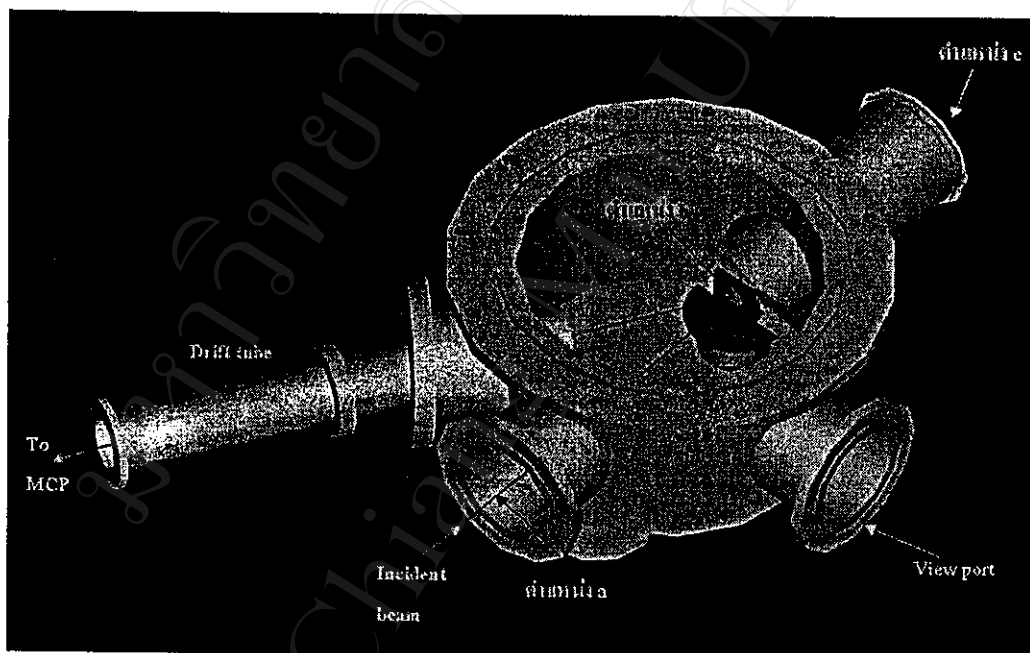


บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การเล็งแนว빔ด้วยเลเซอร์

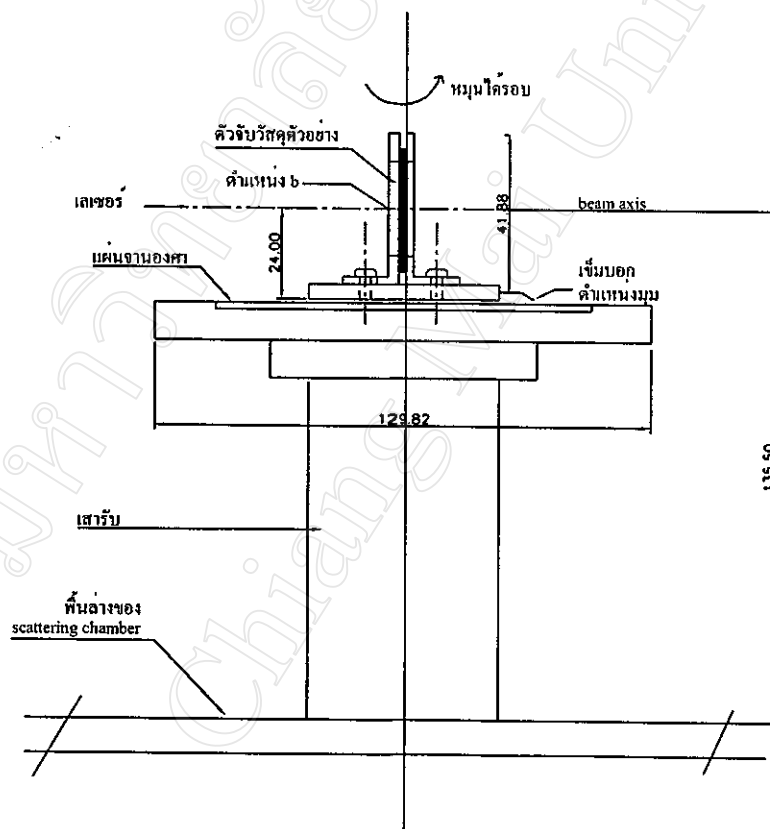
ในการทำ TOF-RBS ได้นำเครื่องกำเนิดนิวตรอนแบบห้วง[Vilathong et al.,1991]มาประยุกต์ใช้ โดยส่วนสุดท้ายของแนว빔ที่เคยเป็นที่อยู่ของเป้าทรีเทียม ได้ถูกเปลี่ยนเป็น scattering chamber ของ RBS แทน ซึ่ง scattering chamber จะมีลักษณะต่างๆ ไป ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะต่างๆ ไปของ scattering chamber

3.1.1 การวัดมุม scattering chamber เบื้องต้น

โดยก่อนจะนำเอา scattering chamber ไปติดตั้ง ณ ตำแหน่งจริงที่ปลาย beam line ได้มีการตั้ง scattering chamber เพื่อทำการวัดมุมของ drift tube เมื่อเทียบกับแนว incident beam ที่เข้าทาง incident port ซึ่งในการตั้งนี้ ได้อาศัยใช้แสงเลเซอร์ โดยตั้ง scattering chamber ไว้บนพื้นราบ และจัดลำเลเซอร์ให้อยู่ในแนวราบด้วย แล้วส่องเลเซอร์ไปบนกึ่งกลางทางด้านหน้า (ตำแหน่ง a) และด้านหลัง (c) ของ chamber โดยปรับเฉพาะ chamber เท่านั้น เมื่อเลเซอร์ฉาย ณ ตำแหน่ง a และ c แล้ว จะได้แนวเส้นตรงของเลเซอร์ที่ถือว่าเป็นแนวเบีมจริง หลังจากนั้นวัดตำแหน่งของเลเซอร์ที่ตำแหน่ง b ที่เป็นตำแหน่งของตัวจับวัสดุตัวอย่าง เพื่อจะทำการออกแบบตัวจับวัสดุตัวอย่างนี้ ดังรูปที่ 3.2



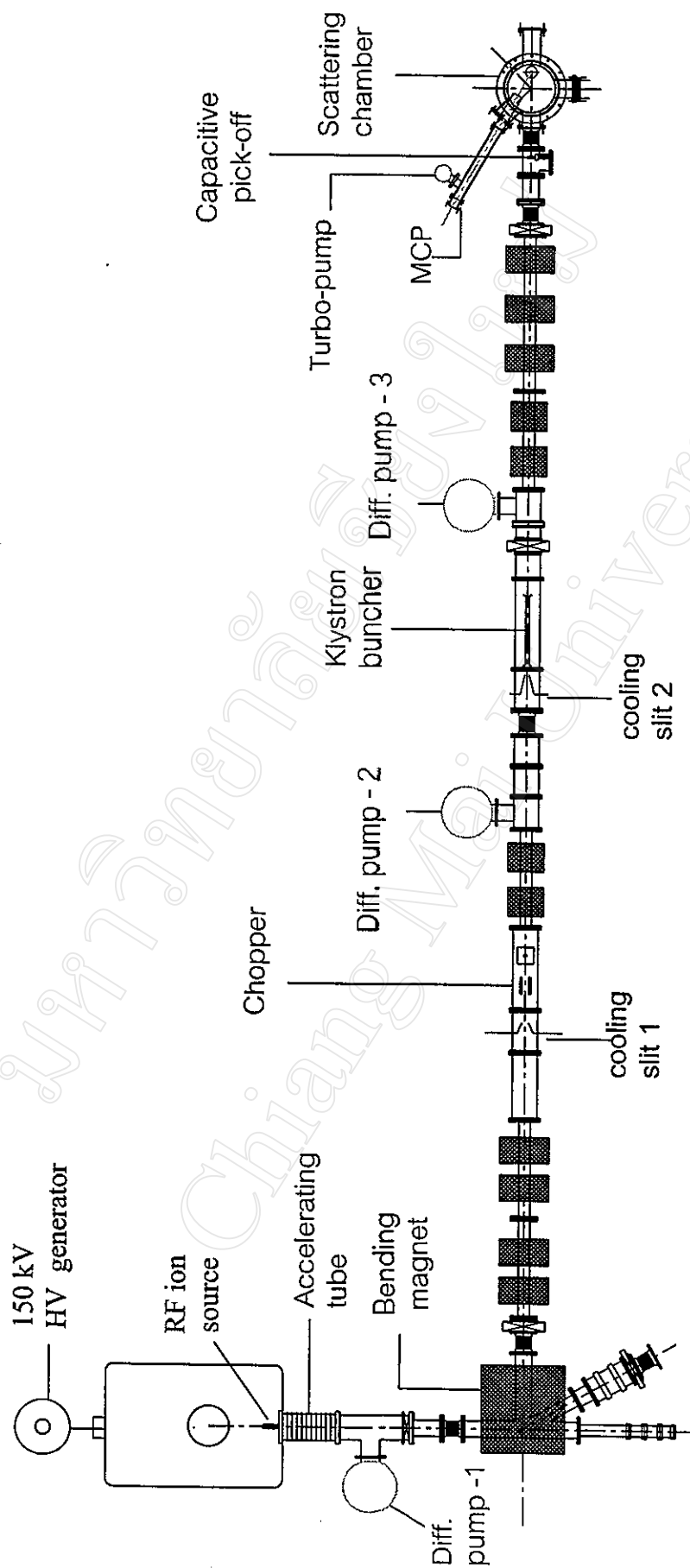
รูปที่ 3.2 แสดงแบบของตัวจับวัสดุที่ใช้ในการวัดมุม scattering chamber
(ความยาวมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ซึ่งในการออกแบบนี้ จะให้ตำแหน่ง b เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของตัวจับวัสดุตัวอย่าง หลังจากนั้นส่องเลเซอร์ผ่านทั้ง 3 จุด คือ a, b และ c แล้วนำกระจกเงาที่ฉาบผิวหน้ามาไว้ ณ ตำแหน่ง b ปรับกระจกเงาให้ตั้งฉากกับแนวเส้นตรง ac โดยตรวจสอบจากจุดสะท้อนของเลเซอร์ไปตกยัง incident port ต้องเป็นจุดเดียวกับตำแหน่ง a จึงจะสามารถตั้งศูนย์ของแผ่นจานองศาที่ระนาบของกระจกเงาตั้งฉากกับแนวเส้นตรง ac ได้ หลังจากนั้นหมุนตัวจับวัสดุ เพื่อให้จุดสะท้อนของเลเซอร์จากกระจกเงาไปตก ณ ตำแหน่ง d ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของ drift tube ที่ยาว 91.25 ซม. ซึ่งพบว่าแนวเส้นตรง bd ทำมุม 150 องศา กับแนว ab

ซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1.2.1 นั้น มุมนี้ควรจะโตกว่า 150 องศา แต่เนื่องจากขนาดของ incident port และ drift tube ของ scattering chamber มีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถเลื่อน drift tube ไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่มุมมากกว่า 150 องศาได้ เพราะตำแหน่งทั้งสองจะเกยกัน ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการสร้าง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า มุม 150 องศานี้เป็นมุมที่โตที่สุดในการทดลอง TOF-RBS สำหรับงานวิจัยนี้

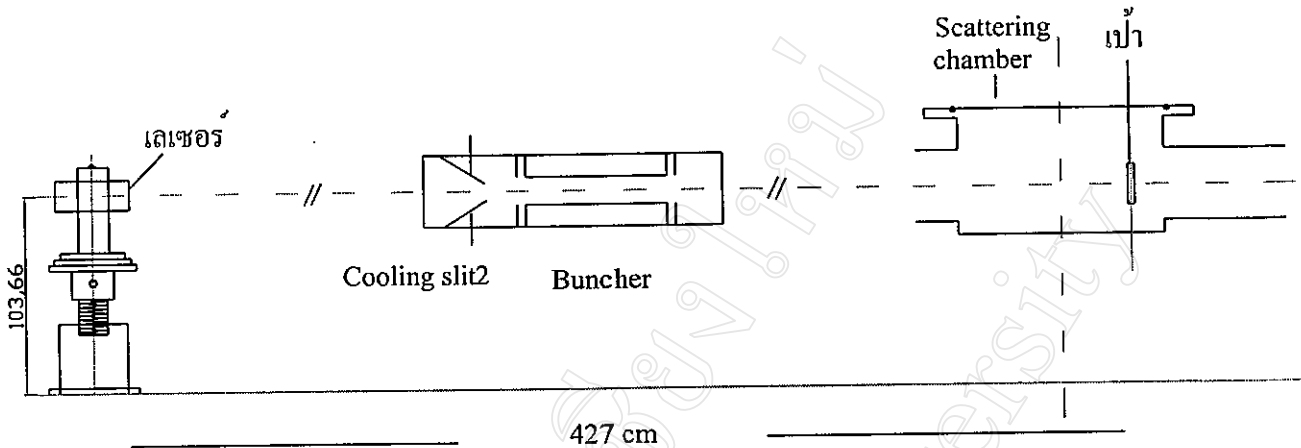
3.1.2 การติดตั้ง scattering chamber ณ ตำแหน่งจริง

เมื่อติดตั้ง scattering chamber ในส่วนสุดท้ายของบีม ดังแสดงในรูปที่ 3.3



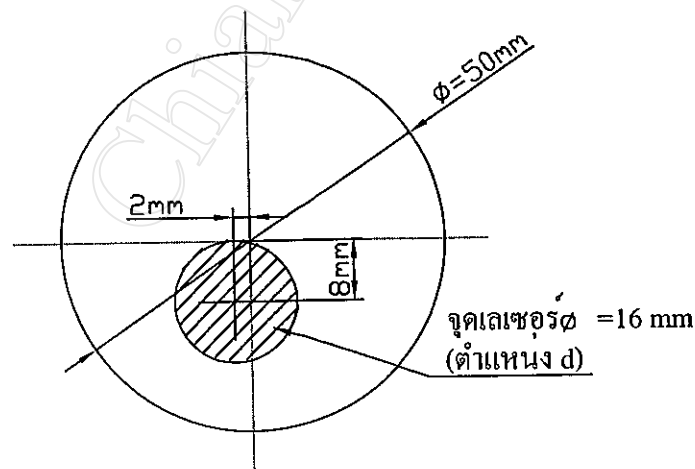
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการติดตั้ง scattering chamber บนแนวบีมและจุดติดตั้งเลเซอร์

และจะใช้เลเซอร์แทนแนวลำอนุภาคตัวที่รอนในการเล็ง โดยเลเซอร์จะถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่งก่อนถึง cooling slit 2 ในแนวปีม ดังรูปที่ 3.4



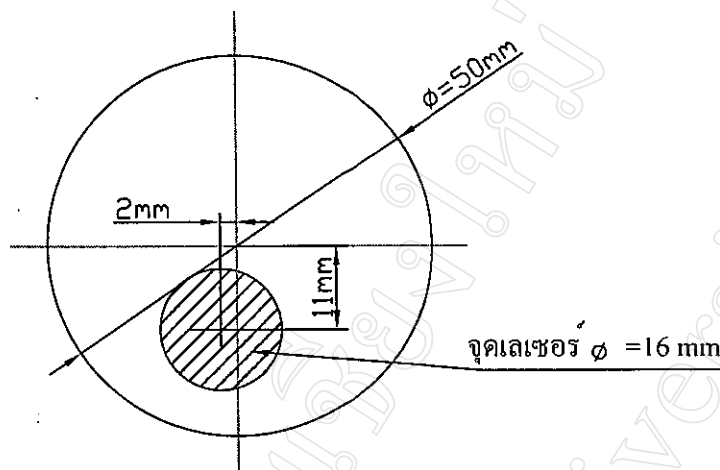
รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้งเลเซอร์เพื่อใช้เป็นแนวอ้างอิงโดยถือว่าเป็นแนวของพัลส์ตัวที่รอนจริง

เมื่อติดตั้งเลเซอร์บนแนวปีม โดยลำกล้องเลเซอร์ตั้งขนานกับแนวระดับ แล้วฉายเลเซอร์ผ่าน cooling slit 2, buncher และ capacitive pick-off เพื่อให้เลเซอร์นี้ไปตกยังกึ่งกลางของตัวจับวัสดุตัวอย่าง และจะได้จุดตกของเลเซอร์บน capacitive pick-off ที่จะใช้เป็นจุดอ้างอิงในการปรับกระเจงาที่ฉาบผิวหน้าให้ตั้งฉากกับแนวปีม โดยนำกระเจงาฉาบผิวหน้านี้ใส่ในตัวจับวัสดุ แล้วสะท้อนจุดเลเซอร์ไปยัง capacitive pick-off เพื่อให้ได้จุดสะท้อนและจุดบน capacitive pick-off เป็นจุดเดียวกัน จึงจะได้ว่ากระเจงที่ตั้งฉากกับแนวปีม แล้วหมุนตัวจับวัสดุตัวอย่าง โดยจะได้จุดสะท้อนของเลเซอร์ไปตกยังกึ่งกลางของ drift tube ที่ยาว 129 ซม. พบว่าเลเซอร์ตก ณ ตำแหน่งดังรูปที่ 3.5



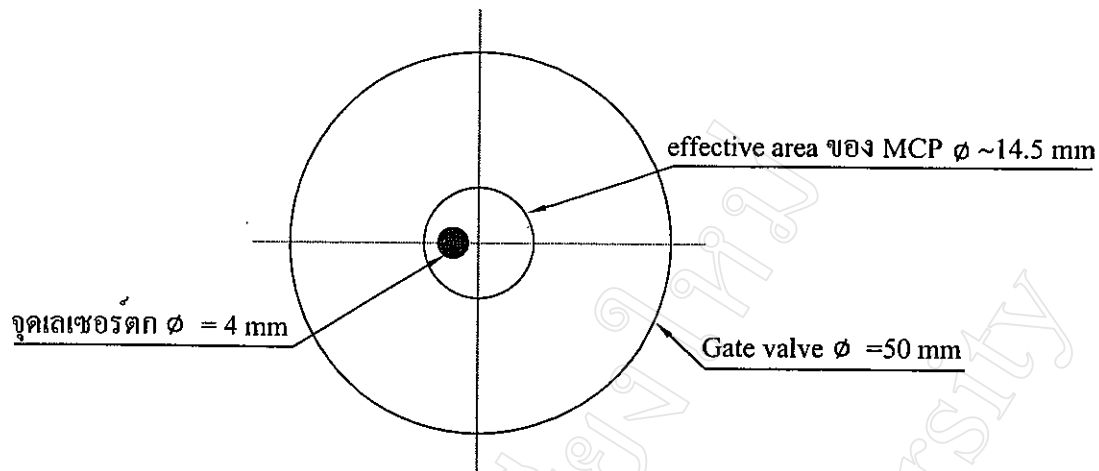
รูปที่ 3.5 แสดงจุดตกของเลเซอร์บนปลาย drift tube

ต่อ 3 ทาง ณ ตำแหน่งต่อจาก drift tube ที่ยาว 129 ซม. แล้วต่อ gate valve เข้ากับ 3 ทางนี้ โดยได้
ถือว่าจุดกึ่งกลางของ gate valve เป็นจุดเดียวกับกึ่งกลางของ MCP ที่จะต่อจาก gate valve ซึ่งพบว่า
เลเซอร์ตกบน gate valve ดังรูปที่ 3.6



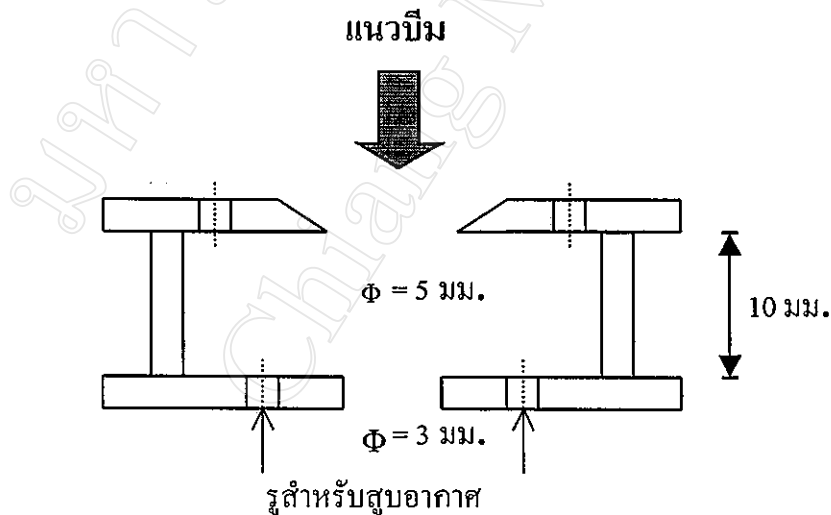
รูปที่ 3.6 แสดงจุดตกของเลเซอร์บน gate valve

