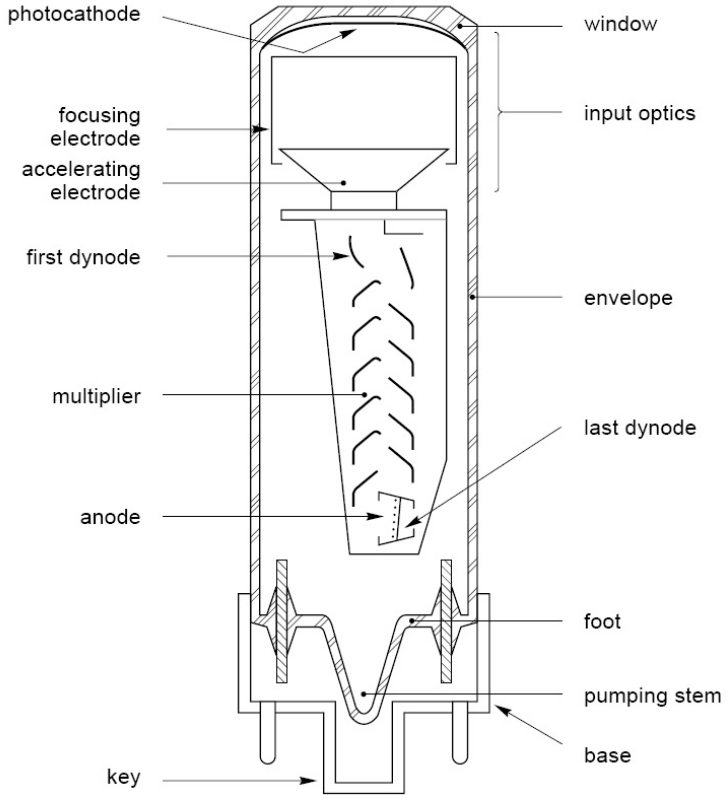
ตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสูญญากาศ Photomultiplier tubes: PMT: (ตอน 2)

ตัวตรวจจับแสงทวีคูณสามารถเปลี่ยนพลังงานของแสงให้เป็นสัญญารทางไฟฟ้า โดยมีการขยายสัญญาณให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยการให้อิเล็กตรอนมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นในลำดับที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นรูปที่แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหัววัดแสงซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- ส่วนของโฟโตคาโทดจะทำการเปลี่ยนความเข้มของแสงเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอน
- เมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกกระต้นจากแสงจะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเข้าสู่ในระบบการตรวจจับ จากนั้นจะทำการปรับโฟกัส และความเร่งของลำอิเล็กตวามเพิ่มขึ้น
- การที่อิเล็กตรอนมีการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณเกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่ส่วนประกอบภายในโครงสร้างของแผ่นไดย์โนดที่มีการเชื่อมต่อกันอยู่หลายชั้นทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนมากขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนก็จะเข้าสู่แผ่นแอโนดที่เป็นส่วนสุดท้าย



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงทวีคูณ

ปรากฏการณ์หลักพื้นฐานสองประการที่บอกถึงกระบวนการทำงานของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ คือ การคายพลังงานหรือการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อแสงตกกระทบ และปลดปล่อยพลังงานในลำดับที่สองต่อไปอย่างต่อเนื่อง การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเกิดจากการที่โฟตอนที่เป็นก้อนพลังงานของแสงตกกระทบลงบนแผ่นคาโทดที่เคลือบสาร โลหะอัลคาไลด์ หรือสารกึ่งตัวนำ ซึ่งพลังงานของโฟตอนต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวัสดุเหล่านั้น โดยอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกจากแผ่นคาโทดก็จะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเข้าสู่แผ่นไดย์โนด ที่มีอยู่เป็นจำนวน n_k โดยที่อัตราการขยายแต่ละแผ่นไดย์

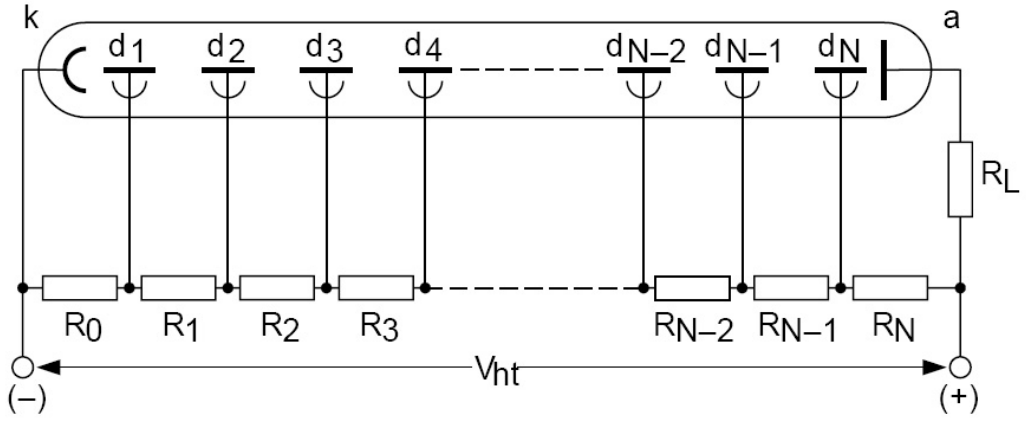
โนดเป็น g_1 ทำให้จำนวนของอิเล็กตรอนในลำดับที่สองเป็น $n_k g_1$ ดังนั้นถ้าแผ่นไดย์โนดในลำดับต่อไปมีอัตราขยายเป็น g_2 ซึ่งเป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเท่ากับ $n_k g_1 g_2$ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในแผ่นไดย์โนดลำดับต่อไปจนเข้าสู่แผ่นแอโนดที่เป็นส่วนสุดท้าย ดังนั้นเมื่อกำหนดให้จำนวนแผ่นไดย์โนดเป็นจำนวน N แล้วจำนวนของอิเล็กตรอนที่มีการสะสมที่แผ่นแอโนจะเป็นดังความสัมพันธ์นี้

$$n_a = n_k \prod_{i=1}^{N} g_i$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าอัตราการขยายแต่ละแผ่นไดย์โนดเท่ากับ 4 โดยการขยายกระแสเป็น M ที่ผลการทวีคูณเป็น 10 เท่า คือ

$$M = \frac{n_a}{n_k} = \prod_{i=1}^{10} g_i = 4^{10} \approx 10^6$$

อิเล็กตรอนที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง และมีการควบคุมโฟกัสด้วยสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นไดย์โนดจำเป็นที่จะต้องได้รับศักดาไฟฟ้าที่แบ่งจ่ายให้แต่ละแผ่นไดย์โนด ด้วยหลักการแบ่งแรงดันที่ได้รับจากแหล่งจ่ายกระแสตรงแรงดันสูงดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายกระแสตรง

1. ขั้วแผ่นโฟโตคาโทด

โดยปกติแล้วทางด้านขั้วคาโทดที่ใช้ในตัวตรวจจับแสงทวีคูณจะทำการเคลือบสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วยโลหะอัลคาไลด์ที่มีค่าเวิรค์ฟังก์ชันต่ำมากที่สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ง่าย ซึ่งมีอยู่ประมาณสิบกว่าชนิด โดยแผ่นโฟโตคาโทดจะมีความสามารถยอมให้มีการผ่านของแสง(การยอมให้แสงผ่านได้บางส่วน) หรือการสะท้อนของแสงที่ลักษณะที่แตกต่างกัน โดยการกำหนดมมตราฐานสำหรับการออกแบบสำหรับการตอบสนองความยาวคลื่นแสง ซึ่งจำแนกจากวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างโฟโตคาโทด และหน้าต่างช่องรับแสง โดยในปัจจุบันวัสดุส่วนประกอบของโฟโตคาโทด และหน้าต่างช่องรับแสงถูกกำหนดให้เป็นค่าของ “S number” ที่เป็นค่าที่ยอมรับกันอาทิเช่น S-1, S-2 อื่นๆ

