

**รายงานเชิงเทคนิค**  
**(TECHNICAL REPORT)**

หมายเลขเอกสาร (For OD) KM Document No.	SLRI-TR-2022-045
ชื่อเรื่อง Title	ระบบวัดการสูญเสียลำไอเล็กตรอนด้วยเส้นใยแก้วนำแสง
ชื่อฝ่าย Department	ฝ่ายเครื่องเร่งอนุภาค
วันที่เขียนรายงาน Date of Report	2 สิงหาคม 2565
ระดับการเปิดเผยข้อมูล Level of Disclosure	<input type="checkbox"/> ข้อมูลในรายงานเป็นความลับ (Undisclosed) <input type="checkbox"/> เปิดเผยข้อมูลเฉพาะภายในฝ่ายหรือส่วนงาน (Information can be disclosed within department/section) <input type="checkbox"/> เปิดเผยข้อมูลได้สำหรับพนักงานของสถาบันฯ และอนุญาตให้บันทึกข้อมูลเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบ Knowledge Management ภายในสถาบันฯ (Information can be disclosed for SLRI staffs and can be part of SLRI's Knowledge Management System) <input checked="" type="checkbox"/> เปิดเผยข้อมูลได้เพื่อเป็นองค์ความรู้สาธารณะ เช่นเว็บไซต์ของสถาบันฯ (Information is available for public)
คำสำคัญ Keyword	เส้นใยแก้วนำแสง, Optical fiber, Beam loss monitor

รายชื่อผู้ดำเนินโครงการและจัดทำรายงาน Name	ส่วนร่วมในการปฏิบัติงานในโครงการ Responsible tasks in the project
ธรรมาภิบาล ภู่อำพงษ์	หัวหน้าโครงการ, จัดซื้อ,ออกแบบ,ประกอบทดสอบ, เขียนรายงาน
พรทิพย์ สุดเมือง	หัวหน้าโครงการ FF, ที่ปรึกษา
ณัฐวุฒิ สุรเดช	ที่ปรึกษา
วิเวก ภาชีรักษ์	ที่ปรึกษา
ชัยยุทธ ปรีชา	Remote setting for scope

### บทคัดย่อ

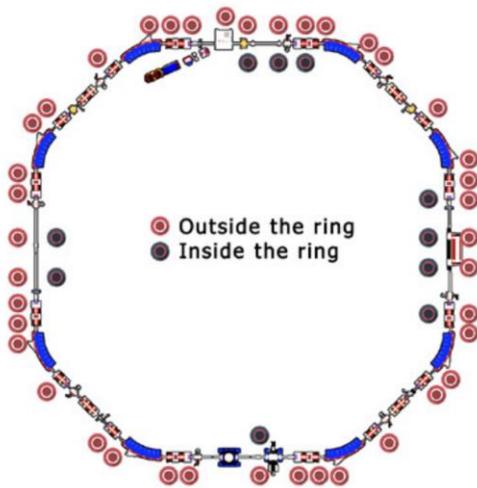
การสูญเสียลำอิเล็กตรอนเป็นเหตุการณ์ที่ไม่น่าพึงประสงค์สำหรับการเดินเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน อย่างไรก็ตาม การสูญเสียลำอิเล็กตรอนเป็นสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติของลำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนอยู่ในท่อสุญญากาศในเครื่องเร่งอนุภาค นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียลำอิเล็กตรอนระหว่างกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอนที่จำกัดประสิทธิภาพการเติมอิเล็กตรอน การศึกษาและเข้าใจการสูญเสียลำอิเล็กตรอนในเครื่องเร่งอนุภาคจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดซึ่งจะสามารถนำมาสู่การปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อทำให้การสูญเสียลำอิเล็กตรอนลดลงและมีความเสถียรมากขึ้น ระบบการวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนเดิมเป็นหัววัดประเภท PIN diodes ของ Bergoz ที่ต้องนำไปติดตั้งจุดที่ต้องการวัดเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถครอบคลุมบริเวณที่สนใจได้ทั้งหมด จึงได้ทำการศึกษาและติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนบริเวณใกล้กับจุดเติมอิเล็กตรอนโดยอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถติดตั้งได้ครอบคลุมบริเวณกว้างและบางบริเวณที่หัววัดแบบเดิมไม่สามารถเข้าถึงได้ นอกจากนี้ยังมีความสามารถวัดเหตุการณ์การสูญเสียลำอิเล็กตรอนได้อย่างละเอียดในเชิงตำแหน่งจึงทำให้ทราบรูปแบบสัญญาณการสูญเสียลำอิเล็กตรอนจากกรณีศึกษาและทราบถึงการสูญเสียลำอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งแม่เหล็ก septum ซึ่งจะได้นำไปสู่การปรับปรุงต่อไป โดยงานวิจัยนี้ยังเป็นระบบต้นแบบสำหรับการใช้งานในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV ในอนาคตอีกด้วย

คำค้น Keyword: เส้นใยแก้วนำแสง, Optical fiber, Beam loss monitor

1. บทนำ

ปฏิเสธไม่ได้ว่ากระบวนการที่มีความสำคัญในการเดินเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนคือการเติมลำอิเล็กตรอน (injection) และการกักเก็บอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ปรากฏการณ์ที่จำกัดประสิทธิภาพของการเดินเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนคือการสูญเสียลำอิเล็กตรอนทั้งในกรณีระหว่างกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอนและการสูญเสียเนื่องจากค่าชีวิตที่จำกัด ความสามารถในการวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากสำหรับความเข้าใจเครื่องเร่งอนุภาคอย่างทอ่งแท้ที่จะนำมาสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอย่างถูกต้อง โดยจะเป็นประโยชน์โดยเฉพาะเมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนใหม่ หรือหลังจากการปิดเครื่อง โดยการวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนจะสามารถบ่งบอกถึงความผิดปกติของเครื่องเร่งอนุภาค โดยอาจมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน หรือมีอุปกรณ์ที่ไม่พร้อมทำงานเป็นต้น

อุปกรณ์วัดการสูญเสียของลำอิเล็กตรอนหรือ Beam Loss Monitor (BLM) นั้นมีหลากหลายชนิดและวิธีการใช้งานที่ต่างกันโดยมีการติดตั้ง BLM แบบ pin diode ของ Bergoz ที่วงกักเก็บอิเล็กตรอนให้มีลักษณะกระจายตัวรอบวงให้ครอบคลุมได้มากที่สุดตามรูปที่ 1 โดยติดกับที่สูญญากาศด้วยเทปตีนตุ๊กแกดังแสดงในรูป อย่างไรก็ตามก็ถึงจะสังเกตได้ว่าไม่สามารถติดหัววัดได้ครอบคลุมทุกอุปกรณ์และไม่สามารถติดเข้าไปในพื้นที่แคบได้เช่นในแม่เหล็กต่างๆ นอกจากนี้ตัวหัววัดจะต้องใช้จำนวนมากเท่ากับจำนวนจุดที่ติดตั้งเพื่อวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอน และยังมี การเดินสายสัญญาณและการจัดการกับระบบโดยรวมที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นหากจำนวนหัววัดเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่มาในการศึกษาระบบวัดที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นหัววัด (sensor) ที่มีความสามารถครอบคลุมพื้นที่กว้าง มีความยืดหยุ่น สามารถถูกติดตั้งโดยการเดินสายเส้นใยแก้วนำแสงผ่านอุปกรณ์ต่างๆในพื้นที่แคบๆได้



รูปที่ 1 แผนภาพการติดตั้ง BLM แบบ pin diode ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน (ซ้าย) และการติดตั้งจริงที่ท่อสูญญากาศ (ขวา) [1]

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อออกแบบระบบวัดการสูญเสียลํอเล็กตรอนดว้เส้นใยแก้วนำแสงสำหรับใช้งานในวงกักเก็บอเล็กตรอน
- 2.2 เพื่อนำระบบวัดการสูญเสียลํอเล็กตรอนดว้เส้นใยแก้วนำแสงติดตั้งทดสอบที่เครื่องกำเนิดแสงสยามสำหรับศึกษาและปรับปรุงกระบวนการยิงลํอเล็กตรอน
- 2.3 เพื่อสร้างระบบต้นแบบเป็นแนวทางของระบบวัดการสูญเสียลํอเล็กตรอนดว้เส้นใยแก้วนำแสงสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV ในอนาคต

## 3. แนวคิด/ทฤษฎี/หลักการ

การสูญเสียกระแสของลํอเล็กตรอนเป็นตัวจำกัดประสิทธิภาพในการเดินเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ระบบอัตราการสูญเสียของลํอเล็กตรอนทำหน้าที่ระบุตำแหน่งและปริมาณการสูญเสียไปของลํอเล็กตรอนในบริเวณที่มีการติดตั้งระบบดังกล่าว โดยอาศัยอันตรกริยาของอนุภาคที่เกิดจากการสูญเสียไปของลํอเล็กตรอนกับตัวกลางเป็นวัสดุที่ใช้ทำหัววัดซึ่งเป็นอาจเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดรังสีชนิดต่างๆ หรือเส้นใยแก้วนำแสง

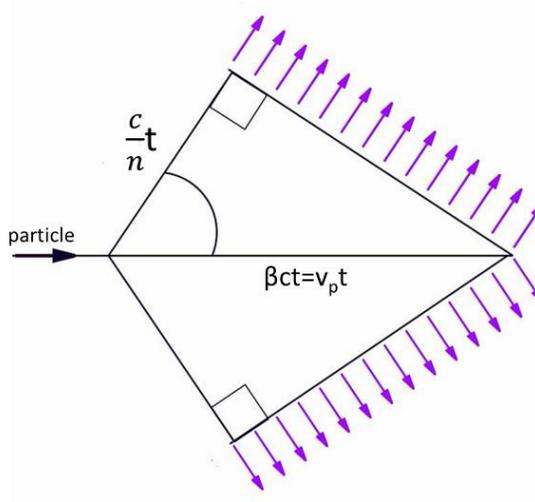
### 3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดการสูญเสียของลํอเล็กตรอนชนิดเส้นใยแก้วนำแสง

