ตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสูญญากาศ Photomultiplier tubes: PMT: (ตอน3)

จากพื้นฐานของตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบหลอดสูญญากาศจะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ

- ส่วนของแผ่นโฟโตคาโทด
- ระบบการรับสัญญาณอินพุทของแสง-อิเล็กตรอน
- ส่วนการทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอน และ ส่วนแอโนด

1. ลักษณะการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

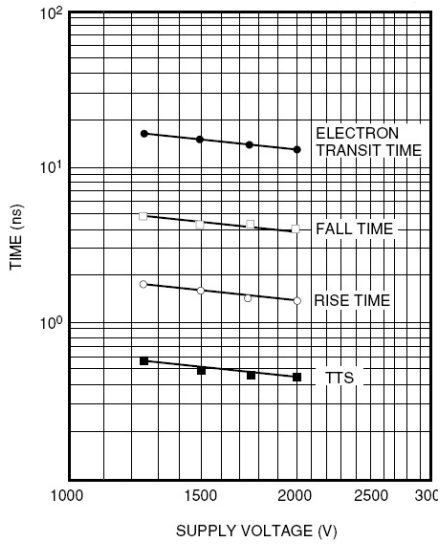
ตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบสูญญากาศเป็นตัวตรวจจับทางแสงที่มีการตอบสนองทางเวลาที่รวดเร็ว โดยที่การตอบสนองทางเวลาสามารถตรวจพบได้จากเวลาการส่งผ่านเมื่อแสงตกกระทบที่ขั้วคาโทด ก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเคลื่อนด้วยความเร่งเข้าสู่ขั้วแอโนดภายหลังจากการทวีคูณ ด้วยการออกแบบตัวตรวจจับแสงทวีคูณมีช่องหน้าต่างรับแสงที่เป็นทรงกลมทำให้ความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านต่ำสุด ทำให้การตอบสนองจะรวดเร็วมาก

ตารางที่ 1 แสดงถึงคุณสมบัติทางเวลาแบบต่างๆ ของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จากแผ่นไดย์โนดชนิดต่างๆ

Unit : ns

Dynode Type	Rise Time	Fall Time	Pulse Width (FWHM)	Electron Transit Time	TTS
Linear-focused	0.7 to 3	1 to 10	1.3 to 5	16 to 50	0.37 to 1.1
Circular-cage	3.4	10	7	31	3.6
Box-and-grid	to 7	25	13 to 20	57 to 70	Less than 10
Venetian blind	to 7	25	25	60	Less than 10
Fine mesh	2.5 to 2.7	4 to 6	5	15	Less than 0.45
Metal channel	0.65 to 1.5	1 to 3	1.5 to 3	4.7 to 8.8	0.4

โดยหลักแล้วการหาผลการตอบสนองทางเวลาสามารถทราบได้จากแผ่นไดย์โนด และแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง ในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามไฟฟ้า หรือจากแรงดันที่ให้ เป็นผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากขั้วคาโทดไปยังแผ่นไดย์โนดที่มีระยะห่างกันก่อให้เกิดเวลาของการส่งผ่าน โดยทั่วไปแล้วเวลาการตอบสนอง สามารถทราบได้ในสัดส่วนที่ตรงกันข้ามกับรากที่สองของแรงดันที่จ่าย จากรูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะการตอบสนองทางเวลา กับแรงดันที่ให้

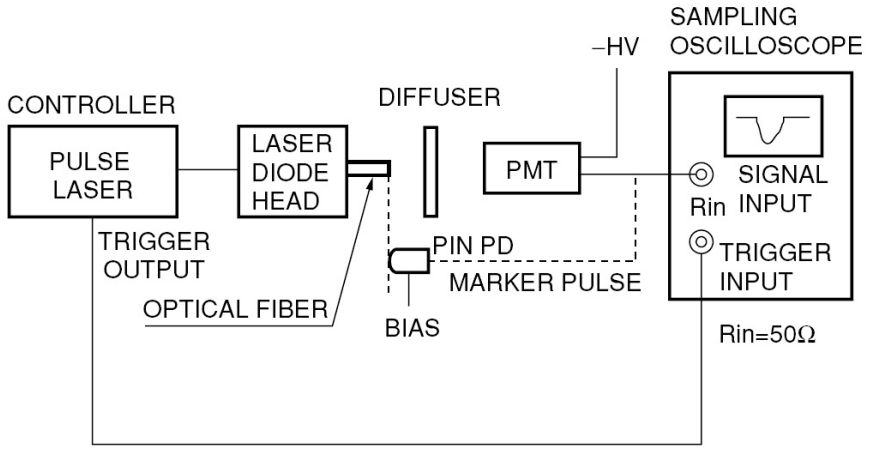


รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะการตอบสนองทางเวลา กับแรงดันที่ให้

ลักษณะการตอบสนองทางเวลา และหลักการวัดทดสอบของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

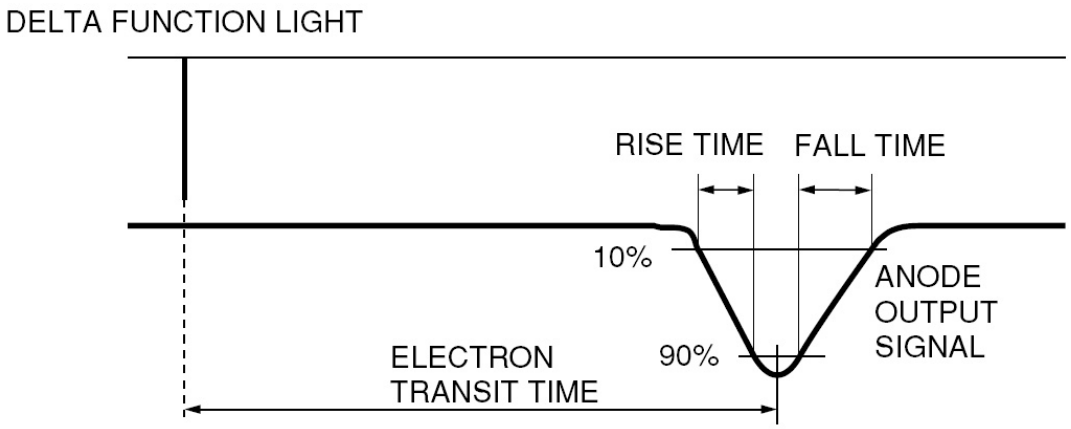
1. การวัดทดสอบ Rise time , Fall time และ electron transit time

จากรูปที่ 2 แสดงแผนภาพสำหรับการวัดทดสอบการตอบสนองทางเวลา และรูปที่ 3 แสดงให้ทราบถึงความหมายของช่วงเวลาขอบขาขึ้น เวลาขอบขาลง และการส่งผ่านของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นสัญญาณเอาท์พุทของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ



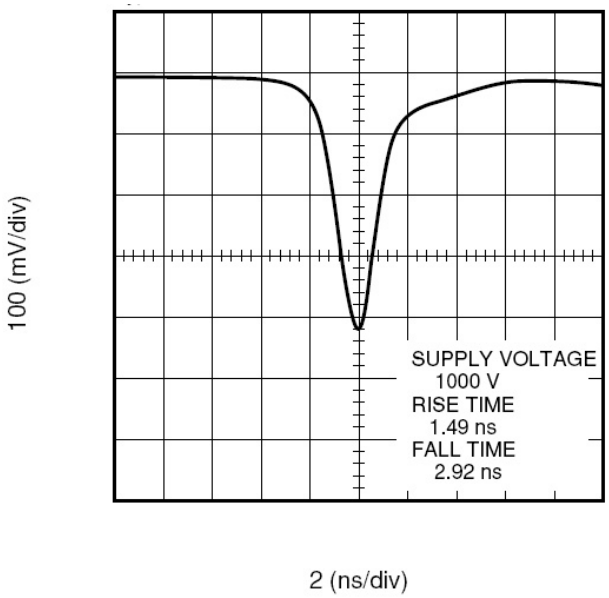
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการวัดทดสอบช่วงเวลาขอบขาขึ้น เวลาขอบขาขึ้น และเวลาการส่งผ่านของอิเล็กตรอน