- ขั้วคาโทดที่ได้รับการเคลือบสารที่ยอมให้แสงผ่านได้บางส่วน ทำการเคลือบสารประกอบยังส่วนด้านในของช่องหน้าต่างเพื่อให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยจากทางด้านตรงกันข้ามที่แสงตกกระทบ แผ่นคาโทดถูกสร้างให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจาก 10 ถึง 100 มิลลิเมตร รวมทั้งช่องหน้าต่างที่รับแสงจะทำการเคลือบสารดังกล่าวด้วยเช่นกันให้มีความนูน หรือ ราบ เพื่อให้แสงเข้าสู่แผ่นคาโทดได้ดีขึ้น
- ขั้วคาโทดที่เคลือบสารสะท้อนของแสง จะทำการเคลือบลงบนส่วนของโลหะด้านในของหลอดสูญญากาศ โดยที่อเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยจากด้านที่รับแสง โดยปกติพื้นที่รับแสงจะมีขนาดจำกัดเพียงหนึ่งตารางเซ็นติเมตร ได้ถูกใช้เป็นส่วนปรับโฟกัสของอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกจากแผ่นคาโทด

การวัดทดสอบ และการคำนวณลักษณะการตอบสนองทางแสง

ตัวตรวจจับทางแสงแบบสูญญากาศ หรือตัวตัวจับสารกึ่งตัวนำ ได้ถูกใช้เป็นมาตราฐานในการทดสอบวัดการตอบสนองความไวของแสง และประสิทธิภาพควันตัม ซึ่งใช้เป็นมาตราฐานการสอบเทียบความละเอียดของการวัด โดยในลำดับแรกสำหรับการทดสอบ จำกำหนดให้แสงตกกระทบที่มีความเข้ม L_p ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการทดสอบ จากนั้นทำการวัดทดสอบตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ตำแหน่งเดียวกันเพื่อการเปรียบเทียบ และทำการวัดกระแสแสง I_k การทดสอบความไวของการเปล่งแสง $S_k(A/W)$ ของตัวตรวจจับแสงทวีคูณสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$S_k = \frac{I_k}{L_p}(\mathrm{A/W}) \qquad [1]$$

ประสิทธิภาพควันตัม คือ η สามารถแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถหาได้จาก S_k จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta(\%) = \frac{h.c}{\lambda e}.S_k = \frac{1240}{\lambda}.S_k.100\% \qquad [2]$$

กำหนดให้

$$h = 6.63\times10^{-34}\ \mathrm{Js}$$
$$c = 3.00\times10^{8}\ \mathrm{ms^{-1}}$$
$$e = 1.6\times10^{-19}\mathrm{C}$$

โดยที่ ค่าของ h คือค่าคงที่ของ Plank's constant

λ คือความยาวคลื่นแสงตกกระทบ (นาโนเมตร)

c คือ ความเร็วของแสงในสูญญากาศ

e คือ ประจุอิเล็กตรอน

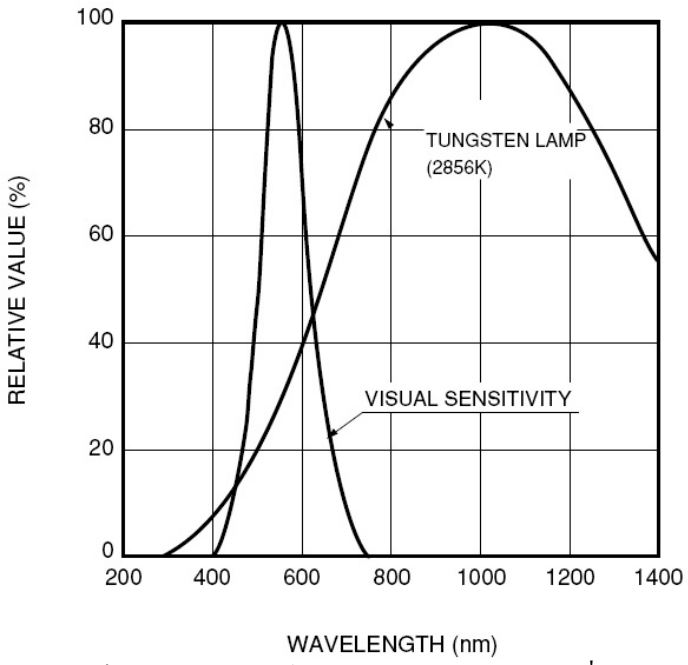
ช่วงความยาวคลื่นของการตอบสนองทางแสง(ช่วงจำกัดความยาวคลื่นสั้น และยาว)

ความยาวช่วงคลื่นจำกัดระหว่างความยาวคลื่นสั้น และยาว เรียกว่าช่วงการตอบสนองความยาวคลื่นแสง โดยที่การตอบสนองของความยาวคลื่นที่ลดต่ำลงทางด้านความยาวคลื่นสั้น เรียกช่วงจำกัดความยาวคลื่นสั้น หรือการคัทออฟ (Cutoff) ส่วนการตอบสนองของความยาวคลื่นที่ลดต่ำลงทางด้านความยาวคลื่นยาว เรียก ช่วงจำกัดความยาวคลื่นยาว โดยช่วงจำกัดความยาวคลื่นสั้นหาได้โดยวัสดุที่ใช้ทำช่องหน้าต่างรับแสง และ ช่วงจำกัดความยาวคลื่นยาวขึ้นกับวัสดุที่เคลือบบนผิวขั้ว

คาโทดซึ่งความไวของการตรวจจับจะลดลง 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับความไวสูงสุดจากวัสดุไบอัลคาไลด์และ Ag-O-Cs ที่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของความไวสูงสุดของวัสดุประเภทมัลติอัลาไลด์ที่เคลือบลงบนขั้วคาโทด ที่ช่วงจำกัดความยาวคลื่นสั้นกำหนดจากความยาวคลื่นที่แสงตกกระทบแล้วถูกดูดกลืนโดยวัสดุที่ใช้ทำช่องรับแสง อย่างไรก็ตามความยาวคลื่นจำกัดจะขึ้นกับเงื่อนไขของการทำงานเมื่อมีความยาวคลื่นแสงหลายความยาวคลื่นตกกระทบ รวมถึงความไวของโฟโตคาโทด กระแสมืด และอัตราการตอบสนองของ สัญญาณ กับสัญญาณรบกวน ของระบบการวัดทดสอบ

ความไวของการส่องสว่าง

การทดสอบการตอบสนองความเข้มแสงของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ จะใช้ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน และเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในการประเมินหาความไวของตัวตรวจจับแสงทวีคูณจะพิจารณา จากความไวการส่องสว่างที่พื้นผิวที่ระยะทางหนึ่งเมตรจากแหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเป็น 1 แคนเดลลา (cd) หรือ 1 ลักซ์ (Lux) ซึ่งหนึ่งลูเมนส์ มีค่าเท่ากับฟลักซ์ความสว่างที่ หนึ่งลักซ์ที่แสงตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร ความไวของการส่องสว่างจะถูกแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าจากขั้วคาโทด หรือแอโนด จากการพิจารณาจากฟลักซ์ความสว่างจากแสงที่เกิดจากหลอดทังเสตนที่มีอุณหภูมิ 2856 เคลวิน (K) ในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวกรองแสงประกอบอยู่ระหว่างตัวตรวจจับแสงทวีคูณ และ แหล่งกำเนิดแสง โดยส่วนใหญ่แล้วไม่จำเป็นต้องใช้ จากรูปที่ 3 แสดงถึงความไวของการมองเห็นจากสายตามนุษย์ และขนาดการตอบสนองความเข้มที่ความยาวคลื่นต่างๆแสงจากหลอดใส้ทังเสตนที่อุณหภูมิ 2856 เคลวิน (K)

