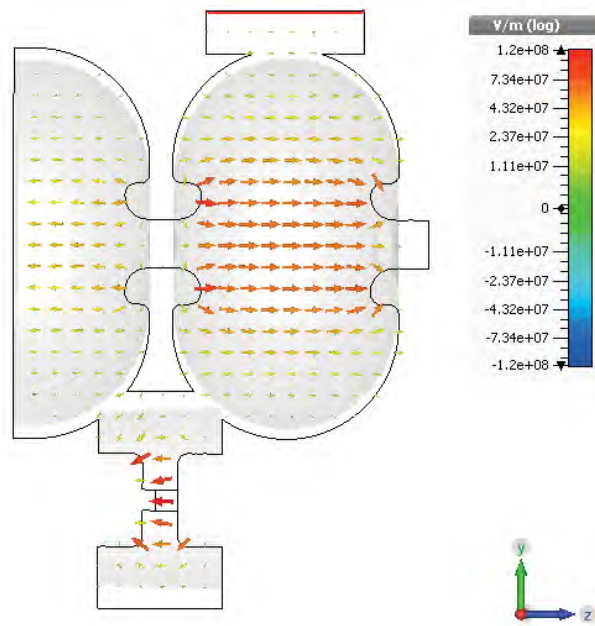


รูปที่ 39 เฟส-สเปซ และ เฟส-สเปซ แบบสไลซ์ (12 ps แรก) ของลำอิเล็กตรอน
คำนวณโดยใช้สนาม 3 มิติ โดยจุดศูนย์กลางของเฟส-สเปซ ไม่ตรงกับพิกัด $x=0, x'=0$

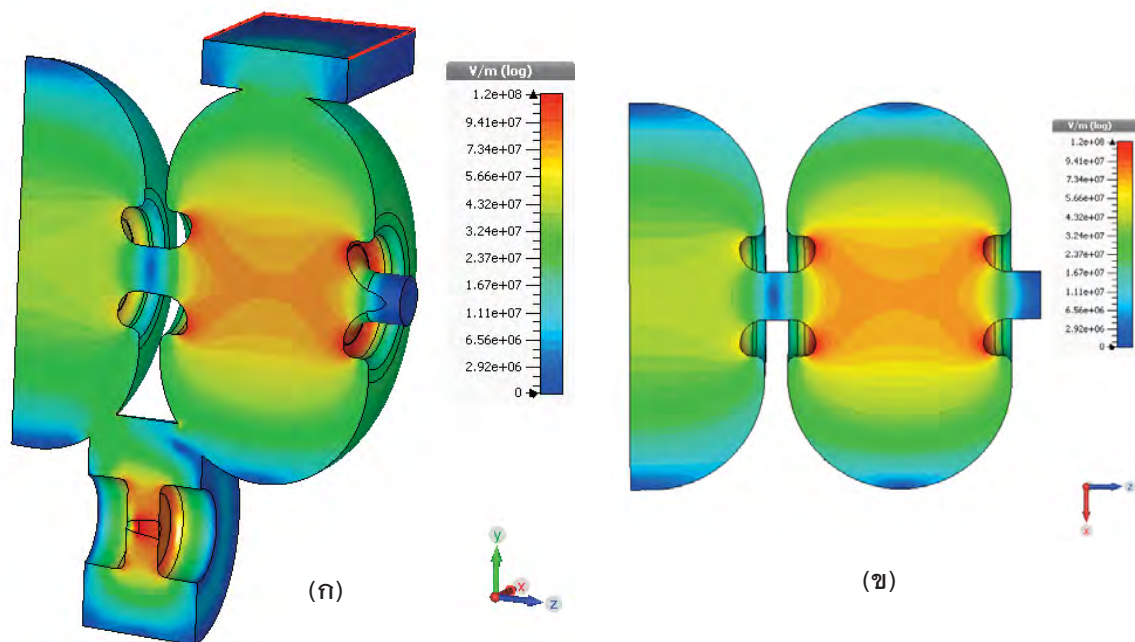
ได้มีแนวคิดที่จะหมุนตำแหน่งของ coupling – cell ให้มาอยู่ในแนวแกนเดียวกับช่องเปิดที่ต่อกับท่อนำคลื่น แต่อยู่คนละด้าน ดัง model 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กตรอน ในรูปที่ 40 เพื่อลดผลของความไม่สมมาตรของสนามต่อการกระจายตามขวางของลำอิเล็กตรอน รูปที่ 41 และ รูปที่ 42 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ 3 มิติ ของ RF-gun ที่มีการหมุนตำแหน่ง coupling – cell ผลจากโปรแกรม PAREMELA ที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านปืนอิเล็กตรอนนี้ แสดงในรูปที่ 43 และ รูปที่ 44 ซึ่งพบว่าลำอิเล็กตรอนอยู่ใกล้ตรงตำแหน่งพิกัด (0,0) มากขึ้น และเฟส-สเปซ ที่ทางออกของ RF-gun ก็มีลักษณะคล้ายผลที่ได้จาก RF-gun ที่มีสนามสมมาตร จากการคำนวณสนามด้วยโปรแกรม SUPERFISH มาก ควรจะสามารถใช้การชดเชยการบิดเฟส-สเปซ ได้ ซึ่งการปรับปรุง RF-gun ในลักษณะนี้จะได้ทำการศึกษาอย่างละเอียดต่อไปในอนาคต