จากแผนภาพแสดงถึงแหล่งกำเนิดสัญญาณเลเซอร์แบบพลัทซ์ โดยกำหนดให้มีความกว้างของพลัทซ์แคบมากซึ่งแสงที่ถูกกำหนดให้มีความกว้างของพลัทซ์แคบมากเปรียบเหมือนกับสัญญาณแสงเป็น Delta-function จากนั้นแสงก็จะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับแสงทวีคูณ สำหรับแซมปิ้งออสซิลโลสโคป ถูกใช้สำหรับวัดสัญญาณเอาท์พุทจากตัวตรวจจับแสงทวีคูณหลายๆช่วงเวลา จึงจะได้รูปคลื่นที่สมบูรณ์ สัญญาณเอาท์พุทที่ได้รับได้จากตัวตรวจจับแสงทวีคูณผ่านกระบวนการตรวจจับทางแสงก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ทุกๆตำแหน่งของโฟโตคาโทด ดังนั้นช่วงเวลาของขอบขาขึ้น และลง สามารถทราบได้โดยเวลาการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง รวมทั้งการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้า และปริมาณแรงดันไบแอสจากแหล่งจ่ายที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 3 ช่วงเวลาขอบขาขึ้น เวลาขอบขาขึ้น และการส่งผ่านของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4 แสดงถึงรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ปรากฏขึ้นจริง โดยทั่วไปแล้วเวลาขอบขาลงจะใช้เวลาค่อนข้างนานเป็น 2 หรือ 3 เท่ามากกว่าเวลาขอบขาขึ้น นั่นหมายความว่าเมื่อขณะทำการวัดมีลักษณะของสัญญาณพลัทซ์ที่ซ้ำๆกัน ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อมิให้มีการซ้อนทับกันของสัญญาณพลัทซ์ อีกทั้งค่า FWHM (Full width at half maximum) ของสัญญาณเอาท์พุทรูปคลื่นพลัทซ์ โดยปกติแล้วจะใช้เวลาที่ 2.5 เท่าของเวลาขอบขาขึ้น

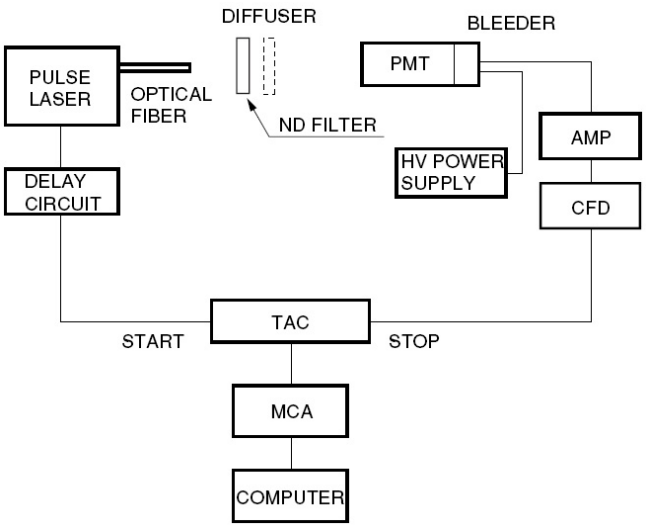


รูปที่ 4 สัญญาณรูปคลื่นเอาท์พุทของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ปรากฏขึ้นจริง

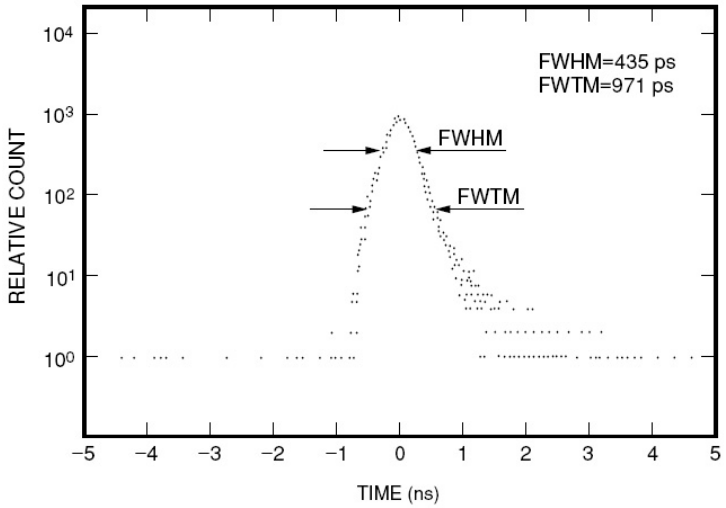
เวลาของกาส่งผ่านจะเป็นช่วงเวลาระหว่างสัญญาณพลัทซ์ของแสงมาถึงขั้วของแผ่นโฟโตคาโทด และปรากฏเป็นสัญญาณรูปคลื่นพลัทซ์ ในการวัดเวลาของการส่งผ่านจะใช้พินโฟโตไดโอด(PIN Photodiode) โดยติดตั้งการวัดสัญญาณอ้างอิงที่เวลาศูนย์วินาที โดยทำการติดตั้งให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับส่วนของโฟโตคาโทดของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ เวลาในช่วงดังกล่าวเป็นเวลาระหว่างที่พินโฟโตไดโอดได้ทำการตรวจจับสัญญาณพลัทซ์ของแสง และสัญญาณเพลัทซ์เอาท์พุทของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่มีขนาดของยอดสัญญาณแอมปลิจูดจึงจะทำการทดสอบ ค่าเวลาของการส่งผ่านนี้ถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการวัดทดสอบเวลาล่าช้า delay time ของระบบในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานกับการช่วงเวลาที่มีอยู่ของการเรืองแสง โดยให้มีการทดสอบจากสัญญาณพลัทซ์ของแสงซ้ำอีกครั้ง

2. TTS (Transit time spread) การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน

เมื่อส่วนของโฟโตคาโทดได้รับความเข้มแสงจนเต็มที่ก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกปลดปล่อยออกมา ในที่นี้เวลาของการส่งผ่านของทุกๆโฟโตอิเล็กตรอนที่แสดงในรูปของสัญญาณรูปคลื่นพลัทซ์มีการกระเพื่อม การกระเพื่อมหรือการกวัดแกว่งนี้เรียกว่า การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS (Transit time spread) จากแผนภาพระบบการการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่านแสดงในรูปที่ 5 และทุกๆ ข้อมูลของการทดสอบแสดงในรูปที่ 6



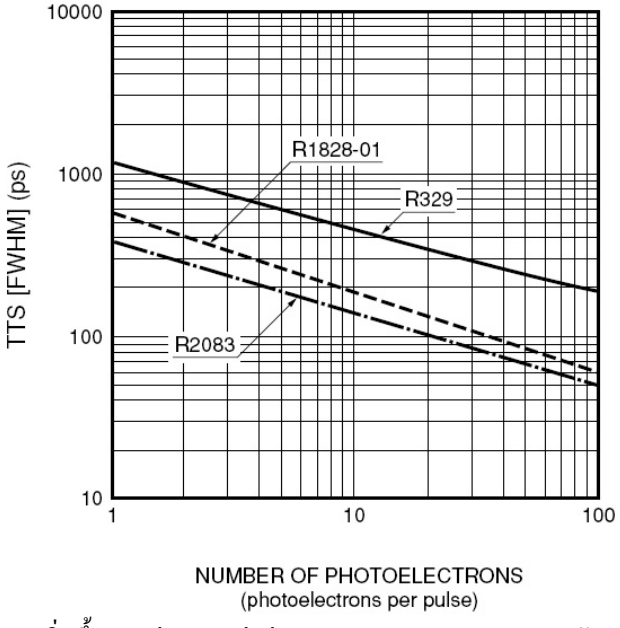
รูปที่ 5 แผนภาพระบบการทดสอบการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS (Transit time spread)