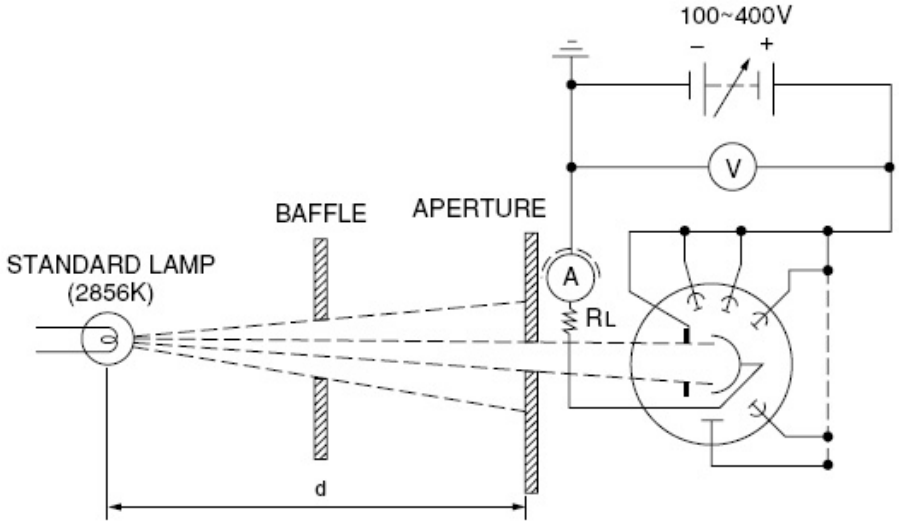


รูปที่ 3 แสดงการตอบสนองการมองเห็นจากสายตามนุษย์ และการตอบสนองความเข้มที่ความยาวคลื่นต่างๆแสงจากหลอดใส้ทังเสตนที่อุณหภูมิ 2856 เคลวิน (K)

ความไวการส่องสว่างจำแนกได้จาก 2 ปัจจัย คือ ความไวของการส่องสว่างขั้วคาโทด ซึ่งถูกกำหนดจากประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตคาโทด และความไวการส่องสว่างขั้วแอโนด ถูกกำหนดจากลักษณะประสิทธิภาพการทำงานภายหลังการทวีคูณซึ่งอธิบายได้ดังนี้

(1) ความไวของการส่องสว่างขั้วคาโทด

ความไวของการส่องสว่างขั้วคาโทด ถูกกำหนดจากกระแสที่ถูกกระตุ้นจากแสงที่ตกกระทบที่ขั้วคาโทดต่อฟลักซ์ความสว่าง จากหลอดใส้ทังเสตน ที่มีอุณหภูมิ 2856 เคลวิน(K) ในการวัดทดสอบจะต้องกำหนดให้แผ่นไดย์โนดทุกแผ่นนั้นมีศักย์ดาแรงดันเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นเองตัวตรวจจับแสงทวีคูณนี้ จะมีการทำงานเหมือนกับหลอดสูญญากาศสองขั้ว



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการวัดความไวที่ขั้วคาโทดของการส่องสว่างของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

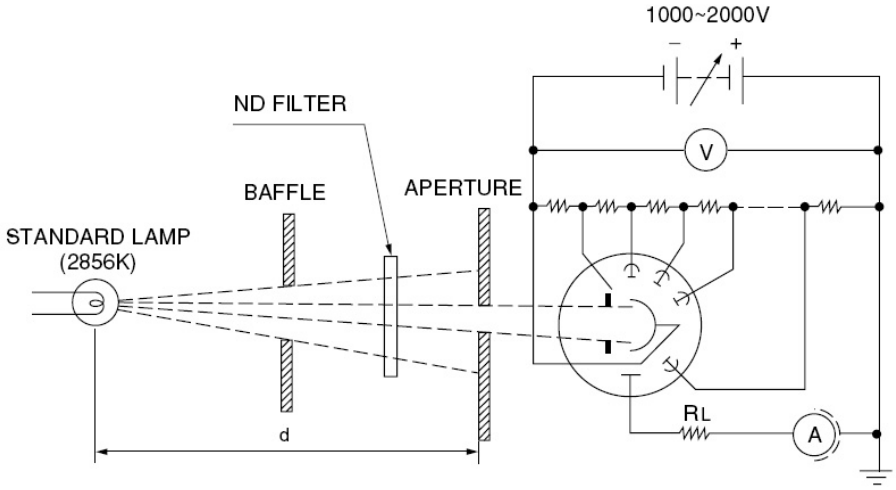
ฟลักซ์ความสว่งของแสงที่ตกกระทบถูกใช้เพื่อทำการวัดทดสอบในช่วง 10^{-5} ถึง 10^{-2} ลูเมนส์ ถ้าฟลักซ์ความสว่างมากเกินไปการวัดทดสอบนี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากสภาพความต้านทานที่ผิวขอโฟโตคาโทด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกฟลักซ์ความสว่างที่เหมาะสมขึ้นกับขนาดพื้นที่ของขั้วโฟโตคาโท และวัสดุที่เคลือบ
การวัดกระแสแสงจะใช้แอมมิเตอร์ขนาดพิโคแอมป์ โดยจะทำการปรับย่านการวัดหลายระดับจากย่านนาโนแอมป์(nA) จนถึงไมโครแอมป์(μA) ในการวัดทดสอบนี้จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงกระแสรั่วไหล และสัญญาณรบกวนที่กระทำกับระบบ อีกทั้งต้องระวังสิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับส่วนของซ็อกเกต์ของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ หรือ ขั้วของหลอดไฟ และต้องระวังเรื่องของความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในระดับต่ำๆเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อระบบกระแสไฟฟ้า

โดยปกติตัวตรวจจับแสงทวีคูณต้องการแหล่งจ่ายแรงดันที่ก่อให้เกิดกระแสคาโทดที่อยู่ในระดับกระแสอิ่มตัว ซึ่งให้แรงดันไบแอสในช่วง 90 จนถึง 400 โวลท์ ลักษณะของกระแสอิ่มตัวนี้จำเป็นที่จะต้องมีความเป็นเชิงเส้น และแอมป์มิเตอร์ที่ต่อเข้ากับระบบการวัดนั้นจะทำการต่ออนุกรมระหว่างขั้วคาโทด กับภาระความต้านทาน R_L ที่มีค่า 100kΩ จนถึง 1MΩ เพื่อเป็นการจำกัดกระแสป้องกันวงจรไม่ให้เกิดความเสียหาย