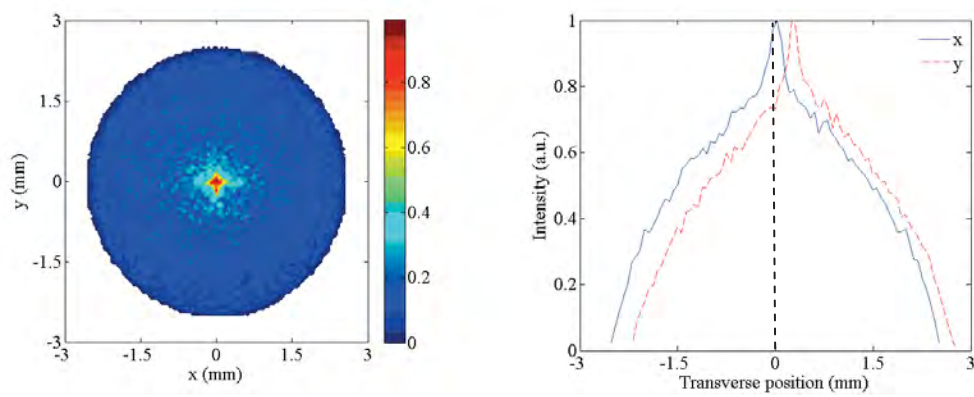
รูปที่ 40 โมเดล 3 มิติ ของ ปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell
ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น ในโปรแกรม CST Microwave studio (MWS)



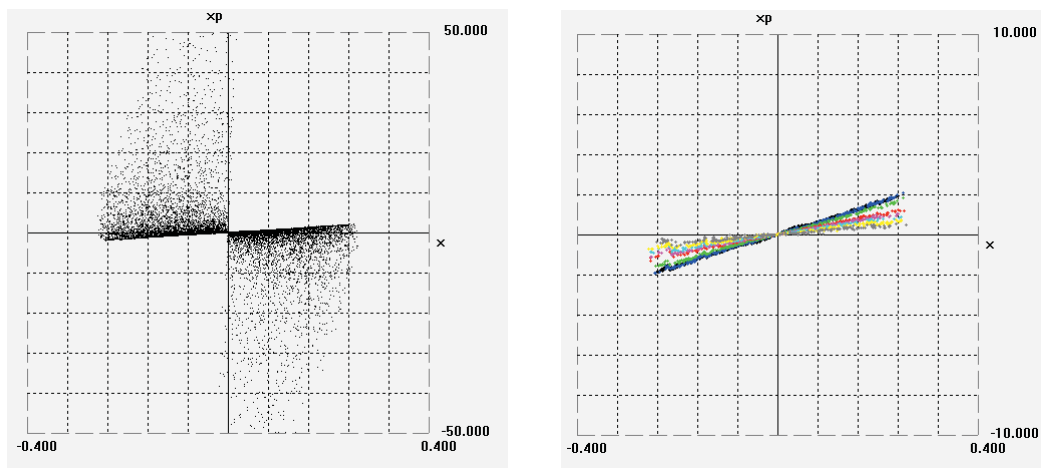
รูปที่ 41 ภาคตัด yz-plane แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น



รูปที่ 42 ภาคตัด yz-plane (ก) และ xz-plane (ข) แสดงความเข้มสนามไฟฟ้า ของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น



รูปที่ 43 ภาควัดตัดขวางของลำอิเล็กตรอน จากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น โดยจุดศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน จะใกล้กับพิกัด $x=0, y=0$

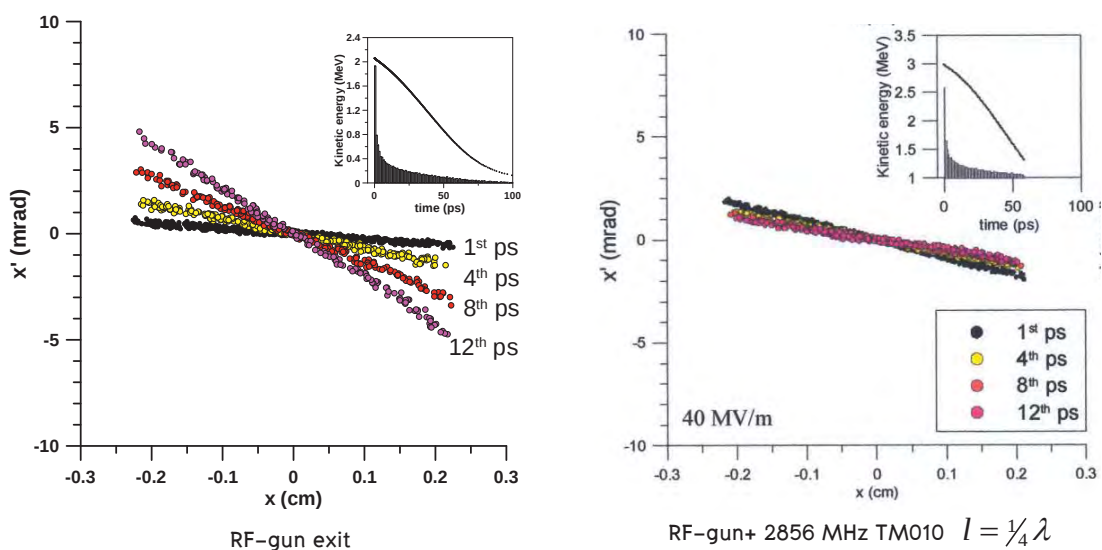


รูปที่ 44 เฟส-สเปซ และ เฟส-สเปซ แบบสไลซ์ ของลำอิเล็กตรอน จากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟที่ทำการหมุน coupling-cell ให้อยู่ในแนวเดียวกับท่อนำคลื่น โดยจุดศูนย์กลางของเฟส-สเปซ จะใกล้กับพิกัด $x=0, x'=0$