และอ่านมุมที่แผ่นจานองศาที่แนวเลเซอร์นี้มีจุดตกดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ได้ 151 องศา (backscattering angle) จะพบว่าตำแหน่ง c นี้ไม่ได้ตกภายใน effective area ของ MCP ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.5 มม. จึงใช้แนวเลเซอร์นี้เป็นแนวในการนำทาง (guide line) เท่านั้น โดยจะใช้จุด b เป็นจุด fix จากกล้อง theodolite ในการเล็งจุดนี้ไว้ แล้วทำการยึด scattering chamber ไว้กับ support ซึ่งจะส่งผลให้จุดตกของเลเซอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ เปลี่ยนไป จึงต้องทำการปรับ chamber เพื่อให้เลเซอร์ตก ณ ตำแหน่ง b แล้วสะท้อนจากกระจกฉายผิวหน้านี้ไปตก ณ แนวเดียวกับจุดบน capacitive pick-off หลังจากนั้น ทำการหมุนตัวจับวัสดุตัวอย่างเพื่อให้จุดสะท้อนจาก b กับจุดบน capacitive pick-off เป็นจุดเดียวกัน และหมุนตัวจับวัสดุตัวอย่างไปตกยังตำแหน่ง d ที่เป็นสลิตที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. (slit 2) แล้วต่อ 3 ทางและ gate valve อีกครั้ง พบว่าจุดเลเซอร์ตกบน gate valve ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงจุดตกเลเซอร์บน gate valve หลังจากผ่าน slit 2 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม.

จะพบว่าจุดตกของเลเซอร์นี้ อยู่ภายในบริเวณพื้นที่ของ MCP ที่สามารถตรวจวัดอนุภาคที่กระเจิงย้อนกลับมาได้ ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้นั้น ทำมุม 149 องศา กับแนวเส้นตรง ac (ที่ถือเป็นแนวบีบเริ่มต้น) จากการอ่านค่าบนแผ่นจานองศา และเพื่อให้ได้แนวบีบในมุม 149 องศาที่ชัดเจนขึ้น จึงเพิ่มสลิต 1 ณ ตำแหน่งก่อนเข้า drift tube 129 ซม. โดยสลิต 1 นี้ทำเป็นสลิตคู่ดังรูปที่ 3.8 ทั้งนี้เพื่อให้ปั๊มสุญญากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.8 แสดงการออกแบบสลิต 1 ณ ตำแหน่งก่อนเข้า drift tube

การทำสลิตนี้ ทำโดยใช้เลเซอร์ในแนว 149 องศา เป็นตัวกำหนดตำแหน่งบนสลิตชั้นที่ 1 แล้วเจาะรูให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มม. แล้วนำสลิตชั้นแรกออกเพื่อทำการกำหนดตำแหน่งเลเซอร์บนชั้นที่ 2 ของสลิต เพื่อนำไปเจาะรูให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. หลังจากนั้นทำการประกอบทุกส่วนบนแนวบีม ก่อนทำการปั๊มให้ระบบมีความดันสุญญากาศประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์ ก่อนทำการทดลองเพื่อหาแนวบีมด้วยลำอนุภาคดิวทีรอน

3.2 การเล็งแนวบีมด้วยลำอนุภาคดิวทีรอน

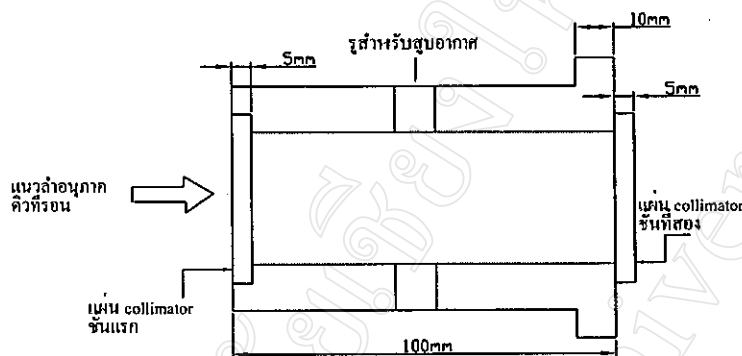
เมื่อทำการติดตั้ง scattering chamber และปั๊มระบบ จนกระทั่งภายใน scattering chamber มีความดันสุญญากาศประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์แล้ว จึงจะทำการยิงลำอนุภาคดิวทีรอนที่ถูกผลิตจาก RF ion source และถูกเร่งให้มีพลังงาน 140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) เคลื่อนผ่าน chopper และ buncher แล้วจะได้พัลส์ดิวทีรอนที่มีความกว้างอยู่ในเรือน นาโนวินาที (nanosecond หรือ ns) หลังจากผ่าน buncher และหลังจากนี้ก็จะเคลื่อนผ่าน capacitive pick-off ไปเข้ายัง scattering chamber ทาง incident port เพื่อให้พัลส์ดิวทีรอนไปชนกับฉากสารเรืองแสงที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมเคลือบด้วยผง phosphor ($Gd_2O_2S:Tb$) โดยวิธีการเตรียมฉากเรืองแสงนี้ดูได้จากภาคผนวก ง

3.2.1 การปรับแต่งลำอนุภาคดิวทีรอน

เมื่อลำอนุภาคดิวทีรอนพลังงาน 140 keV เคลื่อนไปชนกับฉากเรืองแสง จะเกิดแสงวาบให้เห็น จากกล้องที่ติดตั้งไว้ตรง view port A ของ scattering chamber หลังจากนั้นจะทำการปรับค่าความแรงของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กสองขั้ว (bending magnet) และแม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet) เพื่อให้ลำอนุภาคดิวทีรอน ตรง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของฉากเรืองแสงและมีเส้นผ่าศูนย์กลางมีขนาดเล็ก และมีความสมมาตรเท่าที่จะทำได้ หลังจากที่ได้ลำดิวทีรอนที่มีความสมมาตรและตกประมาณกึ่งกลางของตัวจับวัสดุแล้วนั้น จำเป็นจะต้องจำกัดแนวบีมนี้ให้ไปตกยังกึ่งกลางของตัวจับวัสดุ แล้วกระเจิงย้อนกลับเข้าภายใน effective area ของ MCP ที่ตั้งที่มุม 149 องศาจากแนวบีมด้วย collimator

3.2.2 การกำหนดตำแหน่งรูของ beam collimator

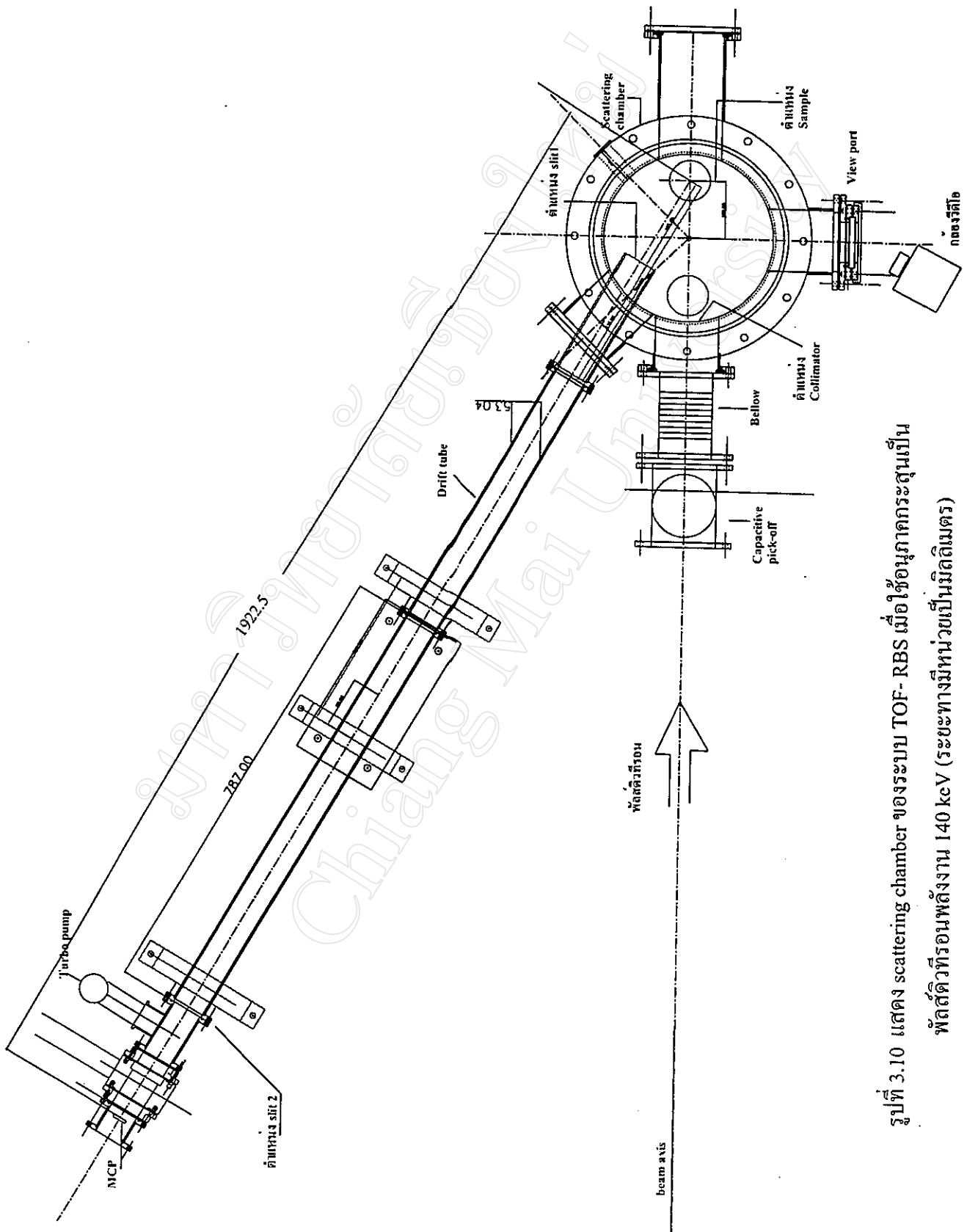
ในการจำกัดหรือบังคับแนวลำตัวทรีออน ให้ไปตกยังกึ่งกลางของตัวจับวัสดุ สามารถทำได้จากการใช้ beam collimator ซึ่ง collimator นี้จะอยู่ ณ ตำแหน่ง incident port โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็น collimator 2 ชั้น