(2) ความไวของการส่องสว่างขั้วแอโนด

ความไวของการส่องสว่างขั้วแอโนดถูกกำหนดจากกระแสเอาท์พุทต่อฟลักซ์ความสว่างที่ตกกระทบลงบนแผ่นโฟโตคาโทด ในการทดสอบนี้จะทำการให้แรงดันกับทุกๆขั้วไฟฟ้าดังนรูปที่ 5 โดยการใช้หลอดใส้ทังเสตนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เช่นเดียวกันกับที่ใช้วัดความไวของการส่องสว่างขั้วคาโทด โดยฟลักซ์ของแสงนี้จะให้ลดลงมาอยู่ที่ระดับ 10^{-10} ถึง 10^{-5} ลูเมนส์ โดยควบคุมจากตัวกรองความเข้มแสง ส่วนแอมป์มิเตอร์นั้นจะทำการต่ออนุกรมระหว่างขั้วแอโนดกับ

ความต้านทาน ตัวต้านทานที่ใช้ในการแบ่งแรงดันที่ถูกใช้ในการทดสอบจะต้องมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ

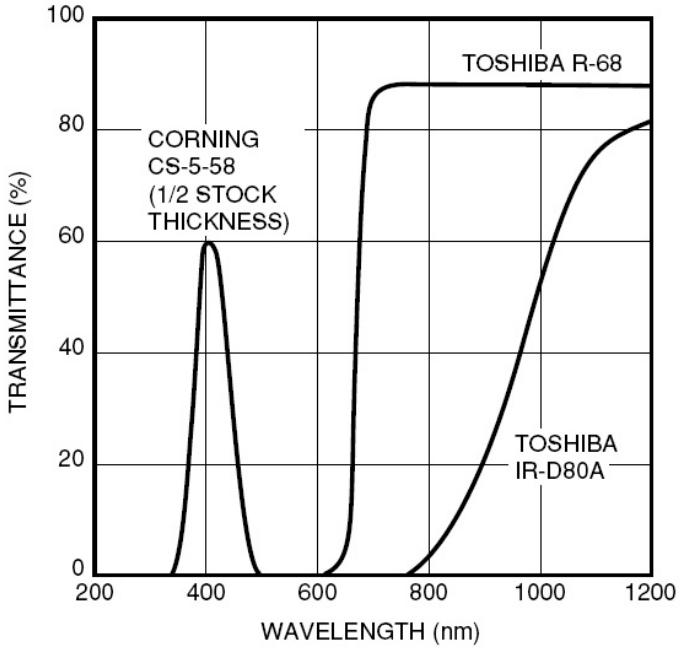


รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการวัดความไวที่ขั้วแอโนดของการส่องสว่างของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

(3) อัตราส่วนดัชนีความไวการตอบสนองของแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดง ต่อแสงขาว

ค่าอัตราส่วนนี้ถูกใช้เพื่อการเปรียบเทียบการตอบสนองของแสงในแต่ละความยาวคลื่นของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ในการพิจารณาความไวการตอบสนองของแสงสีน้ำเงินจะใช้แผ่นกรองแสงติดตั้งอยู่ด้านหน้าของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ที่ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบวัดความไวของการส่องสว่างแผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน จะใช้ก้อนสารซีเซียมที่สามารถให้แสงสีน้ำเงินเป็นฟลักซ์ความหนาแน่นของแสงที่เข้าสู่ช่องรับแสง แต่แสงที่เข้าตัวหัววัดนี้จะไม่ทำการแปลงให้เป็นลูเมนส์โดยตรง ดังนั้นดัชนีความไวการตอบสนองของแสงสีน้ำเงินจะไม่มีหน่วยชีวัด การตอบสนองของแสงในแต่ละความยาวช่วงคลื่นที่ส่องผ่านแผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการทดสอบการคายพลังงานของการเปล่งแสงของสารประกอบโซเดียมไอโอไดย์ NaI ที่มีความยาวคลื่นท 420 นาโนเมตร การใช้สารประกอบประเภทนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อใช้นับจำนวนการตกกระทบของโฟตอน หรือรังสี ความไวของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ในการตรวจจับการสว่างวาบเนื่องจากแสงที่ตกกระทบลงบนสารประกอบนี้จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับความไวที่ขั้วแอโนด จากการใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน

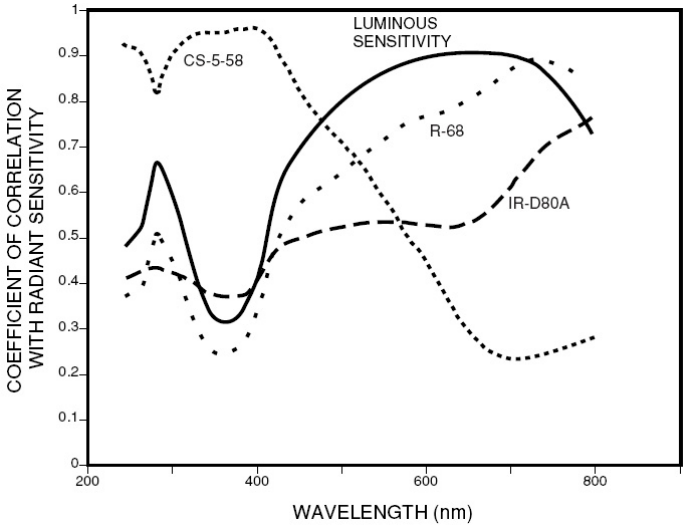
อัตราส่วนดัชนีความไวการตอบสนองของแสงสีแดงที่ถูกใช้กับตัวตรวจจับแสงทวีคูณ เพื่อใช้ในการขยายย่านการตอบสนองความยาวคลื่นแสงให้ใกล้กับย่านอินฟาเรด ปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งที่กำหนดสัดส่วนการวัดทดสอบความไวการส่องสว่างที่ขั้วคาโทด ดังนั้นการกรองความยาวคลื่นแสงในช่วงอินฟาเรด และใกล้อินฟาเรด โดยมีข้อกำหนดเดียวกันกับการทดสอบหาความไวการส่องสว่างที่ขั้วคาโทดขณะที่มีการกรองและไม่มีการกรองแสง โดยปกติแล้วตัวกรองแสงที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นรุ่นของ Toshiba IR-D80A กหับสารประกอบ Ag-O-Cs ที่เคลือบอยู่กับแผ่นโฟโตคาโทด หรืออาจจะใช้ รุ่น R-68 สำหรับสารชนิดอื่นที่เคลือบบนแผ่นโฟโตคาโทด ในกรณีที่โฟโตคาโทดที่ใช้สารชนิดอื่นจะมีการใช้ตัวกรองแสงที่มีการปรับสัดส่วนในช่วงความยาวคลื่นจากแสงสีแดงถึงสีขาว รูปที่ 6 แสดงขนาดของแสงที่ส่องผ่านจากตัวกรองแสง



รูปที่ 6 แสดงขนาดของแสงที่ส่องผ่านจากตัวกรองแสง

ความไวของการส่องสว่างและการตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่น

เพื่อการจำกัดขอบเขตให้มีความสัมพันธ์กันระหว่างความไวการส่องสว่าง และ การตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่นที่ในช่วงที่พิจารณษเป็นพิเศษ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 ถึงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความสว่าง ดัชนีความไวต่อแสงสีน้ำเงิน ด้วยการใช้ตัวกรองรุ่นCs-5-58 และอัตราส่วนแสงสีแดงต่อแสงขาว ที่ใช้ตัวกรองรุ่น R-68,IR-D80A โดยมีความยาวคลื่นเป็นเงื่อนไขในการทดสอบ



รูปที่ 7 ถึงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองความสว่าง และความไวการเปล่งรังสี

เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวจะพบว่าความไวการเปล่งรังสีของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ มีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีความไวต่อแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 450 นาโนเมตร กับความไวการส่องสว่างที่ 700 ถึง 800 นาโนเมตร กับอัตราส่วนแสงสีแดงถึงแสงขาวโดยการใช้ตัวแผ่นกรองแสงของ Toshiba รุ่น R-68 อยู่ที่ความยาวคลื่น 700- 800 นาโนเมตร ในกรณีอัตราส่วน