รูปที่ 6 สัญญาณของ การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS (Transit time spread)

ในการทดสอบนี้สัญญาณทริก Trigger signal จากสัญญาณพลัทซ์ที่ผสมเข้ากับแสงเลเซอร์ได้ถูกส่งผ่านเข้าสู่วงจรหน่วงเวลา และเริ่มทำการเปลี่ยนช่วงคาบเวลาของแอมป์ปลิจูด TAC (time-to-amplitude converter) ซึ่งจะทำการเปลี่ยนช่วงคาบเวลาเป็นขนาดความสูงของสัญญาณพลัทซ์ นั่นหมายความว่าสัญญาณเอาท์พุทจากตัวตรวจจับแสงทวีคูณได้ถูกส่งให้ทำการหยุดสัญญาณการเปลี่ยนช่วงคาบเวลาให้เป็นแอมป์ปลิจูด โดยการพิจารณาเป็นอัตราส่วนค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ช่วยลดเวลาของสัญญาณกระเพื่อม (time jitter) จากกการกระเพื่อมของความสูงสัญญาณพลัทซ์ ช่วงคาบเวลาของแอมป์ปลิจูด TAC ที่กำเนิดสัญญาณความสูงของพลัทซ์จะเป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาระหว่างสัญญาณที่ “เริ่ม” และ “หยุด” จากนั้นสัญญาณที่เข้าสู่การวิเคราะห์หลายช่องสัญญาณ (multichannel analyzer) เพื่อการวิเคราะห์ขนาดความสูงสัญญาพลัทซ์ ด้วยเหตุที่ช่วงเวลาระหว่างสัญญาณที่ “เริ่ม” และ “หยุด”สัมพันธ์กันกับเวลาการส่งผ่านของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยการแสดงสัญญาณออกมาในรูปของกราฟแท่ง หรือ histogram ด้วยการการวิเคราะห์หลายช่องสัญญาณโดยการรวบรวมค่าความสูงสัญญาณพลัทซ์แต่ละอันเข้าไว้ในหน่วยความจำ การแสดงผลอาศัยลักษณะการวิเตราะห์เชิงสถิติเพื่อบอกให้ทราบถึงการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในช่วงช่วงเวลาส่งผ่าน

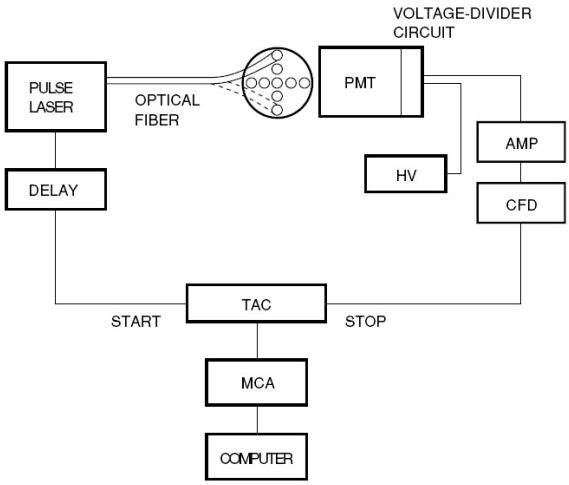
โดยปกติแล้วค่า TTS (Transit time spread) การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน จะแสดงในรูปของ FWHM ที่เป็นการกระจายแบบ histogram แตบางครั้งอาจจะแสดงแบบค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน ดังนั้นเมื่อค่าของ histogram บอกถึงการกระจายแบบเกาส์ Gaussian distribution แล้วค่าของ FWHM จะมีค่า 2.35 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน ในที่นี้ TTS (Transit time spread) การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน มีผลต่อการปรับปรุงจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน หรืออิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงตกกระทบ ต่อสัญญาณรูปคลื่นพลัทซ์ที่เพิ่มขึ้น หรือในทางกลับกันก็เป็นสัดส่วนกับค่ารากที่สองของจำนวนโฟฌตอิเล็กตรอน จากความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงค่าการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS (Transit time spread) กับจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน

(3) ความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD (Cathode transit time difference)

ความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด เป็นความแตกต่างในเวลาการส่งผ่านเมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งของแสงตกกระทบบนโฟโตคาโทด โดยส่วนใหญ่แล้วการวัดทดสอบผลการตอบสนองของเวลากระทำยังส่วนของโฟโตคาโทดภายใต้ความเข้มแสง ในรูปที่ 8 แสดงถึงการวัดทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD โดยอาศัยแผ่นที่มีช่องรับแสงเพื่อให้เกิดการเลื่อนของตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบเข้าสู่แผ่นโฟโตคาโทด และ ความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านระหว่างลำแสงที่ตกกระทบยังตำแหน่งที่ทำการทดสอบ



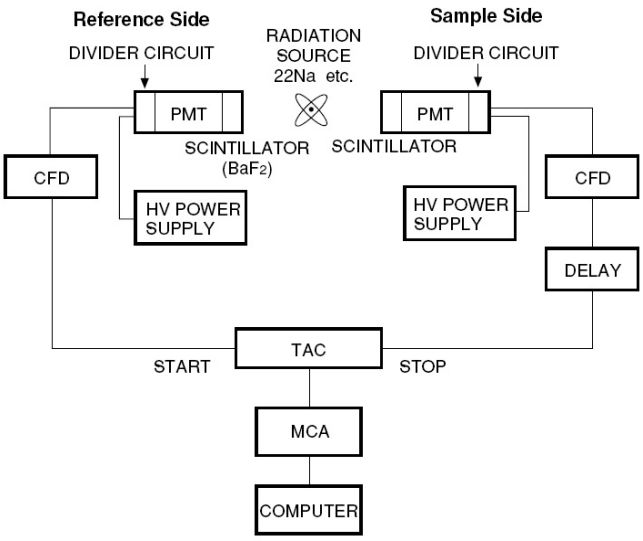
รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบการทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD

โดยพื้นฐานระบบการวัดทดสอบนี้จะเป็นเช่นเดียวกันกับการวัดการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS ที่ทุกๆ ตำแหน่งที่แสงตกกระทบแตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในขนาดความสูงของสัญญาณพลัทซ์ก็จะเป็นการกระจายข้อมูลสัมพันธ์แบบ histogram ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD ข้อมูลที่ได้จาก CTTD จากทุกๆตำแหน่งนั้นจะแสดงถึงความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านที่ได้จากการวัดทดสอบเมื่อแสงได้ตกกระทบลงยังส่วนของโฟโตคาโทด

ในการประยุกต์ใช้จริง การทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD ไม่จำเป็นที่จะต้องปฏิบัติ แต่จะต้องทำการทดสอบในกระบวนการผลิตโดยผู้ผลิตหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ อย่างไรก็ตามการทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD เป็นค่าเฟคเตอร์ที่สำคัญต่อช่วงเวลาขอบขาขึ้น เวลาขอบขาลง และ การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS รวมถึงค่าของเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน coincident resolving time :CRT

(4) ค่าของเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน coincident resolving time :CRT

การใช้เทคนิคการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS เป็นการวัดการกระเพื่อมของเวลาการส่งผ่าน ซึ่งมีลักษณะการทดสอบคล้ายกับระบบการทดสอบความแตกต่างของเวลาการส่งผ่านด้านขั้วคาโทด CTTD หรือการวัดทดสอบช่วงเวลาที่ถูกกระตุ้น: TOF ดังนั้นเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน: CRT จึงเป็นการวัดทดสอบที่ต้องอาศัยข้อมูลในทางปฏิบัติที่แท้จริง เพื่อหาความเหมาะสมของตัวตรวจจับแสงทวีคูณเพื่อการนำไปใช้ในภาคสนาม หรือการประยุกต์ใช้ที่คล้ายเคียงกันรูปที่ 9 แสดงถึงแผนภาพของการวัดทดสอบเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน:CRT