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของ collimator ที่ทำจากอลูมิเนียม

และจะต้องเจาะรูบน collimator ทั้ง 2 ชั้น เพื่อบังคับบีบให้ไปตกยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยขนาดและตำแหน่งของรูจะถูกกำหนดโดย ยิงพัลส์ตัวทรีออนพลังงาน 140 keV มาชน collimator ชั้นแรก ตรง incident port ซึ่งได้ทำ liquid paper เอาไว้ จนกระทั่งปรากฏรอยไหม้ให้เห็นได้ชัด แล้วจึงทำการเจาะรูบน collimator ชั้นแรกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มม. และทำการบีบระบบจนกระทั่งภายใน scattering chamber มีความดันสูญญากาศประมาณ 2×10^{-7} มิลลิบาร์ เพื่อจะทำการยิงพัลส์ตัวทรีออนผ่าน collimator ชั้นแรก ให้ไปปรากฏรอยไหม้บน liquid paper ที่ทำอยู่บน collimator ชั้นที่ 2 แล้วจึงนำไปเจาะรูให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. หลังจากนั้นจึงทำการประกอบ collimator 2 ชั้นนี้ แล้วทำการบีบระบบ เพื่อทำการยิงพัลส์ตัวทรีออนผ่าน collimator 2 ชั้นนี้ไปตกยังกึ่งกลางของตัวจับวัสดุตัวอย่าง โดยสังเกตจากการวางของฉากเรืองแสง

เมื่อพัลส์ตัวทรีออนที่ยิงผ่าน collimator 2 ชั้นนี้ไปตกยังกึ่งกลางของตัวจับวัสดุตัวอย่างนั้น จะได้ว่าขนาดของบีบบนวัสดุตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 มม. และจะกระเจิงย้อนกลับหลังจากชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์กับนิวเคลียสของวัสดุตัวอย่าง ผ่านสลิต 1 และสลิต 2 ของ drift tube ที่ได้จากการเล็งแนวบีบด้วยเลเซอร์ ไปยังหัววัด MCP ด้วยมุมกระเจิงย้อนกลับเท่ากับ 149 องศาจากแนวบีบ ดังรูปที่ 3.10

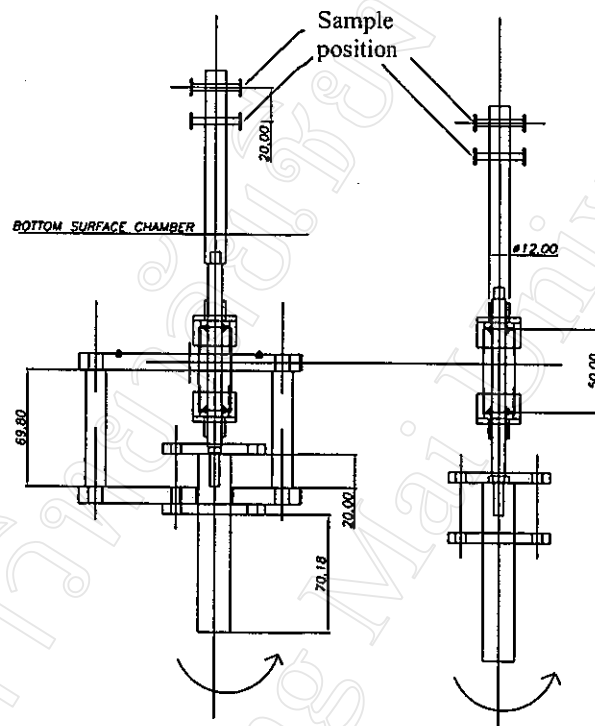


รูปที่ 3.10 แสดง scattering chamber ของระบบ TOF-RBS เมื่อใช้เทคนิคการกระตุ้นเป็น

พัลส์ลำไอออนพลังงาน 140 keV (ระยะทางมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

3.3 การออกแบบตัวจับวัสดุตัวอย่าง (sample holder)

ในการทดลองแต่ละครั้ง เราต้องการเก็บข้อมูลจากวัสดุตัวอย่างหลายๆ ชนิด โดยไม่ต้องเปิด/ปิด สภาพสุญญากาศบ่อยๆ จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวจับวัสดุตัวอย่างขึ้นมาใหม่ แทนตัวจับวัสดุตัวอย่างเดิมที่ใช้ในการเล็งแนวบีม ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งตัวจับวัสดุตัวอย่างที่สร้างขึ้นมานี้สามารถจับวัสดุตัวอย่างได้ 4 อัน โดยมีก้านจับที่สามารถเลื่อน/หมุนวัสดุตัวอย่างให้ไปอยู่ตรงกับจุดตกของบีมได้จากภายนอก



รูปที่ 3.11 แสดงแบบของตัวจับวัสดุตัวอย่างแบบ 4 ชั้นพร้อมกัน ที่มีพื้นที่
ชั้นละ 1 ตร.ซม (ความยาวมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

เมื่อได้ตัวจับวัสดุตัวอย่างใหม่แล้ว จึงนำไปติดตั้งภายใน scattering chamber แทนอันเดิม แล้วทำการปั๊มระบบเพื่อเตรียมไว้สำหรับการทดลองจริง

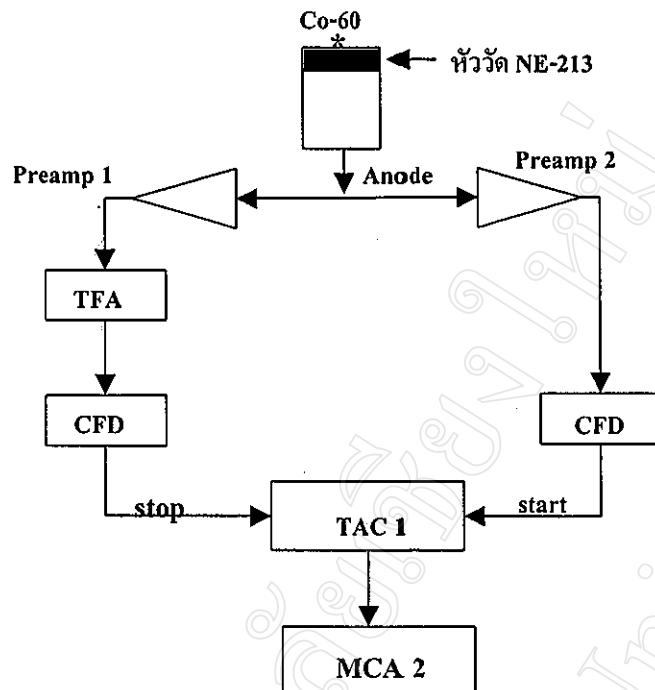
3.4 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเทคนิค TOF-RBS

ก่อนการทำการทดลองจริงเพื่อเก็บข้อมูลนำไปวิเคราะห์นั้น จำเป็นจะต้องตรวจสอบการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์, สายสัญญาณ รวมไปถึงการตั้งค่าต่างๆ ในระบบอิเล็กทรอนิกส์

เช่น TAC (time to amplitude converter) range ให้เหมาะสมกับการทดลอง ซึ่งการตั้ง TAC range นี้จะพิจารณาจาก เวลาทั้งหมดของพัลส์คิวทรีออนพลังงาน 140 keV ที่ใช้ในการเคลื่อนจาก capacitive pick-off ไปยังเป้าด้วยระยะ 55 ซม. ซึ่งจะกินเวลา 150.25 ns และเวลาที่พัลส์คิวทรีออนที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากชนกับนิวเคลียสของธาตุบนเป้าไปยังหัววัดด้วยระยะ 192.25 ซม. โดยเวลาที่พัลส์คิวทรีออนที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากชนกับนิวเคลียสของธาตุบนเป้านี้ จะขึ้นอยู่กับมวลของธาตุด้วย คือ พัลส์ที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากชนกับธาตุนั้น จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่มากกว่าชนกับธาตุนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สมมุติให้ธาตุนั้นเป็นเป้าที่เบาที่สุดที่จะสามารถวัดได้ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ด้วยระยะ 192.25 ซม. ของพัลส์คิวทรีออนที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากชนกับนิวเคลียสของคาร์บอนจะเท่ากับ limiter ประมาณ 663.29 ns ดังนั้นเวลาที่พัลส์คิวทรีออนใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมดประมาณ 813.54 ns จึงได้ว่า TAC range ควรตั้งไว้ที่ช่วงเวลามากกว่า 813.54 ns แต่จะไม่มากกว่าช่วงเวลาห่างของแต่ละหัวของพัลส์คิวทรีออนที่เลือกใช้ repetition rate เท่ากับ 500 kHz หรือคิดเป็นช่วงเวลาห่างระหว่างหัวเท่ากับ 2000 ns ในงานวิจัยนี้จึงเลือกตั้ง TAC range ไว้ที่ 2000 ns

3.5 Intrinsic timing resolution ของระบบอิเล็กทรอนิกส์

ในการหา intrinsic timing resolution ของระบบ TOF electronic ของการทดลองนั้น ได้ใช้สารกัมมันตรังสี Co-60 และหัววัด NE-213 liquid scintillation ซึ่งจะแยกสัญญาณออกจากแอมโพลีออกเป็น 2 สัญญาณ เพื่อใช้เป็นสัญญาณ start และ stop ไปเข้า TAC 1 โดยที่ใช้ TAC range เท่ากับ 2000 ns ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งวงจรที่ใช้นี้จะเป็นวงจรเดียวกับการทดลอง TOF-RBS (รายชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายนี้ดูจากตารางที่ 3.1)