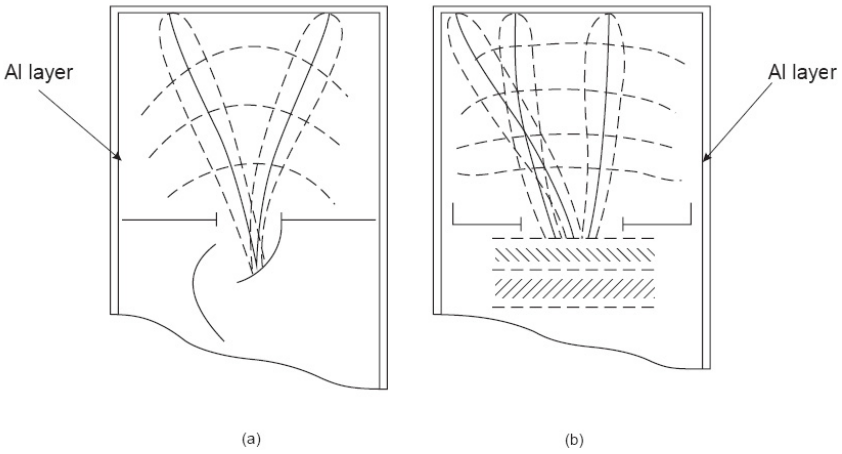
แสงสีแดงถึงแสงขาวการใช้ตัวแผ่นกรองแสงของ Toshiba รุ่น R-D80A อยู่ที่ความยาวคลื่น 800 นาโนเมตร หรือมากกว่า จากค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าความไวที่เหมาะสมของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ต้องเป็นความยาวคลื่นที่ง่ายต่อการเลือกใช้ได้เหมาะสมมากกว่าการวัดการตอบสนองของความยาวคลื่นแสง

ระบบการตรวจวัดสัญญาณทางแสงกับการกำเนิดอิเล็กตรอน

ในระบบการวัดสัญญาณทางแสงกับการกำเนิดอิเล็กตรอน จะมุ่งเน้นไปที่การเกิดขึ้นของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากแสงที่ตกกระทบ ไปยังพื้นที่ของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตรงส่วนของแผ่นโฟโตคาโทดที่เกิดการขุ่นมัวที่ตำแหน่งหนึ่งภายในโครงสร้างของขั้วไฟฟ้า และ ส่วนของระบบการรับสัญญาณอินพุท ถ้าสารที่เคลือบบนช่องทางเข้าของแสงยอมให้แสงผ่านได้บางส่วน และมีขนาดใหญ่เพียงพอแล้วจะทำให้ระบบการวัดนี้มีความเหมาะสม สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการออกแบบให้มีการโฟกัสอย่างพิเศษ โดยระบบการวัดสัญญาณอินพุทต้องมีปัจจัยด้วยกันสองประการ คือ

(1) ระบบการรับสัญญาณอินพุทจะต้องสามารถปรับโฟกัสให้อิเล็กตรอนจากแผ่นโฟโตคาโทดที่เกิดขึ้นมา พุ่งตรงไปยังแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก โดยไม่ต้องพิจารณาความเร็วเริ่มต้นในขณะนั้น ซึ่งอัตราส่วนของจำนวนอิเล็กตรอนที่เดินทางมาถึงพื้นที่ของแผ่นไดย์โนดและจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วคาโทดเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ประสิทธิภาพการสะสม ที่มีการเปลี่ยนแปลงกัความยาวคลื่น

(2) เวลาของการส่งผ่าน transit time ของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วแผ่นคาโทด และแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก พบว่าความเร็วเริ่มต้นและจุดกำเนิดของอิเล็กตรอนจะเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน สิ่งที่สำคัญยิ่งของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่มีระบบการรับสัญญาณอินพุทที่ค่อนข้างซับซ้อนทำให้มีการตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 8 แสดงส่วนของภาครับแสงกับอิเล็กตรอนของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ (a) ส่วนของการปรับโฟกัสด้วยแผ่นไดย์โนด (b) แผ่นไดย์โนดแบบม่าน แสดงถึงเส้นแรงของสนามไฟฟ้าและแนววิถีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

เมื่อพิจารณาส่วนของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณตามรูปที่ 8 ความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนในขณะนั้นได้ขยายตัวออกเพิ่มขึ้น โดยมีอิเล็กตรอนบางส่วนได้ตกลงนส่วนของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ซึ่งความเร็วของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากขั้วคาโทดได้แผ่ขยายเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจาก 2 ปัจจัยด้วยกันที่ช่วยให้ประสิทธิภาพของการเก็บสะสะมอิเล็กตรอนคือ การปรับโฟกัสอิเล็กตรอนจากแสง และขนาดพื้นที่ของแผ่นไดย์โนดแผ่นแรกต้องมีขนาดใหญ่ โดยการออกแบบให้มีช่องว่างภายใน

เพื่อใช้แผ่นขั้วไฟฟ้าทำการปรับโฟกัสให้มีการปรับเข้าสู่ตรงกลางทีละน้อย ต่อจากนั้นก็จะแยกตัวออกสู่แผ่นขั้วไดย์โนดในลำดับต่อไป

การตอบสนองอย่างรวดเร็วของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณ

การตอบสนองที่รวดเร็วของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ จำเป็นที่จะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของช่วงเวลาของการส่งผ่าน transit time จากขั้วคาโทด กับแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก โดยการกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสองนั้นต่ำมาก การปรับเปลี่ยนค่าของช่วงเวลาของการส่งผ่าน มีอยู่ด้วยกัน 2 องค์ประกอบ

(1) องค์ประกอบโครมาติก เป็นผลอันเนื่องจากความเร็วเริ่มต้นที่แผ่ขยายออกจากจุดกำเนิดอิเล็กตรอนยังตำแหน่งเดิม ซึ่งเวกตอร์ของความเร็วเริ่มต้นสามารถกำหนดเป็นความเร็ว v_n ที่ส่วนของแผ่น คาโทด ที่สัมพันธ์กับระดับพลังงาน E_n และความเร็ว V_t ตามเส้นสัมผัสที่สัมพันธ์กับระดับพลังงาน E_t เมื่อเปรียบเทียบด้วยเวลาของการส่งผ่าน ของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งมีความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ในขณะเดียวกันเวลาของการส่งผ่าน ก็จะลดต่ำลงอันเนื่องจากองค์ประกอบของความเร็วเริ่มต้น คือ

$$\Delta t_n = \frac{1}{\varepsilon e}\sqrt{2m_e \Delta E_n} \qquad [3]$$

โดยที่ ε คือความแรงของสนามไฟฟ้าที่ผิวของแผ่นขั้วคาโทด

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

m_e มวลของอิเล็กตรอน

องค์ประกอบแนวเส้นสัมผัสของความเร็วจะส่งผลให้เวลาของการส่งผ่าน มีการแกว่งไปมาเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาของการส่งผ่านของอิเล็กตรอน ที่ปลดปล่อยออกมาจะมีความเร็วเริ่มต้นที่เป็นศูนย์ กระนั้นเมื่อเวลาของการส่งผ่านเพิ่มขึ้นอันเนื่องจากองค์ประกอบของความเร็วเริ่มต้นนี้คือ