รูปที่ 9 แสดงถึงแผนภาพของการวัดทดสอบเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน:CRT

จากแผนภาพจะใช้ธาตุที่ให้กัมมันตรังสีคือ Na^{22} หรือ $Ge^{68}-Ga$ ในการทดสอบ ส่วนตัวเรืองแสงนั้นจะเป็นส่วนที่มีการผสมธาตุแบเรียมไดฟูออรีน BaF_2 ของส่วนหัววัดที่ใช้ในการอ้างอิง ในทำนองเดียวกันด้านที่เป็นส่วนของหัววัดทดสอบนั้นจะใช้ธาตุ BGO, BaF_2, CsF หรือพลาสติกเรืองแสง โดยให้มีการใช้งานร่วมกันระหว่างการแผ่รังสี และส่วนที่เปล่งแสงควรแยกกให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน ในส่วนแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีจะถูกนำมาวางไว้ตรงกลางระหว่างคู่ของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ธาตุกัมมันตรังสีนี้จะให้รังสีแกมมาในทิศทางตรงกันข้ามกันที่ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นรังสีอกมมาที่เข้าสู่หัววัดทั้งสองพร้อมกันก่อให้เกิดการเปล่งแสงออกจากอุปกรณ์เรืองแสง scintillator พร้อมกันทั้งคู่ จากนั้นสัญญาณที่ถูกตรวจจับโดยหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ จะเริ่มส่งการรับสัญญาณเข้าสู่วงจรเปลี่ยนคาบเวลาเป็นแอม

ปลิจูด (time-to-amplitude-converter: TAC) ขณะที่สัญญาณจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณอีกตัวหนึ่งก็จะส่งสัญญาณหยุดการตรวจจับไปยังวงจร(TAC) โดยการผ่านทางวงจรหน่วงเวลาโดยอาศัยการเวลาการทริกส์ Trigger timing ในกรณีของการวัดด้วยวิธีการ TTS จำเป็นที่จะต้องทำการวัดทดสอบซ้ำหลายครั้ง และความสูงของสัญญาณพลัทซ์ก็จะถูกวิเคราะห์โดยส่วนการวิเคราะห์หลายช่องสัญญาณ multichannel analyzer เพื่อให้เกิดขนาดของสเปกตัมขณะที่มีที่แสงตกกระทบร่วมกัน ขนาดของสัญญาณสเปกตัมจะมีการแสดงค่าข้อมูลเหมือนกับข้อมูลทางสถิติ โดยสัญญาณที่ได้จะมีการกระเพื่อมกวัดแกว่งตามเวลาเมื่อเข้าสู่วงจรเปลี่ยนคาบเวลาเป็นแอมปลิจูด: TAC การกระเพื่อมของสัญญาณนี้จะเป็นผลจากการแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS ของสองหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ดังนั้นเมื่อสังเกตุจากรูปที่ 1 และรูปที่ 7 จะเป็นสัดส่วนกลับกันกับรากที่สองของจำนวนอิเล็กตรอนเนื่องจากแสงต่อหนึ่งพลัทซ์ และยังเป็นรากที่สองของแรงดันแหล่จ่าย ดังนั้นการที่พลังงานการแผ่รังสีสูงๆ และแรงดันจากแหล่งจ่ายจะให้ผลได้ดีกับการทดสอบค่าของเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน : CRT จากการที่การแผ่ขยายเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาส่งผ่าน TTS ของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณเป็นเวลา τ_1 และ τ_2 ทำให้ค่าของเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน CRT ถูกกำหนดจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$CRT = (\tau_1^2 + \tau_2^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

ลักษณะของค่าของเวลาที่แสงตกกระทบร่วมกัน : CRT เป็นตัวแปรที่สำคัญมากของการวัดทดสอบการวัดทดสอบช่วงเวลาที่ถูกกระตุ้น: TOF เนื่องจากผลกระทบจากความละเอียดของกีเปลี่ยนตำแหน่ง

ลักษณะความเป็นเชิงเส้น Linearity

หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ แสดงลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ดีจากสัญญาณเอาท์พุทด้านแอโนดที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ ได้ดีเท่าเทียมกับช่วงขอบเขตของการนับโฟตอนที่ตกกระทบเข้าสู่หัววัด หรืออาจจะกล่าวได้ว่าช่วงการตอบสนองที่กว้างมาก อย่างไรก็ตามถ้าแสงที่ตกกระทบนั้นมีปริมาณที่มากจะทำให้สัญญาณเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากจากความเป็นเชิงเส้นในทางอุดมคติ เหตุผลนี้เป็นเพียงเหตุผลเบื้องต้นของลักษณะความเป็นเชิงเส้นด้านแอโนด แต่กระนั้นก็ตามเหตุผลนี้ก็มีผลกระทบกับลักษณะความเป็นเชิงเส้นด้านคาโทด เมื่อตัวตรวจจับแสงทวีคูณอยู่ภายใต้สถานะการทำงานเมื่อแสงได้ผ่านเข้าสู่ส่วนของโฟโตคาโทดในขณะที่ได้รับการจ่ายแรงดันขนาดต่ำๆ และเกิดกระแสด้านเอาท์พุทที่สูง ดังนั้นความเป็นเชิงเส้นทั้งในด้านคาโทด และแอโนดจะขึ้นอยู่กับค่าของกระแสเพียงเท่านั้น ถ้าแรงดันจากแหล่งจ่ายคงที่ แต่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

(1) ความเป็นเชิงเส้นด้านคาโทด

ในส่วนของโฟโตคาโทดที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำส่วนของโฟโตคาโทด ดังนั้นความแตกต่างเชิงเส้นด้านคาโทดขึ้นอยู่กับวัสดุที่เคลือบอยู่กับแผ่นขั้วคาโทดดังในตารางที่ 2 แสดงถึงวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านได้ ในกรณีของการสะท้อนแสงของโฟโตคาโทด ที่มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะดังนั้นจึงมีสภาพความต้านทานที่ต่ำ ดังนั้นจึงไม่เป็นปัญหาต่อความเป็นเชิงเส้น ความการลดผลกระทบของสภาพความต้านทานของโฟโตคาโทดเพื่อให้ความเป็นเชิงเส้นของตัวอุปกรณ์มีประสิทธิภาพปราศจากการการลดทอนของสัญญาณ จึงควรให้แรงดันไบแอสในช่วง 50 ถึง 300 โวลท์ระหว่างแผ่นโฟโตคาโทด และแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ทั้งนั้นขึ้นกับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ สำหรับโฟโตคาโทดที่ใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำเคลือบที่ผิว พบว่าสภาพความต้านทานนั้นเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงควรพิจารณาคุณลักษณะของสภาพความต้านทานของโฟโตคาโทดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณอยู่ในสภาวะที่อุหภูมิลดลง

ตารางที่ 2 แสดงลักษณะวัสดุที่เคลือบบนแผ่นโฟโตคาโทด และข้อจำกัดความเป็นเชิงเส้นของขั้วคาโทด

Photocathode Materials	Spectral Response [Peak Wavelength] (nm)	Upper Limit of Linearity (Average Current)
Ag-O-Cs	300 to1200 [800]	1μA
Sb-Cs	up to 650 [440]	1μA
Sb-Rb-Cs	up to 650 [420]	0.1μA
Sb-K-Cs	up to 650 [420]	0.01μA
Sb-Na-K	up to 650 [375]	10μA
Sb-Na-K-Cs	up to 850 [420], up to 900 [600] extended red	10μA
Ga-As(Cs)	up to 930 [300~700]	(*) 0.1μA
Cs-Te	up to 320 [210]	0.1μA
Cs-I	up to 200 [140]	0.1μA