การวัดการสูญเสียไปของลํอเล็กตรอนดว้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นการตรวจวัดอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particles) ที่เกิดจากการสูญเสียอเล็กตรอนในทอสูญญากาศ โดยการวัดสัญญาณในเส้นใยแก้วอาศัยปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เรียกว่าการแผ่รังสี Cherenkov ที่จะเกิดเมื่อมีอนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วเฟส (Phase velocity) ของแสงในตัวกลางนั้น ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงจึงถูกใช้ติดตั้งใกล้กับทอสูญญากาศให้มากที่สุดสำหรับเป็นตัวกลางให้อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียของลํอเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้ามาโดยเมื่อความเร็วของอนุภาคคือ  $v_p$  จะเกิดการแผ่รังสี Cherenkov ตามเงื่อนไข

$$\frac{c}{n} < v_p < c$$

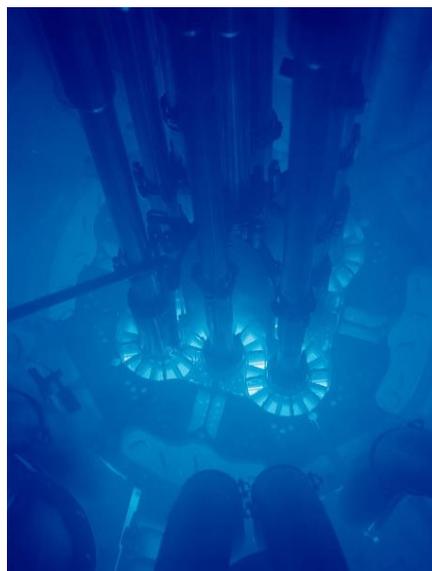
เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสง  $n$  คือดัชนีหักเหแสงของตัวกลาง (refractive index) โดยจะเกิดการแผ่รังสีตามรูปที่ 2 โดยในตัวกลางแสงที่ถูกแผ่ออกจะเป็นมุมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและมีความเร็ว  $c/n$  ซึ่งน้อยกว่าความเร็วของอนุภาค  $v_p$  และสามารถทราบมุมของการแผ่รังสีได้จาก

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$



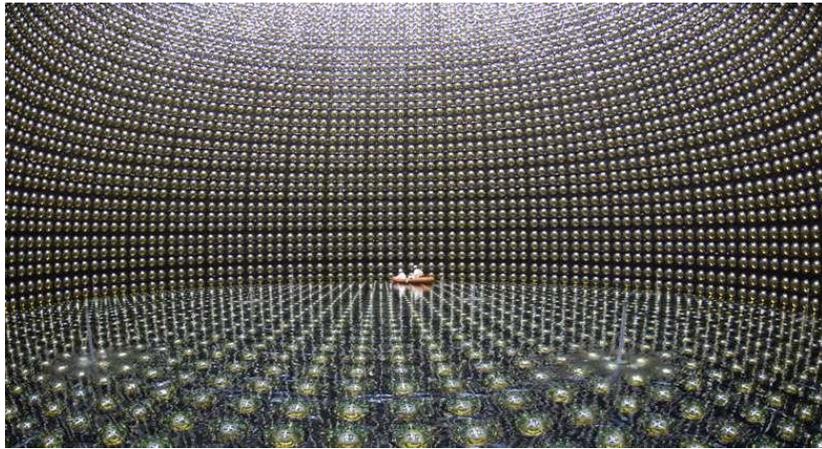
รูปที่ 2 แผนภาพการแผ่รังสี Cherenkov

การแผ่รังสี Cherenkov สามารถสังเกตได้ตามปกติในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เนื่องจากการกำเนิดอนุภาคจำนวนมากในกระบวนการแตกของนิวเคลียส fission ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ และต้องมีน้ำหล่อเย็นในเตาปฏิกรณ์ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านในตัวกลางคือน้ำหล่อเย็น และเกิดการแผ่รังสีออกมาเป็นสีฟ้าถึงม่วงตามตัวอย่างในรูปที่ 3



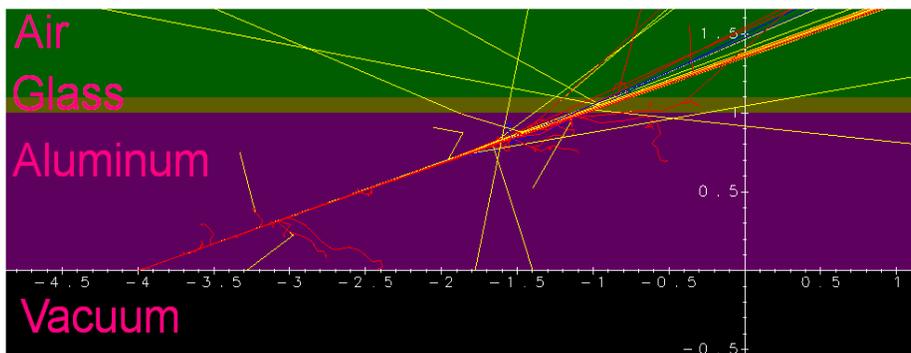
รูปที่ 3 การแผ่รังสี Cherenkov ใน Advanced Test Reactor

การประยุกต์ใช้การแผ่รังสี Cherenkov สำหรับเครื่องมือวัดอนุภาคพลังงานสูงมีหลากหลายเช่นหนึ่งในเครื่องวัดอนุภาคเพื่อศึกษาฟิสิกส์ของอนุภาค (particle physics) ขนาดใหญ่คือ Super-Kamiokande ที่ประเทศญี่ปุ่นซึ่งใช้ในการวัดอนุภาคนิวตริโนที่ตรวจวัดได้ยากมาก โดย Super-Kamiokande อาศัยการบรรจุน้ำปริมาณมหาศาลที่จะถูกใช้เป็นตัวกลางให้อนุภาคนิวตริโนเคลื่อนที่ผ่านแล้วจึงตรวจสอบแสงที่เกิดจากการแผ่รังสี Cherenkov โดยมีหลอดขยายสัญญาณแสง Photo Multiplier Tube (PMT) จำนวนมากสำหรับวัดสัญญาณแสงที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 PMT ภายใน Super-Kamiokande

สำหรับการประยุกต์ใช้การแผ่รังสี Cherenkov เพื่อเป็นระบบวัดอัตราการสูญเสียของอิเล็กตรอนใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องวัดข้างต้นเพียงแต่ตัวกลางแทนที่จะเป็นน้ำ แต่เป็นเส้นใยแก้วนำแสงโดยการวัดสัญญาณจะเกิดขึ้นเมื่อมีการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงที่ด้านข้างของท่อสุญญากาศ เมื่อมีการชนของอิเล็กตรอนในท่อสุญญากาศจะทำให้เกิดอนุภาคทุติยภูมิ (secondary particles) ออกมาแล้วเคลื่อนเข้าไปในเนื้อของเส้นใยแก้วทำให้เกิดการแผ่รังสี Cherenkov ดังที่แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบเหตุการณ์ชนของอิเล็กตรอนในท่ออลูมิเนียมที่มีเส้นใยแก้วติดตั้งอยู่

คุณสมบัติพิเศษของเส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในบริบทของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน คือมีขนาดเล็กและเป็นเส้นยาวสามารถติดตั้งที่ด้านข้างของท่อสุญญากาศได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อเกิดแสงจากการแผ่รังสี Cherenkov แล้วแสงดังกล่าวจะสะท้อนไปมาในตัวเส้นใยแก้วไปยังปลายของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะติดกับตัวขยายสัญญาณแสง Photo Multiplier Tube (PMT) ซึ่งจะเก็บและขยายสัญญาณที่วัดได้ ตัว PMT จะแปลงสัญญาณแสงที่ได้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งจะต้องใช้สาย coaxial สำหรับการต่อเข้าไปยังเครื่องมือเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเช่น oscilloscope ซึ่งอยู่ห่างออกมาจากตัวเครื่องเร่งอนุภาคต่อไป

ข้อควรระวังสำหรับการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงในระบบวัดอัตราการสูญเสียของลำอิเล็กตรอนคือ ความเปราะของใยแก้วทำให้การโค้งงอของเส้นใยแก้วทำได้จำกัดและการติดตั้งจะต้องทำให้มีการโค้งงอน้อยที่สุด และรัศมีความโค้งควรเป็นไปตามค่าที่แนะนำจากผู้ผลิตซึ่งจะขึ้นกับชนิดและขนาดแกนของตัวเส้นใยแก้วนำแสงเอง

### 3.2 ส่วนประกอบของระบบวัดการสูญเสียของลำอิเล็กตรอนด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์การสูญเสียของลำอิเล็กตรอนชนิดเส้นใยแก้วนำแสงจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) ระบบวัดสัญญาณการสูญเสียของอิเล็กตรอนและ 2) ระบบบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล โดยในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังนี้

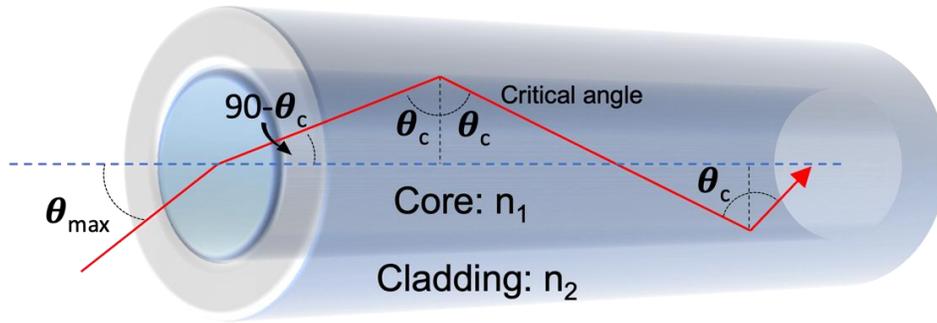
#### 3.2.1 ระบบวัดสัญญาณการสูญเสียของลำอิเล็กตรอน