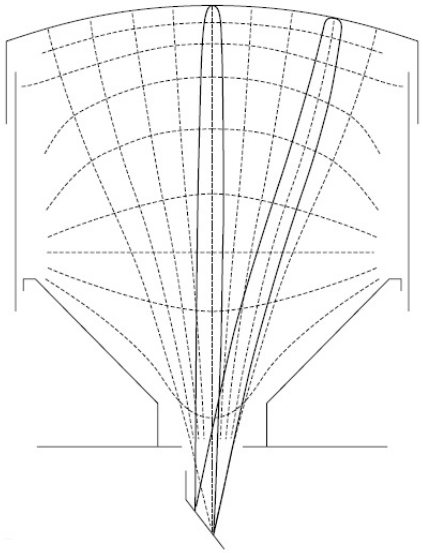
$$\Delta t_t \approx \frac{r}{v} \qquad [4]$$

โดยที่ r เป็นรัศมีของอิเล็กตรอนที่กระจายออกมา และ v เป็นความเร็วที่ตกกระทบลงบนแผนไดย์โนดแผนแรก

(2) องค์ประกอบทางด้านเรขาคณิต เป็นผลอันเนื่องจากความแตกต่างของเวลาของการส่งผ่านระหว่างแนวทางเดินแรกของระยะทางที่แตกต่างกันจากตำแหน่งที่ต่างกันบนแผ่นคาโทด ปัจจัยต่างๆเหล่านี้รวมถึงสนามไฟฟ้าที่มีความแรงแตกต่างกันในแนวตามขวางภายในช่องว่างของหัววัดโดยอิเล็กตรอน ความแตกต่างของเวลาของการส่งผ่านจากอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยที่มีความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ และสนามไฟฟ้า ε ที่ผ่านเข้าสู่แนวเส้นทางตามระยะ L และ $L + \Delta L$ คือ

$$\Delta t = \Delta L\sqrt{\frac{m_e}{2e\varepsilon L}} \qquad [5]$$

เมื่อพิจารณาจาก สมการที่ 3 และ 5 เวลาการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านสามารถลดต่ำลงได้โดย การเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้าที่ผิวของขั้วคาโทด และความแตกต่างที่น้อยที่สุดระหว่างแนวระยะทางเดินของอิเล็กตรอนในช่องว่างของแผ่นขั้วคาโทด กับแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ในการตอบสนองอย่างรวดเร็วของตัวตรวจจับแสงทวีคูณสามารถกระทำได้โดยใช้ แผ่นคาโทดที่ลักษณะเว้าเข้าด้านใน และมีการเพิ่มแผ่นขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการปรับโฟกัสของลำอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 9

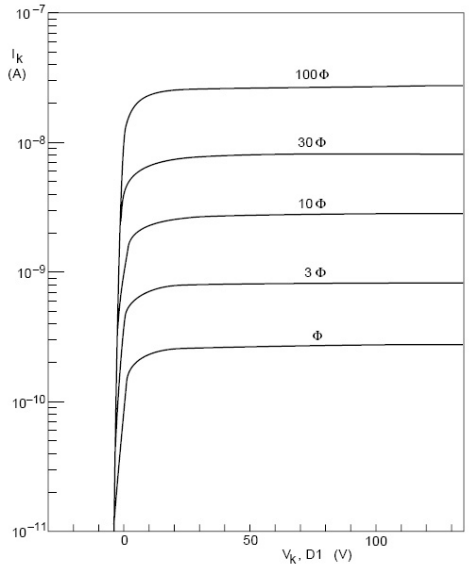


รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างของส่วนอินพุทของตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว

กระแสอิ่มตัวด้านคาโทด

รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างกระแสแงที่เปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่จ่ายให้ระหว่างขั้วคาโทด กับ แผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ที่ภายใต้ฟลักซ์ความเข้มแสงค่าต่างๆ เนื่องจากความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่แสงตกกระทบโดยปกติแล้วจะไม่เป็นศูนย์ โดยอิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกเก็บสะสมที่แผ่นไดย์โนดแผ่นแรก เมื่อเปรียบเทียบกับผลต่างของศักย์ดาแรงดันระหว่างแผ่นคาโทดและแผ่นไดย์โนดแผ่นแรกนี้เป็นศูนย์ ในกรณีที่จะหยุดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถกระทำได้โดยกำหนดให้แผ่นไดย์โนดแผ่นแรกนั้นมีแรงดันด้านลบเมื่อเทียบกับด้านคาโทด แรงดันที่ก่อให้เกิดกระแสแสงนี้จะเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นแรงดัน cut-off voltage ผลของกระแสแสงนี้ยังขึ้นกับความยาวคลื่น วัสดุที่ใช้เคลือบลงบนผ่นคาโทด และ การออกแบบระบบการรับสัญญาณอินพุท

ดังนั้นที่แผ่นไดย์โนดแผ่นแรกเมื่อให้แรงดันด้านบวกกับแรงดันด้านลบที่ขั้วคาโทด กระแสแสงก็จะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าที่อิ่มตัว Saturation value ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการอิมตัวจะต้องขึ้นกับองค์ประกอบโครงสร้างของขั้วคาโทด และโครงสร้างการแปรเปลี่ยนในความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนเมื่อแสงตกกระทบ รวมถึงลักษณะการวางตัวเพื่อให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอน การเกิดกระแสอิ่มตัว จะมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของตัวตรวจจับแสงทวีคูณ ซึ่งเป็นแรงดันเพียงเล็กน้อยจนถึงแรงดันที่มากเกินกว่าสิบเท่า กระแสอิ่มตัวนี้เป็นสัดส่วนกับฟลักซ์ความเข้มของแสงที่ตกกระทบดังแสดงในรูปที่ 10

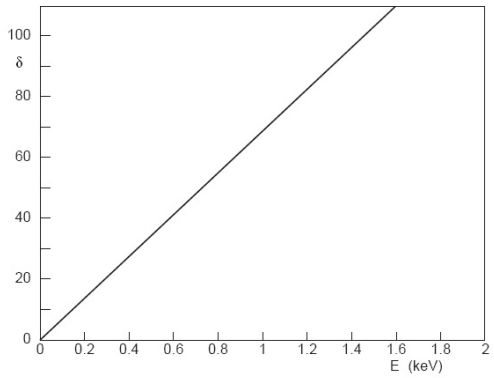


รูปที่ 10 กระแสแสง ที่แปรเปลี่ยนระหว่างแผ่นคาโทดกับแผ่นไดย์โนดแผ่นแรก ภายใต้ความเข้มแสงที่ตกกระทบที่ระดับต่างๆ

ตัวตรวจจับแสงทวีคูณชนิดพิเศษ

(1) หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่แผ่นไดย์โนดมีการเคลือบสาร แกลเลียมฟอสไฟด์ GaP(Cs)

ในส่วนของแผ่นไดย์โนดที่เคลือบสารแกลเลียมฟอสไฟด์ GaP(Cs) จะช่วยให้สัมประสิทธิการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในลำดับที่สองเกิดขึ้นอย่างมาก อีกทั้งยังทำให้ลดการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายกระแส และทำให้การปรับระดับพลังงานที่ให้กับหัววัดมีความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่แสงแบบพลัทซ์ได้ทำให้มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยจากแผ่นขั้วคาโทด ดังนั้นความเป็นไปได้ในการแยกความแตกต่างระหว่างแสงแบบพลัทซ์ ที่ทำให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาเนื่องจากแสงในลำดับที่ 1,2,3,4 หรือ 5 ด้วยแผ่นไดย์โนดแผ่นแรกที่เคลือบสาร แกลเลียมฟอสไฟด์ GaP(Cs) จากลักษณะการตอบสนองทางเวลาที่ได้รับการปรับปรุง สามารถกระทำจากลักษณะการเกิดการทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอน จะเป็นไปตามการเกิดแบบสุ่มซึ่งต้องในหลักทางสถิติมาวิเคราะห์ และการลดจำนวนของแผ่นไดย์โนดก็สามารถกระทำได้เช่นเดียวกัน