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของการทดลองหาค่า intrinsic timing resolution

โดยสัญญาณที่ออกจาก preamplifier ของบริษัท Hamamatsu ที่เสมือนเป็นสัญญาณจากหัววัด MCP (สัญญาณ A) ให้เป็นสัญญาณ start ของ TAC 1 และสัญญาณที่ออกจาก preamplifier ของ ORTEC 9301 ที่เสมือนเป็นสัญญาณจาก capacitive pick-off (สัญญาณ B) ให้เป็นสัญญาณ stop ของ TAC 1

จากการทดลองข้างต้น พบว่า เมื่อนำสัญญาณ A และสัญญาณ B ต่อเข้ากับออสซิลอสโคป สัญญาณ B มาช้ากว่าสัญญาณ A อยู่ประมาณ 103 ns เนื่องจากการ delay ในสายเคเบิ้ล แล้วจึงนำทั้ง 2 สัญญาณนี้เข้า TAC 1 และนำ output จาก TAC 1 ต่อเข้า MCA 2 พบว่าค่า full width at half maximum (FWHM) ประมาณ 2.36 channel number หรือ 3.6 ns จาก

$$\text{FWHM (ns)} = \text{FWHM (ch \#)} \times \text{time calibration}$$

เมื่อ time calibration ของ TAC 1 range 2000 ns เท่ากับ 1.509 ns/ch

ดังนั้น intrinsic timing resolution(ที่FWHM) ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ~ 3.6 ns

ตารางที่ 3.1 รวบรวมรายชื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

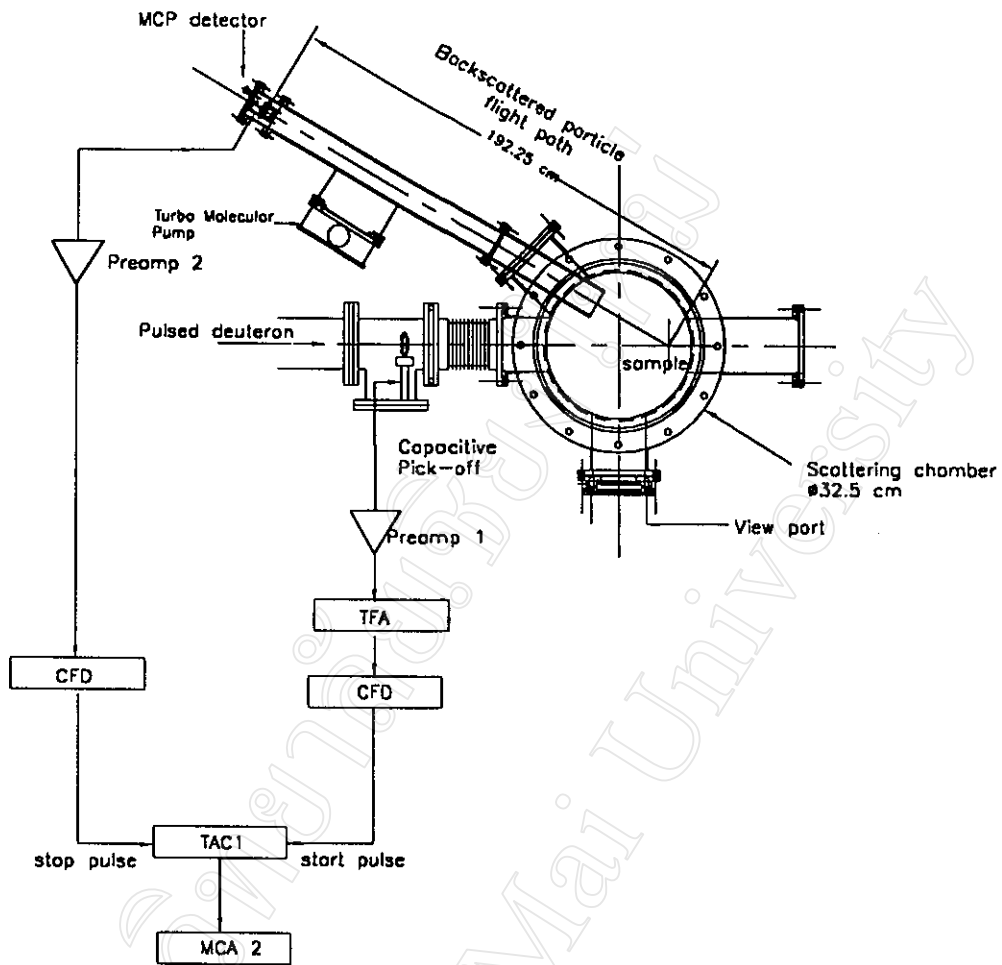
อักษรย่อที่ใช้	ชื่อเต็มและเบอร์รุ่น
Preampl1	Fast Preamplifier รุ่น ORTEC 9301
Preampl2	Fast Amplifier รุ่น Hamamatsu C5594
TFA	Timing Filter Amplifier รุ่น ORTEC 474
CFD	Constant Fraction Discriminator รุ่น ORTEC 473A
TAC 1	Time to Amplitude Converter รุ่น ORTEC 566
TAC 2	Time to Amplitude Converter รุ่น CANBERRA 2044
MCA 1	Multichannel Analyzer รุ่น Nuclear Data 66
MCA 2	Multichannel Analyzer รุ่น Fast comtec
LSD	Logic Shaper and Delay รุ่น CANBERRA 2055

3.6 วิธีการทดลอง

สำหรับวิธีการ Time-of-Flight ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิค RBS นี้ จะใช้ลำอนุภาค กระสุนที่วิ่งเข้าชนเข้าในลักษณะเป็นห้วง (pulse) ที่มีความกว้างในเรื่อนนาโนวินาที โดยได้นำ เครื่องกำเนิดนิวตรอนชนิดห้วงมาประยุกต์ใช้ ซึ่งในส่วนสุดท้ายของแนว빔 (beam line) ที่เคย เป็นที่อยู่ของเป้าทริเทียมได้ถูกเปลี่ยนเป็น scattering chamber ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 32.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3

ห้วงอนุภาคนั้นจะถูกผลิตจากลำอนุภาคคิวทிரอนที่ถูกผลิตจาก radio-frequency ion source และถูกเร่งให้มีพลังงาน 140 keV ผ่านไปยังส่วนของระบบ pulsing ที่ประกอบด้วย chopper ที่ทำหน้าที่หั่นลำอนุภาคให้เป็นห้วง และ buncher ที่ทำหน้าที่บีบห้วงอนุภาคให้แคบลงประมาณ 10 เท่า ซึ่งจะได้ห้วงอนุภาคคิวทிரอนที่มีความกว้างอยู่ในเรื่อน 2-5 ns และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 เซนติเมตร เมื่อห้วงอนุภาคคิวทிரอนนี้เคลื่อนที่ผ่าน capacitive pick-off และเหนี่ยวนำให้เกิด สัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะได้ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงทางเวลาต่อไป เช่น ใช้เป็นสัญญาณ start ของ

เคลื่อนไปชนวัสดุตัวอย่างที่ตั้งฉากกับแนว빔ด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร และมี pulse width ประมาณ 5 ns (ดูรายละเอียดที่หัวข้อ 5.1.2) เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุตัวอย่างแล้วจะมีหัวอนุภาคดิวเทรียมบางส่วนกระเจิงย้อนกลับไปยังหัววัด MCP ที่มุม θ เท่ากับ 149 องศา นับจากแนวการเคลื่อนที่เดิมและอยู่ห่างจากวัสดุตัวอย่างเป็นระยะ 192.25 เซนติเมตร MCP จะผลิตสัญญาณอ้างอิงทางเวลาอีกหนึ่งสัญญาณ ซึ่งจะใช้เป็นสัญญาณ stop ทั้ง 2 สัญญาณที่เกิดจาก capacitive pick-off และ MCP จะถูกส่งไปยัง preamplifier (รุ่น ORTEC 9301 และ Hamamatsu C5594 ตามลำดับ) สัญญาณที่ออกจาก preamplifier รุ่น ORTEC 9301 นี้ส่งไปยัง timing filter amplifier (TFA) เพื่อขยายแอมพลิจูดของสัญญาณที่มาจาก capacitive pick-off แต่ไม่เปลี่ยนแปลง rise time ทั้งนี้เพราะในขณะที่ทำการทดลอง buncher มีประสิทธิภาพไม่ดี ทำให้สัญญาณจาก capacitive pick-off มีแอมพลิจูดต่ำ ซึ่งโดยลำพังแล้วจะไม่สามารถผ่าน lower threshold ของ CFD ได้ สัญญาณจาก preamplifier ทั้งสองนี้จะถูกส่งไปเปลี่ยนเป็นสัญญาณ logic ที่ discriminator (CFD) โดยผ่านทางสาย 50 โอห์ม ซึ่งสัญญาณที่ออกจาก CFD ทั้ง 2 จะถูกส่งต่อไปยัง time to amplitude converter (TAC รุ่น 566 ของบริษัท ORTEC) เพื่อผลิตสัญญาณ logic ที่มีแอมพลิจูดแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาห่างระหว่างสัญญาณ start กับ stop แล้วนำไปเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัลโดย amplitude to digital converter (ADC) เพื่อที่จะสามารถใช้คอมพิวเตอร์บันทึกและวิเคราะห์ได้ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบ TOF-RBS

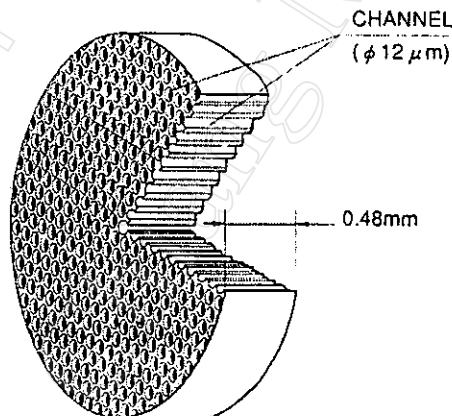
3.7 หัววัด Micro - channel Plate (MCP)