- เส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber)

เส้นใยแก้วนำแสงเป็นวัสดุหลักที่ถูกใช้ในฐานะเซนเซอร์ตรวจจับอนุภาคที่เกิดจากการสูญเสียของอิเล็กตรอนที่ท่อสุญญากาศ คุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงจึงมีความสำคัญในการวัดค่าและจำเป็นต้องเลือกคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานและให้เกิดประสิทธิภาพในการวัดข้อมูลโดยจะพิจารณาคุณสมบัติดังนี้

- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเส้นใยแก้ว (Core diameter) เป็นการบอกขนาดของตัวกลางสำหรับทำให้เกิดการแผ่รังสี Cherenkov เมื่อขนาดของแกนเส้นใยแก้วใหญ่ขึ้นจะทำให้ความสามารถในการสร้างสัญญาณเมื่อมีเหตุการณ์การสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ดีขึ้นเนื่องจากครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้น แต่ขนาดก็จะแปรผันตามราคาของเส้นใยแก้วด้วย นอกจากนี้แกนขนาดใหญ่จะทนต่อการโค้งตัวได้ต่ำลง
- Numerical Aperture (NA) คือ การวัดค่ามุมเปิดรับแสงที่เข้าเส้นใยแก้วและขึ้นกับดัชนีหักเหแสงของวัสดุสามารถอธิบายให้เห็นภาพได้ตามรูปที่ 6 ซึ่งนิยาม NA ได้เป็น

$$NA = n \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$



รูปที่ 6 แสดงการนิยาม Numerical Aperture

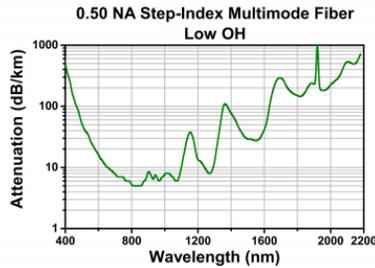
โดย  $\theta_c$  คือมุมวิกฤต (critical angle) เป็นมุมเล็กสุดที่เริ่มทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดในตัวกลาง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้สำหรับระบบวัดอัตราการสูญเสียของลำไอเล็กตรอนต้องให้เส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่า NA ยิ่งสูงยิ่งดีสำหรับประสิทธิภาพส่งผ่านสัญญาณที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสง

- Water Content (OH) เป็นปริมาณความเข้มข้นของกลุ่ม Hydroxyl group (OH) ในเนื้อเส้นใยแก้ว โดยหากมีความเข้มข้น OH สูง (High OH) จะเหมาะกับการใช้งานสำหรับส่งผ่านแสงช่วงความถี่เหนือม่วง (Ultraviolet, UV) กรณีที่ความเข้มข้น OH ต่ำ (Low OH) ตัวแกนเส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูง (Pure Silica) จะมีความใสมากกว่าและจะเหมาะสำหรับการส่งผ่านแสงที่ความถี่ต่ำ ช่วงแสงที่ตามองเห็นซึ่งเป็นช่วงที่ต้องการใช้งานสำหรับแสงจากการแผ่รังสี Cherenkov
- ชนิดโหมดการใช้งาน สำหรับงานระบบวัดการสูญเสียของลำไอเล็กตรอนจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่เป็นชนิด Multi mode step-index ซึ่งให้ค่า NA ที่สูงกว่าแบบ Single mode step-index ทำให้เหมาะกับการใช้งานหลากหลาย
- มีการเข้าหัวแบบ FC type สำหรับการต่อกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณคือ Photo Multiplier Tube (PMT) ที่มีการติดตั้งหัวแปลงแบบ FC

เส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมกับการใช้งานและราคาไม่สูงมากมาจากบริษัท THORLABS ซึ่งมี Numerical Aperture สูงที่ 0.5 เป็นแบบ Low OH และขนาดของแกนที่ใหญ่ 600 ไมโครเมตร (FP600ERT) และ 1000 ไมโครเมตร (FP1000ERT) โดยมีคุณสมบัติตามที่สรุปไว้ในรูปที่ 7

### Specifications

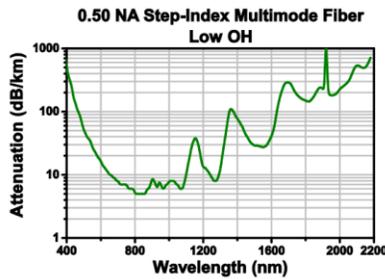
#### Performance Plot



FP600ERT	
Transmission Region	400 - 2200 nm (Low OH Content)
Core Diameter	600 ± 10 µm
Cladding Diameter	630 ± 10 µm
Coating Diameter	1040 ± 30 µm
Core / Cladding Material	Pure Silica / Hard Polymer
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-40 to 150 °C
Numerical Aperture (NA)	0.50
Attenuation	12 dB/km @ 810 nm (Max)
Proof Test Level	≥100 kpsi
Max Core Offset	9 µm
Bend Radius	24 mm (Short Term) 48 mm (Long Term)
Recommended Stripping Tool	T28546

### Specifications

#### Performance Plot



FP1000ERT	
Transmission Region	400 - 2200 nm (Low OH Content)
Core Diameter	1000 ± 15 µm
Cladding Diameter	1035 ± 15 µm
Coating Diameter	1400 ± 50 µm
Core / Cladding Material	Pure Silica / Hard Polymer
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-40 to 85 °C
Numerical Aperture (NA)	0.50
Attenuation	12 dB/km @ 810 nm (Max)
Proof Test Level	≥100 kpsi
Max Core Offset	10 µm
Bend Radius	40 mm (Short Term) 80 mm (Long Term)
Recommended Stripping Tool	M44S63

รูปที่ 7 คุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง FP600ERT (บน) และ FP1000ERT (ล่าง)

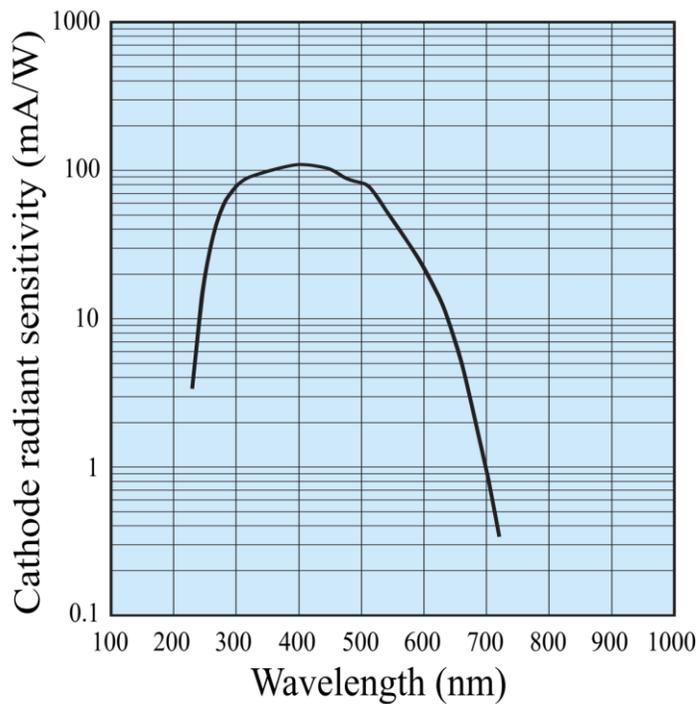
โดยเส้นใยแก้วดังกล่าวจำเป็นต้องมีการสั่งสร้างตามความต้องการโดยเลือกความยาวของเส้นใยแก้วและวิธีการเข้าหัวแบบ FC ซึ่งสะดวกกับการใช้งานเพื่อการเชื่อมต่อกับตัวขยายสัญญาณ PMT ต่อไป



รูปที่ 8 เส้นใยแก้วนำแสงที่สั่งผลิตเข้าหัวแบบ FC

- ระบบขยายสัญญาณแสง Photo Multiplier Tube (PMT)

สัญญาณที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกส่งมาถึงปลายสายและถูกขยายโดย Photo Multiplier Tube (PMT) ที่ต่อกับปลายของเส้นใยแก้ว โดยจะต้องมีตัวแปลงสำหรับการต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้ากับ PMT ในที่นี่จะใช้ตัวแปลงชนิด FC type ตามชนิดการเข้าหัวของเส้นใยแก้วนำแสง โดยใช้ PMT แบบ H10721-110 -ของ Hamamatsu ที่มีขนาดกระทัดรัดและสามารถรับแสงช่วง 230 nm – 700 nm ที่แผ่ออกมาจากเส้นใยแก้วนำแสงผ่านการแผ่รังสี Cherenkov ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การตอบสนองที่คลี่ความถี่ต่างๆของ PMT H10721-110

### 3.2.2 ระบบบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล

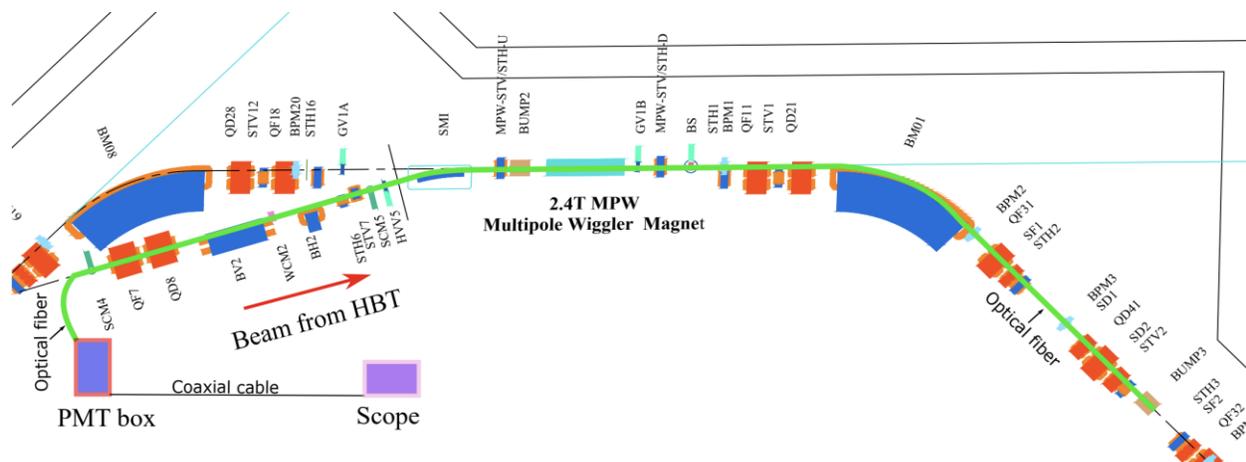
เมื่อสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดย PMT แล้วจะถูกส่งต่อโดยสาย Coaxial มาที่ oscilloscope ที่มีความเร็วและละเอียดสูง โดยตัว oscilloscope: R&S RTO2024 จะสามารถสร้างพื้นที่ (Mask) สำหรับตรวจจับเหตุการณ์ โดยเมื่อมีสัญญาณเกิดขึ้นและเข้าไปอยู่ในพื้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีการบันทึกข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์ต่อไป