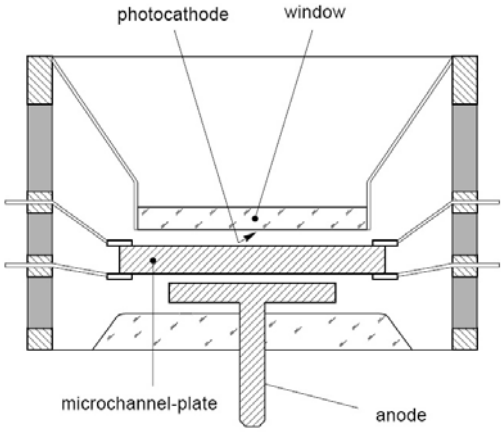
รูปที่ 11 แสดงสัมประสิทธิการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในลำดับที่สองจากแผ่นไดย์โนดที่เคลือบสารแกลเลียมฟอสไฟด์ GaP(Cs) ซึ่งขึ้นกับพังงานของแสงท่ตกกระทบในลำดับแรก กับพลังงานของอิเล็กตรอน (δ :สัมประสิทธิการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในลำดับที่สอง)

(2) หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบตัดขวางสนามไฟฟ้า

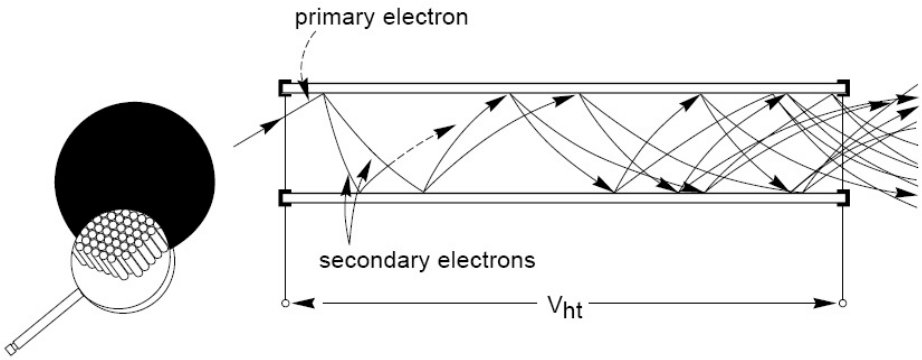
ภายในหลอดหัววัดที่ออกแบบให้มีการตัดขวางสนามไฟฟ้า จะเป็นผลให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ตามแนวทางเดินจากขั้วคาโทดตรงไปยังขั้วแอโนด โดยการตัดขวางกับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ด้วยการเตรียมสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มีความหนาแน่นมีรูปแบบเดียวกัน และอิเล็กตรอนมีเวลาของการส่งผ่านต่ำ พร้อมกับการกวัดแกว่งเกิดขึ้นน้อย ที่ทุกๆ ขั้นตอนที่อิเล็กผ่านแผ่นไดย์โนด โดยปกติแล้วหัววัดรัสีจะมี คาบเวลาเป็นสัญญาณพลัทซ์ในช่วงขอบขาขึ้นที่ต่ำกว่า 0.5 นาโนวินาที(ns)

(3) หัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plate

การศึกษาการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในลำดับที่สองที่เป็นคุณสมบัติของกระจกที่เคลือบสารตะกั่ว เป็นการทำให้เกิดการทวีคูณของอิเล็กตรอน ที่ระหว่างแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plate สองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 12 เป็นตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก ประกอบด้วยตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็กที่อิเล็กตรอนมีการทวีคูณโดยการทำให้การโฟกัสลำอิเล็กตรอนตรงขั้วคาโทดที่ด้านหนึ่ง ขั้วแอโนดอีกด้านหนึ่ง แผ่นตะแกรงขนาดเล็กจะถูกออกแบบให้เรียงตัวเข้าหากันลักษณะขนานกันกับหลอดหัววัดซึ่งแต่ละช่องจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6-25 ไมโครเมตร สำหรับรูปที่ 13 แสดงถึงการทวีคูณของอิเล็กตรอนภายในตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็กหนึ่งช่อง โดยการพิจารณาจาก อิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่วิ่งเข้าสู่ภายในช่องดังกล่าวแล้วก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณมากมายถึง 10^8 เท่า ผลดังกล่าวนี้ยังต้องขึ้นกับแรงดันไบแอสที่ให้กับหลอดหัววัด และอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยปกติแล้วพบว่าข้อจำกัดการทำงานร่วมกันระหว่างตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็กจะมีอัตราขยายกระแสที่ระดับ 10^4 เท่า แต่ถ้าต้องการให้มีอัตราการขยายกระแสสูงกว่านี้ต้องออกแบบการจัดเรียงท่อตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plate ให้ต่อเรียงลำดับกัน

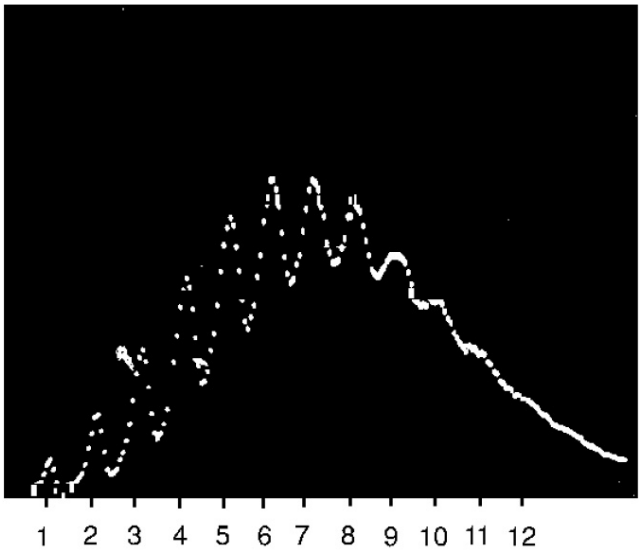


รูปที่ 12 แสดงภาพตัดขวางของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plate



รูปที่ 13 แสดงการทวีคูณของอิเล็กตรอนภายในช่องท่อโลหะตะแกรงขนาดเล็ก Microchannel plateหนึ่งช่อง

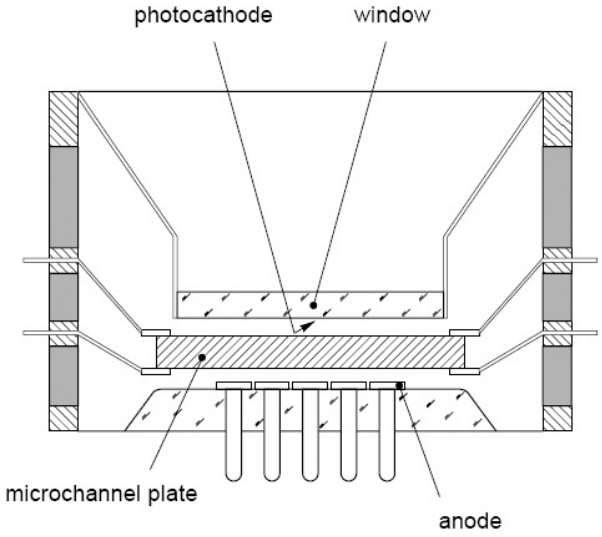
เมื่อพิจารณาถึงอิเล็กตรอนที่อยู่ในรูปแบบของพลัทซ์ที่เริ่มเข้าสู่ภายในช่องท่อโลหะ ก็จะมีการเพิ่มทวีจำนวนจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำผลดังกล่าวมาใช้ในการกำหนดการทำงานในสภาวะอิ่มตัว เพื่อลดการกวักแกว่งของอัตราการขยายกระแสที่มากเกิน ในขณะที่มีการตรวจจับประมาณพลัทซ์กระแสที่มีขนาดต่ำๆ จากรูปที่ 14 แสดงถึงขนาดความสูงของการกระจายสัญญาณพลัทซ์ ในขณะที่จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงตกกระทบมีจำนวนน้อยมากๆ