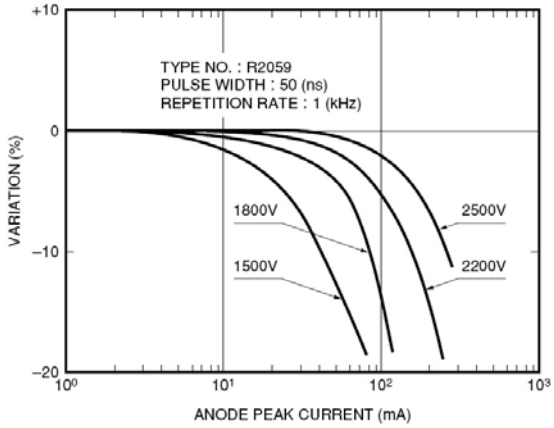
(*) การพิจาราความเป็นเชิงเส้นมีกรลดลงเมื่อกระแสมีมากเกิน

(2) ความเป็นเชิงเส้นด้านแอโนด

ข้อจำกัดความเป็นเชิงเส้นของขั้วแอโนดประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ วงจรแบ่งแรงดัน และผลกระทบของช่องว่างการเก็บประจุ อันเนื่องจากกระแสที่มีปริมาณมากในลำดับต่างๆของแผ่นไดย์โนด ในขั้นตอนนี้แสดงถึงความเป็นเชิงเส้นในกระบวนการทำงานด้านโหมดกระแสตรง DC mode ที่เป็นข้อจำกัดหลักในวงจรแบ่งแรงดันขณะที่การทำงานในโหมดสัญญาณพลัทซ์ pulse mode ซึ่งมีข้อจำกัดจากผลกระทบของช่องว่างการเก็บประจุ อันเนื่องจากขนาดของสัญญาณกระแส

ข้อจำกัดความเป็นเชิงเส้นกำหนดจากวงจรแบ่งแรงดันโดยรายละเอียดจะกล่าวในลำดับต่อไป ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณพลัทซ์ในโหมดสัญญาณพลัทซ์โดยส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดยอดของสัญญาณกระแส เมื่อทำการผสมสัญญาณพลัทซ์เข้ากับความเข้มแสงเข้าสู่เข้าสู่หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณก่อให้เกิดกระแสในปริมาณมากๆไหลเข้าสู่แผ่นไดย์โนดในลำดับอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของการเก็บประจุเพิ่มสูงขึ้น และกระแสมีการอิ่มตัว ดังนั้นผลกระทบต่างๆเหล่านี้ที่เพิ่มขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแผ่นไดย์โนด ในส่วนของผลกระทบของช่องว่างการเก็บประจุขึ้นกับการกระจายของสนามไฟฟ้าและความเข้มแสงระหว่างทุกๆขั้วของแผ่นไดย์โนด

รูปที่ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณพลัทซ์ และแรงดันจากแหล่งจ่ายของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณรุ่น R2059 โดยที่ความเป็นเชิงเส้นสามารถทำการปรับให้มีคุณภาพด้วยการใช้วงจรแบ่งแรงดันที่ออกแบบอย่างพิเศษซึ่งมีการออกแบบให้มีความสามารถเพิ่มระดับแรงดันที่แผ่นไดย์โนดในลำดับต่อไปได้อย่างดี เนื่องจากวงจรแบ่งแรงดันที่ดีนี้เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการปรับการกระจาย และความเข้มของสนามไฟฟ้าให้เกิดความเหมาะสมกับทุกๆแผ่นไดย์โนด ดังนั้นการหาอัตราส่วนของแรงดันที่เหมาะสมจะทำให้การกำหนดการทำงานของหัววัดมีความยุ่งยากน้อยมาก



รูปที่ 10 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเป็นเชิงเส้นกับปริมาณของกระแสด้านแอโนดโดยที่แรงดันขึ้นกับความเป็นเชิงเส้น

(3) การวัดทดสอบความเป็นเชิงเส้น

วิธีการวัดความเป็นเชิงเส้นจะเป็นการทดสอบทั้งโหมดกระแสตรงและโหมดสัญญาณพลัทซ์ ซึ่งแต่ละโหมดจะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

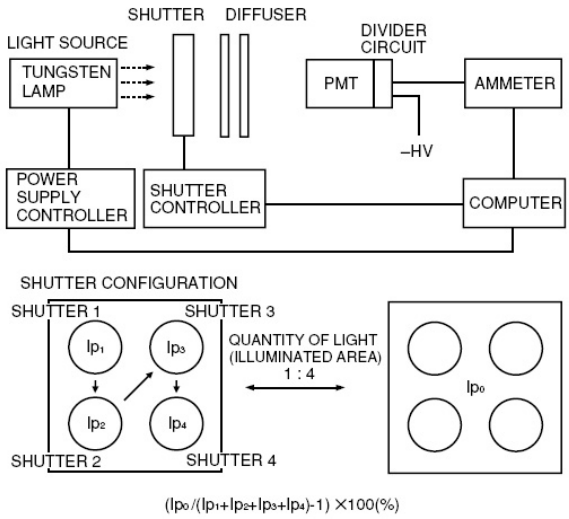
(a) โหมดกระแสตรง DC mode

ในการวัดทดสอบความเป็นเชิงเส้นด้านกระแสตรงจะใช้ระบบการวัดตามแผนภาพการทดสอบดังรูปที่ 11 โดยการใช้แผ่นแพลตโลหะที่มีช่องรับแสงสี่ช่องซึ่งมีอุปกรณ์แผ่นปิดเปิดช่องรับแสง ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดแสง และหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ โดยทุกๆช่องรับแสงจะมีการเปิดเป็นลำดับจากตำแหน่งที่ 1,2,3 และ 4 จากนั้นก็จะเปิดพร้อมกันทั้งสี่ช่อง ส่วนสัญญาณเอาท์พุทจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ถูกทดสอบจะกำหนดให้เป็นกระแส $I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, I_{p4}$ และ I_{p0} ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนของกระแส I_{p0} กับ $(I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, I_{p4})$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$(I_{p0}/(I_{p1}+I_{p2}+I_{p3}+I_{p4})-1)\times 100\% \qquad (2)$$

ถ้าสัญญาณเอาท์พุทอยู่ในช่วงความเป็นเชิงเส้นค่าต่างๆเหล่านี้ก็แสดงการเบี่ยงเบนออกจากความเป็นเชิงเส้นซึ่งมีกระแส I_{p0} เป็นดังนี้

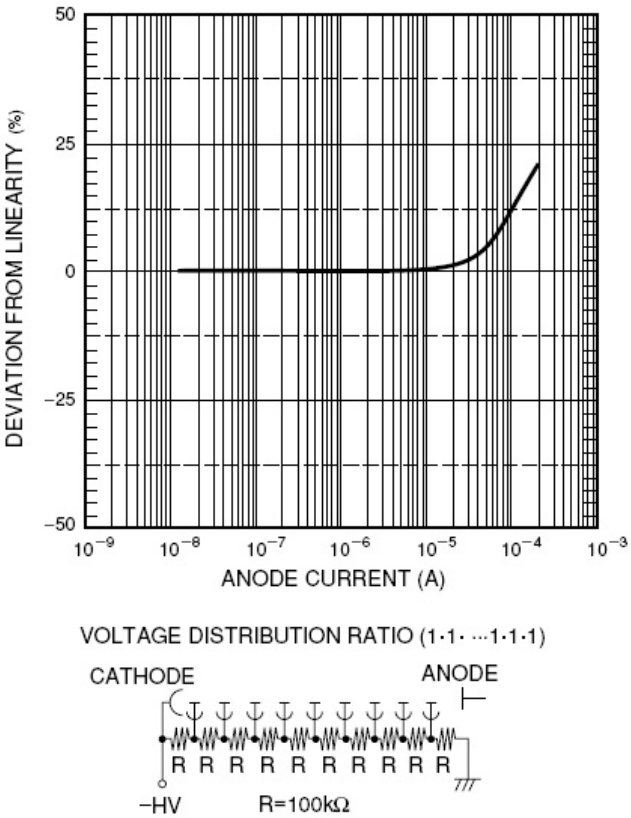
$$I_{p0} = I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4} \qquad (3)$$