#### 4. วิธีการดำเนินงาน

สำหรับระบบวัดอัตราการสูญเสียของลำอิเล็กตรอน ชนิดเส้นใยแก้วนำแสงนี้จะใช้เป็นต้นแบบสำหรับวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 3 GeV โครงการ SPS-II ด้วยจึงมีการศึกษาเส้นใยแก้วนำแสงที่มีคุณสมบัติต่างกัน โดยการดำเนินการออกแบบจะอาศัยการศึกษาวิธีติดตั้งและใช้งานในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอื่นๆ และเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพและราคา การดำเนินงานมีขั้นตอนหลักจะประกอบไปด้วยสามส่วนหลังคือ 1) การออกแบบ 2) การติดตั้งระบบ และ 3) การทดสอบวัดสัญญาณ

##### 4.1 การออกแบบระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

สำหรับการออกแบบการติดตั้งระบบวัดอัตราการสูญเสียของลำอิเล็กตรอน โดยที่เส้นใยแก้วนำแสงมีความยาวจำกัดจึงพิจารณาติดตั้งบริเวณที่สำคัญโดยจะต้องใช้งานในบริเวณใกล้กับอุปกรณ์ที่มีการส่งผ่านในกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอน โดยการแนวคิดออกแบบจะปรับตามแบบดังกล่าวให้เข้ากับบริเวณที่จะทดลองติดตั้งใช้งานในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV เริ่มต้นที่บริเวณปลาย High energy Beam Transport line (HBT) ผ่านแม่เหล็ก Septum และ Bump magnet ตัวที่สองครอบคลุมไปถึงแม่เหล็กสองขั้วตัวที่หนึ่งและสุดท้ายที่ Bump magnet ตัวที่สามด้วยความยาวประมาณ 20 เมตรตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนภาพการติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน SPS

##### 4.2 การติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอน

เส้นใยแก้วนำแสงจะถูกติดกับท่อสุญญากาศด้านข้างฝั่งนอกของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่มีความเป็นไปได้สำหรับการชนของลำอิเล็กตรอนมากกว่าเมื่อมีเหตุการณ์สูญเสียลำอิเล็กตรอนโดยเส้นใยแก้วนำแสงสองชนิดจะถูกติดตั้งให้ชิดและขนานกันมากที่สุด ส่วนตัวขยายสัญญาณแสง PMT จะติดถูกติดตั้งที่ปลายหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงไม่ห่างจากบริเวณที่มีการวัดการสูญเสียอิเล็กตรอน จากนั้นสายสัญญาณ coaxial จะต่อกับ PMT มาเชื่อมต่อ

กับ Oscilloscope ที่บริเวณนอกกำแพงกันรังสี เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์จากการรับรังสีมากเกินไป (radiation damage)

### 4.3 การทดสอบวัดสัญญาณ

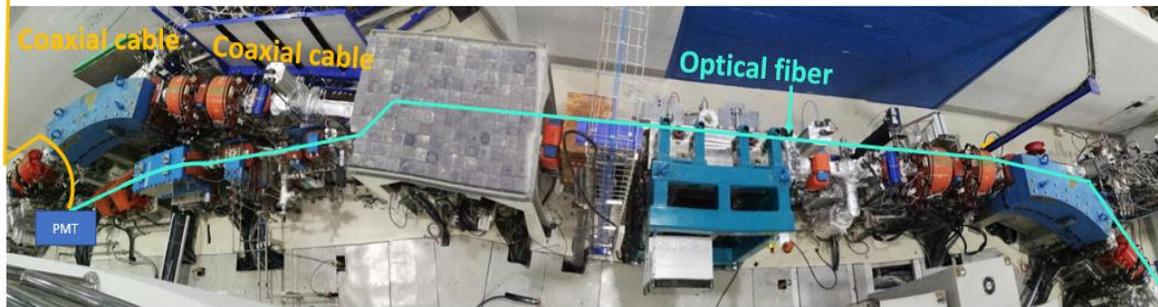
สำหรับการทดสอบวัดสัญญาณจะทำเปรียบเทียบกันระหว่างเส้นใยแก้วสองชนิดที่มีขนาดของแกนเส้นใยแก้วต่างกันคือ 600 และ 1,000 ไมโครเมตร และทำการจำลองเหตุการณ์การสูญเสียอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งต่างๆ ตามลำดับของเส้นทางการเดินของอิเล็กตรอนจากปลาย HBT คือ SCM4, BV2 และ Septum จากนั้นจะสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการวัดเหตุการณ์การสูญเสียลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในการสร้างจริงกับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV

## 5 ผลลัพธ์ และอภิปรายผล

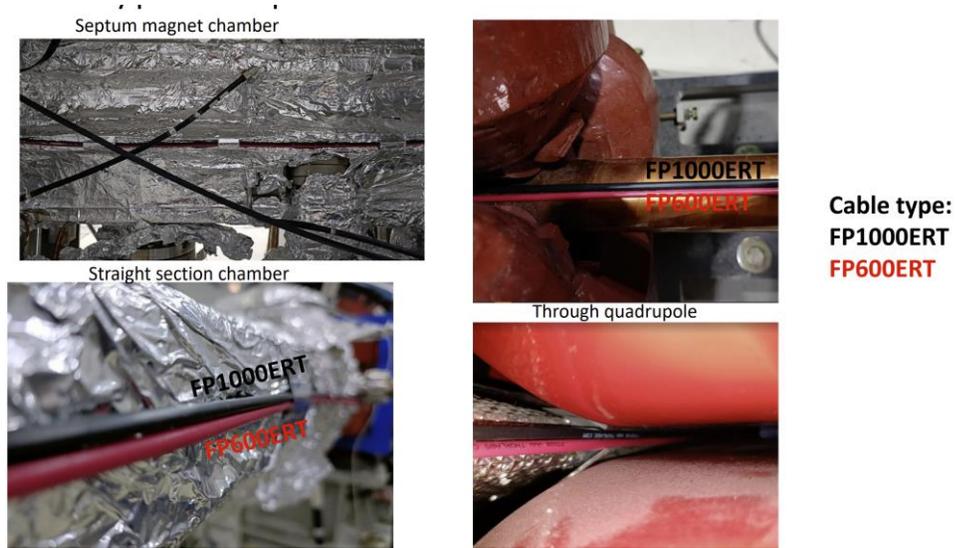
### 5.1 การติดตั้งระบบวัดอัตราการสูญเสียลำอิเล็กตรอน

ได้มีการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV บริเวณปลาย High energy Beam Transport line (HBT) ผ่านแม่เหล็ก Septum และ Bump magnet ตามที่ออกแบบไว้ตามรูปที่ 11 โดยเส้นใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งมีทั้งหมด 2 ชนิดที่มีขนาดของแกนเส้นใยแก้วต่างกันคือ 600 (FP600ERT) และ 1,000 (FP1000ERT) ไมโครเมตร ซึ่งการติดตั้งจะแนบชิดกับท่อสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 12

RT2000 Scope



รูปที่ 11 การติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนด้วยเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 12 การติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน SPS

การติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงผ่านข้างด้านนอกของท่อสุญญากาศให้แนบมากที่สุด โดยในแม่เหล็กชนิดต่างๆ โดยการร้อยสายผ่านช่องว่างระหว่างช่องว่าง (gap) ของขั้วแม่เหล็กและใช้เทปอลูมิเนียมสำหรับติดเส้นใยแก้วกับข้างท่อสุญญากาศ โดยพยายามให้มีการบิดโค้งของเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดการหักของแกนเส้นใยแก้วโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเส้นใยแก้วที่มีแกนขนาดใหญ่ซึ่งจะมีรัศมีความโค้งที่มากกว่าหรือความสามารถในการถูกบิดโค้งที่ต่ำกว่า โดยเส้นใยแก้วนำแสง FP1000ERT มีค่ารัศมีความโค้งที่แนะนำมากกว่าชนิด FP600ERT สองเท่า การติดตั้ง PMT ที่ปลายด้านต้นเพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเหตุการณ์ที่เกิดที่ระยะใกล้จุดเริ่มต้นกว่าจะมาถึง PMT ก่อนตามลำดับนั่นเอง