3 สรุปผลการวิจัย

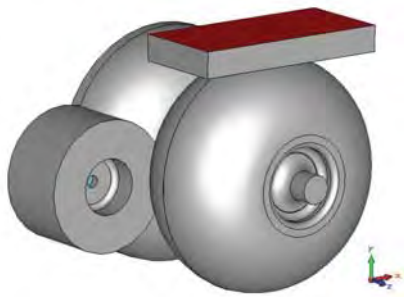
โดยอาศัยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ศึกษาลักษณะการกระจายของเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (PBP-CMU RF-gun) โดยการกระจายของเฟส-สเปซดังกล่าว จะหาได้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอน ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากคาโทด และอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในโครงสร้างของปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ เริ่มด้วยการใช้โปรแกรม SUPERFISH เพื่อจำลองสนาม RF ในปืนอิเล็กตรอน และ ใช้โปรแกรม PARMELA สำหรับคำนวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ขณะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในแต่ละบริเวณ การวิเคราะห์เฟส-สเปซแบบสไลซ์ พบว่า มีการหมุนของเฟส-สเปซสไลซ์อย่างชัดเจน

เมื่อศึกษาลักษณะการกระจายของเฟส-สเปซ ของลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนแบบอาร์เอฟ ของหน่วยวิจัย SUNSHINE, Stanford Synchrotron Research Laboratory (SSRL), Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) พบทั้งการบิดและหมุนของเฟส-สเปซ นั่นคือแตกต่างกันไป โดยการหมุนของเฟส-สเปซ ของ PBP-CMU RF-gun มีลักษณะที่ซับซ้อนน้อยกว่า และความสัมพันธ์ของ x' และ x ในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ มีลักษณะคล้ายเชิงเส้น (linear) ที่น่าจะชัดเจนได้ด้วยสนามอาร์เอฟแบบไม่คงที่ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟส-สเปซแบบสไลซ์อย่างละเอียด เพื่อหาโครงสร้างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสม พบว่าควรใช้สนามจาก TM010 cavity หรือ TM011 cavity ความถี่ 1428, 2856 และ 5712 MHz โดยนอกจากจะให้ผลกับ เฟส-สเปซ ตามแนวขวางแล้วยังมีผลในทางเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนอีกด้วย เมื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ จน พบว่า TM010 cavity ความถี่ 2856 MHz ที่มีความยาวประมาณ 2.6242 เซนติเมตร หรือ $\frac{1}{4}\lambda$ ให้ผลในการลด emittance มากที่สุด หากใช้สนามความเข้ม 40 MV/m ใน cavity จะทำให้ projected normalized emittance ลดลงได้ประมาณ 50% แต่มีผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 1 MeV

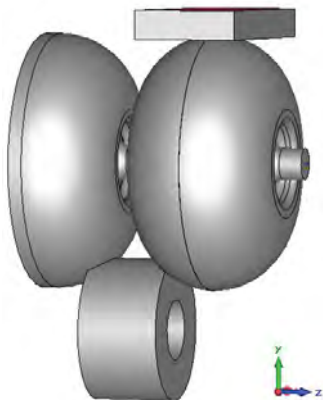
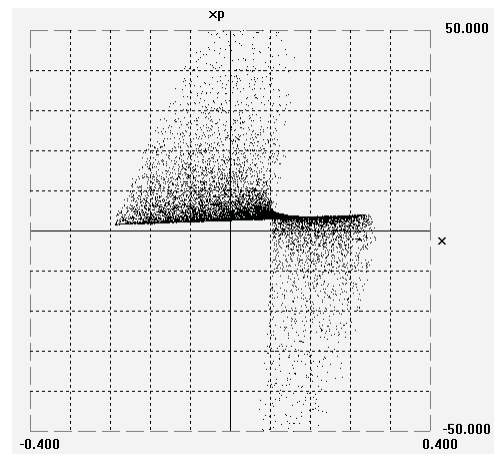


ทั้งนี้หาก cavity ที่จะใช้ชดเชยใช้ความถี่เดียวกับปืนอิเล็กตรอน (2856 MHz) ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเพื่อรวมสนามสำหรับการชดเชยนี้ ไว้กับตัวของปืนอิเล็กตรอน