รูปที่ 11 แผนภาพแสดงการทำงานของการวัดความเป็นเชิงเส้นโหมดกระแสตรง

จากนั้นทำการทดสอบซ้ำโดยการเปลี่ยนความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาท์พุทของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ซึ่งปรากฏดังรูปที่ 12 จากข้อมูลที่ได้พบว่าสัญญาณเอาท์พุทมีการเบี่ยงเบนจากความเป็นเชิงเส้นเช่นกัน การทดสอบวัดความเป็นเชิงเส้นนี้ส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลผ่นจากวงจรแบ่งแรงดันในตัวโครงสร้างของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

วิธีอย่างง่ายสำหรับการทดสอบวัดความเป็นเชิงเส้น สามารถทดสอบได้โดยใช้กระจกปรับความเข้มแสง โดยการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงระดับแสงที่ตกกระทบ



รูปที่ 12 แสดงความเป็นเชิงเส้นด้านกระแสตรงของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณชนิดรับแสงด้านข้าง

(a) โหมดสัญญาณพลัทซ์ Pulse mode

แผนภาพแสดงการทดสอบัดความเป็นเชิงเส้นของโหมดสัญญาณแบบพลัทซ์แสดดังรูปที่ 13 ในการทดสอบนี้จะใช้หลอดแอลอีดี LED ทำการผสมสัญญาณพลัทซ์แบบคู่ ที่มีขนาดของสัญญาณที่สูงมาก และต่ำมากแยกออกจากกัน โดยที่ขนาดสัญญาณแอมปลิจูดของพลัทซ์ที่มีขนาดสูงและต่ำมาก จะมีอัตราส่วนที่ประมาณ 4:1 ถ้าสัญญาณเอาท์พุทจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณมีการตอบสนองต่อสัญญาณพลัทซ์ที่มีขนาดสูงมาก และต่ำมากที่มีความสว่างของแสงที่ต่ำได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นขนาดของสัญญาณกระแสจะถูกกำหนดที่ I_{po1} และ I_{po2} ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง I_{po2}/I_{po1} เป็นสัดส่วนที่ตรงกันกับขนาดแอมปลิจูดของพลัทซ์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{po2}/I_{po1} = 4 \tag{4}$$

เมื่อแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดแอลอีดีได้ถูกนำเข้ามาใกล้หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ กระแสด้านเอาท์พุทเพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจากความเป็นเชิงเส้น ถ้าสัญญาณด้านเอาท์พุทที่สัญญาณพลัทซ์มีความเข้มแสงที่ระดับต่ำมาก เป็น A_1 ที่ระดับกระแส I_{p1} และที่สัญญาณพลัทซ์มีความเข้มแสงที่ระดับสูงมากเป็น A_2 ที่ระดับกระแส I_{p2} ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างกระแสพลัทซ์ทั้งสองดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{p1}/I_{p2} \neq I_{po2}/I_{po1} \tag{5}$$

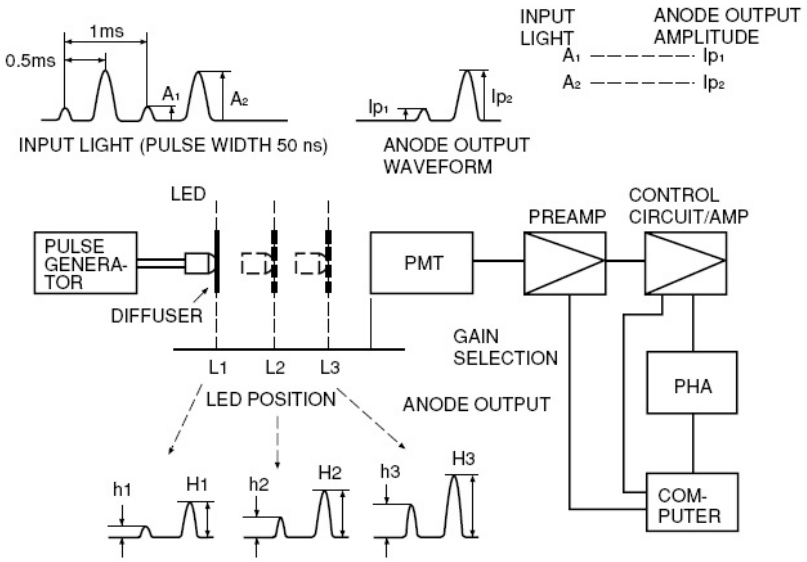
ความเป็นเชิงเส้นสามารถทดสอบโดยการวัดอัตราส่วนระหว่างกระแสทั้งสองของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ซึ่งกระแสทั้งสองนี้ถูกผลิตขึ้นจากสัญญาณพลัทซ์ที่มีความแตกต่างของสองความเข้มแสง คือ I_{p2}/I_{p1} ความเป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณได้ดังความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{(I_{p2}/I_{p1})-(I_{po2}/I_{po1})}{(I_{po2}/I_{po1})}\times 100\% \tag{5}$$

จากการสังเกตุพบว่าการขยายตัวเพิ่มขึ้นของการเบี่ยงเบนออกจากความเป็นเชิงเส้น ของกระแสด้านเอาท์พุทที่ขั้วแอโนด I_{p2} โดยขอบเขตความเป็นเชิงเส้นมีความสัมพันธ์ดังนี้

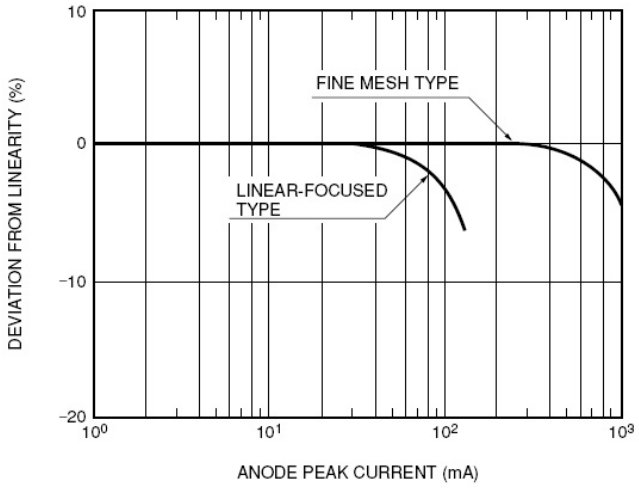
$$(I_{p2}/I_{p1}) = (I_{po2}/I_{po1}) \tag{6}$$

ที่ภายใต้เงื่อนไขดังสมการ (5) จะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 13 แสดงแผนภาพการทดสอบสำหรับการวัดความเป็นเชิงเส้นที่โหมดสัญญาณพลัทซ์ Pulse mode

จากการทดสอบตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นซ้ำ โดยการปรับระยะระหว่างแหล่งกำเนิดแสงของหลอดแอลอีดี LED และหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสด้านเอาท์พุท ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเส้นกราฟความเป็นเชิงเส้นดังในรูปที่ 14

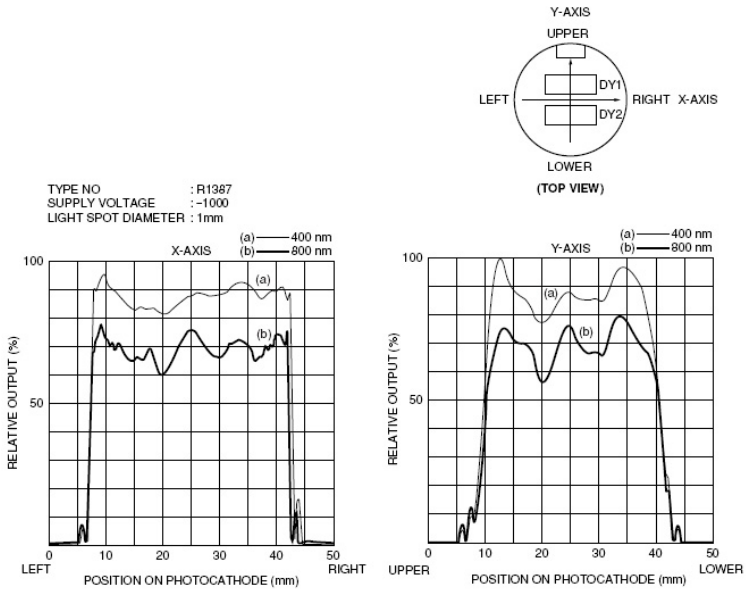


รูปที่ 14 แสดงการเบี่ยงเบนของเอาท์พุทจากความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณพลัทซ์ Pulse กับกระแสด้านแอโนด