### 5.2 การวัดสัญญาณการสูญเสียของลำอิเล็กตรอน

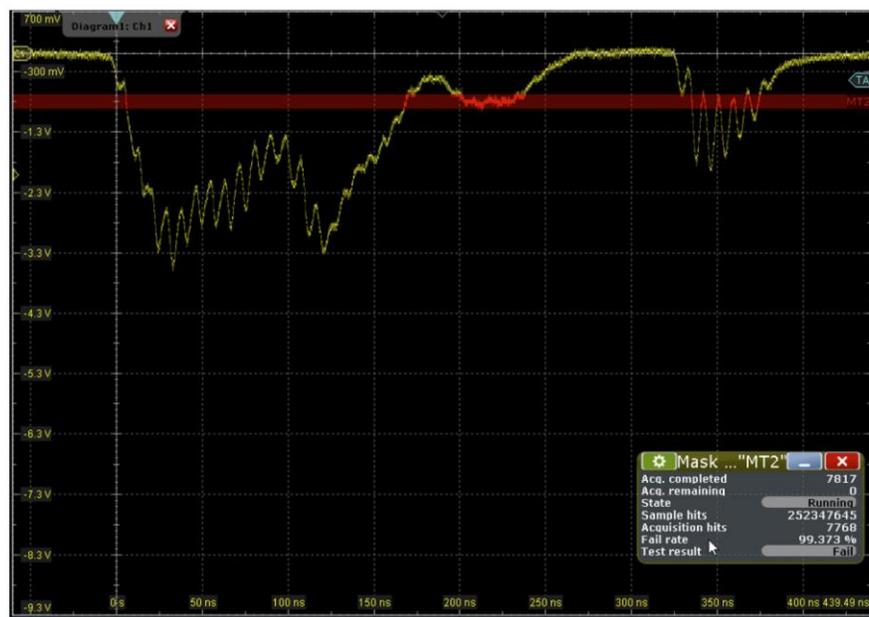
การจะวัดสัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งไว้ได้นั้นจำเป็นต้องมีการจัดเตรียมและติดตั้งระบบวัดสัญญาณการสูญเสียของลำอิเล็กตรอน โดยส่วนประกอบหลักของระบบวัดสัญญาณจะแสดงในรูปที่ 13 ประกอบด้วย

- 1) หัววัดและขยายสัญญาณแสง (Photomultiplier tube) H10721-110 ที่มีการจัดเตรียมสายสัญญาณเป็นแบบ BNC cable สำหรับความสะดวกในการเชื่อมต่อ
- 2) หัวแปลง FC adapter สำหรับ PMT เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงที่เข้าหัวแบบ FC มาแล้ว
- 3) แหล่งจ่ายกำลังไฟ (Power supply) ให้กับ Photomultiplier tube



รูปที่ 13 ส่วนประกอบสำหรับระบบวัดสัญญาณ Photo Multiplier Tube (PMT)

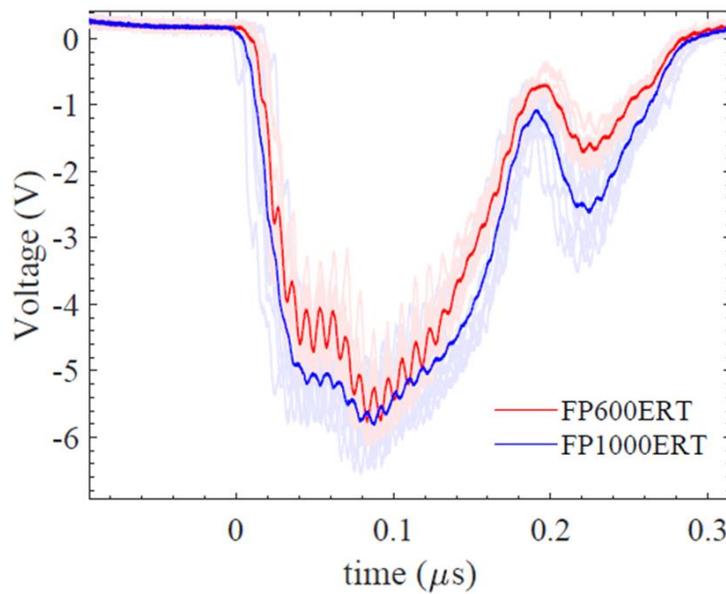
เมื่อได้ทำการติดตั้งระบบวัดสัญญาณแล้วเสร็จจึงได้ทำการทดสอบวัดสัญญาณการสูญเสียของลำอิเล็กตรอนในช่วงของการเติมลำอิเล็กตรอนจากบυσเตอร์ซินโครตรอนสว่างกักเก็บอิเล็กตรอน โดยสัญญาณในรูปที่ 14 เป็นผลการวัดจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิด FP1000ERT ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้า control voltage ที่ 0.7 โวลต์



รูปที่ 14 สัญญาณการสูญเสียลำอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน SPS วัดจากเส้นใยแก้วนำแสงชนิด FP1000ERT ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ 0.7 โวลต์

### 5.2.1 การทดสอบคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงสองชนิดที่ใช้ในการทดลองคือ FP600ERT และ FP1000ERT จากบริษัท Thorlabs โดยคุณสมบัติที่ต่างกันของทั้งสองชนิดคือขนาดของแกนของเส้นใยแก้ว คือ 600 และ 1000 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยการติดตั้งที่ได้แสดงในรูปที่ 12 ทำให้เส้นใยแก้วอยู่ใกล้กันมากที่สุดและขนานไปกับท่อสุญญากาศ จากนั้นทดสอบการให้สัญญาณโดยกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอนทั้งหมดสิบครั้ง สำหรับการเก็บข้อมูลของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นโดยมีเงื่อนไขเดียวกันทุกประการ ทำให้ได้สัญญาณตามรูปที่ 15

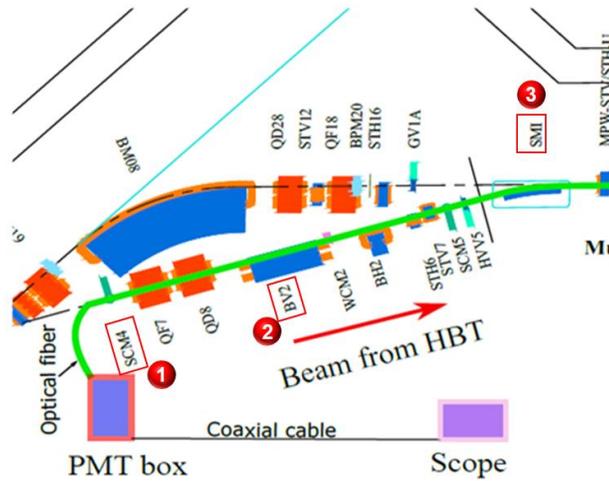


รูปที่ 15 สัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงต่างชนิดกัน ขณะเกิดกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอน สีจางคือข้อมูลจริงสิบครั้ง สีเข้มคือค่าเฉลี่ยของสัญญาณจากเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด [2]

จะเห็นได้ชัดเจนว่า สัญญาณตามเส้นสีน้ำเงินที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดแกนใหญ่กว่า (FP1000ERT) มีขนาดใหญ่มากกว่า แสดงให้เห็นความไวต่อเหตุการณ์การสูญเสียลำอิเล็กตรอนที่มากกว่า และสัญญาณกลุ่มที่สองที่มีขนาดเล็กกว่าน่าจะมาจากการสะท้อนของสัญญาณที่ปลายสายอีกข้างหนึ่ง อย่างไรก็ตามแม้สัญญาณที่ได้จะดีกว่าแต่เส้นใยแก้วนำแสงที่แกนใหญ่กว่าจะมีราคาแพงกว่า โดย FP1000ERT มีราคาแพงกว่า FP600ERT มากกว่า 70%

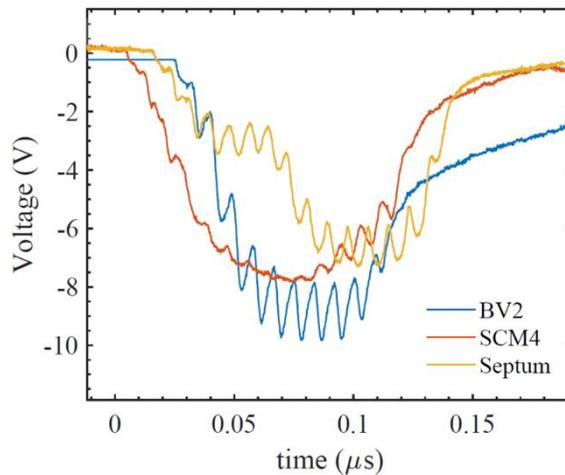
### 5.2.2 ทดสอบจำลองเหตุการณ์การสูญเสียลำอิเล็กตรอน

การทดสอบจำลองเหตุการณ์การสูญเสียลำอิเล็กตรอนทำได้โดยการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนสูญเสียในบริเวณที่ต้องการศึกษาโดยในการศึกษานี้กำหนดสมรรถนะของการสูญเสียลำอิเล็กตรอน คือที่ SCM4, BV2 และ Septum (SMI) ตามรูปที่ 16

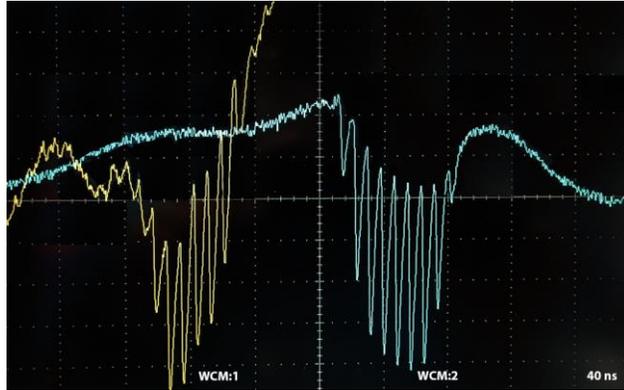


รูปที่ 16 แผนผังแสดงการติดตั้งเส้นใยแก้วนำแสงบริเวณ injection section

โดยเมื่อจะวัดสัญญาณในกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอนจะต้องตั้งสัญญาณ trigger จากการยิงลำอิเล็กตรอนเพื่อให้เป็นจุดอ้างอิงเดียวกันของทุกเหตุการณ์ สำหรับใช้เปรียบเทียบสัญญาณตามลำดับเวลาได้ถูกต้องโดยเมื่อทำการเก็บสัญญาณที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์ทั้งสามกรณีจะได้แสดงตามรูปที่ 17