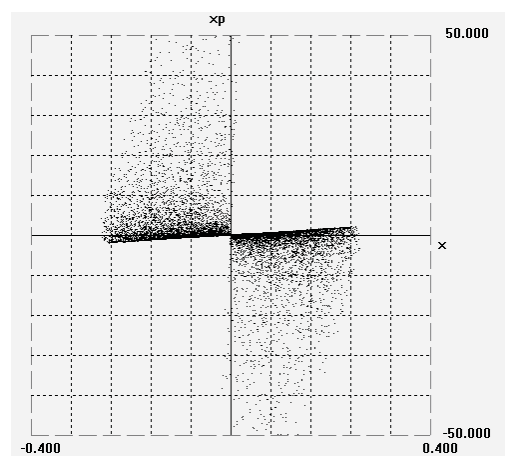
หากใช้การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ 3 มิติ สำหรับการคำนวณเฟส-สเปซ พบรายละเอียดที่สำคัญเนื่องจากความไม่สมมาตรของสนามรอบแกน z นั่นคือ พบว่าลำอิเล็กตรอน ณ ทางออกของ RF-gun ไม่ได้อยู่ตรงศูนย์กลาง (พิกัด $x=0, y=0$) แต่มีการเคลื่อนออกจากศูนย์กลางทั้งในแนวแกน x และ แกน y ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ช่องเปิดท่อนำคลื่นวางอยู่ในแนวแกน y และ coupling-cell วางอยู่ในแนวแกน x แนวทางการแก้ไขปัญหานี้ ก็คือ หมุนให้ coupling-cell วางอยู่ในแนวแกน y โดยวางไว้ด้านตรงข้ามกับช่องเปิดท่อนำคลื่น ซึ่งจะได้ลำอิเล็กตรอนและเฟส-สเปซ ที่อยู่ใกล้ตรงตำแหน่งพิกัด (0,0) มากขึ้น ณ ทางออกของ RF-gun โดยการกระจายของอิเล็กตรอนมีลักษณะคล้ายผลที่ได้จาก RF-gun ที่มีสนามสมมาตร นั่นคือ พบแนวทางการปรับปรุง RF-gun ที่จะให้ลำอิเล็กตรอนที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งการศึกษาอย่างละเอียดสำหรับปืนอิเล็กตรอนในลักษณะนี้จะได้ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต



current RF-gun with horizontal coupling-cell



new design RF-gun with vertical coupling-cell



4 บรรณานุกรม

- [1] K.J. Kim , et. al. “Toward Advanced Electron Beam Brightness Enhancement and Conditioning”, ANL/APS/LS-305, 2004.
- [2] Aceelerator Test Facility, [online] <http://www.bnl.gov/atf/HighBrit.asp>.
- [3] J. W. Lewellen, “Overview of High-Brightness Electron Guns”, in Proceeding of LINAC2004, 2004.
- [4] J.S.Fraser ,R.L.Sheffield and E.R.Grayl, “A New High-Bringhtness Electron Injector for Free Electron Lasers Driven by Rf Linacs”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **250** (1986) 71-76.
- [5] M. Borland, “A High-Brightness Thermionic Microwave Electron Gun”, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1991.
- [6] B.E.Carlsten , “New Photoelectric Injector Design for The Los Alamos National Laboratory XUV FEL Accelerator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **285** (1989) 313-319.
- [7] J. Buon, “Beam Phase Space and Emittance”, in CAS-CERN 94-01 vol.1, 1994.
- [8] P. H. Kung, “Generation and Characterization of Sub-pico second electron Bunches”, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1995.
- [9] S. Rimjaem, et al., "Femtosecond Electron Bunches from an RF-gun", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **533** (2004) 258.
- [10] C. Thongbai, et al., "Femtosecond Electron Bunches: Source and Characterization", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, **587** (2008) 130.
- [11] K. Kim, “RF and Space Charge effects in laser-driven RF Electron Guns”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **275** (1989) 201-218.
- [12] L.M. Young, “POISSON/ SUPERFISH”, LANL Technical Note, LA-UR- 96 1834, 1999.
- [13] L.M. Young, “PARMELA”, LANL Technical Note, LA-UR- 96 1835, 2002.
- [14] Particle Accelerator Physics, 3rd Edition , H. Wiedemann, Springer-Verlag, 2007.
- [15] Electromagnetics Waves, Umran S. Inan and Aziz S. Inan, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [16] Mathematical Methods for Physics and Engineering, 3rd Edition, K.F. Riley, M.P. Hobson, and S.J. Bence, Cambridge University Press., New York, 2006.
- [17] Microwave Studio, Computer Simulation Technology, Darmstadt, Germany.
<<http://www.cst.com>>

5 OUTPUT

5.1 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- Construction and performance of the magnetic bunch compressor for the THz facility at Chiang Mai University, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 637 (2011) S99–S106.
- Bunch compression efficiency of the femtosecond electron source at Chiang Mai University, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 645 (2011) 187 –190.
- Study of thermionic RF–gun phase–space dynamics and slice emittance under Influence of external electromagnetic fields, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 645 (2011) 191–196.
- Accelerator The Accelerators and Related R & D Activities in Thailand, *Journal of Korean Physical Society* , Vol.59, 2 (2011) 534–541.
- Progress on Reflective Terahertz Imaging for Identification of Water in Flow Channels of PEM Fuel, *Applied Mechanics and Materials* Vols. 110–116 (2012), pp 2301–2307
- Simulations and Measurements of Dipole and Quadrupole Magnets for PBP–CMU Linac System, *Energy Procedia* (in press)
- Optimization of Longitudinal Electron Beam Properties for Linac–based infrared Free–electron Laser at Chiang Mai University, *Energy Procedia* (in press)
- RF–gun Phase–space Dynamics and Slice Emittance under Influence of External Electromagnetic Fields, *Thai Journal of Physics*, Series 6, 2010.