MCP เป็นหัววัดที่มีคุณสมบัติเด่นๆหลายประการ เช่น มีการตอบสนองเร็วมาก, มี gain สูง และมีอำนาจการจำแนกเชิงเวลาสูง อีกทั้งมีขนาดเล็ก กระทัดรัด น้ำหนักเบา ซึ่ง MCP นี้สามารถตอบสนองได้ทั้งอิเล็กตรอน, ไอออน, UV, soft X-ray photon และนิวตรอน ดังนั้นหัววัด MCP จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะในเรื่องของการวิเคราะห์เชิงผิว เช่น TOF-RBS, Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS), Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) และฟิสิกส์พลังงานสูง เช่น การทดลองที่เกี่ยวกับแสง Synchrotron [Hamamatsu, 1994]

3.7.1 ลักษณะและกระบวนการผลิตหัววัด MCP

โดยทั่วไปหัววัด MCP จะมีรูปร่างลักษณะและขนาดต่าง ๆ จัดแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้ต่างก็ประกอบด้วยหลอดแก้วขนาดเล็กมากที่เรียกว่า channel จำนวนมากที่ถูกหลอมติดกันดูคล้ายรังผึ้งดังรูปที่ 3.14

อัตราส่วนระหว่างพื้นที่รวมของรู channel ต่อพื้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของหัววัด ซึ่งคำศัพท์เรียกเฉพาะว่า open area ratio(OAR) โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์



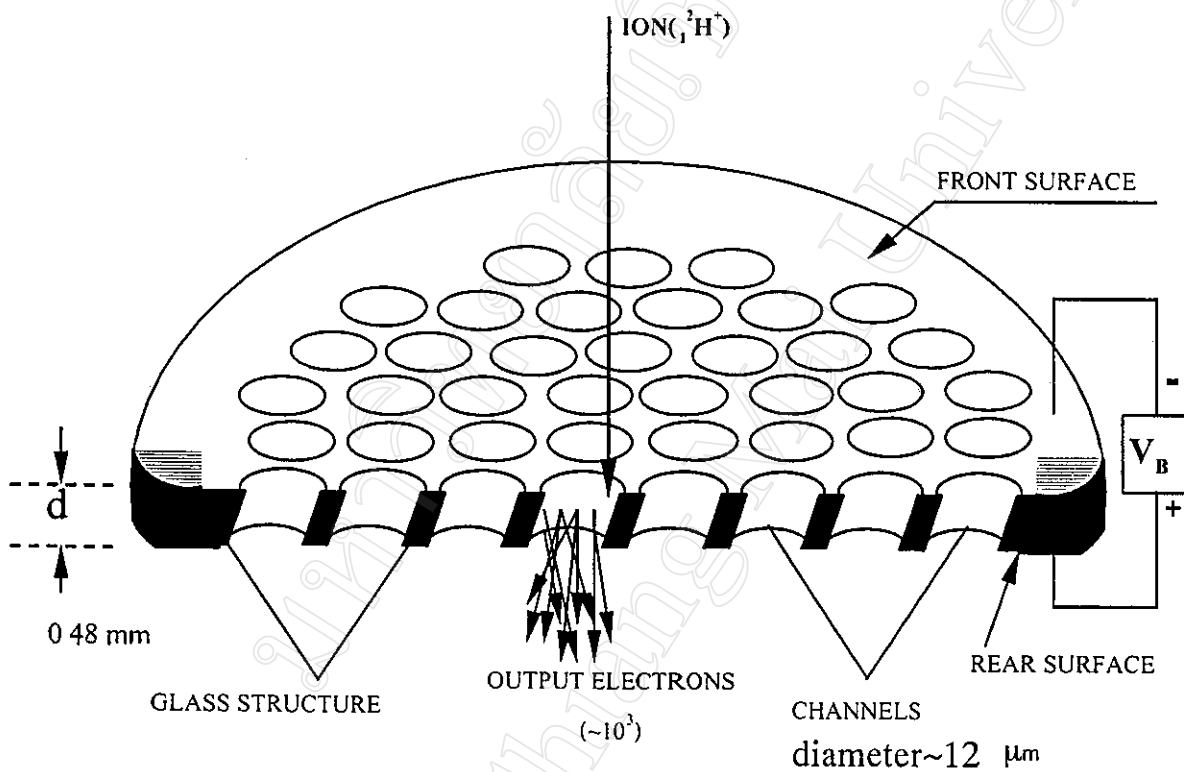
รูปที่ 3.14 ลักษณะของหัววัด MCP แบบวงกลม

แต่ละ channel นี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 ไมครอน และจัดเรียงตัวในลักษณะที่ให้แกนของแต่ละ channel ทำมุมกับแนวแกนที่ตั้งฉากกับผิวหน้าของหัววัด MCP

ประมาณ 5-15 องศา ซึ่งเรียกมุมนี้ว่า bias angle ดังรูปที่ 3.15 และความหนาของหัววัด MCP หรือความยาวของ channel จะหาได้จาก อัตราส่วนของความยาวของ channel ต่อขนาดของรูของ channel ซึ่งมักใช้สัญลักษณ์เป็นตัว α

$$\alpha = \frac{\text{ความยาวของ channel}}{\text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ channel}}$$

โดยทั่วไปบริษัทผู้ผลิตกำหนดให้ $\alpha = 40$ ดังนั้นทำให้ได้ความยาวของ channel หรือความหนาของหัววัด MCP (d) มีค่าเท่ากับ 0.48 มิลลิเมตร



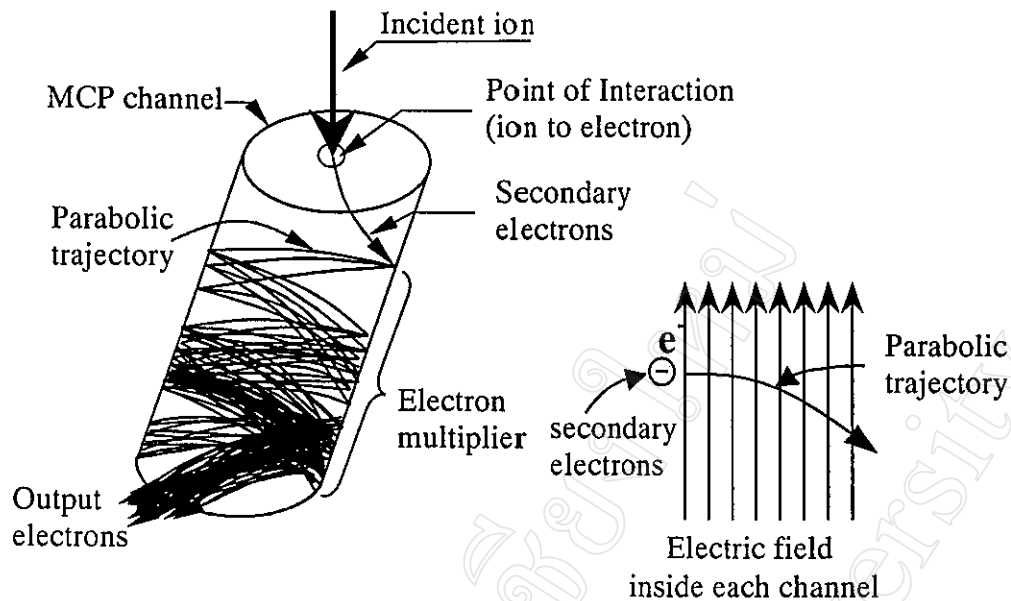
รูปที่ 3.15 แสดงรายละเอียดของหัววัดของ MCP โดย V_B คือความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้แก่ผิวหน้าทั้งสองด้านของ MCP เพื่อทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในช่อง channel ทั้งหมด

* [<http://heawww.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>]

เทคนิคการทำรู channel ที่เล็กมากของหัววัด MCP มีบางส่วนเลียนแบบมาจากการทำเส้นใยนำแสง (optical fiber) กล่าวคือ เริ่มจากนำแท่งแก้วที่สามารถกัดกร่อนได้ไปใส่เป็น core ในช่องกลวงตรงกลางของหลอดแก้วที่เป็นชนิด lead oxide แล้วจึงนำไปดึงให้ยาวขึ้นโดยใช้ความร้อน จนกระทั่งหลอดแก้วนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเรียกว่า first draw fiber เหล่านี้มาจัดเรียงใน hexagonal array แล้วนำไปยัดอีกด้วยความร้อน เรียกว่า second draw fiber หลังจากนั้นนำ fiber เหล่านี้มาหลอมรวมกันเป็นมัดแล้วจึงค่อยนำมาตัดเป็นแผ่นบาง ๆ แล้วนำไปขัดจนกระทั่งได้ความหนาและรูปร่างตามที่ต้องการ ส่วนแก้วที่เป็น core ถูกทำให้หายไปด้วยการกัดกร่อนจนกลายเป็นรู channel เต็มไปหมด ต่อไปทำการระเหย Ni - Cr (Inconel) เคลือบผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน เพื่อที่จะฟอร์มเป็นอิเล็กโทรด โดยความหนาของอิเล็กโทรดนี้จะถูกควบคุมด้วยค่าความดันทานที่มีค่าประมาณ 100-200 โอห์ม เมื่อวัดจากขอบถึงขอบ

3.7.2 หลักการทำงานของหัววัด MCP

เมื่ออนุภาคหรือไอออนเคลื่อนที่เข้าไปชนผนังของ channel จะปลดปล่อยให้อนุภาคอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) หลุดออกมาเจอกับความต่างศักย์ V_B ที่ตกคร่อมอยู่ระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ของหัววัด MCP คือ MCP in และ MCP out ซึ่ง V_B นี้จะสร้างสนามไฟฟ้า E ในทิศทางที่ชี้จาก MCP out ไปยัง MCP in ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะเคลื่อนอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า E เป็นแบบพาราโบลาในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับ E ไปชนกับผนังของ channel แล้วจะได้อิเล็กตรอนทุติยภูมิหลุดออกมาเป็นจำนวนทวีคูณดังรูปที่ 3.16 ตอนโผล่ออกมาจากแต่ละ channel จะกลายเป็นฝูงอิเล็กตรอนทุติยภูมิจำนวนมาก ซึ่งจะวิ่งต่อไปยังขั้วแอโนด โดยมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกที่สูงกว่าผิว MCP out



รูปที่ 3.16 แสดงหลักการเกิดและทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิใน channel *