รูปที่ 14 ลักษณะการกระจายของการคายประจุต่อหนึ่งพลัทซ์ของหัววัดตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็กภายใต้สภาวะอิ่มตัว : แกนตั้งแสดงถึงจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณพลัทซ์ แกนนอนแสดงถึง จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดจากแสงต่อหนึ่งพลัทซ์

ประโยชน์ที่ได้จากตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plat

- การตอบสนองที่รวดเร็ว เนื่องจากการที่การเดินทางของอิเล็กตรอนนั้นสั้นเพียง 1-2 มิลลิเมตร และมีสนามไฟฟ้าที่สูง ในระดับ $1-20\,\mathrm{kV/cm}$ เวลาของการส่งผ่านค่อนข้างสั้นมาก และการกวัดแกว่งก็ยังต่ำ ซึ่งความแตกต่างระหว่างจุดกำเนิดที่ก่อให้เกิดเวลาการส่งผ่านไม่ต้องถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นการตอบสนองช่วงเวลาของพลัทซ์ค่อนข้างสั้นมากโดยมีค่าของ $FWHM \approx 0.2ns$ และความละเอียดทางเวลา $\delta_t (< 100\,ps)$ ที่ให้ผลที่ดีกว่าตัวตรวจจับแสงทวีคูณที่ออกแบบในลักษณะเพิ่มจำนวนแผ่นไดย์โนด
- ไม่มีการตอบสนองกับสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการที่ระยะทางการเดินทางของอิเล็กตรอนนั้นสั้นมาก สนามไฟฟ้าจึงมีการควบคุมภายในท่อโลหะ ดังนั้นแนวการเดินทางของอิเล็กตรอนจึงไม่มีผลกับสนามแม่เหล็กจนถึงระดับ 0.1 เทสลา(T)
- ความละเอียดของระยะทาง ในโครงสร้างที่คล้ายรังผึ้งของแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plate สามารถทำการแปลงแสงที่ตกกระทบยังขั้วคาโทดเปลี่ยนไปเป็นอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนดได้โดยง่ายด้วยการปรับโฟกัส การปรับความละเอียดของระยะทางสามารถกระทำได้โดยปรับแยกส่วนของขั้วแอโนดออกจากกันเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆเรียงต่อกันดังรูปที่ 15



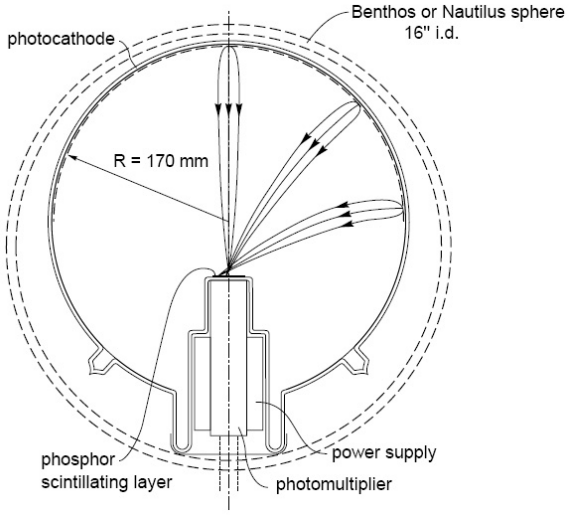
รูปที่ 15 ตัววตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก โดยปรับแยกส่วนของขั้วแอโนดออกจากกันเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆ

ข้อจำกัดของตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก Microchannel plat

- ข้อจำกัดในอัตราการนับ และความเป็นเชิงเส้นในการการวัดสัญญาณพลัทซ์ เนื่องจากการทำงานที่มีข้อจำกัดของกระแสเฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทต่ำมากเพียง $\mu A/cm^2$ และเวลาของการกลับคืนต่อช่องเพิ่มมากขึ้น
- ข้อจำกัดของการอัดประจุต่อช่อง จากสัญญาณพลัทซ์ เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้ อันดับแรกคือ อัตราการขยายมีประมาณ 10^6 และอันดับสองคือ กระแสที่ได้ถูกดูดกลืนต่อสัญญาณพลัทซ์ เนื่องจากรูปร่างของสัญญาณพลัทซ์ และความยาว โดยในข้อจำกัดนี้การอัดประจุที่ขั้วแอโนดจะเป็นเชิงเส้นเพียง 5×10^{-10} ถึง $5\times10^{-9}\ \mathrm{C/cm^2}$
- ข้อจำกัดของอายุการใช้งาน เนื่องจากการที่พื้นที่ผิวโดยส่วนใหญ่ของแผ่นตะแกรงท่อโลหะขนาดเล็ก แกสภายในหัววัดถูกนำออกได้ยากในเวลาที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นด้วยเหตุที่มีการยิงประจุอิเล็กตรอนจะก่อให้เกิดประจุอิออนที่ยิงไปที่แผ่นขั้วคาโทด และความไวลดลงอย่างรวดเร็ว

(4) ตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบชาญฉลาด

ตัวตรวจจับแสงทวีคูณชนิดนี้ได้ถูกออกแบบร่วมกันโดยใช้หลอดสูญญากาศที่มีส่วนขยายสัญญาณแสง และ ตัวตรวจจับแสงทวีคูณขนาดเล็กเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 16 โดยที่กระแสที่เกิดขึ้นจากแสงที่ตกกระทบจะถูกเร่งด้วยส่วนภาคขยายจากแรงดันสูงกะแสตรงขนาด 20 ถึง 40 กิโลโวลต์(kV) ซึ่งอิเล็กตรอนจะวิ่งด้วยความเร็วสูงตรงไปตกกระทบกับสารเรืองแสง ด้วยการปรับโฟกัสสามารถกระทำได้อย่างเป็นเชิงเส้นจากตัวตรวจจับแสงทวีคูณขนาดเล็ก โดยในส่วนแรกอัตรากาขยายจะอยู่ที่ระดับ 30 ถึง 50 เท่าเพื่อให้สัญญาณมีวามคมชัด ลักษณะโครงสร้างหัววัดประเภทนี้จะทนต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็กโลก และเวลาของกรส่งผ่านมีช่วงเวลาที่แตกต่างกันน้อยมากในระดับต่ำกว่า นาโนวินาที(ns) อกทั้งมีความสามารถในการตรวจจับสัญญาณที่ระดับต่ำๆจากอิเล็กตรอนหลายตัวได้ดี



รูปที่ 16 ตัวตรวจจับแสงทวีคูณแบบชาญฉลาด ที่โครงสร้างเป็นครอบแก้วทรงกลมเพื่อใช้ในการตรวจจับอนุภาค นิวทริโน และมิวออน