5.2 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ใน Conference Proceedings

- Investigation of water distribution in proton exchange membrane fuel cells via Terahertz imaging, 7th International Eco–Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Chiang Mai, Thailand 19–22 Nov. 2009.
- Femtosecond Electron Bunches and Terahertz Radiation Source at Chiang Mai University, 7th International Eco–Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Chiang Mai, Thailand 19–22 Nov. 2009.
- Recent Upgrade of the PITZ Facility, 2010 Beam Instrumentation Workshop, May 2–6, 2010, SantaFe, New Mexico, USA.

- Low-charge Simulations for Phase space Tomography Diagnostics at PITZ, Proceeding of the 32nd International Free Electron Laser Conference (FEL2010), August 23–27, 2010, Malmö, Sweden.
- THz Radiation based on femtosecond Electron Bunches and THz Imaging, IEEE Proceeding of the 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THZ 2010), September, 2010, Rome, Italy.
- The Accelerators and Related R&D Activities at Chiang Mai University, The 9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium 2011 (9th EMSES2011), Chiang Rai, Thailand, May 25–28, 2011.
- Accelerator-based THz Radiation source at Chiang Mai University, The 9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium 2011 (9th EMSES2011), Chiang Rai, Thailand, May 25–28, 2011.
- Injector System for Linac-based Infrared Free-electron Laser in Thailand, Proceeding of the 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), August 23–27, 2012, Nara, Japan.
- THz Radiation Sources Based on RF-Linac at Chiang Mai University, Proceeding of the 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), August 23–27, 2012, Nara, Japan.
- Linac-based THz imaging at Chiang Mai University, Proceeding of the 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), August 23–27, 2012, Nara, Japan.
- Simulations and Measurements of Dipole and Quadrupole Magnets for PBP-CMU Linac System, 10th International Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon Ratchathani, Thailand, 5–8 Dec. 2012.
- Optimization of Longitudinal Electron Beam Properties for Linac-based infrared Free-electron Laser at Chiang Mai University, 10th International Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon Ratchathani, Thailand, 5–8 Dec. 2012.
- Linac-based THz Radiation Sources at Chiang Mai University, 10th International Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Ubon Ratchathani, Thailand, 5–8 Dec. 2012.

5.3 ผลงานวิจัยที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ

- Fs Electron Bunches and THz facility of the Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP Center), the PITZ (Photo Injector Test Facility at DESY in Zeuthen) collaboration meeting (board meeting), *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*, Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus, Berlin (Adlershof), Germany, June 22–24, 2009.
- Generation of femtosecond electron pulses at the Plasma and Beam Physics Research Facility, PBP, the PITZ (Photo Injector Test Facility at DESY in Zeuthen) collaboration meeting (general meeting), *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*, Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus, Berlin (Adlershof), Germany, June 22–24, 2009.
- RF-gun Phase-space Dynamics and Slice Emittance under Influence of External Electromagnetic Fields, Siam Physics Congress 2010, March 25–27, 2010, River Kwai Village Hotel, Kanchanaburi, Thailand.
- Control of the accelerator-based THz radiation source at Chiang Mai University, Siam Physics Congress 2010, March 25–27, 2010, River Kwai Village Hotel, Kanchanaburi, Thailand.
- THz Fourier Transform Spectrometer, Siam Physics Congress 2010, March 25–27, 2010, River Kwai Village Hotel, Kanchanaburi, Thailand.
- THz imaging and direct visualization of water presence in the flow channels of a PEM fuel cell, Siam Physics Congress 2010, March 25–27, 2010, River Kwai Village Hotel, Kanchanaburi, Thailand.
- Report from SURIYA Facility, Chiang Mai University, PITZ collaboration meeting, June 8–9, 2010, Zeuthen, Germany.
- Low-charge Simulations for Phase space Tomography Diagnostics at PITZ, PITZ collaboration meeting, June 8–9, 2010, Zeuthen, Germany.
- Study of thermionic RF-gun phase-space dynamics and slice emittance under Influence of external electromagnetic fields, the 8th International Conference in Charged Particle Optics, July 12–16, 2010, Singapore.
- Bunch compression efficiency of the femtosecond electron source at Chiang Mai University, the 8th International Conference in Charged Particle Optics, July 12–16, 2010, Singapore.
- Low-charge Simulations for Phase space Tomography Diagnostics at PITZ, Proceeding of the 32nd International Free Electron Laser Conference (FEL2010), August 23–27, 2010, Malmö, Sweden.

- THz Radiation based on femtosecond Electron Bunches and THz Imaging, the 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW–THZ 2010), September, 2010, Rome, Italy.
- Progress on Reflective Terahertz Imaging for Identification of Water in Flow Channels of PEM Fuel Cells, IEEE Proceeding of the 2010 International Conference on Physics Science and Technology (ICPST 2010), December, 2010, Hong Kong.
- THz Radiation Sources Based on RF–Linac at Chiang Mai University, Proceeding of the 34th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), August 23–27, 2012, Nara, Japan.