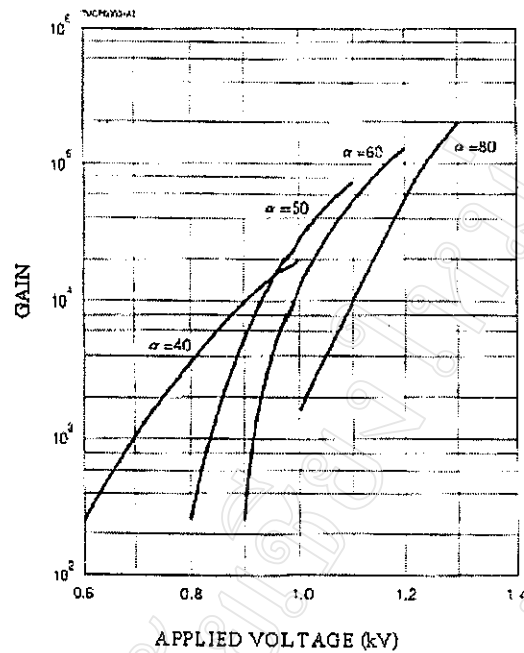
โดยจำนวนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ให้ออกมานี้จะขึ้นอยู่กับค่า gain (g) ของ หัววัด MCP กล่าวคือ

$$g = \exp(G \cdot \alpha)$$

โดยที่ G คือ secondary emission characteristic ของ channel หรือเรียกว่า gain factor

ซึ่งค่า gain factor นี้จะเป็นค่าเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นผนังของ channel และ ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม หรือค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าภายใน channel ด้วย ค่า gain ของ หัววัด MCP อาจดูได้จากรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ให้ตกคร่อม channel กับ gain ของหัววัด MCP 4 ตัวโดยแต่ละตัวจะประกอบด้วย channel ที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน แต่ต่างกันเฉพาะค่า α

*[<http://heawww.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>]



รูปที่ 3.17 แสดงค่า gain ของหัววัด MCP เมื่อมี α ที่แตกต่างกัน 4 ค่า [Hamamatsu,1994]

จากรูปที่ 3.17 หัววัด MCP ที่มีค่า α ที่สูงนั้นจะมีค่า gain ที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ้า gain ของหัววัดสูงกว่า 10^4 แล้ว จะมีผลของ noise ที่เกิดจาก ion feedback เพิ่มขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติแล้วหัววัด MCP มีค่า α ประมาณ 40 ให้ gain ประมาณ 10^4 เมื่อใช้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 1 กิโลโวลต์ และถ้าต้องการเพิ่ม gain ก็สามารถทำได้โดยการเอาแผ่น MCP มาประกบกันหรือเพิ่ม stage

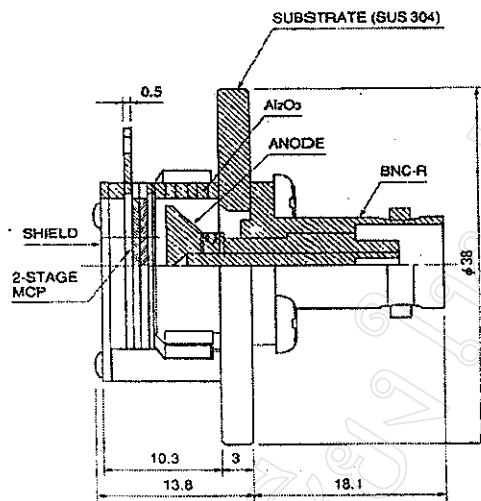
3.7.2.1 หัววัด MCP ที่เกี่ยวข้อง

หัววัด MCP ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เชิงสเปกตรัมมีให้เลือกใช้อยู่หลายรุ่น ดังตารางที่ 3.2

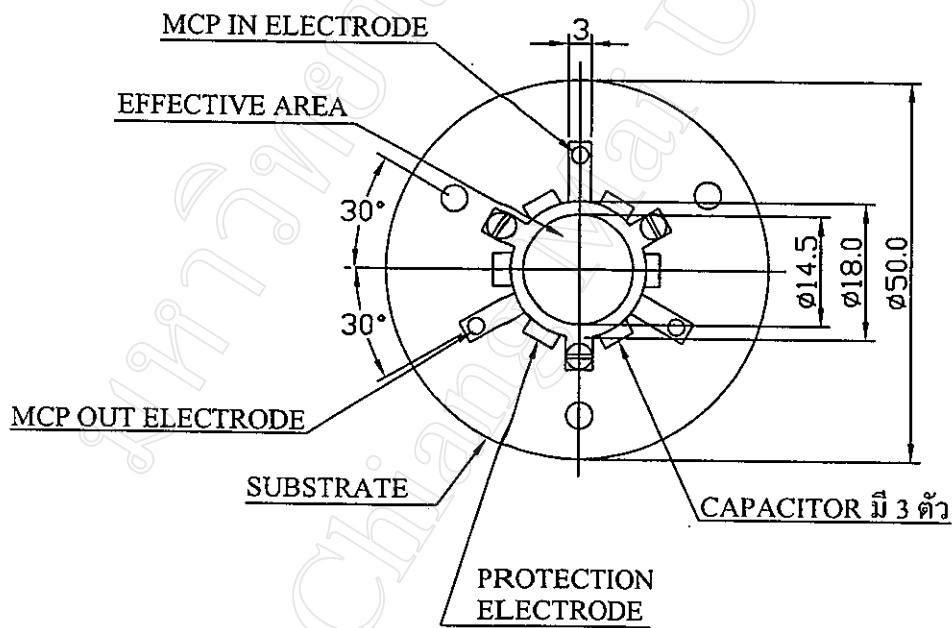
parameter	F4655-10	Unit
● GENERAL		
Assembly Outer Diameter	38.0	mm
Effective Diameter	14.5	mm
Maximum Height	31.9	mm
MCP Channel Diameter	12	μm
MCP Stage Number	2	μm
● MAXIMUM RATINGS		
MCP Supply Voltage(In-Out)	2.5	kV
MCP Out-Anode Voltage	0.5	kV
Electric Potential of Each Terminal	MCP in: -3, MCP Out: -0.5 Anode: GND	kV
Operating Vacuum Condition	1×10^{-5}	Torr
Ambient Temperature	+10 to +40	$^{\circ}C$
● Typical characteristic (Vacuum condition 1×10^{-6} Torr, Ambient temperature $25^{\circ}C$)		
Gain at 2.4 kV	5×10^{-7}	-
Pulse Height Resolution(FWHM) at 2.4 kV	50	%
Plate Resistance	30 to 70	$M\Omega / MCP$
Maximum Linear Output	1	μA
Dark Count at 2.4 kV	3	$s^{-1}(cps)/cm^2$
Rise Time	250	ps
Fall Time	750	ps

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของหัววัด MCP รุ่น F4655-10 [Hamamatsu, 1994]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดเชิงเวลา จึงต้องการหัววัด MCP ที่มีการตอบสนองไวมากเพื่อให้มีความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ หัววัด MCP รุ่น F4655-10 ซึ่งเป็นหัววัด แบบ 2-stage ดังรูปที่ 3.18 และถูกออกแบบมาให้ใช้กับความต่างศักย์ตกรวมได้ ≤ 2.5 kV

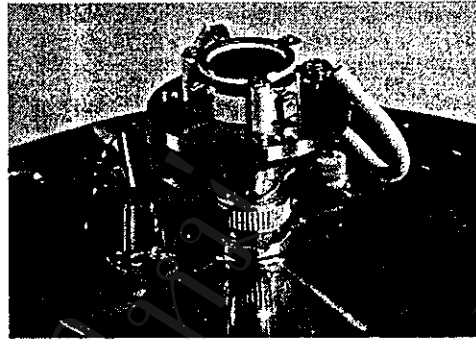
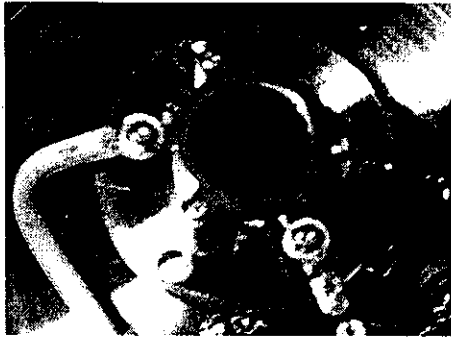


(ก) ความยาวของแบบอยู่ในหน่วยมิลลิเมตร

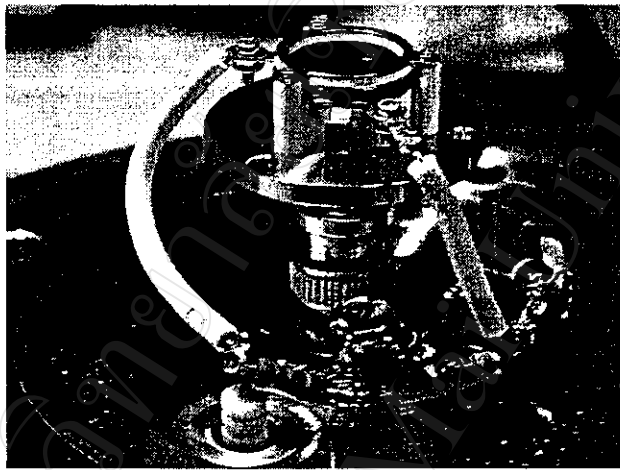


(ข)

รูปที่ 3.18 หัววัด MCP รุ่น F4655-10 (ก) แผนภาพทางด้านข้าง (ข) แผนภาพทางด้านหน้า (ค) ภาพถ่ายในลักษณะที่พร้อมจะติดตั้งกับ detector housing และ (ง) แสดงลักษณะการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับหัววัด MCP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (จ) แผนภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัด MCP



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.18 (ต่อ)