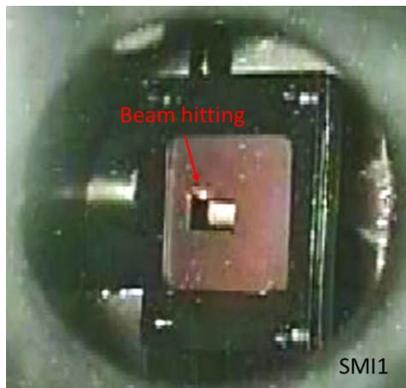


รูปที่ 17 สัญญาณการสูญเสียลำอิเล็กตรอนจากการจำลองเหตุการณ์ที่ BV2, SCM4 และ Septum [2]



รูปที่ 18 สัญญาณจาก wall current monitor

จากสัญญาณจะเห็นว่าตำแหน่งการเกิดสัญญาณมีลำดับเวลาตามระยะทางจากการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในกระบวนการยิงอิเล็กตรอนตามรูปที่ 16 คือ SCM4 BV2 และ Septum รูปร่างของสัญญาณการสูญเสียลำอิเล็กตรอนบริเวณ BV2 และ septum จะสังเกตเห็นรูปร่างตามขบวนอิเล็กตรอนประมาณ 11 ขบวนคล้ายกับสัญญาณที่วัดได้จาก Wall Current Monitor (WCM) ที่ติดตั้งใน HBT ตามรูปที่ 18 แต่รูปร่างสัญญาณจาก SCM4 จะต่างไปเนื่องจากการปิดฉากกัน screen SCM4 ลงมาตัดขวางลำอิเล็กตรอนโดยตรงทำให้ อิเล็กตรอนชนอัดกับตัวฉากกัน เกิดเป็นสัญญาณที่กว้างอันเดียว นอกจากนี้สังเกตสัญญาณจาก septum พบว่าเป็นรูปแบบที่พบได้ตามปกติในกระบวนการเติมลำอิเล็กตรอนตามรูปที่ 15 โดยสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างของตัว septum ที่ภายในประกอบด้วยกรอบโลหะที่เจาะรูให้อิเล็กตรอนผ่านไป การชนของลำอิเล็กตรอนที่บริเวณกรอบโลหะที่ SMI1 ดังที่แสดงในรูปที่ 19 จะทำให้เกิดการสูญเสียลำอิเล็กตรอนและทำให้ประสิทธิภาพเติมลำอิเล็กตรอน (injection efficiency) ลดลง โดยเมื่อมีการติดตั้งระบบวัดอัตราการสูญเสียลำอิเล็กตรอนที่อาศัยเส้นใยแก้วนำแสงในบริเวณดังกล่าวแล้วพบว่าการสูญเสียลำอิเล็กตรอนในกระบวนการยิงลำอิเล็กตรอนเกิดขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญบริเวณแม่เหล็ก hseptum ทำให้ผลการศึกษานำไปสู่การปรับปรุง septum โดยการใช้ฉากเรืองแสงที่สามารถปรับขึ้นลงเพื่อหลบเส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนโดยไม่เกิดการชนและสูญเสียเมื่อไม่ใช้งาน



รูปที่ 19 แสดงการชนของลำอิเล็กตรอนที่กรอบโลหะในแม่เหล็ก Septum screen SMI1 และ SMI2

## 6. สรุปผล

ได้ทำการออกแบบและติดตั้งระบบวัดการสูญเสียลำอเล็กตรอนโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงแล้วเสร็จ พร้อมทดสอบการวัดสัญญาณจริงสำหรับเปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดแกนต่างกันคือ 600 และ 1000 ไมโครเมตร พบว่าขนาดแกนที่ใหญ่กว่าทำให้เกิดสัญญาณดีกว่า อย่างไรก็ตามราคาของเส้นใยแก้วนำแสงจะแพงตามขนาดของแกน โดยเมื่อพิจารณาแล้วขนาดแกน 600 ไมโครเมตรก็เพียงพอต่อการใช้งาน

การวัดสัญญาณจากกรณีศึกษาที่เกิดการสูญเสียลำอเล็กตรอนที่ฉาก SCM4 แม่เหล็ก BV2 และ septum ทำให้ทราบรูปแบบสัญญาณที่มีความแตกต่างกันและรู้ถึงเหตุการณ์สูญเสียลำอเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระบวนการเติมลำอเล็กตรอนตามปกติโดยเกิดที่แม่เหล็ก septum ที่มีกรอบโลหะภายในและมีการชนของลำอเล็กตรอน โดยจะได้นำไปปรับปรุงตัวแม่เหล็ก septum ต่อไปตามโครงการระบบวัดรูปร่างลำอเล็กตรอนแบบฉากเรืองแสงในแม่เหล็ก septum [3]

## 7. กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์

- นักฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค ได้อุปกรณ์วัดคุณลักษณะของลำอเล็กตรอนเพิ่มขึ้น
- ส่วนเดินเครื่องและซ่อมบำรุงมีอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบยิงลำอเล็กตรอน
- ประโยชน์ในการเป็นตัวต้นแบบสำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยามระดับพลังงาน 3 GeV

## เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Suradet, et. al., “IMPROVEMENT OF THE SIAM PHOTON SOURCE BEAM LOSS MONITOR SYSTEM,” in *IBIC2015*, Melbourne, 2015.
- [2] T. Pulampong, et. al., “OPTICAL FIBER BASED BEAM LOSS MONITOR FOR SPS MACHINE,” in *IPAC22*, Bangkok, 2022.
- [3] ฐาปกรณ์ ภู่อำพงษ์ และคณะ, “ระบบวัดรูปร่างลำอิเล็กตรอนแบบฉากเรืองแสงในแม่เหล็ก Septum,” SLRI-TR-2022-044, Nakhon Ratchasima, 2022.

**ภาคผนวก**

Optical fiber and PMT data sheet

## 0.50 NA Hard Polymer Clad Multimode Fiber



### Description

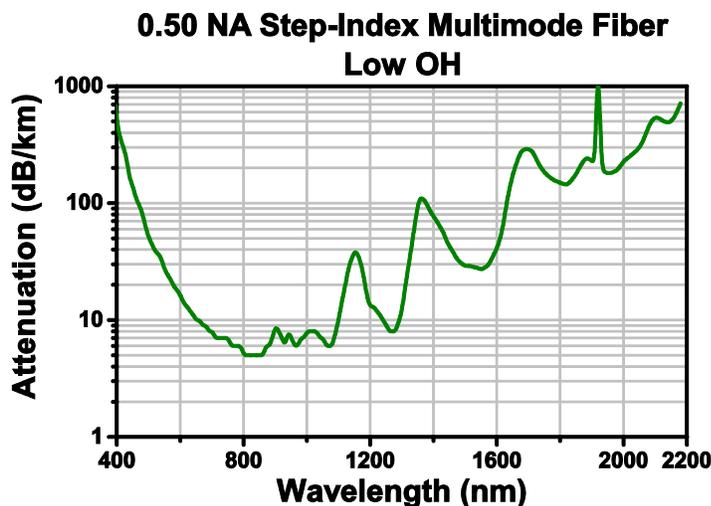
FP600ERT

Thorlabs' 0.50 NA hard polymer-clad, multimode, step-index fibers offer high numerical apertures to suit a broad range of applications, from remote illumination to photodynamic therapy. This high quality fiber offers easy termination with no pistoning effect and is a cost effective alternative to silica / silica fiber.

### Specifications

FP600ERT	
Transmission Region	400 - 2200 nm (Low OH Content)
Core Diameter	600 ± 10 μm
Cladding Diameter	630 ± 10 μm
Coating Diameter	1040 ± 30 μm
Core / Cladding Material	Pure Silica / Hard Polymer
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-40 to 85 °C
Numerical Aperture (NA)	0.50
Attenuation	12 dB/km @ 810 nm (Max)
Proof Test Level	≥100 kpsi
Max Core Offset	9 μm
Bend Radius	24 mm (Short Term) 48 mm (Long Term)
Recommended Stripping Tool	T28S46

### Performance Plot



## 0.50 NA Hard Polymer Clad Multimode Fiber



### Description

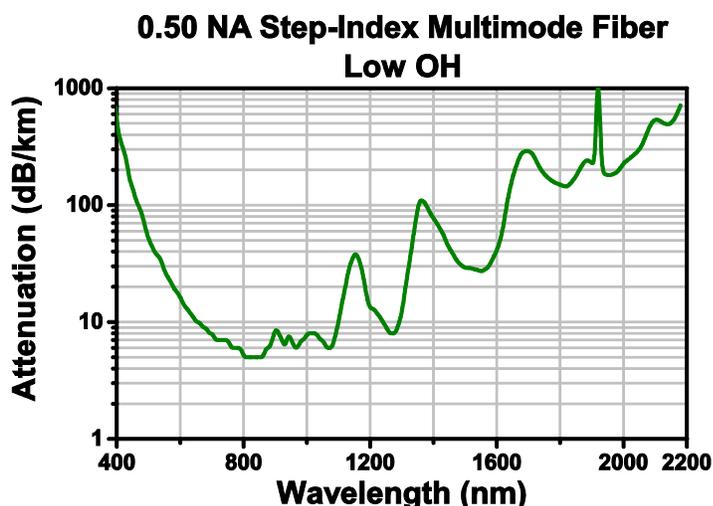
FP1000ERT

Thorlabs' 0.50 NA hard polymer-clad, multimode, step-index fibers offer high numerical apertures to suit a broad range of applications, from remote illumination to photodynamic therapy. This high quality fiber offers easy termination with no pistoning effect and is a cost effective alternative to silica / silica fiber.