5.4 ผลงานอื่นๆ

- บรรยายเรื่อง SURIYA: A Femtosecond THz Source, Free Electron Laser: IR–THz applications Workshop, Jan 28, 2011, Bangkok.
- ข้อตกลงความร่วมมือด้าน High Brightness Injector กับ National Synchrotron Radiation research Center (NSRRC), Taiwan, R.O.C.
- ข้อตกลงความร่วมมือกับ DESY Deutsches Elektronen–Synchrotron ผ่านข้อตกลงความร่วมมือใน PITZ (Photo Injector Test Facility at DESY in Zeuthen) Collaboration Project
- ความร่วมมือกับ Kyoto University Free Electron Laser (KU–FEL), Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Japan
- ความร่วมมือกับ Electron Photon Science Research Center, Tohoku University, Japan

ภาคผนวก



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Construction and performance of the magnetic bunch compressor for the THz facility at Chiang Mai University

J. Saisut^{a,c,*}, K. Kusoljariyakul^{a,c}, S. Rimjaem^d, N. Kangrang^{a,c}, P. Wichaisirimongkol^{a,c}, P. Thamboon^{b,c}, M.W. Rhodes^{b,c}, C. Thongbai^{a,c}

^a Department of Physics and Materials Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^b STIR, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^c THEP Center, Commission on Higher Education, Bangkok 10400, Thailand

^d DESY Zeuthen, Platanenallee 6, Zeuthen 15738, Germany

ARTICLE INFO

Available online 10 February 2010

Keywords:

Alpha magnet
Bunch compression
Femtosecond
Electron bunch
FIR radiation

ABSTRACT

The Plasma and Beam Physics Research Facility at Chiang Mai University has established a THz facility to focus on the study of ultra-short electron pulses. Short electron bunches can be generated from a system that consists of a radio-frequency (RF) gun with a thermionic cathode, an alpha magnet as a magnetic bunch compressor, and a linear accelerator as a post-acceleration section. The alpha magnet is a conventional and simple instrument for low-energy electron bunch compression. With the alpha magnet constructed in-house, several hundred femtosecond electron bunches for THz radiation production can be generated from the thermionic RF gun. The construction and performance of the alpha magnet, as well as some experimental results, are presented in this paper.

Crown Copyright © 2010 Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Femtosecond electron and photon pulses have become interesting tools for basic and applied applications [1–3]. Short electron pulses can be used directly [1] or to generate intense THz radiation [4], ultra-short X-ray pulses [5], and free-electron lasers [6].

Short electron pulses can be produced in a straightforward way by using linear accelerators and bunch compressors. In the case of using a chicane bunch compressor [7], a long relativistic electron bunch with a small energy spread is accelerated in a linear accelerator section at zero-phase, such that the head of the bunch loses energy and the particles in the tail gain energy, while the energy of the particles in the center do not change. In chicane magnets, the high-energy particles in the bunch tail travel a shorter path than the low-energy particles in the bunch head, thereby leading to bunch compression. After sufficient further acceleration, the energy spread becomes small again, and a new step of bunch compression can be implemented.

In the case of using alpha-magnet bunch compression, sub-picosecond electron bunches can be produced in a smaller facility

from a thermionic-cathode radio-frequency (RF) gun and the alpha magnet. It has been possible to produce electron pulses as short as 120 fs rms and a bunch intensity of 100 pCb by using such a compression system at the Stanford SUNSHINE facility [4,7,8]. A similar system to generate femtosecond electron bunches has been constructed and installed at Chiang Mai University. The main components of the system are an S-band 1½-cell RF gun with a thermionic cathode [9], an alpha magnet, and a SLAC-type linear accelerator (linac), as shown in Fig. 1(a). At the exit of the RF gun, electrons have been accelerated to about 2.0–2.5 MeV with a well-defined correlation between energy and time [Fig. 1(b)]. The electron bunch of 20–30 ps from the RF gun enters the alpha magnet at an angle of 42.29 degrees with respect to the magnet axis. The particles follow a close loop similar to the letter α and exit the magnet exactly at the entrance point. In the alpha magnet, higher energy electrons follow longer paths, while lower energy electrons follow shorter ones. Therefore, the lower energy electrons have a chance to catch up to the higher energy electrons in the front, thereby leading to bunch compression. The electron bunches are then accelerated in a 3-m single-section linear accelerator and guided to the experimental station. With an over-compression at the alpha magnet [Fig. 2(a)], the bunches are compressed to less than 1 ps at the experimental station [Fig. 2(c)]. Due to velocity dispersion, if the bunches are well compressed at the magnet exit [Fig. 2(b)], then they would not be optimum at the experimental station [Fig. 2(d)].

* Corresponding author at: Department of Physics and Materials Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand. Tel.: +66 53 943379; fax: +66 53 222776.

E-mail address: jatuporn.st@gmail.com (J. Saisut).