การรักษารูปแบบสัญญาณ

การรักษารูปแบบของสัญญาณทราบได้โดยการปรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาท์พุท กับตำแหน่งต่างๆที่แผ่นโฟโตคาโทด การรักษารูปแบบสัญญาณด้านแอโนดที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากด้านโฟโตคาโทดและเกิดการทวีคูณนั้นจะมีการรักษารูปแบบสัญญาณเอาท์พุทให้คงที่

รูปที่ 15 แสดงถึงรูปแบบสัญญาณเอาท์พุทจากการทดสอบที่ขั้วแอโนดที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร และ 800 นาโนเมตร โดยกำหนดให้ลำแสงเป็นจุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยให้ลำแสงนั้นเคลื่อนที่ไปบนผิวหน้าของขั้วแผ่นโฟโตคาโทดตามแนวแกน x และ แกน y

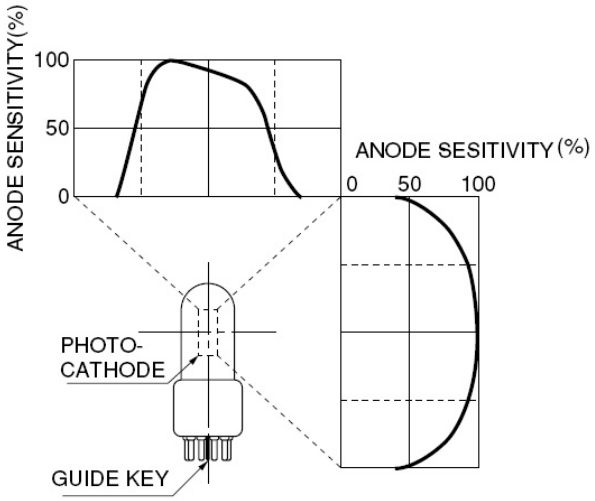


รูปที่ 15 แสดงสัญญาณเอาท์พุทจากการทดสอบที่ขั้วแอโนดที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร และ 800 นาโนเมตร

โดยทั่วไปแล้วรูปสัญญาณเอาท์พุททั้งจากขั้วโฟโตคาโทด และขั้วแอโนดจะมีความแตกต่างกันจากแสงที่ตกกระทบซึ่งที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่าจะมีการแยกออกจากกัน จากผลดังกล่าวนั้นเป็นลักษณะพิเศษของข้อจำกัดความยาวคลื่นยาว(long-

wavelenght) อันเนื่องจากการที่ความไวของการตรวจจับจะใกล้เคียงกับข้อจำกัดความยาวคลื่นยาว ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของวัสดุที่ใช้เคลือบบนขั้วคาโทด และการเพิ่มขึ้นของการกระเพื่อมจากสัญญาณเอาท์พุท ยิ่งไปกว่านั้นการที่แหล่งจ่ายแรงดันมีขนาดลดต่ำลงเมื่อใดจะทำให้ประสิทธิภาพของการสะสมอิเล็กตรอนระหว่างแผ่นไดย์โนดต่างๆ อาจจะลดต่ำลง และการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณจะไม่สม่ำเสมอ

ณ ที่นี้จะใช้หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่รับแสงจากหัวด้านบน (head-on type) พบว่าการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณจะสม่ำเสมอดีกว่าแบบด้านข้าง (side-on type) เนื่องจากการตรวจจับตำแหน่งที่ดี และการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นค่าทีสำคัญของอุปกรณ์จึงได้มีการนำมาประยุกต์ทางด้านการแพทย์เป็นกล้องตรวจจับรังสีแกมมา ดังนั้นหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ถูกใช้ในงานเกี่ยวกับางการแพทย์จึงต้องมีการออกแบบอย่างพิเศษ โดยรูปที่ 16 แสดงถึงสภาพรูปทรงของสัญญาณแบบด้านข้าง ซึ่งมีการทดสอบแบบเดียวกันกับหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบหัวด้านบน โดยมีผลกระทบกับการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณที่โครงสร้างของแผ่นไดย์โนดต่างๆ



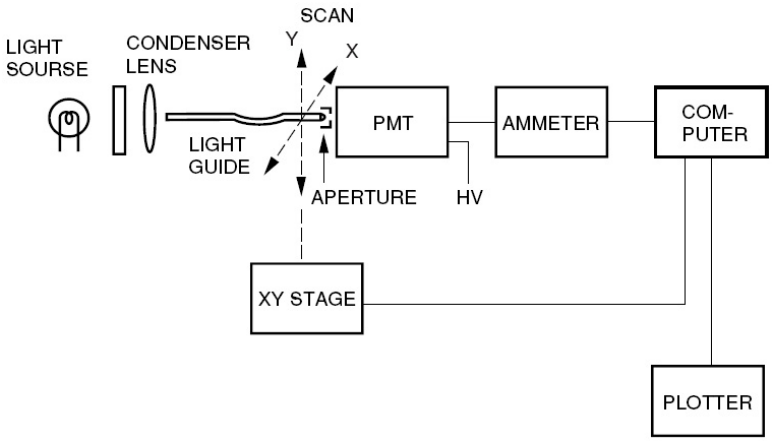
รูปที่ 16 แสดงถึงสภาพรูปทรงของสัญญาณจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบด้านข้าง

จากการพิจารณาหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ถูกใช้จริงพบว่าการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณ สามารถกำหนดการทดสอบได้สองวิธีการด้วยกัน คือ ประการแรกเป็นการวัดทดสอบกับตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบในแต่ละตำแหน่งและอีกประการคือการวัดผลกระทบของมุมที่ตกกระทบ จากขั้นตอนการวัดทดสอบสามารถอธิบายได้ดังคุณลักษณะต่อไปนี้

(1) การรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทาง

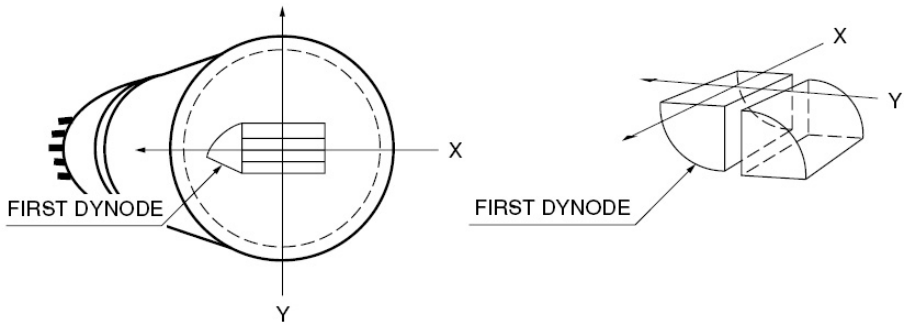
เพื่อการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณ กับระยะทางจะทำการกำหนดให้จุดของแสงมีการเคลื่อนที่ในลักษณะสองมิติบนพื้นผิวของแผ่นโฟโตคาโทด และการเปลี่ยนแปลงในกระแสเอาท์พุท จากรูปที่ 17 แสดงแผนภาพการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทาง

เพื่อความสะดวกต่อการทดสอบจะทำการกำหนดให้แสงมีการเคลื่อนที่ไปบนแผ่นคาโทดตามแนวแกนเอ็กซ์ X-axis และแกน Y-axis ตามแนวของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ดังแสดงในรูปที่ 17 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตำแหน่งการวัดทดสอบระหว่างแกน XY ที่แผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ระดับความสำคัญของการสูญเสียของอิเล็กตรอนที่แผ่นไดย์โนดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรกซึ่งอิเล็กตรอนถูกแสงตกกระทบและหลุดออกจากขั้วคาโทด

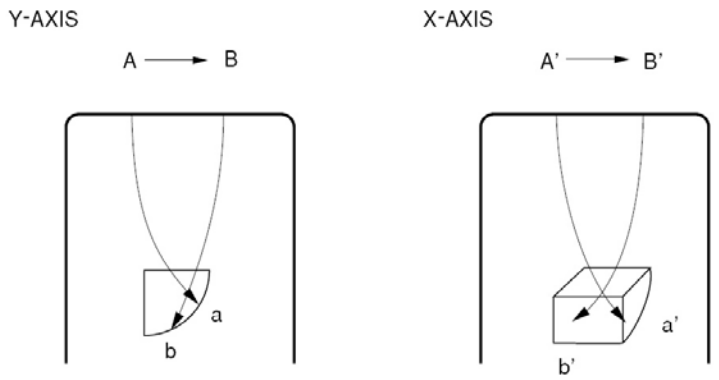


รูปที่ 17 แสดงแผนภาพการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทางจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

ในขณะที่จุดของแสงได้ถูกเคลื่อนที่จากชั้นของโฟโตคาโทด จากนั้นอิเล็กตรอนได้ถูกปลดปล่อยออกมาแล้วเดินทางมาตามแนวแกนเอ็กซ์ x-axis หรือแกนวาย y-axix ของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงแผนภาพการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทางจากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่รับแสงจากหัวด้านบน



รูปที่ 19 แสดงตำแหน่งของการวัดอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกจากโฟโตคาโทด และความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่แผ่นไดย์โนดแผ่นแรก

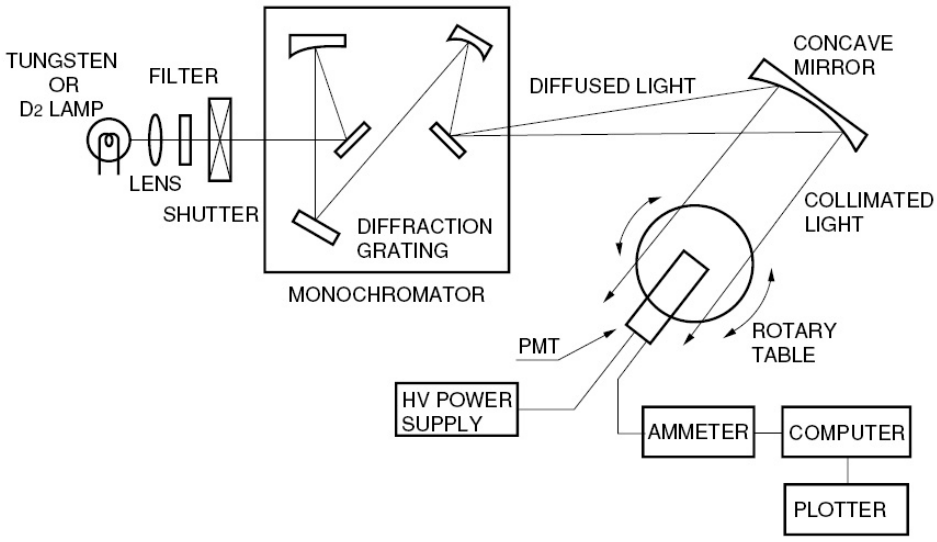
วิธีการนี้เหมาะสำหรับการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทางที่ถูกใช้อย่างมาก เนื่องจากลักษณะการสะสมของอิเล็กตรอนสามารถกระทำได้ในเวลาอันสั้น ในบางกรณีการวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของ

สัญญาณกับระยะทางสามารถทำการทดสอบได้โดยแบ่งพื้นที่ของโฟโตคาดทดออกเป็นส่วนๆ จึงทำให้ความไวการตอบสนองสัญญาณทางแสงแสดงได้เป็นสอง หรือสามมิติ

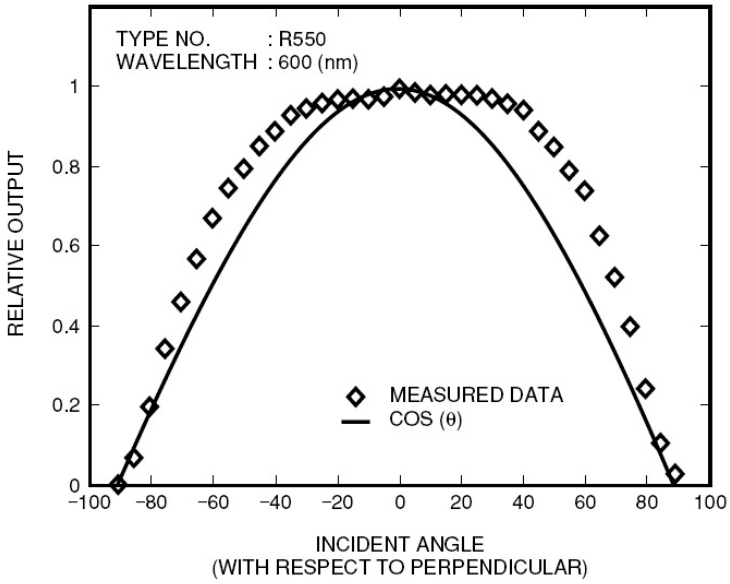
การวัดทดสอบการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณ กับระยะทางของสัญญาณเอาท์พุทด้านแอโนดอยู่ที่ 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์สำหรับหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่รับแสงจากหัวด้านบน ดังนั้นการลดผลกระทบข้างต้นของการรักษาสภาพรูปทรงของสัญญาณกับระยะทางให้ต่ำที่สุด โดยการนำกระจกครอบที่ช่องรับแสงของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

(2) การตอบสนองเชิงมุม Angular response

ความไวหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณบางชนิดขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบที่แผ่นโฟโตคาโทด เรียกว่า “การตอบสนองเชิงมุม” การวัดการตอบสนองเชิงมุม กระทำได้โดยให้แสงตกกระทบยังส่วนของโฟโตคาโทด และทำการวัดกระแสเอาท์พุทในขณะที่หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณมีการหมุนรอบตัวเอง จากโครงสร้างของการทดสอบการตอบสนองเชิงมุมดังในรูปที่ 20 และสัญญาณเอาท์พุทจากข้อมูลของการทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 21 เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดให้โต๊ะทดสอบมีการหมุนเพื่อให้พื้นที่รับแสงนั้นลดลงตามมุมที่เปลี่ยนไป โดยการบันทึกข้อมูลของกระแสเอาท์พุทและมุมที่แสงตกกระทบ จากหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณมีลักษณะคล้ายกับกราฟของโคซายน์ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่ากระแสเอาท์พุทนั้นไม่ขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นเมื่อพิจารณาอย่างทั่วไปพบว่าความไวของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณสามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นโดยให้มุมของแสงที่ตกกระทบมากขึ้น และ กระแสเอาท์พุทที่ทำการเขียนออกมานั้นแสดงถึงความไวที่มีมากกว่ากราฟของโคซายน์ ผลดังกล่าวกิดขึ้นจากแสงที่ส่องผ่านตัดขวางทางเดินของแสงที่มุมตกกระทบมุมกว้าง ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าความไวของการตรวจจับที่เพิ่มสูงขึ้นควรจะใช้กับแสงที่มีความยาวคลื่นมากๆ



รูปที่ 20แสดงโครงสร้างการวัดทดสอบการตอบสนองเชิงมุม



รูปที่ 21 แสดงสัญญาณเอาท์พุทของการทดสอบการตอบสนองเชิงมุม