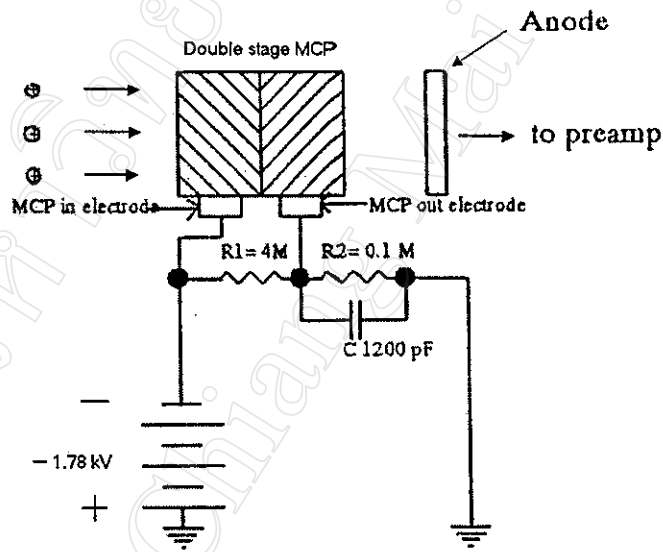
หัววัด MCP รุ่น F4655-10 นี้จะมีตัวเก็บประจุ (capacitor) ที่บริเวณรอบๆ MCP 3 ตัว เพื่อป้องกันการเกิด ringing noise และแอโนดที่ terminate ด้วย 50 โอห์มที่ต่ออยู่กับขั้ว BNC output โดยแอโนดจะทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ออกมาจาก MCP out

ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ V_B มากขึ้นจนกระทั่ง gain ของ MCP นั้นมีค่าสูงมากจนกระทั่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นที่บริเวณนี้มีจำนวนมาก จะส่งผลให้เกิด space charge ขึ้นที่บริเวณ MCP out ที่ติดกับแอโนด การเกิด space charge นี้จะไปมีผลต่อการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถแก้การเกิดนี้ได้โดยให้มี strip current (I_s) ไหลผ่านผนังของ channel โดยผ่านตัวต้านทาน R

ซึ่ง strip current จะมีค่าน้อยเมื่อค่าความต้านทานมีค่าสูงๆ ดังนั้นกระแส output ที่ออกจากแอโนดจะมีค่าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ของ I_s เท่านั้น เมื่อ

$$I_s = \frac{V_B}{R_1 + R_2} (\mu A)$$

โดยที่ R_1, R_2 คือค่าความต้านทานที่อยู่ในเรือนของเมกกะโอห์ม จากความสัมพันธ์ข้างต้นนี้พบว่า I_s จะขึ้นอยู่กับ R_1, R_2 และค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม MCP in และ MCP out (V_B) และกระแส output ที่ได้จะมีค่าประมาณ $0.05 I_s - 0.06 I_s$ ดังนั้นสามารถเลือกใช้ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ($M\Omega$) ให้เหมาะสมกับ V_B (kV) เพื่อให้ได้กระแส output ออกมาเป็นสัญญาณของหัววัด MCP ที่จะถูกส่งผ่านทางขั้ว BNC output ออกไปยัง fast amplifier เพื่อจะนำสัญญาณไปเข้าในส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของ TOF-RBS ที่จะได้กล่าวต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ 4 เมกะโอห์ม และ 0.1 เมกะโอห์มตามลำดับ ดังรูปที่ 3.18

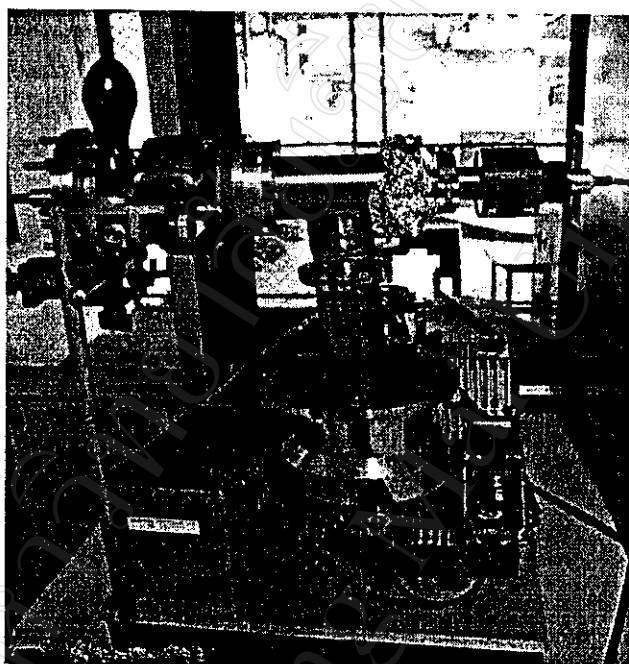


(จ)

รูปที่ 3.18 (ต่อ)

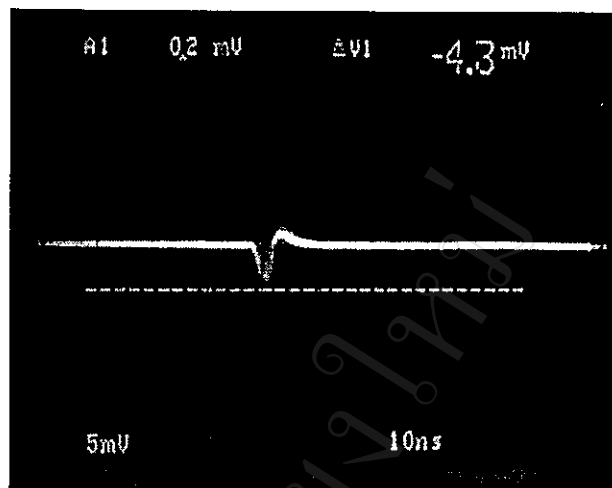
3.7.3 การทดสอบหัววัด MCP

เมื่อต้องจรวจอิเล็กทรอนิกส์ของหัววัด MCP ดังรูปที่ 3.18 (จ) แล้ว จะต้องทำการทดสอบการทำงานของหัววัด MCP ก่อนการติดตั้ง MCP บนแนว빔 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยทำการแยกชุดทดสอบหัววัดซึ่งประกอบไปด้วย gate valve, turbo pump และ housing MCP ที่ติดตั้ง MCP เรียบร้อยแล้วเป็นดังรูปที่ 3.19 และใช้ Am-241 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีอัลฟาพลังงาน 5.47 MeV (Martin and Blichert, 1970) และความดันสูญญากาศเท่ากับ 6×10^{-6} มิลลิบาร์



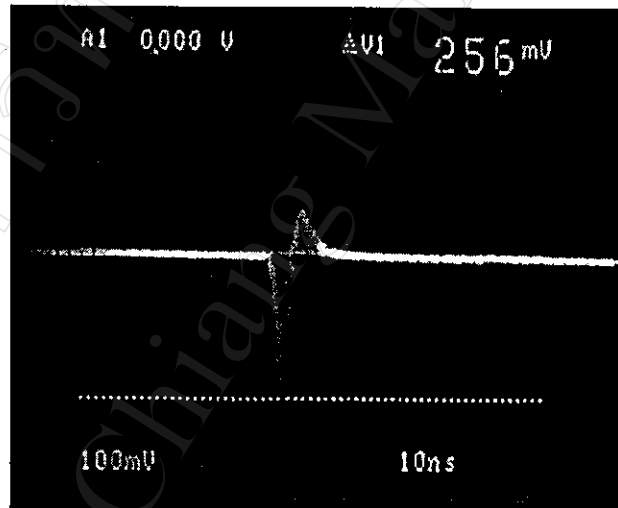
รูปที่ 3.19 แสดงชุดทดสอบหัววัด MCP

เมื่อจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยค่อยๆ เพิ่มค่าความต่างศักย์จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ -2.0 กิโลโวลต์ และนำสัญญาณที่ได้จาก MCP ที่แอดโนคผ่านทางสาย 50 โอห์มที่ขั้ว BNC ซึ่งจะได้สัญญาณของหัววัดที่ต่อเข้ากับ oscilloscope เป็นดังรูปที่ 3.20



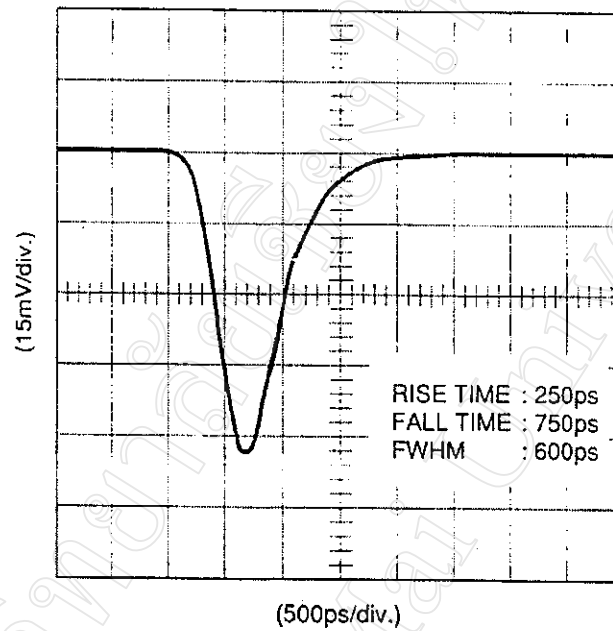
รูปที่ 3.20 แสดงสัญญาณที่ออกจากขั้วแอโนดที่ต่อโดยตรงกับ oscilloscope ผ่านทางสาย 50 โอห์ม

และเมื่อนำสัญญาณจากแอโนด ผ่านทางสาย 50 โอห์มที่ขั้ว BNC นี้ไปยัง fast amplifier รุ่น C5594 ของบริษัท Hamamatsu จะได้สัญญาณของหัววัดจาก oscilloscope เป็นดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะสัญญาณที่ออกจาก fast amplifier รุ่น C5594 ของบริษัท Hamamatsu

จะพบว่าสัญญาณของหัววัด MCP ที่ออกจากแอโนดในรูปที่ 3.20 นั้นมีลักษณะเดียวกับสัญญาณในรูปที่ 3.22 (จากหนังสือคู่มือ ของบริษัท Hamamatsu) ซึ่งเป็นลักษณะที่เคยเห็นมาก่อนแล้ว แต่มีแอมพลิจูดต่ำกว่ามาก เมื่อนำมาถ่ายรูปในตอนหลัง อาจเป็นเพราะการเสื่อมสภาพของหัววัดที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดที่ได้ปล่อยให้หมีแสงเข้าหัววัดตอนที่ได้อ่อนความต่างศักย์สูงให้แก่หัววัดแล้ว



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะสัญญาณที่ออกจากหัววัด MCP เมื่อ
ป้อนความต่างศักย์ค่าสูงเท่ากับ -2.0 kV [Hamamatsu, 1994]