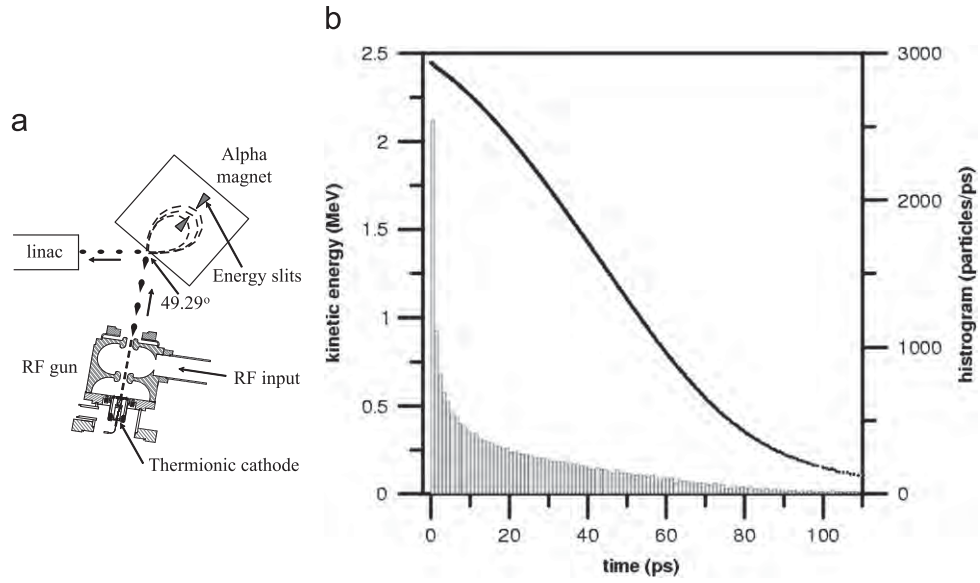


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the bunch generation and compression system, and (b) particle distribution in energy-time phase space with a histogram at the RF-gun exit.

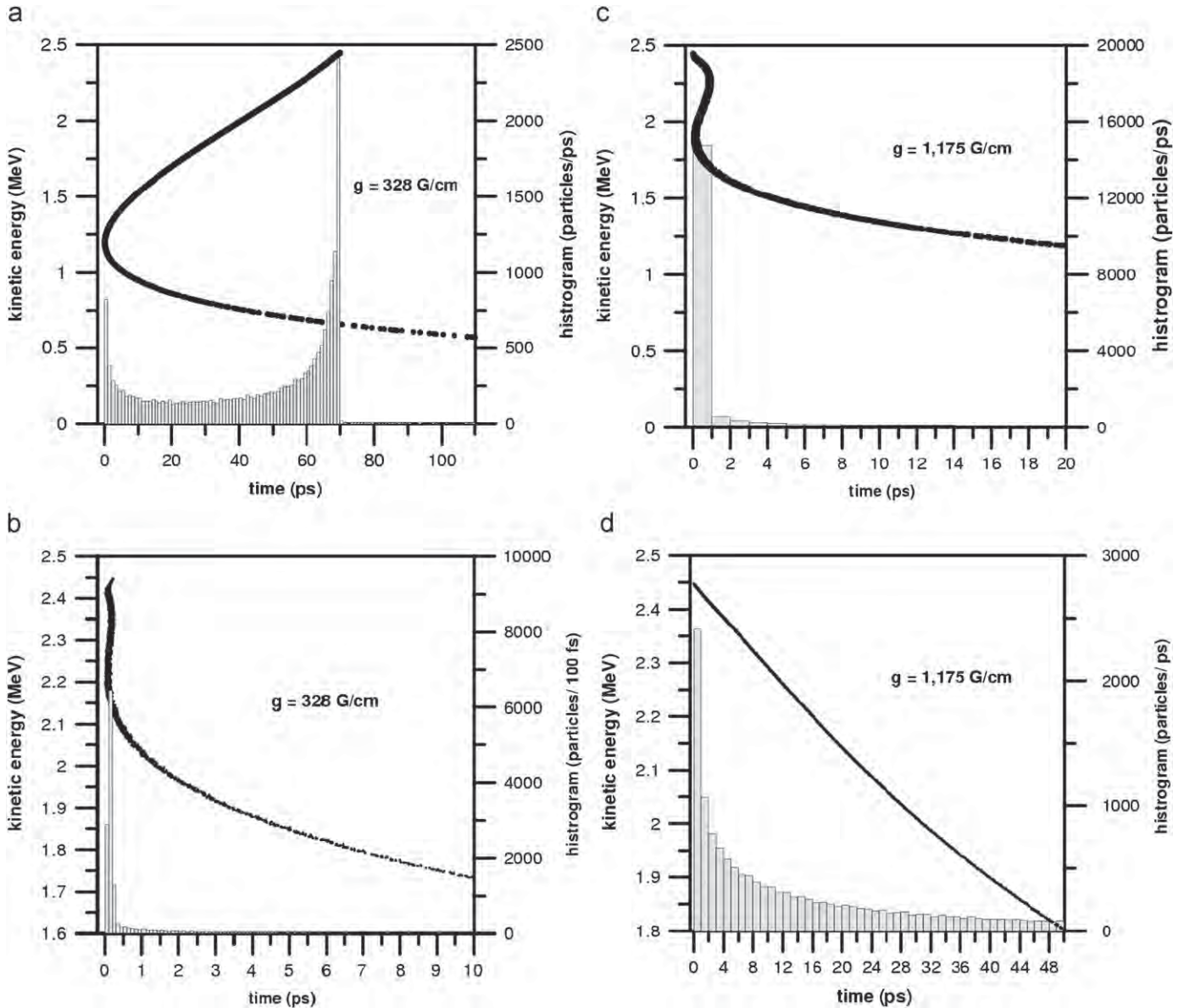


Fig. 2. Particle distribution in energy-time phase space with a histogram: (a) and (c) are at the RF-gun exit, and (b) and (d) are at the experimental station.