### Specifications

FP1000ERT	
Transmission Region	400 - 2200 nm (Low OH Content)
Core Diameter	1000 ± 15 μm
Cladding Diameter	1035 ± 15 μm
Coating Diameter	1400 ± 50 μm
Core / Cladding Material	Pure Silica / Hard Polymer
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-40 to 85 °C
Numerical Aperture (NA)	0.50
Attenuation	12 dB/km @ 810 nm (Max)
Proof Test Level	≥100 kpsi
Max Core Offset	10 μm
Bend Radius	40 mm (Short Term) 80 mm (Long Term)
Recommended Stripping Tool	M44S63

### Performance Plot



## OVERVIEW

The H10720 and H10721 series are photosensor modules containing a metal package PMT and a high-voltage power supply circuit. The built-in PMT uses a metal package with the same diameter as a TO-8 metal package used for semiconductor photodetectors. Despite the small size nearly equal to photodiodes, this PMT delivers high gain, wide dynamic range, and high-speed response. Six types of products are available with different sensitivity characteristics such as spectral response ranges. Hamamatsu also provides "P" type with low dark count selected for photon counting measurement. The H10720 series are pin output type, while the H10721 are flexible cable output type.



## PRODUCT VARIATIONS

### ●Pin output type (On-board type)

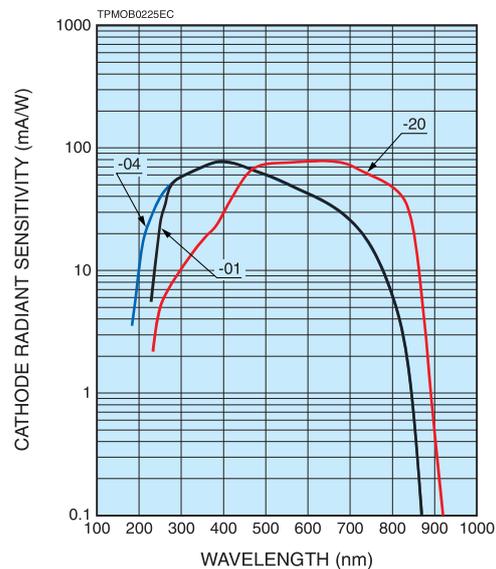
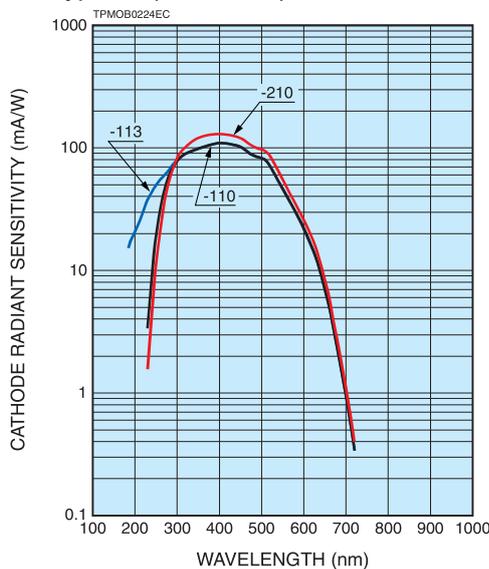
Type No.	Spectral response	Photocathode	Window material	Notes
H10720-110 / H10720P-110	230 nm to 700 nm	Super bialkali	Borosilicate glass	P Type: For photon counting
H10720-113 / H10720P-113	185 nm to 700 nm	Super bialkali	UV glass	
H10720-210 / H10720P-210	230 nm to 700 nm	Ultra bialkali	Borosilicate glass	
H10720-01 / H10720P-01	230 nm to 870 nm	Multialkali	Borosilicate glass	
H10720-04 / H10720P-04	185 nm to 870 nm	Multialkali	UV glass	
H10720-20	230 nm to 920 nm	Extended red multialkali	Borosilicate glass	

### ●Cable output type

Type No.	Spectral response	Photocathode	Window material	Notes
H10721-110 / H10721P-110	230 nm to 700 nm	Super bialkali	Borosilicate glass	P Type: For photon counting
H10721-113 / H10721P-113	185 nm to 700 nm	Super bialkali	UV glass	
H10721-210 / H10721P-210	230 nm to 700 nm	Ultra bialkali	Borosilicate glass	
H10721-01 / H10721P-01	230 nm to 870 nm	Multialkali	Borosilicate glass	
H10721-04 / H10721P-04	185 nm to 870 nm	Multialkali	UV glass	
H10721-20	230 nm to 920 nm	Extended red multialkali	Borosilicate glass	

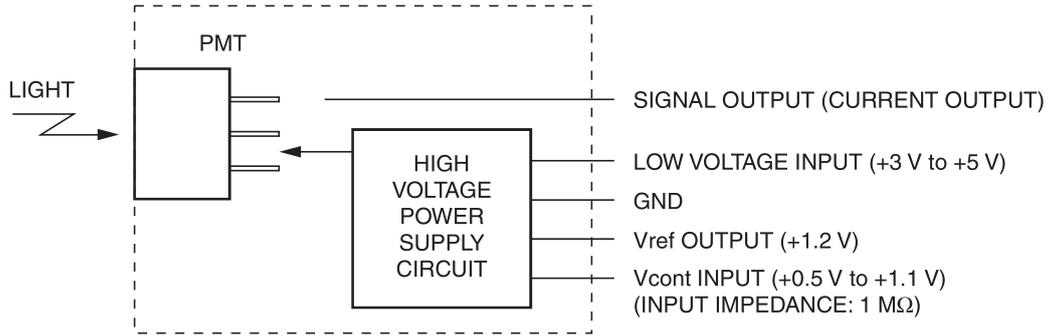
This product can't be used at vacuum environment or reduced pressure environment.

Figure 1: Typical spectral response



# PHOTOSENSOR MODULES H10720/H10721 SERIES

Figure 2: Schematic diagram



TPMOC0261EA

## SPECIFICATIONS

(at +25 °C)

Parameter		H10720 / H10721 series				Unit		
Suffix		-110, -113	-210	-01, -04	-20	—		
Input voltage		+2.8 to +5.5				V		
Max. input voltage		+5.5				V		
Max. input current *1		2.7				mA		
Max. average output signal current *2		100				μA		
Max. control voltage		+1.1 (Input impedance 1 MΩ)				V		
Recommended control voltage adjustment range		+0.5 to +1.1 (Input impedance 1 MΩ)				V		
Effective area		φ8				mm		
Peak sensitivity wavelength		400	400	400	630	nm		
Cathode	Luminous sensitivity	Min.	80	100	100	350	μA/lm	
		Typ.	105	135	200	500		
	Blue sensitivity index (CS 5-58)	Typ.	13.5	15.5	—	—	—	
	Red / White ratio	Typ.	—	—	0.2	0.45	—	
Radiant sensitivity *3		Typ.	110	130	77	78	mA/W	
Anode	Standard type	Luminous sensitivity *2	Min.	80	100	100	350	A/lm
			Typ.	210	270	400	1000	
	Radiant sensitivity *2 *3	Typ.	$2.2 \times 10^5$	$2.6 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5$	$1.5 \times 10^5$	A/W	
		Dark current *2 *4	Typ.	1	1	1	10	nA
	Max.		10	10	10	100		
P type dark count *2 *4		Typ.	50	50	600	—	s <sup>-1</sup>	
		Max.	100	100	1000	—		
Rise time *2		0.57				ns		
Ripple noise *2 *5 (peak to peak)		Max.	0.1			mV		
Settling time *6		Max.	10			s		
Operating ambient temperature *7		+5 to +50				°C		
Storage temperature *7		-20 to +50				°C		
Weight		45 (H10720 series), 80 (H10721 series)				g		

\*1: At +5 V input voltage, +1.0 V control voltage, and output current equal to dark current

\*2: Control voltage = +1.0 V

\*3: Measured at the peak sensitivity wavelength

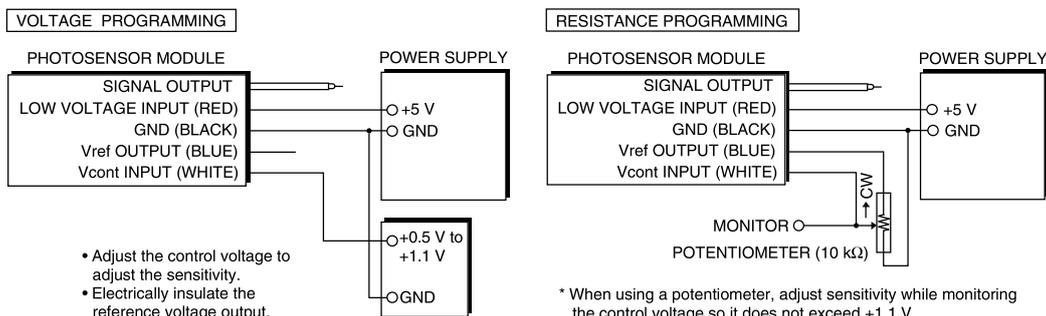
\*4: After 30 minutes storage in darkness.

\*5: Cable RG-174/U, Cable length 450 mm, Load resistance = 1 MΩ, Load capacitance = 22 pF

\*6: The time required for the output to reach a stable level following a change in the control voltage from +1.0 V to +0.5 V.

\*7: No condensation

Figure 3: Sensitivity adjustment method



- Adjust the control voltage to adjust the sensitivity.
- Electrically insulate the reference voltage output.

\* When using a potentiometer, adjust sensitivity while monitoring the control voltage so it does not exceed +1.1 V.

\*\* When input voltage is +4 V or less, please set resistance of potentiometer to 100 kΩ.

TPMOC0231EB

Figure 4: Typical gain

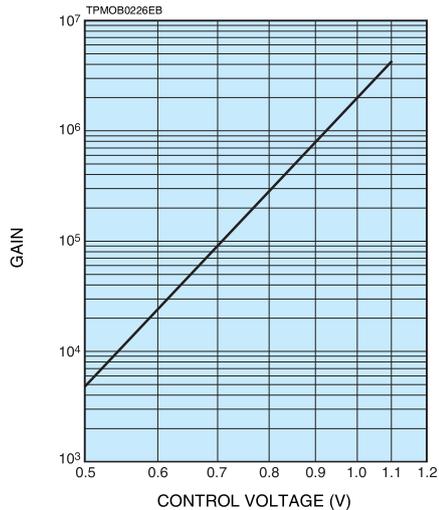


Figure 5: Typical output current v.s. input current

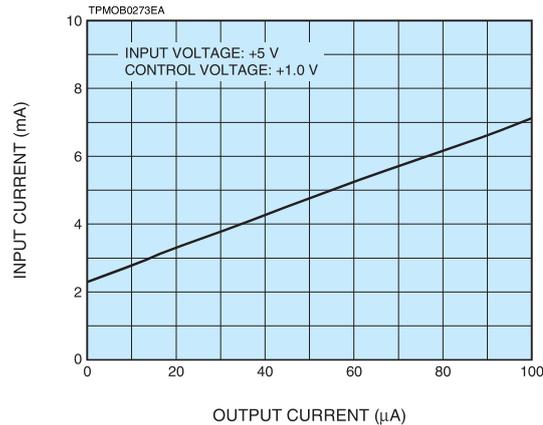


Figure 6: Typical ripple noise

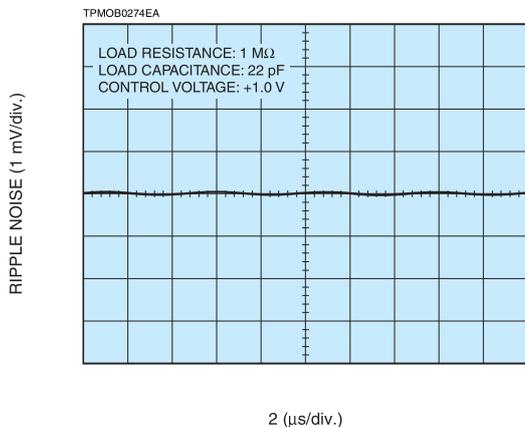
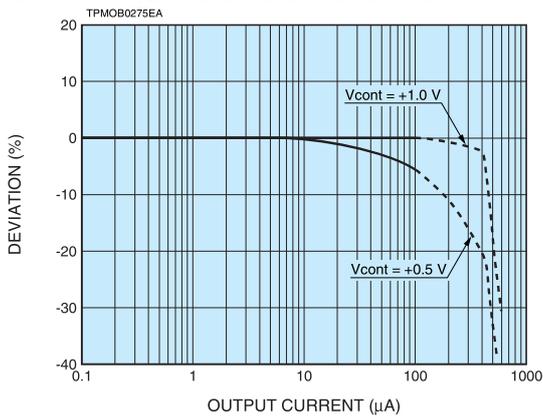


Figure 7: Typical DC linearity

●H1072x-110/H1072x-210/H1072x-113



●H1072x-01/H1072x-20/H1072x-04

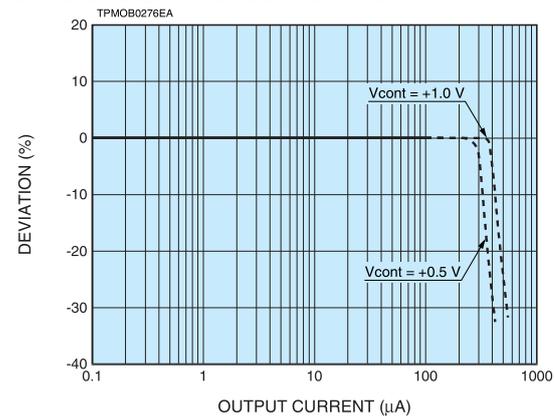
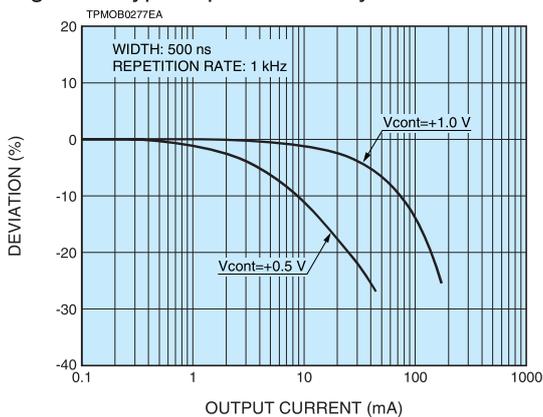
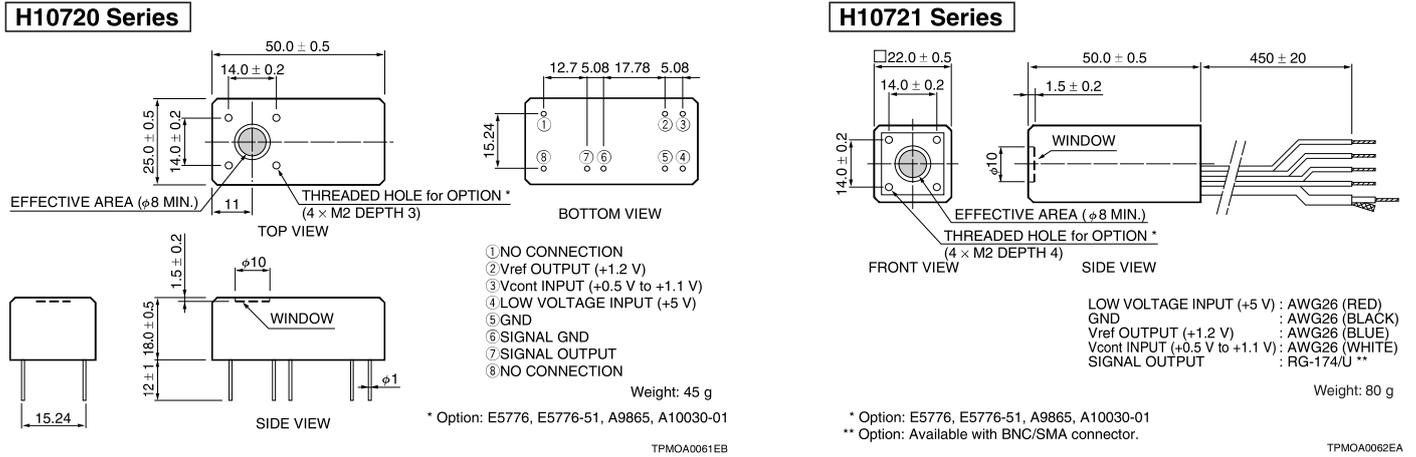


Figure 8: Typical pulse linearity



# PHOTOSENSOR MODULES H10720/H10721 SERIES

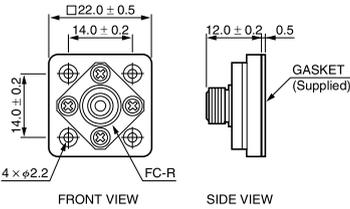
Figure 9: Dimensional outlines (Unit: mm)



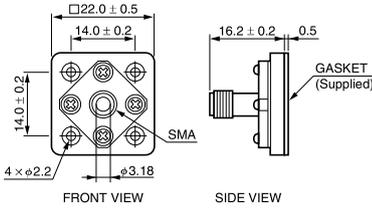
## OPTION

### OPTICAL FIBER ADAPTER E5776 / E5776-51

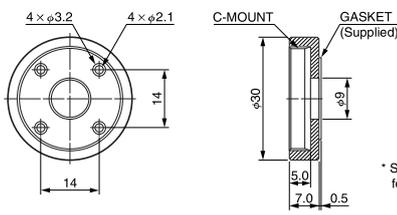
#### E5776 (FC Type)



#### E5776-51 (SMA Type)



### C-MOUNT ADAPTER A9865



Note: Optical blocks are available for these photosensor modules to make compact optical systems without light leakage.

## RELATED PRODUCT

### POWER SUPPLY FOR PHOTOMULTIPLIER TUBE MODULES C10709

The C10709 is the power supply for photomultiplier tube modules which has 5 V output voltage.

This unit can provide both the driving voltage and the control voltage. This feature enables users to operate the modules easily.



Parameter	Description / Value	Unit
Output voltage	±5	V
Output current	Max. 2.0 (+5 V), 0.2 (-5 V)	A
Control voltage <sup>(A)</sup> (variable voltage range)	+0.25 to +1.8	V
Input voltage	AC100 to AC240	V

**NOTE:** <sup>(A)</sup> Adjust within the recommended control voltage range for the photomultiplier tube module being used.

## HAMAMATSU PHOTONICS K.K. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Electron Tube Division

314-5, Shimokanzo, Iwata City, Shizuoka Pref., 438-0193, Japan, Telephone: (81)539/62-5248, Fax: (81)539/62-2205

U.S.A.: Hamamatsu Corporation: 360 Foothill Road, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1)908-231-0960, Fax: (1)908-231-1218 E-mail: usa@hamamatsu.com

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49)8152-375-0, Fax: (49)8152-2658 E-mail: info@hamamatsu.de

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: (33)1 69 53 71 00, Fax: (33)1 69 53 71 10 E-mail: info@hamamatsu.fr

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, United Kingdom, Telephone: (44)1707-294888, Fax: (44)1707-325777 E-mail: info@hamamatsu.co.uk

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Torshamnsgatan 35 SE-164 40 Kista, Sweden, Telephone: (46)8-509-031-00, Fax: (46)8-509-031-01 E-mail: info@hamamatsu.se

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.r.l.: Strada della Moia, 1 int. 6, 20020 Arese (Milano), Italy, Telephone: (39)02-93581733, Fax: (39)02-93581741 E-mail: info@hamamatsu.it

China: Hamamatsu Photonics (China) Co., Ltd.: B1201, Jianning Center, No.27 Dongsanhuan Beilu, Chaoyang District, Beijing 100020, China, Telephone: (86)10-6586-6006, Fax: (86)10-6586-2866 E-mail: hpc@hamamatsu.com.cn

Taiwan: Hamamatsu Photonics Taiwan Co., Ltd.: 8F-3, No.158, Section2, Gongdao 5th Road, East District, Hsinchu, 300, Taiwan R.O.C. Telephone: (886)03-659-0080, Fax: (886)07-811-7238 E-mail: info@tw.hpk.co.jp

TPMO1062E02

NOV. 2016. IP

SLRI-TR-2022-045