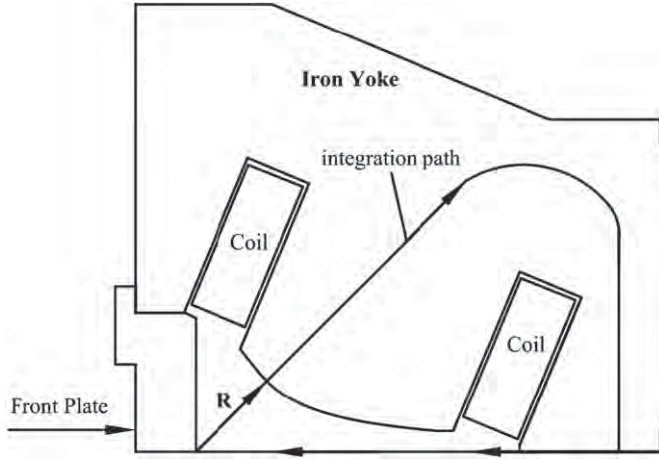


Fig. 3. Integration path in the alpha magnet.

Table 1

Alpha-magnet design parameters.

Parameters	
Maximum field gradient	450 G/cm
Pole radius	10 cm
Good-field region (extent in X)	20 cm
Maximum gradient error	± 0.1%

Bunch compression computer code [10] was employed to study the bunch compression of our system by using some information from the RF-gun study detailed in Rimjaem et al. [9]. Through a series of calculations, the optimum field gradient to generate the short bunch was then obtained. For our system, the maximum alpha-magnet field gradient of 450 G/cm is expected for producing a short electron bunch at 20 MeV [9].

2. Design of the magnetic bunch compressor for the THz facility at Chiang Mai University

The alpha magnet and its properties were first described by Enge [11]. It has the shape of half an asymmetric quadrupole magnet, with two poles and a mirror plate (front plate) terminating the field across the vertical midplane. It is called asymmetric because the pole face extends further horizontally than vertically, in order to provide a large horizontal and uniform field gradient region. The sequence of this alpha-magnet design follows the quadrupole design, which is discussed in more detail in Wiedemann [12] and Fischerm [13]. This magnet design was modified and redesigned based on the alpha magnet of the Stanford Synchrotron Radiation Lightsource Project [14].

A straightforward way to estimate the excitation currents of the magnet is to use the integral form of Ampere's Law:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (1)$$

By using the approximation that the permeability of iron is infinite and by choosing the integration part as shown in Fig. 3,

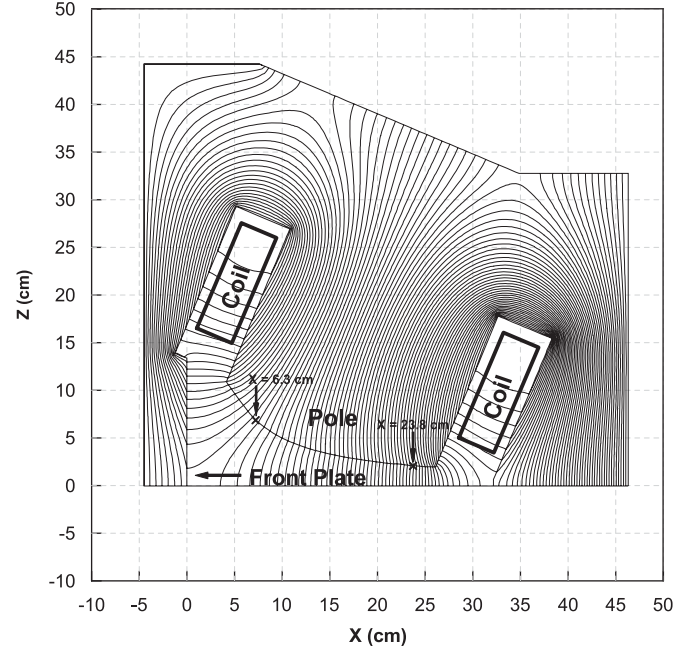


Fig. 4. Alpha-magnet pole profile for POISSON input and the magnetic field line of the alpha magnet.

the integration starts from the magnet axis. The result is:

$$NI = \int_0^a \frac{ar}{\mu_0} dr = \frac{ga^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

where g is the field gradient (Tesla/m), a is the pole radius (m), N is the number of turns, and I is the current (Ampere). With the design parameters shown in Table 1, $NI = 17,905$ Ampere-turn. By considering the space available for the magnet coils and the size of the hollow copper wires, the number of turns, $N = 70$ turns, was selected. The magnet would require a maximum excitation current of 255 Ampere to provide the field gradient of 450 G/cm.

2.1. Computer simulation

The pure quadrupole field, which gives a constant field gradient along the vertical and horizontal midplane, can be created from infinitely wide hyperbolic poles. In practice, the magnet poles are cut to place the excitation coils, thus causing the field gradient to drop near the corner of the poles. In the case of the alpha magnet, there are concerns about the homogeneity of the field gradient and especially the gradient drop near the pole corner and the front plate. The field gradient drop can be compensated by using a tangential technique [12]. At proper positions on the hyperbola pole profile, the tangential lines are extended to intercept with the pole root for iron shimming. The pole profile is optimized by using by POISSON [15], which calculates the magnetic fields from the input pole profile (Fig. 4) as well as the field gradients. The calculation results indicated that the position $x = 6.3$ cm and $x = 23.8$ cm are the best starting points for tangential shimming, which gives a gradient error of less than $\pm 0.1\%$ along the midplane, as shown in Fig. 5.